تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال بیست و دوم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵
Volume 22, No.1, Spring 2026 (IR-WRR)
۳۸-۵۳

سنجش کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شُرب و کشاورزی با روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت تبریز)

الناز شرقی[۱*]، وحید نورانی[۲]، زهرا حیدری[۳]، ناردین جباریان پاک‌نژاد[۴]

چکیده

آب‌های زیرزمینی از منابع اصلی تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که اُفت کیفیت آن می‌تواند تهدیدی جدی برای جامعه باشد. بنابراین، استفاده از نقشه‌های آلودگی ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. دشت تبریز به‌عنوان منطقه‌ای نیمه‌خشک در سال‌های اخیر با کاهش کیفیت آب زیرزمینی مواجه بوده است. در این پژوهش، داده‌های ۴۱ چاه طی دوره ۱۵ ساله (۱۴۰۰_۱۳۸۶) از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی گردآوری و کیفیت آب با شاخص کیفیت آب شرب (WQI)، کشاورزی (IWQI) و روش‌های زمین‌آماری (کریجینگ و IDW) در محیط ArcGIS تحلیل شد. نتایج WQI نشان داد مقادیر آن در فصل تَر بین ۱۱۹/۲۳ تا ۷۶۱/۲۴ و در فصل خشک بین ۱۰۱/۷۰ تا ۷۴۷/۸۹ متغیر بوده که بیانگر کیفیت ضعیف تا غیرقابل شرب است. مقادیر IWQI نیز در فصل تَر بین ۲۲/۷۹ تا ۷۱/۳۲ و در فصل خشک ۲۲/۸۵ تا ۷۵/۴۰ بوده که آب را در محدودیت شدید تا کم برای کشاورزی قرار می‌دهد. مقایسه فصلی بیانگر بهبود ۴/۴۴ درصدی کیفیت آب شرب و ۱/۸۶ درصدی کیفیت آب کشاورزی در فصل خشک نسبت به تَر است. تحلیل‌های انجام شده با AqQA نشان داد رُخساره غالب آب زیرزمینی سدیم_کلراید (Na-Cl) بوده که نقش اصلی در اُفت کیفیت دارند. بررسی دیاگرام ویلکاکس نیز نشان داد اغلب نمونه‌ها در هر دو فصل در گروه با شوری و سدیم بالا قرار گرفته و برای کشاورزی نامناسب هستند. نقشه‌های پهنه‌بندی نشان داد بیشترین آلودگی در جنوب‌غرب و شمال‌شرق آبخوان متمرکز است. در نهایت، مدیریت بهینه مصرف، پایش مستمر کیفیت و کاهش شوری اراضی به‌عنوان راهکارهای بهبود کیفیت آب پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: کیفیت آب زیرزمینی، شاخص‌های کیفیت آب زیرزمینی، رُخساره هیدروشیمیایی، روش‌های زمین‌آمار، دشت تبریز.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۷/۱۷

۱- دانشیار، گروه عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد، گروه عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۴- دکتری، عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*- نویسنده مسئول

Assessment of Groundwater Quality for Drinking and Agricultural Uses with Geostatistical Methods (Case Study: Tabriz Plain)

E. Sharghi [1], V. Nourani [2], Z. Heidari[3], and N. Jabbarian Paknezhad[4]*

Abstract

Groundwater is one of the main water supply sources in arid and semi-arid regions, and the decline in its quality can be a serious threat to the society. The use of pollution maps is an effective tool in water resources management. Tabriz plain, located in a semi-arid region, has faced groundwater quality degradation in recent years. In this study, data from 41 wells were collected for a 15-year period (2007–2021) via East Azerbaijan Regional Water Authority, and groundwater quality was analyzed using Water Quality Index (WQI), Irrigation Water Quality Index (IWQI), and geostatistical methods (Kriging and IDW) using ArcGIS. The WQI results showed values between 119.23 and 761.24 in wet season and between 101.70 and 747.89 in dry season, indicating poor to unsuitable drinking water quality. IWQI values ranged from 22.79 to 71.32 in wet season and from 22.85 to 75.40 in dry season, placing the water in severe to slight restriction for irrigation. Seasonal comparison revealed an improvement of 4.44% in drinking water quality and 1.86% in irrigation water quality in dry season compared to wet season. Analyses with AqQA showed that the hydrochemical facies was sodium–chloride (Na-Cl), playing the main role in water quality reduction. The Wilcox diagram indicated that in both seasons most samples were in the high salinity and sodium hazard group, unsuitable for irrigation. Geostatistical zoning showed that the highest pollution was concentrated in southwest and northeast of aquifer. Optimal groundwater management, regular monitoring, and soil salinity reduction are proposed as solutions to improve water quality.

Keywords: Groundwater Quality, Groundwater Quality Indices, Hydrochemical Facies, Geostatistical Methods, Tabriz Plain.

Received: April 20, 2025

Accepted: October 9, 2025

1- Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: sharghi@tabrizu.ac.ir

2- Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- M.Sc. Student in Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

4- Ph.D. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

*- Corresponding Author

Doi: 10.22034/iwrr.2025.517961.2853

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند. با این‌حال، بهره‌برداری ناپایدار، آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی می‌توانند کیفیت این منابع را تهدید کنند (Chidiac et al., 2023). دشت تبریز به‌عنوان یکی از مناطق کلیدی در فعالیت‌های کشاورزی و توسعه اقتصادی در شمال‌غرب ایران (Barzegar et al., 2017)، طی دهه‌های اخیر با چالش‌های متعددی در کیفیت آب‌های زیرزمینی مواجه شده است. کیفیت آب زیرزمینی تحت تاثیر عوامل متنوعی مانند جنس سنگ‌های مادر، شرایط اقلیمی، عمق چاه‌ها و فعالیت‌های انسانی قرار دارد (Barzegar et al., 2017). در سال‌های اخیر، روش‌های متنوعی برای ارزیابی دقیق کیفیت آب‌های زیرزمینی توسعه یافته‌اند. از جمله آنها می‌توان به شاخص‌هایی مبتنی بر روابط ریاضی برای تحلیل تغییرات کیفی آب مانند شاخص (WQI)[۱] و شاخص (IWQI)[۲] که برای سنجش کیفیت آب جهت مصارف شرب و کشاورزی طراحی شده‌اند، اشاره کرد. این شاخص‌ها در بسیاری از پژوهش‌ها برای سنجش کیفیت آب در سفره‌های آب زیرزمینی استفاده شده‌اند. همچنین، بهره‌گیری از تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تحلیل داده‌های مکانی مانند زمین‌آمار[۳]، امکان پهنه‌بندی کیفیت آب در یک منطقه را فراهم می‌کند. این تکنیک‌ها با مدل‌سازی فضایی، مناطق با کیفیت نامطلوب را شناسایی کرده و اطلاعات ارزشمندی را برای تصمیم‌گیری بهینه در اختیار مدیران منابع آب قرار می‌دهند (Gharbia et al., 2016). در این‌خصوص مطالعات متعددی پیرامون کیفیت آب زیرزمینی انجام شده است. برای نمونه Naz et al. (2024) کیفیت آب‌زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی در مناطق شهری استان پنجاب در پاکستان را بررسی کردند. نتایج نشان داد آلودگی میکروبی و فلزات سنگین در بخش لاهور موجب کاهش کیفیت آب شده و آن را در برخی مناطق غیرقابل‌استفاده کرده است. Najarpour et al. (2018) در حوضه رودخانه شور اصفهان، با استفاده از روش‌های زمین‌آماری از جمله کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و (IDW)[۴] دریافتند که آلودگی در بخش‌های شمالی حوضه بیشتر است و روش کریجینگ معمولی کمترین خطا را در مقایسه با سایر روش‌ها داشته است. همچنین، Shiri & Nourani. (2021) با بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز نشان دادند که به‌دلیل غلظت بالای بسیاری از پارامترهای فیزیکوشیمیایی، این منابع برای مصارف شرب مناسب نیستند و در بین مدل‌ها، کریجینگ و کوکریجینگ با مدل نمایی نتایج دقیق‌تری ارائه دادند. با وجود این مطالعات، همچنان خلأهایی باقی مانده است. اغلب پژوهش‌های پیشین به یک بازه زمانی کوتاه یا یک نوع کاربری خاص (شرب یا کشاورزی) تمرکز داشته‌اند و کمتر به تحلیل هم‌زمان هر دو جنبه پرداخته‌اند. علاوه بر این، مقایسه جامع مدل‌های مختلف زمین‌آماری در پهنه‌بندی کیفیت آب در دشت تبریز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بلندمدت (۱۴۰۰-۱۳۸۶) و به‌کارگیری هم‌زمان دو شاخص WQI و IWQI مبتنی بر استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO)[۵] و مقایسه مدل‌های زمین‌آماری (کریجینگ ساده[۶]، معمولی[۷] و عمومی[۸]) و روش IDW، تصویر دقیق‌تری از تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی این دشت ارائه می‌دهد. نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی علمی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی دشت تبریز فراهم کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت تبریز با وسعت حدود ۷۰۰ کیلومترمربع، در شمال غربی ایران و در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این منطقه، توسط دامنه‌های جنوبی کوه‌های میشو و مورو و کوه‌های غربی قره‌داغ در شمال، دامنه‌های شمالی کوه سهند در جنوب، شهر تبریز در شرق و شوره‌زارهای دریاچه ارومیه در غرب محصور شده است (Barzegar et al., 2017). رودخانه آجی‌چای، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه دائمی این منطقه است که از شمال شرق وارد دشت شده و در مرکز دشت به سمت غرب جریان می‌یابد و درنهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد. رودخانه‌های فرعی گمناب‌چای، سنیخ‌چای و صوفیان‌چای از جناح راست و رودخانه‌های سردرود و عنصرود از جناح چپ به رودخانه آجی‌چای ملحق شده و در ورودی دشت مخروط‌افکنه‌هایی را تشکیل می‌دهند (Barzegar et al., 2017). دشت تبریز شامل دو نوع آبخوان آزاد و تحت‌فشار است. آبخوان آزاد شامل مخروط‌افکنه‌های شمالی و جنوبی بوده و ضخامت آن حداکثر به ۱۰۰ متر می‌رسد که به‌تدریج به سمت کوه‌ها و مرکز دشت کاهش یافته و به ۵۰ متر می‌رسد (Barzghar et al., 2015).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

