هیدروژئولوژی، سال ششم، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۰
Hydrogeology, Volume 6, No. 2, Winter 2022

بررسی هیدروشیمی چاه‌های آب شهرستان بناب و ملکان با هدف ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با رویکرد زمین‌شناسی زیست‌محیطی

فاضل خالقی[1]*، ناصر مسیب‌زاده شیراز[2]

۱- استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲- کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
* نویسنده مسئول: fazel_khaleghi@iaut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷

چکیده

منطقه بناب و ملکان در شمال‌غرب ایران و در جنوب‌غرب استان آذربایجان شرقی واقع‌شده است. به‌منظور بررسی هیدروشیمی آب زیرزمینی از منابع آبی ۱۲ حلقه چاه آب در منطقه بناب و ملکان نمونه‌برداری گردید. اطلاعات مربوط به کیفیت آماری چاه‌های انتخابی شامل pH، EC، TDS و هشت پارامتر دیگر می‌باشد. داده‌ها جهت پردازش و تفسیر وارد نرم‌افزارهای Chemistry، AqQA و SPSS شده و به‌منظور تعیین کیفیت نمونه‌ها برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی کیفیت آب ازنظر شرب از دیاگرام شولر استفاده شد. به‌منظور تعیین کیفیت آب برای مصارف آبیاری و صنعت به ترتیب از دیاگرام ویلکاکس و اندیس لانژیه استفاده گردیده است. براساس دیاگرام شولر، نمونه‌های آب منطقه در محدوده آب‌های خوب و قابل‌قبول قرار می‌گیرند که نشانگر مطلوب بودن کیفیت آب منطقه برای مصارف آشامیدنی می‌باشد. همچنین طبق نمودار ویلکاکس، نمونه‌های منطقه در دو رده خوب و متوسط ازلحاظ آبیاری و کشاورزی قرار می‌گیرند. در بین نمونه‌های انتخابی، چاه W_{12} دارای کیفیت مناسب و بقیه نمونه‌ها کیفیت متوسط دارند. همچنین از میان مجموعه نمونه‌های برداشته‌شده، چاه‌های W_8، W_9، W_{10} و W_{12} قابل‌استفاده در بخش صنعت بوده و درعین‌حال نمونه W_6 رسوب‌گذار است. نمونه‌های شهر بناب همگی خورنده بودند که دلیل آن را می‌توان عمق کم چاه‌های شهرستان بناب به‌واسطه ضخامت کمتر آبرفت‌ها در مقایسه با ملکان دانست. نمونه‌های برداشتی منطقه ازلحاظ سختی کل (TH) عمدتاً در رده کاملاً سخت قرار می‌گیرند که نارضایتی مصرف‌کنندگان را درپی دارد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، بناب و ملکان، سختی کل، کیفیت آب، هیدروشیمی.

مقدمه

کیفیت آب زیرزمینی به اندازه کمیت آن مهم است و عمده تغییرات در کیفیت آب تابعی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی است که به‌شدت تحت‌تأثیر ساختارها و سازندهای زمین‌شناسی منطقه و فعالیت‌های بشری می‌باشد. آب سالم باید دارای شاخص‌های کیفی مناسبی باشد تا بتوان آن را در مصارف مختلف شرب، کشاورزی و صنعت مورداستفاده قرار داد. در این زمینه ملاک عمل، به‌کارگیری استانداردهای سازمان‌هایی مثل سازمان بهداشت جهانی، وزارت نیرو و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، برای املاح محلول و آلاینده‌های مختلف در آب می‌باشد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۷؛ WHO, 2008). از مهم‌ترین عواملی که بر کیفیت آب سفره‌های زیرزمینی و چاه‌های عمیق اثرگذار است، شامل: لیتولوژی سازندهای زمین‌شناسی منطقه و بافت خاک منطقه‌ای که چاه در آن قرار دارد، شیب هیدرولیکی سفره زیرزمینی، میزان نفوذ آب‌های سطحی کشاورزی و پساب‌ها به داخل آبخوان، عمق آبخوان و مسافت طی شده آب زیرزمینی در آن حجم تغذیه در مقاطع مختلف آبخوان، نحوه

ایزولاسیون چاه‌ها و تدابیر حفاظتی آن‌ها می‌باشد. عواملی مثل تغییرات اقلیم و بارندگی، میزان برداشت از منابع آبی، عبور از لایه‌ها و سازندهای مختلف، فعالیت‌های کشاورزی و انسانی کیفیت آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهد. کنترل آب‌های زیرزمینی سخت‌تر از آب‌های سطحی می‌باشد. کیفیت آب زیرزمینی نتیجه کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از زمان تشکیل و تراکم آب در اتمسفر تا زمانی که توسط چاه، چشمه یا قنات از زیرزمین خارج می‌شود بر روی آن عمل کرده است. ماهیت ژئوشیمیایی سازندهای موجود در مسیر حرکت آب تأثیر بسزایی در تیپ و رخساره آب دارد؛ بنابراین، با توجه به رخنمون سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی در منطقه بناب و ملکان ابتدا بررسی اجمالی و کلی واحدهای زمین‌شناسی آورده می‌شود. از طرفی، ارزیابی کیفیت آب با هدف مناسب بودن آن برای مصارف متنوع با استفاده از شاخص‌های خاص انجام می‌شود. یکی از روش‌های تعیین کیفیت آب برای مصرف شرب، استفاده از نمودار نیمه‌لگاریتمی شولر (1962) Schoellerاست. نمودار پایپر علاوه بر نشان دادنِ ماهیت نمونه به‌صورت گرافیکی، وابستگی آن با سایر نمونه‌ها را نیز نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان سهم هر یک از عوامل طبیعی، سنگ‌شناسی و انسان‌زاد را شناسایی کرد (Sayyed et al. 2013). با استفاده از شیوه‌های مذکور (شولر، ویلکاکس و پایپر) کیفیت هیدروژئوشیمیایی بهداشتی آب زیرزمینی رامیان در استان گلستان بررسی‌شده است (خاندوزی و همکاران، ۱۳۹۴). بررسی کیفیت آب مخازن چاه‌های زابل توسط (Homayoon Nezhad et al. 2016) با استفاده از نمودار شولر قابل‌قبول ارزیابی‌شده است. جمشیدزاده (۱۳۹۹) و هادیپور و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از تحلیل‌های هیدروژئوشیمی، به‌ترتیب کیفیت آبخوان دشت کاشان و کوهدشت را بررسی نموده‌اند. استفاده از شاخص لانژلیه برای تشخیص مشکلات منابع آب به اقتباس از مطالعه غلام دخت بندری و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبخیز سیاهو در بندرعباس صورت گرفته است. Khaleghi and Shahverdizadeh (2014) مشخصات هیدروژئوشیمایی و کیفیت آب دشت مرند برای مصارف شرب و کشاورزی را با نمودار پایپر و ویلکاکس ارزیابی کرده است. طبق بررسی Subbarao et al. (1996) تحلیل آماری به روش فاکتوری در تشخیص آلودگی آب زیرزمینی مؤثر می‌باشد.

همچنین در این مقاله از شیوه مطالعاتی Arumugam (2009) and Elangovan برای تعیین مشخصات هیدروشیمیایی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شده است. طبق (2015) Bob et al.استفاده از نمودار شولر و پایپر برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی شهر مدینه نیز برای تشخیص آلودگی از طریق نشت از منابع مختلف مؤثر بوده است.

مطالعه بر روی تفسیر فراسنج‌های مربوط به کیفیت آب آشامیدنی روستاهای سانگانر کشور هندوستان توسط یاشبیر به طریق تجزیه‌وتحلیل آماری چندمتغیره در سال ۲۰۱۰ نمایان کرد که کیفیت این آب‌ها به سمت شرایط نامناسب پیش می‌روند و به مقدار بالاتر از حد مجاز فلوراید، نیترات و قلیائیت حاصل از منابع آلاینده‌های مصنوعی و آلی آلوده شده‌اند (Kumar and Singh, 2010).

سازندهای زمین‌شناسی ازنقطه‌نظر آب‌های زیرزمینی به دو واحد نرم (رسوبات منفصل) و سخت (رسوبات غیر منفصل) تقسیم می‌شوند و گروه اول به‌دلیل نفوذپذیری و متخلخل بودن و توانایی آن در تشکیل آبخوان دارای اهمیت بیشتری نسبت به گروه دوم هستند (محمودی، ۱۳۸۶).

ترکیب شیمیایی منابع آب زیرزمینی تابعی پیچیده از متغیرهای فراوانی ازجمله شرایط هیدروژئولوژیکی، تکامل هیدروشیمیایی آب در جهت حرکت از آن در مخزن، شرایط و ساختارهای زمین‌شناسی منطقه، تبخیر از سطح ایستابی و فعالیت انسانی در منطقه است؛ بنابراین کیفیت آب زیرزمینی به‌طور عمده توسط دو عامل طبیعی و انسانی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Chan, 2001).

آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط منشأ متفاوتی نظیر شهری، کشاورزی و تداخل بالاآمدن آب شیرین و پایین رفتن آب شیرین به‌وجود می‌آید. کیفیت درجه آلوده‌شدن آب‌های زیرزمینی توسط فاضلاب‌های شهری به نوع تصفیه‌ای که قبل از وارد شدن فاضلاب به زمین صورت می‌گیرد، بستگی دارد. راحت‌ترین اثر قابل‌تشخیص زهکشی مخازن فاضلاب به‌طرف آب زیرزمینی واقع در این‌گونه منشأها افزایش نیترات، کلراید و باکتری‌های آب زیرزمینی می‌باشد (خالقی، ۱۳۸۷). تعداد زیادی از این مطالعات نیز نشان داده‌اند که غلظت‌های نیترات آب‌های زیرزمینی در حال حرکت از نواحی جنگلی، مراتع و

حتی چراگاه‌ها بعد از حرکت در زیرزمین‌های کشاورزی بین ۳ تا ۶۰ برابر افزایش‌یافته است (Alley, 1993).

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در جنوب‌غربی استان آذربایجان شرقی واقع‌شده است. این منطقه از شمال به محدوده عجب-شیر و از جنوب به شهرستان میاندوآب و از شرق به شهرستان مراغه و ارتفاعات سهند و از غرب به دریاچه ارومیه محدودشده است. مورفولوژی منطقه موردمطالعه به‌طورکلی متأثر از پدیده‌های تکتونیکی حاکم بر ناحیه و بیشتر ناشی از فعالیت-های آتش‌فشانی سهند می‌باشد. بخشی از منطقه شامل تراس‌های قدیمی است که به‌صورت اراضی تپه‌ماهوری در دامنه‌ها گسترش دارد و در بعضی نقاط دارای ارتفاعات بلند است. دره‌ها به‌جز در مسیر رودخانه‌ها در عمق کم قرار دارند. نقاط مرتفع منطقه معمولاً توسط لایه‌های آهکی پوشیده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۱).

در محدوده مطالعاتی، از قدیم به جدید سازندهای پرکامبرین تا کواترنری رخنمون دارند که عمدتاً شامل سازندهای ژوراسیک، کرتاسه و سنوزوئیک است. واحدهای پرکامبرین-کامبرین شامل ماسه‌سنگ‌های قرمزرنگ سازند لالون، شیل و دولومیت و آهک‌های سازند میلا می‌باشد. سازند سلطانیه به‌صورت دولومیت توده‌ای با میان‌لایه‌هایی از چرت و گاهاً شیل ماسه‌ای و میکادار با رنگ سبز تیره عمدتاً در ملکان رخنمون دارند. در ارتفاعات شمالی ملکان رخنمونی از واحدهای کرتاسه به‌صورت ماسه‌سنگ کوارتزیتی و آهک و شیل نیز دیده می‌شود. واحدهای سنوزوئیک در منطقه موردمطالعه به‌صورت نهشته‌های توف و لایه‌های موسوم به لایه‌های استخوان‌دار مراغه (*Bon Bed*) بخشی از منطقه بناب را پوشانده است. واحدهای کواترنری به‌صورت تپه‌ماهوری، رسوبات تراستی و رسوبات پهنه دشت را شامل می‌شود و عمدتاً اراضی کشاورزی می‌باشند. این نواحی در پایین‌دست به اراضی مسطح و کم-شیب پهنه‌های گلی و در انتها به شوره‌زارهای حاشیه دریاچه ارومیه (Q^{sd}) منتهی می‌گردد. رسوبات مخروط افکنه‌ای (Q^{f}) و پادگانه‌ای جدید در اراضی شمال ملکان رخنمون دارد. وسعت رسوبات رسی حاوی نمک در جنوب شرقی دشت ملکان بیشتر می‌باشد (فیجانی، ۱۳۹۲).

آبخوان دشت ملکان از نوع سفره آزاد بوده و عمدتاً از رسوبات آبرفتی قدیمی، پادگانه‌های آبرفتی جدید، رسوبات مخروط افکنه‌ای و رودخانه‌ای تشکیل‌شده است و رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان بیشتر از جنس ماسه، سیلت و رس می-باشد که در قسمت ابتدایی دشت از نوع دانه‌درشت و به سمت انتهای دشت یا به سمت دریاچه ارومیه، رسوبات دانه‌ریز شده و دارای هدایت هیدرولیکی کمتری می‌باشند. بیشترین ضخامت آبرفت دشت ملکان مربوط به بخش میانی و منطقه شهر ملکان می‌باشد که ضخامت آبرفتی در این قسمت ۷۰ متر است و هرچه به سمت حواشی آبخوان نزدیک‌تر شویم، از ضخامت آبرفت کاسته می‌شود و ضخامت در حدود ۵ متر می-باشد (فیجانی، ۱۳۹۲). البته باتوجه به شرایط طبیعی و ویژگی‌های دانه‌بندی آبرفت، میزان نفوذ در دشت بناب و ملکان متغیر می‌باشد (سازمان آب منطقه‌ای، ۱۳۸۳).

آبرفت‌های عهدحاضر در منطقه بناب ازنظر لیتولوژی شامل نهشته‌های کنگلومرایی با جورشدگی ضعیف و سیمان رسی-ماسه‌ای است که ضخامت آن‌ها از ۲۰ تا ۸۰ متر متغیر می‌باشد (نوروزی، ۱۳۹۴). نقشه خطوط هم‌عمق آب زیرزمینی (۱۳۸۸) براساس چاه‌های مشاهده‌ای در نقشه منطقه نشان می‌دهد که بیشترین عمق آب زیرزمینی در دامنه‌های شمال-غربی و حدود ۱۲ متر است و به‌تدریج به سمت دریاچه مقدار آن کم می‌شود و به حدود ۲ متر نیز می‌رسد (فیجانی، ۱۳۹۲). آب زیرزمینی در آبخوان دشت بناب از ارتفاعات شمالی و شرقی به سمت دشت و دریاچه ارومیه جریان دارد. شیب جریان آب زیرزمینی در محل‌های تغذیه و دامنه‌ها بیشتر است و به سمت بخش‌های میانی و غربی کاهش می‌یابد. هرچند جمع‌بندی محاسبات بیلان در سال آبی ۱۳۸۸ نشانگر رقم ۴/۳۵+ برای تغییرات حجم مخزن بوده ولی در سال‌های اخیر به‌دلیل تخلیه بیش‌ازحد و با توجه به تغییر شرایط اقلیمی حجم مخزن کاهش‌یافته است (فیجانی، ۱۳۹۲).

در این تحقیق در راستای اهداف فوق، کیفیت شیمیایی و هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه بناب و ملکان، جهت مصارف شرب و کشاورزی با استفاده از نمودار *Piper* و شاخص‌های کیفی *Willcox* و *Schuller* موردبررسی قرارگرفته

است و عوامل مختلف مؤثر در کیفیت آب محدوده موردمطالعه، ازجمله میزان املاح محلول، رخساره شیمیایی آب، قابلیت‌ها و محدودیت‌های مصرفی آب بررسی‌شده است.

