Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems

Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

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

Zahra Abdollahi *[1], **Ghobad Rostamizad**[2], **Parviz Abdinezhad**[3]

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

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

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.

ABSTRACT

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.

Citation: Abdollahi, Z., Rostamizad, Gh., & Abdinezhad, P. (2024). Assessment of groundwater quality and the controlling factors (Case study: Zanjan Aquifer). *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(4), 31-50.

DOR:

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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems

Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

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

Zahra Abdollahi [*1], Ghobad Rostamizad[2], Parviz Abdinezhad[3]

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+, Mg+2, and Ca+2) 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 Ca+ and HCO_3^{2-},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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

varied in the sequence as, HCO_3^{2-}<SO42-<Cl-<CO32-, while in contrast, the sequence of cations in the groundwater was Na+<Ca2+< Mg2+<K+. Moreover, based on the Piper diagram, the groundwater was mostly determined to be calcium-bicarbonate-type water. The plot of the Schoellar diagram confirmed that the major cations were Na+ and Ca2+ 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 finantial support and the Zanjan Regional Water Authority for their coopration for providing the data.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

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

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: ۲۴ تیر ۱۴۰۳
بازنگری: ۲۲ مرداد ۱۴۰۳
پذیرش: ۰۲ شهریور ۱۴۰۳
انتشار برخط: ۱۱ دی ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
تحلیل مؤلفه‌های اصلی، دشت زنجان، کیفیت آب زیرزمینی، نمودار پایپر.

چکیده

رشد روز افزون جمعیت و ارتقا مستمر سطح استانداردهای کیفی، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری در جهت برخورداری از آب‌های سالم را به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی کشور مطرح می‌سازد. همگام با تلاش در جهت استفاده بهینه از منابع آب، نیاز به بررسی عوامل کنترل‌کننده کیفیت منابع آب جهت ارائه برنامه‌های کارآمد مدیریتی بیش از گذشته احساس می‌شود. 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. لذا، هدف از مطالعه حاضر، بررسی وضعیت کیفی آبخوان دشت زنجان و تغییرات مکانی و زمانی آن و هم‌چنین شناخت و آگاهی از عوامل اصلی کنترل‌کننده 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 به‌ترتیب کانیون و آنیون 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، عمده چاه‌ها در فصل خشک با عامل دوم و پارامترهای pH، SAR و SSP همبستگی قوی‌تری نشان دادند که حاکی از افزایش غلظت شوری در آب‌های زیرزمینی در ماه‌های کم باران بود. نتیجه این مطالعه می‌تواند مبنایی برای تحقیقات آینده و به‌طور متمرکز در شهرک‌های صنعتی و مدیریت پایدار در راستای کاهش مشکلات محیط زیستی در حوضه مورد مطالعه قرار گیرد.

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

© نویسندگان

* **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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

مقدمه

با توسعه جمعیت، تقاضا برای برداشت آب زیرزمینی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، به‌سرعت 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 تغذیه 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 به‌عنوان 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 آلاینده‌هایی هم‌چون فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و آلاینده‌های آلی و معدنی در آب، سلامت انسان را به‌طور جدی تهدید نموده و باعث بروز بیماری‌هایی مانند فشارخون، هیپوکلسمی، سنگ کلیه، ناراحتی گوارشی-کلیه، کلسیفکاسیون شریانی و ترومبوز می‌شود. هم‌چنین مقادیر بالای نیتروژن در آب نیز به‌عنوان یک تهدید بالقوه برای کیفیت آب آشامیدنی به اثبات رسیده است (Ali et al., 2024). در اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد[1](SDGs) به‌طور مشخص به نقش حیاتی منابع آب زیرزمینی در توسعه پایدار، حفظ تعادل‌های اکولوژیکی و آب و هوایی پرداخته شده است (Nayak et al., 2023). به‌علاوه، کنترل کیفیت آب یکی از موارد ضروری و مهم در برنامه‌ریزی آبیاری اراضی کشاورزی بوده و توسعه پایدار کشاورزی بدون لحاظ کیفیت شیمیایی آب غیر ممکن است. با توجه به ارتباط تنگاتنگ کیفیت سفره آب زیرزمینی با سلامت جمعیت، توسعه اقتصادی و رفاه اجتماعی، ارزیابی کیفیت سفره‌های آب زیرزمینی و تغییرات مکانی و زمانی آن برای مدیریت و برداشت پایدار از این منابع آبی تحت شرایط تغییر اقلیم و فشارهای محیطزیستی حاکم، باید به‌طور ویژه مورد توجه قرار گیرد (Tlili-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 مترمکعب 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 به‌لحاظ کمی و هم به‌لحاظ 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 جغرافیایی نزولات جوی، در معرض بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی و به‌تبع آن افت تراز سفره، کاهش کیفیت آب، فرونشست 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 مکانی 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 پایداری سفره زیرزمینی به‌عنوان اصلی‌ترین منبع آبی ایمن و پایدار 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 به‌موقع کاهشی را فراهم می‌کند.

استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی[2] (PCA) به‌منظور 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 مورد توجه قرار گرفته است. هم‌چنین از آن به‌عنوان 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).

[1]-Sustainable Development Goals
[2]-Principal Component Analysis

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

مروری بر سوابق مطالعاتی (Mehdi et al., 2023; Pashaeifar et al., 2023; Feizizadeh et al., 2022; Ma et al., 2016; Ali et al., 2024; Gautam et al., 2024). حاکی از کاربرد گسترده این روش در تفسیر داده‌های فیزیکوشیمیایی است. تکنیک PCA به‌منظور ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی Uttar Pradesh هند مورد استفاده قرار گرفت که به‌ترتیب 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 به‌لحاظ 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 گرگان‌رود از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌ای استفاده کردند. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی تا حد نسبتاً زیاد با نتایج تحلیل خوشه‌ای در یک راستا بود. فضابخش و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی و تحلیل کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان دشت اردبیل پرداختند. تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت مذکور تحت‌تأثیر 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 المان‌آباد (۱۴۰۲) در بررسی هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، نفوذ آب‌شور دریاچه‌ی 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 به‌عنوان فرآیندهای کنترل‌کننده اولیه و تأثیر فعالیت‌های انسانی شامل نفوذ هرزآب‌های خانگی، کشاورزی و صنعتی به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های ثانویه بر شیمی آب‌های زیرزمینی است. هم‌چنین مرور منابع نشان داد که مطالعات جامعی در خصوص تحلیل آلودگی 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 همبستگی 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.