تحلیل نمونه‌های آب، گام اساسی در ارزیابی کیفیت آن برای مصارف مختلف و تضمین سلامت عمومی جامعه است. جهت ارزیابی کیفیت آب‌زیرزمینی در حوضه دشت تبریز برای مصارف شرب و کشاورزی، داده‌های فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی طی یک دوره ۱۵ ساله (۱۴۰۰-۱۳۸۶) مورد استفاده قرار گرفت.

نمونه‌برداری‌ها به‌صورت شش‌ماهه انجام شده و در هر سال دو سری داده از ۴۱ حلقه چاه برداشت شد که در مجموع ۸۲۶ نمونه را شامل می‌شود. به‌منظور تحلیل تغییرات فصلی، داده‌های هر چاه در دو گروه فصل تَر (نیمسال اول) و فصل خشک (نیمسال دوم) دسته‌بندی شده و میانگین‌گیری صورت گرفت. دلیل این تقسیم‌بندی، انطباق آن با دوره آبیاری محصولات کشاورزی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دارد. بنابراین، برای هر چاه دو مقدار نهایی (میانگین فصل تَر و میانگین فصل خشک) به‌عنوان داده‌های ورودی به تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل هدایت الکتریکی[۹] (EC)، مواد جامد محلول کل[۱۰] (TDS)، سختی‌کل[۱۱] (TH)، میزان اسیدیته (pH)، نسبت جذبی سدیم[۱۲] (SAR)، درصد سدیم[۱۳] (Na%)، پتاسیم (k^+)، سدیم (Na^+)، منیزیم (Mg^{+2})، کلسیم (Ca^{+2})، کلراید (Cl^-)، بی‌کربنات (HCO^-_3)، سولفات (SO^{-2}_4) است. موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

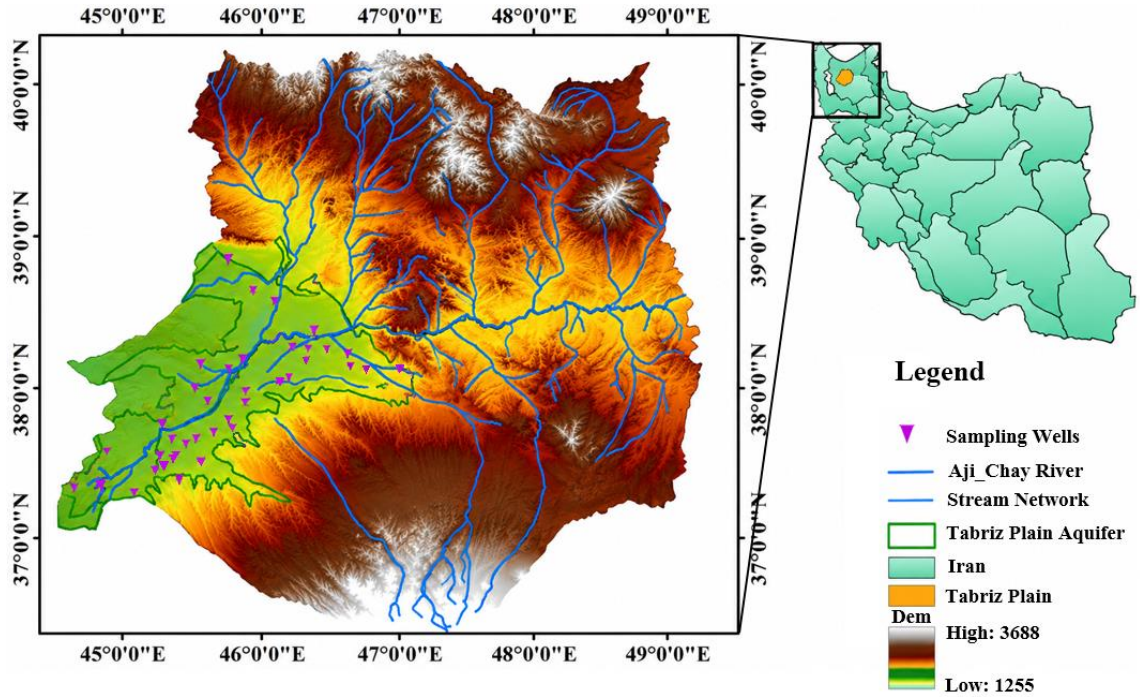


Fig. 1- Locations of the sampling wells
شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده

۲-۳- روش تحقیق

۲-۳-۱- شاخص کیفیت آب شرب

شاخص کیفیت آب، ابزاری مفید برای ارزیابی کلی کیفیت آب است. این شاخص با ارائه یک مقدار واحد به کیفیت آب، تغییرات مکانی آن را به‌صورت ساده و قابل فهم نشان می‌دهد. در این روش، براساس اهمیت نسبی هر پارامتر در کیفیت آب شرب، مطابق جدول (۱) یک وزن w_i به هر پارامتر اختصاص داده می‌شود. پارامترهایی که استانداردهای سخت‌گیرانه‌تری دارند، در محاسبه WQI وزن بیشتری دریافت می‌کنند. وزن نسبی هر پارامتر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$W_i=\frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، W_i وزن نسبی، w_i وزن هر پارامتر و n تعداد متغیرها است. مقیاس درجه‌بندی کیفیت آب مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در این رابطه، C_i غلظت هر پارامتر و S_i مقدار مجاز تعیین شده توسط استاندارد WHO برای هر پارامتر است:

$$q_i=\frac{C_i}{S_i}\times 100 \qquad (۲)$$

شاخص WQI یک ابزار عددی بوده که با ترکیب چندین پارامتر مختلف، یک مقدار واحد که نشان‌دهندهٔ کیفیت کلی آب است، ارائه می‌دهد. این شاخص بر اساس رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$WQI=\sum_{i=1}^{n} W_i q_i / \sum_{i=1}^{n} W_i \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، W_i وزن واحد برای پارامتر i ام، q_i نرخ کیفیت برای پارامتر i ام و n تعداد متغیرها است (Sunitha & Reddy ,2022).

Table 1- Statistical analysis of physical and chemical indicators of underground water samples in the study area (Sunitha & Reddy, 2022)

جدول ۱- بررسی آماری شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه (Sunitha & Reddy, 2022)

Parameter	Unit	(Ds) (WHO, 2011)	Weight (w_i)	Relative Weight (W_i)
Na^{+2}	mg / l	50-200	3	0.081
Ca^{+2}	mg / l	75-200	2	0.054
Mg^{+2}	mg / l	30-150	2	0.054
K^{+}	mg / l	12-20	1	0.054
Cl^{+}	mg / l	250-600	3	0.081
SO_4^{-2}	mg / l	200-600	4	0.0108
HCO^{-}_3	mg / l	300-600	3	0.054
TDS	mg / l	500-1500	5	0.0135
TH	mg / l	100-500	4	0.0108
EC	$\mu s/cm$	1500	5	0.135
PH	-	6.5-8.5	3	0.081

پس از تعیین وزن نسبی هر پارامتر و محاسبه شاخص WQI، لازم است مقادیر به‌دست‌آمده در یک چارچوب تفسیری قرار گیرند تا وضعیت کیفی آب به‌طور دقیق مشخص شود. این طبقه‌بندی امکان می‌دهد که مقادیر عددی شاخص به دسته‌های کیفی قابل فهم از (خیلی خوب) تا (نامناسب برای شرب) تبدیل شوند و تفسیر نتایج برای مصارف مختلف به‌ویژه شرب ساده‌تر شود. محدوده‌های این طبقات در جدول (۲) ارائه شده است

Table 2- Classification of water quality based on WQI (Sunitha & Reddy, 2022)

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس شاخص WQI (Sunitha & Reddy, 2022)

WQI	Drinking water quality
>50	Excellent
50 - 100	Good
100 - 200	Poor
200 - 300	Very Poor
<300	Unsuitable for drinking

- نمودار شولر

برای ارزیابی ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی و بررسی تغییرات کیفی آنها، از نمودار شولر استفاده شد. این نمودار ابزاری گرافیکی برای نمایش غلظت نسبی یون‌های اصلی شامل کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلراید، سولفات و بی‌کربنات است. مقایسه خطوط حاصل از این نمودار امکان شناسایی رُخساره‌های هیدروشیمیایی و روند تغییرات کیفیت آب را فراهم می‌سازد (Hem, 1985). استفاده از این نمودار به‌ویژه در بررسی کیفیت آب برای شرب اهمیت دارد زیرا، نشان می‌دهد کدام یون‌ها بیشترین نقش را در اُفت کیفیت آب ایفـــا می‌کنند. در این مطالعه، نمودار شولر با استفاده از نرم‌افزار AqQA ترسیم شد تا امکان تحلیل دقیق رُخساره‌های شیمیایی آب برای مصارف شرب فراهم شود.

