نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۷۱۴-۷۰۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 701-714

مقاله علمی-پژوهشی

تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف آبیاری و شرب در آبخوان ساحلی دشت میناب استان هرمزگان

رضا رزم پور[۱]، عدنان صادقی لاری[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

چکیده

در مناطق خشک و دارای منابع آب های سطحی کم، مدیریت و حفاظت صحیح از منابع آب زیرزمینی برای تضمین پایداری آن ها بسیار حیاتی است. این پژوهش به ارزیابی جامع کیفیت آب زیرزمینی دشت بحرانی و بااهمیت میناب، واقع شده در استان هرمزگان، طی یک دوره ده ساله بین سال-های۱۳۹۱ الی ۱۴۰۱ با هدف شناسایی روندهای زمانی تغییرات و تعیین وضعیت هیدروژئوشیمیایی پرداخته شد. پارامترهای فیزیکوشیمیایی اصلی ۱۲ چاه پایش، در دو دوره آبیاری و غیر آبیاری مورد بررسی قرار گرفتند. روش شناسی بر پایه تحلیل همبستگی رتبه‌ای کندال برای تعیین میزان همبستگی و روند پارامترهای کیفی در طول زمان و استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) و نمودارهای شولر، نمودار ویلکاکس در راستای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف مختلف و بکارگیری دیاگرام پایپر برای تعیین رخساره هیدروژئوشیمیایی استوار بود. نتایج آزمون کندال نشان داد که روند غالب در سطح دشت، به سمت کاهش کیفیت آب زیرزمینی است؛ به‌طوری که WQI محاسبه شده برای اکثرچاه‌های نمونه‌برداری دارای همبستگی مثبت با زمان (روند افزایشی) نشان دادند که حاکی از تخریب کیفیت آب زیرزمینی در این ناحیه است. درکل دوره مورد مطالعه بیشترین وکمترین مقدار WQI به ترتیب برابر با ۱۰۱ و ۳۵۴ حاصل گردید. تحلیل نمودار پایپر نشان داد که کیفیت هیدروشیمیایی ابتدای دوره زمانی موردمطالعه نسبت به انتهای آن از رخساره‌های کلسیمی-بیکربناتی با کیفیت بهتر به سمت رخساره‌های سدیمی-کلراییدی دارای کیفیت بدتر در انتهای دوره زمانی موردمطالعه تغییر یافته است. بر اساس شاخص ویلکاکس در تمام دوره‌های زمانی موردمطالعه، بیشتر نمونه‌ها در محدوده‌های C3S2 تا C4S4 توزیع شده‌اند. این رده‌بندی نشان‌دهنده آب‌هایی با هدایت الکتریکی بالا تا بسیار بالا (C3 و C4) و نسبت جذب سدیم متوسط تا بسیار زیاد (S2 تا S4) است. این مطالعه بر ضرورت اجرای راهکارهای مدیریتی هدفمند برای کنترل منابع آلاینده و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آزمون کندال، پایپر شاخص کیفیت آب WQI، شولر، ویلکاکس

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک منبع حیاتی، نقش محوری در تأمین نیازهای جوامع روستایی و شهری ایفا می‌کنند، به‌ویژه در مناطقی که منابع آب سطحی با محدودیت مواجه هستند (Çelik, 2019). این منابع، در سطح جهانی، نقش اساسی در تأمین آب شرب، آبیاری کشاورزی و مصارف صنعتی ایفا می‌نمایند (Carrard et al., 2019). بااین‌حال، رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی-اجتماعی در دهه‌های اخیر، فشارهای فزاینده‌ای را بر مخازن آب زیرزمینی وارد کرده که نتیجه آن افت سطح آب و تخریب کیفیت آن‌ها در بسیاری از مناطق جهان بوده است (Chakraborty et al., 2022). کیفیت آب زیرزمینی تابعی از تعامل میان عوامل طبیعی، نظیر زمین‌شناسی، لیتولوژی و اقلیم، و فعالیت‌های انسانی نظیر مدیریت نامناسب زمین‌های کشاورزی و تخلیه فاضلاب‌های شهری است که می‌تواند منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها گردد (Everest and Özcan, 2019). در این میان، بهره‌برداری پایدار از منابع محدود آب زیرزمینی یک ضرورت انکارناپذیر است که ضامن امنیت آبی و رفاه نسل‌های آتی خواهد بود (Ghosh and Bera, 2023). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب محسوب می‌شود (Bahrami et al., 2022)، افت کمیت و کیفیت، به یک چالش جدی تبدیل شده است. بنابراین، پایش و ارزیابی مداوم خواص فیزیکوشیمیایی منابع آب زیرزمینی امری ضروری است

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، بندرعباس، ایران
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، بندرعباس، ایران
(*- نویسنده مسئول: adnan.sadeghilari@hormozgan.ac.ir)
DOI: 10.22034/idj.2026.587457.2702

(Adimalla and Taloor, 2020). استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی[1] برای ترسیم توزیع مکانی پارامترهای کیفی، ابزاری حیاتی برای بهره‌برداری پایدار و شناسایی مناطق بحرانی محسوب می‌شود (Kawo and Karuppannan, 2018). برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها، به‌ویژه در شرایطی که شارژ طبیعی پایین است، پیامدهای زیان‌آوری نظیر کاهش سطح آب و وخامت مستمر کیفیت را به همراه دارد (Taheri et al., 2020). آلودگی منابع آب زیرزمینی ناشی از برداشت بیش از حد، به یک چالش جهانی تبدیل شده است، به خصوص در جوامع روستایی و کشورهای در حال توسعه (Asfaw and Mengistu, 2020) که فرآیندهای تصفیه را نیز به طور چشمگیری دشوار می‌سازد (Rao et al., 2021). در نتیجه، تجزیه و تحلیل جامع ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی برای اطمینان از مناسب بودن آب برای مصارف مختلف، حیاتی است (Badeenezhad et al., 2020). برای ارزیابی کیفیت آب، از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که از سادگی مقایسه با استانداردها تا روش‌های پیچیده‌تر متغیر است (Sharma et al., 2022). تکنیک‌های پرکاربرد شامل شاخص کیفیت آب (WQI[2]) (Horton, 1965)، نمودارهای طبقه‌بندی ژئوشیمیایی مانند نمودار پایپر (Piper, 1944)، نمودار آزمایشگاه شوری ایالات متحده (USSL, 1954) و نمودار شولر (Schoeller, 1965) می‌باشند. در ایران، بر اساس آمار، ۳۹۴ دشت از ۶۰۹ دشت به‌عنوان دشت‌های ممنوعه طبقه‌بندی شده‌اند که برداشت آب از آن‌ها به شدت محدود شده است (Noori Sepehr et al., 2021). صادقی لاری و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی را برای مصارف شرب و آشامیدنی در نواحی گرم و خشک جنوبی ایران موردبررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که بر اساس نمودار پایپر رخساره هیدروشیمیایی غالب منطقه ، NaCl است. هم-چنین تحلیل تغییرات زمانی با آزمون رتبه‌ای کندال نشان داد که پارامترهای EC، TDS، TH، Na، Mg، Ca، SO4 و Cl در اکثر چاه‌ها روند افزایشی داشته و علت آن را به برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، خشکسالی، حفر بیش از حد چاه و تغذیه ناکافی آبخوان‌ها نسبت دادند. تحلیل این مطالعه از تغییرات زمانی و مکانی شاخص کیفیت آب، نمودار شولر و نمودار ویلکاکس نشان داد که کیفیت آب منطقه‌ی مورد مطالعه به دلیل شوری و سدیم بالا برای مصارف آشامیدنی و آبیاری نامناسب است (Sadeghi-Lari et al. 2024). استان هرمزگان با داشتن ۴۲ دشت ممنوعه، یکی از کانون‌های بحرانی محسوب می‌شود که افزایش شوری آب زیرزمینی در آن ناشی از پمپاژ بیش از حد و شارژ پایین است. با این حال، مطالعات انجام شده در این منطقه محدود بوده است (Adeli et al., 2018) باتوجه‌به فقدان مطالعات جامع کیفیت منابع آب زیرزمینی در این منطقه، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب مصارف مختلف در دشت پراهمیت میناب استان هرمزگان با استفاده از شاخص WQI ، نمودار شولر، نمودار ویلکاکس و مشخصه‌یابی نوع آب و رخساره هیدروژئوشیمیایی غالب با استفاده از نمودار پایپر صورت پذیرفت. این تحلیل‌ها بر پایه اندازه‌گیری پارامترهای شمیایی اندازه‌گیری شده در چاه‌های نمونه‌برداری واقع شده در منطقه مورد مطالعه انجام پذیرفت. نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمای مهمی برای مدیران محلی در اتخاذ استراتژی‌های مدیریت پایدار منابع آب در این منطقه بحرانی باشد.

