

Research Paper



Hydrogeochemical Characteristics and Groundwater Quality Assessment in the Asalouyeh Plain



Faezeh Nayeb¹, Abdorreza Vaezihir², Maryam Hasanpour³

1-M.Sc. student of Hydrogeology, Department of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. f.naveb96@gmail.com

2- Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. vaezihir@yahoo.com

3- Ph.D. Student of Hydrogeology, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. maryam.hasanpour04@gmail.com

Keywords

Hydrogeochemistry, Graphical Methods, Groundwater, Asalouyeh Plain southern coast of Iran.

Received: 2024/10/11

Accepted: 2025/04/08

Published: 2025/07/21

ABSTRACT

Introduction

The Asalouyeh Plain, located along the Persian Gulf in southern Iran, is a vital industrial center primarily focused on petrochemical production. Rapid industrialization in this region has led to significant environmental challenges, especially concerning groundwater quality. Groundwater is essential for agricultural irrigation and industrial processes; however, it faces threats from anthropogenic activities and saline water intrusion. Previous studies highlight the importance of groundwater quality for human health and ecological balance. Kubicz et al. (2021) underscore that contamination can have severe health implications, while Hassanzadeh (2011) notes that industrial pollution significantly impacts groundwater systems, leading to elevated levels of harmful contaminants. In the Asalouyeh Plain, research by Ahmadi et al. (2018) indicates that saline intrusion, exacerbated by industrial water extraction, contributes to groundwater degradation.

This study aims to conduct a hydrochemical analysis of groundwater in the Asalouyeh Plain, focusing on the effects of industrial activities and saline water intrusion. By collecting and analyzing data from eight wells and two springs, this research seeks to elucidate the spatial variability in groundwater quality and the underlying hydrochemical processes. The findings will provide insights for the sustainable management of groundwater resources in the region.

*Corresponding Author: Abdorreza Vaezihir

E-mail: vaezihir@yahoo.com

How to cite this article: Nayeb, F; Vaezihir, A; & Hasanpour, M. (2025). Hydrogeochemical Characteristics and Groundwater Quality Assessment in the Asalouyeh Plain. *Hydrogeomorphology*, 12(43): 34 – 57.

DOI: [10.22034/hyd.2025.63947.1760](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.63947.1760)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Methodology

Groundwater samples were systematically collected from eight wells and two springs across the Asalouyeh Plain. A detailed hydrochemical analysis was performed using graphical methods, including Piper and Durov diagrams, to classify water types and elucidate the chemical processes affecting groundwater. Additionally, multivariate statistical techniques were applied to investigate correlations among various chemical parameters and assess the impact of industrial pollutants. Key indicators such as chloride, sodium, and sulfate concentrations were measured to evaluate the extent of contamination and the influence of seawater intrusion. Groundwater samples were systematically collected from eight wells and two springs across the Asalouyeh Plain. A detailed hydrochemical analysis was performed using graphical methods, including Piper and Durov diagrams, to classify water types and elucidate the chemical processes affecting groundwater. Additionally, multivariate statistical techniques were applied to investigate correlations among various chemical parameters and assess the impact of industrial pollutants. Key indicators such as chloride, sodium, and sulfate concentrations were measured to evaluate the extent of contamination and the influence of seawater intrusion.

Results and Discussion

The hydrochemical assessment of groundwater in the Asalouyeh Plain revealed significant contamination, particularly in the southern and western sectors of the region, where industrial activities are most concentrated. The analysis indicated elevated concentrations of key ions, with sulfate levels peaking at 1711 mg/l and sodium concentrations reaching up to 60%. These results underscore the critical impact of industrial operations and saline water intrusion on groundwater quality. The hydrogeochemical processes identified in this study include reverse ion exchange and the dissolution of dolomitic and carbonate rocks. Reverse ion exchange was observed as sodium ions from saline water replaced calcium and magnesium ions in the groundwater, leading to increased sodium concentrations. This process significantly affects groundwater quality, particularly in agricultural contexts, where elevated sodium levels can impair soil health and crop productivity.

Additionally, the dissolution of dolomitic and carbonate rocks contributes to the overall hydrochemical changes observed in the groundwater. The presence of these minerals enhances the mobility of certain ions, which can lead to further deterioration of water quality. The high concentrations of sulfate and sodium in the groundwater are indicative of these complex hydrogeochemical interactions. Qualitative assessments revealed that the groundwater across various sectors of the Asalouyeh Plain is predominantly unsuitable for agricultural applications. The elevated salinity levels pose a serious challenge for crop cultivation, as high sodium concentrations can negatively affect soil structure and fertility. Moreover, the groundwater's high sedimentation potential renders it less suitable for industrial applications, particularly in processes where water clarity and quality are critical. In summary, the findings of this study highlight the urgent need for effective groundwater management strategies in the Asalouyeh Plain. The degradation of groundwater quality due to industrial activities and saline water intrusion necessitates immediate action to mitigate these impacts. Sustainable management practices, including monitoring and regulation of industrial discharges, are essential for protecting this vital resource and ensuring its availability for future generations.

Conclusions

This study underscores the pressing need for enhanced groundwater management practices in the Asalouyeh Plain. The degradation of groundwater quality due to industrial activities and saline water intrusion presents significant risks to agricultural productivity and industrial operations. Effective measures must be implemented to mitigate saline water intrusion and regulate industrial effluents to ensure the long-term sustainability of groundwater resources.

مقاله پژوهشی



ویژگی‌های هیدروژنوشیمی و ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت عسلویه



فائزه نایب^۱، عبدالرضا واعظی هیر^۲، مریم حسن پور^۳

۱- دانشجوی ارشد هیدروژنولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. f.nayeb96@gmail.com

۲- استاد هیدروژنولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. vaezihir@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری هیدروژنولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. maryam.hasanpour04@gmail.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

دشت عسلویه، به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق صنعتی ایران، در سال‌های اخیر با چالش‌های جدی در زمینه کیفیت آب‌های زیرزمینی مواجه شده است. این مطالعه به منظور تحلیل هیدرووشیمیایی و ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی این دشت، با تمرکز بر تأثیرات فعالیت‌های صنعتی و نفوذ آب‌های شور دریایی انجام شده است. برای این منظور، داده‌های کیفی مربوط به ۸ چاه و ۲ چشمه در منطقه جمع‌آوری و با استفاده از روش‌های گرافیکی نظیر نمودارهای پایپر و دوروف و تحلیل‌های آماری چندمتغیره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نفوذ آب شور دریایی و فعالیت‌های صنعتی منجر به افزایش غلظت یون‌های کلراید، سدیم و سولفات شده و کیفیت آب زیرزمینی به‌ویژه در نواحی جنوبی و غربی منطقه به شدت کاهش یافته است، به طوری که غلظت سولفات به 1711 mg/l و درصد سدیم به 60% در این مناطق رسیده که نشان‌دهنده تأثیر شدید منابع آلاینده طبیعی و انسانی است. علاوه بر این، پدیده تعویض یونی معکوس و انحلال سنگ‌های دولومیتی و کربناته به عنوان فرآیندهای غالب هیدروژنوشیمیایی شناسایی شدند. تحلیل‌های کیفی نشان داد که آب‌های زیرزمینی در بخش‌های مختلف منطقه برای مصارف کشاورزی عمدتاً نامناسب هستند، در حالی که برخی از چشمه‌ها کیفیت بهتری دارند. همچنین، آب‌های زیرزمینی دارای خاصیت رسوب‌گذاری بالا برای مصارف صنعتی هستند.

هیدروژنوشیمی، روش
گرافیکی، آب زیرزمینی، دشت
عسلویه، سواحل جنوبی ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ انتشار: 1404/04/30

ارجاع به این مقاله: نایب، فائزه؛ واعظی هیر، عبدالرضا؛ حسن پور، مریم. (۱۴۰۴). ویژگی‌های هیدروژنوشیمی و ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت عسلویه. هیدروژنومورفولوژی، دوره (شماره): 34-57.

*نویسنده مسئول: عبدالرضا واعظی هیر
رایانامه: vaezihir@yahoo.com

شماره دیجیتال مقاله: DOI: 10.22034/hyd.2025.63947.1760



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

آب به عنوان یک نیاز اولیه برای رشد اکوسیستم‌ها و توسعه اجتماعی، کشاورزی و صنعتی، نقش حیاتی ایفا می‌کند (کوبیکز^۱ و همکاران، ۲۰۲۱: ۲۶۳). در این میان، آب‌های زیرزمینی به عنوان یکی از منابع مهم تأمین آب شیرین برای میلیون‌ها نفر در سطح جهان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. با این حال، آلودگی این منابع می‌تواند تأثیرات عمده‌ای بر سلامت انسان‌ها، فعالیت‌های صنایع، کشاورزی و محیط زیست داشته باشد (حسن زاده و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۲). این منابع آب معمولاً دارای ترکیباتی از گازها و مواد جامد محلول هستند و کیفیت آب‌های زیرزمینی بر اساس ترکیبات شیمیایی، بیولوژیک، محتوای رسوبی و درجه حرارت آن تعیین می‌گردد (هانسلاو^۲، ۱۹۹۵: ۲۸۰). این کیفیت نتیجه کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از زمان تراکم در اتمسفر تا زمان تخلیه شدن از یک چاه یا چشمه بر آن اثر می‌گذارد و تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی و انسانی قرار دارد. همچنین، ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی می‌تواند نشان‌دهنده منشاء، سن و درجه حرارت موجود در عمق آن باشد (باور^۳، ۱۹۷۸: ۲۰).

استفاده از نمودارهای ترکیبی یون‌های عمده، ابزاری مفید و کاربردی در تعیین فرآیندهای هیدرووشیمی حاکم بر آبخوان‌ها به شمار می‌رود (لاکشمین^۴ و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۵۷؛ ووتسیس^۵ و همکاران، ۲۰۱۵: ۷۹؛ ردوان و منعیم، ۲۰۱۶: ۳۲۹). این نمودارها با شناسایی فرآیندهای حاکم، می‌توانند ناهنجاری‌های ناشی از آلودگی‌های مختلف، به ویژه شورابه‌ها (منجرزی^۷ و همکاران، ۲۰۱۲: ۶۷) و آب‌های فسیلی (کورتس^۸ و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۱۳) را تشخیص دهند. به منظور ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و شناسایی الگوهای شیمیایی آن، تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است. آب زیرزمینی به عنوان یک بخش فعال از چرخه هیدرولوژیکی، منبعی کلیدی برای شرب و آبیاری محسوب می‌شود (کوندیری و گروم^۹، ۲۰۰۹: ۱۵؛ شرستا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۶: ۱). به عنوان نمونه، (جبراییلی اندریان^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۴: ۶۳) در ارزیابی هیدروژئوشیمیایی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت آذرشهر، تغییرات آب‌نمود در برابر هدایت الکتریکی را تحلیل کردند. تحقیقات آنان نشان داد که غلظت نیترات و عناصر مضر نظیر آرسنیک، سرب، نیکل و کروم فراتر از حد مجاز برای شرب است. تحلیل نمودارهای پایپر و استیف نشان داد که تیپ آب‌های منطقه عمدتاً سولفات و بیکربناته بوده و منشاء آنها به اختلاط و تعویض یونی مرتبط است. همچنین، نتایج آنالیزهای آماری چندمتغیره نشان‌دهنده تأثیرات انسانی به عنوان یک عامل مهم در کیفیت آب‌های زیرزمینی بودند. پارامترهای مختلف کیفی برای طبقه‌بندی آب زیرزمینی شامل رخساره‌های شیمیایی آب، سختی کل، نمودار ویلکاکس، درصد سدیم و کربنات سدیم است (چیدامبارام^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۴۱۹؛ زیدی^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۰۸).