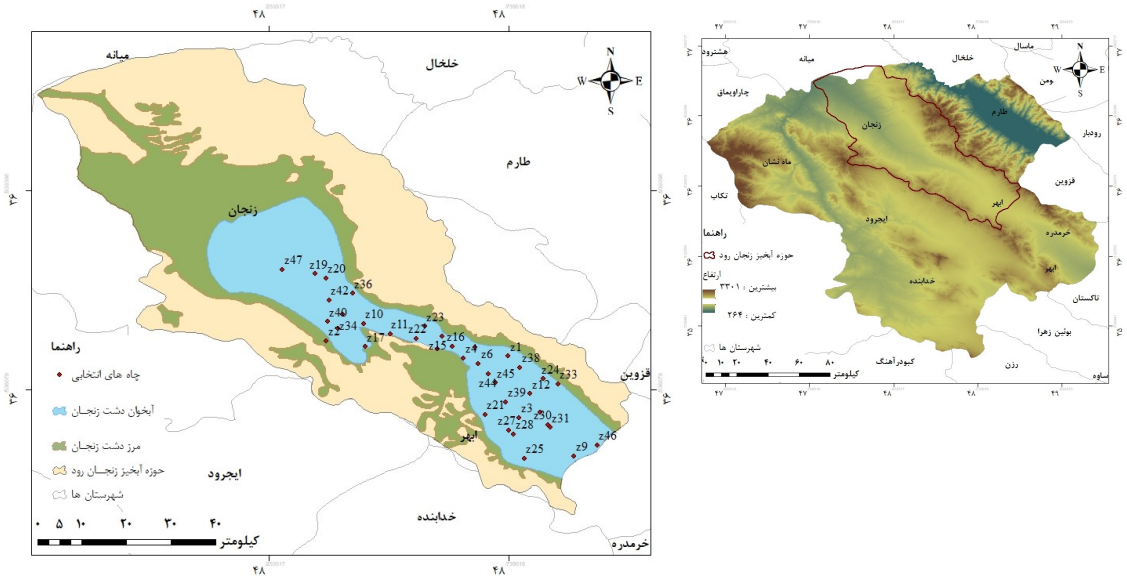
مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

حوزه‌ی آبخیز زنجان‌رود با مساحت ۴۶۶۴ کیلومترمربع در شمال شرقی- جنوب‌شرقی استان زنجان و در محدوده‌ی جغرافیایی با عرض ′۱۵ °۳۶ شمالی 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 زنجان‌رود در شکل (۱) نشان داده شده است. منطقه‌ی مورد مطالعه دارای اقلیم مدیترانه‌ای بوده و به‌دلیل 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، به‌طور 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 بیست‌ساله آب پایه و دبی اوج جریان در ایستگاه هیدرومتری سرچم (واقع در طول جغرافیایی ′۵۳ °۴۷ شرقی و عرض جغرافیایی ′۷ °۳۷ شمالی) به‌ترتیب ۱/۳۶ و ۱۷۱ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان زنجان، ۱۴۰۲).

