

سنجش کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی با روش های زمین آمار

(مطالعه موردی: دشت تبریز)

الناز شرقی^{۱*} وحید نورانی^۲، زهرا حیدری^۳، ناردین جباریان پاک نژاد^۴

- ۱- دانشیار گروه عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
 - ۲- استاد گروه عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
 - ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
 - ۴- دکتری عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
- *- نویسنده مسئول

E.Sharghi^{1}, V.Nourani², Z.Heidari³, and N.Jabbarian Paknezhad⁴*

- 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. E-mail: nourani@tabrizu.ac.ir
 - 3- M.Sc. Student in Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran.
 - 4- Ph.D. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
- *- Corresponding Author

چکیده

آب های زیرزمینی از منابع اصلی تأمین آب در مناطق خشک و نیمه خشک می باشند که افت کیفیت آن می تواند تهدیدی جدی برای جامعه باشد. بنابراین، استفاده از نقشه های آلودگی ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب محسوب می شود. دشت تبریز به عنوان منطقه ای نیمه خشک در سال های اخیر با کاهش کیفیت آب زیرزمینی مواجه بوده است. در این پژوهش، داده های ۴۱ چاه طی دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰) از سازمان آب منطقه ای آذربایجان شرقی گردآوری و کیفیت آب با شاخص کیفیت آب شرب (WQI)، کشاورزی (IWQI) و روش های زمین آماری (کریجینگ و IDW) در محیط ArcGIS تحلیل شد. نتایج WQI نشان داد مقادیر آن در فصل تر 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 تر 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 می دهد. مقایسه فصلی بیانگر بهبود ۴/۴۴ درصدی کیفیت آب شرب و ۱/۸۶ درصدی کیفیت آب کشاورزی در فصل خشک نسبت به تر است. تحلیل های انجام شده با AqQA نشان داد رخساره غالب آب زیرزمینی سدیم-کلراید (Na-Cl) بوده که نقش اصلی در افت کیفیت دارند. بررسی دیاگرام ویلکاکس نیز نشان داد اغلب نمونه ها در هر دو فصل در گروه با شوری و سدیم بالا قرار گرفته و برای کشاورزی نامناسب اند. نقشه های پهنه بندی نشان داد بیشترین آلودگی در جنوب غرب و شمال شرق آبخوان متمرکز است. در نهایت، مدیریت بهینه مصرف، پایش مستمر کیفیت و کاهش شوری اراضی به عنوان راهکارهای بهبود کیفیت آب پیشنهاد می شود.

کلمات کلیدی: کیفیت آب زیرزمینی، شاخص های کیفیت آب زیرزمینی، رخساره هیدروشیمیایی، روش های زمین آمار، دشت تبریز.

۱- مقدمه

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند. با این حال، 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 شمال غرب 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^4 و شاخص $IWQI^2$ 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 (GIS) 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 را در اختیار مدیران منابع آب قرار می‌دهند (Gharbia et al., 2016). مطالعات متعددی در زمینه کیفیت آب زیرزمینی انجام شده است. برای نمونه Naz et al. (2024) کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی در مناطق شهری استان پنجاب در پاکستان بررسی کردند. نتایج نشان داد آلودگی میکروبی و فلزات سنگین در بخش لاهور موجب کاهش کیفیت آب شده و آن را در برخی مناطق غیرقابل استفاده کرده است. (Najarpour et al., 2018) در حوضه رودخانه شور اصفهان، با استفاده از روش‌های زمین‌آمار از جمله کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و IDW^4 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 به دلیل غلظت بالای بسیاری از پارامترهای فیزیکوشیمیایی، این منابع برای مصارف شرب مناسب نمی‌باشند و در بین مدل‌ها، کریجینگ و کوکریجینگ با مدل‌نمایی 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 زمین‌آمار در پهنه‌بندی کیفیت آب در دشت تبریز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بلندمدت (۱۳۸۶-۱۴۰۰) و به کارگیری هم‌زمان دو شاخص WQI و $IWQI$ مبتنی بر استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO⁵) و مقایسه مدل‌های زمین‌آمار (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 کیلومتر مربع، 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 شوره زارهای 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 در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد. رودخانه‌های فرعی گمناب‌چای، سنخ‌چای و صوفیان‌چای از جناح راست و رودخانه‌های سردرود و عنصرود از جناح چپ به رودخانه آجی‌چای ملحق شده و در ورودی دشت مخروط افکنه‌هایی را تشکیل می‌دهند (Barzegar et al., 2017). دشت تبریز شامل دو نوع آبخوان آزاد و تحت فشار است. آبخوان آزاد شامل مخروط افکنه‌های شمالی و جنوبی بوده و ضخامت آن حداکثر به ۱۰۰ متر می‌رسد که به تدریج به سمت کوه‌ها و مرکز دشت کاهش یافته و به ۵۰ متر می‌رسد (Barzghar et al., 2015).

۲-۲- داده‌های استفاده شده

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 (۱۳۸۶-۱۴۰۰) مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌برداری‌ها به صورت شش‌ماهه انجام شده و در هر سال دو سری داده از ۴۱ حلقه چاه برداشت گردید که در مجموع ۸۲۶ نمونه را شامل می‌شود. به منظور تحلیل تغییرات فصلی، داده‌های هر چاه در دو گروه فصل تر (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 تر و میانگین فصل خشک) به عنوان داده‌های ورودی به تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل هدایت الکتریکی^۹ (EC)، مواد جامد محلول کل^{۱۰} (TDS)، سختی کل^{۱۱} (TH)، میزان اسیدیته (pH)، نسبت جذبی سدیم^{۱۲} (SAR^{۱۲})، درصد سدیم^{۱۳} (Na%^{۱۳})، پتاسیم^{۱۴} (K⁺)، سدیم^{۱۵} (Na⁺)، منیزیم^{۱۶} (Mg^{۲+})، کلسیم^{۱۷} (Ca^{۲+})، کلراید^{۱۸} (Cl⁻)، بی‌کربنات^{۱۹} (HCO₃⁻)، سولفات^{۲۰} (SO₄^{۲-}) می‌باشد. موقعیت چاه‌های نمونه برداری شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