مواد و روش‌ها

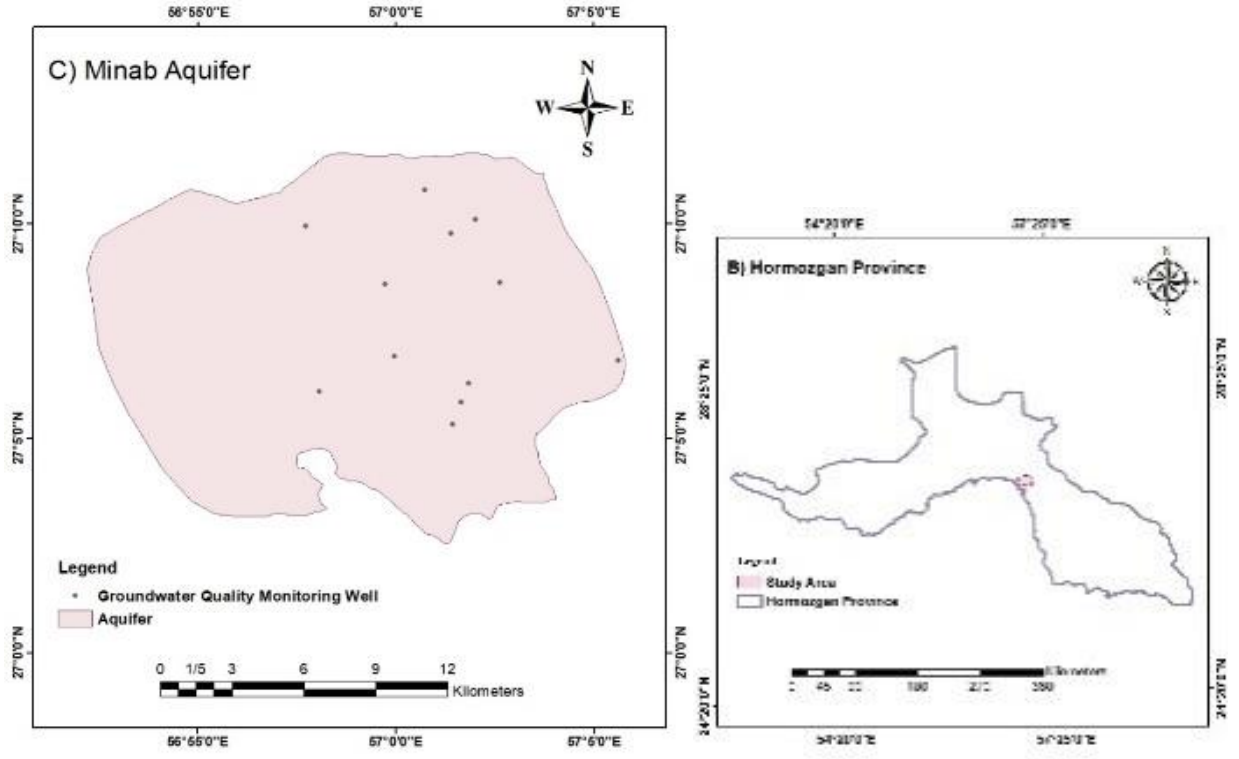
با هدف ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت میناب، ابتدا روند زمانی پارامترهای کیفی شامل EC، TDS، pH، TH، Hco^{-}_{3}، SO^{2-}_{4}، Cl^{-}، Mg^{2+}، Ca^{2+}، Na^{+} مربوط به ۱۲ چاه پایش کیفی آب زیرزمینی طی یک دوره ده‌ساله (۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱) با استفاده از آزمون همبستگی رتبه‌ای کندال تعیین گردید. سپس، برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه موردمطالعه برای مصارف مختلف از شاخص WQI، نمودارهای شولر و ویلکاس استفاده گردید. محاسبه شاخص WQI و ترسیم دیاگرام شولر و ویلکاکس بر مبنای پارامترهای شیمیایی اندازه‌گیری شده در ۱۲ چاه نمونه‌برداری منطقه موردمطالعه در طول یک دوره ده‌ساله (از ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱) صورت پذیرفت. جهت ارزیابی دقیق‌تر کیفیت آب زیرزمینی نقشه‌هایی پهنه‌بندی شاخص WQI و نمودارهای ویلکاکس و شولر در فصل آبیاری از مهرماه الی اسفندماه و فصل غیرآبیاری از فروزدین‌ماه الی شهریورماه در سال-های ۱۳۹۱ (سال ابتدایی دوره موردمطالعه) و ۱۴۰۱ (سال انتهایی دوره موردمطالعه) ترسیم و سپس علاوه بر تفسیر مکانی اقدام به تفسیر زمانی تغییرات کیفیت آب زیرمینی نسبت به ابتدای دوره موردمطالعه گردید. ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی نیز به وسیله نمودار پایپر مورد سنجش قرار گرفت.

موقعیت و ویژگی‌های منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه، دشت میناب، با وسعت تقریبی ۸۵۷ کیلومترمربع، در موقعیت جغرافیایی ۹۰ کیلومتری شرق شهر بندرعباس واقع شده است (شکل ۱). میانگین ارتفاع منطقه در کناره شرقی حدود ۳۰ متر بوده و این ارتفاع تا مناطق ساحلی منتهی به دریای عمان و تنگه هرمز به زیر تراز سطح دریا میل می‌کند. مهم‌ترین آبراهه دشت میناب، رودخانه میناب است. حوضه آبریز این رودخانه گستره وسیعی از استان‌های کرمانو هرمزگان را در بر می‌گیرد. از منظر کلیماتولوژی، دشت میناب تحت نفوذ مستقیم

1 Geographic information System (GIS)
2 Water Quality Index (WQI)

توده‌های رطوبتی ناشی از مجاورت با دریای عمان و اقیانوس هند قرار گرفته و مشخصه غالب اقلیمی آن، طبقه‌بندی به‌عنوان اقلیم گرم و مرطوب است. گرادیان رطوبت و دما در این منطقه با فاصله گرفتن از خط ساحلی و افزایش ارتفاع به سمت نواحی کوهستانی، روندی کاهشی و متمایل به خشکی را نشان می‌دهد. اقلیم میناب به دو دوره متمایز تقسیم می‌شود: فصل گرم که بازه زمانی آن از اواخر اسفندماه آغاز شده و تا اوایل آبان‌ماه امتداد می‌یابد، و فصل معتدل که از اواخر آبان‌ماه تا پایان اسفندماه به طول می‌انجامد فصل بارش به‌طور متناوب و پراکنده از آذرماه آغاز شده و تا نیمه فروردین‌ماه تداوم می‌یابد. نزولات جوی عمدهاً به شکل باران رخ می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

شاخص کیفیت آب WQI

شاخص کیفیت آب WQI ابزاری قدرتمند برای تعیین کیفیت آب آشامیدنی است. این تکنیک رتبه‌بندی منحصربه‌فرد به‌عنوان شاخصی تعریف می‌شود که تأثیر ترکیبی پارامترهای مختلف کیفیت آب مورد نظر را منعکس می‌کند (Aleem et al., 2018). برای محاسبه WQI در این مطالعه، به هر یک از نه پارامتر شیمیایی، وزنی (w_i) بر اساس اهمیت نسبی آن در کیفیت کلی آب برای آشامیدن اختصاص داده شد (جدول ۱). بیشترین وزن به TDS به‌عنوان حیاتی‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر کیفیت آب آشامیدنی اختصاص داده شد. سپس، وزن نسبی (Wi) هر پارامتر از معادله (۱) محاسبه شد:

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

که در آن n تعداد پارامترهای شیمیایی است. در مرحله بعد، معادله (۲) برای تعریف WQI به کار گرفته شد:

معادله (۲)
$$WQI = \sum_{i=1}^{n}\left(W_i \times (\frac{C_i}{S_i} \times 100)\right)$$

که در آن Ci غلظت هر پارامتر شیمیایی در هر نمونه آب (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) و Si استاندارد آب آشامیدنی برای هر پارامتر شیمیایی (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) در آب آشامیدنی بر اساس استاندارد WHO (۲۰۱۰) است (Adimalla and Taloor، ۲۰۲۰؛ Derdour et al.، ۲۰۲۱).

جدول 1: وزن و وزن نسبی پارامترهای شیمیایی مورد استفاده برای محاسبه WQI

Parameter	WHO (2010)	Weight (wi)	Relative weight (Wi)
pH	۸/۵	۳	۰/۱۰۰
EC (µmho cm^{-1})	۱۰۰۰	۴	۰/۱۳۳
TDS (mg L^{-1})	۵۰۰	۵	۰/۱۶۷
TH (mgL^{-1} as $CaCO_3$)	۱۲۰	۳	۰/۱۰۰
Ca^{2}+ (mg L^{-1})	۷۵	۲	۰/۰۶۷
Mg^{2}+ (mg L^{-1})	۵۰	۲	۰/۰۶۷
Na+ (mg L^{-1})	۲۰۰	۳	۰/۱۰۰
HCO^{3}- (mg L-۱)	۱۲۰	۲	۰/۰۶۷
Cl- (mg L^{-1})	۲۵۰	۳	۰/۱۰۰
SO^{42}- (mg L^{-1})	۲۵۰	۳	۰/۱۰۰
Sum.		۳۰	۱

بر اساس محدوده WQI، نمونه‌های آب به پنج کلاس طبقه‌بندی می‌شوند، شامل: عالی (<۵۰)، خوب (۵۰–۱۰۰)، ضعیف (۱۰۰–۲۰۰)، بسیار ضعیف (۲۰۰–۳۰۰)، و نامناسب برای مصارف آشامیدنی (۳۰۰<) (Derdour et al., 2021). در این مطالعه، WQI با استفاده از ده متغیر شیمیایی، TDS، Hco_3^-، SO_4^{2-}، Cl^-، Mg^{2+}، Ca^{2+}، Na^+، نمونه‌های آب محاسبه شد تا سازگاری آب زیرزمینی آبخوان میناب برای مصارف آشامیدنی ارزیابی شود.

