



فرآیندهای هیدروشیمی در آبخوان های بهبهان، رامهرمز و زیدون استان خوزستان با استفاده از نمودارهای ترکیبی و ایزوتوپی

هادی محمدی^۱، نصراله کلانتری^{۲*}، فرشاد علیجانی^۳، علی محرابی نژاد^۴

- ۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۲- استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۳- استادیار، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران.
- ۴- دانش آموخته سنجش از دور، سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: n.kalantari@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

چکیده

به‌منظور شناسایی عوامل اصلی تغییرات هیدروشیمی و بررسی فرآیندهای هیدروژئوشیمی کنترل‌کننده آب زیرزمینی در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون جنوب‌شرق استان خوزستان از روش تلفیقی هیدروشیمی و ایزوتوپی استفاده شده است. در این تحقیق از نمودارهای ترکیبی کل جامدات محلول (TDI) در مقابل یون‌های عمده، نمودار تبادل کاتیونی و نمودارهای ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) استفاده شده است. نتایج حاصل از نمودارهای ترکیبی، فرآیندهای اصلی انحلال در آبخوان‌ها ابتدا به انحلال سولفات و سپس کلراید مربوط می‌باشد. با افزایش TDI، غلظت سولفات به‌طور خطی افزایش می‌یابد. این رابطه خطی بین یون‌های سولفات و کلسیم نیز وجود دارد که نشان‌دهنده فرآیند انحلال ژپس در آب زیرزمینی دشت‌های مورد مطالعه است. با این تفاوت که میزان سولفات در نمونه‌های آب دشت‌ها به‌صورت رامهرمز < بهبهان < زیدون می‌باشد. روند خطی بسیار خوب در نمودار سدیم در مقابل کلراید در دشت زیدون نسبت به دشت رامهرمز و بهبهان مشاهده می‌شود که این موضوع نیز مؤید انحلال هالیت در منطقه مورد مطالعه است. یافته‌های ایزوتوپی نشان می‌دهند که غنی‌شدگی ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در دشت رامهرمز بیشتر از سایر مناطق است و نمونه‌های این دشت در مقدار دوتریوم مازاد (D-excess) به‌وضوح اثر تبخیر شدید را نشان می‌دهند. رابطه مستقیم بین افزایش کلراید و غنی‌شدگی ایزوتوپی در دشت رامهرمز تأییدکننده اثر فرآیندهای تبخیری است، در حالی که در دشت زیدون این رابطه ضعیف‌تر است. فرآیندهای هیدروژئوشیمی غالب در آبخوان‌های مورد مطالعه به‌ترتیب غالب بودن در حالت کلی شامل انحلال کانی‌های تبخیری ژپس و سپس هالیت، انحلال کربنات‌ها، تبخیر و در نهایت تبادل کاتیونی نرمال و معکوس (به‌طور موضعی) می‌باشند.

کلمات کلیدی: ایزوتوپ‌های پایدار، بهبهان، تبادل یونی، رامهرمز، زیدون، نمودارهای ترکیبی.

مقدمه

در هنگام عبور از حوضه بر آن تأثیر می‌گذارند. از جمله عوامل مؤثر بر تکامل ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی می‌توان به زمان ماندگاری آب، موادی که در واکنش‌های آب-سنگ حضور دارند و وقوع اختلاط میان منابع مختلف آب اشاره نمود (He et al., 2019; Ledesma-Ruiz et al., 2015; همکاران، ۱۴۰۰). به‌عنوان مثال، اجزای شیمیایی ماده معدنی و منبع تغذیه آب زیرزمینی، ویژگی‌های شیمیایی اصلی

منابع آب زیرزمینی تنها منبع قابل اعتماد آب برای اهداف زیست محیطی و اقتصادی به‌ویژه در مناطق خشک هستند (Dogramaci and Skrzypek, 2015; Zarei et al., 2013). با توجه به کمبود منابع آب در بسیاری از نقاط جهان، مدیریت کمی و کیفی آبخوان‌ها امری ضروری است. کیفیت و ترکیب شیمیایی آب بستگی به محیط، شرایط و فرآیندهایی دارد که

جریان و همچنین میزان اختلاط با آب‌های زیرزمینی و شناسایی فرآیندهای هیدروژئوشیمی در سراسر جهان مؤثر است (Asomaning et al., 2023). در سال‌های اخیر، کاربرد ترکیبی و اعتبار متقابل این روش‌ها به‌عنوان یک نقطه توجه در تحقیقات فعلی در مورد هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی و هیدروژئولوژی پدیدار شده است (Ji et al., 2024).

فنون هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی به‌طور گسترده‌ای برای شناسایی منابع تغذیه آب زیرزمینی، ویژگی‌های هیدروژئوشیمی، منابع آلودگی و فرآیندهای هیدروژئوشیمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال Bryan et al., (2016) با استفاده از هیدروژئوشیمی و ایزوتوپ‌ها (^3H , D , ^{18}O) نفوذ آب دریا به لزه‌های آب شیرین را در جزیره روتنست، استرالیا را مورد بررسی قرار دادند. Esmacili et al., (2018) عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت قره ضیال‌الدین در استان آذربایجان غربی را بررسی نمودند. نتایج مدسازی‌های ژئوشیمیایی معکوس، وقوع فرآیندهای هوازدگی، انحلال کانی‌های کربناته، سولفات، هالیت و تبادل یونی را در بخش‌های مختلف آبخوان تأیید می‌کرد و شاخص‌های کلروآلکالین محاسبه شده، نشانگر وقوع تبادل یونی عادی بود. نمونه‌های آب نسبت به کانی‌های کربناته و کوارتز حالت فوق اشباع داشتند؛ درحالی‌که نسبت به کانی‌های سولفات و هالیت تحت اشباع بودند. Akshitha et al., (2021) با استفاده از تحلیل هیدروژئوشیمی و روش‌های آماری چند متغیره، عوامل کنترل‌کننده غالب ویژگی‌های هیدروژئوشیمی و نفوذ آب دریا در آبخوان ساحلی کارناتا‌کا هند را نشان داد. Chen et al., (2023) شرایط هیدروژئولوژی و تکامل هیدروژئوشیمی سیستم آبخوان چند لایه جزیره دونگ‌های چین با استفاده از شیمی آب زیرزمینی و ایزوتوپ‌های پایدار مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که یون‌های اصلی و کل مواد جامد محلول (TDS) در آب‌های زیرزمینی کم‌عمق بیشتر از آب‌های زیرزمینی محصور است و این آبخوان‌ها تحت تأثیر نفوذ قابل توجه آب دریا قرار نگرفته‌اند. بررسی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸، دوتریوم و دوتریوم مازاد (D-excess) نشان داد که آب‌های زیرزمینی کم‌عمق از بارش محلی نشأت می‌گیرند و دوره تغذیه آب‌های زیرزمینی محبوس با آب‌های کم‌عمق متفاوت است.

آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند. شدت بارندگی بر میزان هوازدگی سطح تأثیر می‌گذارد (Gabet et al., 2010). تبخیر شدید و تغذیه محدود بارندگی می‌تواند منجر به شوری آب‌های زیرزمینی کم عمق شود. همچنین مسیر جریان طولانی و افزایش زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی نیز باعث شور شدن آب‌ها و تغییر در نوع آب از بیکربناته به سولفات و کلروره می‌شود. انواع برهمکنش‌های آب / سنگ^۱ در جهت تکامل هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهند و تغییرات ناشی از انسان در شرایط جریان آب زیرزمینی نیز می‌تواند تأثیر غیرقابل اغماض بر هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی داشته باشد (Chen et al., 2023). به‌طور خلاصه می‌توان بیان کرد هر عاملی که غلظت یون‌ها در آب را تحت تأثیر قرار دهد، می‌تواند کیفیت آب را تغییر دهد (Kwong et al., 2015; Liu et al., 2016).

در تعیین فرآیندهای هیدروژئوشیمی منابع آب زیرزمینی از روش‌ها و ابزارهای مختلفی از جمله بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه، روش‌های گرافیکی، نمودارهای ترکیبی، روش‌های آماری و استفاده از ایزوتوپ‌های محیطی و مطالعات تجربی استفاده شده است (Han et al., 2014; Kazakis et al., 2016). استفاده از تکنیک نمودار ترکیبی برای بررسی چارچوب هیدروژئوشیمی سیستم آبخوان به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Afrifa et al., 2017; Asare-Donkor et al., 2018; Edjah et al., 2017; Egbi et al., 2019; Grzywna and Bronowicka-Mielniczuk, 2020).