۲-۳-۲- شاخص کیفیت آب کشاورزی

برای محاسبه شاخص IWQI، از پنج پارامتر اصلی شامل EC، SAR، Na^{+}، Cl^{-} و HCO_3^{-} استفاده می‌شود. این شاخص به صورت جمع وزنی از پارامترهای کیفیت آب q_i طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود، به‌طوری که هر پارامتر وزن مشخص W_i متناسب با میزان مطلوبیت آن برای مصارف کشاورزی به خود اختصاص می‌دهد:

$$IWQI=\sum\left[\left(\frac{w_i}{\sum_n^{i=1} w_i}\right)\times\left(q_{max}-\left(\frac{[(x_{ij}-x_{inf})\times q_{iamp}]}{x_{amp}}\right)\right)\right] \quad (۴)$$

این معادله شامل W_i وزن اختصاص داده‌شده به هر پارامتر طبق جدول (۴)، q_{max} به‌عنوان حداکثر مقدار q_i برای هر رده، x_{ij} داده‌های پارامتر آب، x_{inf} حد پایین رده‌ای است که پارامتر به آن تعلق دارد، q_{iamp} دامنه رده و x_{amp} دامنه رده‌ای است که پارامتر به آن تعلق دارد. پارامترهای کیفیت آب کشاورزی q_i به همراه مقادیر حدی پیشنهادی آن‌ها در جدول (۳) خلاصه شده است (Fadi et al., 2024).

Table 3- Limit values of water quality parameters for agricultural uses (Fadi & et al., 2024)

جدول ۳- مقادیر حدی پارامترهای کیفیت آب برای مصارف کشاورزی (Fadi & et al., 2024)

q_i	EC ($\mu S/cm$)	SAR (meq/l)	Na^+ (meq/l)	Cl^- (meq/l)	HCO_3^- (meq/l)
85-100	200-750	>3	2-3	>4	1–1.5
60-85	750-1500	3-6	3-6	4-7	1.5–4.5
35-60	1500-3000	6-12	6-9	7-10	4.5–8.5
0-35	>200 or ≤ 3000	<12	>2 or ≤ 9	<10	<1 or ≤ 8.5

شاخص کیفیت آب آبیاری (IWQI)، به پنج سطح تقسیم‌بندی شده است که هر سطح بیانگر محدودیت‌های متفاوت در استفاده از آب در آبیاری است. این شاخص، با مقادیر بین صفر (بی‌کیفیت‌ترین) تا صد (باکیفیت‌ترین) مطابق جدول (۵)، شرایط مناسب یا نامناسب بودن آب زیرزمینی برای آبیاری را مشخص می‌کند (Aravinthasamy & et al., 2020; Fadi & et al., 2024).

Table 4- Determining weights of the parameters (Fadi et al., 2024)

جدول ۴- تعیین وزن پارامترها (Fadi et al., 2024)

Parameter	Weight (w_i)
EC	0.21
Na^+	0.20
Cl^-	0.20
HCO_3^-	0.19
SAR	0.20

Table 5- Classification of water quality range and types based on IWQI (Al-Aizari & et al., 2024)

جدول ۵- طبقه‌بندی دامنه و انواع کیفیت آب بر اساس شاخص IWQI (Al-Aizari & et al., 2024)

Water quality classification	IWQI
Severe restriction	0-40
High restriction	40-55
Moderate restriction	55-70
Low restriction	70-85
No restriction	85-100

- شاخص نفوذپذیری [۱۴](PI)

شاخص نفوذپذیری (PI) مطابق با رابطه (۵) توسط Doneen. (1975) توسعه داده شد. شاخص PI برای ارزیابی مناسب بودن آب جهت آبیاری و تأثیر آن بر نفوذپذیری خاک به‌کار می‌رود. این شاخص استفاده بلندمدت از آب آبیاری با شوری بالا را با درنظر گرفتن اثرات یون‌های مختلف موجود در آب ارزیابی می‌کند (Fadi & et al., 2024):

$$PI=\frac{Na^+ +\sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{+2}+Mg^{+2}+Na^+}\times 100 \quad (۵)$$

- نمودار ویلکاکس

به‌منظور تعیین میزان مناسب بودن آب‌های زیرزمینی برای آبیاری، از نمودار ویلکاکس بهره گرفته شد. در این نمودار، EC به‌عنوان شاخص شوری و Na% به‌عنوان شاخص سدیمی بودن آب به‌کار گرفته می‌شوند. موقعیت نمونه‌ها در این نمودار نشان می‌دهد که آب در کدام یک از طبقات کیفیتی قرار گرفته و آیا برای مصارف کشاورزی مناسب است یا خیر (Wilcox, 1955). بدین‌ترتیب، این نمودار ابزار مؤثری برای سنجش اثرات شوری و سدیم در محدودیت‌های استفاده از منابع آب زیرزمینی برای آبیاری محسوب می‌شود. نمودار ویلکاکس نیز در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار

AqQA ترسیم شد تا دسته‌بندی کیفی نمونه‌ها با دقت بیشتری صورت پذیرد.

۲-۳-۳- روش‌های زمین‌آمار

برای توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب در مصارف شُرب و کشاورزی، از روش‌های زمین‌آماری در محیط ArcGIS استفاده شد. در مرحله پیش‌پردازش، داده‌ها با روش لگاریتمی نرمال‌سازی شدند تا تأثیر داده‌های پِرت کاهش یابد و دقت مدل افزایش پیدا کند. برای مدل‌سازی ساختار مکانی داده‌ها، واریوگرام به‌کار گرفته شد و وزن‌های کریجینگ بر اساس مدل‌های واریوگرام تنظیم شد تا مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی ساختار فضایی داده‌ها انتخاب شود. این فرآیند به شناسایی همبستگی‌های مکانی و افزایش دقت پیش‌بینی کمک می‌کند. فرمول واریوگرام مطابق با رابطه (۶) ارائه شده است:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، $\gamma(h)$ نیمه واریانس، $N(h)$ تعداد زوج داده‌هایی که با فاصله h از یکدیگر جدا شده‌اند، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه x_i و $Z(x_i+h)$ مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه (x_i+h) است. برازش مدل ریاضی به داده‌های تجربی، ساختار فضایی داده‌ها را تعیین کرده و پارامترهای ورودی کریجینگ را توصیف می‌کند. واریوگرام نیمه‌تجربی داده‌ها با استفاده از مدل‌های مختلف در جدول (۱۱) برازش داده شد. پارامترهای اثر قطعه‌ای[۱۵] و آستانه[۱۶] توسط ابزار زمین‌آمار محاسبه شدند. اثر قطعه‌ای در واقع عرض از مبدأ مدل واریوگرام است و آستانه مقدار واریوگرامی است که مدل در آن به‌طور کامل صاف می‌شود (Ababakr et al., 2023).

- کریجینگ

کریجینگ یک روش زمین‌آماری است که برای پیش‌بینی مقادیر در نقاط نامعلوم، از داده‌های نقاط شناخته شده استفاده می‌کند تا سطحی پیوسته از مقادیر در بین مکان‌ها ایجاد کند. رابطه (۷)، فرم عمومی معادله کریجینگ را نشان می‌دهد:

$$\hat{Z}(x_p)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i) \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، $\hat{Z}(x_p)$ مقدار برآورد شده متغیر Z در موقعیت x_p، $Z(x_i)$ مقدار شناخته شده در موقعیت x_i و λ_i وزن مربوط به داده‌ها است (Ababakr et al., 2023).