نمودارهای شولر و ویلکاکس

روش‌های متعددی برای ارزیابی کیفیت آب در کشاورزی پیشنهاد شده است که عمدتاً بر اساس کل نمک‌های محلول و ترکیبات یونی آب هستند. روش‌های نمایش شیمی آب، مانند نمودارهای شولر و ویلکاکس که در این مطالعه استفاده گردید، نسبت غلظت یونی را در نمونه‌های منفرد نشان می‌دهند. نمودار شولر یک نمودار نیمه لگاریتمی است که غلظت‌های نسبی کاتیون‌ها و آنیون‌ها را به تصویر می‌کشد. به‌طورکلی، این نمودار برای طبقه‌بندی آب آشامیدنی در گزارش‌های هیدرولوژیکی ترسیم و تجزیه و تحلیل می‌شود. در این نمودار، بر اساس جدول ۲، کیفیت نمونه آب به شش نوع تقسیم می‌شود، شامل: خوب، قابل قبول، متوسط، نامناسب، عموماً ناخوشایند و غیرقابل شرب (Choramin et al., 2015).

جدول ۲- طبقه‌بندی استاندارد آب آشامیدنی بر اساس نمودار شولر(mg L-1)

Quality	TDS	TH	Cl-۱	SO^{43}-	Na+
Good	<۵۰۰	<۲۵۰	<۱۷۵	<۱۴۵	<۱۱۵
Acceptable	۵۰۰–۱۰۰۰	۲۵۰–۵۰۰	۱۷۵–۳۵۰	۱۴۵–۲۸۰	۱۱۵–۲۳۰
Medium	۱۰۰۰–۲۰۰۰	۵۰۰–۱۰۰۰	۳۵۰–۷۰۰	۲۸۰–۵۸۰	۲۳۰–۴۶۰
Poor	۲۰۰۰–۴۰۰۰	۱۰۰۰–۲۰۰۰	۷۰۰–۱۴۰۰	۵۸۰–۱۱۵۰	۴۶۰–۹۲۰
Very Poor	۴۰۰۰–۸۰۰۰	۲۰۰۰–۴۰۰۰	۱۴۰۰–۲۸۰۰	۱۱۵۰–۲۲۴۰	۹۲۰–۱۸۴۰
Non-Drinking	> ۸۰۰۰	> ۴۰۰۰	> ۲۸۰۰	> ۲۲۴۰	> ۱۸۴۰

وجود سطوح بالای سدیم در منابع آب می‌تواند اثرات مخربی بر ویژگی‌های خاک، مانند کاهش نفوذپذیری، داشته باشد. علاوه بر این، غلظت‌های بالای این فلز می‌تواند منجر به افزایش قلیایی‌ات در خاک شود. یک روش برای ارزیابی تناسب آب برای اهداف کشاورزی، استفاده از نمودار ویلکاکس است (Khoramabadi Shams et al., 2014). نمودار ویلکاکس بر اساس ارزیابی دو پارامتر اصلی است: هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذبی سدیم (SAR)، که به ترتیب با حروف C و S نشان داده می‌شوند. بر اساس مقادیر این دو پارامتر، آب را می‌توان به چهار دسته برای مصارف کشاورزی طبقه‌بندی کرد، از جمله عالی، خوب، مشکوک و نامناسب. مقدار SAR با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود، که در آن غلظت یون‌های Mg^{2+}, Ca^{2+} و Na^+ بر حسب meq L^{-1} بیان می‌باشد (Sreedevi et al., 2019).

رخساره‌های هیدروشیمیایی

رخساره‌های هیدروشیمیایی به گروه‌های متمایز از نمونه‌های آب اشاره دارند که ویژگی‌های شیمیایی مشابهی دارند. یک روش معمول برای شناسایی رخساره‌های هیدروشیمیایی، نمودار پایپر است که یک نمایش گرافیکی از ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب است. نمودار پایپر یک نمودار سه خطی است که غلظت‌های نسبی کاتیون‌ها و آنیون‌ها را در نمونه‌های آب نمایش می‌دهد (Gao et al., 2020). با تجزیه‌تجزیه‌وتحلیله‌های آب با استفاده از نمودار پایپر، محققان و مدیران آب می‌توانند بینشی در مورد کیفیت آب و شرایط هیدروژئوشیمیایی یک منطقه معین به دست آورند.

تحلیل همبستگی رتبه‌ای کندال

همبستگی به‌عنوان یک مفهوم آماری، بیانگر میزان و نوع ارتباط

میان دو یا چند متغیر است که توسط ضریب همبستگی اندازه‌گیری می‌شود. قدرمطلق ضریب همبستگی، شدت این ارتباط را نشان می‌دهد؛ هرچه این مقدار به واحد (۱) نزدیک‌تر باشد، همبستگی قوی‌تر است. در حالت همبستگی مثبت قوی (نزدیک به ۱+)، افزایش در یک متغیر با افزایش متغیر دیگر همراه است و بالعکس. در مقابل، ضریب همبستگی نزدیک به منفی یک (۱-) حاکی از یک رابطه معکوس و قوی میان دو پارامتر است (Mann, 1945). با توجه به ماهیت داده‌های کیفی زیرزمینی در آبخوان میناب که ممکن است توزیع نرمال نداشته باشند، در این پژوهش از آزمون ناپارامتریک همبستگی رتبه‌ای کندال استفاده شد. این آزمون برای سنجش همبستگی آماری میان متغیر زمان (به‌عنوان متغیر مستقل) و پارامتر-های کیفی آب زیرزمینی (به‌عنوان متغیر وابسته) اندازه‌گیری شده در هر یک از چاه‌های نمونه‌برداری، به کار گرفته شد. سطح معنی‌داری آماری برای این آزمون بر روی سطح اطمینان ۹۹ درصد تنظیم گردید تا از دقت نتایج حاصل از همبستگی‌ها اطمینان حاصل شود.

نتایج و بحث

تغییرات پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با آزمون همبستگی کندال

بررسی تغییرات زمانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در دشت میناب طی یک دوره ده‌ساله (۱۳۹۱ تا ۱۴۰۲)، با استفاده از آزمون همبستگی کندال، در جدول ۳ ارائه گردیده است. نتایج آزمون کندال نشان داد که بیشترین همبستگی و روند تغییرات در سطح دشت، مربوط به شاخص‌های شوری و سختی آب است. پارامترهای هدایت الکتریکی (EC[1])، کل مواد جامد محلول (TDS[2]) و سختی کل (TH[3]) در نیمی از چاه‌های نمونه‌برداری (جدول ۳) همبستگی مثبت و روند افزایشی معناداری را نشان دادند. این امر نشان‌دهنده‌ی افزایش تجمع املاح محلول و افت محسوس کیفیت آب زیرزمینی در منطقه است.

بررسی یون‌های اصلی نیز مؤید این روند بود؛ به‌گونه‌ای که کلراید، سولفات، کلسیم و منیزیم در نیمی از چاه‌ها همبستگی مثبت و روند افزایشی معنادار نشان دادند. در مجموع، موارد افت کیفیت آب از حیث روند افزایشی املاح به‌مراتب بیش از موارد بهبود کیفیت بوده و این موضوع کاهش کلی کیفیت آبخوان را به‌صورت آماری تأیید می‌کند. افزون بر این، روند کاهشی معنی‌دار pH در چاه‌های نمونه-برداری شماره ۵، ۱۰ و ۱۱ و هم‌چنین روند کاهشی غیرمعنی‌دار در چاه‌های نمونه‌برداری ۱، ۳، ۴، ۷، ۸، ۹ و ۱۲ از مجموع ۱۲ چاه نمونه‌برداری(جدول ۳) بیانگر تمایل آب به اسیدی شدن تدریجی در کل منطقه مورد مطالعه است. در مقابل، پارامترهای سدیم (Na) و نسبت جذب سدیم (SAR[4]) روندهای متفاوتی در چاه‌های مختلف نشان دادند که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های محلی در شرایط هیدروژئوشیمیایی باشد.

در میان چاه‌ها، چاه‌های ۲، ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲ به‌عنوان نقاط بحرانی شناسایی شدند؛ زیرا ترکیبی از افزایش شوری، سختی و غلظت یون‌های سنگین را تجربه کردند. مقایسه میانگین روندها در کل دشت نشان می‌دهد که پارامترهای EC، TDS و TH دارای ضریب کندال مثبت و معنادار هستند که تأییدکنندهٔ روند نزولی کیفیت آب زیرزمینی در طول دورهٔ مطالعه است.