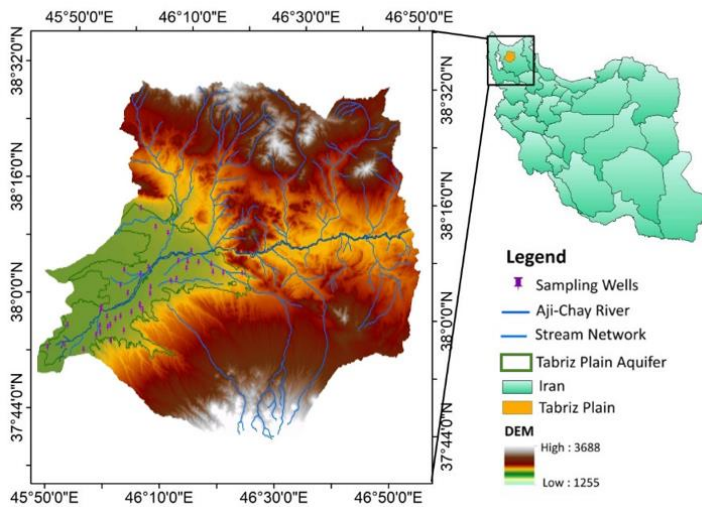


Figure 1- Location of the sampling wells

شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه برداری 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 به صورت 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:

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

در رابطه (۱)، W_i = وزن نسبی، w_i = وزن هر پارامتر و n = تعداد متغیرها است. مقیاس درجه بندی 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:

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

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

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

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)

پارامترها	واحد	(WHO,2011) (Ds)	وزن نسبی (W _i)	وزن (w _i)
Na ⁺	mg/l	۵۰-۲۰۰	۰/۰۸۱	۳
Ca ^{۲+}	mg/l	۷۵-۲۰۰	۰/۰۵۴	۲
Mg ^{۲+}	mg/l	۳۰-۱۵۰	۰/۰۵۴	۲
K ⁺	mg/l	۱۲-۲۰	۰/۰۵۴	۱
Cl ⁻	mg/l	۲۵۰-۶۰۰	۰/۰۸۱	۳
SO _۴ ^{-۲}	mg/l	۲۰۰-۶۰۰	۰/۰۱۰۸	۴
HCO _۳	mg/l	۳۰۰-۶۰۰	۰/۰۵۴	۳
TDS	mg/l	۵۰۰-۱۵۰۰	۰/۱۳۵	۵
TH	mg/l	۱۰۰-۵۰۰	۰/۰۱۰۸	۴
EC	μs/cm	۱۵۰۰	۰/۱۳۵	۵
pH	-	۶/۵-۸/۵	۰/۰۸۱	۳

پس از تعیین وزن نسبی هر پارامتر و محاسبه شاخص WQI، لازم است مقادیر به دست آمده در یک چارچوب تفسیری قرار گیرند تا وضعیت کیفی آب به طور 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 به ویژه شرب ساده‌تر گردد. محدوده‌های این طبقات در جدول (۲) ارائه شده است.

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

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

کیفیت آب شرب	WQI
عالی	۵۰ >
خوب	۵۰-۱۰۰
ضعیف	۱۰۰-۲۰۰
بسیار ضعیف	۲۰۰-۳۰۰
نامناسب برای شرب	۳۰۰ <

۲-۳-۱-۱ 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 رخساره‌های هیدروشیمیایی و روند تغییرات کیفیت آب را فراهم می‌سازد (Hem, 1985). استفاده از این نمودار به ویژه در بررسی کیفیت آب برای شرب اهمیت دارد زیرا نشان می‌دهد کدام یون‌ها بیشترین نقش را در افت کیفیت آب ایفا

می‌کنند. در این مطالعه، نمودار شولر با استفاده از نرم‌افزار AqQA ترسیم شد تا امکان تحلیل دقیق رخساره‌های شیمیایی آب برای مصارف شرب فراهم گردد.

۲-۳-۲- شاخص کیفیت آب کشاورزی

برای محاسبه شاخص IWQI، از پنج پارامتر اصلی شامل EC، SAR، Na⁺، Cl⁻ و HCO₃⁻ استفاده می‌شود. این شاخص به صورت جمع وزنی از پارامترهای کیفیت آب q_i طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود، به طوری که هر پارامتر وزن مشخص W_i متناسب با میزان مطلوبیت آن برای مصارف کشاورزی به خود اختصاص می‌دهد.

$$IWQI = \sum \left[\left(\frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \times \left(q_{max} - \left(\frac{[(X_{ij} - X_{inf}) \times q_{iamp}]}{X_{amp}} \right) \right) \right] \quad (4)$$

این معادله شامل W_i وزن اختصاص داده شده به هر پارامتر طبق جدول (۴)، q_{max} به عنوان 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 (μS/cm)	SAR (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)
۸۵-۱۰۰	۲۰۰-۷۵۰	۳>	۲-۳	۴>	۱-۱/۵
۶۰-۸۵	۷۵۰-۱۵۰۰	۳-۶	۳-۶	۴-۷	۱/۵-۴/۵
۳۵-۶۰	۱۵۰۰-۳۰۰۰	۶-۱۲	۶-۹	۷-۱۰	۴/۵-۸/۵
۰-۳۵	۳۰۰۰≤ or ۲۰۰>	۱۲<	۹≤ or ۲>	۱۰<	۸/۵≤ or ۱<