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

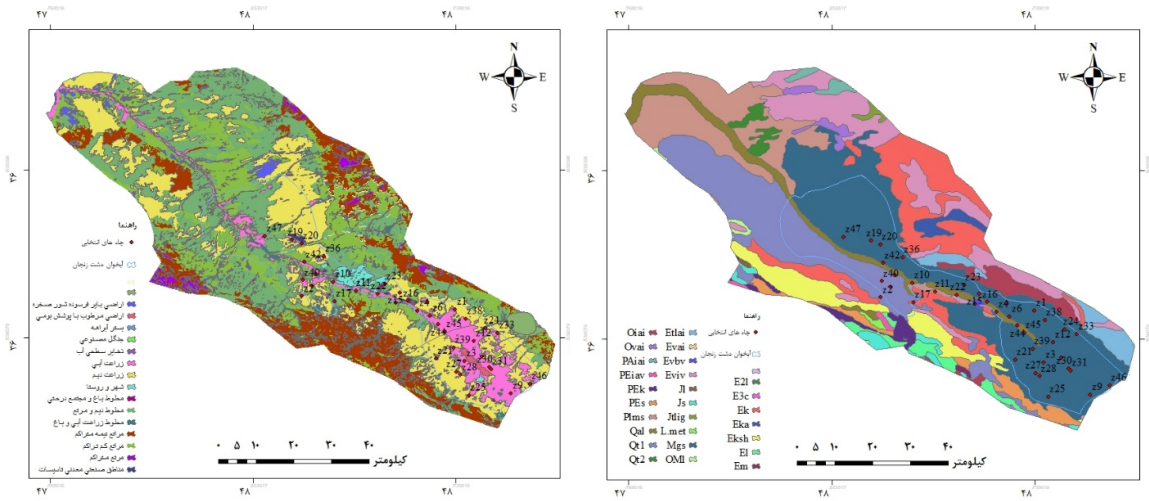


شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش چاه‌های مطالعاتی

Figure 1- Location of the study area and the distribution of the study wells

زمین‌شناسی منطقه

از نگاه زمین‌شناسی ساختمانی و پهنه‌های ساختاری رسوبی، بخش بالادست رودخانه قسمت کوچکی از دامنه‌های جنوبی البرز باختری است. بخش اعظم رخنمون‌های حوزه‌ی آبخیز، مجموعه‌های پیروکلاستیک ائوسن (سازند کرج) بوده و لیتولوژی غالب ردیف‌های آذرین آواری، همانند سایر نواحی البرز، از نوع توف‌های سبز به‌همراه میان لایه‌های شیلی و آهکی است. به‌جز ردیف‌های آذرین آواری، در این مجموعه همراهانی از گدازه‌های آندزیتی، آندزی بازالتی، ریوداسیت پورفیری و غیر پورفیری وجود دارد که هم به‌صورت زیردریایی و هم در سطح خشکی تشکیل شده‌اند (آقانباتی، ۱۳۸۳). در محدوده غربی دشت توالی‌های سنگ آهک نازک تا ضخیم لایه از سازند قم رخنمون 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، کنگلومرایی و ماسه‌سنگی موجود است. این نهشته‌ها عدسی‌هایی از گچ داشته و به‌طور دِگرشیب پیروکلاستیک‌های ائوسن را می‌پوشانند. هم‌چنین در امتداد پایین‌دست رودخانه فرو نشست‌های تکتونیکی دشت کم‌عرض زنجان–ابهر با پوشش آبرفتی کواترنری پوشیده شده است (Afrasiabian et al., 2021). هم‌چنین نقشه زمین شناسی و کاربری اراضی حوزه آبخیز زنجان‌رود با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ در شکل (۲) ارائه شده است.



[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

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

وضعیت آبخوان

دشت زنجان حالت گرابنی داشته و به‌صورت 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 به‌خصوص ارتباط این دشت را با دشت ابهر، سهرین 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 به‌طور سالانه در حدود ۰/۹۵ 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، ۴۷ چاه مشاهداتی با پراکنش مناسب در کل دشت مذکور انتخاب شده و اطلاعات ۱۴ مشخصه کیفی آب شامل SO_4^{2-}، Cl^-، HCO_3^{2-}، CO_3^{2-}، Mg^{2+}، Ca^{2+}، K^+، Na^+، pH، EC، TDS، سختی کل، نسبت جذب سدیم (SAR)[1] و درصد سدیم محلول (SSP)[2] با دوره آماری مشترک ۱۸ ساله (۱۳۸۲–۱۴۰۰) تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. موقعیت و پراکنش چاه‌های انتخابی در شکل (۱) ارائه شده است. به‌منظور بررسی اثرات فصلی روی متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی، کل دوره مشاهداتی با توجه به مقادیر متوسط بارش ۱۵ سال اخیر ثبت‌شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی محدوده حوزه آبخیز زنجان‌رود، به دو فصل خشک و بارانی تقسیم‌بندی شد. جهت تجزیه و تحلیل آماری سری داده‌های مورد بررسی، در گام اول از آزمون شاپیروویلک برای برازش توزیع نرمال مشخصه های کیفی آب زیرزمینی استفاده شد (Papadaki et al., 2023; Rodrigues de Souza et al., 2023).

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 صحت‌سنجی قرار گرفت. در این مطالعه خطای قابل‌قبول $<5\pm$ 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 رده‌بندی 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 (Mg^{2+}، Ca^{2+}، Na^+)، سه آنیون اصلی (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، قابل‌قبول، متوسط و دارای مزه، نامناسب، کاملاً نامطبوع و غیر قابل شرب قابل تقسیم است (Schöller, 1962).

[1] Sodium Adsorption Ratio
[2] Soluble Sodium Percentage

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

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 حداکثر مقدار اطلاعات و تجسم داده‌های چند بعدی را فراهم می‌سازد (کلانتری 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 حداکثر واریانس موجود در داده‌ها که توسط PC_1 محاسبه نشده است، را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های اصلی دیگر نیز به همین نحو انتخاب می‌شوند تا حداکثر واریانس موجود در داده‌ها را توجیه نمایند. عمود بودن مؤلفه‌های اصلی بر هم به‌معنای 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 خطا اشاره دارد.

$$X=SL+E \quad (۱)$$

رسم بهترین خط برازش شده از میان داده‌های اولیه در سیستم مختصات فرضی، جهت حداکثر واریانس تصویرسازی‌شده روی خط را نشان می‌دهد. این خط همان مؤلفه اصلی است که ترکیب خطی از تمام متغیرهای اولیه بوده و می‌توان آن را به‌صورت 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، به‌ترتیب واریانس‌های کم‌تری که در مؤلفه‌های اصلی قبلی لحاظ نشده، را نشان می‌دهند.

$$PC_n=a_{1n}X_1+a_{2n}X_2+\ldots..+a_{pn}X_p \quad (۲)$$

در این مطالعه بارهای عاملی برابر و یا بیش‌تر از ۰/۴ 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.