اتحادیه هیدروژئولوژی جهانی طی سال‌های گذشته شاهد توسعه و کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در چندین رشته بوده است که شامل درک تکامل ژئوشیمیایی منابع آب است. ایزوتوپ‌های پایدار آب ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) دارای کاربرد ارزشمندی برای توصیف هیدروژئوشیمی هستند (Ala-Aho et al., 2018; Klaus and McDonnell, 2013). این تکنیک به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است زیرا $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ آب معمولاً نشان‌دهنده منشأ اولیه خود می‌باشند و در طبیعت تحت تأثیر فرآیندهای فیزیکوشیمیایی بین آب زیرزمینی و محیط اطراف قابل تغییر می‌باشند. این ویژگی باعث می‌شود که اثر اصلی خود را حفظ کنند. این روش برای ارزیابی زمان‌ها و مسیرهای

¹Water/rock interaction

آبرفتی و عمدتاً دانه درشت و حاوی ذرات رس، سیلت و مارن می‌باشد (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۳). آبخوان‌های مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی یکپارچه جنوب شرق ایران با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی یکصد هزارم بهبهان، هفتکل، آغاچاری و بندر دیلم شرکت ملی نفت ایران استخراج شده است (Geological and Exploration Division, 1966; Geological and Exploration Division, 1970). رسوبات آبرفتی دشت عمدتاً در پای ارتفاعات آهکی شرق و شمال دشت و تپه‌های کنگلومرایی جنوب و شمال غرب دشت، درشت دانه بوده که با روند سریعی به رسوبات ماسه ریزدانه در بخش میانی و سیلت رس در قسمت خروجی دشت (غرب دشت) تغییر می‌یابد. نهشته‌های کواترنری به صورت واریزه‌های دامنه‌ای در پای ارتفاعات و آبراهه‌ها و سپس نهشته‌های آبرفتی شامل قله‌سنگ، شن و ماسه به صورت پادگانه‌های آبرفتی و مخروط-افکنه‌ها در راستای دره‌های بزرگ تا میانه دشت قرار دارند. آبخوان رامهرمز بین طول جغرافیایی ۱۱° ۴۹' تا ۴۱° ۴۹' شرقی و عرض جغرافیایی ۰۹' ۳۱° تا ۳۶' ۳۱° شمالی قرار گرفته است. این دشت یکی از ناودیس‌های زاگرس چین‌خورده است که در بخش شرقی تا شمال آن گسل تراستی رامهرمز، سازند گچساران را بر روی رسوبات آبرفتی عهد حاضر رانده است. رخنمون سازندهای منطقه شامل مارن و گچ سازند گچساران، تناوب مارن و ماسه سنگ آغاچاری و لهری و سازند بختیاری می‌باشد. آبخوان آبرفتی رامهرمز در بخش شمالی تا مرکز به جز در برخی نقاط در شمال که در نزدیکی سازند بختیاری واقع شده است، عمدتاً متشکل از رسوبات ریزدانه رس و سیلت می‌باشد. این رسوبات در ناحیه جنوبی با نزدیک شدن به سازند بختیاری درشت‌دانه شده و عمدتاً از ماسه و کنگلومرا تشکیل شده‌اند. البته وجود لنزهای گراولی در بین لایه‌های ریزدانه حاصل از آورد رودخانه اعلا در اطراف مسیر فعلی رودخانه و در کانال‌های رودخانه‌ای مدفون وجود دارد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲). آبخوان زیدون نیز در بین طول جغرافیایی ۴۶' ۴۹° تا ۱۷' ۵۰° شرقی و عرض جغرافیایی ۱۶' ۳۰° تا ۳۳' ۳۰° شمالی واقع گردیده است. آبخوان دشت زیدون از شمال شرق به راندگی پازنان و تاقدیس پازنان محدود می‌گردد (مرز شمالی) و از جنوب غرب توسط لایه‌های سازند بختیاری و تاقدیس رگ‌سفید محدود می‌گردد (مرز جنوبی). در این

تکامل آب‌های زیرزمینی حوضه رودخانه بلک ولتا با استفاده از تحلیل آماری و ایزوتوپی توسط (Asoomaning et al., 2023) مورد بررسی قرار گرفت که فرآیندهای ژئوشیمیایی طبیعی، تأثیرات انسانی و انحلال اجزای سیلیکات از عوامل مؤثر در کیفیت آب معرفی شدند. نتایج حاصل از بررسی منشأ و مکانیسم‌های کنترل‌کننده کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت ارومیه با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمی و نمودارهای ترکیبی توسط (Ghorbanzadeh et al., 2024) نشان داد که یون سدیم محلول در آبخوان ارومیه دارای دو منشأ تبادلات یونی مستقیم و تبادلات یونی معکوس، یون منیزیم ناشی از سه منشأ فرآیند هوازدگی دولومیت، انحلال دولومیت-سنگ آهک و انحلال دولومیت، یون سولفات دارای منشأ غیرطبیعی و متأثر از کودهای کشاورزی و دفع فاضلاب‌های جذبی بوده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند هنگامی که تفسیرهای هیدروژئوشیمی با دانش زمین‌شناسی و اطلاعات هیدروژئولوژیکی ترکیب می‌شوند، روش‌های آماری و ایزوتوپی نیز می‌توانند به درک جریان و فرآیندهای غالب در سیستم پیچیده آبخوان کمک کنند (Cloutier et al., 2008).

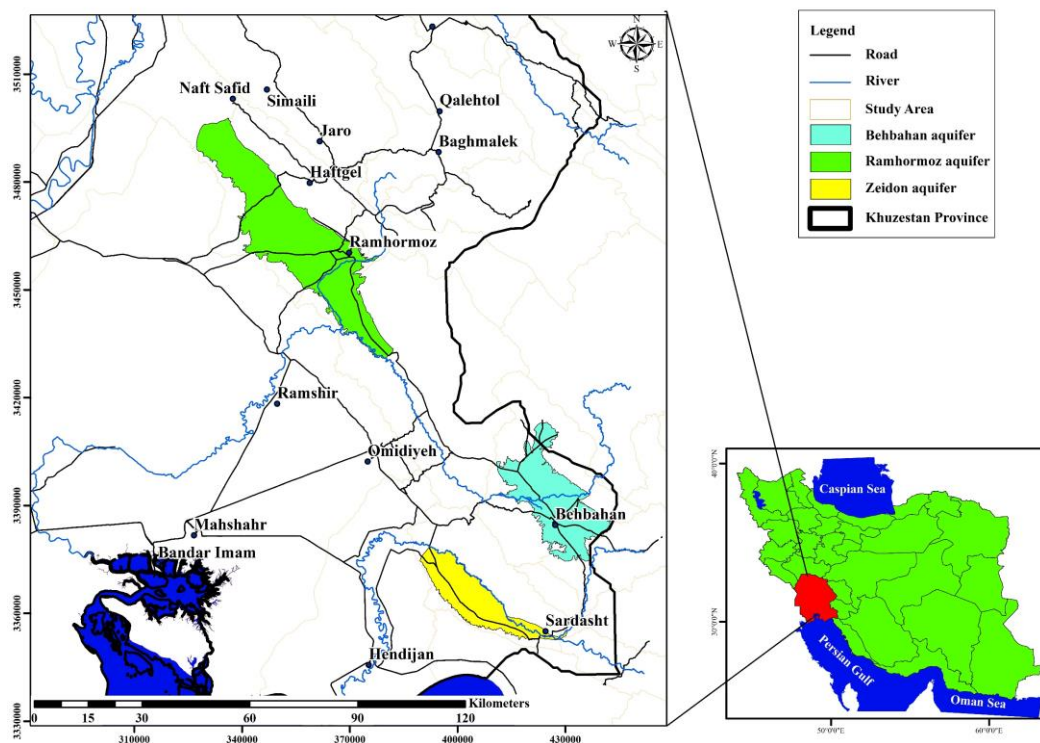
هدف اصلی این مطالعه، شناسایی خصوصیات شیمیایی آب‌های زیرزمینی و فرآیندهای هیدروژئوشیمی کنترل‌کننده عمده در آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در جنوب شرقی استان خوزستان با استفاده از نمودارهای ترکیبی و ایزوتوپ‌های پایدار است. این مطالعه در نظر دارد تا تفاوت فرآیندهای هیدروژئوشیمی کنترل‌کننده در تکامل شیمی آب‌های زیرزمینی را در آبخوان‌های مذکور را با تلفیق روش‌های گرافیکی (نمودارهای ترکیبی) و ایزوتوپ‌های پایدار در ارتباط با هدایت الکتریکی و یون کلراید شناسایی کند.

موقعیت محدوده مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در این پژوهش شامل آبخوان‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در جنوب شرق استان خوزستان می‌باشند (شکل ۱). آبخوان بهبهان با مساحت ۴۸۵ کیلومتر مربع، در شرق امیدیه و بین طول جغرافیایی ۰۴' ۵۰° تا ۲۴' ۵۰° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰' ۳۰° تا ۵۱' ۳۰° شمالی واقع است. آبخوان بهبهان از نوع آزاد است و جنس رسوبات آن،

پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌ها در راستای دره‌های بزرگ قرار دارند (فیروزی و همکاران، ۱۴۰۲). جهت شناخت بیشتر خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان و وضعیت هیدروژئولوژی می‌توان به منابع فوق‌الذکر مراجعه نمود.

دشت سازنده‌های گروه فارس و کنگلومرای بختیاری و رسوبات عهد حاضر رخنمون دارند. نهشته‌های کواترنر به صورت واریزه‌های دامنه‌ای در پای ارتفاعات و آبراهه‌ها و سپس نهشته‌های آبرفتی شامل قله‌سنگ، شن و ماسه به صورت



شکل ۱- نقشه موقعیت آبخوان‌های مورد مطالعه در جنوب شرق خوزستان.