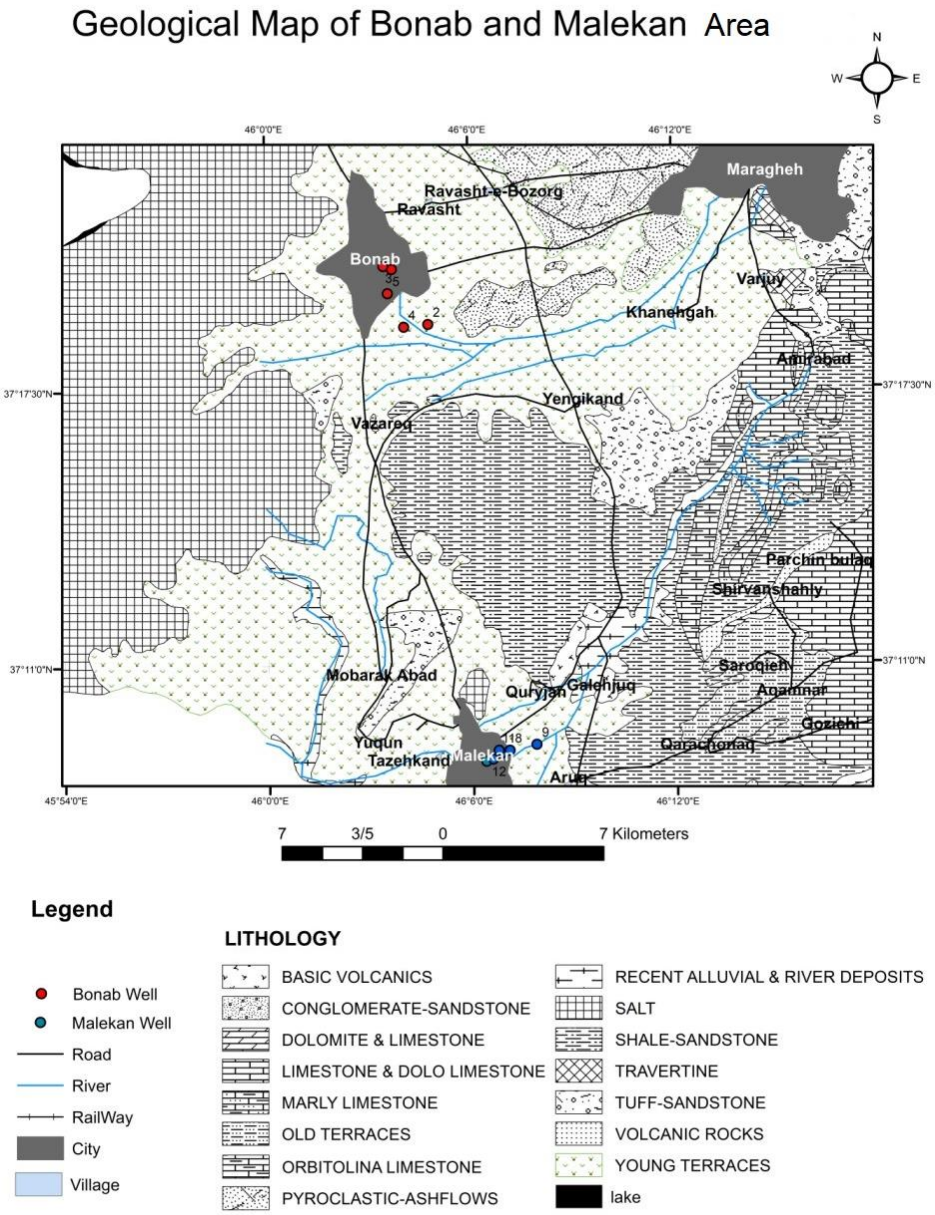
با توجه به لزوم رعایت استانداردهای نمونه‌برداری، پارامترهای صحرایی و پایدار نگه‌داشتن نمونه‌های آب ازلحاظ فیزیکی و شیمیایی، دقت در برداشت و نگهداری نمونه‌ها تا رسیدن به آزمایشگاه بسیار بااهمیت است. نمونه‌برداری طبق استانداردهای آب (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۶۷) و روش‌های آنالیز بر اساس APHA (2005) صورت گرفته است. در هر ایستگاه (پمپاژ چاه) پس از سه بار شستشوی بطری با آب نمونه و تخلیه آن، بطری ۳۰۰ mL کاملاً از آب پرشده و بلافاصله درپوش آن محکم بسته شد تا هیچ‌گونه تبادل و تغییری صورت نگیرد. نمونه‌های آب برداشت‌شده پس از بررسی‌های صحرایی در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب استان مورد تجزیه شیمیایی قرارگرفته‌اند. pH و هدایت الکتریکی با دستگاه pH متر و EC متر، غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم با روش نورسنجی شعله‌ای[1]، غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات و کلر به روش تیتراسیون و یون سولفات به روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شده‌اند. برای تعیین کنترل کیفیت و خطای اندازه‌گیری داده‌های تجزیه از روش محاسبه بالانس یونی Freez and Chery (1979) استفاده شد. در شرایط اساسی حاکم بر محلول‌های الکترولیت مجموع بارهای یونی مثبت (کاتیون‌ها) برابر با مجموع بارهای منفی (آنیون‌ها) خواهد بود. لذا نمونه‌های با خطای بالانس کمتر از ۵ درصد مدنظر قرار گرفت. نتیجه کنترل خطای تجزیه آنالیزهای شیمیایی محدوده موردمطالعه در جدول ۱ آورده شده است که قابل‌قبول بودن صحت داده‌های آنالیز را تأیید می‌کند. در شکل ۱، زمین‌شناسی، موقعیت جغرافیایی چاه‌های نمونه‌برداری شده و سایر اطلاعات موردنیاز آورده شده است.

استانداردهای آب آشامیدنی موجود در ایران در نشریه ۳-۱۱۶ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی (۱۳۷۷) موجود می‌باشد که این استاندارد شامل مواردی است که به‌عنوان حداقل ویژگی‌های موردنیاز آب آشامیدنی کشور ضروری است. در جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل آماری نمونه‌های منابع آبی شهرستان‌های ملکان و بناب و مقایسه آن‌ها با استاندارد ملی نشان داده‌شده است.

جدول ۱- کنترل کیفیت و اندازه‌گیری خطای تجزیه شیمیایی نمونه‌های موردمطالعه.

شهر	علامت اختصاری	X	Y	مجموع کاتیون‌ها	مجموع آنیون‌ها	درصد خطا
بناب	W1	594087	4133024	14.4546	14.35532	0.34
بناب	W2	595674	4130627	10.2976	10.03732	1.28
بناب	W3	593715	4133157	10.7382	10.08632	3.14
بناب	W4	594621	4130502	9.1513	8.94132	1.16
بناب	W5	593913	4131969	13.4069	13.16132	0.92
ملکان	W6	598250	4111578	9.8836	9.95532	0.36
ملکان	W7	598542	4111675	10.2479	10.06532	0.9
ملکان	W8	598896	4111935	10.0981	9.86392	1.17
ملکان	W9	599260	4112059	9.6274	9.21942	2.16
ملکان	W10	600432	4112320	10.4904	10.50032	0.05
ملکان	W11	598543	4111675	9.1747	9.18232	0.04
ملکان	W12	598791	4112055	7.4842	7.28392	1.36

[1] Flame Photometery

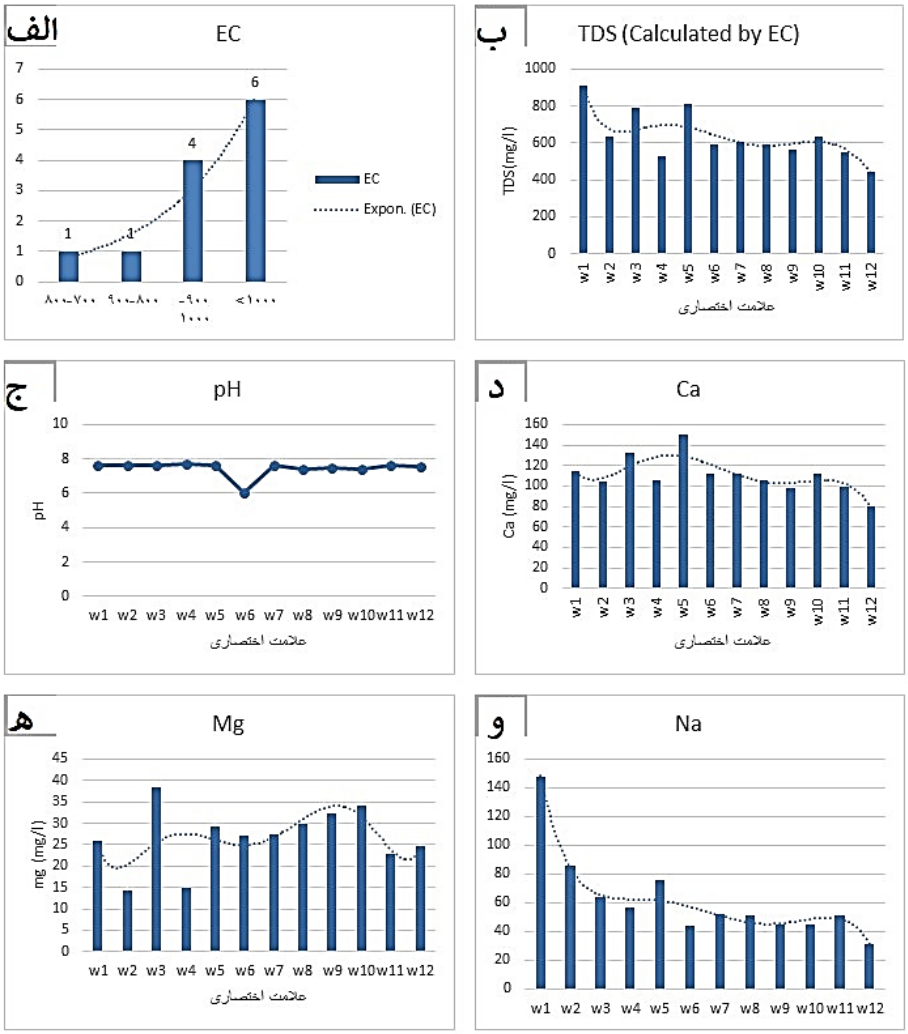


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده.