تحلیل همبستگی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با شاخص WQI برای مصارف آشامیدنی

نتایج آزمون کندال بر روی شاخص کیفیت آب WQI نشان داد که روند غالب در دشت، به سمت کاهش کیفیت آب زیرزمینی است. در مجموع، ۷۵ درصد از چاه‌ها (۹ مورد از ۱۲ چاه) روند افزایشی در WQI را نشان دادند که به‌معنی گرایش کلی به تخریب کیفیت آبخوان در طول دوره پایش است.به طور کلی، چهار چاه (شماره ۲، ۹، ۱۱ و ۱۲) دارای روندهای افزایشی معنادار آماری در WQI بودند. این مقادیر معنادار (با آماره‌های کندال بین ۰/۸۸ تا ۱) نشان‌دهنده افت قطعی و قوی کیفیت آب در این نقاط بحرانی است. شناسایی این چاه‌ها، نیاز به اعمال راهبردهای مدیریتی فوری و هدفمند جهت کنترل منابع آلاینده (مانند نشت‌های احتمالی کشاورزی، شهری یا صنعتی) را تأیید می‌کند. در مقابل این یافته‌ها، سه چاه (شماره ۳، ۴ و ۵) روند نزولی WQI را ثبت کردند که حاکی از بهبود نسبی کیفیت آب در این مناطق است. این بهبود نسبی ممکن است تحت تأثیر تغییر در الگوهای برداشت، یا شرایط تغذیه آبخوان صورت گرفته باشد. شایان ذکر است که چهار چاه باقی‌مانده (۱، ۶، ۸ و ۱۰) نیز روند افزایشی در WQI را تجربه کردند، اما این روندها به سطح معناداری آماری نرسیده‌اند. این وضعیت به‌عنوان یک نشانه‌ی هشدار اولیه تلقی می‌شود؛ بدین معنی که در صورت تداوم شرایط بهره‌برداری فعلی، احتمال تبدیل شدن این روندهای غیرمعنادار به افت کیفیت قطعی در دوره‌های پایش آتی وجود دارد. داده‌های آزمون کندال به‌طور قاطع تأثیر منفی بر کیفیت آب زیرزمینی در بخش قابل توجهی از شبکه چاه‌های منطقه را نشان می‌دهند. مدیریت آبخوان باید بر کنترل منابع آلاینده در مناطق با افت کیفیت معنادار و همچنین پایش مستمر نقاط با روند افزایشی غیرمعنادار متمرکز شود.

1- Electrical conductivity
2- Total dissolved solid
3- Total hardness

4 Sodium Adsorption ratio

جدول ۳- ضرایب همبستگی آماری میان متغیر زمان (به‌عنوان متغیر مستقل) و پارامترهای کیفی آب زیرزمینی (به‌عنوان متغیر وابسته) یا آزمون رتبه‌ای کندال

well	EC	TDS	pH	HCO^{3}	CL	SO^{4}	Ca	Mg	Na	SAR	TH
۱/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۲۳	-۰/۲۷۹	-۰/۱۱۲	-/۳۴۶*	۰/۱۱۳	-۰/۲۳۸	-/۳۴۹*	۰/۰۸۳	۰/۱۲۰	-/۴۴۴**
۲/۰۰	/۵۳۵**	/۵۳۱**	/۴۱۸**	-۰/۰۵۹	/۶۸۸**	/۳۰۰*	/۵۱۰**	/۶۷۰**	/۳۹۷**	-۰/۱۷۷	/۶۱۵**
۳/۰۰	-۰/۱۴۶	-۰/۲۲۵	-۰/۲۴۲	-۰/۱۰۵	-/۳۷۳*	-۰/۱۳۵	-۰/۱۷۱	-۰/۲۹۲	-۰/۱۴۶	-۰/۰۳۶	-۰/۲۶۰
۴/۰۰	/۳۷۷**	-۰/۲۷۵	-۰/۱۴۹	-۰/۰۳۳	/۴۱۰**	۰/۰۴۴	-۰/۲۲۵	-/۴۲۸**	-۰/۲۷۲	۰/۱۲۳	-/۴۸۱**
۵/۰۰	-۰/۰۹۹	-۰/۰۲۰	-/۳۸۶*	-۰/۱۰۱	-۰/۲۳۵	۰/۰۲۸	۰/۲۰۱	-۰/۲۶۶	-۰/۰۷۱	۰/۰۲۰	-۰/۱۷۹
۷/۰۰	۰/۱۱۱	۰/۱۲۴	-۰/۱۹۸	-۰/۰۰۷	۰/۱۳۸	۰/۱۵۷	۰/۰۱۴	۰/۰۹۹	۰/۱۵۷	۰/۲۶۸	۰/۰۴۷
۸/۰۰	/۶۶۲**	/۶۶۲**	-۰/۱۳۲	۰/۱۵۲	/۶۵۹**	۰/۲۲۷	/۴۲۵*	/۵۲۵**	/۴۳۴**	-۰/۱۶۵	/۵۹۵**
۹/۰۰	/۶۷۳**	/۶۸۶**	-۰/۳۰۷	/۳۷۲*	۰/۲۴۷	۰/۲۱۷	۰/۲۴۵	/۵۴۴**	/۵۲۵**	-۰/۰۲۰	/۶۷۵**
۱۰/۰۰	۰/۲۷۵	/۳۰۱*	-/۳۴۲*	۰/۱۰۶	۰/۲۷۲	/۳۱۲*	۰/۲۷۶	۰/۱۹۴	۰/۲۱۸	۰/۱۲۳	۰/۲۵۳
۱۱/۰۰	/۵۵۱**	/۵۷۲**	-/۳۷۵*	۰/۰۶۲	/۵۹۳**	/۴۷۸**	/۴۲۴**	/۴۷۴**	/۳۹۹**	۰/۰۴۳	/۴۹۸**
۱۲/۰۰	/۳۲۱*	/۳۹۳**	-۰/۰۶۰	-۰/۱۰۴	/۴۳۹**	/۳۰۹*	۰/۲۷۳	/۳۴۰*	۰/۲۳۴	۰/۰۴۴	/۴۴۳**
average	۰/۳۰۴	۰/۳۱۰۳	۰/۲۵۱۸	۰/۰۴۹۳	۰/۱۹۴	۰/۱۸۹۳	۰/۱۷۲۶	۰/۱۹۱۴*	۰/۲۱۹۶	۰/۰۳۰۵	۰/۲۱۹۹

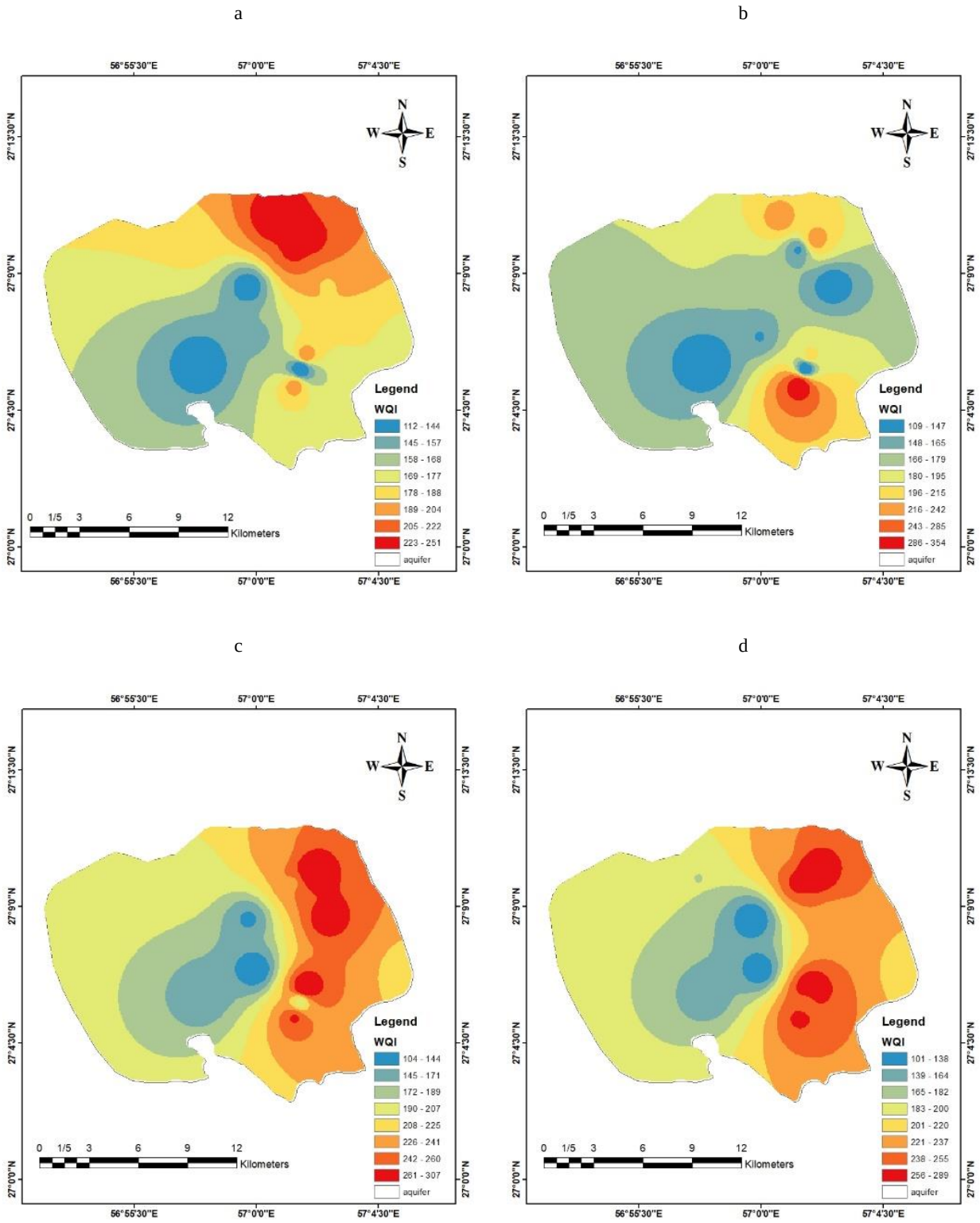
جدول ٤- نتایج سنجش همبستگی آماری میان متغیر زمان (به‌عنوان متغیر مستقل) و شاخص کیفیت آب WQIزیرزمینی (به‌عنوان متغیر وابسته) یا آزمون همبستگی رتبه‌ای کندال

