



Investigating Changes in the Quality of Groundwater in the Karst Aquifer of Al-Shatar Plain

Aryan Heidari Motlagh^{1*}, Shadman Veysi²

1. Department of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.
2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Received: 08 January 2024/ **Revised:** 22 February 2024/ **Accepted:** 04 March 2024

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2019926.1007>

Abstract

Groundwater is one of the most important sources of fresh water. With the increase in world population and water demand for agriculture and urban use, the need for water resources has risen, with groundwater playing a crucial role. In this study, Dasht aleShtar, a typical region of Iran with a temperate climate, was selected as a case study to evaluate the quality of groundwater in the region using data from 17 observation wells between 1366 and 1397. For this purpose, information from deep wells in the plain, including pH, K, Cl, EC, TDS, Mg, HCO₃, Na, SAR, SO₄, TH, and Ca, was utilized. The Mann-Kendall test was used to check the trend of changes. The results showed that the patterns of changes in pH, K, Cl, EC, TDS, and Mg parameters had an increasing trend, and this increase was significant at the 95% confidence level. On the other hand, because the Z-statistics of HCO₃, Na, SAR, SO₄, TH, and Ca parameters were negative, their changes are decreasing. However, the decreasing trend of Ca is significant at the 99% confidence level. To measure the relationship between groundwater quality variables, Pearson's correlation coefficient was calculated for the Al-Shatar area. The highest positive correlations were between TDS and EC (R=0.98), Na and SAR (R=0.93), and HCO₃ and TH (R=0.93). The correlation between Ca and TH (R=0.80) is also noteworthy. Using ArcGIS software, a map of groundwater quality parameters was prepared in the study area for quality assessment. According to the water is suitable for agricultural use in the region. Schuler's diagram shows that all examined samples are in the good drinking class.

Keywords: Geographic information system, Ground water, Hydrogeochemical, Wilcox diagram.



بررسی تغییرات کیفی آب زیرزمینی آبخوان کارستی دشت الشتر

آرین حیدری مطلق^{۱*}، شادمان ویسی^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، بخش آبیاری و فیزیک خاک، کرج، ایران.

دریافت: ۱۸ دی ماه ۱۴۰۲/اصلاحات: ۰۳ اسفند ماه ۱۴۰۲/پذیرش: ۱۴ اسفند ماه ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2019926.1007>

چکیده

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آبی شیرین می‌باشند. با افزایش جمعیت جهان و تقاضای آب برای کشاورزی و استفاده شهری، نیاز به منابع آب افزایش یافته است، بنابراین منابع آب زیرزمینی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. در این مطالعه، دشت الشتر، با اقلیم معتدل، به عنوان یک مطالعه موردی برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه با استفاده از داده‌های ۱۷ چاه مشاهده‌ای بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۷ انتخاب شد. برای این منظور از اطلاعات چاه‌های عمیق موجود در دشت که شامل: TDS, EC, Cl, K, pH, Mg, HCO₃, Na, SAR, So₄, TH و Ca استفاده گردید. برای بررسی روند تغییرات از آزمون من کندانال استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوی تغییرات پارامترهای TDS, EC, K, Cl, pH و Mg دارای روندی افزایشی بوده‌اند که این روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده است. از سوی دیگر، آماره‌ی Z پارامترهای HCO₃, Na, SAR, So₄, TH و Ca منفی بوده است، لذا روند تغییرات آن‌ها به صورت کاهشی مشاهده گردید. برای اندازه‌گیری رابطه بین متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی، ضریب همبستگی پیرسون برای ناحیه الشتر محاسبه شد. بالاترین همبستگی مثبت به ترتیب بین TDS و EC (R=0.98)، Na و SAR (R=0.93) و HCO₃ و TH (R=0.80) بوده است. با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS، نقشه پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه برای ارزیابی کیفیت تهیه شد. با توجه به نمودار ویلکاکس، همه‌ی نمونه‌ها کیفیت آب جهت کشاورزی در رده‌ی C2S1 قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده آب زیرزمینی مناسب برای استفاده کشاورزی در منطقه می‌باشد. نمودار شولر نشان می‌دهد که همه‌ی نمونه‌های بررسی شده در کلاس خوبی برای نوشیدن قرار دارند.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، هیدروژئوشیمیایی، روند تغییرات نمودار ویلکاکس، سیستم اطلاعات جغرافیایی.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یک منبع طبیعی بسیار مهم برای بشریت هستند، زیرا حدود ۳۰ درصد از کل منابع آب شیرین جهان را تشکیل می‌دهد. آب‌های زیرزمینی تقریباً نیمی از کل آب آشامیدنی در سراسر جهان را تأمین می‌کند (Li et al., 2020). تخمین زده می‌شود که بیش از ۱/۵ میلیارد نفر در سراسر جهان برای امرار معاش خود به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند (Adimalla and Li 2019; He et al., 2020). همچنین آب‌های زیرزمینی قابل اعتمادترین و ضروری‌ترین منبع آب شیرین در مناطق نیمه‌خشک و خشک است (Machiwal and Jha, 2015; Adimalla and Wu, 2019). به همین دلیل توسعه اقتصاد و گسترش شهرنشینی، تشدید فعالیت‌های انسانی بر کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی تأثیر منفی گذاشته است (Ray et al., 2017; Li et al., 2017) با این حال، تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی ممکن است خطری جدی برای سلامت و اکوسیستم انسان ایجاد کند. مطالعات گذشته شواهدی مبنی بر کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی ارائه کرده است، که حدود ۷۰ درصد از منابع آب زیرزمینی شهری و بیش از ۸۰ درصد از منابع آب زیرزمینی روستایی را به دلیل آلودگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی برای مصارف انسانی ناسالم اعلام کرده است (Tahir et al., 2010; Imran et al., 2015; Ashraf, 2016). علاوه بر این، کیفیت آب زیرزمینی اساساً تحت تأثیر مسیرهای معدنی و تغذیه سنگ آبخوان است (Gu et al., 2018; Kumar et al., 2019).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که آب اغلب کمیاب است، کیفیت آب زیرزمینی نه تنها به منابع آب موجود برای مصارف خانگی، کشاورزی و صنعتی مرتبط است، بلکه یک نگرانی عمده برای سلامت عمومی ایجاد کرده است (Kaur et al., 2020, Xiao et al., 2021; Kaur et al., 2019; Celebi et al., 2015). از طرفی نیز صنعتی شدن سریع که نیاز روز بسیاری از کشورهای توسعه نیافته است نیز به آلودگی آب‌های زیرزمینی کمک می‌کند (Kumar et al., 2019). پساب‌های صنایع، فاضلاب‌های خانگی، محل‌های تخلیه، کودها همگی باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی با نفوذ به داخل سفره‌های زیرزمینی می‌شوند و تهدیدات قابل توجهی را ایجاد می‌کنند. از آنجایی که آلودگی آب‌های زیرزمینی و کمبود آب آشامیدنی پاک و سالم بر سلامت و طول عمر افراد در بسیاری از کشورهای در حال توسعه جهان تأثیر گذاشته است (Karunanidhi et al., 2021). کشورهای مناطق خشک و نیمه خشک، به‌ویژه هند، ایران، و بسیاری دیگر از کشورهای در حال توسعه با منابع آبی نسبتاً کمیاب، مشکلات بقای ناشی از کمبود منابع آب زیرزمینی و بدتر شدن کیفیت آب را تجربه می‌کنند (Bulut et al., 2020, Adimalla and Qian, 2019; Garg and Kaur et al., 2019; Liu et al., 2021). همین‌طور در کشورهای در حال توسعه جایی که آب‌های سطحی کم و به‌طور نابرابر توزیع شده است از آب‌های زیرزمینی برای اهداف مختلفی استفاده می‌شود. آب زیرزمینی به دلیل عدم تعادل بین منابع آب موجود و توسعه جمعیت مصرف می‌شود (Foster, 1995; Singh et al., 2011; Chen et al., 2018). فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مختلف، مانند شستشوی کودها، تبادل یونی، تبخیر-تعرق، فعالیت‌های بیژنیک و انحلال مواد معدنی، خواص شیمیایی آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کنند (Ahmed et al., 2019). همین‌طور غلظت بالای کلرید (Cl⁻)، فلوراید (F⁻)، فلزات کمیاب، و مواد دارویی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها و ضد میکروب‌ها در آب‌های زیرزمینی عوامل مهم تأثیرگذار بر سلامت انسان در بسیاری از مناطق جهان می‌باشند (Wu et al., 2020; Bazeli et al., 2020; He et al., 2019). آب‌های زیرزمینی، با تجمع زیستی و ماندگاری بالا هستند (Saha et al., 2017; Bhutiani et al., 2016). آلودگی فلزی در آب‌های زیرزمینی ممکن است در اثر فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی، مانند هوازگی مواد معدنی، تولیدات کشاورزی، زباله‌های صنعتی و خانگی ایجاد شود (Varol and Tokatli, 2022; Shams et al., 2020). اگرچه برخی از فلزات کمیاب برای عملکردهای فیزیولوژیکی بدن در یک مقدار محدود ضروری هستند، اما مصرف بیش از حد نیز می‌تواند اثرات سمی ایجاد کند، در حالی که سایر فلزات ممکن است حتی در غلظت‌های پایین مضر باشند (Ukah et al., 2019). از جمله وجود سولفات، نیترات، فلوراید و فلزاتی مانند کلسیم، منیزیم، سدیم، منگنز، کادمیوم، نیکل، کروم و آرسنیک در آب آشامیدنی در بالاتر از حد مجاز با مشکلات مرتبط با سلامتی همراه هستند (Tyagi and sarma et al., 2020; Rashid et al., 2020). در زمینه بررسی کیفیت مکانی و زمانی آب‌های زیرزمینی در داخل و خارج از ایران مطالعاتی صورت گرفته است که در ذیل به آن‌ها پرداخته می‌شود:

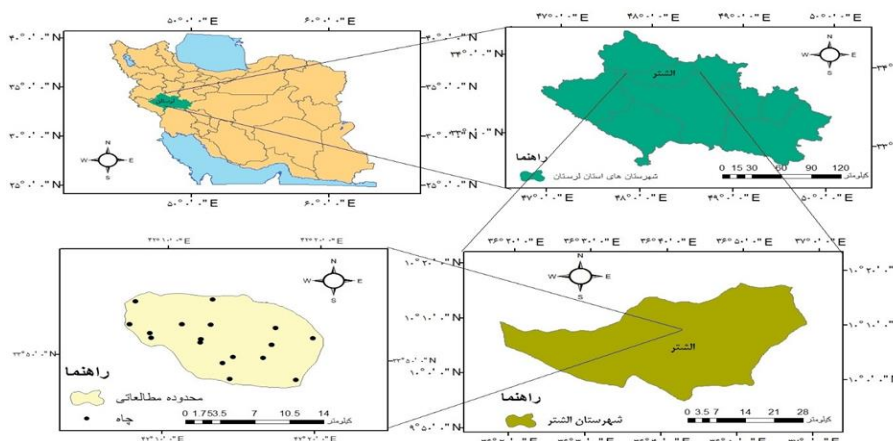
رشید و همکاران (Rasheed et al., 2022) در ارزیابی کیفیت و در دسترس بودن آب زیرزمینی: مطالعه موردی منطقه Jhelum در پاکستان به این نتیجه رسیدند که بر اساس پهنه‌بندی آب زیرزمینی منطقه مقدار شوری، آرسنیک و فلوراید بسیار بالا ارزیابی شده است