Figure 1- Map of the Location of the Studied Aquifers in Southeastern Khuzestan.

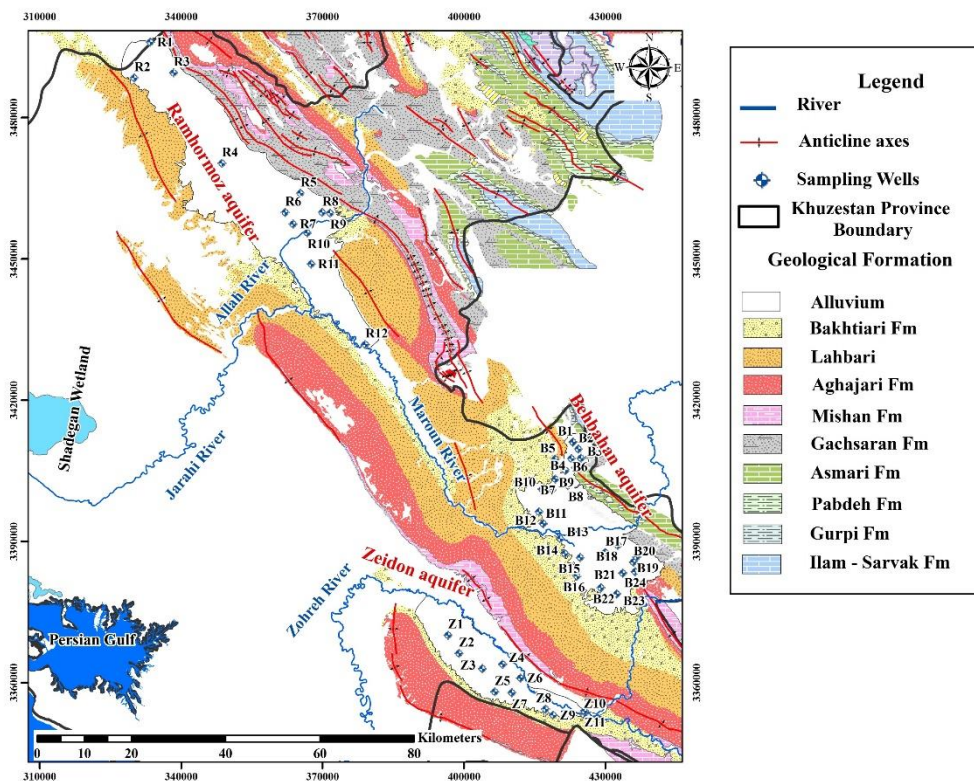
جمع‌آوری داده

آب‌شناس شیراز و آنالیزهای ایزوتوپی برای یک فصل در آزمایشگاه مصباح انرژی انجام شده است. روش اندازه‌گیری کلسیم، سدیم، کربنات، بی‌کربنات و کلرید به صورت تیتراسیون، منیزیم و پتاسیم به روش فلومتری و سولفات با استفاده اسپکتوفتومتری DR2500 می‌باشد. نمونه‌های آب برای آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار آب قبل از جمع‌آوری در بطری-های پلی‌اتیلن استریل ۵۰ میلی‌لیتری با استفاده از فیلترهای سر سرنگی ۰/۴۵ میکرون فیلتر شدند. نمونه‌های مربوط به ایزوتوپ‌های آب تا زمان آنالیز در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و در یخچال نگهداری شدند. برای آنالیز $\delta^{18}O$ ، نمونه‌های آبی در تعادل با گاز CO_2 قرار گرفته و گاز CO_2 حاصله از طریق دستگاه ورودی دوگانه (Dual-Inlet) به اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی وارد شده و نسبت $^{18}O/^{16}O$ آن با اندازه‌گیری نسبت پرتوهای مولکولی 46 به 44 مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در مورد اندازه‌گیری δD ، نمونه آب در حضور کاتالیست

یکی از بخش‌های مهم مطالعات هیدروشیمی نمونه‌برداری از منابع آب است، چون اگر به درستی انجام نشود می‌تواند موجب اشتباه در تمام مراحل بعدی باشد. جهت شناخت سیستم ژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دو نوبت (آبان ۱۴۰۱ و اردیبهشت ۱۴۰۲) نمونه‌برداری به عمل آمد. تعداد نمونه‌های برداشت شده در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون به ترتیب ۲۴، ۱۲ و ۱۲ نمونه می‌باشد (شکل ۲). ایستگاه‌های نمونه‌برداری با توجه به توزیع مکانی چاه‌های بهره‌برداری در دشت‌های مذکور، به نحوی انتخاب شدند که بهترین پراکنش را در سطح دشت داشته باشند. سنجش نمونه‌های آب از طریق سنجش‌های صحرایی (اندازه‌گیری پارامترهای دما، هدایت الکتریکی و pH) و آزمایشگاهی هیدروشیمی یون‌های عمده (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- و CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , K^+) در آزمایشگاه زاگرس

آنیون‌های هر محلول باید با هم برابر و یا در محدوده خطای قابل قبول (کمتر از ± 5 درصد) باشد که در تمامی نمونه‌ها خطای واکنش در محدوده مجاز بوده است. خلاصه آماری نتایج آنالیز شیمیایی و ایزوتوپی نمونه‌های آب آبخوان‌های مورد مطالعه به ترتیبی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

پلاتین با گاز H_2 به تعادل رسیده و گاز H_2 حاصله پس از رطوبت‌زدایی به دستگاه اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی تزریق شده و نسبت D/H آن با اندازه‌گیری پرتوهای مولکولی H_2 و HD مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همچنین جهت صحت-سنجی نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها از روش خطای واکنش استفاده شده است. در این روش مجموع اکی‌والان کاتیون‌ها و



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در آبخوان‌های مورد مطالعه (رقومی شده بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی یک صد هزارم شرکت ملی نفت ایران).

Figure 2- Location of sampling stations in the studied aquifers (Digitized based on the geological maps of the National Iranian Oil Company).

جدول ۱- خلاصه آماری نتایج آنالیز شیمیایی در آبخوان‌های مورد مطالعه (آبان ماه ۱۴۰۱).

Table 1- Statistical summary of the results chemical analysis in the studied aquifers (November, 2022).

Parameter	Aquifer	pH	EC	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl
			$\mu\text{m/cm}$	mg/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	
Number of samples		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mean		7.19	3154	2053.21	13.9	7.43	9.54	0.16	4.18	17.94	9.49
Standard deviation	Behbahan	0.23	1535.68	988.58	6.94	4.43	6.41	0.1	0.73	11.73	6.16
Maximum		7.7	6128	4043	25.67	17.61	24.6	0.59	5.7	40.14	22.03
Minimum		6.94	770	530.84	3.5	1.05	2.59	0.08	2.88	1.25	2.95
Number of samples		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Mean		7.27	5084	3330.5	20.79	9.47	20.22	0.19	3.12	31.31	17.88
Standard deviation	Ramhormoz	0.26	1964.7	1224.25	3.23	5.5	15.17	0.13	1.12	13.18	10.02
Maximum		7.77	10965	6994	25	22	69.36	0.44	4.73	60	49
Minimum		6.98	3350	2280	15.81	4.8	9.22	0.09	1.25	18.5	5.75
Number of samples		11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Mean		7.21	4263.64	2764.73	12.8	5.46	25.6	0.14	3.2	15.01	26.33
Standard deviation	Zeidon	0.12	1466.41	965.27	3.6	2.34	12.06	0.05	0.42	5.85	12.93
Maximum		7.4	7162	4723	18.8	9.75	51.1	0.2	3.8	25.5	48.39
Minimum		7.02	1813	1160	8.14	2.35	4.29	0.05	2.53	8.75	4.79

جدول ۲- خلاصه آماری نتایج ایزوتوپی در آبخوان‌های مورد مطالعه.

Table 2- Statistical summary of isotopic results in the studied aquifers.