شاخص کیفیت آب آبیاری (IWQI)، به پنج سطح تقسیم بندی شده است که هر سطح بیانگر محدودیت‌های متفاوت در استفاده از آب در آبیاری است. این شاخص، با مقادیر بین صفر (بی کیفیت ترین) تا صد (با کیفیت ترین) 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 the weight of the parameters (Fadi et al., 2024)
جدول ۴- تعیین وزن پارامترها (Fadi et al., 2024)

وزن (W _i)	پارامترها
۰/۲۱	EC
۰/۲۰	Na ⁺
۰/۲۰	Cl ⁻
۰/۱۹	HCO ₃ ⁻
۰/۲۰	SAR

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)

طبقه‌بندی کیفیت آب	IWQI
محدودیت شدید	۰-۴۰
محدودیت زیاد	۴۰-۵۵
محدودیت متوسط	۵۵-۷۰
محدودیت کم	۷۰-۸۵
بدون محدودیت	۸۵-۱۰۰

۲-۳-۱- شاخص نفوذپذیری (PI¹⁴)

شاخص نفوذپذیری (PI) مطابق با رابطه (۵) توسط دنیین (۱۹۷۵) توسعه داده شد. این شاخص PI است که برای ارزیابی مناسب بودن آب جهت آبیاری و تأثیر آن بر نفوذپذیری خاک به کار می‌رود. این شاخص با استفاده بلندمدت از آب آبیاری با شوری بالا را با در نظر گرفتن اثرات یون‌های مختلف موجود در آب ارزیابی می‌کند (Fadi & et al., 2024).

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+} \times 100 \quad (5)$$

۲-۳-۲- نمودار ویلکاکس

به منظور تعیین میزان مناسب بودن آب‌های زیرزمینی برای آبیاری، از نمودار ویلکاکس بهره گرفته شد. در این نمودار، EC به عنوان شاخص شوری و Na% به عنوان شاخص سدیمی بودن آب به کار گرفته می‌شوند. موفقیت 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). بدین ترتیب، 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 زمین آمار

برای توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب در مصارف شرب و کشاورزی، از روش‌های زمین‌آمار در محیط ArcGIS استفاده شد. در مرحله پیش‌پردازش، داده‌ها با روش لگاریتمی نرمال‌سازی شدند تا تأثیر داده‌های پرت کاهش یابد و دقت مدل افزایش پیدا کند. برای مدل‌سازی ساختار مکانی داده‌ها، واریوگرام به کار گرفته شد و وزن‌های کریجینگ براساس مدل‌های واریوگرام تنظیم گردید 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:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (6)$$

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 (Nugget) و آستانه (Sill) 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).

۲-۳-۳-۱- کریجینگ

کریجینگ یک روش زمین‌آمار 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:

$$\hat{Z}(x_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

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).

۲-۳-۳-۲- روش وزن دهی 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، به طوری که نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتری دریافت می‌کنند. معادله کلی برای IDW به صورت زیر است:

$$\hat{Z}(x_p) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) \cdot d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-p}} \quad (8)$$

طبق رابطه (۸)، $\hat{Z}(x_p)$ مقدار درونی‌یابی شده 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 زمین‌آمار از ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۵} (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا^{۱۶} (MAE) و ضریب تعیین^{۱۷} (R^2) جهت بررسی دقت مدل‌های زمین‌آمار استفاده شد. در نرم‌افزار ArcGIS شاخص RMSE به صورت مستقیم محاسبه و گزارش می‌شود، در حالی که جهت محاسبه MAE و R^2 محاسبات دستی بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی صورت گرفت. مطابق رابطه (۹)، بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده است. هرچه این مقدار کم‌تر باشد، دقت برآورد مدل بیشتر خواهد بود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (9)$$

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 پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی را بدون توجه به 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:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_i - y_i| \quad (10)$$

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

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (11)$$

طبق رابطه (۱۱)، R_i مقدار محاسباتی، Z_i مقدار مشاهداتی و \bar{Z} میانگین مقادیر مشاهداتی و N طول داده‌ها می‌باشد (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 فیزیکی و شیمیایی، 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 تر و خشک را نشان می‌دهد. تمامی داده‌ها با واحد میلی‌گرم بر لیتر و EC به واحد میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد. داده‌های فیزیکی و شیمیایی 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 گردید. 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 زمین‌آماري گردید، زیرا مدل‌هایی زمین‌آماري نسبت به مقادیر غیرنرمال حساس بوده و حضور آن‌ها می‌تواند موجب انحراف در نتایج شود.

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

جدول ۶- خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی آبخوان دشت تبریز

پارامترها	واحد	فصل خشک			فصل تر	
		حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر
SO ₄ ^{۲-}	mg/l	۱۵۹	۹۰۷	۳۵۶/۸۳	۱۵۸	۹۰۶
CL ⁻	mg/l	۱۲۷	۳۳۸۰	۹۹۵/۲۲	۱۶۳	۳۵۱۰
HCO ₃ ⁻	mg/l	۲۰۹	۶۱۳	۳۴۹/۲۶	۲۳۷	۷۵۰
Na ⁺	mg/l	۱۲۰	۱۸۱۰	۴۴۹/۶۸	۱۲۰	۱۷۷۰
Mg ^{۲+}	mg/l	۳۶/۳	۲۵۱	۹۷/۳۰	۳۱/۶	۲۴۱
Ca ^{۲+}	mg/l	۳۳/۵	۸۷۵	۲۲۶/۵۶	۳۰/۵	۷۶۱
K ⁺	mg/l	۲۰/۳	۵/۴۷	۱۱/۵۴	۵/۰۸	۲۸/۲
pH		۷/۰۳	۸/۳	۷/۷۳	۷/۲۲	۸/۱۴
TDS	mg/l	۸۰۶/۹۷	۷۳۲۶/۸۰	۲۶۶۰/۸۰	۹۳۳/۵۸	۷۵۸۴/۵۷
TH	mg/l	۲۳۳	۳۳۱۶/۶۶	۹۵۹/۳۰	۹۰۵	۲۸۹۳/۱۴
EC	μs/cm	۱۲۴۱/۵۰	۱۱۲۷۲	۴۰۹۳/۵۵	۱۴۳۶/۷	۱۱۶۶۸/۶

طبق جدول (۶)، غلظت میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی محاسبه و برای بررسی روند تغییرات فصلی مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد ترتیب غالب یون‌ها در هر دو فصل مشابه است، اما غلظت آن‌ها بسته به شرایط هیدرولوژیکی و تغییرات فصلی متفاوت می‌باشد. یون‌های K⁺، Mg^{۲+} و Ca^{۲+} کمترین غلظت را داشته، درحالی‌که Cl⁻ و Na⁺ یون‌های اصلی غالب هستند.