روش‌های متعددی برای توصیف شیمی آب و عوامل کنترل‌کننده آن وجود دارد، از جمله تجزیه و تحلیل‌های آماری و روش‌های گرافیکی مانند نمودار پایپر و نمودار استیف. با استفاده از این روش‌ها، تحقیقات متعددی در ارتباط با ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، کیفیت و خصوصیات هیدرووشیمیایی انجام شده است (شنر^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۳۲؛ برهان^{۱۵}، ۲۰۱۸: ۲۱۵؛ راویندرا^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۵۶؛ شارما^{۱۷} و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۰۳؛ ندیری^{۱۸} و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۴۹؛ لیو^{۱۹} و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۰۲۰). دی‌اگرام بسط داده شده دوروف، تیپ‌های مختلف آب زیرزمینی و برخی از فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مانند تعویض یونی و انحلال ساده را بهتر از دی‌اگرام پایپر نشان می‌دهد (سینگال^{۲۰}، ۱۹۹۹: ۲۰۹)، دی‌اگرام استیف نیز نمونه‌های آنالیز شده را با نمونه‌های استاندارد مقایسه کرده و از این طریق تأثیر لیتولوژی بر آب زیرزمینی را آشکار می‌کند (استیف^{۲۱}، ۱۹۵۱: ۳).

در حالی که روش‌های گرافیکی برای تفسیر و نمایش پارامترهایی مانند سیلیس، نیترات و آرسنیک محدودیت دارند، روش‌های آماری چندمتغیره می‌توانند بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی مختلف مانند هدایت الکتریکی، دما و pH ارتباط برقرار کرده و روابط بین متغیرها

¹Kubicz²Hounslo³Bouwer⁴Lakshmanan⁵Voutsis⁶Redwan & Moneim⁷Monjerezi⁸Cortes⁹Koundouri & Groom¹⁰Shrestha¹¹Jebraeili Andrian¹²Chidambaram¹³Zaidi¹⁴Şener¹⁵Brhane¹⁶Ravindra¹⁷Sharma¹⁸Nadiri¹⁹Liu²⁰Singhal²¹Stiff

و نمونه‌ها را کشف کنند. به همین دلیل، این روش‌ها توانایی رفع محدودیت‌های روش گرافیکی را در تفسیر فرآیندهای هیدروژنوشیمیایی دارند (دالتون^۱، ۱۹۷۸: ۲۲۸).

به‌عنوان نمونه، (کریمی^۲ و همکاران، ۱۳۰۱۷) در بررسی خصوصیات هیدروژنوشیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت سمنان، با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، نمونه‌های آب را به سه خوشه تقسیم‌بندی کردند: (۱) آب‌های با بیشترین مقدار بیکربنات و کمترین مقدار مواد محلول، (۲) آب‌های با بیشترین غلظت سولفات و (۳) آب‌های کلروره با بیشترین شوری. همچنین، (هادی پور هفشجانی^۳ و همکاران، ۱۳۰۱۸: ۳۲) در مطالعه‌ای بر روی آبخوان کوه‌دشت دریافتند که تکامل شیمیایی آب از تیپ بی‌کربناته کلسیک با غلظت کم املاح محلول در مناطق تغذیه شمالی آغاز می‌شود و در مناطق تخلیه به تیپ کلروره سدیک با غلظت بالای املاح تغییر می‌یابد.

ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف جهان نشان داده است که عوامل طبیعی و انسانی به‌طور همزمان بر کیفیت این منابع اثرگذارند. در منطقه معدنی اردستان، استان اصفهان، (احمدی^۴ و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۰۱۸) با استفاده از نمودار شولر و ویلکوکس دریافتند که آب زیرزمینی منطقه برای آشامیدن و کشاورزی مناسب است، اما فعالیت‌های معدنی و اکسایش کانی‌هایی نظیر پیریت ممکن است در آینده باعث کاهش کیفیت منابع آب از طریق تولید زه‌آب اسیدی شود. در مطالعه‌ای مشابه در تونس، (خاولا و محمد^۵، ۲۰۲۰: ۱) نشان دادند که شوری بالا و غلظت بالای کادمیوم و نیترات در آب زیرزمینی منطقه، آن را برای آبیاری نامناسب کرده است. (سوبارائو^۶ و همکاران، ۱۳۰۱۷) در شمال هند نیز به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی پرداختند و دریافتند که غلظت بالای نمک‌های محلول موجب شوری آب شده، اما فلوراید در حد استاندارد باقی مانده و آب برای محصولات مقاوم به شوری مناسب است. همچنین (بنادلا^۷ و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۳۳) در شمال غربی الجزایر نشان دادند که فعالیت‌های کشاورزی و برداشت بیش از حد آب همراه با عوامل طبیعی نظیر هوازدگی سنگ‌های کربناته و انحلال هالیت، موجب افزایش غلظت کلراید در آب زیرزمینی شده است.

دشت عسلویه، واقع در جنوب ایران و همجوار با خلیج فارس، به دلیل توسعه سریع صنایع پتروشیمی و رشد شهرنشینی، با چالش‌های مهمی در خصوص کیفیت آب زیرزمینی مواجه است. این دشت به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق صنعتی ایران شناخته می‌شود و نقش کلیدی در اقتصاد کشور ایفا می‌کند. اما توسعه‌ی سریع صنایع و نیازهای روزافزون به آب برای بخش‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی باعث شده که منابع آبی این منطقه با خطر آلودگی شدید روبرو شوند. فعالیت‌های پتروشیمی و تخلیه‌ی پساب‌های صنعتی به منابع آبی زیرزمینی منطقه، موجب بروز نگرانی‌هایی جدی در مورد تأثیرات این آلودگی‌ها بر سلامت عمومی و پایداری محیط‌زیست شده است. بررسی کیفیت آب زیرزمینی در دشت عسلویه از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا می‌تواند اطلاعاتی را در مورد منشأ و میزان آلودگی و عوامل مؤثر بر آن ارائه دهد و به درک بهتری از شرایط هیدروژنوشیمیایی این منابع حیاتی کمک کند.

تحقیق حاضر در راستای مطالعات پیشین، به بررسی فرآیندهای هیدروژنوشیمیایی و تأثیرات ترکیبی آلودگی‌های صنعتی و نفوذ آب شور بر کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت عسلویه پرداخته است. در مقایسه با مطالعات قبلی، تفاوت‌ها و شباهت‌های متعددی قابل مشاهده است. مطالعه (کلانتری^۸ و همکاران، ۱۳۰۱۲: ۳۳۳) نشان داد که غلظت فلزات سنگین مانند سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) در برخی مناطق دشت عسلویه از حد مجاز فراتر رفته است، با این حال تمرکز اصلی این تحقیق بر آلودگی فلزات سنگین در خاک و آب زیرزمینی بوده است. در مقابل، پژوهش حاضر علاوه بر بررسی کیفیت آب، به فرآیندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر ترکیب شیمیایی آن، از جمله تعویض یونی و انحلال دولومیت و کربنات‌ها، پرداخته و اثرات همزمان فعالیت‌های صنعتی و نفوذ آب شور را نیز مورد ارزیابی قرار داده است، که در مطالعه کلانتری و همکاران کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. مطالعه (جبرئیلی اندریان و همکاران، ۲۰۲۴: ۶۳) در دشت آذرشهر نیز

¹ Dalton⁵ Khawla و Mohamed⁷ Benadela² Karimi⁸ Kalantari³ Hadipour Hafshejani⁶ Subba Rao⁴ Ahmadi

به بررسی تأثیر آلاینده‌های انسانی و فرآیندهای ژئوشیمیایی، به‌ویژه تعویض یونی و انحلال سنگ‌های تبخیری، بر کیفیت آب زیرزمینی پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این فرآیندها منجر به افزایش غلظت یون‌های کلراید، سدیم و سولفات در منابع آب شده‌اند، که شباهت قابل توجهی با یافته‌های پژوهش حاضر دارد. در دشت عسلویه نیز نفوذ آب شور و تأثیر فعالیت‌های صنعتی منجر به تغییر کیفیت آب زیرزمینی و افزایش قابل توجه این یون‌ها شده است.

به‌طور مشابه، مطالعه (هادی پور هفشجانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۲) در آبخوان کوه‌دشت نشان داد که ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی در مسیر جریان خود دستخوش تغییر شده و از بی‌کربناته کلسیک در نواحی تغذیه به کلروره سدیک در نواحی تخلیه تبدیل می‌شود. این الگو با یافته‌های تحقیق حاضر تطابق دارد، زیرا در دشت عسلویه نیز تیپ آب در نواحی نزدیک به دریا عمدتاً کلروره و در مناطق دورتر سولفات شده است.

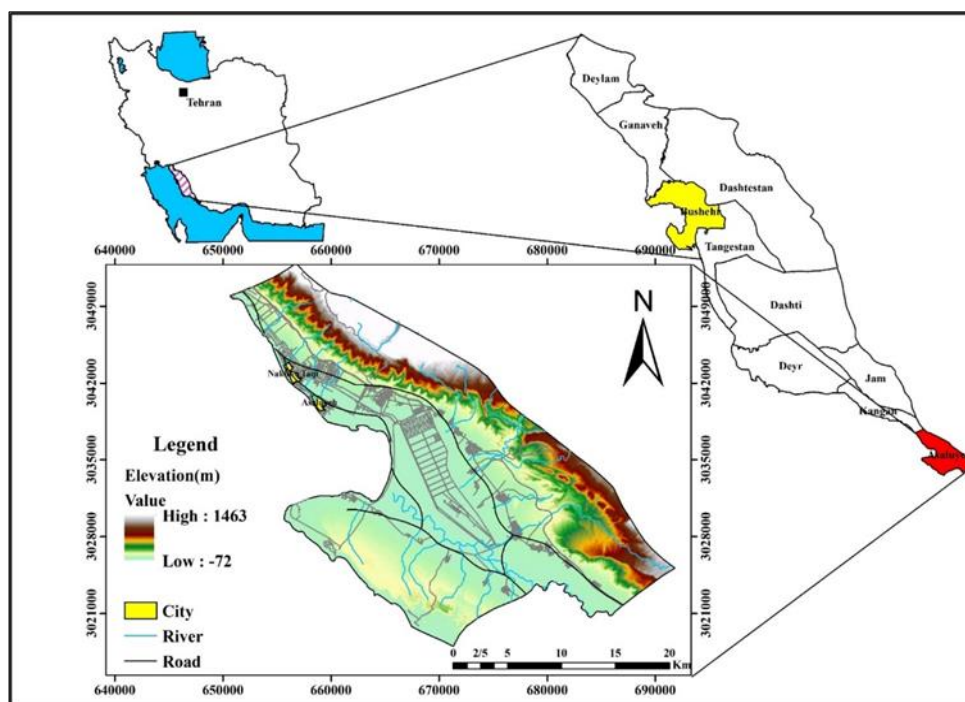
همچنین، نتایج مطالعه (سوبا راثو و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۰) در شمال هند نشان داد که در نواحی تحت تأثیر نفوذ آب شور و فعالیت‌های انسانی، غلظت سدیم و سولفات در آب‌های زیرزمینی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها با پژوهش حاضر کاملاً سازگار است، زیرا در دشت عسلویه نیز بیشترین میزان سدیم (۶۰٪) و سولفات (تا ۱۱۷۱۱ mg) در مناطق جنوبی و غربی مشاهده شده که ناشی از تأثیر هم‌زمان نفوذ آب شور و آلودگی‌های صنعتی است. در مجموع، مقایسه این مطالعات نشان می‌دهد که تحقیق حاضر علاوه بر تأیید برخی نتایج پیشین، با بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی پیشرفته و نمودارهای گرافیکی، رویکرد جامعی به بررسی فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی، تأثیرات صنعتی و تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی در دشت عسلویه ارائه داده است.