- روش وزن‌دهی معکوس فاصله

پارامترهای ناشناخته را می‌توان با استفاده از روش IDW محاسبه کرد. در این روش، وزن‌ها بر اساس فاصله از نقاط نزدیک‌تر تعیین می‌شوند، به‌طوری که نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتری دریافت می‌کنند. معادله کلی برای IDW به‌صورت زیر است:

$$\hat{Z}(x_p)=\sum_{i=1}^{n}Z(x_i).d_{ij}^{-p}\Big/\sum_{i=1}^{n}d_{ij}^{-p} \qquad (۸)$$

طبق رابطه (۸)، $\hat{Z}(x_p)$ مقدار درون‌یابی‌شده یک گره شبکه در مکان x_p، $Z(x_i)$ نقاط داده‌های همسایه و d_{ij}^{-p} فواصل بین گره شبکه و نقاط داده می‌باشند (Ababakr et al., 2023). در این پژوهش برای اعتبارسنجی مدل‌های زمین‌آماری از **ریشه** میانگین مربعات خطا[۱۷] (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا[۱۸] (MAE) و ضریب تعیین[۱۹] (R^2) جهت بررسی دقت مدل‌های زمین‌آماری استفاده شد. در نرم‌افزار ArcGIS شاخص RMSE به‌صورت مستقیم محاسبه و گزارش می‌شود، در حالی‌که جهت محاسبه MAE و R^2 محاسبات دستی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و داده‌های واقعی صورت گرفت. مطابق رابطه (۹)، که بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده است. هرچه این مقدار کم‌تر باشد، دقت برآورد مدل بیشتر خواهد بود:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\hat{x}_i)^2}{n}} \qquad (۹)$$

طبق رابطه (۹)، x_i مقدار پیش‌بینی شده در نقطه i، $\hat{x}_i$ مقدار مشاهده شده در نقطه i و n تعداد کل نمونه‌ها است (Ababakr et al., 2023). معیار MAE نشان‌دهنده میانگین اندازه خطاهای پیش‌بینی مدل است و میزان اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی را بدون توجه، بیش از حد به نقاط پرت اندازه‌گیری می‌کند. مقدار بهینه آن صفر است و هرچه بزرگ‌تر باشد، دقت مدل کمتر است (Chicco et al., 2021) مقدار MAE طبق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$MAE=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}|x_i-y_i| \qquad (۱۰)$$

طبق رابطه (۱۰)، m تعداد کل نمونه‌ها، x_i مقدار مشاهده شده در نقطه i و y_i مقدار پیش‌بینی شده در نقطه i است. معیار R^2 بدون بُعد بوده و در بازه $[-\infty, 1]$ قرار دارد. هرچقدر R^2 به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد دقیق‌تر مدل در بازتولید مقادیر واقعی است:

$$DC=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(Z_i-R_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Z_i-\bar{Z})^2} \quad (۱۱)$$

طبق رابطه (۱۱)، R_i مقدار محاسباتی، Z_i مقدار مشاهداتی و $\bar{Z}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و N طول داده‌ها است (Chicco et al., 2021).

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی

آب مورد استفاده در مصارف مختلف باید دارای معیارهای کیفی مشخصی باشد. عناصر موجود در آب‌زیرزمینی براساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، بیولوژیکی و رادیواکتیو آب تعریف می‌شود و غلظت آنها باید در حدی باشد که مصرف آن در کوتاه مدت یا بلند مدت عوارضی ایجاد نکند. جدول (۶) نتایج آماری بررسی نمونه‌های آب‌زیرزمینی در فصول تَر و خشک را نشان می‌دهد. تمامی داده‌ها با واحد میلی‌گرم بر لیتر و EC به واحد میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. داده‌های فیزیکوشیمیایی مورد استفاده در این پژوهش از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی گردآوری شده‌اند. بنابراین، فرآیند نمونه‌برداری و تحلیل آزمایشگاهی به‌طور مستقیم در این مطالعه انجام نشده است. برای اطمینان از صحت داده‌ها، در گام نخست بالانس یونی بین مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها محاسبه شد که خطای آن در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۵ درصد بود و بدین ترتیب اعتبار داده‌ها از نظر توازن شیمیایی تأیید شد. در ادامه، به‌منظور کاهش اثر داده‌های پرت و تفاوت مقیاس میان پارامترها، داده‌ها با استفاده از تبدیل لگاریتمی نرمال‌سازی شدند. این فرآیند موجب افزایش پایداری و دقت تحلیل‌های زمین‌آماری شد، زیرا، مدل‌هایی زمین‌آماری نسبت به مقادیر غیرنرمال حساس بوده و حضور آنها می‌تواند موجب انحراف در نتایج شود.

طبق جدول (۶)، غلظت میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی محاسبه و برای بررسی روند تغییرات فصلی مقایسه شدند. نتایج

Table 6- Statistical summary of chemical parameters for Tabriz plain aquifer

جدول ۶- خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی آبخوان دشت تبریز

		Wet Season			Dry Season		
Parameter	**Unit**	**Average**	**Maximum**	**Minimum**	**Average**	**Maximum**	**Minimum**
SO_4^{-2}	mg/l	381.51	906	158	356.83	907	159
CL^-	mg/l	1038.68	3510	163	995.22	3380	127
HCO_3^-	mg/l	361.87	750	237	349.26	613	209
Na^+	mg/l	512.56	1770	120	449.68	1810	120
Mg^{+2}	mg/l	101.40	241	31.6	97.30	251	36.3
Ca^{+2}	mg/l	240.64	761	30.5	226.56	875	33.5
K^+	mg/l	12.13	28.2	5.08	11.54	5.47	20.3
pH	-	7.64	8.14	7.22	7.73	8.3	7.03
TDS	mg/l	2776.85	7584.57	933.58	2660.80	7326.80	806.97
TH	mg/l	1021.55	2893.14	905	959.30	3216.66	233
EC	$\mu s/cm$	4271.46	11668.6	1436.7	4093.55	11272	1241.50

نشان می‌دهد ترتیب غالب یون‌ها در هر دو فصل مشابه است، اما غلظت آن‌ها بسته به شرایط هیدرولوژیکی و تغییرات فصلی متفاوت است. یون‌های K^+، Mg^{+2} و Ca^{+2} کمترین غلظت را داشته، درحالی‌که Cl^- و Na^+ یون‌های اصلی غالب هستند.

فصل تَر: $K < Mg < Ca < SO_4 < HCO_3 < Na < Cl$

فصل خُشک: $K < Mg < Ca < SO_4 < HCO_3 < Na < Cl$

در فصل تَر، افزایش بارش‌ها باعث تماس بیشتر آب با مواد معدنی خاک و سنگ‌ها شده و فرآیند انحلال ترکیباتی مانند HCO_3^- و SO_4^{-2} را تقویت می‌کند، که منجر به افزایش غلظت یون‌ها می‌شود (Ganesan & Arivarasi, 2017). همچنین، کربنات‌ها (CO_3^-) و HCO_3^- در واکنش با دی‌اکسید کربن محلول افزایش یافته و TH آب نیز به‌دلیل افزایش Ca^{+2} و Mg^{+2} بیشتر می‌شود. در فصل خشک، تبخیر آب شدیدتر شده و غلظت یون‌های محلول مانند

Cl^-و Na^+ افزایش می‌یابد. EC و TDS به‌عنوان شاخص‌های شوری به‌دلیل تجمع مواد معدنی محلول افزایش می‌یابد. همچنین، نفوذ شورابه‌ها یا ورود آب‌های سطحی آلوده به آب‌های زیرزمینی می‌تواند تغییرات کیفیت آب را تشدید کند. افزایش PH نیز به‌دلیل تغییر تعادل شیمیایی یون‌ها و کاهش حجم آب اتفاق می‌افتد (Arroyo-Figueroa et al., 2024). اصطلاح رُخساره‌های هیدروشیمیایی برای توصیف گروه‌های مختلف آب‌های زیرزمینی و یون‌های شیمیایی غالب در هر سفره به‌کار می‌رود، که ترکیب شیمیایی آنها با یکدیگر تفاوت دارد (Barzegar et al., 2017). در این پژوهش، پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی با واحد میلی‌اکی‌والان بر لیتر در نرم‌افزار AqQA ترسیم شد.

مطابق شکل (۲)، تمامی نمونه‌ها در میدان ۴ قرار دارند که نشان‌دهنده غلبه اسیدهای قوی به اسیدهای ضعیف است. باتوجه به نتایج نمودار پایپر، رخساره هیدروشیمیایی غالب آب زیرزمینی در فصول تَر و خشک سدیم‌ـکلراید (Na-CL) است.