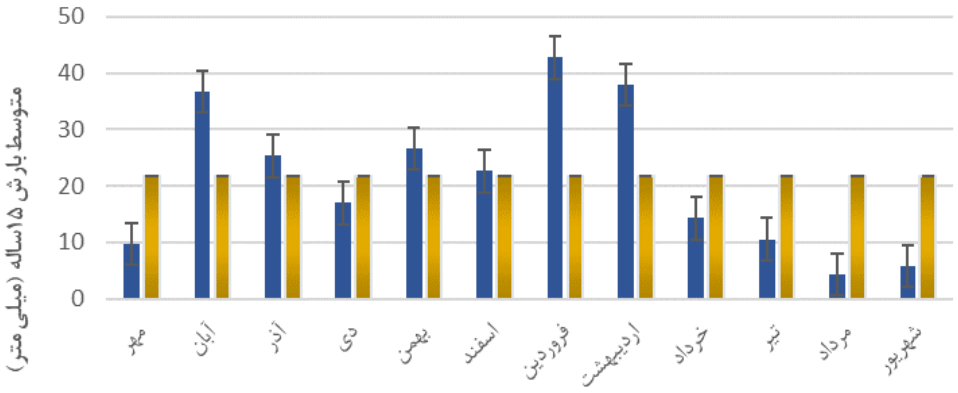
نتایج و بحث

با توجه به‌شکل (۳)، در حوزه آبخیز زنجان‌رود متوسط بارش ماهانه ۱۵ سال اخیر (۱۳۹۷-۱۳۸۲) طی ماه‌های آبان، آذر، بهمن، اسفند، فرودین و اردیبهشت از متوسط بارش سالانه ۱۵ ساله بیش‌تر بود. بنابراین ماه‌های مذکور در رده بارانی و باقی ماه‌ها در فصل خشک طبقه‌بندی شدند (Abdollahi et al., 2019). جدول (۱) مقادیر متوسط، کمینه، بیشینه و انحراف از استاندارد متغیرهای فیزیکوشیمیایی 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 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ برای کاتیون‌ها و $HCO_3^{2-} > SO_4^{2-} > Cl^- > CO_3^{2-}$ برای آنیون‌ها است. لذا، یون‌های سدیم و بی‌کربنات به‌ترتیب کاتیون و آنیون غالب در دشت مذکور هستند. مقادیر کل جامدات محلول (TDS) در آبخوان دشت زنجان به‌ترتیب بین ۱۳۶/۸۹۶ تا ۱۶۳۹/۰۷۸ میلی‌گرم در لیتر با میانگین و انحراف از استاندارد به‌ترتیب ۵۲۳/۷۷۴ و ۲۹۵/۷۸۷ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است. مقدار متوسط و بیشینه هدایت الکتریکی به‌ترتیب برابر ۸۱۱/۱۰۶ و ۲۵۳۹/۵۵۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در آبخوان دشت زنجان بوده است. لذا با توجه به جدول (۱)، عمده چاه‌های محدوده مطالعاتی به‌لحاظ غلظت املاح و هدایت الکتریکی برای مصارف شرب مناسب نیست. درحالی‌که با آگاهی از حد تحمل محصولات زراعی در مقابل غلظت املاح و شوری و اقدامات مدیریتی مناسب برای مصارف آبیاری و کشاورزی قابل استفاده است. جلالیان و همکاران (۱۳۹۹) نیز در مطالعه خود بر روی دشت زنجان، آب زیرزمینی این دشت را به‌لحاظ مقادیر هدایت الکتریکی برای مصارف کشاورزی بدون مشکل گزارش نمودند. این درحالی 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 ۱۳/۳۵۲ تا ۱۷۳/۹۶۹ میلی‌گرم در لیتر در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت زنجان بوده است. هم‌چنین مقادیر منیزیوم بین ۵/۷۸۶ تا ۱۲۳/۷۶۲ میلی‌گرم در لیتر در نمونه‌های آب زیرزمینی گزارش شد. غلظت پتاسیم نیز بین ۰/۵۳۸ و ۵/۷۳۵ میلی‌گرم در لیتر بود. مقادیر سولفات در دامنه بین ۱۳/۶۰۹ تا ۵۵۳/۷۳۷ میلی‌گرم در لیتر در آبخوان متغیر بود. با توجه به‌حد مجاز غلظت سولفات برای مصارف آشامیدن بر اساس استاندارد WHO، در برخی از چاه‌ها غلظت سولفات از حد مجاز بالاتر بوده است. Celestino و همکاران (۲۰۱۹) افزایش غلظت سولفات در آب‌های زیرزمینی را ناشی از انحلال مواد معدنی و استفاده از پساب برای آبیاری دانسته‌اند (Marín Celestino et al., 2019). دامنه تغییرات یون کلر نیز بین ۸/۰۶۷ تا ۳۵۵/۹۴۰ 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 آن‌جایی‌که تجمع بالای یون کلر در پساب‌ها و

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

هرزآب‌های کشاورزی گزارش شده است و با توجه به تجمع اراضی زراعی در اطراف رودخانه زنجان‌رود 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 زنجان‌رود

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[1] Standard	Irrigation limit[3]
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

[1] (Ali et al., 2024; Organization, 2002)

[2] میکروزیمنس بر سانتی‌متر

[3] (Drechsel et al., 2023)

همبستگی بین متغیرهای فیزیکوشیمیایی

نتایج به‌دست آمده از آزمون شاپیروویلک نشان داد که متغیرهای فیزیکوشیمیایی مورد بررسی در این تحقیق به‌جز pH از توزیع نرمال تبعیت 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 > ۰/۷ بیان‌گر همبستگی بالا هستند. هم‌چنین مقادیر ۰/۵ < r < ۰/۷ همبستگی متوسط را نشان می‌دهند (El-Rawy et al., 2023). در آبخوان دشت زنجان یون SO_4^{2-} با TDS و EC همبستگی بالایی را نشان داد (r = ۰/۹۵). همبستگی مثبت بالای ۰/۷۶ بین K^+ و SO_4^{2-} در آبخوان دشت زنجان مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده تبادل پتاسیم و نمک سولفات در فرآیند هوازدگی سنگ و استفاده مکرر از پساب در مصارف آبیاری باشد. Abou Zakhem و همکاران (۲۰۱۷) نیز همبستگی مثبت ۰/۷۷ را بین K^+ و SO_4^{2-} در آبخوان دشت Jezireh در سوریه گزارش نمودند. El-Rawy و همکاران