این مطالعه نشان می‌دهد که آب شیرین در منطقه مورد مطالعه کمیاب و آب با کیفیت آسیب‌پذیر است و نیاز به مدیریت یکپارچه کمی و کیفی آب دارد. ژانگ و همکاران (Zhao et al., 2022) در توصیف کیفیت آب زیرزمینی شرب در مناطق روستایی مغولستان و ارزیابی خطرات سلامتی انسان بر اساس تکنیک درون‌یابی با وزن معکوس فاصله (IDW) نشان دادند که مناطق بسیار آلوده عمدتاً در مناطق مرکزی و غربی مغولستان پراکنده شده است و تاثیرگذارترین پارامترها برای خطرات سلامتی شامل غلظت بالای غلظت آرسنیک، منگنز، فلئور و کروم می‌باشد. وانگ و همکاران (Wang et al., 2021) در تجزیه و تحلیل هیدروشیمیایی، عوامل کنترل‌کننده و ویژگی‌های آلاینده آب‌های زیرزمینی در ناحیه بالادست رودخانه زرد در شمال چین به این نتیجه رسیدند که آلودگی نیتروژنی آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و کودهای شیمیایی است و آلودگی فلئور ناشی از انحلال فلوریت است. همچنین نتایج ارزیابی خطر سلامت نیز نشان داد که ۵۷ درصد و ۲۱ درصد نمونه‌ها به ترتیب خطرات سلامتی غیرقابل قبولی برای کودکان و بزرگسالان داشته‌اند. رافی شریف‌آباد (Rafei Sharif Abad et al., 2017) نیز در بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی جهت شرب و کشاورزی بر اساس دیگرام شولر و ویلکاکس در دشت یزد-اردکان نشان دادند که با گذشت زمان بر میزان آلودگی قسمت‌های شمالی و شرقی افزوده می‌شود و دلایل کاسته شدن کیفیت آب را از یک‌سو افزایش برداشت به دلیل گسترش نواحی شهری و فعالیت‌های صنعتی و از سوی دیگر خشکسالی‌های اخیر عنوان کرده‌اند. هوشمند و همکاران (Hooshmand et al., 2012) بررسی منابع شوری آب‌های زیرزمینی با استفاده از GIS در دشت گنوند پرداختند. نتایج نشان داد شرایط هیدروژئولوژیکی باعث بدتر شدن کیفیت آب در شرق دشت می‌شود. گسل راندگی در نزدیکی رسوبات آبرفتی قرار دارد که باعث افت کیفیت آب در این بخش از دشت شده است. همچنین نمودارهای ترکیبی و نقشه‌های هم‌تراز مانند هدایت الکتریکی، کلرید، سولفات و کلسیم نشان‌دهنده تخریب کیفیت آب به دلیل محلول گچ و نمک در سازند گچساران و مصرف آب اضافی برای اهداف کشاورزی در دشت گنوند است. منطقه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، الشتر می‌باشد که در استان لرستان واقع شده است. بخش اعظم آب زیرزمینی این منطقه برای مصارف کشاورزی برداشت می‌شود که به دلیل فشار زیاد به آبخوان با افت بیش از حد سفره‌های زیرزمینی همراه بوده است. لذا هدف از این تحقیق بررسی مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان الشتر با استفاده از پارامترهای هیدروشیمیایی است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت الشتر (سلسله)، با وسعتی بیش از ۸۰ هزار هکتار (۵۰/۲۵ درصد از کل مساحت شهرستان) در شمال شهرستان سلسله و شمال استان لرستان واقع می‌باشد. تنها کانون شهری این ناحیه الشتر است که در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی قرار دارد. حوضه‌ی مطالعاتی الشتر دارای سیمای تقریباً کوهستانی است، به طوری که تیپ کوه‌ها و تپه‌ها بیش از ۶۵.۳۹ درصد اراضی را به خود اختصاص داده‌اند. حداکثر ارتفاع حوضه ۳۶۰۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۵۰۰ متر با ارتفاع متوسط ۲۱۱۶ و ارتفاع میانه‌ی ۲۱۰۰ است (شکل ۱). به طور کلی این منطقه از نظر اقلیمی نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان سرد می‌باشد و مجموعه بارش سالیانه این منطقه حدود ۵۱۵ میلی‌متر می‌باشد (Heidari motlagh et al., 2023). شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه دشت الشتر و آبخوان مربوط به آن
 Fig. 1. Geographical location of the study area of Aleshtar Plain and its related aquifer

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، داده‌های ۱۷ چاه مشاهده‌ای برای یک دوره از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۷ برای مطالعه مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). اطلاعات ۱۷ چاه مشاهده‌ای در این مطالعه توسط سازمان آب منطقه‌ای لرستان برداشت شده است، موقعیت چاه‌ها در این منطقه را نشان می‌دهد. براساس میانگین داده‌های سالانه جمع‌آوری شده، ۱۲ پارامتر فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند. این اطلاعات شامل کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، سدیم (Na)، کلر (Cl)، سولفات (So₄)، سختی کل (TH^۱)، نسبت جذب سدیم (SAR)، هدایت الکتریکی (EC^۲)، کل جامدات محلول (TDS^۳)، بی‌کربنات (HCO₃) و اسیدیته (pH) می‌باشد.

آزمون من کندال

آزمون من کندال^۴ یکی از متداول‌ترین روش‌های پارامتری تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به‌شمار می‌رود. این آزمون به دو روش: الف- آزمون آماره Z و ب- آزمون نموداری قابل انجام است. مطالعات مختلف انجام شده با استفاده از این روش حاکی از اهمیت و کاربرد فراوان آن در تحلیل روند سری‌های زمانی می‌باشد (Khalili and Bazrafshan, 2004). آزمون من کندال ابتدا توسط من (Mann, 1945) ارائه و سپس توسط کندال (Kendall, 1975) توسعه یافت. کاربرد این روش توسط سازمان جهانی هواشناسی توصیه گردید، همچنین این روش برای آزمون فرض تصادفی بودن توالی داده‌ها در مقابل روند استفاده می‌گردد (Hejam et al., 2008). از نقاط قوت روش من کندال می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع خاصی پیروی نمی‌کنند، اشاره نمود. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است (Khalili and Bazrafshan, 2004). در این روش آماره S برای ماه گام و ایستگاه kام با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد: که در آن n تعداد داده‌های سری می‌باشد و sgn تابع علامت و تفاضل دو مشاهده در هر یک از پارامترهای مورد بررسی در سال‌های مختلف i و j بوده که به‌صورت معادله (۲) تعریف می‌شود. وقتی $n \geq 10$ باشد، آماره S تقریباً به‌طور نرمال توزیع شده و دارای میانگین صفر و انحراف معیار (۳) است. که در آن d تعداد داده‌های یکسان در سری زمانی و V واریانس می‌باشد. در این روش Sgk به‌صورت معادله (۴) نرمال می‌شود. سپس آماره آزمون یا Z استاندارد شده که دارای توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس ۱ است، به شرح معادله (۵) به دست می‌آید. چنانچه مقدار Z بزرگ‌تر از ± 1.96 باشد داده‌ها دارای روند می‌باشند و فرض صفر رد می‌شود در غیر این صورت فاقد روند است. در رابطه (۵)، Z: آماره توزیع نرمال استاندارد می‌باشد و در یک آزمون دو دامنه بسته به سطوح اعتماد مورد آزمون می‌تواند مقادیر مختلفی به خود گیرد و S: پارامتر روش من کندال است که به نحوه محاسبه آن در بالا اشاره گردید. مقدار آماره Z برای سطوح اطمینان ۹۵٪ و

1 - Total Hardness
 2 - Electrical Conductivity
 3 - Total Dissolve Solids
 4 - Man-Kendall

۹۹٪ به ترتیب برابر با ۱/۹۶ و ۲/۵۸ در نظر گرفته می‌شود. برای ترسیم گراف من کندال دو دنباله‌ی U و U' در برابر هم ترسیم می‌شوند. دنباله‌ی U مقادیر سری زمانی پارامتر و دنباله‌ی U' همان مقادیر پارامتر در برابر ترتیب برعکس زمان می‌باشند. برای تعیین روند و نقاط جهش (تغییر ناگهانی در روند)، U نسبت به محور x و U' نسبت به محور y ترسیم می‌گردند.

$$S_{gk} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} \text{sgn}(X_{jgk} - X_{igk}), \forall i < j \leq n \quad (1)$$

$$\text{Sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$V_{(gg)k} = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum d(d-1)(2d+5)]}{18} \quad (3)$$

$$S'_{gk} = S_{gk} - \text{sgn}(S_{gk}) \quad (4)$$

$$Z_{gk} = \frac{S'_{gk}}{(\sigma_{gg})} \quad (5)$$

روش زمین‌آمار

در بررسی‌های آمار کلاسیک نمونه‌های به‌دست آمده از جامعه، عمدتاً به‌صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شوند و مقدار اندازه‌گیری شده‌ی یک کمیت معین در یک نمونه‌ی خاص، هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره‌ی مقدار همان کمیت در نمونه‌ی دیگر و به فاصله‌ی معلوم نخواهد داشت. در صورتی که در زمین‌آمار، بین مقادیر یک کمیت در جامعه، نمونه‌ها، فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه‌ها نسبت به هم ارتباط برقرار می‌شود. همچنین در آمار کلاسیک، فرض می‌شود که تغییرپذیری یک متغیر تصادفی است. در صورتی که در زمین‌آمار، بخشی از آن تصادفی و بخش دیگر آن دارای ساختار و تابع فاصله و جهت است. بنابراین در زمین‌آمار ابتدا به بررسی وجود یا نبود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار مکانی تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. زمین‌آمار شاخه‌ای از علم آمار است که مبتنی بر نظریه‌ی متغیرهای ناحیه‌ای است. هر متغیری که در فضای سه بعدی توزیع شده باشد و دارای وابستگی مکانی باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شود و در مطالعات زمین‌آماري بحث و بررسی می‌گردد. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه، به دو مؤلفه‌ی قطعی و تصادفی تجزیه می‌شود. بنابراین می‌توان نوشت:

$$Z(x) = m(x) + L(x) \quad (6)$$

که در آن: $Z(x)$: متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای به مختصات (x) ، $m(x)$: مؤلفه‌ی قطعی متغیر ناحیه‌ای و $L(x)$: مؤلفه‌ی تصادفی متغیر ناحیه‌ای است. در صورتیکه متغیر ناحیه‌ای دارای ساختار مکانی مناسبی باشد، تحلیل‌های بسیاری را بر روی آن می‌توان به عمل آورد که از جمله آن‌ها می‌توان به برآورد متغیر مورد نظر در نقاط بدون آمار و طراحی نمونه‌برداری اشاره کرد. لازم به ذکر است، شرط استفاده از روش‌های زمین‌آماري، این است که داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک باشند.

روش کریجینگ

نام این تخمین‌گر زمین‌آماري به افتخار یکی از پیشگامان علم زمین‌آمار به نام کریج، که یک مهندس معدن آفریقای جنوبی بود، به نام کریجینگ^۱ نام‌گذاری شد (Keriging, 2006). روش کریجینگ بر اساس میانگین متحرک وزن‌دار بوده و می‌توان آن را بهترین تخمین‌گر خطی نارایب خواند. فرمول کلی روش کریجینگ مانند سایر تخمین‌گرها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z^*(x_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (7)$$

که در آن مقدار تخمین متغیر در نقطه‌ی موردنظر، وزن یا اهمیت نمونه ام، تعداد مشاهدات و مقدار مشاهده شده متغیر می‌باشد. شرط استفاده از کریجینگ خطی بالا این است که متغیر مورد بررسی از توزیع نرمال پیروی کند. در غیر این‌صورت باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا با استفاده از تبدیلی متغیر مورد نظر را به نرمال تبدیل نمود و سپس روی آن‌ها کریجینگ خطی را اعمال نمود.