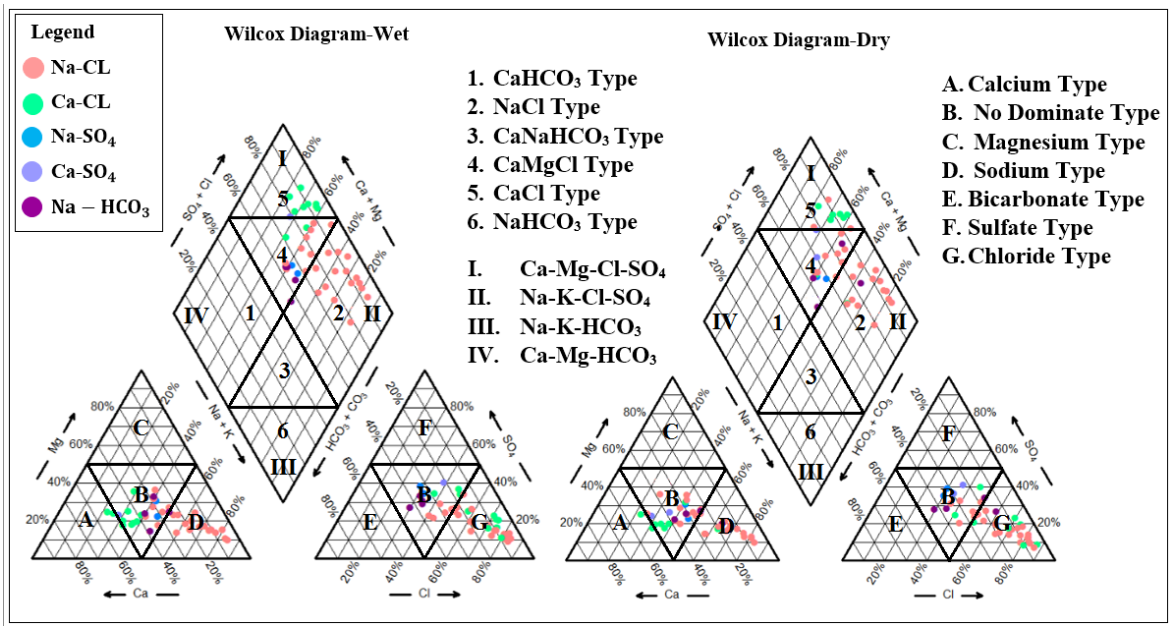


Fig. 2- Papier diagram of Tabriz plain groundwater in dry season and wet season

شکل ۲- دیاگرام پایپر آب زیرزمینی دشت تبریز در فصل خشک و فصل تَر

۲-۳- کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز برای مصارف شرب

نتایج بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب با استفاده از شاخص WQI مطابق جدول (۷) نشان داد، کیفیت آب در فصل تَر در بازه ۱۱۹/۲۳ تا ۷۶۱/۲۴ و در فصل خشک بین ۱۰۱/۷۰ تا ۷۴۷/۸۹ قرار گرفتند. این نتایج نشان‌دهندهٔ آن است که کیفیت آب زیرزمینی در هر دو فصل در محدوده ضعیف تا غیرقابل استفاده برای مصارف شرب قرار دارد. مقایسه بین دو فصل حاکی از آن است که کیفیت آب در فصل خشک ۴/۴۴ درصد بهتر از فصل تَر است. این بهبود می‌تواند ناشی از کاهش بارندگی و رواناب در فصل خشک و در نتیجه ورود کمتر آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی باشد.

Table 7- Classification of drinking water quality indexresults (Sunitha & Reddy ,2022)

جدول ۷- نتایج طبقه بندی شاخص کیفیت آب شُرب (Sunitha & Reddy, 2022)

WQI	Wet season (%)	Dry season (%)
>50	–	–
50-100	–	–
100-200	39.02	34.14
200-300	24.39	26.82
<300	36.58	39.02

طبقه‌بندی کیفیت آب شرب براساس نمودار شولر با واحد میلی‌اکی‌والان بر لیتر در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشتر منابع آب زیرزمینی دشت تبریز در فصول تَر و خشک در محدوده تا حدودی نامناسب برای شُرب (رتبه ۳) قرار دارند.

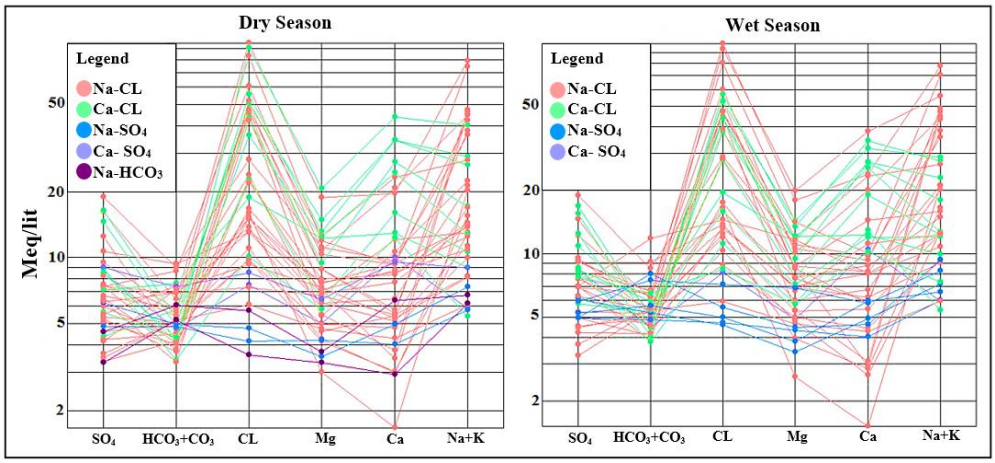


Fig. 3- Schuler diagram for Tabriz plain aquifer in dry season and wet season

شکل ۳- دیاگرام شولر آبخوان دشت تبریز در فصول خشک و تَر

در فصل تَر، افزایش بارش و نفوذ آب‌های سطحی به سفره‌های آب زیرزمینی می‌تواند غلظت برخی مواد معدنی را از طریق رقیق‌سازی کاهش دهد. اما هم‌زمان احتمال ورود آلاینده‌های سطحی نیز وجود دارد که کیفیت آب را تحت تاثیر قرار دهد (Rao, 2006). در فصل خشک، کاهش تغذیه طبیعی و افزایش تبخیر موجب تمرکز نمک‌ها و مواد معدنی می‌شود، اما به‌دلیل کاهش شسته شدن آلاینده‌های سطحی، برخی شاخص‌های کیفی آب ممکن است بهتر از فصل تر بهبود یابند (Adnani et al., 2020). در این مناطق، کیفیت آب زیرزمینی نه تنها به عوامل فصلی، بلکه وابسته به زمین‌شناسی، نوع خاک و فعالیت‌های انسانی نیز است (Giridharan et al., 2008).

۳-۳- کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز برای مصارف کشاورزی

بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از IWQI در جدول (۸) نشان داد که در هر دو فصل، آب زیرزمینی در گروه با محدودیت بالا (۴۰-۵۵) قرار دارد. میانگین IWQI در فصل خشک بین ۷۵/۴۰ تا ۲۲/۸۵ و در فصل تَر بین ۷۱/۳۲ تا ۲۲/۷۹ متغیر است. براساس استانداردهای آب کشاورزی، هیچ یک از نمونه‌ها در گروه بدون محدودیت (عالی) قرار نگرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت آب کشاورزی در فصل خشک نسبت به فصل تر ۱/۸۶ درصد بهبود یافته است.

Table 8- Classification of agricultural water quality results (Fadi et al., 2024)

جدول ۸- طبقه‌بندی نتایج کیفیت آب کشاورزی (Fadi et al., 2024)

IWQI	Wet season (%)	Dry season (%)
0-40	36.58	39.02
40-55	41.46	41.46
55-70	19.51	14.63
70-85	2.4	4.8
85-100	-	-

آمار توصیفی پارامترهایی مانند EC، SAR، Na% و PI برای تعیین مناسب بودن کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای مصارف کشاورزی محاسبه شد. مطابق نتایج جدول (۹)، میزان EC در فصل خشک بین ۱۱۲۷۲ تا ۳۲۰/۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و در فصل تَر بین ۱۱۰۰۰ تا ۲۲۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. نتایج نشان می‌دهد که در فصل خشک ۴/۱۷ درصد کیفیت آب بهبود یافته، اما در هر دو فصل، کیفیت آب در بازه مشکوک و نامناسب قرار دارد.

Table 9- Classification of agricultural water quality

جدول ۹- طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی

Parameter	Range	Water quality	Wet season (%)	Dry season (%)
EC	>250	Excellent	-	-
	250-750	Good	-	-
	750-2500	Questionable	34.14	34.14
	<2500	Unsuitable	65.85	65.85
SAR	>10	Excellent	73.17	75.60
	10-18	Good	19.51	17.07
	18-26	Questionable	7.31	7.31
	<26	Unsuitable	-	-
Na%	20-40	Good	31.70	29.26
	40-60	Acceptable	39.02	39.02
	60-80	Questionable	29.26	31.70
PI	<75	Good	34.14	
	25-75	Acceptable	65.85	12.19
	>25	Unsuitable	-	

مقادیر SAR در فصل خشک بین ۲۶/۹۳ تا ۰/۳۷ و در فصل تَر بین ۳۵/۷۵ تا۰/۴۱ متغیر است. SAR در فصل تَر ۰/۳۱ درصد وضعیت بهتری نسبت به فصل خشک دارد. Na% در فصل خشک بین ۸۹/۰۷ تا ۱۰/۸۸ و در فصل تَر بین ۹۰/۲۸ تا ۱۲/۷۰ متغیر است. کیفیت آب در فصل خشک نسبت به فصل تَر ۰/۰۵ درصد افزایش یافته است. PI در فصل خشک وضعیت نامطلوب‌تری نسبت به فصل تَر دارد، به‌طوری که در فصل تَر ۸۳/۱۴ درصد کیفیت آب وضعیت بهتری دارد. نمودار USSL پیشنهاد شده توسط کارکنان آزمایشگاه شوری ایالات متحده بین مقادیر EC و SAR رسم شده است (USSL, 1954). با استفاده از نمودار ویلکاکس مطابق شکل (۴) می‌توان کلاس یا نوع آب کشاورزی را شناسایی کرد.