WELL	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
WQI	۰/۶۶۷	۱/۰۰۰*	-۰/۳۳۳	-۰/۶۶۷	-۰/۳۳۳	۰/۶۶۷	-۰/۰۲۱	۰/۶۶۷	۰/۸۹۰*	۰/۶۶۷	۰/۸۷۹*	۰/۹۸۰*

تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی کیفی WQI نشان داد که کمترین مقدار آن در منطقه موردمطالعه برابر با ۱۰۱ اندازه‌گیری شده است که بر اساس استانداردهای تعیین‌شده، همچنان نشان‌دهنده‌ی کیفیت متوسط آب محسوب می‌شود. به‌جز بخش مرکزی آبخوان، در سایر نواحی، مقدار WQI بیش از ۲۰۰ است که این امر استفاده از آب را برای مصارف شرب نامناسب می‌سازد. بیشترین مقادیر WQI در قسمت‌های شرقی و جنوبی مشاهده شده است. می‌توان نتیجه گرفت که این امر به دلیل غلظت بالای نمک (مشخص شده توسط پارامترهای هدایت الکتریکی و کلراید) است که ممکن است ناشی از افت شدید تراز سطح آب زیرزمینی در کل منطقه‌ی مورد مطالعه و به تبع آن نفوذ آب دریا به آبخوان مورمطالعه باشد . این مناطق، به‌عنوان کانون‌های اصلی بحران کیفیت آب در دشت میناب شناسایی شده‌اند. در رتبه‌بندی بعدی، بخش‌های شمالی و غربی قرار دارند که دارای سطوح شوری بالاتری نسبت به مرکز هستند. لازم به ذکر است تحلیل‌های مکانی نشان می‌دهند که تراکم چاه‌های بهره‌برداری و کانون‌های اصلی عملیات تعمیق (کف‌کنی) در پهنه‌های جنوبی و شرقی دشت متمرکز شده‌اند. از آنجایی که این مناطق مسئولیت تأمین حجم قابل توجهی از نیاز آبی شرب شهری (بندرعباس) را بر عهده دارند، فشار هیدرولیکی ناشی از برداشت‌های تجمعی فزاینده در این بخش‌ها، به‌عنوان مکانیزم اصلی تنزل کیفیت و افت سطح آبخوان مطرح می‌گردد. این تمرکز بالای بهره برداری، فرآیندهای شورزایی و تبادل یونی را در این پهنه‌های حساس تسریع بخشیده است.در بخش مرکزی دشت، به دلیل نفوذ آب شیرین و همچنین دانه درشت بودن رسوبات در این منطقه، میزان WQI به طور قابل توجهی کاهش یافته و کیفیت آب بهتری را نشان می‌دهد. مطابق با شکل‌های ۲a، ۲b، ۲c و ۲d نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی WQI در فصل‌های آبیاری و غیر آبیاری مربوط به ابتدا و انتهای دوره زمانی موردمطالعه نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در فصل آبیاری نسبت به فصل غیر آبیاری افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که در نواحی ساحلی حداقل نیمی از فصل رشد گیاه مصادف با فصل بارش می‌باشد از اینرو تغذیه آبخوان با بارندگی منجر به افزایش کیفیت آب زیرزمینی می‌گردد. از طرفی کیفیت آب زیرزمینی در انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۴۰۱) نسبت به ابتدای دوره موردمطالعه (۱۳۹۱) کاهش یافته است که دلیل این امر را می‌توان به خشکسالی‌های پیاپی، عدم وجود بارش مناسب، تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری‌بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی نسبت داد.

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی با دیاگرام ویلکاکس

تحلیل نمودار ویلکاکس برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در چهار دوره زمانی شامل فصل آبیاری و غیرآبیاری در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۴۰۱ نشان داد که وضعیت کلی آب برای مصارف کشاورزی نامطلوب است (شکل‌های ۶ الی ۹). کیفیت آب زیرزمینی در هیچکدام از چاه‌های نمونه‌برداری در رده ایده‌آل C1-S1 (شوری کم، سدیم پایین) قرار نگرفتند، که بیانگر وجود محدودیت‌های کیفی از ابتدای دوره پایش است. در تمام دوره‌ها، بخش عمده‌ای از نمونه‌ها در محدوده‌های C3S2 تا C4S4 توزیع شدند.



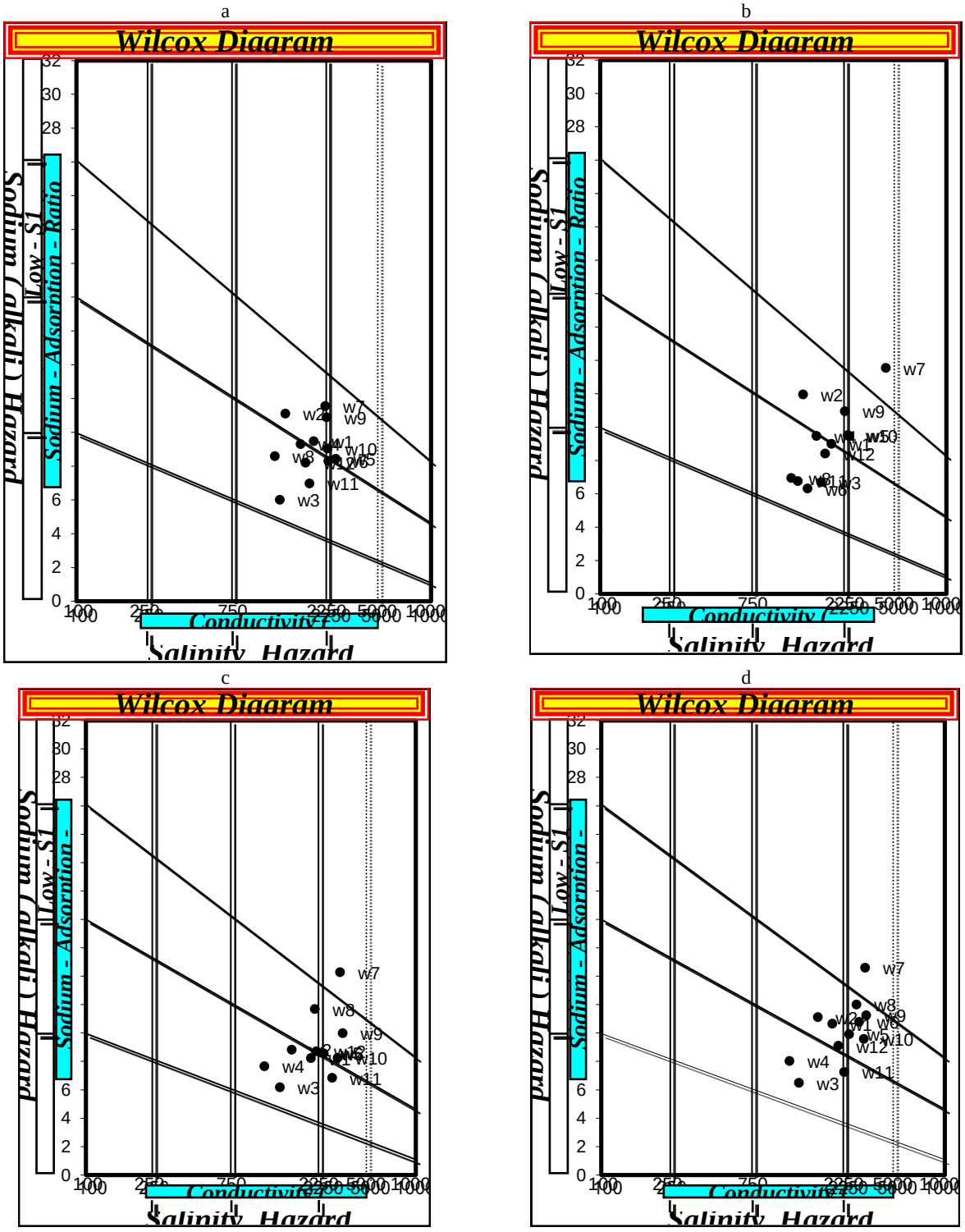
شکل ۲- پهنه‌بندی میانگین شاخص کیفیت آب زیرزمینی (WQI) a: فصل آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)، b: فصل غیر آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)،c: فصل آبیاری در انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۴۰۱)، d: فصل غیر آبیاری انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۴۰۱)

این رده‌بندی نشان‌دهنده آب‌هایی با هدایت الکتریکی بالا تا بسیار بالا (C3 و C4) و نسبت جذب سدیم متوسط تا بسیار زیاد (S2 تا S4) است. استفاده از این آب‌ها در کشاورزی، مستلزم به‌کارگیری روش‌های مدیریتی خاص شامل انتخاب گیاهان مقاوم به شوری و اصلاح مستمر خاک از طریق شست‌وشو و زهکشی مؤثر است. مقایسه داده‌ها در طول یک دهه، یک روند کاهشی واضح در کیفیت آب را آشکار می‌سازد: در سال ۱۳۹۱ کبفیت آب زیرزمینی بیشتر چاه-های نمونه‌برداری عمدتاً در دسته‌های C3S2 و C4S2 متمرکز بودند (شوری بالا، سدیم متوسط)، که محدودیت استفاده را به گیاهان مقاوم‌تر افزایش می‌داد.