فصل تر: K < Mg < Ca < SO₄ < HCO₃ < Na < Cl

فصل خشک: K < Mg < Ca < SO₄ < HCO₃ < Na < Cl

در فصل تر، افزایش بارش‌ها باعث تماس بیشتر آب با مواد معدنی خاک و سنگ‌ها شده و فرآیند انحلال ترکیباتی مانند HCO₃⁻ و SO₄^{۲-} را تقویت می‌کند، که منجر به افزایش غلظت یون‌ها می‌شود (Arivarasi & Ganesan, 2017). همچنین، کربنات‌ها (CO₃^{۲-}) و HCO₃⁻ در واکنش با دی‌اکسید کربن محلول افزایش یافته و TH آب نیز به دلیل افزایش Ca^{۲+} و Mg^{۲+} 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 به دلیل 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 به دلیل تغییر تعادل شیمیایی یون‌ها و کاهش حجم آب اتفاق می‌افتد (Arroyo-Figueroa et al., 2024). اصطلاح رخساره‌های هیدروشیمیایی برای توصیف گروه‌های مختلف آب‌های زیرزمینی و یون‌های شیمیایی غالب در هر سفره به کار می‌رود، که ترکیب شیمیایی آن‌ها با یکدیگر تفاوت دارد (Selman et al., 2022). در این پژوهش، پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی با واحد میلی‌اکی‌والان بر لیتر در نرم‌افزار AqQA ترسیم شد.

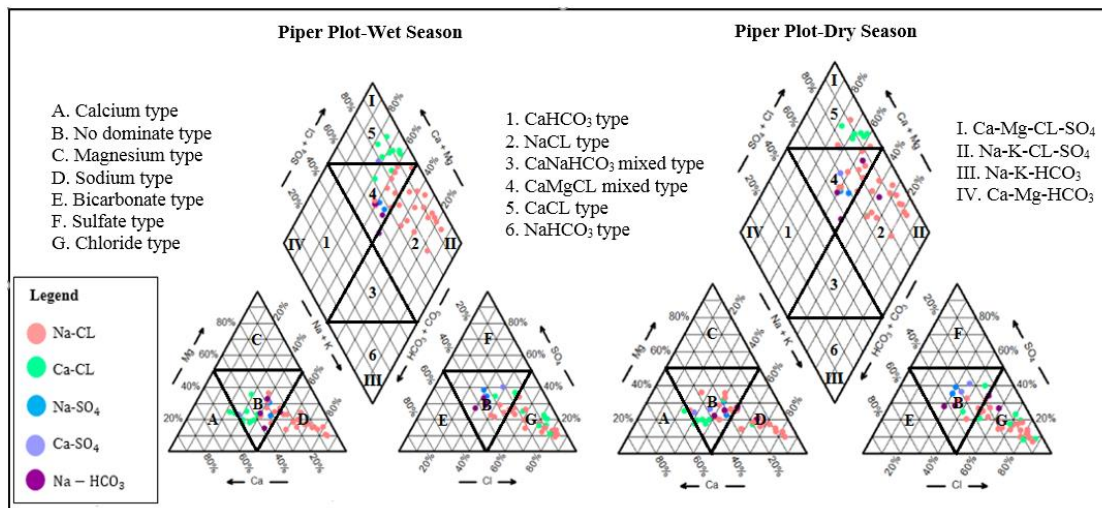


Figure 2- Papier diagram of Tabriz plain groundwater in dry season and wet season
شکل ۲- دیاگرام پایپر آب زیرزمینی دشت تبریز در فصل خشک و فصل تر

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

۳-۲- 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 تر در بازه ۱۱۹/۲۳ تا ۷۶۱/۲۴ و در فصل خشک بین ۱۰۱/۷۰ تا ۷۴۷/۸۹ قرار گرفتند. این نتایج نشان دهنده 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 تر 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 index results (Sunitha & Reddy, 2022)

جدول ۷- نتایج طبقه بندی شاخص کیفیت آب شرب (Sunitha & Reddy, 2022)		
درصد داده‌ها در فصل خشک	درصد داده‌ها در فصل تر	WQI
—	—	۵۰ >
—	—	۵۰-۱۰۰
۳۴/۱۴	۳۹/۰۲	۱۰۰-۲۰۰
۲۶/۸۲	۲۴/۳۹	۲۰۰-۳۰۰
۳۹/۰۲	۳۶/۵۸	۳۰۰ <