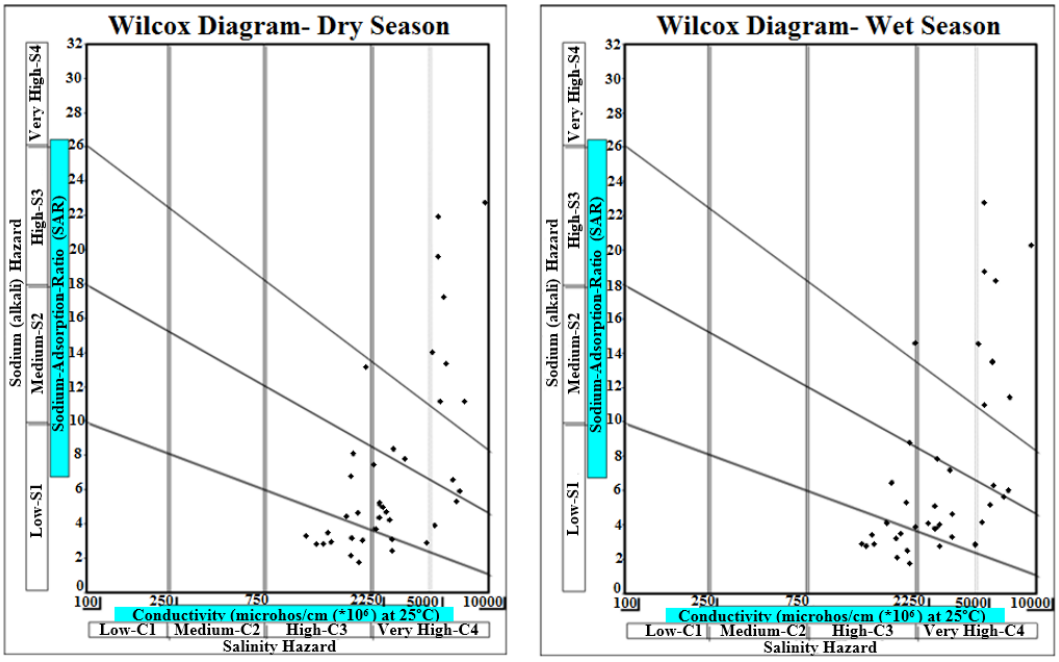


Fig. 4- Checking the quality underground water for Tabriz plain using Wilcox diagram in wet season and dry season

شکل ۴- بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از دیاگرام ویلکاکس در فصول تَر و خشک

نتایج بررسی نمودار ویلکاکس مطابق جدول (۱۰) نشان‌دهنده تغییرات قابل‌توجه کیفیت آب بین فصول خشک و تَر است. در هر دو فصل، بیشتر نمونه‌ها در کلاس‌های با شوری بالا (C4)، یعنی بدترین وضعیت از نظر شوری و سدیم قرار دارند، که نشان‌دهنده کیفیت پایین آب برای مصارف کشاورزی است. به‌طوری‌که ۵۸/۵۳ درصد در فصل‌تَر و ۵۳/۶۵ درصد در فصل خشک از نظر کشاورزی نامناسب و مضر هستند.

Table 10- Classification of groundwater in Tabriz Plain for agricultural uses

جدول ۱۰- طبقه‌بندی آب زیرزمینی دشت تبریز برای مصارف کشاورزی

Water quality classification	Water type	Wet season (%)	Dry season (%)
C_1S_1	Fresh water	_	_
C_1S_2, C_2S_2, C_2S_1	Suitable water	_	_
C_1S_3, C_2S_3, C_3S_1, C_3S_2, C_3S_3	Slightly salty water	36.58	34.14
C_1S_4, C_2S_4, C_3S_4, C_4S_4, C_4S_3, C_4S_2, C_4S_1	Very salty water	53.65	58.53

۳-۴- تحلیل زمین‌آماری

در این مطالعه، برای تحلیل توزیع مکانی، ابتدا داده‌ها با روش لگاریتمی نرمال‌سازی شدند تا اثر مقادیر پرت و تفاوت مقیاس میان پارامترها کاهش یافته و دقت مدل‌سازی افزایش یابد. سپس از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ ساده، معمولی، عمومی و همچنین روش IDW با توان‌های یک تا چهار استفاده شد. برای مدل‌سازی ساختار فضایی داده‌ها، سمی واریوگرام‌ها با مدل‌های نمایی، کروی، دایره‌ای و گوسی به کار گرفته شدند. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه می‌تواند برای ارزیابی ساختار مکانی داده‌ها و تعیین وابستگی تغییرات به عوامل ذاتی یا مدیریتی استفاده شود. اگر این نسبت بیش از ۰/۷۵ باشد، نشان‌دهنده ضعف ساختار مکانی و وابستگی آن به عوامل مدیریتی است. نسبت در بازه ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ نشان‌دهنده ساختار مکانی متوسط وابستگی به هر دو عامل است، در حالی که نسبت کمتر از ۰/۲۵ نشان‌دهنده قوی‌بودن ساختار مکانی و وابستگی شدید به عوامل ذاتی است (Goovarets, 1997). طبق جدول (۱۱)، نتایج واریوگرافی نشان داد پارامترهایی ازجمله PH، شاخص‌های WQI و IWQI، TDS، TH، EC، SAR، Na%، PI، Ca^{+2} و Cl^- نسبت به سایر متغیرها ساختار مکانی قوی‌تری دارند. بنابراین، تخمین زمین‌آماری این پارامترها از دقت بالاتری برخوردار هستند. برای تعیین مناسب‌ترین روش درون‌یابی برای هر پارامتر، خطای RMSE در روش IDW با روش کریجینگ مقایسه شد و روش با کم‌ترین خطای RMSE انتخاب شد

Table 11- The parameter resulting from the fitting of the toxic variogram models

جدول ۱۱- پارامترهای حاصل از بَرازش مدل‌های سمی واریوگرام

Parameter	Model	Sill ($C+C_0$)	Nugget effect (C_0)	$C_0/(C+C_0)$	Range (m)
WQI	Circular	0.208	0	0	5089.84
IWQI	Exponential	0.0562	0	0	8902.217
Na^+	Exponential	0.2625	0.0825	0.30	7055.80
Ca^{+2}	Exponential	0.3114	0.0349	0.11	10000
Mg^{+2}	Exponential	0.2377	0.0791	0.33	10000
Cl^-	Exponential	0.4866	0.1087	0.22	10000
SO_4^{-2}	Exponential	0.3707	0.1882	0.51	7496.97
HCO_3^-	Exponential	0.0752	0.041	0.55	9924.47
pH	Exponential	0.0014	0	00	1435.90
TDS	Exponential	0.243	0.0577	0.24	8783.06
TH	Spherical	0.4096	0	0	1028.61
EC	Exponential	0.3441	0.794	0.23	9817.14
SAR	Spherical	0.2395	0.0343	0.14	10000
Na%	Circular	0.4125	0.0122	0.03	7328.40
PI	Exponential	0.0493	0.0031	0.06	9061.45

Table 12- The results of geostatistical analysis
جدول۱۲- نتایج تحلیل روش زمین آمار

Parameters	IDW method	R^2	MAE	RMSE	Kriging method	R^2	MAE	RMSE
WQI	IDW with exponent 4	0.472	89.89	129. 43	Universal	0.562	77.83	**121.75**
IWQI	IDW with exponent 4	0.491	6.87	9.76	Universal	0.421	7.31	**12.28**
Na^+	IDW with exponent 2	0.592	5.37	6.06	Ordinary	0.510	6.46	**31.56**
Ca^{+2}	IDW with exponent 2	0.586	1.92	2.36	Universal	0.526	2.13	**2.51**
Mg^{+2}	IDW with exponent 2	0.621	2.25	2.68	Universal	0.587	2.33	**2.95**
Cl^-	IDW with exponent 2	0.588	6.43	8.09	Universal	0.553	6.75	**8.28**
SO_4^{-2}	IDW with exponent 2	0.653	1.81	2.36	Universal	0.618	2.01	**2.55**
HCO_3^-	IDW with exponent 3	0.547	1.10	1.33	Universal	0.413	1.25	**1.48**
pH	IDW with exponent 2	0.596	0.19	0.28	Ordinary	0.584	0.22	**0.29**
TDS	IDW with exponent 2	0.643	625.21	810.43	Universal	0.625	648.24	**835.87**
TH	IDW with exponent 2	0.627	178.38	231.17	Ordinary	0.644	232.58	**273.33**
EC	IDW with exponent 2	0.593	984.55	1243.90	Universal	0.580	1001.69	**2229.36**
SAR	IDW with exponent 4	0.618	2.13	3.30	Simple	0.592	3.37	**4.78**
Na%	IDW with exponent 4	0.584	7.32	9.45	Simple	0.629	7.44	**9.26**
PI	IDW with exponent 3	0.590	8.49	10.36	Simple	0.613	8.56	**10.03**

طبق نتایج جدول (۱۲)، Na^+، Ca^+، Mg^{+2}، Cl^-، SO_4^{-2}، EC، TDS و PH با روش IDW توان ۲، HCO_3^- با روش IDW توان۳، SAR و IWQI با روش IDW توان۴ کم‌ترین خطای RMSE و MAE و بالاترین مقدار R^2 را نشان دادند. همچنین، Na% و PI با روش کریجینگ ساده، TH با روش کریجینگ معمولی و WQI با روش کریجینگ عمومی بهترین نتایج را ارائه دادند.