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

(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 پتاسیم در این آبخوان منشأ طبیعی و انسانی دارد. از یک سو این یون در اثر هوازدگی و انحلال سنگ‌های کربناته و فلدسپات پتاسیم‌دار در آبخوان آزاد شده است. از طرف دیگر استفاده از کودهای شیمیایی و نفوذ فاضلاب به داخل آبخوان نیز می‌تواند منابع حضور پتاسیم در نمونه‌های آب زیرزمینی باشد (Chandran et al., 2017; Zghibi et al., 2014). پتاسیم یک فلز قلیایی 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 پتاسیم در آب زیرزمینی باشد (Nematollahi et al., 2018). بیشینه مجاز تعیین شده برای غلظت پتاسیم در آب آشامیدنی در استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است. تغییرات 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 این‌که با افزایش سن کلیه‌ها کم‌تر قادر به حذف پتاسیم از خون خواهند بود، باعث بروز مشکلاتی در بدن می‌شود. همبستگی مثبت متوسطی (r = ۰/۴۲) بین Ca^{+} و HCO_3^{2-} 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. درحالی‌که Abou Zakhem و همکاران (۲۰۱۷) همبستگی منفی ۰/۵۶ را بین Ca^{+} و HCO_3^{2-} گزارش نمودند. کلسیم به‌طور طبیعی در آب وجود دارد. یکی از دلایل اصلی فراوانی کلسیم در نمونه‌هایی آب وجود طبیعی آن در ساختار لیتولوژی منطقه است که از طریق هوازدگی سنگ به‌ویژه سنگ آهک و شست شوی خاک وارد منابع آبی می‌شود. کلسیم اکسید (سنگ آهک) که لیتولوژی غالب منطقه است، به‌طور 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 > ۰/۶) حاکی از انحلال نمک‌ها و مینرال‌ها در آب زیرزمینی است (Chandran et al., 2017; Li et al., 2016) و سهم قابل توجه این یون‌ها را در میزان شوری در آبخوان مورد مطالعه نشان می‌دهد. وجود مقادیر قابل ملاحظه سدیم در آبخوان مذکور یکی از عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب محسوب می‌شود. میزان این پارامتر به‌طور مستقیم بر روی نسبت جذب سدیم و درصد سدیم محلول برای کشاورزی تأثیر دارد. هر چه مقدار آن بیش‌تر باشد نسبت جذب سدیم و درصد سدیم محلول نیز بیش‌تر می‌شود (r > ۰/۶). سرچشمه‌ی سدیم در منابع آبی ناشی از انحلال‌پذیری مواد معدنی سدیم‌دار و منابع انسانی از جمله صنایع حیوانات و ضایعات خانگی است. بیشینه مجاز تعیین شده توسط WHO برای سدیم در آب آشامیدنی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است (Organization, 2002). ازدیاد 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

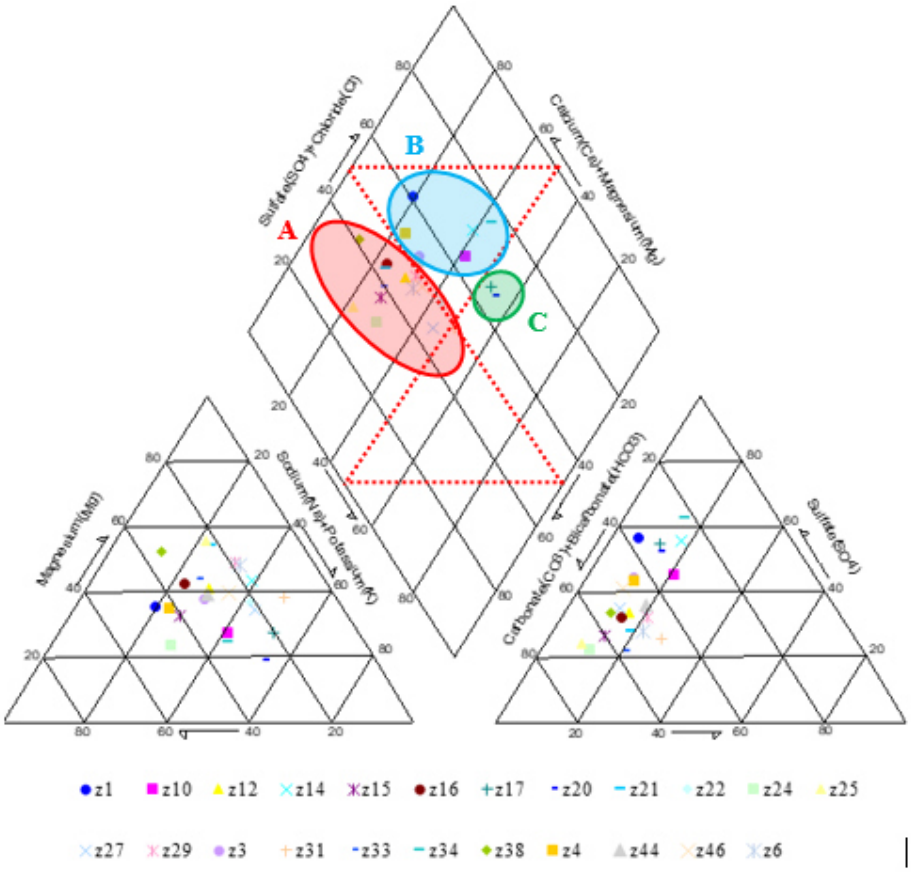
Variable	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^{2-}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+	Na^+	pH	TDS	EC	TH	SAR	SSP
SO42-	**1**												
Cl-	**0.81**	**1**											
HCO32-	**0.53**	**0.54**	**1**										
Mg2+	**0.66**	**0.73**	**0.81**	**1**									
Ca2+	**0.84**	**0.65**	**0.42**	**0.45**	**1**								
K+	**0.76**	**0.71**	**0.52**	**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.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

بر اساس نمونه‌های چاه‌های انتخابی دشت زنجان و با توجه به نتایج ارائه شده در دیاگرام پایپر (شکل ۴)، سه تیپ و رخساره برای نمونه های آب زیرزمینی مورد بررسی شناسایی شد. عمده چاه‌ها 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 زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، در ساختار زمین‌شناسی آبخوان دشت زنجان میان‌لایه‌های آهکی پراکنش قابل توجهی دارند. از آن‌جایی‌که با کاهش دما، حلالیت CO_2 در آب افزایش می‌یابد، 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 ($CaCO_3+CO_2+H_2O \leftrightarrow Ca^{2+}+2HCO_3$) افزایش می‌یابد. از این رو، برهمکنش بین آب اشباع‌شده با دی‌اکسید کربن و سنگ آهک، احتمال حل شدن کلسیم و بی‌کربنات بیش‌تر را در آبخوان مورد مطالعه افزایش می‌دهد. مابقی چاه‌ها به‌ترتیب در زون B، تیپ کلیسیم سولفاته ($Ca\ SO_4$) با شوری متوسط و زون C، تیپ سدیم کلراید ($Na\ Cl$) طبقه‌بندی می‌شوند. هم‌چنین نتایج حاصل از نمودار ویلکاکس نشان می‌دهد که ۶۴/۲۹ درصد چاه‌ها 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 ٤- نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از آبخوان دشت زنجان