Parameter	Aquifer	D/H	¹⁸ O/ ¹⁶ O
		permill	
Number of samples		14	14
Mean		-15.18	-3.26
Standard deviation	Behbahan	3.44	0.67
Maximum		-9.68	-2.18
Minimum		-21.84	-4.57
Number of samples		11	11
Mean		-14.88	-2.99
Standard deviation	Ramhormoz	3.74	0.74
Maximum		-7.57	-1.34
Minimum		-20.64	-4
Number of samples		7	7
Mean		-16.53	-3.45
Standard deviation	Zeidon	2.21	0.39
Maximum		-12.51	-2.93
Minimum		-20.17	-4.19

روش‌شناسی

یکی از روش‌های تفسیر فرآیندهای مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی، تعیین رابطه بین پارامترهای نمونه-های آب از طریق رسم آن‌ها بر روی نمودارهای دو متغیره است که به نمودارهای ترکیبی^۲ معروف می‌باشند. با توجه به نحوه آرایش نمونه‌ها در این نمودارها می‌توان فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی را تعیین کرد. در این نمودارها موقعیت نقاط داده با نوع آب زیرزمینی مرتبط است و موقعیت نمونه-هایی که از مابقی نمونه‌ها جدا می‌باشند، می‌تواند تحت تأثیر فرآیندهای مختلفی از قبیل تبادل یونی و یا اختلاط قرار گرفته باشد. بر این اساس نمودارهای ترکیبی همیشه باید با در نظر گرفتن سیستم هیدروشیمی و هیدرودینامیک آبخوان تفسیر شود. ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم از ابزارهای قدرتمند در تحلیل هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند. این ایزوتوپ‌ها اطلاعاتی درباره منشأ، مسیر جریان و فرآیندهای مؤثر بر آب زیرزمینی ارائه می‌دهند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند جنوب غرب ایران، جایی که منابع آبی محدود هستند، مطالعه رفتار ایزوتوپی می‌تواند به شناسایی تأثیر تبخیر، تغذیه مجدد و اختلاط منابع کمک کند. به منظور شناسایی فرآیندهای هیدروژئوشیمی از نمودارهای ترکیبی TDI در مقابل عناصر عمده، نمودار Na-Cl، نمودارهای $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ در مقابل Cl- Na، نمودارهای پراکنش δD در مقابل $\delta^{18}O$ ، δD در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC،

نمودار حبابی عمق آب زیرزمینی در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC، نمودار حبابی δD در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس Cl، CI در مقابل $\delta^{18}O$ و δD و Cl در مقابل D-Excess در آبخوان‌های مورد مطالعه که در محیط Excell ترسیم شده‌اند و استفاده شده است.

نتایج و بحث

نمودارهای ترکیبی و فرآیندهای هیدروژئوشیمی

نمودارهای دو متغیره کل یون‌های محلول (TDI) در مقابل سایر یون‌های عمده برای آبخوان‌های آبرفتی بهبهان، رامهرمز و زیدون در شکل ۳ ارائه شده است. فرآیندهای اصلی انحلال مربوط به انحلال سولفات و کلراید می‌باشد. در مناطق مورد مطالعه با افزایش TDI، غلظت سولفات به طور خطی افزایش می‌یابد. این رابطه خطی بین یون‌های سولفات و کلسیم نیز وجود دارد که نشان‌دهنده فرآیند انحلال ژپس در آب زیرزمینی دشتهای مورد مطالعه است با این تفاوت که میزان سولفات در نمونه‌های آب دشتهای به صورت رامهرمز < بهبهان < زیدون می‌باشد. همچنین این ارتباط خطی در یون منیزیم نیز دیده می‌شود. منشأ اصلی افزایش غلظت منیزیم را می‌توان به رخداد دولومیتیزاسیون^۳ نسبت داد که رخداد غالب در آب‌های کربناته - کلسیکی است که در مسیر جریان با رسوبات گچی نیز در تماس قرار می‌گیرند. ۷۶ درصد نمونه‌ها در TDI زیر ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر قرار گرفته‌اند. در این بخش میزان

³Dedolomitization

²Composition diagrams

هالیت در منطقه رخ داده است.

تبادلات کاتیونی (عادی و معکوس) در شکل‌گیری غلظت نهایی عناصر اصلی محلول در آب زیرزمینی نقش مهمی دارند و در شناسایی فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر کیفیت آب زیرزمینی کاربرد فراوانی دارند. نمونه‌هایی که تبادل کاتیونی عادی در آن‌ها صورت گرفته است و دارای منشأ دوگانه‌اند. منشأ دوگانه بودن، این موضوع را بیان می‌کند که افزایش نسبت مولی Na/Cl از دو طریق انحلال هالیت و جانشینی کلسیم محلول در آب به جای سدیم موجود در کانی‌های رسی و در نتیجه، آزاد شدن یون سدیم و ورود آن به آب زیرزمینی است. همچنین در این نمودار وقتی نسبت مولاریته Na/Cl کمتر از یک شود، فرآیندهای شیمیایی مانند تبادل کاتیونی معکوس رخ می‌دهد. در تبادل کاتیونی معکوس، کانی‌های رسی مانند مونت‌موریلونیت و دگرسانی‌ها باعث تبادل کاتیونی کلسیم و منیزیم به جای سدیم و کاهش نسبت مولاریته Na/Cl می‌شوند (Yan et al., 2024). بر اساس نمودار Na-Cl (شکل ۴) مشخص می‌شود که برخی از نمونه‌ها مقدار یون Na^+ نسبت به Cl^- بیشتر است. بالاتر بودن مقادیر Na^+ نسبت به Cl^- نشان‌دهنده تبادل کاتیونی است. بیشتر بودن مقدار Na^+ و رخداد تبادل کاتیونی باعث خروج Ca^{2+} از محلول می‌شود. در دشت بهبهان نمونه‌های B6 و B8، در دشت رامهرمز نمونه‌های R1، R2، R3، R11 و در دشت زیدون نمونه‌های Z3، Z4 و Z5 تحت تاثیر تبادل کاتیونی عادی واقع شده‌اند. همچنین نمونه‌های B3 و B9 در دشت بهبهان، نمونه‌های R4، R6، R8 در دشت رامهرمز و نمونه‌های Z2، Z6 و Z7 تحت تاثیر تبادل کاتیونی معکوس قرار گرفته‌اند.

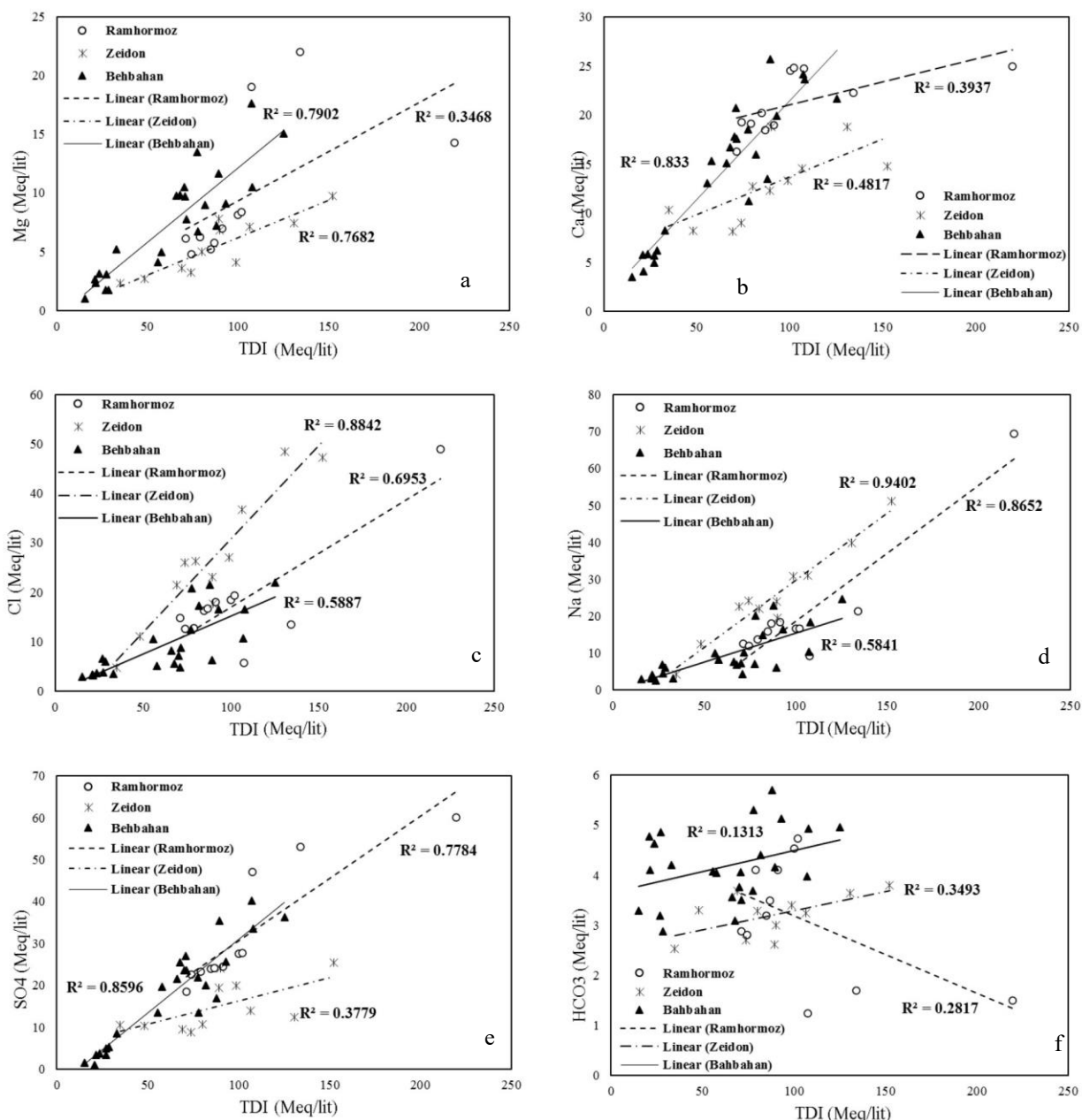
غلظت کلر بیش از غلظت سدیم نشان‌دهنده تبادل کاتیونی معکوس است که با توجه به نمودار Na در مقابل Cl این فرآیند در آبخوان‌های مورد نظر قابل ملاحظه می‌باشد. بخصوص نمونه‌های واقع در قسمت شمالی و جنوبی دشت زیدون، در قسمت‌های جنوبی و مرکز دشت رامهرمز و بخش‌های شمالی و جنوبی دشت بهبهان تبادل کاتیونی معکوس اتفاق افتاده است. همچنین در شکل ۵ نمودار $SO_4^{2-}-Ca^{2+}+Mg^{2+}$ در مقابل HCO_3^- در مقابل Cl-Na که بیانگر فرآیند تبادل کاتیونی می‌باشد را نشان می‌دهد. در این نمودار نمونه آب‌هایی که بر روی محور x نزدیک به مقدار صفر قرار می‌گیرند، تحت تأثیر