نقشه پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز برای فصول تر و خشک با استفاده از نرم افزار ARC-GIS و روش‌های زمین‌آمار و روش IDW مطابق شکل (۵) و شکل (۶) استخراج شده است.

طبق شکل (۵)، نقشه توزیع مکانی شاخص WQI با روش کریجینگ عمومی و شاخص IWQI با روش IDW توان ۴ برای فصول خشک و تَر تهیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص WQI و IWQI از نواحی تغذیه آبخوان در بخش شمالی به سمت نواحی تخلیه آبخوان در جنوب و جنوب غربی کاهش می‌یابد. نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص WQI نشان می‌دهند که نواحی حاشیه‌ای آبخوان در محدوده کم خطر قرار دارند، درحالی که مناطق مرکزی، تغذیه و تخلیه آبخوان به عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند. برای شاخص IWQI نیز، بخش‌های شمالی و جنوبی آبخوان به عنوان نواحی پرخطر و بخش‌های مرکزی و شمال شرقی از نواحی کم خطر طبقه‌بندی شده‌اند.

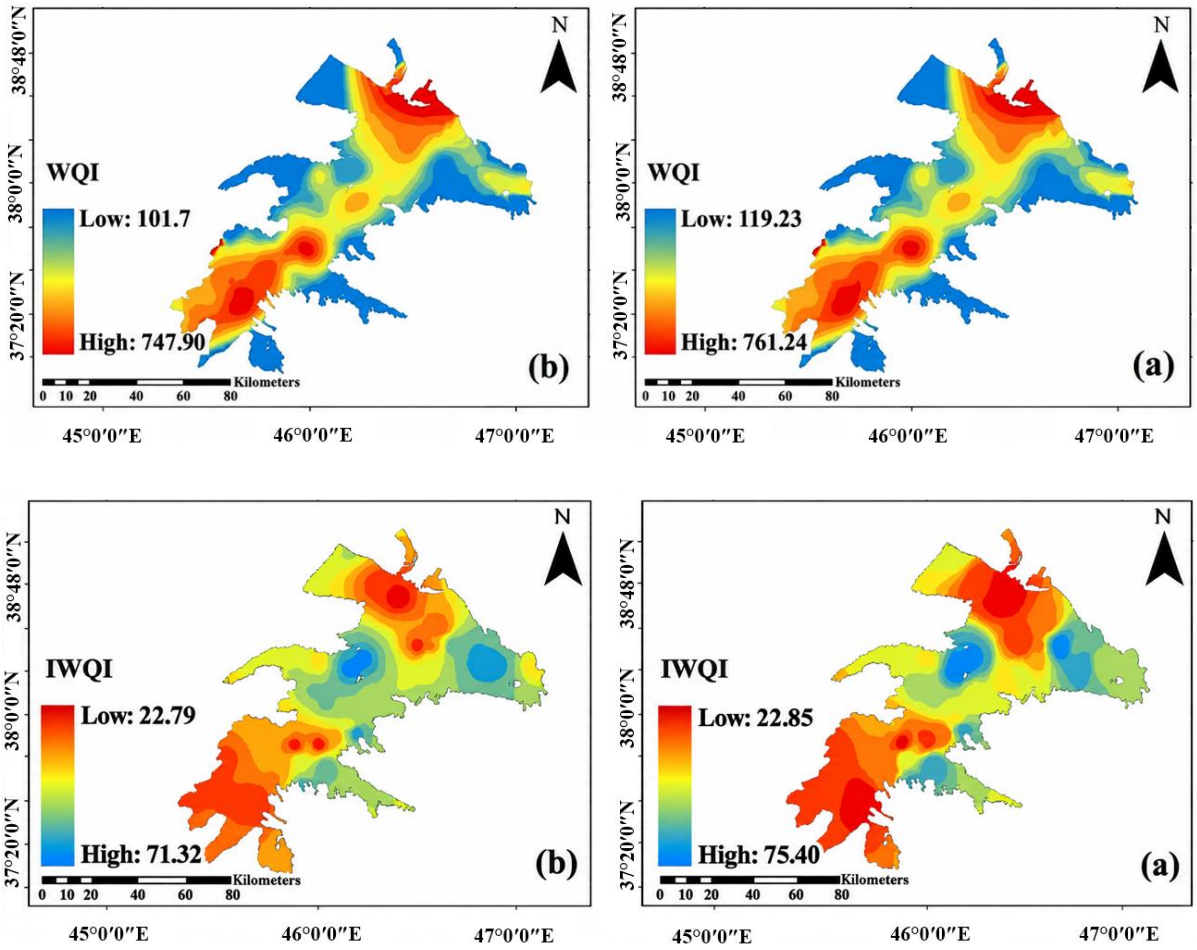


Fig. 5- Zoning of WQI index and IWQI index in wet season (a) and dry season (b)

شکل ۵- پهنه‌بندی شاخص WQI و شاخص IWQI در فصل تَر (الف) و فصل خشک (ب)

غلظت میانگین EC در فصل خشک ۴۰۹۳/۵۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و در فصل تَر ۴۲۷۱/۴۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. مطابق شکل (۶)، افزایش غلظت EC در نواحی شمال‌غربی و جنوبی آبخوان نسبت به سایر نواحی در فصل خشک قابل مشاهده بوده و گسترش نواحی پرخطر در فصل خشک بیشتر از فصل تَر است. میانگین غلظت SAR در فصل خشک ۷/۴۲ و در فصل تَر ۷/۳۹ است، که نشان می‌دهد SAR در هر دو فصل تقریباً ثابت بوده و تغییرات قابل‌توجهی ندارد. شاخص PI برای مصارف کشاورزی طبق نظر Doneen (1962) به سه دسته تقسیم می‌شود: مقادیر PI بیشتر از ۷۵ (خوب)، مقادیر بین ۲۵ تا ۷۵ (متوسط) و مقادیر کمتر از ۲۵ (ضعیف) طبقه‌بندی می‌شوند (Al-Aizari et al., 2024). میانگین غلظت PI در فصل خشک برابر با ۳۸/۱۳ و در فصل تَر ۶۹/۸۳ محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در فصل‌تَر، میزان PI خاک نسبت به فصل‌خشک افزایش می‌یابد. طبق نقشه پهنه‌بندی نشان داده شده در شکل (۶)، افزایش کیفیت خاک و نفوذپذیری در فصل تَر نسبت به فصل خشک به وضوح قابل مشاهده است.

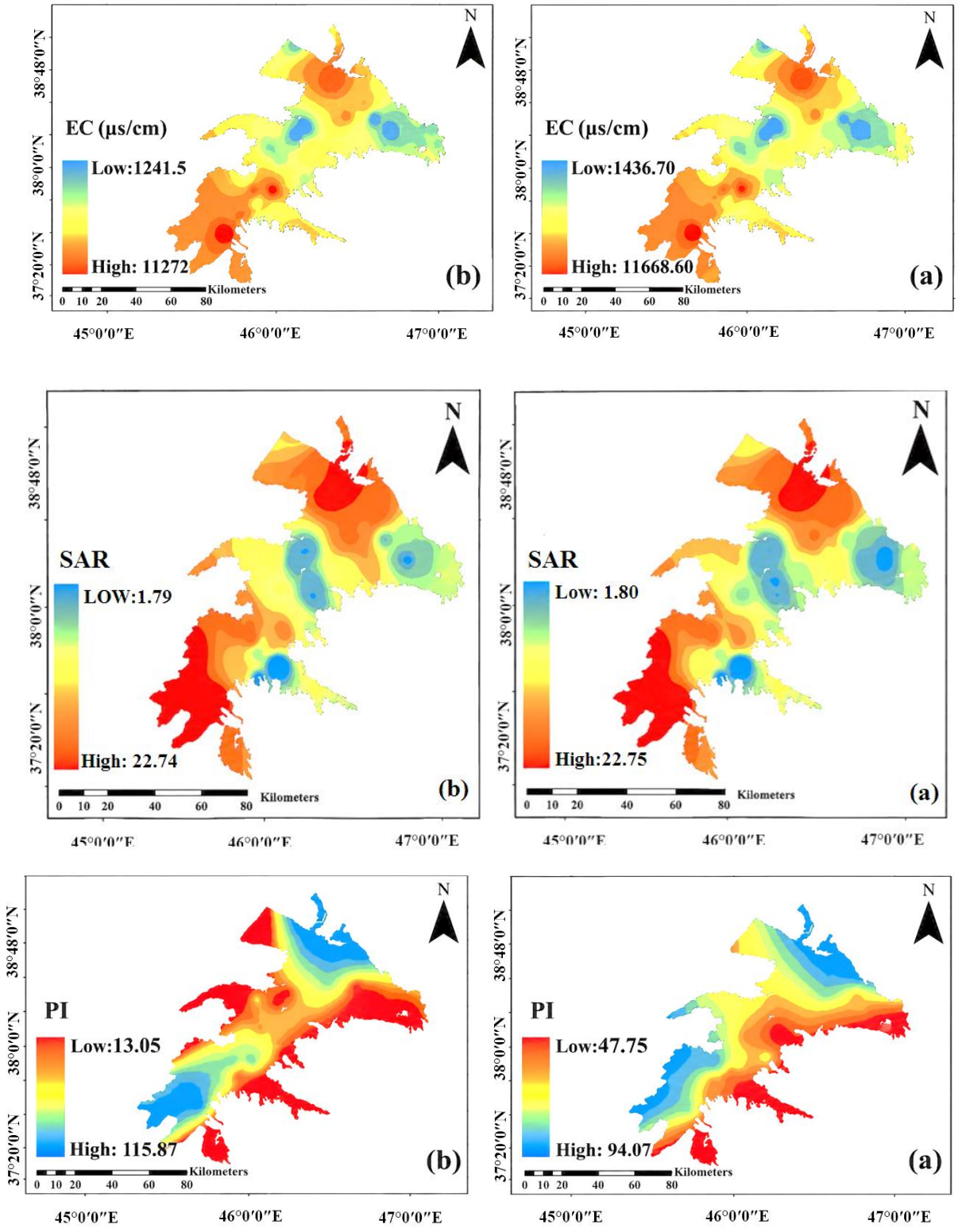


Fig. 6- Zoning of EC, SAR and PI in the wet season (a) and dry season (b)