^۱ Keriging

طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی

نمودار ویلکاکس^۱ بر اساس مقادیر هدایت الکتریکی (EC) در آب در کلاس‌های متفاوت است (Sunkari et al., 2019). طبقه‌بندی ویلکاکس یکی از مهم‌ترین طبقه‌بندی‌ها در زمینه‌ی تعیین کیفیت آب کشاورزی است (Wilcox, 1958). در طبقه‌بندی ویلکاکس هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم (SAR) (خطر قلیایی) برای تعیین کیفیت مصارف کشاورزی در نظر گرفته شده و هر یک به چهار قسمت تقسیم می‌شوند. ترکیب این رده‌ها، آب را از نظر کشاورزی در چهار نوع کیفیت و ۱۶ رده تقسیم می‌کنند

جدول ۱. طبقه بندی آب کشاورزی طبق نمودار ویلکاکس (Wilcox, 1958)

Table 1. Classification of agricultural water based on Wilcox diagram (Wilcox, 1958)

رده	SAR	رده	EC	کیفیت آب
S1	SAR<10	C1	EC<250	عالی
S2	10<SAR<18	C2	250<EC<750	خوب
S3	18<SAR<26	C3	750<EC<2250	متوسط
S4	SAR>26	C4	EC<2250	نامناسب

طبقه بندی آب از نظر شرب

یکی از مهم‌ترین طبقه‌بندی‌ها جهت بررسی کیفیت آب از نظر شرب است. در این نمودار بر اساس پارامترهای pH سدیم، کلر، سولفات، کلسیم، منیزیم و سختی آب‌ها که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌اند بر روی محور متناظر با آنها و اتصال نقاط روی این محور می‌توان کلاس کیفی آب را تعیین نمود. جدول (۲) نشان‌دهنده‌ی مقادیر طبقه‌بندی غلظت پارامترهای کیفی بر اساس طبقه‌بندی شولر می‌باشد.

جدول ۲. طبقه بندی آب شرب طبق دیاگرام شولر و ISIRI^۲

Table 2. Classification of drinking water according to the Scholler and ISIRI diagram

ISIRI	بد	نامناسب	قابل قبول	خوب	پارامتر
6.5-8.5	10	9	7.8	7.2	PH
300	130	85	25	20	Ca
200	72	37	6	4.5	Mg
200	730	104	73	69	Na
400	650	57	48	37	So4
400	550	54	35	28	Cl
1500	>4000	4000-1000	1000-500	<500	TDS
400	-	-	-	-	EC
-	-	-	-	-	HCO3
-	-	-	-	-	K
300	>2000	500-2000	250-500	<250	TH

تهیه نقشه پهنه‌بندی

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی از روش‌های مختلف درون‌یابی در محیط نرم افزار Arc-GIS می‌توان استفاده کرد. ارزیابی میزان دقت و خطا میان مقادیر مشاهده‌ای و تخمین معیارهای مختلفی نظیر مجموع مربعات باقیمانده، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، استفاده از روش‌های مقایسه آماری نظیر آنالیز واریانس و کای اسکوار وجود دارد. در مطالعه حاضر از شاخص RMSE برای تعیین روش مناسب استفاده شد که به عنوان شاخصی مهم جهت نشان دادن دقت تحلیل مکان در GIS شناخته می‌شود و از طریق رابطه زیر و با استفاده از داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده به دست می‌آید: از بین روش‌های مختلف، هر کدام که میزان RMSE کم‌تری داشته باشد به عنوان روش مناسب انتخاب می‌گردد (Yonesi et al., 2020)

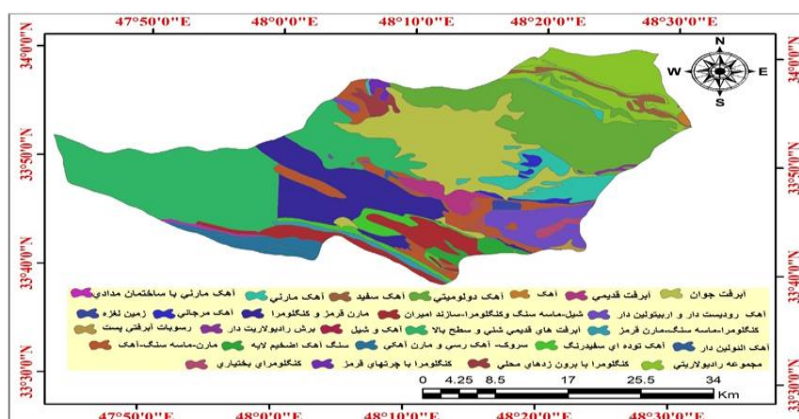
¹ Wilcox

² Institute of Standards and Industrial Research of Iran

نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۲ برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌های کیفی آب‌های زیرزمینی برای چاه‌های مشاهده در منطقه الشتر و برای یافتن ماتریس همبستگی استفاده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های آماری و هیدروشیمیایی، توزیع فضایی هر ویژگی مورد مطالعه با استفاده از روش کریجینگ معمولی با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS ترسیم شد.

نتایج و بحث

در بررسی تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی دشت الشتر، شاهد تغییرات متفاوت مشخصه‌های مختلف می‌باشیم. دلیل این امر می‌تواند تبادلات شیمیایی بین آب و سازند زمین‌شناسی دشت و اثرپذیری آب زیرزمینی باشد. این تبادلات شیمیایی باعث می‌شود که آب زیرزمینی در گستره‌ی خود ناهمگن شود، چون آب زیرزمینی در حین حرکت خود به مواد مختلف برخورد کرده و مواد مختلف با مقادیر مختلف را در خود حل می‌کند. بنابراین شرایط فیزیکی آکواریوم، کانی‌شناسی بستر و شرایط آب و هوایی تحت‌تأثیر عوامل مختلفی از جمله هوازدگی سنگ، پوشش گیاهی قرار دارند (Panahi et al., 2021). شکل (۲) نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز دشت الشتر را نشان می‌دهد. حوضه آبریز الشتر از نظر زمین‌شناسی از سنگ‌های مجموعه رادیولاریتی ژوراسیک تشکیل شده‌است. ارتفاعات شمالی این حوضه از رادیولاریتی و کنگلومرا تشکیل شده است در حالی که ارتفاعات جنوبی منطقه از شیل ماسه و شن و سروک آهک رسی تشکیل شده است. این سنگ‌های رادیولاریتی به همراه رسوبات آهکی در زمان‌های مختلف تحت‌تأثیر نیروهای زمین‌ساختی از هم پاشیده‌اند و ترکیبات رنگی را تشکیل داده‌اند. همچنین مجموعه‌ای از آهک رودیست‌دار و اربیتولین‌دار به طور گسترده در مناطق جنوب‌شرقی این حوضه توسعه یافته‌اند. همچنین مجموعه‌ای آبرفت‌های قدیمی شنی در جنوب غربی حوضه شکل گرفتند.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی در دشت الشتر
Fig. 2. Geological map of Aleshtar Plain

آمار توصیفی پارامترهای کیفی مورد بررسی

جدول (۳) دربردارنده‌ی اطلاعات آمار توصیفی پارامترهای مورد بررسی می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی کمترین و بیشترین مقدار، میانگین، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی برای همه‌ی پارامترها می‌باشد. در حالت کلی اگر مقدار چولگی و کشیدگی داده‌ها در دامنه (+۲ تا -۲) قرار داشته باشد، داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار هستند.

بر اساس جدول (۳)، نتایج تجزیه و تحلیل محدوده تغییرات pH را نشان می‌دهد که به‌صورت تعادل بین غلظت یون‌های هیدروژن و یون‌های هیدروکسید تعریف می‌شود، pH قابل توجه بوده و از ۶/۶۶ تا ۸/۱۰۴۵ نوسان می‌کند. حداقل میزان EC، ۳۲۶/۶۳ و حداکثر آن ۵۱۶/۶۷ میکروزیمنس برسانتی‌متر می‌باشد معمولاً طبق استانداردها، منابع آبی که EC بیشتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر دارند برای کشاورزی مضر بوده و باعث افزایش شوری خاک و تخریب محصول می‌گردد و معمولاً گیاهان مقاوم به شوری آب‌های با EC کمتر از ۷ دسی‌زیمنس بر متر را تحمل می‌کنند. حداقل مقدار TDS برابر ۲۳۲/۱۳ و حداکثر مقدار آن ۳۳۲/۲۹ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. حداقل میزان پارامتر (HCO₃) ۲/۸۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و حداکثر آن ۴/۱۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر است. تغییرات یون سولفات (SO₄) از حداقل ۰/۰۳ تا ۱/۰۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر متغیر می‌باشد. حداقل یون کلسیم (Ca) ۲/۵۲ و حداکثر آن ۳/۶۶ میلی‌اکی‌والان

بر لیتر می‌باشد. مقدار یون منیزیم (Mg) از حداقل ۰/۷۷ تا ۱/۶۷ میلی‌اکی‌والانت بر لیتر متغیر است. حداکثر میزان سدیم (Na) ۰/۳۳ میلی‌اکی‌والانت بر لیتر و حداقل آن ۰/۰۳ میلی‌اکی‌والانت بر لیتر می‌باشد. حداقل مشخصه نسبت‌جذبی سدیم (SAR) ۰/۰۵ و حداکثر آن ۰/۲۲ می‌باشد. سختی آب (TH) پارامتری است که از تجمع نمک ناشی از تماس با ساختارهای زمین‌شناسی که معمولاً به صورت مجموع غلظت یون‌های Ca و Mg برحسب میلی گرم بر لیتر به دست می‌آید (Patil and Patil, 2011)؛ بنابراین، اگر غلظت این کاتیون‌ها برحسب میلی‌گرم بر لیتر باشد TH برحسب رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Alizadeh, 2009) حداقل مقدار ۱۸۵ و حداکثر مقدار آن ۲۴۲/۵ می‌باشد.

$$TH = 2.5 \times Ca^{2+} + 4.1 \times Mg^{2+} \quad (۸)$$

حداقل مقدار کلر (Cl) ۰/۳۳ و حداکثر آن ۰/۵۵ می‌باشد.

جدول ۳. آمار توصیفی پارامترهای کیفی مورد بررسی

Table 3. Descriptive statistics of studied qualitative parameters

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	چولگی	کشدگی
TDS(meq/L)	286.84	24.03	232.13	332.29	-0.25	-0.38
EC(μS/cm)	444.2	38.65	362.63	516.67	-0.19	-0.45
pH	7.4096	0.3446	6.66	8.1045	-0.48	-0.01
HCO3(meq/L)	3.6093	0.3177	2.83	4.1578	-0.38	0.15
Cl(meq/L)	0.43975	0.05432	0.33125	0.5525	-0.30	-0.48
SO4(meq/L)	0.4180	0.1924	0.0375	1.0220	1.46	3.69
Ca(meq/L)	3.1232	0.2953	2.52	3.6647	0.03	-0.42
Mg(meq/L)	1.1557	0.2149	0.7763	1.67	0.33	-0.27
Na(meq/L)	0.1889	0.0904	0.0392	0.3317	-0.33	-1.21
SAR	0.1488	0.04916	0.05550	0.2215	-0.44	-0.99
TH(mg/L)	214.03	14.88	185.63	242.5	-0.68	-0.89
K	0.04086	0.03630	0	0.1660	1.25	2.99

به منظور بررسی روند تغییرات سری زمانی پارامترهای کیفی آب‌زیرزمینی از تحلیل ناپارامتریک من کندال استفاده شد. جدول (۴) نشان‌دهنده مقدار آماره‌ی من کندال برای سری زمانی سالانه پارامترهای کیفی مورد بررسی می‌باشد. با توجه به نتایج این تحلیل، مشخص گردید که روند تغییرات پارامترهای TDS, EC, Cl, K, PH, و Mg در بازه زمانی ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۷ به دلیل دارا بودن آماره‌ی من کندال (Z) مثبت، دارای روندی افزایشی بوده‌اند که این روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده است. در طرف مقابل، چون آماره‌ی Z پارامترهای HCO3, Na, SAR, So4, TH و Ca منفی بوده است، لذا روند تغییرات آن‌ها به صورت کاهش‌ی لیکن روند کاهش Ca در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($Z > 2.57$) معنی‌دار است. روند کاهش SAR و Na بیانگر بهبود کیفیت جهت مصارف کشاورزی است. خطر سدیم به طور عمومی با عنوان نسبت جذب سدیم بیان می‌شود، که از نسبت سدیم به کلسیم و منیزیم به دست می‌آید. مناسب بودن آب برای مصارف کشاورزی به تاثیر مواد معدنی موجود در آن بر روی گیاهان و خاک مربوط می‌گردد، به طوریکه محتوای بالای SAR سبب قلیایی شدن خاک می‌شود (Khanduzi et al., 2015). این نتیجه در تایید نتایج روند تغییرات pH است به طوریکه روند افزایش تغییرات pH نیز موید قلیایی بودن آب است. روند مثبت pH به معنای قلیایی شدن کیفیت آب زیرزمینی است. که نتایج با (Khanduzi et al., 2015; Bayatvarkeshi et al., 2017; Dinpasho et al., 2015; Daneshvar Vosoughi et al., 2011)، مطابقت دارد. غلظت HCO3 باعث خطر سدیم در آب آبیاری می‌شود. غلظت زیاد این یون باعث ایجاد رسوب کلسیم و منیزیم از محلول خاک و در نتیجه افزایش در سطح ذرات رسی شده که خطر سدیم را افزایش می‌دهد.