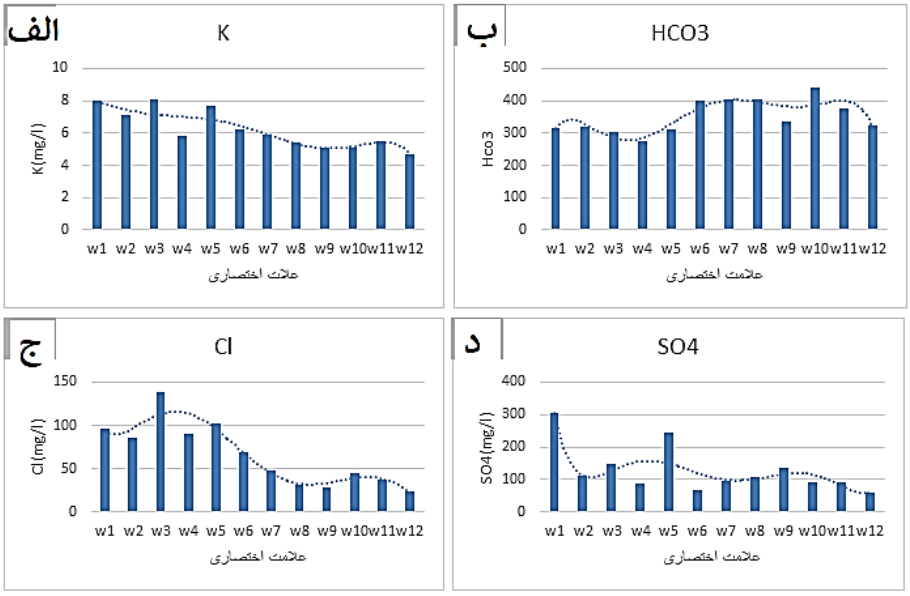
نتایج و بحث

هدایت الکتریکی (EC)

هدایت الکتریکی در آب مستقیماً ناشی از غلظت یون‌های موجود در آب بوده و هدایت الکتریکی بالا با شوری بالا و درصد بالای املاح معدنی در آب زیرزمینی مرتبط است Toumi et al. 2015). مقادیر هدایت الکتریکی (EC) بین حداقل µS/cm ۷۳۵ در ملکان تا حداکثر (µS/cm) ۱۲۵۰ در بناب متغیر است. چنانچه در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود هدایت‌الکتریکی اکثر نمونه‌ها بیشتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است که هدایت الکتریکی نسبتاً بالایی دارند و بیشترین EC چاه‌های نمونه‌برداری ۱۴۲۰ می‌باشد که مربوط به W_1 منطقه بناب است.



شکل ۲- الف) هیستوگرام مربوط به EC منابع آبی منطقه مطالعاتی، ب) هیستوگرام مربوط به TDS منابع آبی منطقه مطالعاتی، ج) هیستوگرام مربوط به اسیدیته منابع آبی منطقه مطالعاتی، د) هیستوگرام مربوط به کلسیم منابع آبی منطقه مطالعاتی، ه) هیستوگرام مربوط به منیزیم منابع آبی منطقه مطالعاتی، و) هیستوگرام مربوط به سدیم منابع آبی منطقه مطالعاتی.



شکل ۳- الف) هیستوگرام مربوط به پتاسیم منابع آبی منطقه مطالعاتی، ب) هیستوگرام مربوط به بی‌کربنات منابع آبی منطقه مطالعاتی، ج) هیستوگرام مربوط به کلر منابع آبی منطقه مطالعاتی و د) هیستوگرام مربوط به سولفات منابع آبی منطقه مطالعاتی.

جدول ۲- مشخصه‌های آماری پارامترهای شیمیایی در منطقه مطالعاتی (به‌جز pH و EC بقیه برحسب mg/L).

پارامتر	تعداد	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین	استاندارد ملی ایران (۱۰۵۳)	
						حداکثر مطلوب	حداکثر مجاز
EC(µs/cm)	12	1420	735	194.78	1039.5	1500	2000
TDS	12	908.8	441	132.84	693.52	1000	1500
pH	12	7.7	6	0.46	7.44	6.5-8.5	6.5-9
Ca	12	150	80	17.43	110.41	300	400
Mg	12	38.4	14.4	7.06	26.7	30	150
Na	12	148	31	30.75	62.5	200	200
K	12	8.1	4.7	1.20	6.21	-	-
HCO_3	12	441.8	274.18	51.87	350.86	-	-
Cl	12	138.5	23.1	36.38	66.28	250	400
SO_4	12	305.87	60.03	73.88	128.9	250	400

کل مواد جامد محلول (TDS)

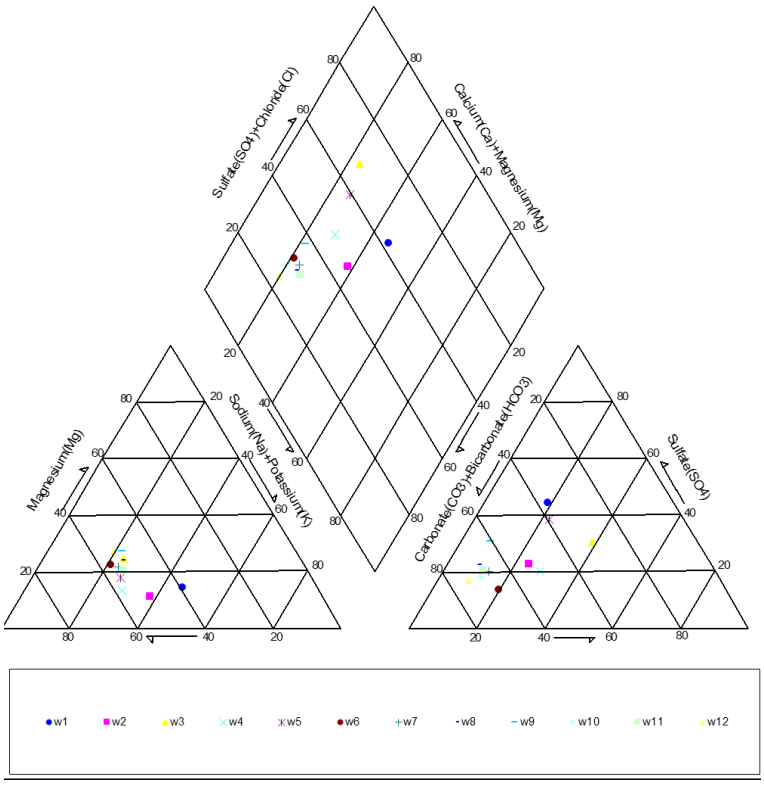
مطابق نمودار ۲-ب تمام داده‌ها TDS زیر (mg/l) ۱۰۰۰ دارند و نشانگر این است که منابع آبی کیفیت خوب و مطلوب داشته و آب شیرین هستند. همان‌طور که در هیستوگرام مربوط به اسیدیته منابع آبی ۲-ج ملاحظه می‌گردد، به‌غیراز یک نمونه با pH اسیدی بقیه نمونه‌های منطقه مطالعاتی دارای pH قلیایی هستند. طبق استاندارد *WHO* حد مجاز کلسیم در آب mg/l ۲۵۰ می‌باشد و با توجه به نمودار ۲-د مشاهده می‌شود که مقادیر کلسیم تمام نمونه‌ها زیر (mg/l) ۱۵۰ می‌باشد که دلیل بر مطلوب بودن آب است و می‌توان گفت که نمونه‌های منطقه موردمطالعه ازلحاظ کلسیم دارای توزیع عادی می‌باشد. مقدار منیزیم موجود در آب طبق استاندارد *WHO* نباید بیشتر از (mg/l) ۵۰ باشد و باتوجه به نمودار ۲-ه مقادیر نمونه‌ها زیر (mg/l) ۵۰ است که مطلوب بودن کیفیت آب را نشان می‌دهد. طبق استاندارد *WHO* میزان سدیم موجود در آب (mg/l) ۲۰۰ است و مطابق نمودار ۲-و میزان سدیم کمتر از (mg/l) ۱۰۰ می‌باشد و فقط بیشترین میزان نمونه ۱۴۸ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که کمتر از حد مجاز می‌باشد. با توجه به میزان کم سدیم کیفیت آب مطلوب می‌باشد و وجود املاح سدیم بیش‌ازحد مجاز سبب خرابی جنس زمین و کم شدن قابلیت نفوذ آب در زمین می‌شود. طبق استاندارد *WHO* میزان پتاسیم موجود در آب (mg/l) ۱۲ تعیین‌شده است و با توجه به نمودار ۳- الف مقدار پتاسیم در اکثر نمونه‌های منطقه موردمطالعه کمتر از (mg/l) ۸ می‌باشد که با توجه به میزان کم پتاسیم کیفیت آب منطقه موردمطالعه می‌باشد. در مورد حضور بی‌کربنات در منابع آبی طبق نمودار ۳-ب منطقه بناب و ملکان طبق نمودار فوق، مقدار آن‌ها مطلوب است. طبق استاندارد *WHO* مقدار مجاز کلراید (mg/l)۴۰۰ می‌باشد و مطابق نمودار ۳- ج به‌غیراز یک نمونه که کلراید زیادی دارد بقیه میزان کلر کمتری دارند و با توجه به مقدار کم کلراید کیفیت آب مطلوب می‌باشد. طبق استاندارد *WHO* مقدار مجاز سولفات در آب (mg/l) ۴۰۰ می‌باشد و مطابق نمودار ۳-د میزان سولفات در تمام نمونه‌های منطقه موردمطالعه دارای توزیع عادی می‌باشد.