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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

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 عمده آبخوان دشت زنجان دارای آب‌های زیرزمینی سخت است. تنها ۴/۳۴ درصد آن در کلاس کاملاً سخت قرار می‌گیرند (جدول ۳). خلاصه نتایج به‌دست آمده از کیفیت نمونه‌های برداشت شده دشت زنجان از نظر مصارف آشامیدن به تفکیک متغیرهای کیفی آب‌بر اساس روش طبقه‌بندی شولر نیز در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ٤- 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-Value <۰/۰۵ 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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

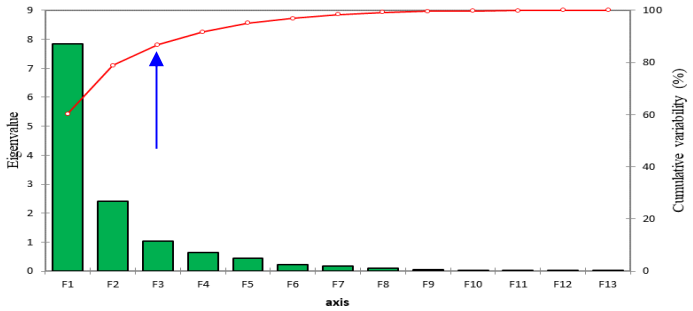
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

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

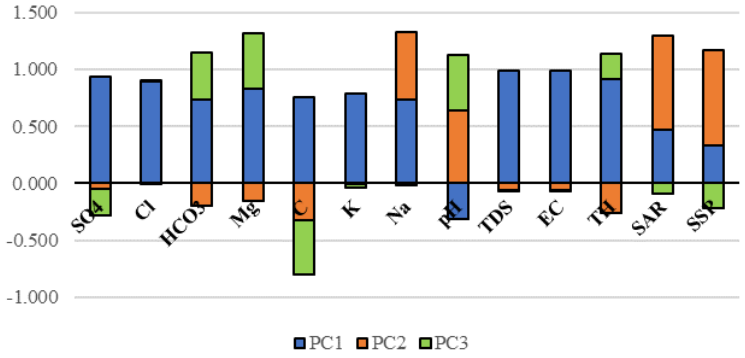
Chi-square (Observed value)	1964.172
Chi-square (Critical value)	113.145
Degrees of Freedom (DF)	90
p-value	< 0.0001
alpha	0.05



شکل ۵- نمودار سنگریزه‌ای مقدار واریانس تبیین‌شده و مقادیر ویژه ۱۳ مؤلفه استخراج‌شده 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+}، Na^+، Ca^{2+}، K^+، TDS، EC و TH در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت زنجان سهم بیش‌تری در توزیع عامل اول (PC_1=۶۰/۲۷ ٪) داشته‌اند. هم‌چنین پارامترهای pH، SAR و SSP در عامل دوم (PC_2 =۱۸/۵۷ ٪) بهتر تبیین شده‌اند. شکل (۷) پراکنش متغیرهای کیفی را نسبت به دو عامل اصلی اول و دوم نشان می‌دهد.

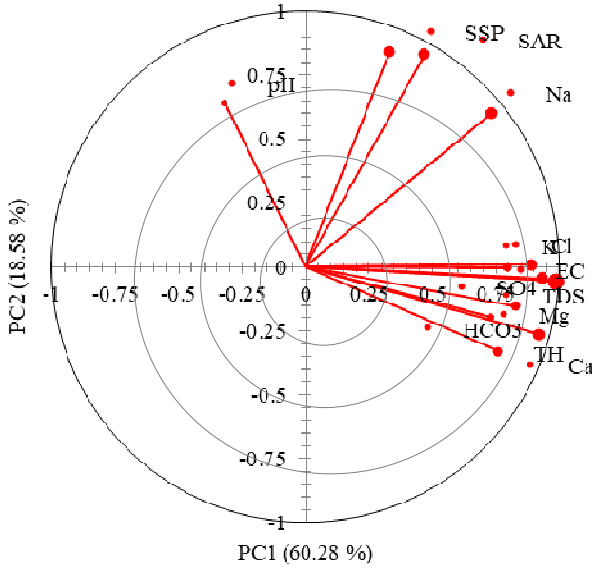


شکل ٦- بار عامل‌های اصلی در آبخوان دشت زنجان طی دوره مطالعاتی ۱۸ ساله (۱۴۰۰-۱۳۸۲)

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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]



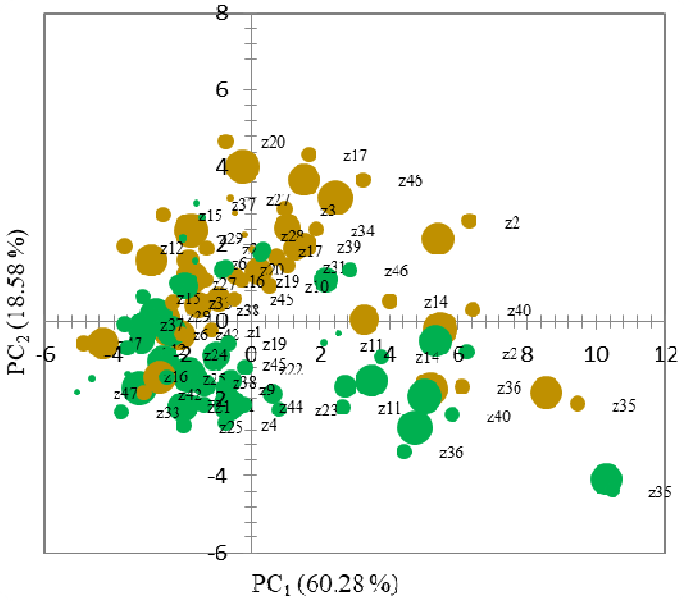
شکل ۷- بار عاملی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی در آبخوان دشت زنجان نسبت به دو عامل اصلی PC_1 و PC_2 (۷۸/۸۵ درصد)