یون Ca^{2+} در دشت بهبهان و رامهرمز تا ۲۵ میلی‌اکی‌والان و دشت زیدون تا ۱۵ میلی‌اکی‌والان افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود. در این دامنه میزان یون SO_4 تقریباً نیز روند افزایشی دارد از TDI بالاتر از ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر روند حرکت انتقالی انحلال ژپیس به سمت هالیت دیده می‌شود ولی این توسعه ناکامل مانده است. این روند افزایشی در نمونه‌های دشت رامهرمز و بهبهان قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به بررسی شکل ۳ مشاهده می‌گردد که بیشترین همبستگی بین TDI و پارامترهای هیدروشیمیایی در دشت رامهرمز با ضریب $0/93$ مربوط به یون سدیم است و پس از آن یون سولفات و کلرید می‌باشد. در دشت زیدون بیشترین ضریب همبستگی با ضریب $0/96$ متعلق به یون سدیم بوده و پس از آن کلرید و منیزیم دارای ضریب همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند. همچنین در دشت بهبهان بر خلاف دشت زیدون و رامهرمز بیشترین ضریب همبستگی با ضریب $0/92$ و $0/91$ درصد به ترتیب یون سولفات و کلسیم بوده و در دشت‌های مذکور ضعیف‌ترین همبستگی در یون بی‌کربنات مشاهده می‌گردد که این همبستگی در دشت رامهرمز منفی می‌باشد.

الگوی نمودار سدیم در مقابل TDI با نمودار کلراید در مقابل TDI کاملاً مشابه است. این روند در دشت زیدون روند خطی بسیار خوبی در نمودار سدیم در مقابل کلراید نسبت به دشت رامهرمز و بهبهان مشاهده می‌شود که این موضوع نیز مؤید انحلال هالیت در منطقه مورد مطالعه است. تحول شیمیایی آب بر اساس این نمودارها از بی‌کربنات - منیزیک به بی‌کربنات - کلسیک، بی‌کربنات (سولفات) - منیزیک، سولفات - کلسیک (منیزیک) و سولفات (کلروه) - منیزیک در دشت بهبهان و رامهرمز می‌باشد. در صورتی که سیستم تحت تأثیر تکامل شیمیایی طبیعی قرار بگیرد انتظار بر این است که انحلال کلروها بعد از انحلال سولفات‌ها اتفاق بیفتد. در واقع از TDI حدود ۱۰۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به بعد می‌بایست کلرایدها افزایش یابند و دیگر انحلال ژپیس رخ ندهد، ولی همان گونه که از شکل ۵ مشخص است افزایش کلرایدها همزمان با افزایش سولفات‌ها صورت گرفته است. در دشت زیدون برخلاف دشت رامهرمز و بهبهان افزایش غلظت کلرایدها بعد از انحلال سولفات‌ها اتفاق افتاده است و نشان‌دهنده این موضوع است که در ابتدا انحلال ژپیس صورت پذیرفته و پس از آن انحلال

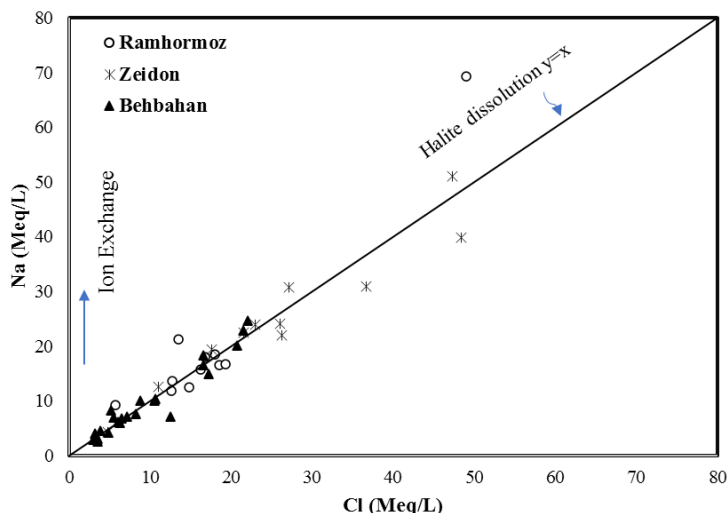
هستند و نشانگر انحلال کربنات‌ها و ژئیس می‌باشند. با توجه به توضیحات ارائه‌شده می‌توان گفت فرآیندهای هیدروژئوشیمی غالب در آبخوان‌های مورد مطالعه فرآیندهای هیدروژئوشیمی به‌ترتیب غالب بودن در حالت کلی شامل انحلال کانی‌های تبخیری ژئیس و سپس هالیت، انحلال کربنات‌ها و در نهایت تبادل کاتیونی نرمال و معکوس (به‌طور موضعی) می‌باشند.

تبادل کاتیونی واقع نشده‌اند. علاوه بر این اگر انحلال کلسیت، دولومیت و ژئیس به‌طور سازگار روی دهد و تبادل کاتیونی صورت نگیرد، در آن صورت مقدار $SO_4^{2-}-Ca^{2+}+Mg^{2+}$ نیز نزدیک به مقدار صفر خواهد شد. نمونه‌هایی که تبادل کاتیونی را متحمل می‌شوند در طول خط با شیب ۱- قرار می‌گیرند (Jankowski and Acworth, 1997). بعضی از نمونه‌های دشت بهبهان در نمودار فوق بر مقدار (۰ و ۰) منطبق

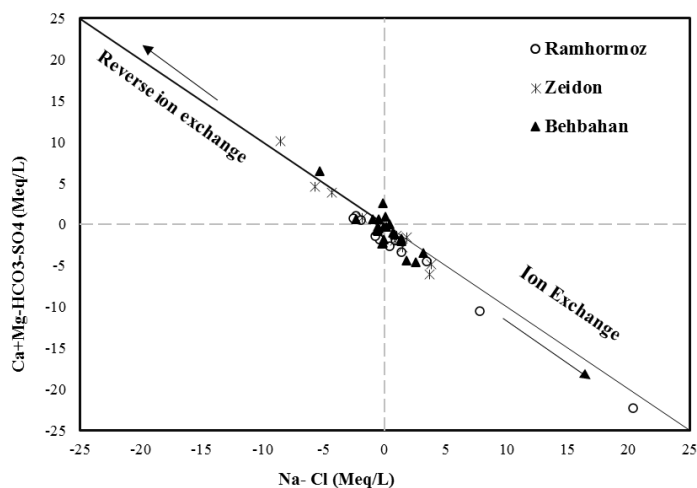


شکل ۳- نمودارهای ترکیبی یونهای اصلی نسبت به TDI در دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون.

Figure 3- Composition diagrams of major ions relative to TDI in Behbahan, Ramhormoz and Zeidon plains.



شکل ۴- نمودار ترکیبی نسبت سدیم به کلراید (میلی اکی والان بر لیتر).
Figure 4- Composition diagram of Sodium vs. Chloride (meq/Lit).



شکل ۵- نمودار $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-$ در مقابل $\text{Na}-\text{Cl}$.
Figure 5- Diagram of $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-$ VS $\text{Na}-\text{Cl}$.

نشان می‌دهند که به دلیل رخداد تبخیر در این نمونه‌ها می‌باشد. این مسئله برای شش نمونه در دشت بهبهان نیز دیده می‌شود که البته غنی‌شدگی اکسیژن ۱۸ بین ۲- تا ۳- % را نشان می‌دهند. دیگر نمونه‌ها در دشت‌های مورد مطالعه در دامنه اکسیژن ۱۸ بین ۳- تا ۴- % و دوتریوم بین ۱۷- تا ۱۳- % قرار دارند.