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

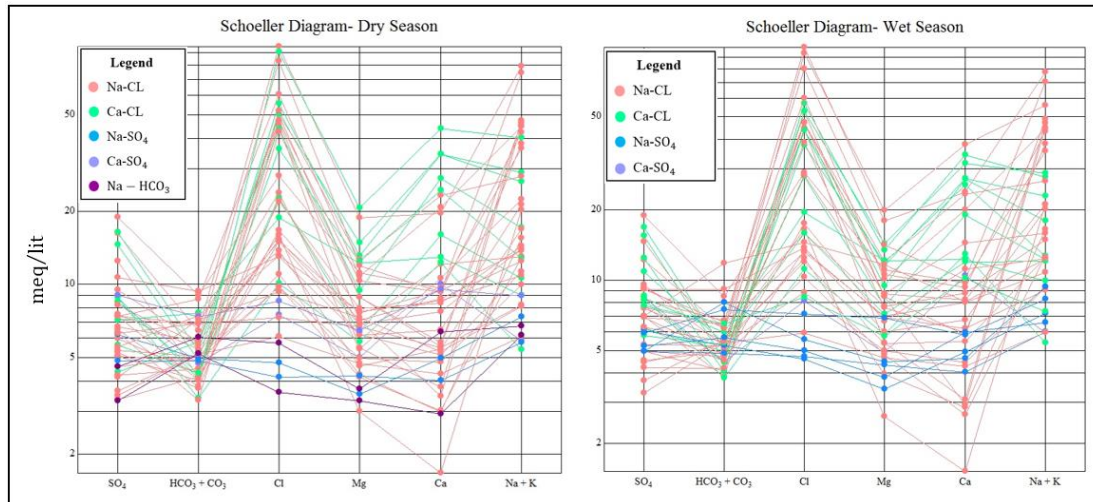


Figure 3- Schuler diagram of Tabriz plain aquifer in dry season (a) and wet season (b)

شکل ۳- دیاگرام شولر آبخوان دشت تبریز در فصول خشک (الف) و تر (ب)

در فصل تر، 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 به دلیل 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 زمین شناسی، نوع خاک و فعالیت‌های انسانی نیز می‌باشد (Giridharan et al., 2008).

۳-۲- 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 تر 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- طبقه بندی نتایج کیفیت آب کشاورزی (Fadi et al., 2024)

درصد داده‌ها در فصل تر	درصد داده‌ها در فصل خشک	IWQI
۳۶/۵۸	۳۹/۰۲	۰-۴۰
۴۱/۴۶	۴۱/۴۶	۴۰-۵۵
۱۹/۵۱	۱۴/۶۳	۵۵-۷۰
۲/۴	۴/۸	۷۰-۸۵
-	-	۸۵-۱۰۰

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 تر 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- طبقه بندی کیفیت آب کشاورزی

پارامترها	محدوده	کیفیت آب	درصد داده‌ها در فصل تر	درصد داده‌ها در فصل خشک
EC	۲۵۰ >	عالی	-	-
	۲۵۰-۷۵۰	خوب	-	-
	۷۵۰-۲۵۰۰	مشکوک	۳۴/۱۴	۳۴/۱۴
	۲۵۰۰ <	نامناسب	۶۵/۸۵	۶۵/۸۵
SAR	۱۰ >	عالی	۷۳/۱۷	۷۵/۶۰
	۱۰-۱۸	خوب	۱۹/۵۱	۱۷/۰۷
	۱۸-۲۶	مشکوک	۷/۳۱	۷/۳۱
	۲۶ <	نامناسب	-	-
Na%	۲۰-۴۰	خوب	۳۱/۷۰	۲۹/۲۶
	۴۰-۶۰	قابل قبول	۳۹/۰۲	۳۹/۰۲
	۶۰-۸۰	مشکوک	۲۹/۲۶	۳۱/۷۰
PI	۷۵ <	خوب	۳۴/۱۴	۱۲/۱۹
	۲۵-۷۵	قابل قبول	۶۵/۸۵	۴۶/۳۴
	۲۵ >	نامناسب	-	۴۱/۴۶

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

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

جدول ۱۰- طبقه بندی آب زیرزمینی دشت تبریز برای مصارف کشاورزی

طبقه بندی کیفیت آب	نوع آب	درصد داده‌ها در فصل خشک	درصد داده‌ها در فصل تر
C1S1	آب شیرین	-	-
C1S2, C2S2, C2S1	آب مناسب	-	-
C1S3, C2S3, C3S1, C3S2, C3S3	آب کمی شور	۳۴/۱۴	۳۶/۵۸
C1S4, C2S4, C2S4, C4S4, C4S3, C4S2, C4S1	آب بسیار شور	۵۸/۵۳	۵۲/۶۵

نتایج بررسی نمودار ویلکاکس مطابق جدول (۱۰) نشان دهنده تغییرات قابل توجه کیفیت آب بین فصول خشک و تر است. در هر دو فصل، بیش تر نمونه‌ها در کلاس‌های با شوری بالا (C۴)، یعنی بدترین وضعیت از نظر شوری و سدیم قرار دارند، که نشان‌دهنده کیفیت پایین آب

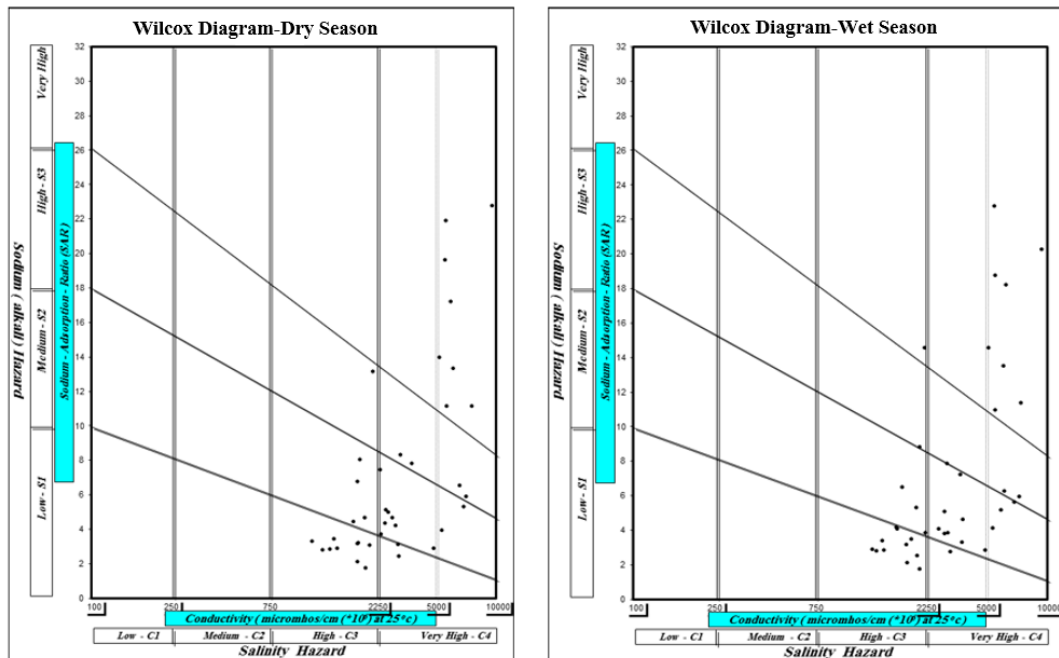


Figure 4- Checking the quality of Tabriz plain underground water using Wilcox diagram in wet season and dry season.