این مطالعه با هدف ارزیابی کیفیت و خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی در دشت عسلویه انجام شده است. با توجه به توسعه سریع صنعتی و افزایش نیاز به منابع آبی، بررسی دقیق تغییرات شیمیایی و فیزیکی این منابع امری ضروری است. این پژوهش تلاش دارد تا با شناسایی فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و تحلیل اثرات آن‌ها بر سلامت انسان و محیط‌زیست، اطلاعات لازم را برای مدیریت پایدار منابع آب در این منطقه ارائه دهد. برای دستیابی به این هدف، داده‌های کیفی آب زیرزمینی از شرکت آب منطقه‌ای استان بوشهر جمع‌آوری شده و اطلاعات مربوط به ۸ چاه و ۲ چشمه در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. این داده‌ها شامل پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب مانند غلظت یون‌های اصلی (کلراید، سدیم، سولفات و غیره)، هدایت الکتریکی، pH و شاخص‌های مرتبط با کیفیت آب هستند. سپس، داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های گرافیکی نظیر نمودارهای پایپر و دوروف تحلیل شده و برای تعیین مکانیسم‌های هیدروژئوشیمیایی حاکم، از تحلیل‌های آماری چندمتغیره بهره گرفته شده است. علاوه بر این، تأثیر عوامل انسانی مانند فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و همچنین نقش فرآیندهای طبیعی نظیر تعویض یونی و انحلال سنگ‌های کربناته در تغییر کیفیت آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است.

موقعیت و زمین‌شناسی

موقعیت محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت عسلویه با وسعت ۲۸۵ کیلومتر مربع، در ناحیه‌ای آبرفتی بین تاقدیس‌های عسلویه و گاوبندی در شمال شرق و شرق، و تاقدیس خالفانی در جنوب غرب واقع شده است. این دشت در مرز جنوبی خود به خلیج فارس محدود می‌شود و در موقعیت جغرافیایی تقریباً ۳۰۰ کیلومتر شرق بندر بوشهر و ۵۷۰ کیلومتر غرب بندر عباس قرار دارد (شکل ۱).



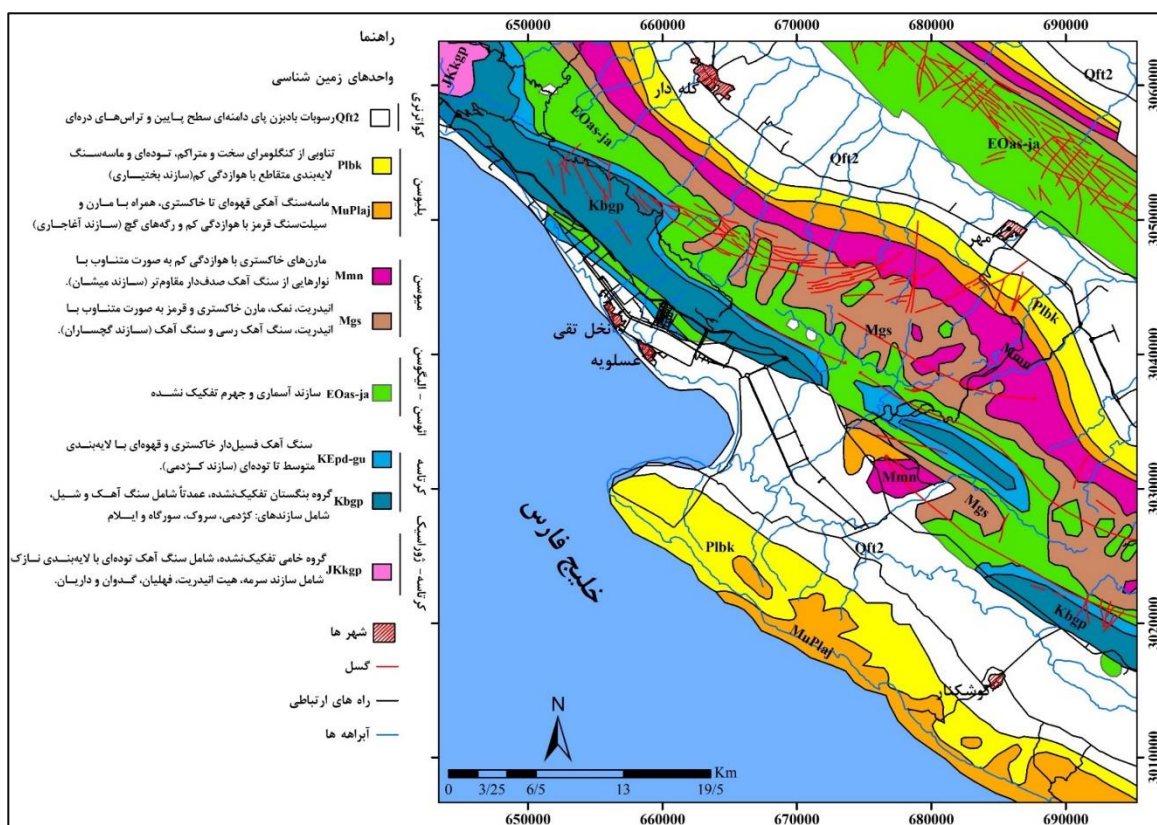
شکل (۱): موقعیت شهرستان عسلویه

Figure (1): Location of Asalouyeh County

اقلیم منطقه، به‌ویژه در زمینه هیدرولوژی، تحت تأثیر ویژگی‌های بیابانی گرم و شدید قرار دارد. بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده در دوره زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۴۰۱، بارندگی سالانه در دشت عسلویه به‌طور متوسط ۱۶۹/۷ میلی‌متر ثبت شده است. علاوه بر این، میانگین دمای سالانه این ناحیه معادل ۲۷/۳۲ درجه سانتی‌گراد بوده که نشان‌دهنده شرایط آب و هوایی گرم و خشک در این حوزه می‌باشد. این ویژگی‌های اقلیمی، به‌ویژه میزان پایین بارندگی و دماهای بالا، تأثیر عمیقی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت عسلویه دارند. متوسط دبی ماهانه چشمه‌های موجود در محدوده منطقه مورد مطالعه از سال ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۱، میزان دبی چشمه عسلویه بیدخون (S2) تقریباً ۳ برابر چشمه کلات (S1) می‌باشد. اختلاف بین بیشترین و کمترین دبی در چشمه عسلویه-بیدخون برای ماه‌های مختلف ۲/۰۶ لیتر بر ثانیه است اما این مقدار برای چشمه کلات ۳/۵۷ لیتر بر ثانیه است که نشان‌دهنده نوسانات بیشتر دبی این چشمه می‌باشد. برای چشمه عسلویه-بیدخون بیشترین دبی برای اسفند ماه با مقدار ۲۵/۱۸ و برای کلات دی ماه با مقدار ۷/۵ ثبت شده است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

از نظر زمین‌شناسی دشت عسلویه در پهنه ساختاری زاگرس قرار دارد و تاقدیس عسلویه مهمترین ساختار زمین‌ساختی آن است. در این مطالعه، نقشه زمین‌شناسی منطقه با استفاده از نقشه‌های ۱:۱۰۰,۰۰۰ شیرینو (سازمان زمین‌شناسی، ۱۳۸۴) و بساتین (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۶) تهیه شده است (شکل ۲). قدیمی‌ترین واحدهای چینه‌شناسی منطقه، شامل گروه خامی و سازندهای سورمه، هیث، فلهیان، گدوان و داریان هستند که در یال جنوبی تاقدیس عسلویه رخنمون یافته‌اند و نقش مهمی در ذخایر هیدروکربنی دارند. سازند داریان، به‌عنوان سنگ مخزن مهم، تا ضخامت ۲۵۰ متر می‌رسد. سازندهای کژدمی، سروک، ایلام و گورپی به دوره کرتاسه و سازندهای گچساران، میشان و آغاچاری به دوران سوم زمین‌شناسی تعلق دارند. رسوبات جوان‌تر کواترنری نیز به‌صورت تراس‌های آبرفتی سطح دشت را پوشانده‌اند.



شکل (۲): نقشه موقعیت و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (رقومی شده از نقشه سازمان زمین‌شناسی ورقه شیرینو و شرکت ملی نفت ایران ورقه بساتین)
 Figure (2): Map of the Location and Geological Features of the Study Area (Digitized from Maps of Shirino (developed by Geological Survey) and Basatin Sheet (developed by the National Iranian Oil Company's))

مواد و روش‌ها

برای ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی در دشت عسلویه و تعیین منشأ آلودگی‌ها، از روش‌های گرافیکی و آماری چندمتغیره استفاده شد. داده‌های مربوط به ۸ چاه و ۲ چشمه در این منطقه از سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۱ از شرکت آب منطقه‌ای استان بوشهر جمع‌آوری گردید. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به کاتیون‌ها و آنیون‌ها نظیر سدیم، کلسیم، منیزیم، سولفات، کلرید و بی‌کربنات و همچنین پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند pH و هدایت الکتریکی (EC) است. به دلیل عدم وجود پیژومتر در منطقه، نمونه‌برداری‌ها تنها از چاه‌ها و چشمه‌ها صورت گرفت و داده‌های مربوط به ماه شهریور ۱۴۰۱ برای تجزیه و تحلیل انتخاب شدند چرا که این ماه کامل‌ترین داده‌ها را در مقایسه با سایر سال‌ها ارائه می‌دهد. نقاط نمونه‌برداری به‌طور دقیق انتخاب شدند تا پوشش گسترده‌ای از منطقه را دربر بگیرند.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزارهای AQQA و RockWork استفاده شد. این نرم‌افزارها به‌طور ویژه برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی و شناسایی فرایندهای هیدروشیمیایی در آبخوان‌ها به‌کار می‌روند. به‌ویژه برای رسم نمودارهای گرافیکی نظیر نمودارهای پایپر، استیف و دوروف که ابزارهای اصلی در شناسایی تیپ‌های آبی و تحلیل فرایندهای هیدروشیمیایی هستند، از این نرم‌افزارها استفاده گردید. نمودار پایپر به‌منظور تحلیل ترکیب شیمیایی آب‌ها و شناسایی فرایندهایی مانند انحلال یا رسوب‌گذاری، اختلاط بین دو نوع آب و تبادل یونی به‌کار می‌رود. این نمودار با تفکیک یون‌ها در سه محور مختلف اطلاعات دقیقی درباره ویژگی‌های آبی ارائه می‌دهد و به شناسایی تأثیرات ناشی از نفوذ آب شور یا آلودگی‌های صنعتی کمک می‌کند. همچنین، نمودار استیف به‌عنوان ابزاری سریع برای شناسایی تیپ آب و منشأ آن‌ها استفاده شد. این نمودار، با نمایش شباهت‌ها و تفاوت‌ها در ترکیب شیمیایی آب‌ها، کمک می‌کند تا منابع آلودگی و فرایندهای شیمیایی در منطقه مشخص شوند. نمودار دوروف نیز برای تحلیل فرایندهای اختلاط و انحلال در منابع آب زیرزمینی و شبیه‌سازی فرایندهای تبادل یونی و انحلال سنگ‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

برای ارزیابی کیفیت آب‌ها از نظر مصارف مختلف، از جمله شرب، کشاورزی و صنعت، از نمودارهای شولر و ویلکاکس بهره برده شد. نمودار شولر برای طبقه‌بندی آب‌ها بر اساس استانداردهای آب آشامیدنی و ارزیابی میزان شوری و درصد سدیم استفاده گردید. این نمودار به‌ویژه برای تعیین مناسب بودن آب‌ها برای مصارف شرب و کشاورزی کاربرد دارد. همچنین، نمودار ویلکاکس برای ارزیابی شوری آب‌ها و بررسی کیفیت آب‌ها برای مصارف کشاورزی و صنعتی به‌کار رفت. این نمودار به‌طور ویژه برای ارزیابی اینکه آیا آب‌ها مناسب برای آبیاری و سایر مصارف کشاورزی هستند، مفید است.