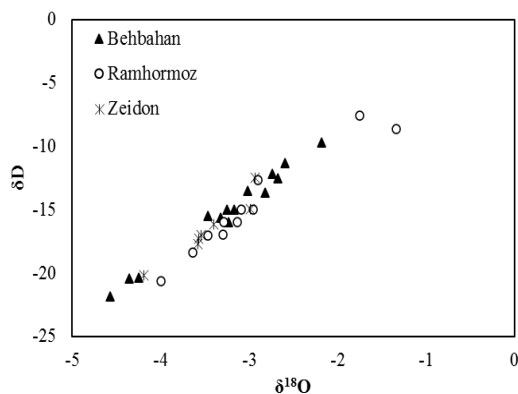
نمونه‌های آب زیرزمینی که در دشت‌های بهبهان و رامهرمز غنی‌شدگی نشان می‌دهند اثر تبخیر را با انحراف از LMWL (فرهادی و همکاران، ۱۳۹۹) و GMWL (Craig, 1961) در شکل ۷ به خوبی نشان می‌دهند. تأیید غنی‌شدگی در اثر تبخیر با کاهش D-Excess در دو نمونه رامهرمز در شکل ۱۰ به خوبی مشخص است، ولی تعداد نمونه‌های مورد تأیید غنی‌شدگی به

روابط ایزوتوپی پایدار

ترکیبات ایزوتوپی پایدار ($\delta^{18}\text{O}$ و δD) نمونه‌های آب دشت‌های بهبهان، رامهرمز و زیدون در شکل ۶ برای دوره خشک نشان داده شده است. به‌طور کلی، مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی در دشت‌های مورد مطالعه در محدوده ۴/۵۷- % تا ۱/۳۴- % با میانگین ۳/۲۱- % و برای δD در محدوده ۲۱/۸۴- % تا ۷/۵۷- % با میانگین ۱۵/۳۷- % قرار دارند. سه نمونه در دشت بهبهان، یک نمونه در دشت رامهرمز و یک نمونه در دشت زیدون به طور جدا از بقیه نمونه‌ها در مقادیر اکسیژن ۱۸ کمتر از ۴- % قرار گرفته‌اند و بیانگر آب‌های تغذیه‌ای شیرین می‌باشند. دو نمونه از دشت رامهرمز به صورت جدا از دیگر نمونه‌ها، غنی‌شدگی شدید مقادیر ایزوتوپی را

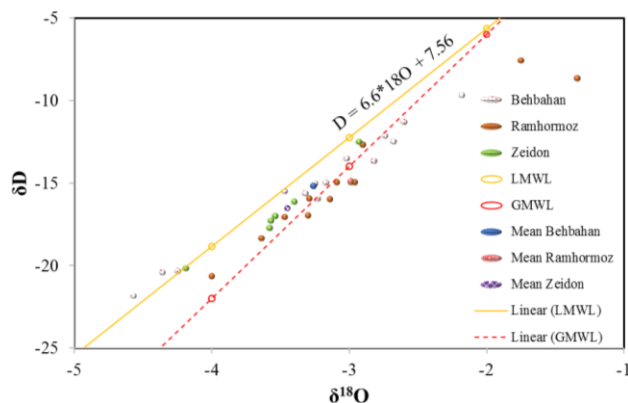
۱۸ و دوتریم در دشت رامهرمز با انحراف از خط جوی جهانی و غنی‌شدگی است که بیشتر تحت تأثیر تبخیر ناشی از نمونه‌های با شوری بالا واقع در شمال دشت می‌باشد. منشأ آب زیرزمینی این آبخوان، علاوه بر تغذیه از سازندهای زمین‌شناسی، رودخانه اعلا می‌باشد. لذا انحراف از خط جوی محلی در شکل ۷ مشاهده می‌گردد. در نمودار دو متغیره اکسیژن ۱۸ با دوتریم که با EC طبقه‌بندی شده است (شکل ۸b) مشخص گردیده که همبستگی منفی و منطقی نسبت اکسیژن ۱۸ با عمق در آبخوان بهبهان وجود دارد. در آبخوان رامهرمز عملاً رابطه خاصی دیده نمی‌شود و تغییرات با ضریب همبستگی نزدیک به صفر می‌باشد. در آبخوان زیدون این همبستگی حتی منفی شده است به طوری که عمق آب زیرزمینی در نمونه‌های با اکسیژن ۱۸ زیادتر، تا بیش از ۲۰ متر افزایش یافته است. بر این اساس عملاً به جز آبخوان بهبهان در دو آبخوان دیگر در حال کلی افزایش اکسیژن ۱۸ با کاهش عمق مشخص نمی‌باشد.

واسطه تبخیر در دشت بهبهان به ۵ نمونه کاهش یافته است. عدم تأثیر کامل پدیده شور شدگی به واسطه تبخیر در نمونه‌های دشت بهبهان در نمودار روابط ایزوتوپی حبایی با EC در شکل ۸a به وضوح تأیید می‌گردد. این نمونه‌ها با مقادیر هدایت الکتریکی کمتر از دیگر نمونه‌های دشت بهبهان که تهی‌شدگی نشان می‌دهند بیانگر تغذیه از شبکه‌های آبیاری و زهکشی در سطح دشت می‌باشند. اثر شوری به واسطه تبخیر در دو نمونه حد انتهایی دشت رامهرمز با غنی‌شدگی اکسیژن ۱۸ تأیید می‌شود. به‌طور کلی در نمونه‌های بخش میانی که فرآیند تکاملی نشان می‌دهند، میزان شوری به ترتیب از زیدون به دشت بهبهان و در نهایت دشت رامهرمز افزایش نشان می‌دهد. مقدار میانگین اکسیژن ۱۸ و دوتریم در آبخوان‌های بهبهان و زیدون بین خط بارش محلی و جهانی واقع شده‌اند و این انحراف از خط بارش محلی ناشی از تغذیه آبخوان‌ها توسط رودخانه مارون در دشت بهبهان و رودخانه زهره در دشت زیدون می‌باشد که سرچشمه این رودخانه‌ها در استان‌های بالادست بخصوص کهگلویه و بویراحمد است. میانگین اکسیژن



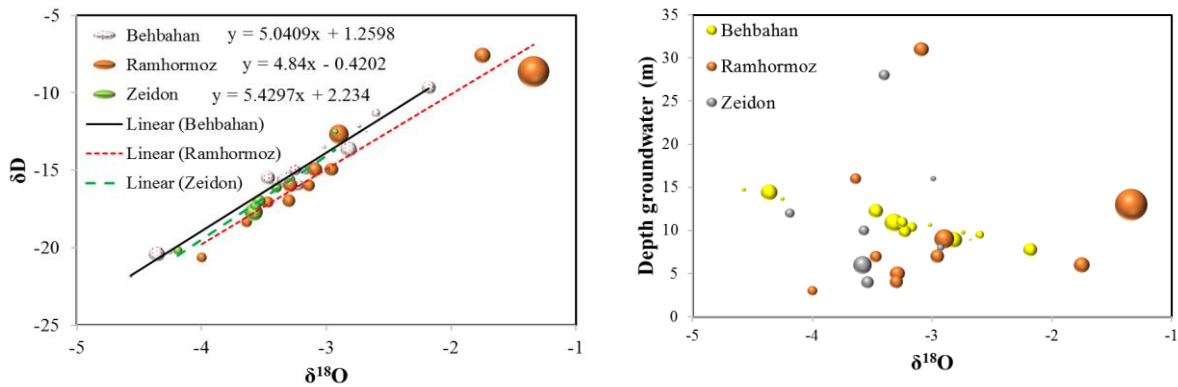
شکل ۶- نمودار پراکنش δD در مقابل δ18O نمونه‌های آب زیرزمینی مناطق مورد مطالعه.

Figure 6- Scatter diagram of the δD versus δ18O in groundwater samples of study areas.



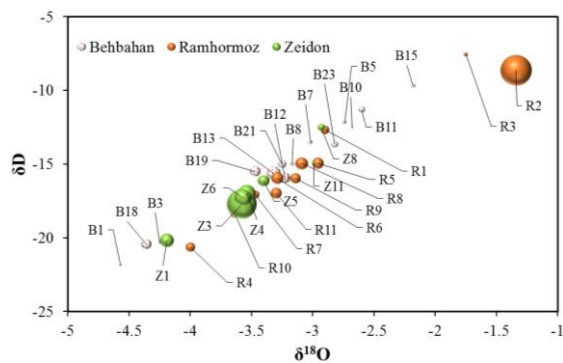
شکل ۷- نمودار δD در مقابل δ18O در آبخوان‌های مورد مطالعه به همراه خط آب جوی محلی LMWL و جهانی GMWL.

Figure 7- Plot of δD versus δ18O in the study aquifers along with LMWL (local meteoric water line) and GMWL (global meteoric water line).



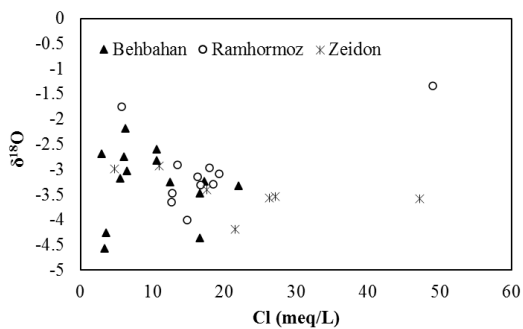
شکل ۸- (الف) نمودار حبابی δD در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC (ب) نمودار حبابی عمق آبی زیرزمینی در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس EC در آبخوان‌های مورد مطالعه.

Figure 8- a) Diagram of δD vs. $\delta^{18}O$ bubbled with EC (b) diagram of groundwater depth vs. $\delta^{18}O$ bubbled with EC in the study aquifers.



شکل ۹- نمودار حبابی δD در مقابل $\delta^{18}O$ بر اساس Cl در آبخوان‌های مورد مطالعه.