شکل ۴- بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از دیاگرام ویلکاکس در فصول تر و خشک برای مصارف کشاورزی است. به طوری که ۵۸/۵۳ درصد در فصل تر و ۵۳/۶۵ درصد در فصل خشک از نظر کشاورزی نامناسب و مضر هستند.

۳-۳- تحلیل زمین آماری

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 زمین‌آماري کربجینگ ساده، معمولی، عمومی و همچنین روش IDW با توان‌های یک تا چهار استفاده شد. برای مدل‌سازی ساختار فضایی داده‌ها، سعی واریوگرام‌ها با مدل‌های نمایی، کروی، دایره‌ای و کوسی 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 نشان دهنده ساختار مکانی متوسط وابستگی به هر دو عامل است، در حالی که نسبت کمتر از ۰/۲۵ نشان دهنده قوی بودن ساختار مکانی و وابستگی شدید به عوامل ذاتی است (Goovarets, 1997). طبق جدول (۱۱)، نتایج واریوگرافی نشان داد پارامترهایی از جمله PH، شاخص‌های WQI و JWQI، TDS، TH، EC، SAR، Na%، PI، Ca⁺⁺ و Cl⁻ نسبت به سایر متغیرها ساختار مکانی

قوی تری دارند. بنابراین، تخمین زمین آماری این پارامترها از دقت بالاتری برخوردار هستند. برای تعیین مناسب ترین روش درون یابی برای هر پارامتر، خطای RMSE در روش IDW با روش کریجینگ مقایسه شد و روش با کمترین خطای RMSE انتخاب گردید.

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

جدول ۱۱- پارامتر حاصل از برازش مدل های سمی واریوگرام

پارامترها	مدل	اثر قطعه ای (C ₀)	آستانه (C + C ₀)	C ₀ /(C + C ₀)	دامنه تأثیر (متر)
WQI	دایره ای	۰	۰/۲۰۸	۰	۵۰۸۹/۸۴
IWQI	نمایی	۰	۰/۰۵۶۲	۰	۸۹۰۲/۲۱۷
Na ⁺	نمایی	۰/۰۸۲۵	۰/۲۶۲۵	۰/۳۰	۷۰۵۵/۸۰
Ca ^{+۲}	نمایی	۰/۰۳۴۹	۰/۳۱۱۴	۰/۱۱	۱۰۰۰۰
Mg ^{+۲}	نمایی	۰/۰۷۹۱	۰/۲۳۷۷	۰/۳۳	۱۰۰۰۰
Cl ⁻	نمایی	۰/۱۰۸۷	۰/۴۸۶۶	۰/۲۲	۱۰۰۰۰
SO _۴ ^{-۲}	نمایی	۰/۱۸۸۲	۰/۳۷۰۷	۰/۵۱	۷۴۹۶/۹۷
HCO _۳ ⁻	نمایی	۰/۰۴۱	۰/۰۷۵۲	۰/۵۵	۹۹۲۴/۴۷
pH	نمایی	۰	۰/۰۰۱۴	۰	۱۴۳۵/۹۰
TDS	نمایی	۰/۰۵۷۷	۰/۲۴۳	۰/۲۴	۸۷۸۳/۰۶
TH	کروی	۰	۰/۴۰۹۶	۰	۱۰۲۸/۶۱
EC	نمایی	۰/۰۷۹۴	۰/۳۴۴۱	۰/۲۳	۹۸۱۷/۱۴
SAR	نمایی	۰/۰۳۴۳	۰/۲۳۹۵	۰/۱۴	۱۰۰۰۰
Na%	دایره ای	۰/۰۱۲۲	۰/۴۱۲۵	۰/۰۳	۷۳۲۸/۴۰
PI	نمایی	۰/۰۰۳۱	۰/۰۴۹۳	۰/۰۶	۹۰۶۱/۴۵

طبق نتایج جدول (۱۲)، Na⁺، Ca⁺، Mg^{+۲}، Cl⁻، SO_۴^{-۲}، EC، TDS و pH با روش IDW توان ۲، HCO_۳⁻ با روش IDW توان ۳، SAR و IWQI با روش IDW توان ۴ کمترین خطای RMSE و MAE و بالاترین مقدار R^۲ 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 زمین آمار و روش IDW مطابق شکل (۵) و شکل (۶) استخراج شده است.