شکل ۶- پهنه‌بندی EC، SAR و PI در فصل تَر (الف) و فصل خشک (ب)

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش، کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت تبریز برای مصارف شرب و کشاورزی با استفاده از شاخص‌های IWQI و WQI ارزیابی شد. نتایج نشان داد که آب برای مصارف شرب در محدوده ضعیف تا غیرقابل شرب قرار دارد و برای مصارف کشاورزی نیز با محدودیت‌های قابل‌توجهی مواجه است. تحلیل نمودار شولر نشان داد که کیفیت آب شرب در هر دو فصل در محدوده نامناسب برای شرب (رتبه ۳) قرار دارد. همچنین، براساس نتایج نمودار ویلکاکس، کیفیت آب در هر دو فصل در گروه با شوری بالا قرار دارد. بررسی‌ها نشان داد که در فصل‌خشک، کیفیت آب شرب ۴/۴۴ درصد و کیفیت آب کشاورزی ۱/۸۶ درصد نسبت به فصل تر بهبود یافته است. تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های WQI و IWQI نشان داد که نمونه‌های ابتدای آبخوان (مناطق تغذیه) در هر دو فصل کیفیت بهتری نسبت به ایستگاه‌های پایین‌دست (مناطق تخلیه آبخوان) دارند. نتایج مدل‌های واریوگرام نشان داد که مدل نمایی کمترین خطا را نسبت به مدل‌های کروی، دایره‌ای و گوسی دارد. بررسی روش‌های زمین‌آماری مانند کریجینگ ساده، معمولی، عمومی و روش IDW نشان داد که مدل کریجینگ عمومی عملکرد بهتری در مقایسه با دیگر روش‌ها از نظر خطای RMSE دارد. نقشه‌های پراکنش نشان داد که بیشترین آلودگی آب زیرزمینی در مناطق جنوب‌غرب و شمال‌شرقی آبخوان مشاهده می‌شود. این آلودگی علاوه بر فرآیندهای طبیعی مانند آبشویی اراضی شور و افزایش غلظت یون‌ها، به عوامل انسانی نیز وابسته است، از جمله؛ برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، استفاده گسترده از کود و سموم کشاورزی و ورود احتمالی پساب‌های صنعتی و فاضلاب شهری به آبخوان، که این ترکیب از فشارهای طبیعی و انسانی باعث تشدید شوری و آلودگی منابع آب شده است. درنهایت، برای بهبود کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه، پیشنهاد می‌شود که کنترل ورود آلاینده‌ها، مدیریت بهینه کود و سموم کشاورزی، پایش و مدیریت پساب‌های صنعتی و شهری، تزریق مصنوعی به آبخوان، بررسی تغییرات اقلیمی و توسعه الگوهای مصرف پایدار در دستورکار قرار گیرد. همچنین، اجرای مطالعات مشابه با استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر و در بازه‌های زمانی بلندمدت می‌تواند به درک بهتر تغییرات کیفیت آب زیرزمینی کمک کند.

پی‌نوشت‌ها

1- Water Quality Index
2- Irrigation Water Quality Index
3- Geo-Statistical Method
4- Inverse Distance Weighting
5- World Health Organization
6- Simple Kriging
7- Ordinary Kriging
8- Universal Kriging
9- Electrical Conductivity
10- Total Dissolved Solids
11- Total Hardness
12- Sodium Adsorption Ratio
13- Sodium Percentage
14- Permeability Index
15- Nugget
16- Sill
17- Root Mean Square Error
18- Mean Absolute Error
19- Coefficient of Determination

۵- منابع

Ababakr F A, Ahmed K O, Amini A, Karami Moghadam M, Gökçekuş H (2023) Spatio-temporal variations of groundwater quality index using geostatistical methods and GIS. Applied Water Science, 206 (2023)

Adnani I, Younsi A, Namr K, Achheb A (2020) Assessment of seasonal and spatial variation of groundwater quality in the coastal sahel of doukkala, Morocco. Nature Environment and Pollution Technology 19(1):17-28

Arroyo-Figueroa C, Chalá D.C, Gutiérrez-Ribon G, Quiñones-Bolaños E (2024) A framework to evaluate groundwater quality and the relationship between rock weathering and groundwater hydrogeochemistry in the tropical zone: A case study of coastal aquifer arroyo grande, in the Caribbean Region of Colombia. Water 16(12):1650

Al-Aizari H S, Aslaou F, Mohsen O, Al-Aizari A R, Al-Odayni A B, Abduh N A Y, Al-Aizari A J M, Abo Taleb E (2024) Assessment of groundwater quality for irrigation purpose using irrigation water quality index (IWQI). Journal of Environmental Engineering and Landscape Management 32(1):1–11

Barzegar R, Asghari Moghaddam A, Tziritis E (2017) Hydrogeochemical features of groundwater resources in Tabriz plain, northwest of Iran. Applied Water Science 7(7):3997–4011

Barzegar R, Asghari Moghaddam A, Kazemian N (2015) Assessment of heavy metals concentrations with emphasis on arsenic in the Tabriz plain aquifers, Iran. Environmental Earth Sciences 74(1):297–313

Chidiac S, El Najjar P, Ouaini N, El Rayess Y & El Azzi D (2023) A comprehensive review of Water Quality Indices (WQIs): History, models, attempts and perspectives. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 22(2):349–395

Chicco D, Warrens M J, Jurman G (2021) The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science 7:e623

Doneen, L. D. (1962). The influence of crop and soil on percolating water. In Proceedings 1961 Biennial Conference on Groundwater Recharge (pp. 156–163), California, USA.

Fadl M E, ElFadl D M A, Hussien E A A, Zekari M, Shams E M, Drosos M, Scopa A, Megahed H A (2024) Irrigation water quality assessment in Egyptian Arid Lands, Utilizing Irrigation Water Quality Index and Geo-Spatial Techniques. Sustainability 16(14):6259

Ganesan M, Arivarasi R (2017) Seasonal variation in ground water quality and its suitability for drinking and agriculture– A case study in Kancheepuram region, Tamil Nadu, India. Global NEST Journal 19(1):131–139

Gharbia A S, Gharbia S S, Abushbak T, Wafi H, Aish A, Zelenakova M, & Pilla F (2016) Groundwater quality evaluation using GIS based geostatistical algorithms. Journal of Geoscience and Environment Protection 4(2):89–103

Giridharan L, Venugopal T, Jayaprakash M (2008) Evaluation of the seasonal variation on the geochemical parameters and quality assessment of the groundwater in the proximity of River Cooum, Chennai, India. Environmental Monitoring and Assessment 143(1–3):161–178

Goovarets P (1997) Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford Univ. Press, UK

Hem JD (1985) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, 3rd ed. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, Reston, VA, 263 p.

Naz I, Ahmad I, Aslam RW, Quddoos A, Yaseen A (2024) Integrated assessment and geostatistical evaluation of groundwater quality through water quality indices. Water 16(1):63

Najafpour N, Torabi Pudeh H, Younesi H A (2018) Evaluation of GIS and interpolation methods in determining spatial distribution and classifying groundwater quality. Iran-Water Resources Research 14(1):257–262 (In Persian)

Rao S (2006) Seasonal variation of groundwater quality in a part of Guntur District, Andhra Pradesh, India. Environmental Geology 49(3):413–429

Shiri N, Nourani V (2021) Qualitative zoning of Tabriz Plain ground water Resources with using WQI. Hydrogeology (In Persian)

Sunitha V, Reddy B M (2022) Geochemical characterization, deciphering groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG), water quality index (WQI) and geographical information system (GIS) in hard rock aquifer, South India. Applied Water Science 12(3):41

United States Salinity Laboratory Staff (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook No. 60, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 160 p.

Wilcox LV (1955) Classification and use of irrigation waters. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 19 p.

WHO (2011) Guidelines for drinking water quality. 4th edn WHO, press p.564