Figure 9- Diagram of δD vs. $\delta^{18}O$ bubbled with Cl in the study aquifers.



شکل ۱۰- نمودار Cl در مقابل $\delta^{18}O$ در آبخوان‌های مورد مطالعه.

Figure 10- Cl vs. $\delta^{18}O$ diagram in the study aquifers.

نمودار دو متغیره اکسیژن ۱۸ در مقابل دوتریوم که با مقدار کلراید نمادگذاری شده (شکل ۹)، نمایانگر عدم تأثیر انحلال هالیت بر روابط ایزوتوپی در آبخوان بهبهان می‌باشد. در آبخوان رامهرمز غلظت کلراید میانه با نسبت‌های ایزوتوپی میانی منطبق می‌باشند و از دو نمونه با حداکثر غنی‌شدگی یک نمونه با کلراید حداکثر و دیگری بدون تأثیر انحلال هالیت و متأثر از انحلال ژپس می‌باشد. نمونه‌های آب زیرزمینی زیدون نیز که تهی‌شدگی دارند (محتوی اکسیژن ۱۸ کمتر از ۴-‰)، غلظت کلراید کمتری نسبت به نمونه‌های با مقادیر اکسیژن ۱۸ بین ۳/۵ تا ۳- دارند.

کلراید به‌عنوان یک یون پایستار^۴ خود می‌تواند به‌عنوان شاخص تکامل هیدروشیمی در ارتباط با ایزوتوپ‌های پایدار آب به‌کار گرفته شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). نمودار کلراید در مقابل اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در آبخوان زیدون الگوی خاصی نشان نمی‌دهد. در آبخوان رامهرمز به‌جز یک نمونه با کلراید بیش از ۵۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، به‌نظر می‌رسد با افزایش غلظت کلراید تهی‌شدگی در اکسیژن ۱۸ و دوتریوم رخ می‌دهد. در آبخوان بهبهان نیز افزایش غلظت کلراید با تهی‌شدگی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم قابل تأیید است.

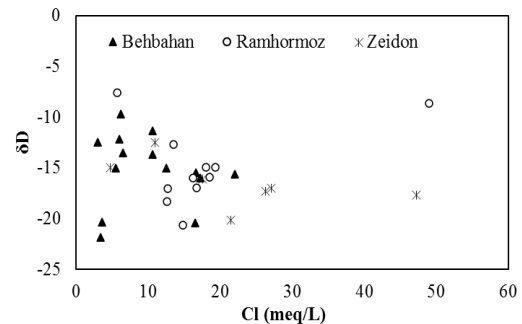
⁴ Conservative ion

میلی گرم بر لیتر) نشان دهنده تأثیر تبخیر شدید است. در دشت زیدون مقادیر اکسیژن ۱۸ در این دشت بین ۳/۵- تا ۵/۳% و دوتریوم بین ۱۸/۴- تا ۲۵/۷% اندازه گیری شد. غلظت کلراید در این دشت بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر تغییر کرد که بیانگر نقش محدودتر تبخیر و ترکیب آب های سطحی و زیرزمینی است.

نتیجه گیری

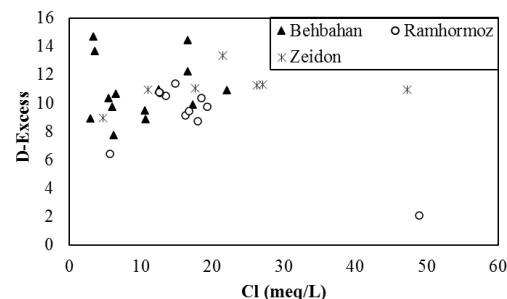
در این مقاله، فرآیندهای هیدروشیمیایی و ایزوتوپی آب های زیرزمینی در دشت های بهبهان، رامهرمز و زیدون بررسی شد. یافته ها نشان داد که انحلال ژپس و هالیت از مهم ترین فرآیندهای مؤثر در شیمی آب زیرزمینی این دشت ها است. رابطه خطی بین غلظت یون های سولفات و کلسیم با TDI بیانگر غالب بودن انحلال ژپس است، در حالی که انحلال هالیت در TDI بالاتر از ۱۰۰ میلی اکی والان بر لیتر آغاز می شود. این روند در دشت زیدون قوی تر از رامهرمز و بهبهان است. ۷۶ درصد نمونه ها در TDI زیر ۱۰۰ میلی اکی والان بر لیتر قرار گرفته اند. در این بخش میزان یون Ca^{2+} در دشت بهبهان و رامهرمز تا ۲۵ میلی اکی والان و دشت زیدون تا ۱۵ میلی اکی والان افزایش می یابد و سپس ثابت می شود. در این دامنه میزان یون SO_4 تقریباً نیز روند افزایشی دارد از TDI بالاتر از ۱۰۰ میلی اکی والان بر لیتر روند حرکت انتقالی انحلال ژپس به سمت هالیت دیده می شود. بیشترین همبستگی بین TDI و پارامترهای هیدروشیمیایی در دشت های رامهرمز و زیدون به ترتیب با ضریب ۰/۹۳ و ۰/۹۶ متعلق به یون سدیم بوده و در دشت بهبهان بر خلاف دشت زیدون و رامهرمز بیشترین ضریب همبستگی با ضریب ۰/۹۲ و ۰/۹۱ درصد به ترتیب یون سولفات و کلسیم می باشد.

مقادیر ایزوتوپی نمونه های آب زیرزمینی در دشت های مورد مطالعه در محدوده ۴/۵۷- تا ۱/۳۴% تا ۱/۳۴- تا ۳/۲۱% با میانگین ۷/۵۷- تا ۲۱/۸۴% تا ۷/۵۷% با میانگین ۱۵/۳۷- قرار دارند. سه نمونه در دشت بهبهان، یک نمونه در دشت رامهرمز و یک نمونه در دشت زیدون به طور جدا از بقیه نمونه ها در مقادیر اکسیژن ۱۸ کمتر از ۴- % قرار گرفته اند و بیانگر آب های تغذیه ای شیرین می باشند. دو نمونه از دشت رامهرمز به صورت جدا از دیگر نمونه ها،



شکل ۱۱- نمودار CI در مقابل δD در آبخوان های مورد مطالعه.
Figure 11- CI vs. δD diagram in the study aquifers.

نمودار دوتریوم مازاد در مقابل کلراید (شکل ۱۲) نمایانگر افزایش کلراید با دوتریوم مازاد می باشد به طوری که به جز دو نمونه در دشت بهبهان با حداکثر دوتریوم مازاد که غلظت کلراید پایین دارند، در دیگر نمونه ها، دوتریوم مازاد با کلراید افزایش نشان می دهد. دشت زیدون مطابق با دیگر نمودارها، کلراید نیز در مقابل ایزوتوپها بدون ارتباط مشخص می باشد. در آبخوان رامهرمز نیز عمده نمونه ها در مقدار دوتریوم مازاد بین ۸ تا ۱۲% قرار گرفته اند و نمونه با بیشترین مقدار کلراید حداقل مقدار دوتریوم مازاد را دارد که اثر شدید تبخیر را نمایان می سازد.



شکل ۱۲- نمودار CI در مقابل D-Excess در آبخوان های مورد مطالعه.

Figure 12- CI vs. D-Excess diagram in the study aquifers.

در دشت بهبهان مقادیر اکسیژن ۱۸ در این دشت بین ۳/۲- تا ۴/۵% و دوتریوم بین ۱۵/۷- تا ۲۱/۸% اندازه گیری شد. مقادیر هدایت الکتریکی (EC) کمتر از ۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر در بسیاری از نمونه ها نشان دهنده تأثیر کم تبخیر و تغذیه مجدد از شبکه های آبیاری و زهکشی است. در دشت رامهرمز مقادیر اکسیژن ۱۸ در این دشت بین ۲/۴- تا ۳/۸- % و دوتریوم بین ۱۰/۶- تا ۱۷/۵% اندازه گیری شد. شوری بالاتر در این دشت EC (بیش از ۳۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر) و همبستگی مثبت با افزایش غلظت کلراید (تا ۳۵۰

شیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت زیدون، استان خوزستان. آبخوان و قنات، ۴(۲): ۱۸۷-۲۰۴.

قبادی، م.، محمدیان، م.، محسنی، ح.، کرمی، ر.، ۱۳۹۲. مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند گچساران در منطقه رامهرمز (مخزن سد جره)، شرق خوزستان. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۷، ۱۲-۱.

کلانتری، ن.، زروش، ن.، علیجانی، ف.، دانشیان، ح.، باشتی، م.، ۱۴۰۳. بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی با تاکید بر منشا و تعیین شاخص آلودگی نترات با استفاده از روش های هیدروشیمی و تکنیک های آماری چند متغیره در بخش جنوبی آبخوان بهبهان استان خوزستان. هیدروژئولوژی، ۹(۱): ۴۰-۵۶.

کلانتری، ن.، شیخزاده، ع.، محمدی، ه.، چقازردی، ز.، ۱۴۰۰. ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی آبخوان عقیلبی با تأکید بر روش های آماری چند متغیره. هیدروژئولوژی، ۶(۲): ۹۵-۱۰۸.