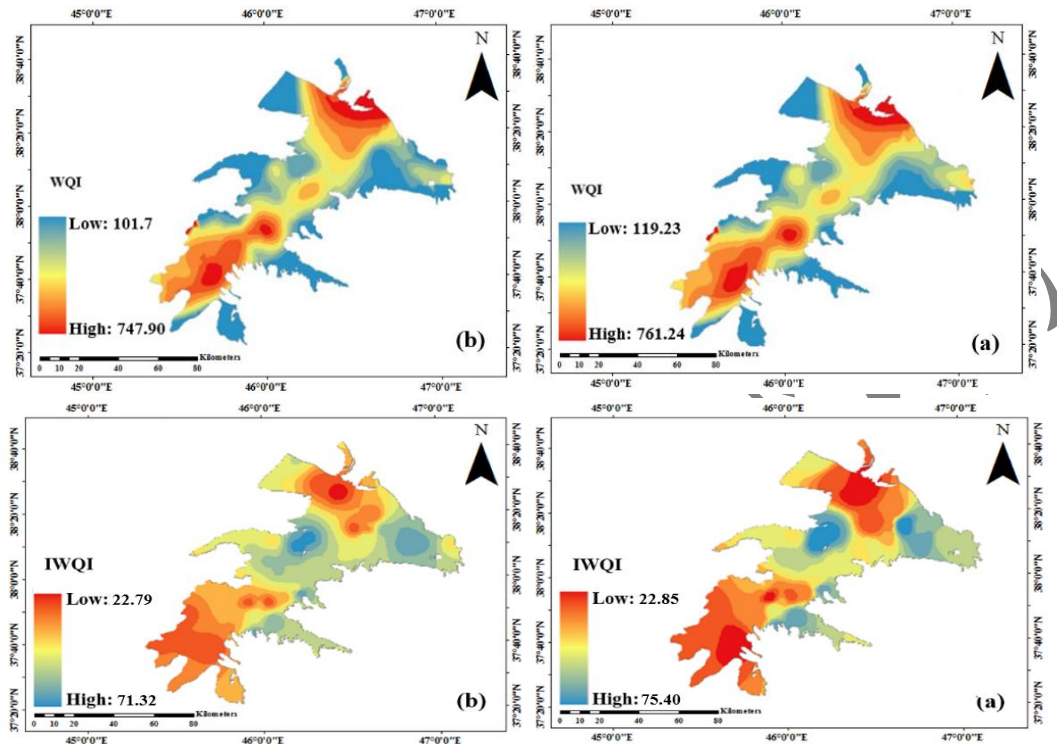


Figure 5- Zoning of WQI index and IWQI index in wet season (a) and dry season (b)
 شکل ۵- پهنه بندی شاخص WQI و شاخص IWQI در فصل تر (الف) و فصل خشک (ب)

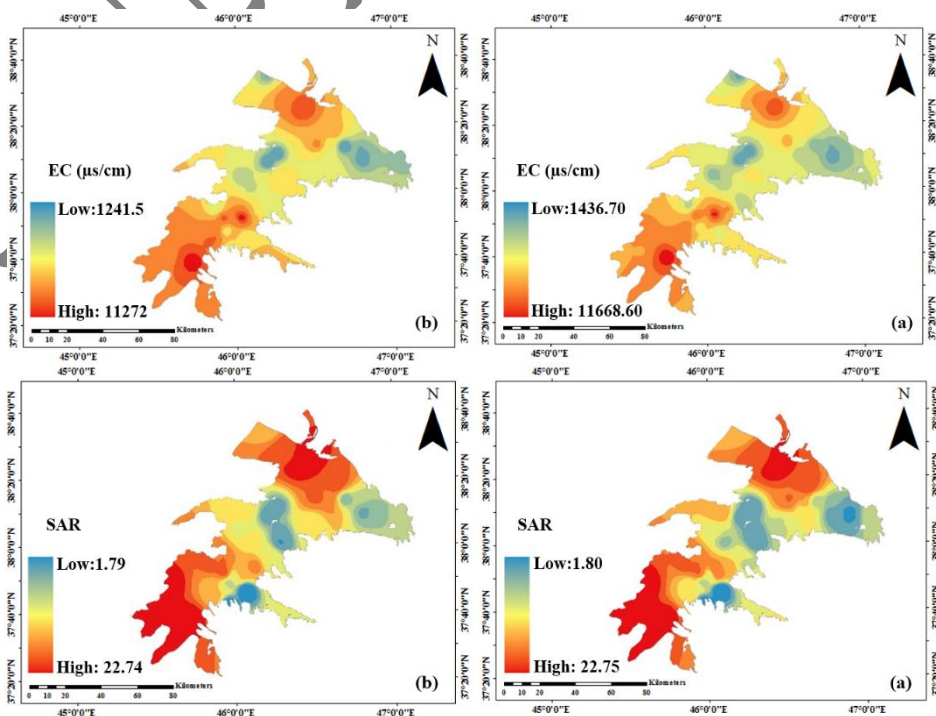
Table 12- The results of geostatistics analysis

جدول ۱۲- نتایج تحلیل روش زمین آمار

R ^۲	MAE	RMSE	روش Kriging	R ^۲	MAE	RMSE	روش IDW	پارامترها
۰/۵۶۲	۷۷/۸۳	۱۳۱/۷۵	عمومی	۰/۴۷۲	۸۹/۸۹	۱۲۹/۴۳	۴ با توان IDW	WQI
۰/۴۲۱	۷/۳۱	۱۲/۲۸	عمومی	۰/۴۹۱	۶/۸۷	۹/۷۶	۴ با توان IDW	IWQI
۰/۵۱۰	۶/۴۶	۳۱/۵۶	عادی	۰/۵۹۲	۵/۳۷	۶/۰۶	۲ با توان IDW	Na ⁺
۰/۵۲۶	۲/۱۳	۲/۵۱	عمومی	۰/۵۸۶	۱/۹۲	۲/۳۶	۲ با توان IDW	Ca ^{۲+}
۰/۵۸۷	۲/۳۳	۲/۹۵	عمومی	۰/۶۲۱	۲/۲۵	۲/۶۸	۲ با توان IDW	Mg ^{۲+}
۰/۵۵۳	۶/۷۵	۸/۲۸	عمومی	۰/۵۸۸	۶/۴۳	۸/۰۹	۲ با توان IDW	Cl ⁻
۰/۶۱۸	۲/۰۱	۲/۵۵	عمومی	۰/۶۵۳	۱/۸۱	۲/۳۶	۲ با توان IDW	SO _۴ ^{۲-}
۰/۴۱۳	۱/۲۵	۱/۴۸	عمومی	۰/۵۴۷	۱/۱۰	۱/۳۳	۳ با توان IDW	HCO _۳ ⁻
۰/۵۸۴	۰/۲۲	۰/۲۹	عادی	۰/۵۹۶	۰/۱۹	۰/۲۸	۲ با توان IDW	pH
۰/۶۲۵	۶۴۸/۲۴	۸۳۵/۸۷	عمومی	۰/۶۴۳	۶۲۵/۲۱	۸۱۰/۴۳	۲ با توان IDW	TDS
۰/۶۴۴	۲۳۳/۵۸	۲۷۳/۳۳	عادی	۰/۶۲۷	۱۷۸/۳۸	۲۳۱/۱۷	۲ با توان IDW	TH
۰/۵۸۰	۱۰۰/۱۶۹	۲۲۲۹/۳۶	عمومی	۰/۵۹۳	۹۸۴/۵۵	۱۲۴۳/۹۰	۲ با توان IDW	EC
۰/۵۹۲	۳/۳۷	۴/۷۸	ساده	۰/۶۱۸	۲/۱۳	۳/۳۰	۴ با توان IDW	SAR
۰/۶۲۹	۷/۴۴	۹/۲۶	ساده	۰/۵۸۴	۷/۳۲	۹/۴۵	۴ با توان IDW	Na%
۰/۶۱۳	۸/۵۶	۱۰/۰۳	ساده	۰/۵۹۰	۸/۴۹	۱۰/۳۶	۳ با توان IDW	PI