علاوه بر روش‌های گرافیکی و آماری، برای شناسایی منشأ و فرآیندهای هیدروشیمیایی حاکم بر منابع آب زیرزمینی، از نسبت‌های یونی مختلف استفاده شد. این نسبت‌ها به‌طور عمده برای تحلیل فرآیندهای هیدروشیمیایی مانند انحلال، تعویض یونی و تأثیرات ناشی از منابع آلاینده استفاده می‌شوند. مهم‌ترین نسبت‌های یونی که در این مطالعه محاسبه شدند عبارتند از:

نسبت $Na/(Na+Cl)$: این نسبت برای شناسایی فرآیندهای تعویض یونی معکوس استفاده می‌شود که به‌ویژه در مناطق نزدیک به دریا که تحت تأثیر نفوذ آب شور قرار دارند، کاربرد دارد. مقادیر بالای این نسبت نشان‌دهنده وقوع فرآیند تعویض یونی در آب‌های شور است. نسبت $Mg/(Ca+Mg)$: این نسبت برای شناسایی فرآیندهای انحلال دولومیت و ته‌نشینی کلسیت به کار می‌رود. این نسبت در تشخیص تغییرات شیمیایی ناشی از هوازدگی سنگ‌های کربناته مفید است.

نسبت $Ca/(Ca+SO_4)$: این نسبت برای شناسایی فرآیندهای تبادل یونی و حذف کلسیم در آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. مقادیر پایین این نسبت ممکن است به فرآیندهایی مانند تبادل یونی و رسوب کلسیم اشاره داشته باشند.

نسبت $(Ca+Mg)/SO_4$: این نسبت به‌ویژه برای شناسایی فرآیندهای هیدروشیمیایی ناشی از انحلال سنگ‌های دولومیتی و سنگ‌های سولفات مفید است و می‌تواند تأثیرات مختلف منابع آلاینده و تغییرات در ترکیب آب‌ها را نشان دهد. جدول (۱) نسبت‌های یونی مختلف و نحوه محاسبه آن‌ها را نشان می‌دهد (هانسلاو^۱، ۱۹۹۵: ۲۸۰).

جدول (۱): نسبت‌های یونی مختلف و نحوه محاسبه آن‌ها (هانسلاو، ۱۹۹۵)

Table (1): Different Ion Ratios and Their Calculation Method (Hounsflow, 1995)

پارامترها	مقدار	منشأ
$\frac{Na}{Na + Cl}$	>0.5	- منبع سدیم دیگری از هالیت-آلبیت، تبادل یونی
	$=0.5$	- انحلال هالیت
	<0.5	- تبادل یونی معکوس
	$50 < TDS < 500$	- خطای آنالیز
	$TDS < 50$	- آب باران
$\frac{Mg}{Ca + Mg}$	$=0.5$	- هوازدگی دولومیت
	<0.5	- هوازدگی سنگ دولومیت، سنگ آهک
	>0.5	- انحلال دولومیت، ته‌نشست کلسیت یا آب دریا

¹ Hounsflow

ادامه جدول ۱

$=0.5$		- انحلال ژپیس
$\frac{Ca}{Ca + SO_4}$	<0.5 pH <5.5	- اکسیداسیون پیریت
	<0.5 pH(neutral)	- حذف کلسیم- تبادل یونی یا رسوب کلسیم
	>0.5	- منبع کلسیم دیگری از ژپیس- کربناتها یا سیلیکات‌ها
$\frac{Ca + Mg}{SO_4}$	>0.8 and <1.21	- دولومیتی شدن
	>0.8 TDS >500	- آب دریا، شورآبه و یا تبخیر
$\frac{Cl}{Sum\ Anion}$	>0.8 TDS <100	- آب بارش
	<0.8	- هوازگی سنگ
	>0.8	- هوازگی سیلیکات یا کربنات
$\frac{Hco_3}{Sum\ Anion}$	<0.8 sulfate high	- انحلال ژپیس
	<0.8 sulfate low	- شورآبه یا آب دریا
$\frac{Na + K - Cl}{Na + K - Cl + Ca}$	>0.2 and <0.8	- هوازگی پلاژیوکلاز
	$0.8 < or <0.2$	- عدم هوازگی پلاژیوکلاز

برای تشخیص آلودگی لایه های آبدار ساحلی، از نسبت یون کلرید و مجموع یونهای بی کربنات و کربنات $\frac{CL}{HCO_3 + CO_3}$ نیز میتوان استفاده کرد بر مبنای پیشنهاد رول نسبت یون کلرید به مجموع یون های بی کربنات و کربنات معیار خوبی برای ارزیابی و تشخیص آلودگی آب زیرزمینی در نتیجه تهاجم آب شور دریا است. یکی دیگر از پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفت نسبت Kelly (KR) می باشد مقدار این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می شود. چنانچه مقدار این پارامتر کمتر از یک باشد این آب برای مصارف کشاورزی مناسب می باشد (رابطه شماره ۱).

$$KR = \frac{Na^+}{Mg^{2+} + Ca^{2+}} \quad (1)$$

در ارزیابی کیفیت آب‌ها برای مصارف کشاورزی و صنعتی، از دو معیار مهم دیگر نیز استفاده گردید: پتانسیل رسوب گذاری و پتانسیل خوردگی. پتانسیل رسوب گذاری، که با استفاده از شاخص‌هایی مانند آلکالینیتی به عنوان CaO و pH محاسبه می شود، میزان تمایل آب‌ها به رسوب گذاری مواد جامد را تعیین می کند. آب‌هایی که پتانسیل رسوب گذاری بالاتری دارند، برای مصارف صنعتی مناسب تر هستند زیرا می توانند به عنوان آب‌های با قابلیت ته نشینی و رسوب در سیستم‌های صنعتی استفاده شوند. از سوی دیگر، پتانسیل خوردگی که با محاسبه شاخص‌های مختلفی نظیر پتانسیل شیمیایی خوردگی (pH-pHs) و مقدار کلسیم (Ca) ارزیابی می شود، به شناسایی آب‌هایی کمک می کند که ممکن است در سیستم‌های لوله کشی و تجهیزات صنعتی موجب خوردگی شوند.

علاوه بر این، برای ارزیابی کیفیت آب‌ها از نظر کشاورزی، شاخص نسبت جذب سدیم (SAR) محاسبه گردید. این شاخص برای ارزیابی تأثیر سدیم بر خاک‌های کشاورزی استفاده می شود و نشان می دهد که آب‌هایی با مقدار بالای SAR ممکن است موجب تجمع سدیم در خاک شده و قابلیت استفاده در کشاورزی را کاهش دهند. آب‌هایی که SAR بالایی دارند معمولاً برای آبیاری نامناسب هستند. در شکل ۳ قسمت شمالی چشمه‌های کارستی کلات (S1) و عسلویه-بیدخون (S2) قابل مشاهده هستند. با استفاده از نرم افزارهای AQ.QA

و Rock work خصوصیات هیدروشیمی نقاط تعیین شدند. جدول ۲ غلظت کاتیون ها و آنیون های اصلی در نمونه های منطقه مطالعاتی را نشان می دهد.



شکل (۳): تصویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه برداری شده توسط سازمان آب منطقه ای (شهریور ۱۴۰۱)

Figure (3): Satellite image of the study area and the location of sampling points by the Regional Water Organization (September 2022)

جدول (۲): غلظت کاتیون ها و آنیون های اصلی و تغییرات این عناصر در نمونه های آب زیرزمینی منطقه (شهریور ۱۴۰۱)

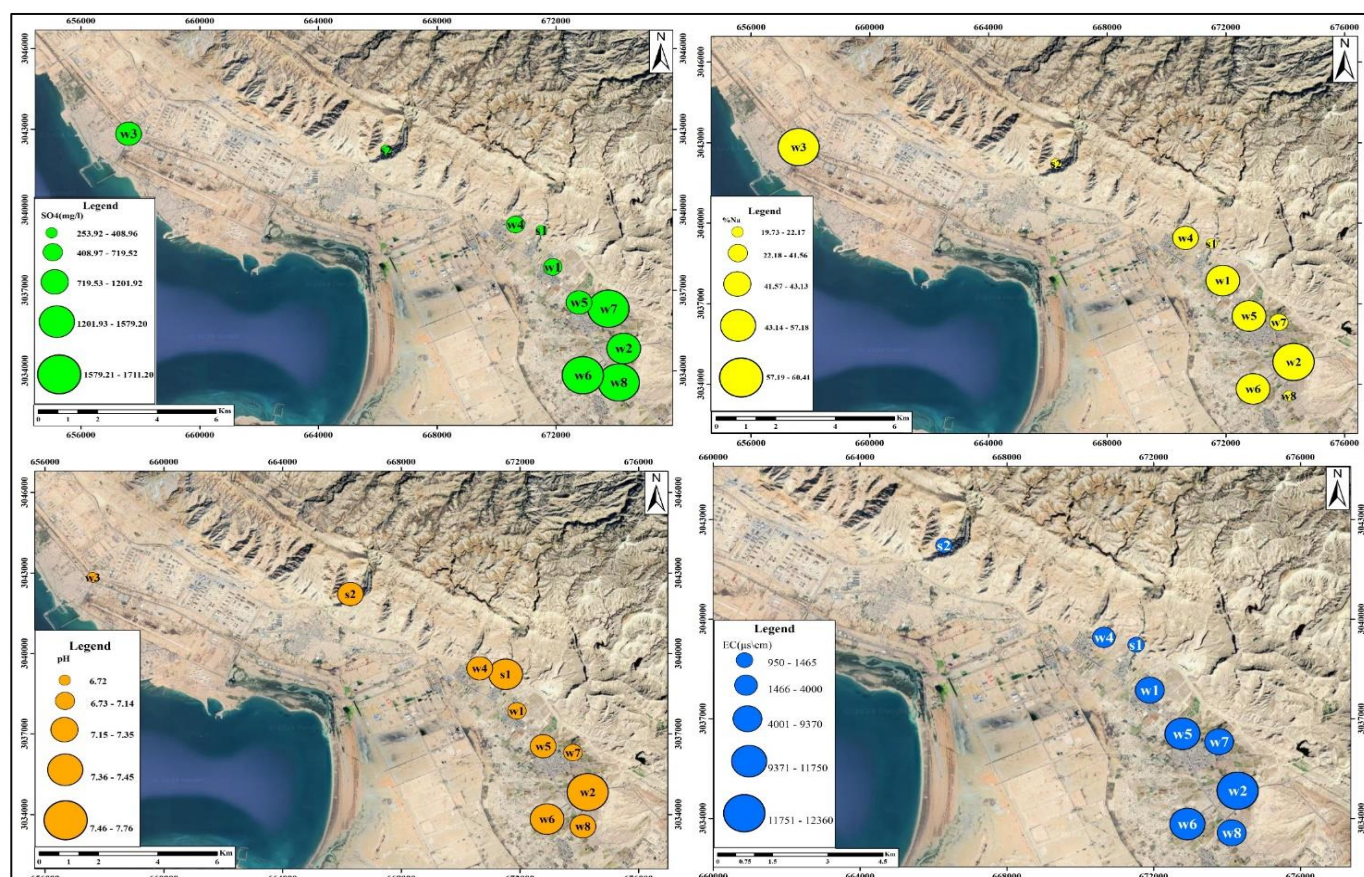
Table (2): Concentration of Major Cations and Anions and Their Variations in Groundwater Samples from the Region (September 2022)

Sample	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	T.D.S	Ca^{+2} (mg/l)	Mg^{+2} (mg/l)	Na^{+} (mg/l)	K^{+} (mg/l)	HCO_3^{-} (mg/l)	Cl^{-} (mg/l)	SO_4^{-2} (mg/l)
w1	9370	7.14	5280	452	192.6	1161	2.73	180	2474	719.5
w2	12360	7.76	7390	471	289.3	1671	2.34	170.2	3024	1579
w3	12350	6.72	6540	381.2	290.3	1515	3.12	180	2989	1202
w4	4000	7.35	2157	206.6	117.5	349.1	3.12	139.7	799.1	680.6
w5	11060	7.25	5980	479	265.7	1271	2.34	209.8	2749	984.5
w6	11750	7.42	6245	384.2	294	1341	3.12	170.2	2534	1675
w7	7990	7.04	4275	489	177.7	640.3	3.12	150.1	1230	1711
w8	6980	7.32	3897	553.8	266.6	325.2	3.12	200	938.3	1692
s1	1465	7.45	956	116.8	66.12	63.02	1.95	129.9	114.3	409
s2	950	7.27	603	65.8	46.44	43.01	1.95	79.91	75.97	253.9
WHO,2006	1500	2.5-9.6		75	30	200	200		250	

بحث و نتایج

براساس مجاورت آبخوان با آب دریا و همچنین بدلیل صنعتی بودن منطقه و همچنین با بررسی نمودارهای دایره ای (شکل ۴) و نتایج حاصل از غلظت های آنیون ها و کاتیون های نمونه های مورد بررسی جدول (۲) و تحلیل‌های انجام‌شده بر روی پارامترهای کیفی آبخوان نشان می‌دهند که این پارامترها، از جمله غلظت سولفات، درصد سدیم، pH، و هدایت الکتریکی (EC)، تأثیرات معناداری بر کیفیت آب زیرزمینی دارند. نتایج حاصل از این مطالعه، درک بهتری از پراکندگی فضایی و دلالت‌های زیست‌محیطی این پارامترها فراهم می‌آورد.