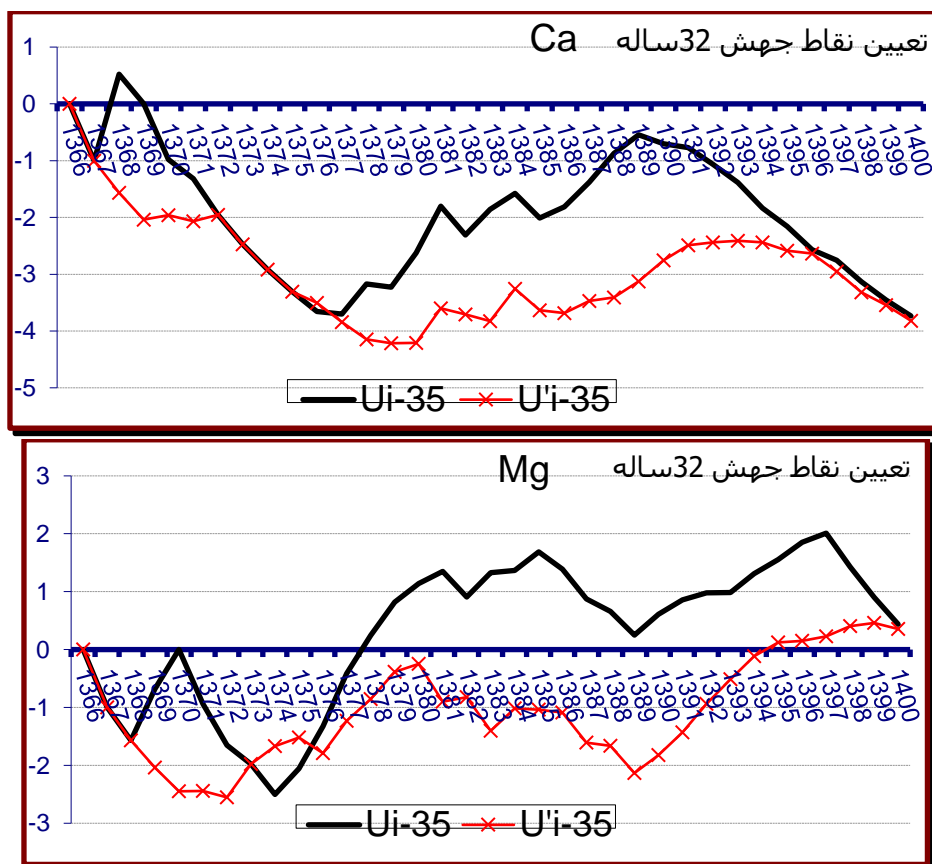
بنابراین کاهش HCO_3 موجب کاهش رسوب‌گذاری آب می‌شود که علاوه بر کاهش خطر سدیمی خاک، در مصرف آب منطقه در صنعت و انتقال آب از لوله‌های انتقال آب نقشه بسزایی دارد.

جدول ۴. مقدار آماره من کندال پارامترهای کیفی در مقیاس سالانه

Table 4. The value of Mann Kendall statistics of qualitative parameters in annual scale

پارامتر	TH	SAR	Na	Ca	SO4	Cl	HCO3	pH	EC	TDS	K	Mg
مقیاس سالانه	-1.86	-1.93	-1.62	-2.77	-0.82	0.60	-1.03	0.43	0.34	0.01	0.79	2.02

شکل (۳)، نمودار من کندال مربوط به دو پارامتر Ca و Mg را نشان می‌دهد. این نمودارها نشان‌دهنده تغییرات در سال‌های آماری موردبررسی می‌باشد. در این گراف‌ها مؤلفه عمودی مربوط به مقادیر متغیر (U) و مؤلفه افقی U' است. برای به دست آوردن U' کافی است مقادیر متغیر را در مقابل ترتیب نزولی سال‌ها قرارداد. چنانچه در این گراف‌ها دو منحنی U و U' یکدیگر را قطع نمایند نشان‌دهنده تغییر معنی‌دار در میزان متغیر در آن سال است که به این نقطه جهش گفته می‌شود و چنانچه دو نمودار موازی هم باشند بیانگر عدم تغییر معنی‌دار در دوره مورد بررسی است. از بین این پارامترها، قوی‌ترین روند افزایشی مربوط به Mg و قوی‌ترین روند کاهشی مربوط به Ca می‌باشد. بر اساس این نمودار روند افزایشی و روند کاهشی Ca مشاهده است. در روند Mg در سال ۱۳۷۲ و ۱۳۷۵ دو جهش با حاکمیت به ترتیب افزایشی و کاهشی دیده می‌شود. در حالی که در روند تغییرات Ca در سال ۱۳۷۵ و ۱۳۷۷ جهشی به صورت کاهشی رخ داده است.



شکل ۳. نمودار تغییرات پارامترهای Ca و Mg در دوره ۳۲ ساله

Fig. 3. The graph of changes of Ca and Mg parameters in a period of 32 years

برای اندازه‌گیری رابطه بین متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی، ضریب همبستگی، که تعامل دو متغیر است (Patil and Patil., 2011)، برای ناحیه الشتر محاسبه شد (جدول ۵). بالاترین همبستگی مثبت به ترتیب بین TDS و EC ($R=0.981$)، Na و SAR ($R=0.935$) و HCO₃ و TH ($R=0.809$) است که در راستای مطالعه‌ای است که توسط (Magesh et al., 2013; Mohaghegh et al., 2020) انجام شده است: رسانایی الکتریکی^۱ و سختی کل^۲ توسط یون‌های منیزیم، سدیم، کلسیم، سولفات و پتاسیم کنترل می‌شود و از برهم‌کنش آب و فرایندهای انحلال طبیعی ناشی می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که یک همبستگی مثبت قابل توجه قوی بین EC و HCO₃، EC و TH، TDS و Ca، TH و Ca، TH وجود دارد. همچنین می‌توان بیان کرد که HCO₃ همبستگی مثبت قابل توجهی با pH که نشان می‌دهد محتوای کربنات نقش مهمی در کنترل pH آب بازی می‌کند (Magesh et al., 2013). همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، TDS همبستگی مثبت قوی و قابل توجهی با Ca، HCO₃، TH، pH و TH دارد که با نتایج به‌دست‌آمده توسط (Patil and Patil, 2011) و (Panahi et al., 2021) مطابقت دارد.

جدول ۵. ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای مختلف کیفیت آب زیرزمینی

Table 5. Pearson correlation coefficient between different parameters of groundwater quality

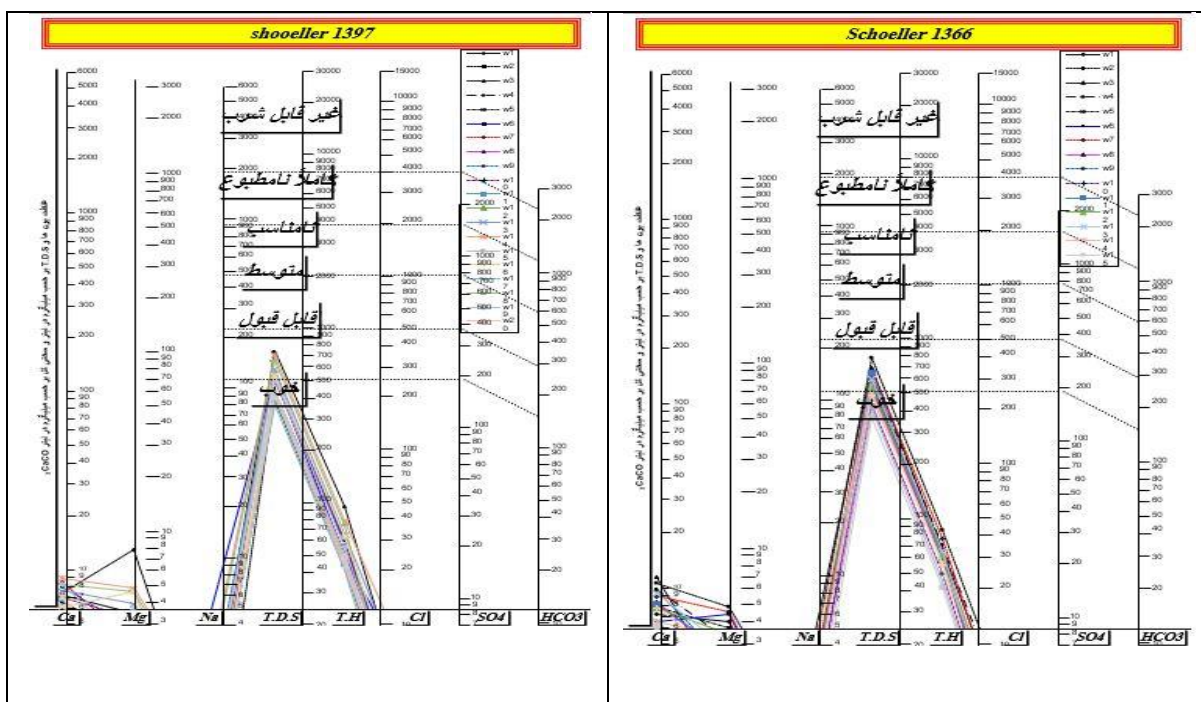
	Ec	TDS	PH	Ca	Mg	Na	K	Hco3	Cl	So4	Th	SAR
Ec	1											
TDS	0.981*	1										
PH	0.336	0.369*	1									
Ca	0.609**	0.612**	0.093	1								
Mg	0.231	0.232	-0.19	-0.353*	1							
Na	0.196	0.175	-0.556**	0.146	0.377*	1						
K	-0.04	-0.082	-0.16	-0.215	0.342	0.512**	1					
Hco3	0.705**	0.0676**	0.612**	0.706**	0.150	-0.046	-0.02	1				
Cl	0.288	0.263	0.054	0.164	0.011	0.515**	-0.323	0.156	1			
So4	0.06	0.096	0.339	-0.063	0.220	0.236	0.086	-0.454**	-0.043	1		
Th	0.772**	0.775**	-0.046	0.737**	0.372*	-0.084	0.034	0.809**	0.170	0.096	1	
SAR	0.06	0.043	0.463*	0.058	-0.309	0.935**	-0.366*	-0.161	0.330	0.320	-0.165	1

شکل (۴) نمودار شولر را به‌منظور ارزیابی کیفیت آب شرب برای دشت الشتر را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار شولر مشخص شد که در هر دو دوره‌ی ۱۳۶۶ و ۱۳۹۷ کیفیت آب زیرزمینی دشت الشتر در طبقه خوب قرار دارد. مقادیر بالاتر TDS ناشی از زمان طولانی‌تر زمانی است که آب زیرزمینی با بدنه آبخوان و حضور نمک‌های آن در ارتباط است (Selvam et al., 2013). سختی آب با توجه به میزان یون‌های کلسیم و منیزیم دشت تعیین می‌شود. در طبقه‌بندی آب به‌منظور شرب، علاوه بر یون‌های اصلی برخی یون‌های نادر آب نیز اهمیت دارند. یون‌های نیترات و عناصری چون آرسنیک به دلیل اهمیت از نظر سمی بودن باید میزان کنترل شده‌ای در آب شرب داشته باشند. بر این اساس تصمیم‌گیری در مورد استفاده شرب در یک دشت فقط با استفاده از عناصر عمده کاملاً صحیح نیست. با توجه به گسترش کشاورزی و حجم بالای یون‌های نفوذی از آبیاری و آلودگی آب‌ها در نتیجه استفاده از کودهای مختلف آلودگی آبخوان توسط آلاینده‌ها، به خصوص یون نیترات دور از انتظار نمی‌باشد (Salari et al., 2022). شکل (۵) نمودار ویلکاکس برای سنجش کیفیت آب در مصرف کشاورزی است، برای نمونه‌های آب زیرزمینی از چاه‌ها در دشت الشتر را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار ویلکاکس مستخرج برای همه‌ی نمونه‌ها در هر دو دوره‌ی ۱۳۶۶ و ۱۳۹۷ مشاهده می‌شود که کیفیت آب جهت کشاورزی در رده‌ی C2S1 قرار می‌گیرند که نتایج