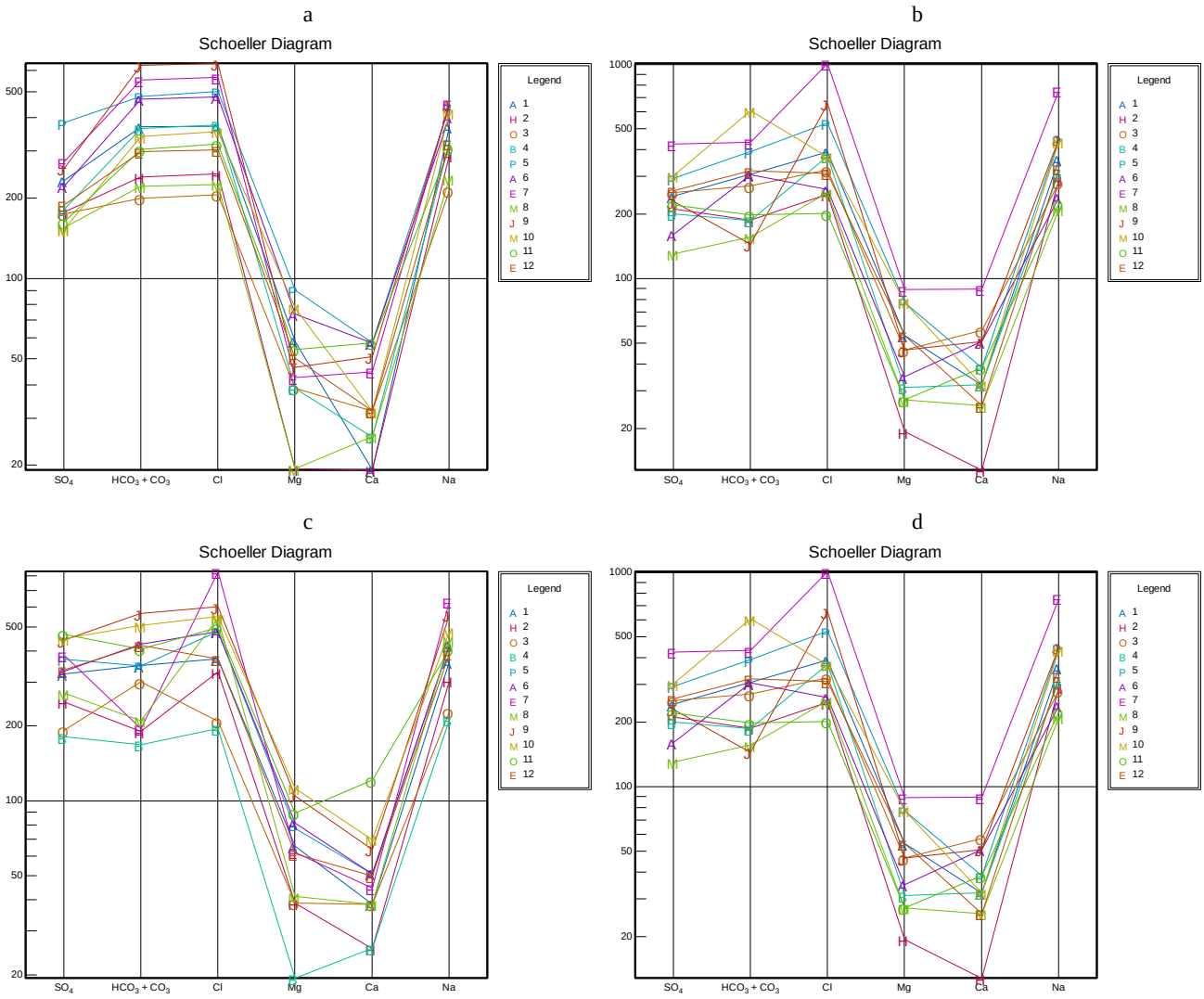
با گذشت یک دوره ده‌ساله درسال ۱۴۰۱ اکثریت چاه‌های نمونه-یرداری کیفی آب زیرزمینی رده‌های با کیفیت پایین‌تر قرارا گرفتند. لذا افزایش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری در محدوده‌های C4S3 و C4S4 در مقایسه با ابتدای دوره موردمطالعه (۱۳۹۱)، تأییدکننده تشدید اثر منابع شور و سدیمی در آبخوان است. با مقایسه دیاگرام ویلکاکس در فصول آبیاری و غیر آبیاری در انتهای دوره مطالعاتی (شکل‌های ۲a، ۲b) می‌توان پی برد که در هر فصل تغییر محسوسی در کیفیت اب زیررزمینی در تمامی چاه‌های نمونه برداری مشاهده نمی‌شود. دلیل عدم تغییر کیفیت آب آبیاری بین دو فصل آبیاری و غیر آبیاری در ابتدای دوره را می‌توان به بارش‌های بیشتر در ان زمان، شدت خشکسالی‌های کمتر، عدم برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و عدم الگوی کشت متراکم نسبت داد. اما در انتهای دوره موردمطالعه (شکل‌های ۲c و ۲d) کیفیت آب زیرزمینی بین دو فصل آبیاری و غیر آبیاری در تعدادی از چاه‌های نمونه‌برداراریاز C3S2 به C4S4 تغییر وضعیت داده‌اند که نشان از تخریب کیفیت آب زیرزمینی بین دو دوره آبیاری و غیر آبیاری است. که علت این امر خشکسالی‌های پیاپی در طی دوره ده‌ساله، عدم وجود تغذیه مناسب آبخوان، تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی است. تحلیل نمودار ویلکاکس به‌وضوح نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی منطقه در طول دوره مطالعه، تحت محدودیت‌های شدید شوری (EC) و سدیمی (SAR) قرار دارد. روند زمانی از ۱۳۹۱ به ۱۴۰۱، افت کیفی مداوم را با انتقال نقاط به سمت رده‌های C4S3 و C4S4 تأیید می‌کند. این تنزل کیفیت احتمالاً ناشی از عواملی چون نفوذ آب شور و تأثیر تغییرات اقلیمی و کاهش تغذیه خاص از بارش‌ها است؛ بنابراین، اقدامات مدیریتی باید بر محوریت کنترل شوری و سدیم از طریق انتخاب ارقام مقاوم و بهبود زهکشی خاک متمرکز گردد.

تحلیل تطبیقی و روند زمانی هیدروشیمیایی آب زیرزمینی با دیاگرام شولر

مطالعه تطبیقی داده‌های هیدروشیمیایی استخراج‌شده از دیاگرام‌های شولر در دو دوره زمانی متفاوت شامل سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۴۰۱ و فصل‌های آبیاری و غیر آبیاری حاکی از یک تغییر هیدروشیمیایی و کاهش قابل ملاحظه کیفیت آب زیرزمینی در چاه-های نمونهبدرای‌کیفی آب زیرمیین منطقه موردمطالعه است (شکل-های ۲a و ۲b). با توجه به شکل ۲b تیپ غالب کیفیت آب زیرزمینی در فصل غیر آبیاری ابتدای دوره مطالعاتی، سدیمی–کلراییدی (Na–Cl) با TDS برآورد شده بالاتر از ۲۰۰۰ mg/l است، که حاکی از کیفیتی نامناسب تا ناخوشایند برای مصارف آشامیدنی است. اما وقوع بارش و تغذیه آبخوان و از طرفی نفوذ عمقی آب آبیاری در فصل آبیاری ۱۳۹۱ منجر به تعدیل یون‌ها و تغییر تیپ کیفیت آب زیرزمینی به کلسیمی–بیکربناتی ($Ca–HCO_3$) با TDS در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ mg/l گردید که کیفیت قابل قبول برای مصارف آشامیدنی محسوب می‌شود (شکل ۲b). بررسی دیاگرام‌های شولر در انتهای دوره مطالعاتی (سال۱۴۰۱) و در هر دو فصل آبیاری و غیر آبیاری (شکل‌های ۲c و ۲d)غیر آبیاری نشان‌دهنده تشدید آلودگی شوری و سدیمی بود. تیپ آب به سدیمی–کلراییدی–سولفاتی تغییر یافته و TDS به محدوده ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ mg/l رسید. این افزایش شوری، که ناشی از عدم وقوع بارش، عدم تغذیه مناسب آبخوان، تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های مکرر در طول این دوره ده‌ساله بوده است، آب را برای شرب نامناسب ارزیابی می‌کند. با این وجود در فصل آبیاری اثر تعدیل‌کننده آبیاری در دیاگرام شولر هویدا است وآب زیرزمینی کیفیت آن به صورت نسبی بهبود یافته است (TDS بین ۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ mg/l، تیپ $Ca–HCO_3$ گرایش‌یافته به Na). با این حال، این کیفیت نسبت به ابتدای دوره مطالعه، پایین‌تر ارزیابی شده و مصرف مستقیم آن نیازمند تصفیه سبک است. روند ده‌ساله (۱۳۹۱ به ۱۴۰۱) به‌وضوح نشانگر کاهش مستمر کیفیت آب زیرزمینی است که با حرکت تیپ هیدروشیمیایی از $Ca–HCO_3$ به سمت Na–Cl و افزایش کلی شوری نمود یافته است. در حالی که فصل آبیاری همچنان تأثیر تعدیل‌کننده بر غلظت یون‌ها دارد، دامنه این بهبود در سال ۱۴۰۱ نسبت به سال پایه (سال ابتدای دوره مطالعه) کمتر شده است. این یافته‌ها بر ضرورت اتخاذ استراتژی‌های مدیریت حوضه آبریز برای کنترل فرآیند شورزایی منابع زیرزمینی تأکید می‌کنند.