طبق شکل (۵)، نقشه توزیع مکانی شاخص WQI با روش کریجینگ عمومی و شاخص IWQI با روش IDW توان ۴ برای فصول خشک و تر 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، در حالی 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.

غلظت میانگین EC در فصل خشک ۴۰۹۳/۵۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و در فصل تر ۴۲۷۱/۴۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. مطابق شکل (۶)، افزایش غلظت EC در نواحی شمال غربی و جنوبی آبخوان نسبت به سایر نواحی در فصل خشک قابل مشاهده بوده و گسترش نواحی پرخطر در فصل خشک بیشتر از فصل تر می‌باشد. میانگین غلظت SAR در فصل خشک ۷/۴۲ و در فصل تر ۷/۳۹ است، که نشان می‌دهد SAR در هر دو فصل تقریباً ثابت بوده و تغییرات قابل توجهی ندارد. شاخص PI برای مصارف کشاورزی طبق نظر Doneen 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 تر ۶۹/۸۳ محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در فصل تر، میزان PI خاک نسبت به فصل خشک افزایش می‌یابد. طبق نقشه پهنه‌بندی نشان داده شده در شکل (۶)، افزایش کیفیت خاک و نفوذپذیری در فصل تر نسبت به فصل خشک به وضوح قابل مشاهده است.



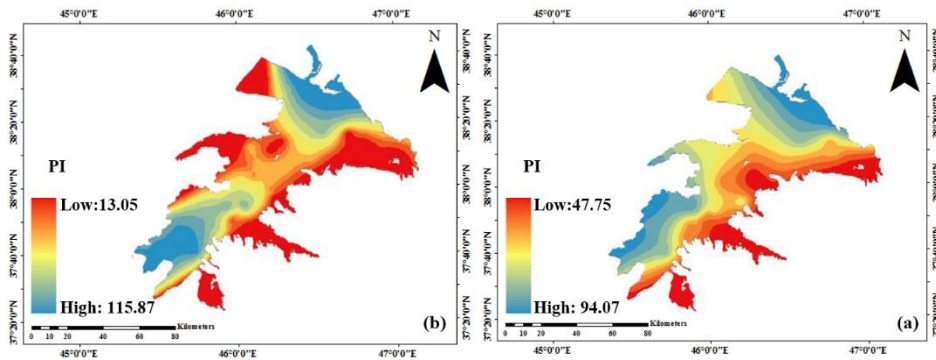


Figure 6- Zoning of EC, SAR and PI in the wet season (a) and dry season (b)

شکل ۶- پهنه بندی EC، SAR و PI در فصل تر (الف) و فصل خشک (ب)

۴- جمع بندی

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 قابل توجهی 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 فصل خشک، 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، دایره ای و گوسی دارد. بررسی روش‌های زمین‌آماري 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 آب‌زیرزمینی در مناطق جنوب‌غرب و شمال شرقی آبخوان مشاهده می‌شود. این آلودگی علاوه بر فرآیندهای طبیعی مانند آیشیوی 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.

پی نوشت‌ها

- 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
¹² Sodium Percentage
¹³ Permeability Index
¹⁴ Root Mean Square Error
¹⁵ Mean Absolute Error
¹⁶ Coefficient of Determination

۵- مراجع

- 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*
- 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.
- 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*
- 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*
- Barzegar R, Asghari Moghaddam A, Tziritis E (2017) Hydrogeochemical features of groundwater resources in Tabriz plain, northwest of Iran. *Applied Water Science*
- 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*
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- 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*
- 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*
- 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*
- 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*
- 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*
- Goovarets P (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford Univ. Press, UK
- Naz I, Ahmad I, Aslam R.W, Quddoos A, Yaseen A (2024) Integrated Assessment and Geostatistical Evaluation of Groundwater Quality through Water Quality Indices. *Water*
- 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 Researces (In Persian)*

Rao S (2006) Seasonal variation of groundwater quality in a part of Guntur District, Andhra Pradesh, India. Environmental Geology

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

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

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

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

Abstract

Groundwater is one of the main water supply sources in arid and semi-arid regions, and its quality decline can be serious threat to society. Therefore, the use of pollution maps is effective tool in water resources management. The Tabriz plain, as semi-arid region, has faced groundwater quality degradation in recent years. In this study, data from 41 wells over 15-year period (2007–2021) were collected from 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) in 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 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), with these ions playing the main role in 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. Finally, 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.



ویپر استناری نشسته، عبید قلیبیل استناری