با توجه به شکل (شکل 4a) سولفات (SO_4^{2-}) به عنوان یکی از آنیون‌های کلیدی در آب‌های زیرزمینی، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی کیفیت آب ایفا می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که غلظت سولفات در آبخوان مطالعه‌شده به طور محسوسی متغیر است. (شکل 4b) به ویژه، در مناطق شمال شرقی که دور از منابع آلاینده قرار دارند، غلظت‌های کم سولفات ($96/92-408/253$ mg/l) مشاهده می‌شود. در مقابل، نواحی جنوبی و غربی با غلظت‌های بالاتر ($1201/93-11711/20$ mg/l) احتمالاً به دلیل نفوذ آب‌های شور دریایی و تأثیر فعالیت‌های انسانی، غلظت‌های بالایی از سولفات را دارند. این الگو نشان‌دهنده تأثیر متقابل منابع طبیعی و آلودگی‌های انسانی بر کیفیت آب زیرزمینی است. درصد سدیم (Na%) به عنوان یک پارامتر کلیدی در ارزیابی کیفیت آب، به‌ویژه در مصارف کشاورزی، دارای اهمیت ویژه‌ای است. (شکل 4a) نتایج نشان می‌دهند که نواحی شمالی و مرکزی با کمترین درصد سدیم ($19/73-22/17$ %) قرار دارند، در حالی که نقاط غربی نزدیک به ساحل ($44/14-60/41$ %) بالاترین درصد سدیم را نشان می‌دهند. این امر می‌تواند به نفوذ آب شور و تأثیرات ناشی از فعالیت‌های صنعتی نسبت داده شود. افزایش درصد سدیم در نواحی نزدیک به ساحل می‌تواند تأثیرات منفی بر کیفیت خاک و قابلیت تولید محصولات کشاورزی داشته باشد. pH یکی از شاخص‌های اساسی برای ارزیابی کیفیت آب است و محدوده pH به دست‌آمده در این مطالعه بین $6/72$ تا $7/76$ قرار دارد. (شکل 4d) مناطق با pH پایین‌تر نشان‌دهنده شرایط کمی اسیدی هستند که ممکن است ناشی از فعالیت‌های انسانی و نفوذ آب‌های آلوده باشد. در مقابل، نواحی با pH بالاتر نشان‌دهنده شرایط قلیایی‌تر هستند و می‌توانند به وجود ترکیبات قلیایی در خاک و سنگ‌های بستر مربوط باشند. این تغییرات در pH نشان‌دهنده تغییرات کیفی آب و تأثیرات بالقوه آن بر اکوسیستم‌های محلی است. هدایت الکتریکی (EC) به عنوان معیاری برای سنجش غلظت یون‌های محلول در آب، ارتباط مستقیمی با کیفیت آب دارد. (شکل 4c) نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که نواحی با EC بالا (چاه‌های مانند W3) می‌توانند به دلیل نفوذ آب شور و آلودگی‌های انسانی دارای غلظت‌های بالای نمک باشند. در مقابل، نقاطی با EC پایین (مانند W1 و W4) نشان‌دهنده آب با کیفیت بالاتر و غلظت کمتر یون‌های محلول هستند. این تفاوت‌ها در EC می‌تواند به شناسایی نواحی مناسب برای استفاده از آب زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی کمک کند.



شکل (۴): (a) پراکندگی درصد سدیم، (b) سولفات، (c) EC و (d) pH در محدوده ی مطالعاتی

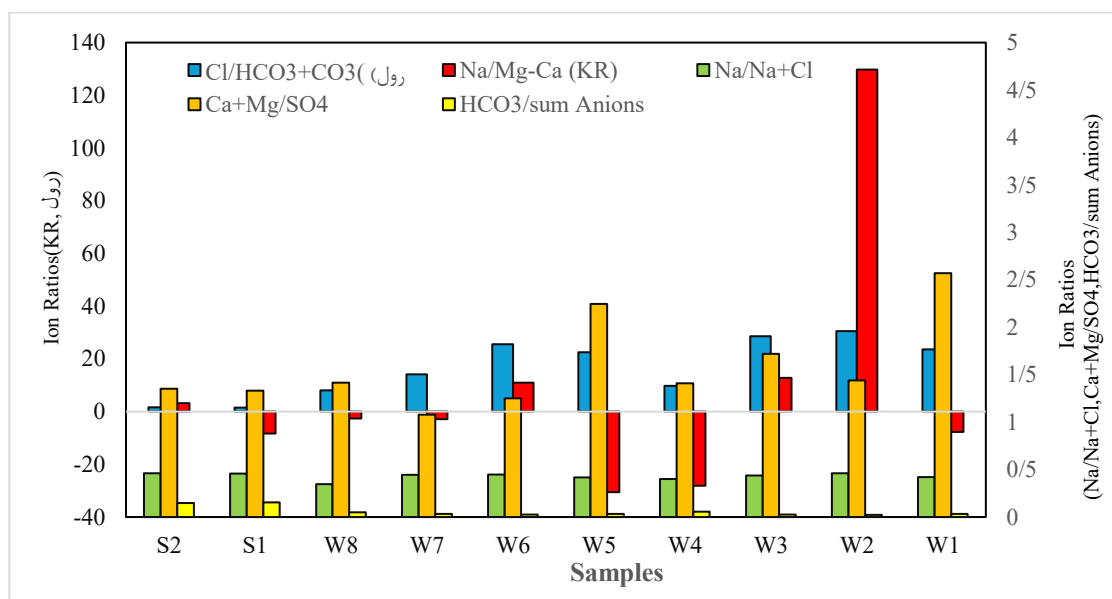
Figure(4): (a) %Na, (b) sulfate, (c) electrical conductivity (EC), and (d) pH in the study area

نسبت‌های یونی معرف‌های مناسبی برای بررسی شیمی منابع آب زیرزمینی هستند و استفاده از آن‌ها روش مناسبی برای تعیین منشأ املاح است. با استفاده از نسبت‌های یونی می‌توان به نوع کانی‌هایی که منشأ آنیون‌ها و کاتیون‌های محلول در آب هستند، پی برد (هانسلاو، ۱۹۹۵). شکل (۵) و جدول (۳) نسبت‌های یونی محاسبه شده برای نمونه‌های آب زیرزمینی محدوده ی مطالعاتی را نشان می‌دهند.

جدول (۳): نسبت‌های یونی محاسبه شده برای نمونه‌های آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

Table (3): Calculated Ion Ratios for Groundwater Samples in the Study Area

Parameters	S2	S1	W8	W7	W6	W5	W4	W3	W2	W1
Na/Na+Cl	0.462	0.459	0.348	0.445	0.449	0.416	0.402	0.438	0.46	0.42
Mg/Mg+Ca	0.54	0.485	0.445	0.377	0.56	0.48	0.486	0.559	0.505	0.415
Ca/Ca+So4	0.383	0.406	0.439	0.406	0.355	0.538	0.421	0.432	0.417	0.601
Ca+Mg/SO4	1.353	1.332	1.415	1.08	1.25	2.247	1.41	1.72	1.44	2.57
Cl/sumAnions	0.244	0.232	0.406	0.476	0.654	0.763	0.577	0.75	0.704	0.795
HCO3/sum Anions	0.149	0.153	0.05	0.033	0.025	0.033	0.058	0.026	0.023	0.033
Na+K-Cl/Na+K+Ca-Cl	-0.071	-0.079	-0.775	-0.318	-1.744	-8.466	-2.019	-9.95	-0.969	-4.73
CI/HCO3+CO3 (رول)	1.63	1.51	8.05	14.081	25.58	22.51	9.82	28.54	30.53	23.62
Na/Mg-Ca (KR)	3.22	-8.33	-2.58	-2.88	11.01	-30.52	-28.11	12.83	129.73	-7.703



شکل (۵): نسبت های یونی محاسبه شده برای نمونه های آب زیرزمینی محدوده ی مطالعاتی

Figure(5): Calculated ionic ratios for groundwater samples in the study area

با توجه به جدول (۳) تحلیل شیمیایی نمونه‌های آب (W1 تا W8، S1 و S2) در منطقه عسلویه، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه نفوذ آب شور دریا بر کیفیت آبخوان‌ها است. نسبت $Na/(Na+Cl)$ در تمامی نمونه‌ها، وقوع پدیده نرم‌شدگی معکوس را تأیید می‌کند. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که آب شور دریا با سفره‌های آب زیرزمینی ترکیب می‌شود و یون‌های سدیم به جای کلسیم و منیزیم قرار می‌گیرند. شواهد نشان می‌دهد که این فرآیند به‌ویژه در مناطق ساحلی مانند عسلویه که تحت تأثیر مستقیم آب دریا قرار دارند، تشدید می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده به‌وضوح آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی را در برابر نفوذ آب شور و لزوم توجه به مدیریت پایدار منابع آبی در این مناطق نمایان می‌سازد.

نسبت $Mg/(Ca+Mg)$ در نمونه‌های W2 و W5، نمایانگر انحلال دولومیت و ته‌نشینی کلسیت است. این نسبت به‌عنوان شاخصی برای شناسایی تغییرات شیمیایی ناشی از هوازدگی سنگ‌های کربناته عمل می‌کند. در نمونه‌های مذکور، نسبت بالای منیزیم احتمالاً به‌دلیل انحلال دولومیت و افزایش محتوای منیزیم در آب است. در مقابل، در سایر نمونه‌ها، هوازدگی دولومیت غالب است که به افزایش نسبی منیزیم نسبت به کلسیم اشاره دارد.

نسبت $Ca/(Ca+SO_4)$ در بیشتر نمونه‌ها، نشان‌دهنده حذف کلسیم یا فرآیندهای تبادل یونی است. در نمونه‌های خاصی مانند W1 و W5، منابع اضافی کلسیم از جمله ژئوپس و کربنات‌ها شناسایی شده‌اند. کاهش این نسبت می‌تواند ناشی از تبادل یونی یا رسوب کلسیم به‌دلیل تشکیل کربنات‌ها و سولفات‌های کلسیم باشد.

در خصوص نسبت $(Ca+Mg)/SO_4$ ، تنها در نمونه W7، فرآیند دولومیتی شدن به‌خوبی مشهود است. این پدیده ناشی از واکنش آب با سنگ‌های دولومیتی است که منجر به انحلال این سنگ‌ها و افزایش غلظت کلسیم و منیزیم در آب می‌شود. نسبت $Cl/Sum\ Anions$ در تمامی نمونه‌ها، هوازدگی سنگ را به‌عنوان منبع غالب آنیون‌ها نمایان می‌سازد. کلرید، یکی از آنیون‌های اصلی در آب‌های زیرزمینی، می‌تواند از هوازدگی سنگ‌های مختلف ناشی شود. این پدیده به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند عسلویه که تبخیر بالاست، رایج است و منجر به افزایش غلظت کلرید در آب‌های زیرزمینی می‌شود.