در دیاگرام پایپر، مقایسه تعداد زیادی داده‌های آنالیز شده بر اساس غلظت نسبی و نه غلظت واقعی اجزا امکان‌پذیر می‌شود (Fetter, 1988). چهار نتیجه اساسی را می‌توان از آنالیزهای گوناگون رسم شده روی دیاگرام پایپر به‌دست آورد که عبارت‌اند از: تیپ آب، رسوب‌گذاری یا انحلال، اختلاط و تبادل یونی.

تیپ و رخساره آب زیرزمینی

رخساره هیدروشیمی آب زیرزمینی، تیپ آب‌های با ماهیت ژئوشیمیایی مختلف را منعکس می‌کند Fetter, (1999). برای تبیینِ تفاوت‌های شیمیایی آب از مفهوم رخساره هیدروشیمی استفاده می‌شود. عواملی مثل لیتولوژی، قدرت تحرک محلول‌ها و جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان بر نوع رخساره تأثیرگذارند. در طبقه‌بندی تیپ آب‌ها، چون آنیون‌های بی‌کربنات، سولفات و کلراید از تشکیل‌دهنده‌های

پرتحرک آب‌های زیرزمینی و معرف اصلی جهت بحث و بررسی‌های منشأ آن می‌باشند، لذا اساس طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی قرارگرفته‌اند و کاتیون‌ها از اولویت دوم برخوردارند (اصغری مقدم، ۱۳۸۹). استفاده از نمودار پایپر یکی از روش‌های معمول در تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی است (Piper, 1994). بر اساس نمودار پایپر تیپ و رخساره غالب هیدروشیمی آب زیرزمینی منطقه بناب-ملکان طبق جدول ۳ از نوع بی‌کربناته‌کلسیک می‌باشد به‌جز نمونه W_1 و W_3 بناب که به‌ترتیب تیپ سولفاته و کلروره دارند. به‌ویژه در مورد W_1 می‌توان تأثیر سنگ‌های مارنی و پهنه‌های نمکی حاشیه دریاچه ارومیه را بر روی تیپ آب مشاهده نمود. نمونه W_3 نیز مشخصاً تیپ و رخساره‌ای همخوان با شرایط هیدروژئولوژیکی خود دارد و از نوع کلروره کلسیک است.



شکل ۴- دیاگرام پایپر مربوط به منابع آبی منطقه مطالعاتی (Piper. 1994).

جدول ۳- تواتر یونی، تیپ و رخساره نمونه‌های آب منطقه بناب ـ ملکان.

ردیف	نمونه	غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره
1	W_1Bn	SO4 > HCO3 > Cl	Na+K > Ca > Mg	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک
2	W_2Bn	HCO3 > Cl > SO4	Ca > Na+K > Mg	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
3	W_3Bn	Cl > SO4 > HCO3	Ca > Mg > Na+K	کلروره	کلسیک	کلروره کلسیک
4	W_4Bn	HCO3 > Cl > SO4	Ca > Na+K > Mg	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
5	W_5Bn	HCO3 > SO4 > Cl	Ca > Na+K > Mg	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
6	W_6Mk	HCO3 > Cl > SO4	Ca > Mg > Na+K	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
7	W_7Mk	HCO3 > SO4 > Cl	Ca > Na+K > Mg	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
8	W_8Mk	HCO3 > SO4 > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
9	W_9Mk	HCO3 > SO4 > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
10	$W_{10}Mk$	HCO3 > SO4 > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
11	$W_{11}Mk$	HCO3 > SO4 > Cl	Ca > Na+K > Mg	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک
12	$W_{12}Mk$	HCO3 > SO4 > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی‌کربناته	کلسیک	بی‌کربناته کلسیک

سختی کل

به‌منظور تعیین کاربرد آب در مصارف شرب و بهداشت، کشاورزی، صنعت و همچنین محاسبات مربوط به سبک یا نرم کردن آب، بررسی میزان سختی آب بسیار مهم است. برای ارزیابی نمونه‌های منطقه موردمطالعه ازنظر سختی از طبقه‌بندی Todd and Mays (2005) استفاده شده است. طبق این رده‌بندی آب‌های با سختی ۰-۷۵ mg/L آب نرم، ۷۵-۱۵۰ mg/Lرا آب سخت و آب‌های با سختی ۳۰۰ mg/L را آب‌های کاملاً سخت نام‌گذاری می‌کنند. با استفاده از این روش طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعاتی در جدول ۴ نشان داده‌شده است. بر این اساس تمام نمونه‌ها غیر از یک مورد، در رده کاملاً سخت قرار می‌گیرند. کمترین میزان سختی مربوط به نمونه W_{12} ملکان می‌باشد.

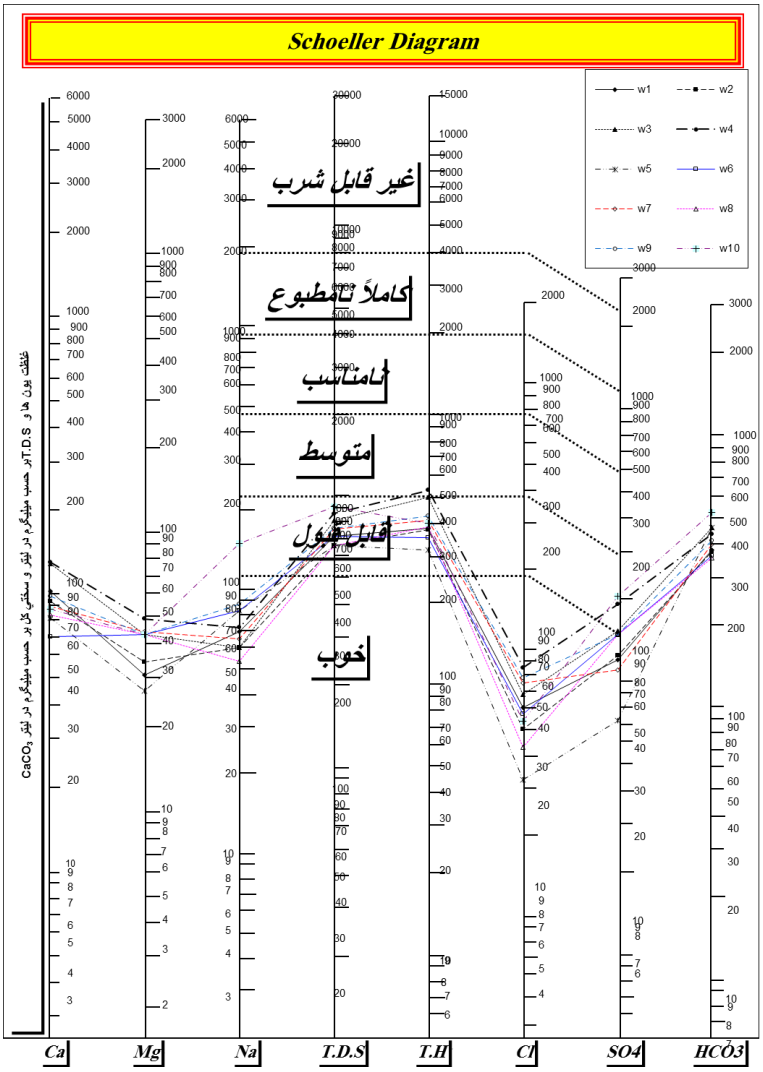
جدول ۴- کیفیت آب‌های منطقه موردمطالعه بر اساس سختی کل.