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

علاوه‌بر آن، پراکنش نمرات عاملی مربوط به چاه‌های انتخابی در آبخوان دشت زنجان در دو فصل خشک و بارانی نیز نشان داده شده است. اندازه‌ی دوایر در چاه‌های مشاهداتی بر اساس مقادیر مربع کسینوس (cos^2) آن‌ها نسبت به PC_1 و PC_2 متغیر بوده و دوایر بزرگ‌تر گویای cos^2 بیش‌تر و بنابراین ارتباط قوی‌تر مشاهده‌ها و عوامل اصلی با یک‌دیگر است. در این مطالعه مشاهدات با $cos^2 > 0.4$ به‌دلیل 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 PC_1 و PC_2 در دو گروه قابل بررسی هستند. گروه دوم که ارتباط مثبت با PC_1 دارند و بیش‌تر با متغیرهای SO_4^{2-}، Cl^-، HCO_3^{2-}، Mg^{2+}، Na^+، Ca^{2+}، K^+، TDS، EC و TH تعریف می‌شوند. درحالی‌که گروه دوم ارتباط مثبت با PC_2 دارند. این گروه بیش‌تر با متغیرهای pH، SAR و SSP و کم‌تر با متغیرهای SO_4^{2-}، Cl^-، HCO_3^{2-}، Mg^{2+}، Na^+، Ca^{2+}، K^+، TDS، EC و TH مشخص می‌شوند و دارای تیپ NaCl هستند. نتایج هم‌چنین نشان داد که چاه‌های z4، z10، z17، z20 و z25 در هر دو فصل خشک و بارانی با PC_2 و به‌عبارت دیگر با متغیرهای pH، SAR و SSP ارتباط قوی نشان دادند. این درحالی است که با توجه به نتایج رخساره چاه‌های مشاهداتی (شکل ۴)، چاه‌های z17 و z20 دارای تیپ NaCl بودند که تأییدی بر نتایج به‌دست 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 دگرسان‌شده که با نهشته‌های سیلابی 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 شوری 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 تشدید 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 به‌دلیل استفاده طولانی‌مدت از پساب تصفیه‌نشده در مصارف آبیاری اتفاق بیفتد. Celestino و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعات خود، مقادیر بالای سدیم را در پساب استفاده شده برای مصارف کشاورزی گزارش نمودند.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]



شکل ۸- نمرات عاملی چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان دشت زنجان نسبت به دو عامل اصلی PC_1 و PC_2 (۷۸/۸۵ درصد)

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 (۱۳۸۲–۱۴۰۰) 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 به‌ترتیب کاتیون و آنیون غالب در آبخوان دشت زنجان بودند. مقادیر بالای بی‌کربنات در منطقه مورد مطالعه را می‌توان با انحلال سازنده‌ای کربناته در ارتباط دانست. میانگین کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی به‌ترتیب ۵۲۳/۷۷۴ میلی‌گرم در لیتر و ۸۱۱/۱۰۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود که با توجه به‌حد مجاز اعلام شده توسط FAO، برای مصارف آبیاری محدودیت ایجاد نکرده ولی عمده چاه‌های محدوده مطالعاتی به‌لحاظ غلظت املاح 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 عمدتاً می‌تواند به‌دلیل برهم‌کنش سنگ و آب زیرزمینی باشد. لذا، توصیه می‌شود که آب چاه‌های دشت زنجان قبل از استفاده به‌عنوان آب آشامیدنی به‌درستی تصفیه شود. همبستگی مثبت بالا بین K^+ و SO_4^{2-} در آبخوان دشت زنجان مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده تبادل پتاسیم و نمک سولفات در فرآیند هوازدگی سنگ و استفاده مکرر از پساب در مصارف آبیاری باشد. همبستگی مثبت بین Ca^+ و HCO_3^{2-} نیز حاکی از انحلال کلسیت در منطقه مورد مطالعه بود. بر اساس دیاگرام پایپر عمده آبخوان دشت زنجان در تیپ کلسیم بی‌کربناته قرار گرفت. از نظر میزان سختی کل نیز عمده 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 SO_4^{2-}، Cl^-، HCO_3^{2-}، Mg^{2+}، Na^+، Ca^{2+}، K^+، TDS، EC و TH در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت زنجان سهم بیش‌تری در توزیع عامل اول داشته و پارامترهای pH، SAR و SSP در عامل دوم بهتر تبیین شده‌اند. با توجه به نمرات عاملی چاه‌های مورد مطالعه، عمده چاه‌ها در فصل خشک با 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 آن‌جایی‌که برداشت بی‌رویه از آبخوان و استفاده از پساب‌های صنعتی و زراعی به‌طور مستقیم بر کیفیت آب‌های زیرزمینی اثرگذار است، تصفیه بهینه پساب‌های برگشتی به بخش کشاورزی، آگاهی‌بخشی در خصوص استفاده آگاهانه و پایدار از منابع متناسب با ظرفیت آبخوان، کشت گونه‌های متناسب با اقلیم و ظرفیت منطقه و آموزش و ترویج در جهت جلب و مشارکت هر چه بیش‌تر 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 روستایی برای ترویج رفتارهای حفاظتی هم‌چون به‌کارگیری فناوری‌های مدرن آبیاری تحت فشار (قطره‌ای

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

و بارانی)، پوشش‌دار کردن کانال‌های انتقال آب از منبع تا مزرعه، کشت ارقام بذور با نیازهای آبی کم، ایجاد استخر یا حوضچه‌های آبی برای جمع‌آوری هرزآب‌ها یا ذخیره‌ی آبی و نشر ارزش‌های اخلاقی، می‌توان حفاظت از منابع آب را در میان کشاورزان گسترش داد. از طرفی، نظارت منظم بر کیفیت آب زیرزمینی جهت شناسایی آلاینده‌های نوظهور و ارزیابی اثربخشی اقدامات مدیریتی با هدف بهبود کیفیت آب در دشت مذکور توصیه می‌شود. استفاده از رویکردها و فناوری‌های جدید مثل سنجش از دور برای نظارت بر کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز می‌تواند بینش ارزشمندی را در مورد تغییرات و روندهای فضایی ارائه دهند. با استمرار مطالعات و استفاده از فناوری‌های نوظهور و سرمایه‌گذاری در برنامه‌های نظارتی قوی، می‌توانیم منابع ارزشمند آب زیرزمینی خود را برای نسل‌های آینده بهتر محافظت و مدیریت کنیم.