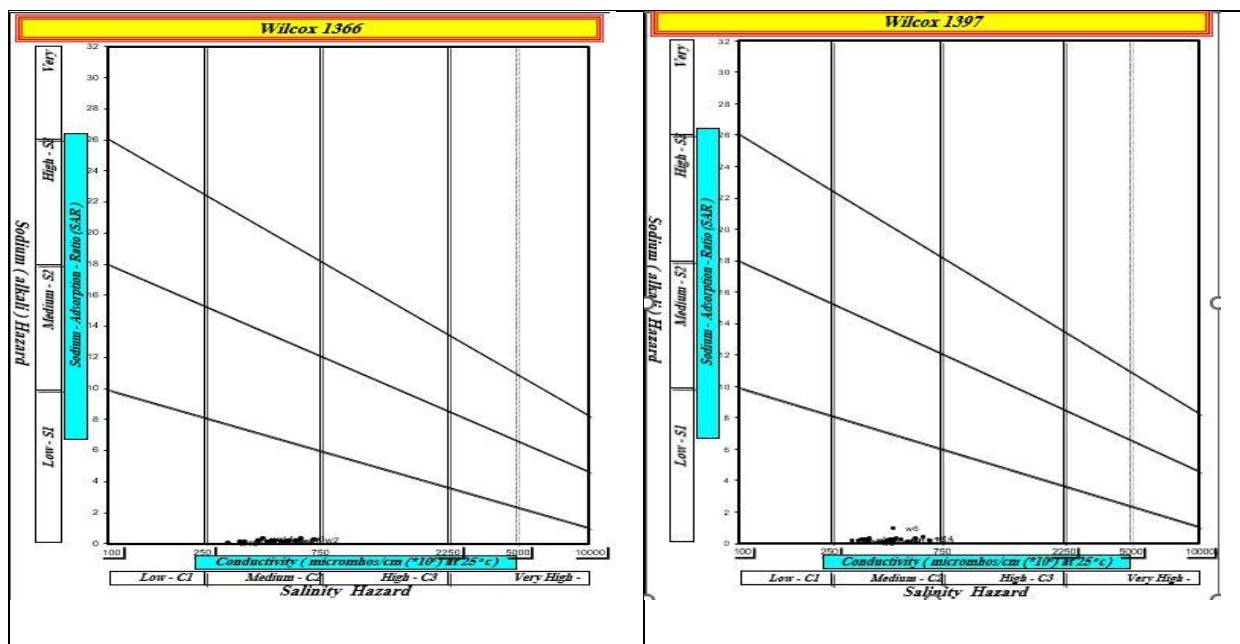
¹ Electrical conductivity

² Total Dissolved Solids

(Torabi and Hamezadeh, 2018) که به بررسی کیفیت منابع آب با استفاده از نمودارهای ویلکاکس و شولر پرداختند و نتایج نشان داد که مناطق دشت در کیفیت خوب و قابل قبول جهت شرب و کشاورزی قرار دارند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، S1 آب کم‌سدیم است که از این آب‌ها تقریباً می‌توان برای آبیاری کلیه خاک‌ها استفاده کرد بدون اینکه خطری از بابت زیاد شدن سدیم تبادل خاک متحمل باشد. C2 آب با شوری متوسط است و هرگاه آب‌شویی خاک در حد مناسبی انجام شود بدون اینکه عملیات خاصی برای کنترل نیاز باشد می‌توان از این آب برای آبیاری گیاهان استفاده کرد که تحمل متوسط در مقابل شوری دارند.



شکل ۴. دیاگرام شولر سال ۱۳۶۶ و ۱۳۹۷
Fig. 4- Scholler diagram 1987- 2017



شکل ۵. دیاگرام ویلکاکس سال ۱۳۶۶ و ۱۳۹۷
Fig. 5. Wilcox diagram 1987 and 2017

از مقایسه مقدار آماره‌های صحت سنجی RMSE مربوط به روش‌های مرسوم زمین آماری چون عکس فاصله وزن دار (IDW)، توابع شعاعی (RBF)، کریجینگ، تخمین گر موضعی (LPI) و تخمین گر عام (GPI) مشخص شد که روش کریجینگ برای پارامترها داری کمترین مقدار برای این صحت سنجی می‌باشد. از بین روش‌های مختلف، هرکدام که میزان RMSE کمتری داشته باشد به عنوان روش مناسب انتخاب می‌گردد. کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن دار استوار است و بهترین تخمین گر خطی می‌باشد (Gaus et al., 2003). بنابراین روش کریجینگ و نتایج حاصل از آن به دلیل واریانس مکانی و موقعیت توزیع داده‌ها مورد اعتماد نسبت به دیگر روش‌های موجود می‌باشد، که با نتایج (Haqizadeh et al., 2017) مطابقت دارد. میزان RMSE مربوط به روش‌های زمین آمار در جداول زیر آمده است.

جدول ۶. مقادیر RMSE روش‌های مختلف پهنه‌بندی برای کیفیت آب زیرزمینی در دوره ۱۳۹۷

Table 6. RMSE values of different zoning methods for groundwater quality in 2017

	2017											
	So4	Hco3	K	Na	Mg	Ca	PH	TDs	Th	Sar	ec	Cl
Kriging	13.0	70.0	027.0	15.0	59.0	49.0	2.0	1.49	1.40	11.0	8.76	2.0
IDW	131.0	86.0	03.0	24.0	71.0	52.0	22.0	34.61	8.47	18.0	7.95	21.0
GPI	196.0	05.1	03.0	47.0	76.0	01.1	26.0	84.70	1.61	36.0	6.110	29.0
RBF	134.0	80.0	028.0	17.0	65.0	5	21.0	55.59	7.45	12.0	9.92	21.0
LPI	171.0	84.0	029.0	17.0	81.0	75.0	28.0	86.64	5.51	14.0	1.101	21.0

جدول ۷. مقادیر RMSE روش‌های مختلف پهنه‌بندی برای کیفیت آب زیرزمینی در دوره ۱۳۶۶

Table 7. RMSE values of different zoning methods for groundwater quality in 1987

	1987											
	So4	Hco3	K	Na	Mg	Ca	PH	TDs	Th	Sar	ec	Cl
Kriging	195.0	54.0	005.0	1.0	42.0	63.0	13.0	3.57	4.36	06.0	03.83	17.0
IDW	2.0	68.0	006.0	11.0	47.0	74.0	14.0	7.67	6.43	07.0	2.99	19.0
GPI	196.0	70.0	006.0	13.0	42.0	81.0	15.0	5.64	9.43	08.0	1.101	21.0
RBF	2.0	55.0	007.0	11.0	45.0	77.0	13.0	3.61	3.38	06.0	04.88	18.0
LPI	198.0	55.0	006.0	1.0	43.0	73.0	15.0	3.58	3.37	06.0	02.88	18.0

شکل (۶) توزیع هر پارامتر کیفیت مورد مطالعه در آب‌های زیرزمینی دشت الشتر را نشان می‌دهد. در هر نقشه، توزیع هر پارامتر کیفیت آب زیرزمینی در دشت الشتر مورد بررسی قرار گرفت.

pH: عوامل زمین‌شناسی و بیولوژیکی می‌توانند بر pH آب زیرزمینی تاثیر بگذارند (Qishlaqi et al., 2017). با توجه به شکل ۶ الف و ب بیشترین مقادیر pH در سال ۱۳۹۷ در نواحی مرکزی و شمالی دشت الشتر و کمترین مقادیر آن در نواحی غربی و جنوبی و بخش‌هایی از جنوب شرقی قرار دارند. pH در این منطقه ۷/۰۶ تا ۷/۹۰ در نوسان می‌باشد. در سال ۱۳۶۶ بیشترین مقادیر pH در قسمت غرب و کمترین آن در قسمت مرکز و جنوب قرار دارد. علت بالا بودن pH در این مناطق می‌تواند بر اثر انحلال واحدها آهکی و دولومیتی شمال غرب آبخوان باشد.

K: با توجه به شکل ۶ (چ و ح) می‌توان اظهار داشت که مقادیر حداکثر پتاسیم برای دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۶۶ بسیار گسترده‌تر از مقادیر حداقل می‌باشد. که در سال ۹۷ بیشترین مقادیر در شمال و جنوب غربی و در سال ۶۶ در شمال شرقی و مرکز دشت قرار دارد.

HCO₃: با توجه به شکل ۶ (خ و د) بیشترین مقادیر HCO₃ در سال ۱۳۹۷ در نواحی مرکزی و جنوبی دشت الشتر و کمترین مقادیر آن در نواحی غربی و شرقی قرار دارند. HCO₃ در این منطقه ۲.۷ تا ۶ میلی‌اکی‌والان در لیتر در نوسان می‌باشد. در سال ۱۳۶۶ بیشترین مقادیر HCO₃ در قسمت مرکز و غرب و کمترین آن در قسمت شرق و شمال شرقی قرار دارد. به این ترتیب مشاهده می‌شود که موقعیت مقادیر بی‌کربنات طی دو دوره آماری دچار تغییر شده است.

EC: با توجه به شکل ۶ (ذ و ر) میزان EC دشت در نواحی مختلف با هم متفاوت‌اند به طوری که در سال ۹۷ بیشترین مقدار در نواحی شمالی و مرکزی در سال ۶۶ در مرکز و غربی دشت وجود دارد. در قسمت غرب، شرق و جنوب شرقی آبخوان میزان هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. این مناطق محل جریان ورودی و تغذیه آبخوان هستند و تغذیه آبخوان از ارتفاعات آهکی و دولومیتی شمال،

شمال غرب و شمال شرقی منطقه صورت می‌گیرد. همچنین رسوبات موجود در حاشیه بخش شمالی و غربی رسوبات آبرفتی بوده است. آبرفت‌ها به دلیل بالا بودن نفوذپذیری آب با سرعت بیشتری حرکت نموده و املاح کمتری را در خود حل می‌کند. احتمالاً تغذیه ناشی از ورود فاضلاب به آبخوان سبب افزایش هدایت الکتریکی شده است. قسمت میانی، جنوب و جنوب غربی آبخوان به دلیل قرار گرفتن در مسیر رودخانه گیرنده دارای مقادیر بالای هدایت الکتریکی می‌باشند. رودخانه دائمی الشتر از قسمت شمال شرقی وارد آبخوان شده و از بخش جنوبی خارج می‌شود، با توجه به خطوط هم پتانسیل و چشمه‌هایی که در مجاورت رودخانه قرار گرفته‌اند، جهت جریان به سمت رودخانه می‌باشد و نشان می‌دهد که رودخانه گیرنده است. همچنین جنوب منطقه محل تخلیه دشت می‌باشد، در طول مسیر جریان از شمال به جنوب بر میزان هدایت الکتریکی افزوده می‌شود. چون در مسیر حرکت جریان میزان املاح افزایش می‌یابد، بنابراین جنوب منطقه هدایت الکتریکی افزایش یافته است.

Cl: با توجه به شکل ۶ (ز و س) غلظت بالای این یون به گونه‌ای است که انحلال ژپیس و هالیت کلرید را افزایش می‌دهد بنابراین چنانچه از حد مجاز تجاوز کند برای گیاه مشکل ساز و برای شرب از عوامل ایجاد شوری خواهد بود (Mallick et al., 2018). با توجه به نقشه‌های این یون مشاهده می‌شود در سال ۹۷ در نواحی جنوبی، غربی و شرقی دشت کم‌تر بوده در حالیکه شمال دشت حداکثر است. در سال ۶۶ در غالب مناطق غلظت در حالت پایدار تغییر می‌کند که بیشترین غلظت آن را در غرب دشت ملاحظه می‌کنیم.