شکل ۳- دیاگرام ویلکاکس: a: فصل آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)، b: فصل غیر آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)،c: فصل آبیاری در انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱٤۰۱)، d: فصل غیر آبیاری انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱٤۰۱)

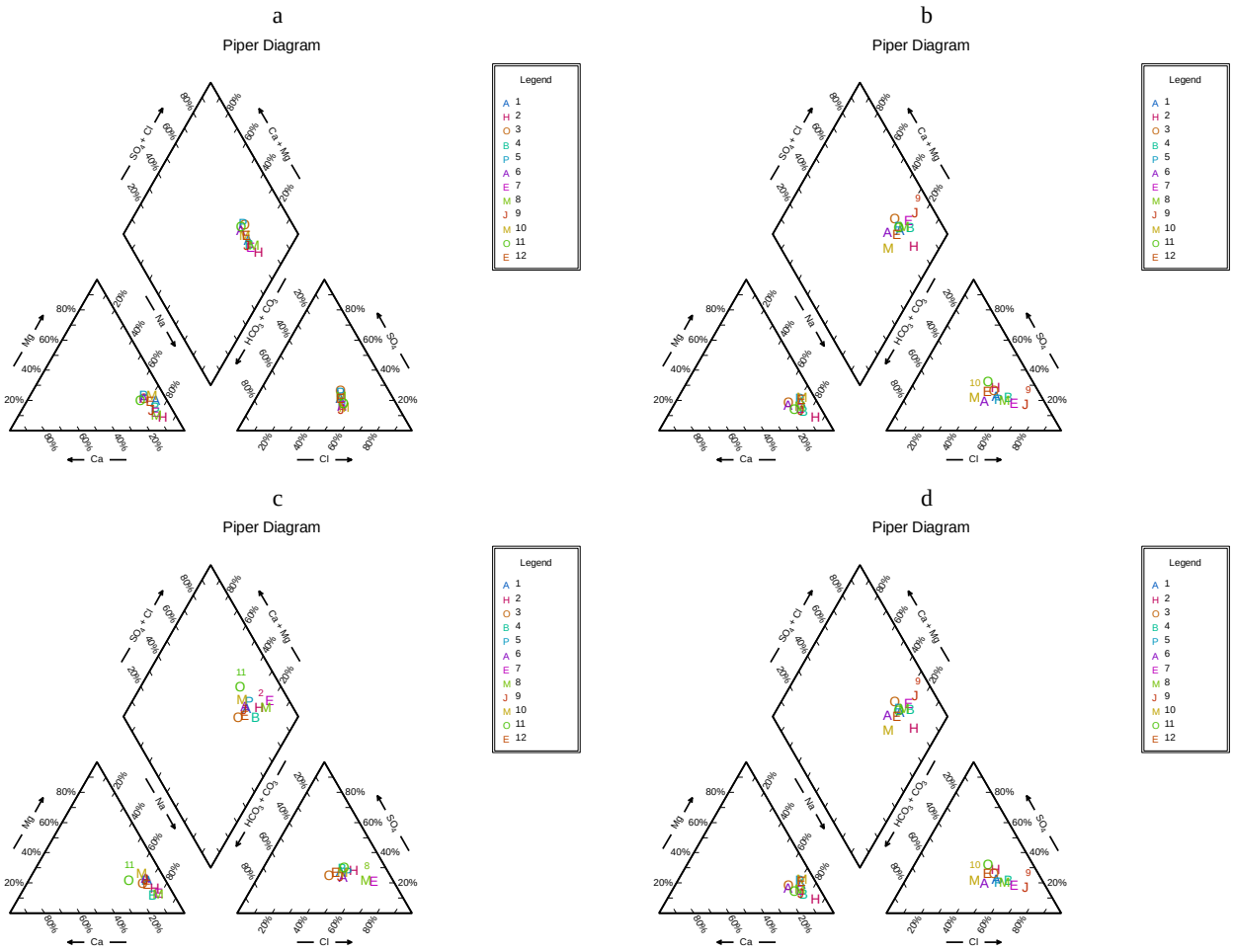


شکل ٤- دیاگرام شولر: a: فصل آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)، b: فصل غیر آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)،c: فصل آبیاری در انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱٤۰۱)، d: فصل غیر آبیاری انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱٤۰۱)

تکامل هیدروشیمیایی آب زیرزمینی بر اساس دیاگرام پایپر

شکل‌های ۵a، ۵b، ۵c و ۵d دیاگرام پایپر در فصول آبیاری و غیر آبیاری در ابتدا و انتهای دوره زمانی موردمطالعه را نشان می‌دهد. تحلیل نمودار پایپر نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی انتهای دوره موردمطالعه نسبت به ابتدای آن شاهد یک تکامل هیدروشیمیایی اساسی از تیپ‌های کلسیمی به سمت تیپ‌های سدیمی-کلراییدی (Na^{+}-Cl^{-}) بوده است. در سال ابتدای دوره موردمطالعه ترکیب آب عمدتاً دارای رخساره کلسیمی-منیزیمی-بیکربناتی (Ca^{2+}-Mg^{2+}-HCO_3^{-}) بوده که مشخصه آب‌های تازه و نسبتاً کم‌عمق است. با این حال، تا سال ۱۴۰۱، کیفیت آب زیرزمینی در اکثریت چاه‌های نمونه‌برداری کیفی به سمت ناحیه تحت تسلط رخساره Na^{+}-Cl^{-} تغییر یافته‌اند. این جابه‌جایی یونی، در بعد کاتیونی، از غلبه Mg^{2+}، Ca^{2+}، به سمت Na^{+} در بعد آنیونی، از HCO_3^{-} به سوی Cl^{-} و تا حدودی SO_4^{2-} ، حاکی از غلبه دو فرآیند اصلی شامل الف- تبادل کاتیونی: جایگزینی کاتیون‌های دوظرفیتی (Ca^{2+}، Mg^{2+}) با کاتیون سدیم (Na^{+}) بر روی سطح رسوبات و ب- نفوذ آب شور یا شورزایی: ورود یا تغذیه آبخوان از منابع دارای شوری بالا (مانند نفوذ آب دریا یا انحلال سازندهای تبخیری) که منجر به افزایش شدید غلظت یون‌های Cl^{-} و Na^{+} شده است. تأثیر فصل آبیاری در هر دو سال، باعث رقیق‌سازی نسبی و حرکت نقاط به سمت مناطق کلسیمی/بی‌کربناتی شده است. با این وجود، در سال ۱۴۰۱، حتی باوجود آبیاری، نقاط در نزدیکی تیپ‌های سدیمی باقی مانده‌اند؛ به

این معنی که پتانسیل شورزایی منبع زیرزمینی به‌طور دائمی افزایش یافته است. نمودار پایپر به‌صورت ژئوشیمیایی، فرآیندهای کلیدی را تأیید می‌کند: غلبه پدیده‌های شورزایی و تبادل یونی سدیم بر فرآیندهای انحلال کربناته در طول یک دهه، منجر به تغییر ماهیت آب از یک منبع با کیفیت قابل قبول به یک منبع تحت کنترل شوری و سدیم شده است.



شکل ۵- دیاگرام پایپر: a: فصل آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)، b: فصل غیر آبیاری در ابتدای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۳۹۱)،c: فصل آبیاری در انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۴۰۱)، d: فصل غیر آبیاری انتهای دوره زمانی موردمطالعه (سال ۱۴۰۱)

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پایش ده‌ساله آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه، نگرانی‌های جدی را در خصوص پایداری کیفیت آبخوان برجسته می‌سازد. این مطالعه به‌صورت قاطع نشان داد که تخریب کیفیت آب زیرزمینی روندی غالب است: تحلیل آماری با آزمون کندال بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از شبکه چاه‌ها کاهش شدید کیفیت آب زیرزمینی (افزایش WQI) را تجربه کرده‌اند. این وضعیت به طور مشخص در چاه‌های ۲، ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲ که دارای روندهای معنادار هستند، بحرانی تلقی می‌شود و مستلزم مداخله مدیریتی فوری است. باوجود تفاوت‌های فصلی مشاهده شده (بهبود نسبی در فصل آبیاری)، روند کلی حرکت نقاط بر روی نمودارهای طبقه‌بندی (نظیر شولر و ویلکاکس) به سمت محدودیت‌های شدیدتر شوری و سدیمی است. این وضعیت، پایداری کشاورزی منطقه را در بلندمدت به چالش می‌کشد. شوری و سختی، عوامل اصلی تخریب هستند: پارامترهای اصلی هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS) و سختی کل (TH) قوی‌ترین روند افزایشی معنادار را طی یک دهه نشان داده‌اند. این امر با افزایش محدودیت‌های استفاده از آب برای مصارف کشاورزی بر اساس نمودار ویلکاکس که تمرکز نقاط را به سمت کلاس‌های C4S3 و C4S4 سوق می‌دهد، همخوانی دارد. تغییر ماهیت هیدروشیمیایی: نمودار پایپر به‌وضوح مهاجرت