نسبت $\text{HCO}_3/\text{Sum Anions}$ در نمونه‌های W1 تا W3 نشان‌دهنده هوازگی غالب کربنات‌ها است، در حالی که در نمونه‌های دیگر، انحلال ژیپس مشهود است. حضور مقادیر بالای بی‌کربنات در نمونه‌های اولیه نشان‌دهنده هوازگی سنگ‌های کربناته مانند آهک است. در مقابل، کاهش این نسبت و افزایش سولفات در نمونه‌های دیگر نشان‌دهنده انحلال ژیپس، یک ماده معدنی سولفات است. نسبت $(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl})/(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl}+\text{Ca})$ در نمونه‌های W3 و W4 به هوازگی پلاژیوکلاز اشاره دارد. پلاژیوکلازها به‌عنوان کانی‌های سیلیکاته، در شرایط خاص هوازده شده و یون‌های سدیم و پتاسیم را به آب افزوده می‌کنند. این نسبت تأثیر هوازگی پلاژیوکلاز بر شیمی آب را نمایان می‌سازد.

نهایتاً، نسبت $\text{Cl}/\text{HCO}_3+\text{CO}_3$ در تمامی نمونه‌ها، تأثیر مستقیم نفوذ آب شور دریا بر کیفیت آبخوان را نشان می‌دهد. نسبت بالای این پارامتر، به‌ویژه در مناطق ساحلی مانند عسلویه، نمایانگر تأثیر منفی آب شور دریا بر افزایش غلظت کلرید و کاهش بی‌کربنات است. به‌علاوه، نسبت $\text{Na}/\text{Mg}-\text{Ca}$ نشان‌دهنده نامناسب بودن آب برای مصارف کشاورزی در تمامی نمونه‌ها است. نسبت بالای سدیم به کلسیم و منیزیم، که به دلیل تأثیرات منفی سدیم بر خاک و گیاهان، آب را برای این مصارف نامناسب می‌سازد، می‌تواند ناشی از نفوذ آب شور یا فرآیندهای تبادل یونی نامطلوب باشد.

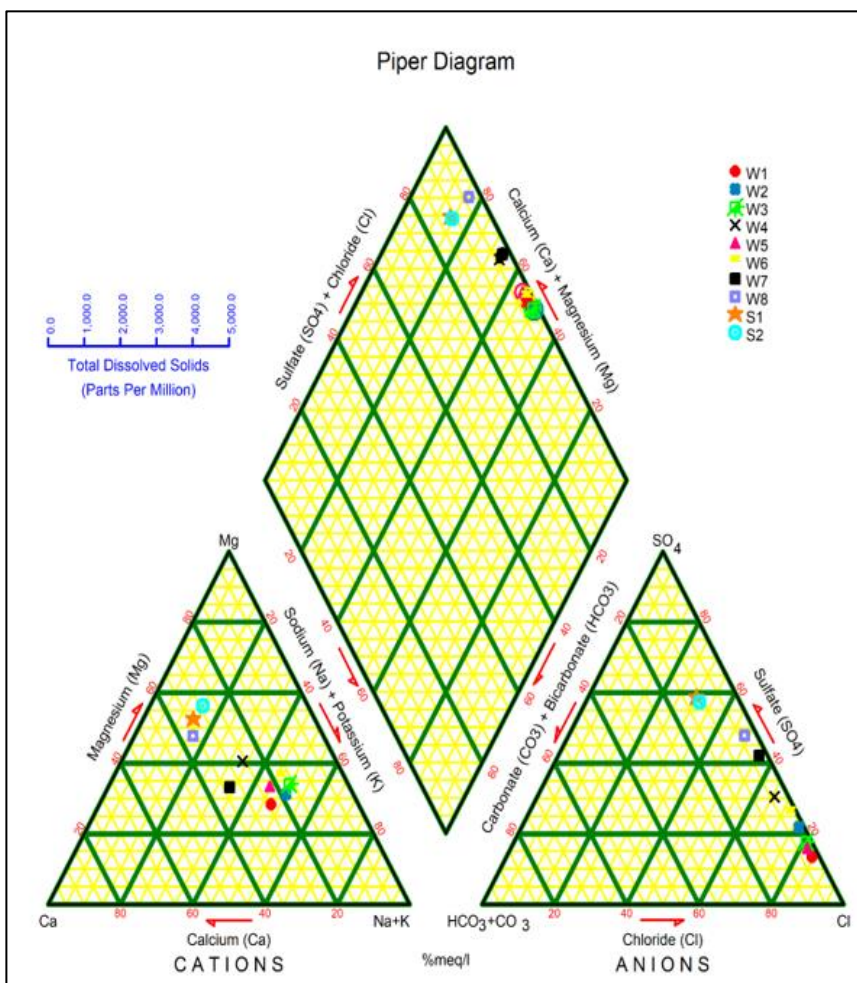
بررسی کیفی آب زیرزمینی برای مصارف مختلف با استفاده از نمایش نموداری

روش‌های گرافیکی که آنالیز آب را نشان می‌دهند، دارای دو هدف اصلی می‌باشند. هدف اول، ترسیم آنالیزها بر روی نقشه و هدف دوم، تعیین روندهای شیمیایی است. نمایش آنالیزها بر روی نقشه‌ها می‌تواند به دو روش انجام شود. یکی از روش‌های متداول، استفاده از پلات‌های گوناگون برای ارائه آنالیزهاست. روش بهتر و متداول‌تر، استفاده از برنامه‌های کنترولی کامپیوتری است. هر یک از پلات‌های کنترولی پایه^۱ یا پلات‌های سه‌بعدی فیشنت^۲ را برای داده‌ها می‌توان تهیه کرد. تحلیل‌های نتایج به دست آمده از نمودارهای هیدروشیمیایی در طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از نظر صنعت، شرب، کشاورزی و همچنین تعیین تیپ‌های آبی، مکانیسم‌های حاکم و تأثیر سازندهای مختلف بر کیفیت آب زیرزمینی و... کاربرد دارد. رخساره‌های هیدروشیمیایی جهت توصیف تفاوت‌ها در ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند (فتر^۳، ۲۰۱۸). جهت نشان دادن رخساره‌های هیدروشیمیایی عمداً از نمودارهایی مثل استیف^۴، پایپر^۵ و دوروف^۶ استفاده می‌شود.

تعیین تیپ و رخساره‌های شیمیایی

نتایج تحلیل نمودار پایپر حاکی از آن است که غلظت اسیدهای قوی در تمامی چاه‌ها و چشمه‌ها بیشتر از اسیدهای ضعیف است. همچنین، سختی غیرکربناتی در تمامی نمونه‌ها بیش از ۵۰ درصد گزارش شده است. نمونه‌های W7، W8، S1 و S2 به‌دلیل نزدیکی به منابع تغذیه و تأثیر سازندهای هیث-سرمه، به تیپ آب سولفات تعلق دارند. در مقابل، نمونه‌های دیگر که به نواحی تخلیه نزدیک‌تر هستند، تیپ آب کلروره دارند. رخساره آب S2 از نوع منیزیک و ناشی از انحلال سازندهای دولومیتی است که غلظت Ca و Mg را افزایش می‌دهد. همچنین، نمونه‌های S1 و W8 کلسیک و سایر نمونه‌ها سدیک هستند، که احتمالاً تحت تأثیر سنگ‌های تبخیری قرار دارند. (شکل ۶).

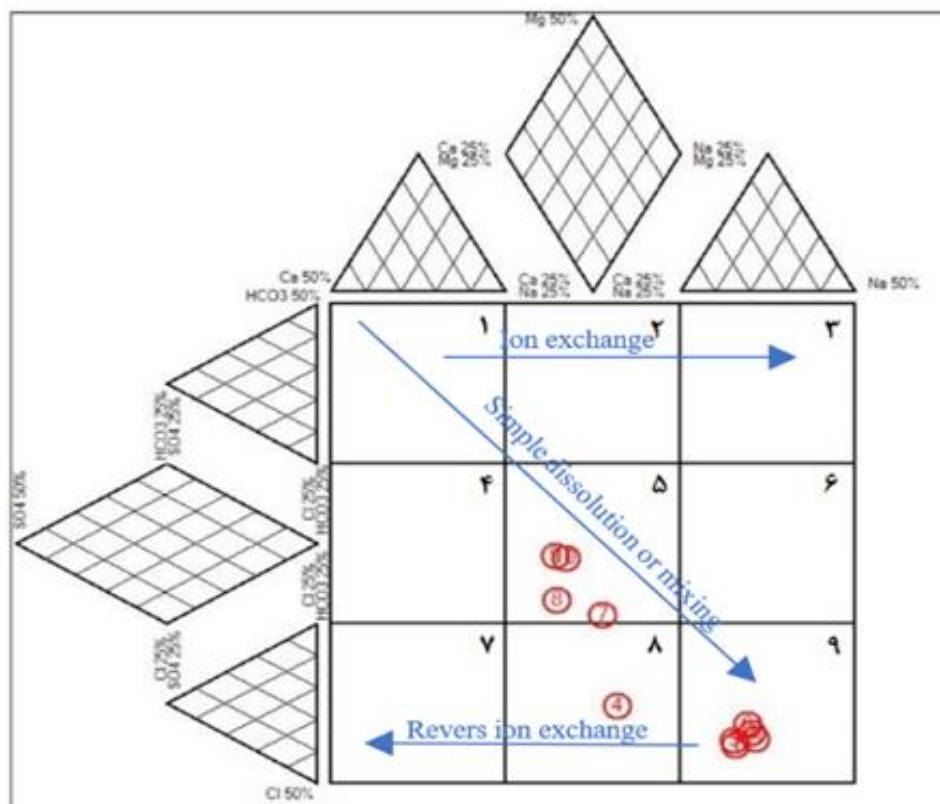
¹ Basic Contour Plots² Fishnet 3-D Plots³ Fetter⁴ Stiff⁵ Piper⁶ Durov



شکل (۶): نمودار پایپر نمونه‌های برداشت شده (شهریور ۱۴۰۱)

Figure (6): Piper diagram of the collected samples (September 2022)