کلانتری، ن.، عنبری، ا.، محمدی، ه.، ۱۳۹۷. بررسی هیدروشیمی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بستان با استفاده از تکنیک های آماری چندمتغیره. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۲): ۲۴۲-۲۵۳.

Afrifa, G.Y., Sakyi, P.A., Chegbeleh, L.P., 2017. Estimation of groundwater recharge in sedimentary rock aquifer systems in the Oti basin of Gushiegu District, Northern Ghana. Journal of African Earth Sciences, 131, 272-283 .

Akshitha, V., Balakrishna, K., Udayashankar, H.N., 2021. Assessment of hydrogeochemical characteristics and saltwater intrusion in selected coastal aquifers of southwestern India. Marine Pollution Bulletin, 173, 112989 .

Ala-Aho, P., Soulsby, C., Pokrovsky, O., Kirpotin, S., Karlsson, J., Serikova, S., Vorobyev, S., Manasypov, R., Loiko, S., Tetzlaff, D., 2018. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape. Journal of Hydrology, 556, 279-293 .

غنی شدگی شدید مقادیر ایزوتوپی را نشان می دهند که به دلیل رخداد تبخیر در این نمونه ها می باشد. این مسئله برای شش نمونه در دشت بهبهان نیز دیده می شود که البته غنی شدگی اکسیژن ۱۸ بین ۲- تا ۳- % را نشان می دهند. دیگر نمونه ها در دشت های مورد مطالعه در دامنه اکسیژن ۱۸ بین ۳- تا ۴- % و دوتریوم بین ۱۷- تا ۱۳- % قرار دارند. تحلیل ترکیبات ایزوتوپی نشان داد که غنی شدگی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در دشت رامهرمز ناشی از تبخیر شدید است و با افزایش کلراید، همبستگی مثبت دارد. در دشت بهبهان، شوری کمتر و کاهش غلظت ایزوتوپها نشان دهنده تأثیر تغذیه مجدد از شبکه های آبیاری و زهکشی و محدود بودن اثرات تبخیر است. در دشت زیدون، همبستگی منفی اکسیژن-۱۸ با عمق آب زیرزمینی حاکی از اختلاط آب های عمیق و سطحی است.

به طور کلی، تحول شیمیایی آب زیرزمینی در این مناطق به ترتیب تحت تأثیر انحلال کانی های تبخیری (ژیپس و هالیت)، انحلال کربنات ها، فرآیندهای تبخیری و تبادل یونی (نرمال و معکوس) است. این یافته ها، علاوه بر روشن کردن منشأ و تحول شیمیایی آب های زیرزمینی، اطلاعات مفیدی برای مدیریت منابع آب و کاهش آثار ناشی از شوری و آلودگی فراهم می کند.

قدر دانی

مؤلفین این تحقیق از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز و مدیریت دفتر پژوهش های کاربردی شرکت سازمان آب و برق خوزستان که تسهیلات لازم و پشتیبانی مالی این تحقیق را فراهم آورده اند، سپاسگزاری می نمایند.

منابع

فرهادی، ص.، علی جانی، ف.، و ناصری، ح.، ۱۳۹۹. مقایسه مشخصات ایزوتوپ های پایدار بارش سیل آسا فروردین ۱۳۹۸ در جنوب غرب کشور با خط آب جوی دیگر مناطق ایران و کشورهای مجاور. هواشناسی کشاورزی، ۸(۲): ۴۴-۵۹.

فیروزی، س.، کلانتری، ن.، محمدی، ه.، ۱۴۰۲. تلفیق روش های هیدروشیمیایی و آماری جهت ارزیابی کیفیت

- Esmacili, S., Barzegar, R., Kazemian, N., 2018. The effective factors on the groundwater chemical quality of Qareh-Ziaeddin plain, West Azarbaijan province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(108): 245-256 .
- Gabet, E. J., Wolff-Boenisch, D., Langner, H., Burbank, D.W., Putkonen, J., 2010. Geomorphic and climatic controls on chemical weathering in the High Himalayas of Nepal. *Geomorphology*, 122(1-2): 205-210.
- Geological and Exploration Division, 1966. Geological map of Agha Jari, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.
- Geological and Exploration Division, 1966. Geological map of Banar-e-Deylam, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.
- Geological and Exploration Division, 1966. Geological map of Haft Kel, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.
- Geological and Exploration Division, 1970. Geological map of Behbahan, 1:100000. Iranian Oil Operating Companies.
- Ghorbanzadeh, R., Mirhaji, N., Rezaie, H., 2024. Investigating the Origin and Controlling Mechanisms of the Underground Water Quality in Urmia Plain Aquifer Using Hydrogeochemical Methods and Composite Diagrams. *Iran-Water Resources Research*, 20(2): 33-60 .
- Grzywna, A., Bronowicka-Mielniczuk, U., 2020. Spatial and temporal variability of water quality in the Bystrzyca river basin, Poland. *Water*, 12(1): 190 .
- Han, D., Song, X., Currell, M.J., Yang, J., Xiao, G., 2014. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China. *Journal of Hydrology*, 508, 12-27 .
- He, B., He, J., Wang, L., Zhang, X., Bi, E., 2019. Effect of hydrogeological conditions and surface loads on shallow groundwater nitrate pollution in the Shaying River Basin: Based on least squares surface fitting model. *Water Research*, 163, 114880 .
- Jankowski, J., Acworth, R.I., 1997. Impact of debris-flow deposits on hydrogeochemical processes
- Asare-Donkor, N.K., Ofori, J.O., Adimado, A.A., 2018. Hydrochemical characteristics of surface water and ecological risk assessment of sediments from settlements within the Birim River basin in Ghana. *Environmental Systems Research*, 7, 1-17 .
- Asomaning, J., Antwi, E.O., Laar, C., Saka, D., 2023. Statistical and isotopic analysis of sources and evolution of groundwater. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 129, 103337 .
- Bryan, E., Meredith, K.T., Baker, A., Post, V.E., Andersen, M.S., 2016. Island groundwater resources, impacts of abstraction and a drying climate: Rottneest Island, Western Australia. *Journal of Hydrology*, 542, 704-718 .
- Chen, Z., Zhou, P., Wang, G., Mao, H., Feng, X., Huang, H. 2023. Groundwater chemistry and isotope for interpreting the hydrogeological conditions and hydrochemical evolution of multilayer aquifer system of Donghai island, China. *Applied Geochemistry*, 159, 105833 .
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3-4): 294-313.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in natural waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Dogramaci, S., Skrzypek, G., 2015. Unravelling sources of solutes in groundwater of an ancient landscape in NW Australia using stable Sr, H and O isotopes. *Chemical Geology*, 393, 67-78 .
- Edjah, A., Akiti, T., Osaie, S., Adotey, D., Glover, E., 2017. Hydrogeochemistry and isotope hydrology of surface water and groundwater systems in the Ellebelle district, Ghana, West Africa. *Applied Water Science*, 7, 609-623 .
- Egbi, C.D., Anornu, G., Appiah-Adjei, E.K., Ganyaglo, S. Y., Dampare, S. B., 2019. Evaluation of water quality using hydrochemistry, stable isotopes, and water quality indices in the Lower Volta River Basin of Ghana. *Environment, Development and Sustainability*, 21, 3033-3063 .

- hydrochemical and isotopic techniques, Konarsiah, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 70, 587-604 .
- and the development of dryland salinity in the yass river catchment, new south wales, australia. *Hydrogeology journal*, 5(4): 71-88 .
- Ji, D., Ma, J., Xue, J., Wu, X., Wang, Z., Wei, S., 2024. Identifying groundwater characteristics and controlling factors in Jiaozhou Bay's northern coastal region, China: a combined approach of multivariate statistics, isotope analysis, and field empirical investigations. *Scientific Reports*, 14(1): 23856 .
- Kazakis, N., Pavlou, A., Vargemezis, G., Voudouris, K., Soulios, G., Pliakas, F., Tsokas, G., 2016. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece. *Science of the Total Environment*, 543, 373-387 .
- Klaus, J., McDonnell, J., 2013. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64 .
- Kwong, H.T., Jiao, J.J., Liu, K., Guo, H., Yang, S., 2015. Geochemical signature of pore water from core samples and its implications on the origin of saline pore water in Cangzhou, North China Plain. *Journal of Geochemical Exploration*, 157, 143-152 .
- Ledesma-Ruiz, R., Pastén-Zapata, E., Parra, R., Harter, T., Mahlknecht, J., 2015. Investigation of the geochemical evolution of groundwater under agricultural land: a case study in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 521, 410-423 .
- Liu, J., Chen, Z., Wang, L., Zhang, Y., Li, Z., Xu, J., Peng, Y., 2016. Chemical and isotopic constrains on the origin of brine and saline groundwater in Hetao plain, Inner Mongolia. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 15003-15014 .
- Yan, M., Wang, L., Wang, Q., Liu, Z., 2024. Hydrochemical Characteristics and Origin Analysis of Groundwater in Nanling County, Anhui Province. *Water*, 16(11): 1579 .
- Zarei, M., Raeisi, E., Merkel, B.J., Kummer, N.A., 2013. Identifying sources of salinization using