ملاحظات اخلاقی

دسترسی به داده‌ها: داده‌ها 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 نویسندگان: زهرا عبداللهی، قباد رستمی‌زاد و پرویز عبدی‌نژاد: بخش‌های مختلف مقاله توسط نام‌بردگان انجام و نگاشته شده است.

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

سپاس‌گزاری: نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور جهت حمایت مالی طرح تحقیقاتی حاضر اعلام می‌دارند. هم‌چنین از حسن همکاری صمیمانه سازمان آب منطقه‌ای استان زنجان و جناب آقای مهندس خالقی در تهیه و کنترل داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

۱. اعظمی، جابر، کیانی‌مهر، ناصر، زمانی، عباسعلی، عبدالهی، زهرا، زارعین، محمد و جعفری، ناصر. (۱۳۹۸). ارزیابی سلامت کیفی آب رودخانه قزل‌اوزن در محدوده استان زنجان با استفاده از شاخص‌های NSFWQI، IRWQISC و Liou. *مهندسی بهداشت محیط*، ۶(۴)، ۳۸۵-۴۰۰. **doi:10.29252/jehe.6.4.385**

۲. آقانباتی، سید علی. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور، ۶۴۰ صفحه.

۳. پاشایی‌فر، محمد رضا، دهقان‌زاده، رضا، رمضانی، محمد ابراهیم، رفیعیان، امید، و نجایی، آرزو. (۱۴۰۲). ارزیابی وضعیت، فرآیندها و منابع ژئوشیمیایی آبخوان با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی، روش‌های گرافیکی و تحلیل‌های آماری چند متغیره- مطالعه موردی: دشت شبستر. *مهندسی منابع آب*، ۱۶(۵۶)، ۱۵-۳۰. **doi:10.30495/wej.2023.28012.2315**

۴. پاک، زهرا، و محسنی موحد، سید اسداله. (۱۳۹۶). اثرات اضافه برداشت و خشکسالی‌های اخیر بر کیفیت و کمیت آبخوان دشت ساوه (یادداشت فنی). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۳(۴)، ۱۵۴-۱۶۰. **https://sid.ir/paper/100321/fa**

۵. جانی‌سرناوی، طاهره، و شاهرخی، سید وحید. (۱۴۰۱). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی به‌کمک پارامترهای هیدروشیمیایی (مطالعه موردی: ناحیه قیدار-استان زنجان). *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۴(۳)، ۲۸۹-۳۰۵. **doi:10.30495/JEST.2022.63521.5519**

۶. جلالیان، عسگر، سمیعی، حمیده، شکری خوبستانی، معصومه، و کریمی، محمد رضا. (۱۳۹۹). بررسی اثرات خشک‌سالی و شوری بر کیفیت شیمیایی آبخوان دشت زنجان. *ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها*، ۸(۲)، ۱۱۹-۱۲۹. **https://sid.ir/paper/961982/fa**

۷. خاندوزی، فهیمه، پری‌زنگنه، عبدالحسین، زمانی، عباسعلی، و دادبان‌شهامت، یوسف. (۱۳۹۴). بررسی کیفیت هیدروژئوشیمیایی و بهداشتی آب زیرزمینی شهرستان رامیان، استان گلستان. *تحقیقات سلامت در جامعه*، ۱(۳)، ۴۱-۵۲. **doi:20.1001.1.24236772.1394.1.3.6.4**

۸. ربانی، جواد، و زهدی، افشین. (۱۳۹۹). ریزدیرینه شناسی و محیط رسوبی سازند قم در شمال غرب زنجان. *رخساره‌های رسوبی*، ۱۳(۲)، ۱۷۳-۱۸۹. **https://civilica.com/doc/1403637**

۹. شهیکی، حدیث، و خراسانی‌پور، مهدی. (۱۴۰۲). هیدروژئوشیمی و کیفیت منابع آب منطقه تهرود، بم، شرق استان کرمان. *محیط زیست طبیعی*، ۷۶(۴)، ۷۳-۷۴۶. **doi:10.22059/jne.2023.345360.2451**

۱۰. شیخی آلمان‌آباد، زهرا، پیرخراطی، حسین، و رحمانپور، حسن. (۱۴۰۲). بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه با بکارگیری روش های آماری چند متغیره و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی. *یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*. **doi:10.22084/nfag.2023.27810.1554**

۱۱. فضابخش، شاهین، رسول‌زاده، علی، رمضانی‌مقدم، جواد، و اسماعیلیان، مهدی. (۱۴۰۱). بررسی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره در آبخوان دشت اردبیل. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۵۰)، ۳۵۳-۳۳۳. **doi:10.22125/IWE.2022.162670**

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

۱۲. کلانتری، نصراله، عنبری، ابوالحسن، و محمدی، هادی. (۱۳۹۷). بررسی هیدروشیمیایی 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., Abdolahi, 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., Alshehri, 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 Sensin*g, 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., Alshehri, 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., & Shahrokhi, 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.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

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 Hydro-geochemical 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.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]

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/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/Ba4DyCu3O9.09 S-scheme heterojunction nanocomposite with enhanced photocatalytic and antibacterial activities. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(7), 2952–2965. https://doi.org/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.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.5.4]