ژئوشیمیایی از تیپ‌های وابسته به انحلال کربناته (Ca^{2+}-HCO_3^-) به تیپ‌های شور و تبادلی (Na^+-Cl^-) را ثبت کرده است. این تحول نشان می‌دهد که فرآیندهای مداوم برداشت بیش از حد و نفوذ آب شور بر فرآیندهای طبیعی زمین‌شناسی غلبه کرده‌اند. اثر فصلی کاهشی است: اگرچه فصل آبیاری منجر به بهبود نسبی کیفیت نسبت به فصل غیر آبیاری می‌شود، اما روند کلی دهه اخیر نشان می‌دهد که حتی در شرایط رقیق‌سازی، کیفیت آب به سطح اولیه خود باز نمی‌گردد و این تأثیر مداوم نشان‌دهنده فشار پایدار بر منابع آبخوان است. در نهایت، برای حفظ کاربری مناسب آب زیرزمینی در این منطقه، ضروری است که راهبردهای مدیریتی بر کنترل منابع آلاینده، کاهش برداشت از چاه‌های موجود و همچنین اجرای اقدامات اصلاحی برای مدیریت شوری و سدیم در اراضی کشاورزی تمرکز یابند.

منابع

عادلی، ب.، محمدی کنگرانی، ح.، سعدالدین، ا.، بذرافشان، ا. و آرمین، م. ۱۳۹۷. ارزیابی کیفی و کمی سفره‌های آب زیرزمینی با به‌کارگیری روش WQI و آزمون من-کندال (مطالعهٔ موردی: دشت سرخون-استان هرمزگان). اکوهیدرولوژی. ۵(۳): ۸۱۱-۸۰۱.

Aleem, M., Shun, C.J., Li, C., Aslam, A.M., Yang, W., Nawaz, M.I. and Ahmed, W.S. 2018. Evaluation of groundwater quality in the vicinity of Khurrianwala industrial zone, Pakistan. Water. 10(1): 1-15.

Asfaw, D. and Mengistu, D. 2020. Modeling megech watershed aquifer vulnerability to pollution using modified DRASTIC model for sustainable groundwater management, Northwestern Ethiopia. Groundwater for Sustainable Development. 11: 100375.

Badeenezhad, A., Tabatabaee, H.R., Nikbakht, H.-A., Radfard, M., Abbasia, A., Baghapour, M.A. and Alhamd, M. 2020. Estimation of the groundwater quality index and investigation of the affecting factors their changes in Shiraz drinking groundwater, Iran. Groundwater for Sustainable Development. 11: 100435.

Bahrami, M., Khaksar, E. and Bahrami, A. 2022. Groundwater quality evaluation for potable and irrigation uses in the semi-arid region of southern Iran. Irrigation and Drainage. 71(3): 749–765.

Carrard, N., Foster, T. and Willetts, J. 2019. Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific: A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns. Water. 11(4): 350.

Chakraborty, B., Roy, S., Bera, B., Adhikary, P.P., Bhattacharjee, S., Sengupta, D. and Shit, P.K. 2022. Evaluation of groundwater quality and its impact on human health: a case study from Chotanagpur plateau fringe region in India. Applied Water Science. 12(1): 25.

Choramin, M., Safaei, A., Khajavi, S., Hamid, H. and Abozari, S. 2015. Analyzing and studding chemical water quality parameters and its changes on the base of Schuler, Wilcox and Piper diagrams (project: Bahamanshir River). WALIA Journal. 31(1): 15-28.

Çelik, R. 2019. Evaluation of Groundwater Potential by GIS-Based Multicriteria Decision Making as a Spatial Prediction Tool: Case Study in the Tigris River Batman-Hasankeyf Sub-Basin, Turkey. Water. 11(10): 47.

Derdour, A., Guerine, L. and Allali, M. 2021. Assessment of drinking and irrigation water quality using WQI and SAR method in Maâder sub-basin, Ksour Mountains, Algeria. Sustainable Water Resources Management. 7(1): 1-15.

Everest, T. and Özcan, H. 2019. Applying multivariate statistics for identification of groundwater resources and qualities in NW Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. 191(4): 47.

Gao, Y., Qian, H., Ren, W., Wang, H., Liu, F. and Yang, F. 2020. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area. Journal of Cleaner Production. 260(1): 121000.

Ghosh, A. and Bera, B. 2023. Hydrogeochemical assessment of groundwater quality for drinking and irrigation applying groundwater quality index (GWQI) and irrigation water quality index (IWQI). Groundwater for Sustainable Development. 22(1): 100958.

Horton, R.K. 1965. An index number system for rating water quality. Water Pollution Control Federation. 37(3): 300–306.

Kawo, N.S. and Karuppannan, S. 2018. Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. Journal of African Earth Sciences. 147(1): 300–311.

Khoramabadi Shams, G., Yusefzadeh, A., Godini, H., Hoseinzadeh, E., Khoshgoftar, M. and Baghapour, M.A. 2014. Water Quality Zoning Based on Water Quality Index and Wilcox Index Using Geographic Information System. Jundishapur Journal of Health Sciences. 6(3): 22-30.

purposes in the arid and hot weather of Southern Iran. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 134(1): 103582.

Sharma, M.K., Kumar, M., Malik, D.S., Singh, S., Patre, A.K., Prasad, B., Sharma, B., Saini, S., Shukla, A.K. and Das, P.C. 2022. Assessment of groundwater quality and its controlling processes in Bemetara District of Chhattisgarh State, India. Applied Water Science. 12(1): 102.

Sreedevi, P.D., Sreekanth, P.D., Ahmed, S. and Reddy, D.V. 2019. Evaluation of groundwater quality for irrigation in a semi-arid region of South India. Sustainable Water Resources Management. 5(1): 1-12.

Taheri, K., Missimer, T.M., Taheri, M., Mohseni Pour, F. and Moayedi, H. 2020. Critical Zone Assessments of an Alluvial Aquifer System Using the Multi-influencing Factor (MIF) and Analytical Hierarchy Process (AHP) Models in Western Iran. Natural Resources Research. 29(3): 1-15.

USSL 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. Soil Science Society of America Journal. 18(4): 348-360.

Mann, H.B. 1945. Non-parametric analysis of sequential data. Econometrica. 13(3): 245-260.

Noori Sepehr, M., Jafari, N. and Molaei Tavani, S. 2021. Assessing the quality of water output from desalination plants and water tankers in Qom and comparison with national standards and WHO. 8(2): 465–476.

Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Economic Geology. 25(3): 914–928.

Rao, N.S., Dinakar, A., Kumari, B.K., Karunanidhi, D. and Kamalesh, T. 2021. Seasonal and Spatial Variation of Groundwater Quality Vulnerable Zones in Yellareddygudem Watershed, Nalgonda District, Telangana State, India. Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 80(1): 11–30.

Schoeller, H. 1965. Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigations and development. UNESCO. 33(1): 44–52.

Sadeghi-Lari, A., Bahrami, M. and Dastandaz, T. 2024. Temporal and spatial variations of groundwater quantity and quality for drinking and irrigation

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 701-714

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۷۱۴-۷۰۱

Spatial and Temporal Changes in Groundwater Quality for Irrigation and Drinking Purposes in the Coastal Aquifer of Minab Plain, Hormozgan Province

R. Razmpoor[1], A. Sadeghi-Lari[2*]
Recived: Jun.18, 2026 Accepted: Jul.18, 2026

Abstract

In arid regions with low surface water resources, proper management and protection of groundwater resources is crucial to ensure their sustainability. This study conducted a comprehensive assessment of groundwater quality in the critical and important Minab Plain, located in Hormozgan Province, over a ten-year period between 2012 and 2022, with the aim of identifying temporal trends in changes and determining the hydrogeochemical status. The main physicochemical parameters of 12 monitoring wells were investigated in two irrigation and non-irrigation periods. The methodology was based on Kendall rank correlation analysis to determine the correlation and trend of quality parameters over time and using the Water Quality Index (WQI) and Schuller diagrams, Wilcox diagrams to assess groundwater quality for different uses and using the Piper diagram to determine the hydrogeochemical facies. The results of the Kendall test showed that the dominant trend in the plain is towards a decrease in groundwater quality; So that the calculated WQI for most of the sampling wells showed a positive correlation with time (increasing trend), which indicates the deterioration of groundwater quality in this area. In the entire study period, the highest and lowest WQI values were 101 and 354, respectively. Piper diagram analysis showed that the hydrochemical quality of the beginning of the study period changed from better quality calcium-bicarbonate facies to worse quality sodium-chloride facies at the end of the study period. Based on the Wilcox index, most of the samples were distributed in the C3S2 to C4S4 ranges in all study periods. This classification indicates waters with high to very high electrical conductivity (C3 and C4) and medium to very high sodium absorption ratio (S2 to S4). This study emphasizes the need to implement targeted management strategies to control pollutant sources and manage the exploitation of groundwater resources.

Keywords: Water Quality Index WQI, Kandal Test, Schuler, Wilcox, Piper

1- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
(*- Corresponding Author Email: adnan.sadeghilari@hormozgan.ac.ir)