ردیف	محل نمونه‌برداری	علامت اختصاری	سختی کل	کیفیت آب بر اساس سختی کل
1	بناب	W_1	388.94	کاملاً سخت
2	بناب	W_2	317.7	کاملاً سخت
3	بناب	W_3	485	کاملاً سخت
4	بناب	W_4	325.12	کاملاً سخت
5	بناب	W_5	493.25	کاملاً سخت
6	ملکان	W_6	388.84	کاملاً سخت
7	ملکان	W_7	390.02	کاملاً سخت
8	ملکان	W_8	385.26	کاملاً سخت
9	ملکان	W_9	375.06	کاملاً سخت
10	ملکان	W_{10}	418.07	کاملاً سخت
11	ملکان	W_{11}	339.34	کاملاً سخت
12	ملکان	W_{12}	299.31	سخت

ارزیابی منابع آب از نظر شرب، کشاورزی و صنعت

آب قابل شرب بایستی دارای خواص فیزیکی مطلوبی ازنظر رنگ، کدورت، مزه و بو باشد. علاوه بر این‌ها باید ازنظر شیمیایی برای استفاده انسان سالم و بدون میکروارگانیسم‌های مضر باشد. استانداردهایی که معمولاً مورداستفاده قرار می‌گیرند شامل استاندارد سازمان جهانی بهداشت (*WHO*[۲])، آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالت متحده (*EPA*[۳]) و جامعه اقتصادی اروپا (*EEC*[۴]) می‌باشد. یکی از معیارهای طبقه‌بندی آب ازلحاظ شرب، تقسیم‌بندی شولر است. نمودار شولر بر اساس املاح و یون‌های عمده موردنیاز بدن طبق استاندار مراکز علمی-پژوهشی جهانی تنظیم‌شده است. این دیاگرام ازنظر سرعت عمل، سهولت مقایسه و نشان دادن تعداد زیاد نمونه در یک برگ، بیشتر معمول است. در این دیاگرام مقادیر یون‌ها را در ستون قائم نشان می‌دهند و تقسیمات ستون لگاریتمی است. نتایج تجزیه شیمیایی آب‌ها را به‌صورت خطوط شکسته در این نمودارها می‌دهند. غلظت عناصر اصلی برحسب میلی-گرم در لیتر و پارامتر سختی برحسب درجه سختی فرانسوی (۱۰ میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم) است. یکی از مزیت‌های مهم این دیاگرام نسبت به دیاگرام‌های مثلثی این است که غلظت واقعی پارامترها رسم می‌شود (اصغری مقدم، ۱۳۸۷). برای رسم این نمودار از نرم‌افزار *Chemistry* استفاده شده است. اکثر نمونه‌ها در منطقه خوب و قابل‌قبول قرارگرفته‌اند لذا هیچ‌گونه محدودیتی برای مصارف شرب در این آب‌ها دیده نمی‌شود (شکل ۵). بر اساس نمودار شولر ممکن است بعضی نمونه‌های آب دارای کیفیت خوبی ازلحاظ آشامیدن باشند، درحالی‌که آن آب‌ها می‌توانند مواد سمی و مضر از قبیل سرب، نیترات، آرسنیک و دیگر عناصر به همراه مواد آلی و باکتریایی که بدین لحاظ کاملاً غیرقابل‌شرب باشند (جبرائیلی اندریان، ۱۳۹۷).

[2] World Helth Organization
[3] U.S. Environmental Protection Agency
[4] European Economic Community



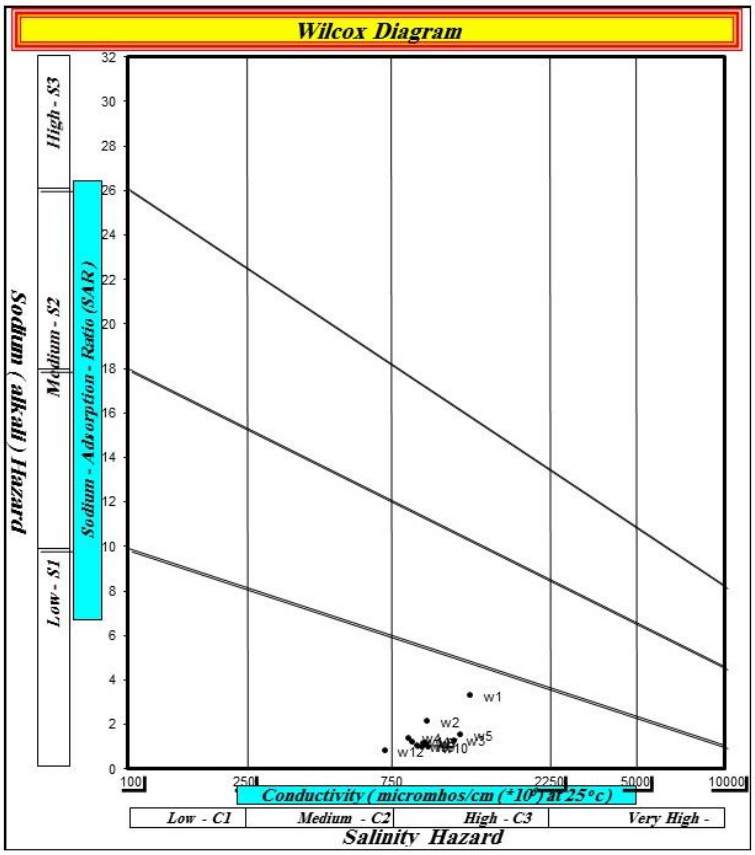
شکل ۵- نمودار شولر مربوط به منابع آبی بناب-ملکان.

ارزیابی کیفیت آب آبیاری یکی از پارامترهای مهم در کشاورزی است. ازآنجایی‌که انواع مختلف آب جهت آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، پس لازم است که سیستم خاصی از استاندارد کیفیت آب برقرار شود؛ زیرا آبی که برای مصارف صنعتی، مصارف بهداشتی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد مناسب برای آبیاری نیست. برای ارزیابی کیفیت آب آبیاری بایستی پارامترهای کیفیت شیمیایی آب بررسی‌شده که شامل: باقیمانده املاح، هدایت الکتریکی، اسیدیته، بی‌کربنات، کلر، سولفات، کل آنیون‌ها، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کل کاتیون‌ها، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم، سختی موقت و سختی کل می‌باشد. دیاگرام ویلکاکس بر اساس هدایت الکتریکی (*EC*) املاح محلول در آب و نسبت سدیم قابل‌جذب آب (*SAR*) قادر به طبقه‌بندی آب در کلاس‌های متفاوت است (Wilcox, 1962). طبقه‌بندی آب‌ها ازنظر کشاورزی بر مبنای دو پارامتر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم استوار است و نقاط حاصل از تقاطع این دو پارامتر در نمودار ویلکاکس بیانگر رده نمونه آبی موردنظر است. روش طبقه‌بندی ویلکاکس و استفاده از نمودار آن کاربردی‌ترین روش برای طبقه‌بندی آب ازنظر کشاورزی در مطالعات هیدرولوژی است. این نمودار آب کشاورزی را به ۱۶رده تقسیم می‌کند که آب‌های کشاورزی باکیفیت آبیاری خیلی خوب در رده C1-S1 و آب‌های کشاورزی باکیفیت خوب در رده‌های C1-S2، C2-S2 و C2-S1 قرار می‌گیرند. درصورتی‌که دانه‌بندی و نفوذپذیری خاک مناسب باشد، رده‌های C1-S3، C2-S3، C3-S1، C3-S2 و C3-S3 برای آبیاری در حد متوسط است و درنهایت رده‌های C4-S1، C4-S2، C1-S4، C2-S4، C4-S3، C3-S4 و C4-S4 نیز

برای آبیاری کشاورزی نامناسب هستند. این نمودار با استفاده از برنامه *Aqua. Chem* ترسیم گردید.

در بررسی کیفیت آب زیرزمینی ازنظر کشاورزی با استفاده از میزان جذب سدیم (*SAR*) و هدایت الکتریکی (*EC*) در دیاگرام ویلکاکس، مشخص‌شده است (Wilcox, 1955). بر اساس شکل ۶ نمونه‌های موردنظر در ۲ رده خوب و متوسط قرار می‌گیرند.

با توجه به شکل زیر مشخص می‌شود که فقط یک نمونه از آب‌های زیرزمینی منطقه برای کشاورزی در دسته‌بندی آب مناسب و بقیه نمونه‌ها متوسط هستند. کیفیت آب چاه‌های منطقه بناب-ملکان جهت مصارف کشاورزی نیز در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۶- نمودار ویلکاکس نمونه‌های موردمطالعه در منطقه مطالعاتی.

جدول ۵- کیفیت آب چاه‌های منطقه بناب-ملکان جهت مصارف کشاورزی.