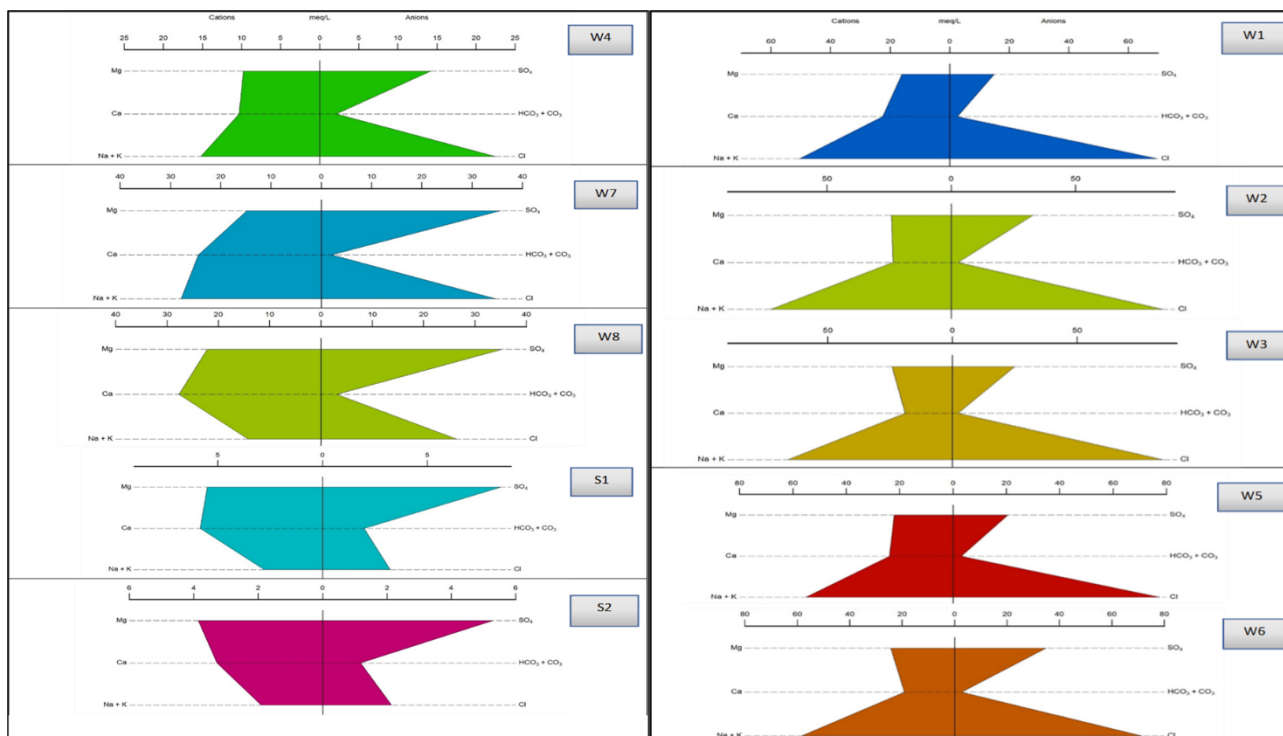
بر اساس تحلیل نمودار بسط داده شده دوروف، قرارگیری نمونه‌های S1، S2، W7 و W8 در زون ۵ به عدم وجود یون غالب در این نمونه‌ها اشاره دارد، که نشان‌دهنده فرآیندهای اختلاط یا انحلال مواد است. نمونه W4 در زون ۸ قرار دارد و حاکی از غالب بودن Cl^- و عدم وجود کاتیون غالب است که می‌تواند به فرآیند تعویض یونی معکوس نسبت داده شود. همچنین، سایر نمونه‌ها در زون ۹ قرار گرفته‌اند که وجود یون‌های غالب Na^+ و Cl^- را در آن‌ها نشان می‌دهد و به آب‌هایی اشاره دارد که به انتهای چرخه هیدرولیکی رسیده‌اند. در نهایت، قرارگیری نمونه‌ها در نواحی ۵ و ۹ می‌تواند به اختلاط ساده آب‌های زیرزمینی و همچنین احتمال منشأ یکسان آن‌ها اشاره کند. (شکل ۷)



شکل (۷): نمودار دوروف نمونه های آب زیرزمینی

Figure (7): Durov Diagram of Groundwater Samples

باتوجه به الگوهای بدست آمده از نمودارهای استیف رسم شده برای نمونه ها (شکل ۸)، چهار منشأ مختلف را می توان برای نمونه ها در نظر گرفت. چاه های (W1, W2, W3, W4, W5, W6) بر اساس این نمودار دارای منشأ یکسان هستند و تحت تاثیر آب شور دریا و یا سازند های شور کننده منطقه قرار گرفته اند. دو چاه W4 و W7 دارای الگوی متفاوتی نسبت به سایر چاه و چشمه هاست. اما چاه W8 الگوی شبیه به الگوی چشمه ها یعنی S1 و S2 دارد و می تواند یکسان بودن منشأ آب چاه و چشمه هارا از یک واحد یکسان تایید کند (واحد های آهکی و گچی).

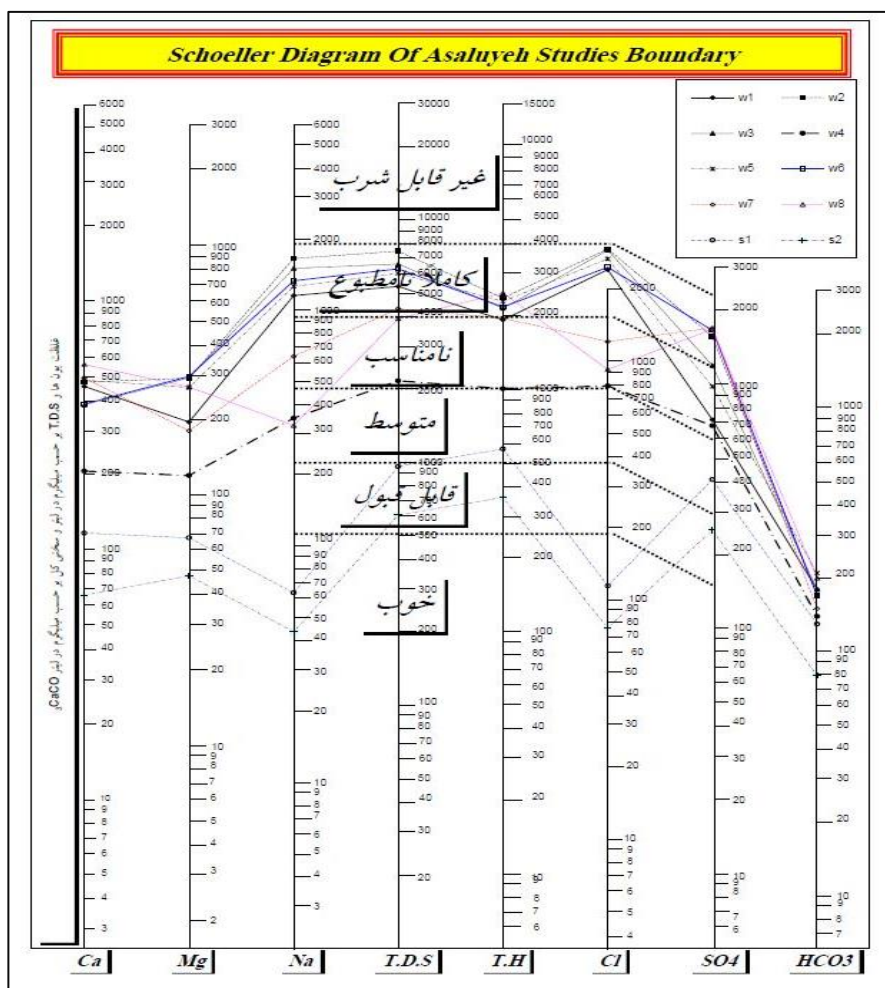


شکل (۸): دیاگرام استیف ترسیم شده برای نمونه‌های آب زیرزمینی (شهریور ۱۴۰۱)

Figure (8): Stiff Diagram of Groundwater Samples (September 2022)

بررسی کیفیت آب از نظر مناسب بودن برای اهداف کشاورزی و صنعت

نمودار شولر، که بر اساس استانداردهای آب آشامیدنی طراحی شده، کیفیت آب چاه‌ها را از "نامناسب" تا "نامطبوع" طبقه‌بندی می‌کند. بدترین کیفیت آب متعلق به چاه W2 است. همچنین، چشمه S1 (کلات) کیفیتی در حد "قابل قبول" تا "متوسط" و چشمه S2 (عسلویه-بیدخون) نیز کیفیت "قابل قبول" دارد. (شکل ۹)



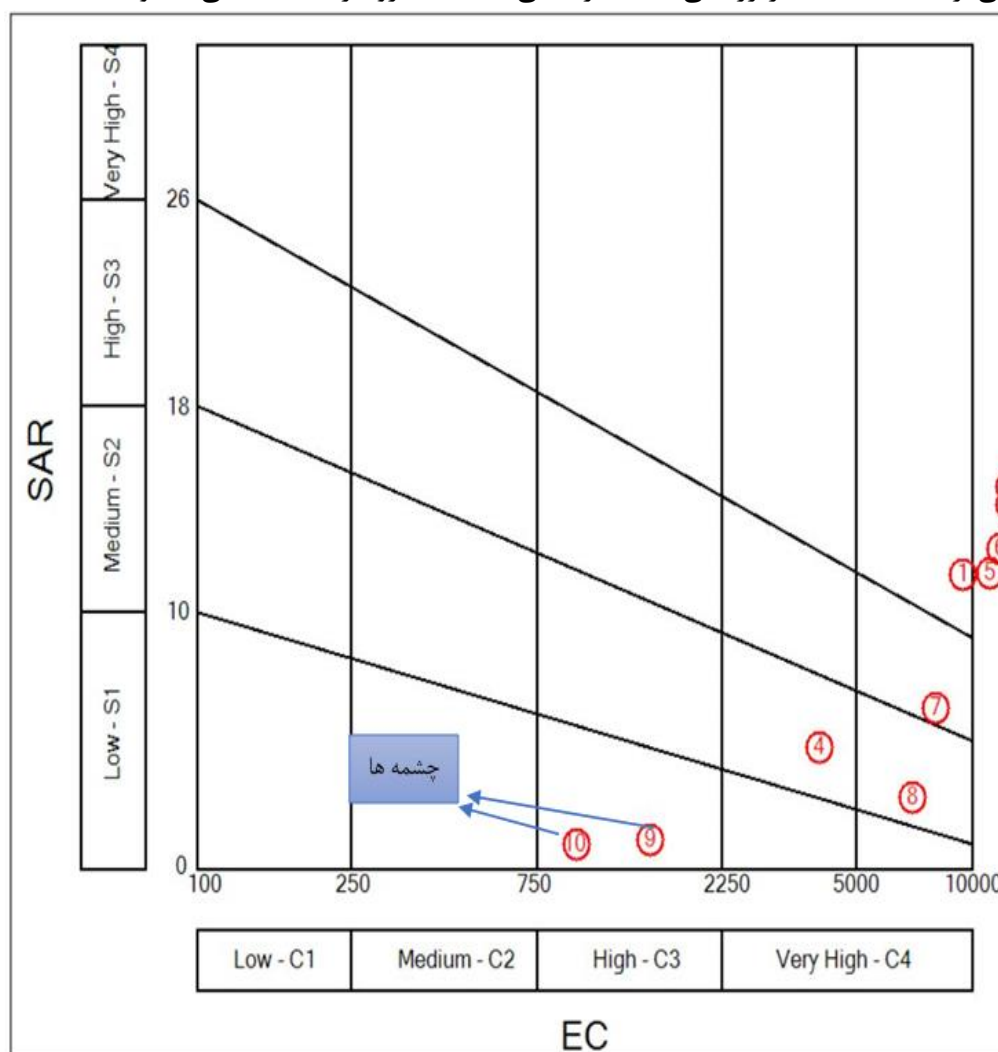
شکل (۹): نمودار شور برای نمونه های آب زیرزمینی

Figure (9): Schoeller Diagram for Groundwater Samples

بر اساس نمودار ویلکاکس همه‌ی چاه‌ها دارای آب خیلی شور و نامناسب برای کشاورزی می‌باشند، اما چشمه‌ها دارای کیفیت شور با قابلیت استفاده برای کشاورزی می‌باشند. علت اینکه چهار مورد از چاه‌ها خارج از محدوده نمودار افتاده است، محدود بودن محور EC تا ۱۰۰۰۰ می‌باشد و هدایت الکتریکی بیشتر از این مقدار را در بیرون از محدوده نمودار نشان می‌دهد. (شکل ۱۰) مقادیر نسبت جذب سدیم برای نمونه‌ها بین ۰/۹۹ تا ۱۴/۸۸ بدست آمد. از نظر درصد سدیم S1 در طبقه عالی، S2 و W8 در طبقه خوب، W1, W4, W5, W6 و W7 در طبقه قابل قبول قرار گرفت و همچنین W2 و W3 در طبقه مشکوک قرار می‌گیرند. نتایج بررسی کیفیت بر اساس درصد سدیم کربنات نیز نشان داد که تمامی نمونه‌ها برای کشاورزی مناسب می‌باشند. (جدول ۴) نمونه‌های برداشته شده جهت مصارف صنعتی از نظر پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، کیفیت تمام نمونه‌ها برای مصارف صنعتی رسوبگذار بوده بجز چشمه S2 که دارای آبی با کیفیت خورنده می‌باشد. همه نمونه‌ها دارای کیفیت کاملاً سخت هستند. (کلانتری^۱ و همکاران، ۱۳۳۳:۲۰۱۲) بر تحلیل غلظت فلزات سنگین و عناصر کمیاب در خاک و آب زیرزمینی دشت عسلویه پرداخته است و از روش‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های آماری برای شبیه‌سازی توزیع این عناصر استفاده کرده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در برخی مناطق، غلظت فلزاتی مانند سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) بالاتر از استانداردهای مجاز است که می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و

¹ Kalantari

بهداشتی داشته باشد. در مقابل، تحقیق حاضر به بررسی هیدروژئوشیمی و کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت عسلویه پرداخته است. این مطالعه با استفاده از نمودارهای گرافیکی مانند پایپر و دوروف و تحلیل‌های آماری چندمتغیره، فرآیندهای شیمیایی آب‌های زیرزمینی نظیر تعویض یونی معکوس و انحلال سنگ‌های کربناته را ارزیابی کرده است. همچنین، تأثیر فعالیت‌های صنعتی و نفوذ آب‌های شور بر کیفیت منابع آب بررسی شده است. در مقایسه، تحقیق کلانتری و همکاران بر آلودگی فلزات سنگین و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها تمرکز دارد، در حالی که تحقیق حاضر فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی و تأثیر شوری و ترکیب شیمیایی آب را مورد مطالعه قرار داده است. هر دو مطالعه درک جامعی از کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه ارائه می‌دهند اما با رویکردهای تحلیلی متفاوت.