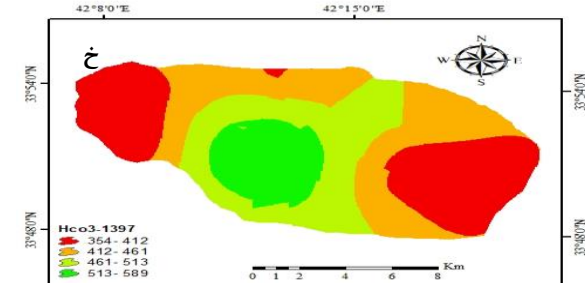
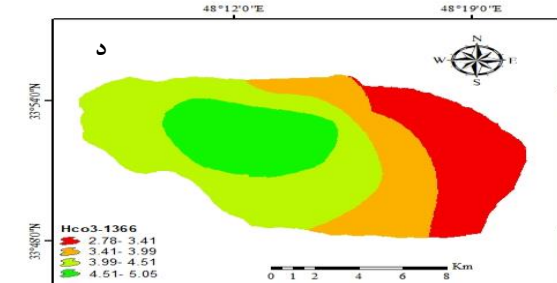
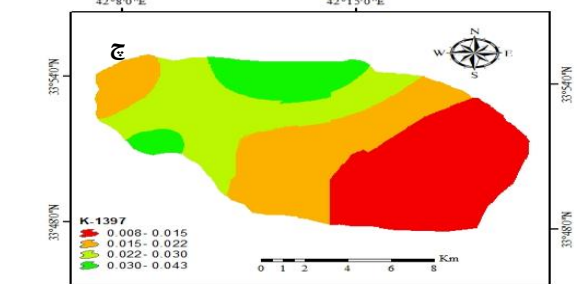
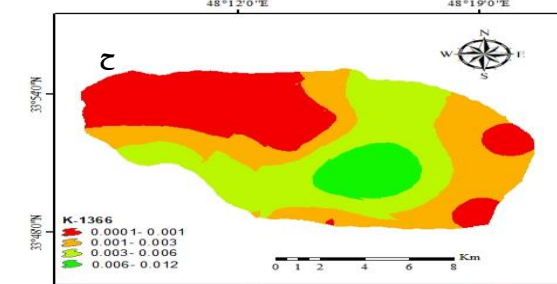
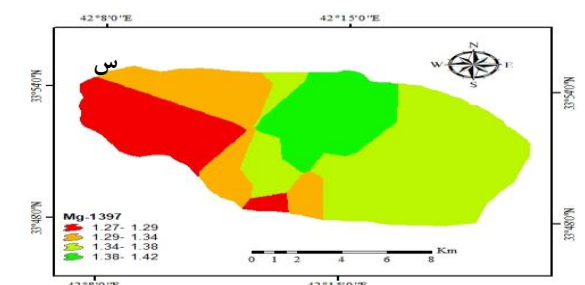
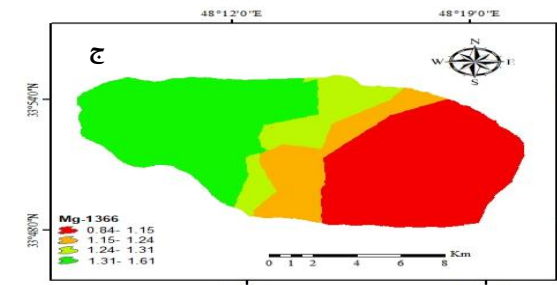
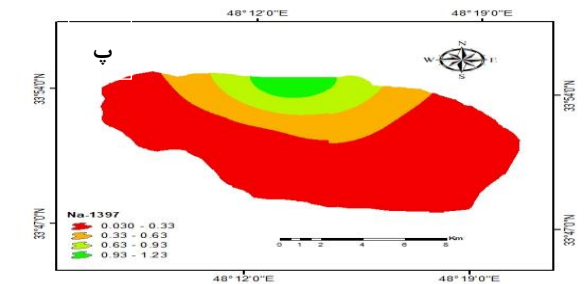
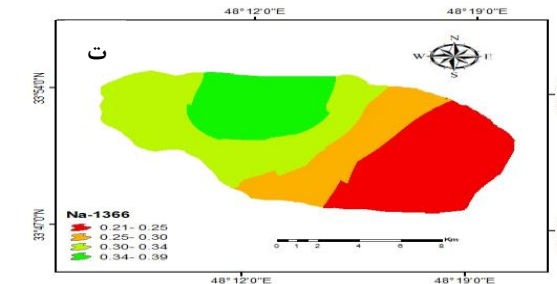
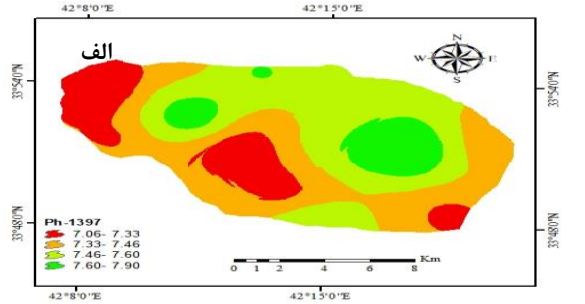
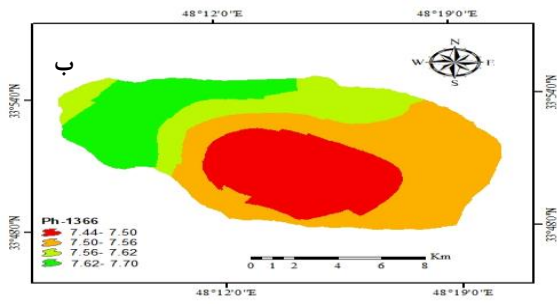
کاتیون‌های کلسیم، منیزیم و سدیم: با توجه به شکل ۶ (ش، ص، س، ج، پ و ت) تغییرات این کاتیون‌ها در طول زمان در دشت مورد مطالعه زیاد بوده است. با گذشت زمان یون سدیم افزایش، سدیم ویژگی دیگری است که در این مطالعه مورد مطالعه قرار گرفته است. توزیع سدیم آب‌های زیرزمینی در دشت الشتر به صورت زیر است: غلظت این یون را می‌توان به فرآیند تبخیر و تعرق در دشت الشتر مربوط کرد. سدیم به طور عمده از فلدسپات‌های موجود در سنگ‌های آذرین حاصل می‌شود. لایه‌های شیست‌رسی و رسی اغلب آبی ایجاد می‌کنند که سدیم زیادی دارند. بیشترین مقادیر Na در سال ۱۳۹۷ در نواحی شمالی دشت الشتر و کم‌ترین مقادیر آن در نواحی غربی و جنوبی و بخش‌هایی از جنوب شرقی قرار دارند. در سال ۱۳۶۶ بیشترین مقادیر Na در قسمت شمال، مرکز و غرب و کمترین آن در قسمت شرق و جنوب شرقی قرار دارد. در مقابل غلظت یون‌های منیزیم و کلسیم در سال ۹۷ نسبت به سال ۶۶ کاهش یافته است. توزیع منیزیم در این دشت در شکل نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۷ مقادیر بالاتر منیزیم در نواحی مرکزی، شمالی و شرقی واقع شده‌اند، در حالی که ۱۳۶۶ بالاترین مقادیر منیزیم شمال، مرکز و غرب دشت واقع شده‌اند. منابع یون‌های منیزیم در سفره‌های آب آهکی یافت می‌شوند.

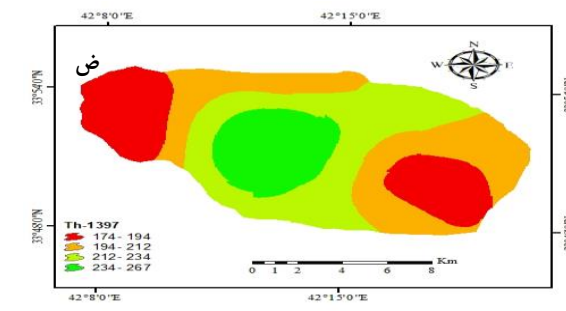
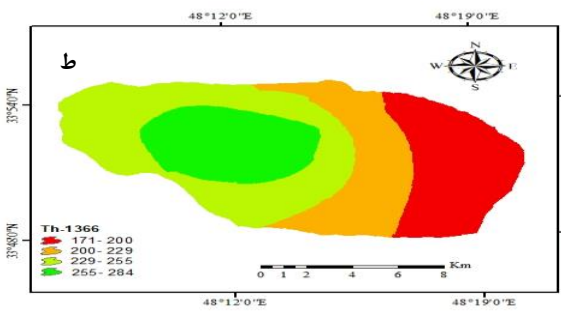
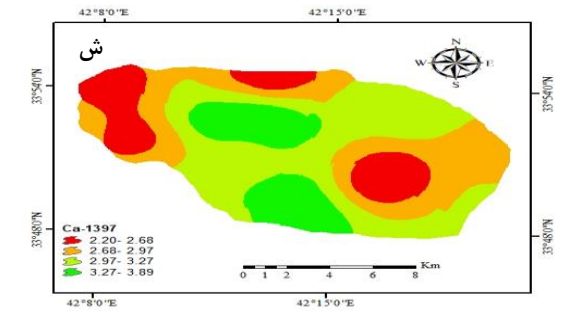
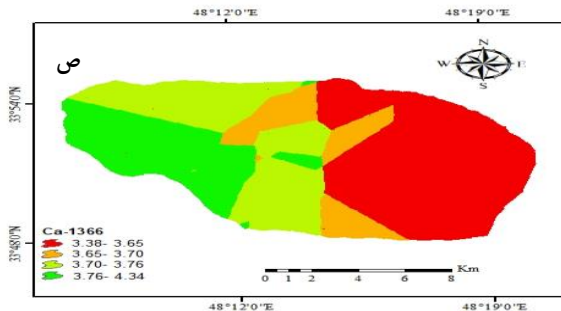
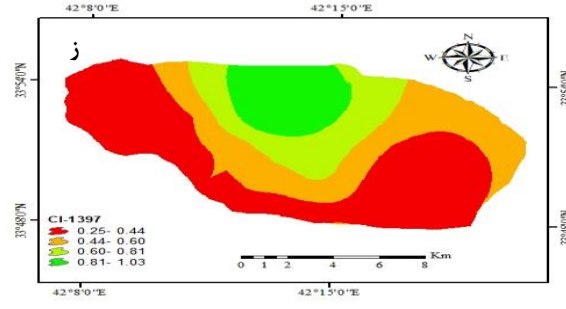
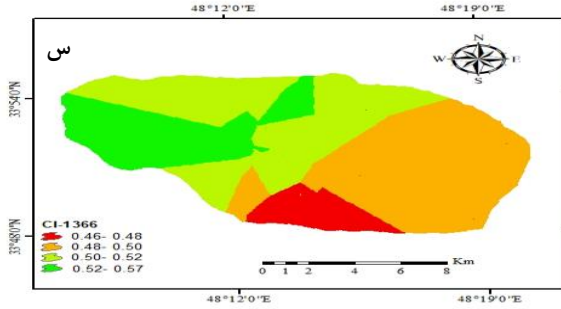
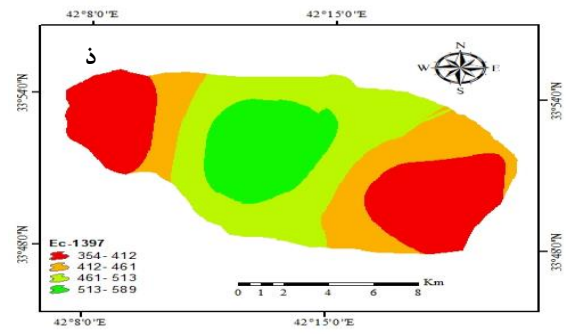
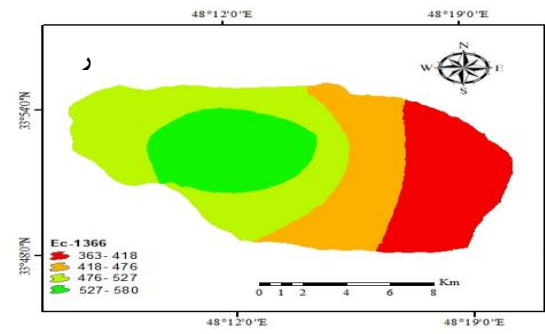
TH: با توجه به شکل ۶ (ض و ط) براساس سازمان بهداشت جهانی حداکثر غلظت مجاز کربنات کلسیم برای آب شرب برابر ۵۱۱ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته می‌شود. براساس طبقه بندی هم (Hem, 1979) آب‌هایی با سختی بیش از ۱۸۱ میلی گرم در لیتر، جزء آب‌های خیلی سخت محسوب می‌شود. سختی آب دشت الشتر در سال ۱۳۹۷ بیشتر در مناطق مرکزی و به میزان حداکثر ۲۶۷ میلی گرم در لیتر قرار دارد. این مقدار در سال ۶۶ به حداکثر ۲۸۶ میلی گرم در لیتر افزایش پیدا کرده است. انحلال سازندها با آهک در دشت الشتر TH را افزایش داده است.