ردیف	محل نمونه‌برداری	علامت اختصاری	SAR	EC	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی
1	بناب	W_1	3.26	1420	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
2	بناب	W_2	2.1	1020	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
3	بناب	W_3	1.26	1250	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
4	بناب	W_4	1.37	885	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
5	بناب	W_5	1.49	1315	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
6	ملکان	W_6	0.97	980.2	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
7	ملکان	W_7	1.14	1008	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
8	ملکان	W_8	1.13	985.1	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
9	ملکان	W_9	1.01	938.2	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
10	ملکان	W_{10}	0.95	1030	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
11	ملکان	W_{11}	1.2	907	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
12	ملکان	W_{12}	0.78	735	C2-S1	کمی شور – مناسب برای کشاورزی

در این مطالعه به‌منظور بررسی کیفی مصارف صنعتی آب منطقه موردمطالعه از اندیس لانژلیه در محیط نرم‌افزار *Water Stability Analyzer*(version1.10) استفاده گردیده است. اندیس شاخص لانژلیه[5] بیانگر وضعیت آب به لحاظ خورندگی و رسوب‌گذاری هست APHA (2005) که به شرایط مختلفی از قبیل اسیدیته آب، TDS، غلظت کربنات، غلظت بی‌کربنات، دمای آب و قلیائیت بستگی دارد. یکی از فاکتورهای مهم در بحث کنترل کیفیت آب‌های مورد استفاده در مصارف صنعتی، پتانسیل خورندگی و رسوب‌گذاری آن می‌باشد (وفادار مبارکی، ۱۳۹۴). لانژلیه[6] روشی را برای محاسبه pH اشباع کربنات کلسیم بر اساس مقدار کلسیم، قلیائیت و TDS تشریح کرده است. وی اختلاف بین pH اشباع کربنات کلسیم و pH واقعی آب را اندیس اشباع کلسیت نام نهاد که اغلب به اندیس اشباع لانژلیه یا شاخص اشباع کلسیت معروف می‌باشد (رابطه ۱). در رابطه ۲ P_{Ca} فاکتور لگاریتمی مربوط به‌سختی کلسیم، P_{ALK} فاکتور لگاریتمی مربوط به قلیائیت آب و C فاکتور لگاریتمی مربوط به مجموع املاح محلول آب (TDS) با توجه به درجه حرارت آب (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد.

$$LSI=pH-PH_SA \quad (۱)$$

$$PH_S=C+P_{ca}+P_{ALK} \quad (۲)$$

آب‌های دارای اندیس اشباع منفی، خورنده بوده و می‌تواند بر روی تأسیسات چاه و آب‌رسانی اثرات نامطلوب باقی بگذارند (جدول ۶).

جدول ۶- تقسیم‌بندی شاخص لانژلیه (Kerry, 1992).

تفسیر	ایندکس
تمایل به انحلال $CaCO_3$	LSI>0
عدم خورندگی و رسوب‌گذاری	LSI=0
تمایل به ترسیب $CaCO_3$	LSI<0

آب‌های دارای اندیس اشباع مثبت، رسوب‌ده بوده و استفاده از آن‌ها در دیگ‌های بخار و گرم‌کن‌های فشار ضعیف در صنعت جایز نمی‌باشد. آب‌های با اندیس اشباع صفر دارای حالت تعادل بوده و خاصیت خورندگی و رسوب‌دهی ندارند. البته معمولاً به‌منظور کنترل خورندگی آب همواره باید سعی گردد تا اندیس اشباع آب کمی مثبت باشد (۰ تا ۰/۵) تا با ایجاد لایه‌های بسیار نازک رسوب از خورندگی فلز جلوگیری شود. به عبارتی آب‌های دارای اندیس اشباع ۰ تا ۰/۵ کمی پوسته‌گذار (مناسب)، اندیس بیش از ۰/۵ پوسته‌گذار، اندیس اشباع ۰ تا ۰/۵- کمی خورنده و اندیس اشباع بیش از ۰/۵- خورنده هستند. کاهش pH و حضور یون‌های کلر و سولفات سبب تشدید خوردگی و افزایش pH و حضور یون‌های کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات و کربنات سبب تقلیل خورندگی می‌گردد. به‌منظور بررسی محدودیت‌های استفاده از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف صنعتی و تعیین خورنده و یا رسوب‌گذار بودن آن اندیس اشباع کلسیت (اندیس لانژیه) برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه بناب-ملکان محاسبه گردید. یکی از عوامل اصلی خورنده بودن آب در برخی نمونه‌ها به سبب وجود سولفات‌ها می‌باشد. همچنین از عوامل اصلی حالت رسوب‌گذار بودن نمونه‌های آب میزان بالای کلسیم و کربنات کلسیم به لحاظ سازندهای زمین‌شناسی می‌باشد. معمولاً برای کنترل خورندگی آب در صنعت همواره باید اندیس اشباع مثبت و بین ۰/۵-۰ باشد؛ بنابراین از میان مجموع نمونه‌ها، چاه‌های W_8، W_9، W_{10}، W_{12} قابل‌استفاده در بخش صنعت می‌باشند. از مجموع نمونه‌های آنالیز شده ۱ نمونه رسوب‌گذار (W_6) و بقیه نمونه‌های بررسی‌شده خورنده هستند (جدول ۷). با توجه به بررسی نقشه‌های هم ضخامت رسوبات دشت مراغه و بناب توسط فیجانی (۱۳۹۲) و دشت ملکان توسط نوروزی (۱۳۹۴)، ضخامت رسوبات آبرفتی در دشت بناب کمتر از ملکان بوده و همین امر برای عمق چاه‌ها نیز تأثیر گذاشته است. دلیل خورنده بودن چاه‌های بناب را می‌توان به ضخامت کمتر و دانه‌بندی ریزتر رسوبات، عمق کم چاه‌ها و تأثیرپذیری آن‌ها از زهاب‌های سطحی با اسیدیته بالا مرتبط دانست.

[5] Langelier Saturation Index

[6] Langelier

جدول ۷- کیفیت آب منطقه مطالعاتی برای مصارف صنعتی.

ردیف	محل نمونه‌برداری	علامت اختصاری	قلیائیت برحسب CaO	Ca (mg/L)	ضریب C	PHs	PH	PHs-PH	کیفیت آب برای مصارف صنعتی
1	بناب	W_1	156.053	113.78	11.31	7.1	7.62	-0.52	خورنده
2	بناب	W_2	93.1254	103.8	11.3	7.3	7.6	-0.3	خورنده
3	بناب	W_3	72.1128	131.74	11.3	7.3	7.62	-0.32	خورنده
4	بناب	W_4	62.8007	105.8	11.29	7.5	7.7	-0.2	خورنده
5	بناب	W_5	83.7171	149.7	11.3	7.2	7.63	-0.43	خورنده
6	ملکان	W_6	50.2074	111.78	11.3	7.6	6	1.6	رسوبگذار
7	ملکان	W_7	57.9111	111.78	11.3	7.5	7.6	-0.1	خورنده
8	ملکان	W_8	56.3999	105.8	11.3	7.5	7.41	0.09	مناسب
9	ملکان	W_9	50.0966	97.8	11.3	7.6	7.49	0.11	مناسب
10	ملکان	W_{10}	50.0966	111.78	11.3	7.6	7.39	0.21	مناسب
11	ملکان	W_{11}	56.5013	98.8	11.29	7.5	7.63	-0.13	خورنده
12	ملکان	W_{12}	35.6918	79.84	11.29	7.8	7.56	0.24	مناسب