شکل (۱۰): نمودار ویلکاکس نمونه‌های آب زیرزمینی (شهریور ۱۴۰۱)

Figure (10): Wilcox Diagram of Groundwater Samples (September 2022)

جدول (۴): مقادیر محاسبه شده معیارهای سنجش سدیم برای نمونه های آب زیرزمینی (شهریور ۱۴۰۱)
 Table (4): Calculated Sodium Assessment Criteria for Groundwater Samples (September 2022)

Quality Based on RSC	RSC	Quality Based on Na%	%Na	SAR	Abbreviation
Suitable	-35.7	Acceptable	56.66	11.48	w1
Suitable	-44.87	Suspicious	60.41	14.88	w2
Suitable	-40.3	Suspicious	60.39	14.16	w3
Suitable	-17.83	Acceptable	43.13	4.79	w4
Suitable	-42.65	Acceptable	54.55	11.51	w5
Suitable	-40.92	Acceptable	57.18	12.47	w6
Suitable	-36.8	Acceptable	41.56	6.28	w7
Suitable	-46.63	Good	22.17	2.83	w8
Suitable	-9.22	Excellent	19.73	1.15	s1
Suitable	-5.85	Good	21.15	0.99	s2

جدول (۵): ارزیابی نمونه های آب زیرزمینی جهت مصارف صنعتی از نظر پتانسیل خوردگی و رسوب گذاری
 Table (5): Assessment of Groundwater Samples for Industrial Uses in the Terms of Corrosion and Sedimentation Potential

Water Quality for Industrial Uses	pHs-pH	pH	pHs	Coefficient C	Ca(mg/l)	Alkalinity asCaO	Abbreviation
Depositional	-1.54	7.14	5.6	11.35	452	1163.31	w1
Depositional	-2.26	7.76	5.5	11.36	471	1673.29	w2
Depositional	-1.12	6.72	5.6	11.35	381.2	1517.9	w3
Depositional	-0.85	7.35	6.5	11.33	206.6	352.26	w4
Depositional	-1.65	7.25	5.6	11.35	479	1273.09	w5
Depositional	-1.82	7.42	5.6	11.35	384.2	1343.79	w6
Depositional	-1.24	7.04	5.8	11.34	489	643.44	w7
Depositional	-1.22	7.32	6.1	11.34	553.8	328.34	w8
Depositional	-0.05	7.45	7.4	11.31	116.8	64.97	s1
Corrosive	0.53	7.27	7.8	11.3	65.8	44.96	s2

نتیجه‌گیری

این پژوهش با تحلیل جامع هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت عسلویه، نشان داد که فعالیت‌های صنعتی و توسعه سریع پتروشیمی در این منطقه به کاهش قابل توجه کیفیت منابع آبی منجر شده است. نتایج بررسی پارامترهای کیفی مانند غلظت یون‌های کلیدی، هدایت الکتریکی (EC)، pH و درصد سدیم نشان‌دهنده تأثیرات معنادار نفوذ آب شور دریایی و تخلیه پساب‌های صنعتی بر وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان‌های منطقه است. به‌ویژه، غلظت بالای سولفات در نمونه‌های آب واقع در نواحی جنوبی و غربی منطقه (۹۳-۲۰ mg/l) به همراه درصد بالای سدیم (۴۴/۱۴-۶۰/۴۱٪)، تأثیر مستقیم نفوذ آب‌های شور را تأیید می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر فرآیندهای طبیعی، فعالیت‌های انسانی از جمله توسعه پتروشیمی و برداشت بی‌رویه منابع آب، به‌ویژه در نواحی نزدیک به ساحل، عامل اصلی کاهش کیفیت آب زیرزمینی است.

تحلیل‌های گرافیکی و آماری، از جمله نمودارهای پایپر و دوروف، ترکیب پیچیده‌ای از فرآیندهای هیدروشیمیایی شامل تعویض یونی معکوس، انحلال دولومیت و تأثیر سنگ‌های کربناته و تبخیری را برجسته ساخت. نمونه‌های آب با تیپ سولفاته و کلروره شناسایی شدند، که نشان‌دهنده تأثیرات گسترده اختلاط آب‌های شور و شیرین و تغییرات هیدروژئوشیمیایی در آبخوان‌های منطقه است. از دیگر یافته‌های مهم این مطالعه می‌توان به تأثیر منفی افزایش شوری و درصد سدیم بر کیفیت آب کشاورزی و صنعتی اشاره کرد. بررسی‌ها نشان داد که بیشتر چاه‌های منطقه به دلیل شوری بالا برای مصارف کشاورزی نامناسب هستند، در حالی که برخی از چشمه‌ها هنوز کیفیت قابل قبولی دارند. همچنین، آب‌های مورد بررسی برای مصارف صنعتی عمدتاً رسوب‌گذار بوده و فقط یکی از چشمه‌ها (S2) خاصیت خوردندگی نشان داد.

References

- Ahmadi, S., Jahanshahi, R., Moeini, V., & Mali, S. (2017). Evaluation of groundwater resources in the copper mine area of Ardestan, Isfahan province. *Iranian Quaternary Journal*, 4(3), 387–403.
- Benadela Laouni, Bekkoussa Belkacem, Gaidi Laouni. 2022. Multivariate analysis and geochemical investigations of groundwater in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(3): 233-249. [doi: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.03.003](https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.03.003)
- Bouwer, H. (1978). *Ground water*. McGraw-Hill Inc.
- Brhane, G. K. (2018). Characterization of hydrochemistry and groundwater quality evaluation for drinking purpose in Adigrat area, Tigray, northern Ethiopia. *Water Science*, 32(2), 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.07.001>.
- Chidambaram, S., Karmegam, U., Prasanna, M. V., Sasidhar, P., & Vasanthavigar, M. (2011). A study on hydrochemical elucidation of coastal groundwater in and around Kalpakkam region, Southern India. *Environmental Earth Sciences*, 64, 1419–1431. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0957-4>.
- Cortes, J. E., Muñoz, L. F., Gonzalez, C. A., Niño, J. E., Polo, A., Suspes, A., Siachoque, S. C., Hernández, A., & Trujillo, H. (2016). Hydrogeochemistry of the formation waters in the San Francisco field, UMV basin, Colombia – A multivariate statistical approach. *Journal of Hydrology*, 539, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.029>.
- Dalton, M. G., & Upchurch, S. G. (1978). Interpretation of hydrochemical faces by factor analysis. *Journal of Groundwater*, 16(4), 228–233.

- Fetter, C. W., Boving, T., & Kreamer, D. (2017). *Contaminant hydrogeology* (3rd ed.). Waveland Press.
- Hadipour Hafshejani, Z., Nassery, H., & Alijani, F. (2018). The hydrogeochemical processes of Kuhdasht aquifer. *Hydrogeology*, 3(1), 32–46. <https://doi.org/10.22034/hydro.2018.5508>.
- Hassanzadeh, R., Abbasnejad, A., & Hamzeh, M. A. (2011). Assessment of groundwater pollution in Kerman urban areas. *Journal of Environmental Studies*, 36(56), 101–110. (In Persian). [20.1001.1.10258620.1389.36.56.6.5](https://doi.org/10.1001.1.10258620.1389.36.56.6.5)
- Hounslow, A. (1995). *Water quality data: Analysis and interpretation*. CRC Press.
- Jabraili Andarian, N., Nadiri, A. A., & Gharekhani, M. (2024). Investigating the quantity and quality of groundwater and its effect on the hydrogeochemistry of the Azarshahr plain aquifer and identifying the possible source of contamination. *Hydrogeomorphology*, 11(38), 60–79. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.58969.1710>
- Kalantari, N., Sajadi, Z., Makvandi, M., & Keshavarzi, M. R. (2012). Chemical properties of soil and groundwater of the Assaluyeh alluvial plain with emphasis on heavy metals contamination. *Journal of Geotechnical Geology (Applied Geology)*, 7(4), 333–342. <https://sid.ir/paper/127072/en>
- Karimi, S., Mohammadi, Z., & Samani, N. (2017). Evaluation of hydrochemical characteristics of groundwater and salinity evolution in Semnan Plain. *Hydrogeology*, 2(1), 1–19. [10.22034/hydro.2017.5237](https://doi.org/10.22034/hydro.2017.5237).
- Khawla, K., & Mohamed, H. (2020). Hydrogeochemical assessment of groundwater quality in greenhouse intensive agricultural areas in coastal zone of Tunisia: Case of Teboulba region. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100335. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100335>.
- Koundouri, P., & Groom, B. (2009). Groundwater management: An overview of hydro-geology, economic values, and principles of management. *Groundwater-Volume III*, 101.
- Kubicz, J., Lochyński, P., Pawełczyk, A., & Karczewski, M. (2021). Effects of drought on environmental health risk posed by groundwater contamination. *Chemosphere*, 263, 128145. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128145>.
- Lakshmanan, E., Kannan, R., & Senthil Kumar, M. (2003). Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of groundwater in a part of Kancheepuram district, Tamil Nadu, India. *Environmental Geosciences*, 10(4), 157–166. <https://doi.org/10.1306/eg.0820303011>.
- Monjerezi, M., Vogt, R. D., Aagaard, P., & Saka, J. D. (2012). The hydro-geochemistry of groundwater resources in an area with prevailing saline groundwater, lower Shire Valley, Malawi. *Journal of African Earth Sciences*, 68, 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.07.002>
- Nadiri, A., Navin, F., Barzegari, A., Ojaghi, M., & Nouri, N. (2022). Investigating the hydrochemistry and quality of water resources in the Hajilarchai basin and determining the origin of trace elements. *Hydrogeomorphology*, 8(29), 127–148. <https://doi.org/10.22034/hyd.2022.48533.1609>.
- Piper, A. M. (1944). A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union*, 25, 914–923.
- Ravindra, K., Thind, P. S., Mor, S., Singh, T., & Mor, S. (2019). Evaluation of groundwater contamination in Chandigarh: Source identification and health risk assessment. *Environmental Pollution*, 255, 113062. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113062>.
- Redwan, M., & Moneim, A. A. A. (2016). Factors controlling groundwater hydrogeochemistry in the area west of Tahta, Sohag, Upper Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 118, 328–338. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.10.002>.

- Şener, Ş., Şener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584, 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.102>.
- Shrestha, S., Bach, T. V., & Pandey, V. P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy*, 61, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.001>.
- Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (1999). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Kluwer Academic Publishers.