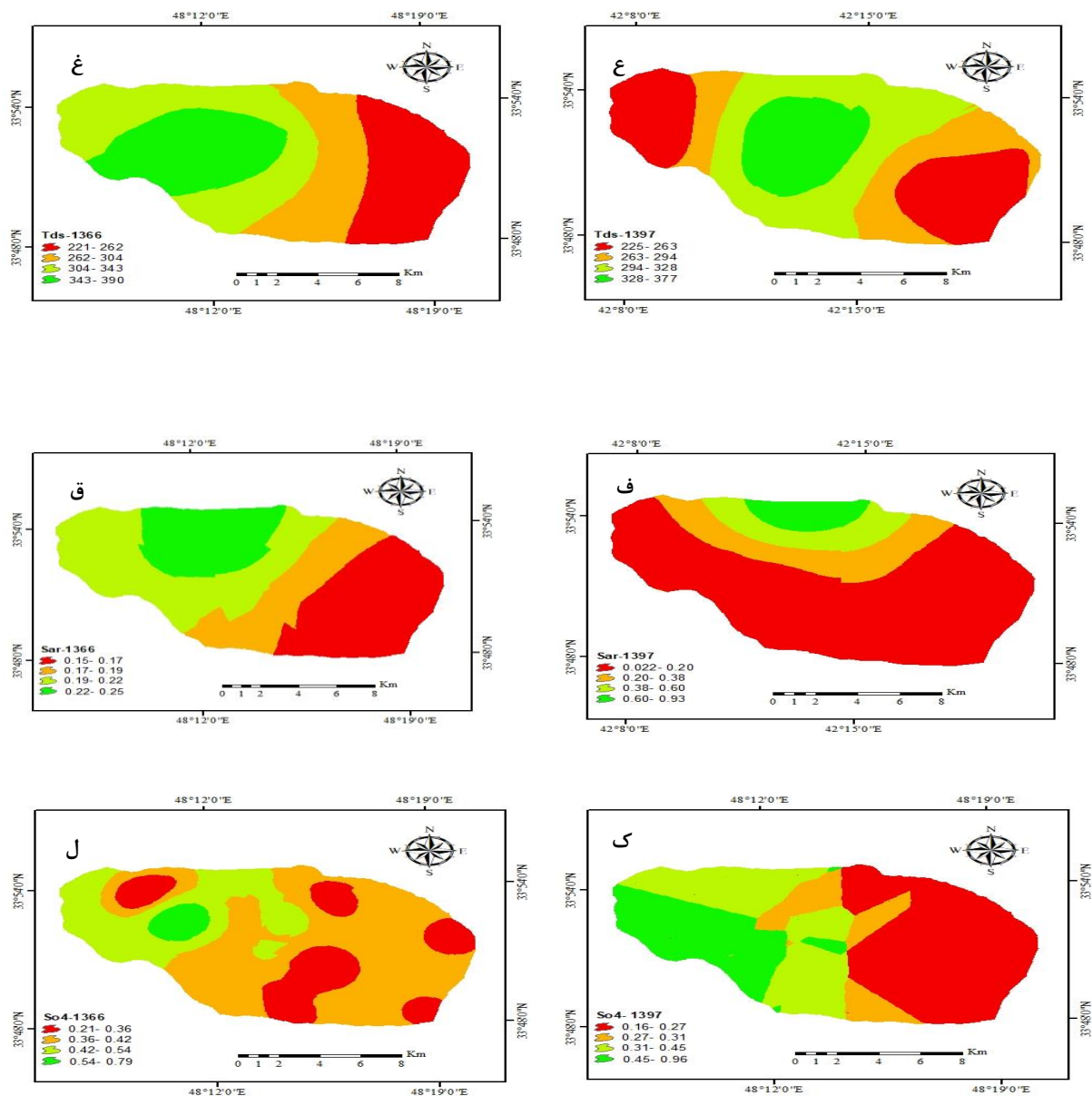
TDS: همانطور که در شکل ۶ (ع و غ) دیده می‌شود، در سال ۱۳۹۷ بیشترین مقادیر ذرات جامد (TDS) در آب در بخش میانی این دشت واقع شده‌اند، در حالی که کم‌ترین مقادیر TDS در بخش غربی و شرقی دشت واقع شده‌اند. در حالی که در سال ۱۳۶۶ بیشترین مقادیر ذرات جامد (TDS) در آب در بخش میانی و غربی این دشت واقع شده‌اند، در حالی که کم‌ترین مقادیر TDS در بخش شرقی دشت واقع شده‌اند.

SAR: با توجه به شکل ۶ (ف و ق) این مؤلفه که با محاسبه‌ی کاتیون‌های Ca، Mg و Na حاصل می‌گردد بیانگر شوری آب است. پراکندگی میزان غلظت SAR دشت با گذشت زمان افزایش یافته است، در سال ۹۷ بیشترین مقدار را در نواحی شمال و در سال ۶۶ شمال و غرب شاهد هستیم.

SO4: با توجه به شکل ۶ (ک و ل) در نهایت، توزیع غلظت سولفات آب زیرزمینی در شکل نشان داده شده است. در سال توزیع غلظت سولفات ۹۷ نشان می‌دهد مقادیر بالاتر آن در بخش‌های مرکزی و غربی دشت و مقادیر پایین‌تر آن در بخش‌های شرقی دشت قرار دارد. در حالیکه در سال ۶۶ مقادیر بالاتر آن در بخش‌های شمال و غربی دشت و مقادیر پایین‌تر آن در بخش‌های شرقی جنوبی دشت قرار دارد.







شکل ۶. نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی در دوره‌های زمانی مختلف در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۷ در دشت الشتر

Fig. 6. Zoning maps of groundwater quality in different time periods in 1987 and 2017 in Aleshtar Plain

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، ۱۷ چاه آب زیرزمینی از سال ۱۳۶۶-۱۳۹۷ برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از دشت الشتر واقع در یک منطقه معتدل جمع‌آوری شد. تحلیل‌ها برای ارزیابی فرآیندهای فیزیک و شیمیایی بر روی کیفیت آب برای مصارف آشامیدنی و کشاورزی انجام شد. برای ارزیابی پارامترهای هیدروشیمیایی، نقشه‌های مختلفی از کیفیت آب زیرزمینی براساس نرم‌افزار GIS تولید شده است که نشان‌دهنده تغییرات مکانی و زمانی در همه پارامترها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. برای بررسی روند تغییرات از آزمون من کاندال استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوی تغییرات پارامترهای EC, TDS, K, PH, Mg دارای روندی افزایشی بوده‌اند که این روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده است. در طرف مقابل، چون آماره‌ی Z پارامترهای HCO_3 , Na, SAR, SO_4 , TH و Ca منفی بوده است، لذا روند تغییرات آن‌ها به صورت کاهشی لیکن روند کاهش Ca در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. در بخش دیگر که به بررسی طبقه‌بندی آب زیرزمینی بر اساس دی‌گرام ویلکاکس پرداخته شد، نتایج نشان داد که بر اساس این طبقه‌بندی، به‌طور کلی کیفیت آب برای کشاورزی با گذشت زمان افزایش یافته است کیفیت آب جهت کشاورزی در رده‌ی C2S1 قرار می‌گیرند.

نمودار شولر نشان می‌دهد که همه‌ی نمونه‌های بررسی شده در کلاس خوبی برای نوشیدن قرار دارند. برای اندازه‌گیری رابطه بین متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی، ضریب همبستگی برای ناحیه‌ی مشترک محاسبه شد بالاترین همبستگی مثبت به ترتیب بین EC و TDS ($R=0.981$)، Na و SAR ($R=0.935$) و HCO_3 و TH ($R=0.809$) قرار دارد. همچنین می‌توان بیان کرد که HCO_3 همبستگی مثبت قابل توجهی با pH که نشان می‌دهد محتوای کربنات نقش مهمی در کنترل pH آب بازی می‌کند.

منابع

- Adimalla, N., & Li, P. (2019). Occurrence, health risks, and geochemical mechanisms of fluoride and nitrate in groundwater of the rock-dominant semi-arid region, Telangana State, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(1-2), 81-103.
- Adimalla, N., & Qian, H. (2019). Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) for drinking purposes and human health risk (HHR) assessment in an agricultural region of Nanganur, south India. *Ecotoxicology and environmental safety*, 176, 153-161.
- Adimalla, N., & Wu, J. (2019). Groundwater quality and associated health risks in a semi-arid region of south India: Implication to sustainable groundwater management. *Human and ecological risk assessment: an international journal*, 25(1-2), 191-216.
- Ahmed, N., Bodrud-Doza, M., Islam, S. D. U., Choudhry, M. A., Muhib, M. I., Zahid, A., ... & Bhuiyan, M. A. Q. (2019). Hydrogeochemical evaluation and statistical analysis of groundwater of Sylhet, north-eastern Bangladesh. *Acta Geochimica*, 38, 440-455.
- Alizadeh A. (2009). Drip irrigation (principles and application). Second edition, Astan Quds Razavi Publishing House, Imam Reza University. 493 p. [in Persian].
- Ashraf, M. (2016, January). Managing water scarcity in Pakistan: moving beyond rhetoric. In Proceedings of AASSA-PAS regional workshop on challenges in water security to meet the growing food requirement. Pakistan Academy of Sciences, Islamabad (pp. 3-14).
- Bayatvarkeshi, M., Fasihi, R. (2018). Monitoring of groundwater quality changes trend in four plains of Gilan province during a 12-year period. *Ijhe*, 10 (4):547-558. [In Persian].
- Bazeli, J., Ghalehaskar, S., Morovati, M., Soleimani, H., Masoumi, S., Rahmani Sani, A., ... and Rastegar, A. (2022). Health risk assessment techniques to evaluate non-carcinogenic human health risk due to fluoride, nitrite and nitrate using Monte Carlo simulation and sensitivity analysis in Groundwater of Khaf County, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(8), 1793-1813.
- Bhutiani, R., Kulkarni, D. B., Khanna, D. R., & Gautam, A. (2016). Water quality, pollution source apportionment and health risk assessment of heavy metals in groundwater of an industrial area in North India. *Exposure and Health*, 8, 3-18.
- Bulut, O. F., Duru, B., Çakmak, Ö., Günhan, Ö., Dilek, F. B., & Yetis, U. (2020). Determination of groundwater threshold values: A methodological approach. *Journal of Cleaner Production*, 253, 120001.
- Çelebi, A., Şengörür, B., & Kløve, B. (2015). Seasonal and spatial variations of metals in Melen Watershed Groundwater, Turkey. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 43(5), 739-745.
- Chen, J., Wu, H., Qian, H., & Li, X. (2018). Challenges and prospects of sustainable groundwater management in an agricultural plain along the Silk Road Economic Belt, north-west China. *International journal of water resources development*, 34(3), 354-368.
- Daneshvar Vousoughi, F., Dinpashoh, Y., & Aalami, M. T. (2011). Effect of drought on groundwater level in the past two decades (Case study: Ardebil Plain). *Water and Soil Science*, 21(4), 165-179. [In Persian].
- Dinpasho, Y., Fakhari Fard, A., Hassanpoor Eghdam, M. A., & Beheshtee Vayghan, V. (2015). Trend analysis of groundwater quality of Shabestar-Soofian Plain. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(1), 55-69. [In Persian].
- Eghbalian, S., & Bahmani, O. (2020). Study of Local and Temporal Changes of Groundwater Quality Standards of Hamedan-Bahar Plain Using (GIS) over a 10 Year Period. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(3), 83-98. Doi: 10.22034/jest.2020.23995.3310 [in Persian].
- Foster, P. N. (1995). Industrial Arts/Technology Education as a Social Study: The Original Intent? *Journal of Technology Education*, 6(2), 4-18.
- Gaus, I., Kinniburgh, D. G., Talbot, J. C., & Webster, R. (2003). Geostatistical analysis of arsenic concentration in groundwater in Bangladesh using disjunctive kriging. *Environmental geology*, 44, 939-948.
- GU, H., Ma, F., Guo, J., Zhao, H., Lu, R., & Liu, G. (2018). A spatial mixing model to assess groundwater dynamics affected by mining in a coastal fractured aquifer, China. *Mine Water and the Environment*, 37(2), 405-420.
- Haghizadeh, A., Kiani, A., & Kiani, M. (2017). Performance Evaluation of Geo-Statistical Methods to Estimate the Spatial Distribution of Snow Depth and Density in Mountainous Areas (Case Study: Gush Bala Watershed, Mashhad). *Hydrogeomorphology*, 4(12), 45-66. [In Persian].