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش، آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعاتی کاملاً سخت بوده و تنها نمونه آب W_{12} دارای آب سخت می‌باشد. با توجه به دیاگرام پایپر و تعیین رخساره‌های شیمیایی و بالا بودن میزان منیزیم و کلسیم، جنس سنگ مخزن منطقه از نوع دولومیت آهکی بوده و با توجه به نتایج آنالیز نمونه‌های آب معلوم می‌شود که بخشی از کیفیت آب منطقه موردمطالعه به سنگ‌های آذرین و دگرگونی اطراف منطقه بناب و ملکان می‌باشد و جنس سنگ آذرین منطقه موردمطالعه از نوع فلدسپات آلکالن-بازالتی می‌باشند. یکی از معیارهای طبقه‌بندی آب ازلحاظ شرب طبقه‌بندی شولر می‌باشد. نمودار شولر بر اساس املاح و یون‌های عمده موردنیاز بدن و طبق استاندارد مراکز علمی و پژوهشی جهان تنظیم شده که با توجه به این نمودار اکثر نمونه‌ها در منطقه خوب و قابل‌قبول برای شرب قرار گرفته‌اند. لذا هیچ‌گونه محدودیتی برای مصارف شرب در این آب‌ها دیده نمی‌شود و آب دارای کیفیت خوبی ازلحاظ آشامیدن است. برای ارزیابی کیفیت آب ازلحاظ کشاورزی، از دیاگرام ویلکاکس که بر اساس هدایت الکتریکی (*EC*) املاح محلول در آب و نسبت سدیم قابل‌جذب آب (*SAR*) می‌باشد، نتیجه می‌گیریم که اکثر نمونه‌ها در کلاس C_3S_1 قرار می‌گیرند و آب زیرزمینی منطقه در ۲ رده خوب و متوسط قرار می‌گیرند و فقط یکی از نمونه‌ها (W_{12}) در رده مناسب می‌باشد. در بررسی کیفیت آب منطقه مطالعاتی برای مصارف صنعتی، با توجه به این‌که یکی از عوامل اصلی خورنده بودن آب در برخی نمونه‌ها به‌سبب وجود سولفات‌ها می‌باشد و همچنین عامل اصلی رسوب‌گذار بودن نمونه‌های آب، میزان بالای کلسیم و کربنات کلسیم به لحاظ سازندهای زمین‌شناسی منطقه می‌باشد. از میان مجموع نمونه‌ها چاه‌های W_8، W_9، W_{10} و W_{12} مناسب برای استفاده بخش صنعتی می‌باشد و آب چاه W_6 رسوب‌گذار بوده و آب بقیه چاه‌ها ازلحاظ صنعتی خورنده می‌باشند.

شهر بناب به لحاظ پیشرفت صنعتی و شهر ملکان به لحاظ پیشرفت کشاورزی در منطقه شمال غرب کشور دارای اهمیت بسیار می‌باشند و به‌طورکلی عدم توجه به مسائل زیست‌محیطی، منطقه را در آینده دچار خطرات جدی خواهد کرد. هرچند کیفیت نمونه‌ها ازنظر برخی پارامترها برای مقاصد شرب مناسب است، درعین‌حال سختی اکثر نمونه‌ها بسیار بالا بوده و ضرورت دارد طبق استانداردهای بهداشتی بهبود یابد. از طرفی با توجه به خورنده بودن نمونه‌های آب منطقه بناب، مشکل خوردگی خطوط انتقال آب، هدر رفت آب در شبکه شرب شهری را بالا خواهد برد و سبب خسارات مالی و بهداشتی فراوان خواهد شد.

سپاسگزاری

این تحقیق با استفاده از امکانات آنالیز شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی تهیه‌شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

اصغری مقدم، ا.، ندیری، ع.، نورانی و.، ۱۳۸۷. مدل‌سازی بارش دشت تبریز با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله دانش کشاورزی، ۱۸(۱): ۱-۱۵.

اصغری مقدم، ا.، ۱۳۸۹. اصول شناخت آب‌های زیرزمینی، چاپ اول. انتشارات دانشگاه تبریز.

جبرائیلی اندریان، ن.، ۱۳۹۷. هیدروژئولوژی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی موجود در واحدهای سازند سخت و کارستی استان کردستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

جمشیدزاده، ز.، ۱۳۹۹. بررسی کیفیت آبخوان دشت کاشان با استفاده از تحلیل‌های هیدروژئوشیمی. مجله هیدروژئولوژی دانشگاه تبریز، ۵(۱): ۳۳-۴۶.

خالقی، ف.، ۱۳۸۷. بررسی عوامل مؤثر در هیدروژئوشیمی منابع آب شهری مرند باهدف حساسیت سنجی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی. فصلنامه پژوهشی زمین‌شناسی و محیط‌زیست، ۲(۱): ۸۱-۹۴.

خاندوزی، ف.، پری زنگنه ع.، زمانی ع.، دادبان شهامت، ی.، ۱۳۹۴. بررسی کیفیت هیدروژئوشیمیایی و بهداشتی آب زیرزمینی شهرستان رامیان، استان گلستان. مجله تحقیقات سلامت در جامعه،۱(۳): ۴۱-۵۲.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور،۱۳۷۷. استاندارد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب شرب، نشریه شماره ۱۱۶-۳، تهران.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مراغه. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و اردبیل، ۱۳۸۳. گزارش حفاری‌های پیزومتری انجام‌یافته در دشت مراغه و بناب.

غلام دخت بندری، م.، رضایی، پ.، غلام دخت بندری، ز.، ۱۳۹۷. ارزیابی کیفیت هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی حوزه سیاهو، شمال شرق شهر بندرعباس. مجله سلامت و محیط‌زیست، ۱۱(۱): ۹۷-۱۱۰.

فیجانی، الف.، ۱۳۹۲. هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان دشت مراغه-بناب با استفاده از مدل‌سازی آب زیرزمینی. پایان‌نامه دکتری هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ۲۰۰ ص.

محمودی، ن.، ۱۳۸۶. بررسی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی دشت مراغه-بناب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

نوروزی، ح.، ۱۳۹۴. مطالعه ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملکان با استفاده از مدل‌سازی Random Forest. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۶۷. استاندارد آب شماره ۱۰۵۳. آب آشامیدنی-ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، تجدید نظر پنجم، انتشارات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تهران.

وفادار مبارکی، م.، ۱۳۹۴. هیدروژئولوژی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی موجود در واحد کارستی و سازند سخت کوه مورو- صوفیان، آذربایجان شرقی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

هادیپور، ز.، ناصری، ح.ر. علیجانی، ف.، ۱۳۹۷. فرآیندهای هیدروژئوشیمی آبخوان کوهدشت، مجله هیدروژئولوژی دانشگاه تبریز، ۳(۱): ۳۲-۴۶.

Alley, W.M., 1993. Regional groundwater quality. Van Nostrand Reinhold, New York.

APHA, AWWA, WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association.

Arumugam, K. and Elangovan, K., 2009. Hydrochemical Characteristics and Groundwater Quality Assessment in Tirupur Region, Coimbatore District, Tamil Nadu, India. Environ. Geol. DOI 10.1007/s00254-800-1652-y.

Bob, M., Abd Rahman, N., Taher, S. and Elamin, A. 2015. Multi-objective Assessment of Groundwater

Toumi, N., Hussein, B.H.M., Rafrafi, S., 2015. Groundwater quality and hydrochemical properties of Al-Ula Region, Saudi Arabia. Environmental Monitoring and Assessment, 05 Feb 2015, 187(3) :84. DOI: 10.1007/s10661-014-4241-4.

WHO. 2008. Guidelines for Drinking Water Quality. 3rd ed. Switzerland: World Health Organization.

Wilcox, L. V., 1955. Classification and Use of Irrigation Waters. U.S. Department of Agriculture, Circular 969, Washington.

Wilcox, L., 1962. The quality of water for irrigation use. Washington, DC: US Department of Agricultural Technical Bulletin.

Quality in Madinah City, Saudi Arabia. Water Quality Exposure and Health, 7(1): 53-66.

Chan, H.J., 2001. Effect of landuse and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea. J. Hydrology, 253: 194-210.

Fetter, C.W., 1988. Applied Hydrogeology. Mc Milan publishing company. U.S.A. 596 p.

Fetter C. 1999. Contaminant Hydrogeology. New Jersey: Prentice Hall. 500 p.

Freez, B.A., Chery. J., 1979. Groundwater, Prentice Hall. 588 p.

Homayoon Nezhad I, Amirian P, Piri I. 2016. Investigation on water quality of Zabol Chahnimeh reservoirs from drinking water and agricultural viewpoint with focus on Schoeller and Wilcox diagrams. Journal of Environmental Science and Technology, 18(1):1-13 (in Persian).

Khaleghi, F., Shahverdizadeh, GH., 2014. Hydrogeochemical Characteristics and Evaluation of the Drinking and Irrigation Water Quality in Marand Plain, East Azerbaijan, NW Iran British Journal of Applied Science & Technology, 4(17): 2458-2467.

Kerry, R., 1992. Introduction to Geological Data Analysis. Blackwill Science, 446p.

Kumar M, Singh Y., 2010. Interpretation of Water Quality Parameters for Villages Sanganer Tehsil, by Using Multivariate Statistical Analysis. J. Water Resour. Prot; 2: 860-3.

Piper, A.M., 1994. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Am. Geophys Union Trans, 25: 914-928.

Sayyed, M., Wagh, G., Supekar, A., 2013. Assessment of impact on the groundwater quality due to urbanization by hydrogeochemical facies analysis in SE part of Pune city, India. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, 3(2): 148-159.

Schoeller, H., 1962. The Groundwater. Paris: Mas-son and Cie.

Subbarao, C., Subbarao, N.V., Chandu, S.N., 1996. Characterization of Ground Water Contamination Using Factor Analysis, Environ. Geol., 28(4): 175-180.

Todd, D.K., Mays, L.W., 2005. Groundwater hydrology. Third Edition. John Wiley and Sons.