- He, S., Dong, D., Sun, C., Zhang, X., Zhang, L., Hua, X., & Guo, Z. (2019). Contaminants of emerging concern in a freeze-thaw river during the spring flood. *Science of the total environment*, 670, 576-584.
- Heidari motlagh, A., nasrolahi, A., veysi, S., & Sharifipour, M. (2023). The influence of land surface temperature (LST) on estimated actual evapo transpiration. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(12), 2701-2720. Doi: 10.22059/ijswr.2022.351202.669396. [In Persian].
- Hejam, S., Skhoshkho, Y., & Shams Al-Din Vrindi, R. (2008). Analyzing the trend of seasonal and annual rainfall variations of several selected stations in the center of Iran using non-parametric methods, *geog. research*, 40 (64), 168-157. [In Persian].
- Hooshmand, A., Veysi, S., & Moradzadeh, M. (2012). Investigation of groundwater salinity resources using GIS (Case study: Gotvand-Aghili plain). *Advances in Environmental Biology*, 6(2), 629-635.
- Imran, S., Anwaar, K., Bukhari, L. N., & Ashraf, M. (2016). Water Quality Status of Major Cities of Pakistan 2015-16. Pakistan Council of Research in Water Resources, *Ministry of Science and Technology*.
- Karunanidhi, D., Aravinthasamy, P., Subramani, T., & Kumar, M. (2021). Human health risks associated with multipath exposure of groundwater nitrate and environmental friendly actions for quality improvement and sustainable management: a case study from Texvalley (Tiruppur region) of India. *Chemosphere*, 265, 129083.
- Kaur, H., & Garg, P. (2019). Urban sustainability assessment tools: A review. *Journal of cleaner production*, 210, 146-158.
- Kaur, L., Rishi, M. S., & Siddiqui, A. U. (2020). Deterministic and probabilistic health risk assessment techniques to evaluate non-carcinogenic human health risk (NHHR) due to fluoride and nitrate in groundwater of Panipat, Haryana, India. *Environmental Pollution*, 259, 113711.
- Kaur, L., Rishi, M. S., Sharma, S., Sharma, B., Lata, R., & Singh, G. (2019). Hydrogeochemical characterization of groundwater in alluvial plains of river Yamuna in northern India: An insight of controlling processes. *Journal of King Saud university-science*, 31(4), 1245-1253.
- Khalili, A.S., & Bazrafshan, C. (2004). An Analysis of the Changes in Annual, Seasonal, and Monthly Rainings in Five Iranian Old Stations in the Past One Seventeen and Sixteen Years, *Desert*, 9(1), 25-25. [in Persian].
- Khanduzi, F., Parizanganeh, A., & Zamani, A. (2015). Application of multivariate statistics and geostatistical techniques to identify the spatial variability of heavy metals in groundwater resources. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 13(4), 333-347.
- Kumar, M., Ramanathan, A. L., Mukherjee, A., Sawlani, R., & Ranjan, S. (2019). Delineating sources of groundwater recharge and carbon in Holocene aquifers of the central Gangetic basin using stable isotopic signatures. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 55(3), 254-271.
- Li, P., & Qian, H. (2018). Water resources research to support a sustainable China. *International Journal of Water Resources Development*, 34(3), 327-336.
- Li, P., Tian, R., Xue, C., & Wu, J. (2017). Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13224-13234.
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2015). Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 80-110.
- Magesh, N. S., Krishnakumar, S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2013). Groundwater quality assessment using WQI and GIS techniques, Dindigul district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 4179-4189.
- Mallick, J., Singh, C. K., AlMesfer, M. K., Kumar, A., Khan, R. A., Islam, S., & Rahman, A. (2018). Hydro-geochemical assessment of groundwater quality in Aseer Region, Saudi Arabia. *Water*, 10(12), 1847.
- Mohaghegh, A., Valikhan Anaraki, M., & Farzin, S. (2020). Modeling of qualitative parameters (Electrical conductivity and total dissolved solids) of Karun River at Mollasani, Ahvaz and Farsiat stations using data mining methods. *Iranian Journal of Health and Environment*, 13(1), 103-122. [In Persian].
- Panahi, G., Eskafi, M. H., Rahimi, H., Faridhosseini, A., & Tang, X. (2021). PHysical-chemical evaluation of groundwater quality in semi-arid areas: case study—Sabzevar plain, Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 7, 1-15.
- Patil, V. T., & Patil, P. R. (2011). Groundwater quality of open wells and tube wells around Amalner town of Jalgaon district, Maharashtra, India. *Journal of Chemistry*, 8, 53-58.
- Qasemi, M., Farhang, M., Morovati, M., Mahmoudi, M., Ebrahimi, S., Abedi, A., ... & Ghaderpoury, A. (2022). Investigation of potential human health risks from fluoride and nitrate via water consumption in Sabzevar, Iran. *International journal of environmental analytical chemistry*, 102(2), 307-318.
- Qishlaqi, A., Kordian, S., & Parsaie, A. (2017). Hydrochemical evaluation of river water quality—a case study. *Applied Water Science*, 7, 2337-2342.

- Rafei Sharif Abad, J., & Zehtabian, G. (2017). Tracking Temporal and Spatial Changes in groundwater Quality for Potable and Agricultural Purposes (Case Study: Yazd, Ardakan Plain). *Desert Management*, 5(9), 107-119. Doi: 10.22034/jdmal.2017.27853. [In Persian].
- Rasheed, H., Iqbal, N., Ashraf, M., & ul Hasan, F. (2022). Groundwater quality and availability assessment: A case study of District Jhelum in the Upper Indus, Pakistan. *Environmental Advances*, 7, 100148.
- Rashid, A., Farooqi, A., GAO, X., Zahir, S., Noor, S., & Khattak, J. A. (2020). Geochemical modeling, source apportionment, health risk exposure and control of higher fluoride in groundwater of sub-district Dargai, Pakistan. *Chemosphere*, 243, 125409.
- Ray, R. K., Syed, T. H., Saha, D., Sarkar, B. C., & Patre, A. K. (2017). Assessment of village-wise groundwater draft for irrigation: a field-based study in hard-rock aquifers of central India. *Hydrogeology Journal*, 25(8), 2513-2525.
- Razmkhah, H., Mohammadi, E., Rostami Ravary, A., & Fararoui, A. (2022). Salinity Assessment and Ground Water Quality Mapping Using Principle Component Analysis, Case study: Khafr Plain. *Water Resources Engineering*, 15(54), 1-18. Doi: 10.30495/wej.2021.26939.2287 [in Persian].
- Saha, N., Rahman, M. S., Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., & Guo, W. (2017). Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk. *Journal of environmental management*, 185, 70-78.
- Salari, M. (2024). Investigating groundwater quality using water quality indicators for drinking, agriculture and industry (Case study: Shiraz plain). *Journal of Environmental Science Studies*, 8(4), 7574-7586. Doi: 10.22034/jess.2023.380846.1953. [In Persian].
- Selvam, S., Manimaran, G., & Sivasubramanian, P. (2013). Hydrochemical characteristics and GIS-based assessment of groundwater quality in the coastal aquifers of Tuticorin Corporation, Tamilnadu, India. *Applied Water Science*, 3, 145-159.
- Singh, C. K., Shashtri, S., & Mukherjee, S. (2011). Integrating multivariate statistical analysis with GIS for geochemical assessment of groundwater quality in Shiwaliks of Punjab, India. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1387-1405.
- Sunkari, E. D., Abu, M., Bayowobie, P. S., & Dokuz, U. E. (2019). Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga west municipality, Ghana: implication for domestic and irrigation purposes. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 501-511.
- Tahir, M. A., Rasheed, H., & Imran, S. (2010). Water quality status in rural areas of Pakistan. *Pakistan Council of Research in Water Resources*.
- Torabi Poudeh, H., & Hamezadeh, P. (2018). Evaluate the Water Quality and Trend of changes in quality parameters of Kashkan basin. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(1), 23-36. Doi: 10.22059/ije.2017.228466.490. [In Persian].
- Tyagi, S., & Sarma, K. (2020). Qualitative assessment, geochemical characterization and corrosion-scaling potential of groundwater resources in Ghaziabad district of Uttar Pradesh, India. *Groundwater for sustainable development*, 10, 100370.
- Ukah, B. U., Egbueri, J. C., Unigwe, C. O., & Ubido, O. E. (2019). Extent of heavy metals pollution and health risk assessment of groundwater in a densely populated industrial area, Lagos, Nigeria. *International Journal of Energy and Water Resources*, 3, 291-303.
- Varol, M., & Tokatli, C. (2022). Seasonal variations of toxic metal (loid) s in groundwater collected from an intensive agricultural area in northwestern Turkey and associated health risk assessment. *Environmental Research*, 204, 111922.
- Wang, X., Zheng, W., Tian, W., GAO, Y., Wang, X., Tian, Y. ... & Zhang, X. (2022). Groundwater hydrogeochemical characterization and quality assessment based on integrated weight matter-element extension analysis in Ningxia, upper Yellow River, and northwest China. *Ecological Indicators*, 135, 108525.
- Wu, J., Zhang, Y., & Zhou, H. (2020). Groundwater chemistry and groundwater quality index incorporating health risk weighting in Dingbian County, Ordos's basin of northwest China. *Geochemistry*, 80(4), 125607.
- Xiao, J., Wang, L., Chai, N., Liu, T., Jin, Z., & Rinklebe, J. (2021). Groundwater hydrochemistry, source identification and pollution assessment in intensive industrial areas, eastern Chinese loess plateau. *Environmental Pollution*, 278, 116930.
- Yonesi, H., Torabipoudeh, H., Shahinejad, B., Arshia, A., & mirzapour, H. (2020). Groundwater quality trend analysis and zoning using TFPW-MK and GIS (Case Study: Najaf Abad Aquifer). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 9(3), 143-156.
- Zanganeh asadi, M. A., Kolivand, T., & Jokar Sarhangi, E. (2021). Hazardous zoning of Aleshtar plain karst aquifer with cap model. *PHysical GeographY Quarterly*, 14(52), 83-98. [In Persian].
- Zhao, C., Zhang, X., Fang, X., Zhang, N., Xu, X., Li, L. ... & Xia, Y. (2022). Characterization of drinking groundwater quality in rural areas of Inner Mongolia and assessment of human health risks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234, 113360.