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

ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی آبخوان عقیلی با تأکید بر روش‌های آماری چند متغیره

نصرالله کلانتری[1]*، علاهن شیخ‌زاده[2]، هادی محمدی[2]، زهرا چقازردی[2]

۱- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران
* نویسنده مسئول: nkalantari@hotmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۴

چکیده

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی در تمام دنیا است و اهمیت آن به دلیل رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی روزبه‌روز بیشتر می‌شود. ازاین‌رو مدیریت نادرست منابع آب، کمبود باران و خشکسالی‌های اخیر بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی در اکثر مناطق ایران تأثیر نامطلوبی گذاشته است. به‌علت اهمیت آبخوان آبرفتی عقیلی واقع شده در استان خوزستان در بخش کشاورزی و نیز تأمین آب شرب شهرها و روستاهای منطقه مطالعاتی، وضعیت کیفیت آب زیرزمینی این آبخوان موردمطالعه قرار گرفته است. جهت بررسی پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان عقیلی از نتایج آنالیز شیمیایی ۱۳ حلقه چاه بهره‌برداری در اسفندماه سال آبی (۹۴-۱۳۹۳) استفاده گردید. در این مطالعه به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان عقیلی از شاخص اشباع، نمودارهای تبادلات یونی، نمودار گیبس، روش‌های گرافیکی و روش‌های آماری چندمتغیره (تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA)) استفاده شده است. تیپ غالب آب زیرزمینی در این آبخوان کلرید-سدیم است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که دو عامل با مجموع ۸۲/۲ درصد کل تغییرات (عامل اول ۶۱/۴ درصد شامل پارامترهای Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^{+}، K^{+}، Cl^{-} و SO_4^{2-} و عامل دوم ۲۰/۸ درصد شامل پارامترهای pH و HCO_3^{-})، کیفیت منابع آب آبخوان عقیلی را کنترل می‌کنند. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA) داده‌های هیدروشیمیایی، دو خوشه مشاهده گردید. به‌طورکلی فرآیندهای انحلال، رسوبگذاری، تبادلات یونی معکوس و آب برگشت کشاورزی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان عقیلی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آبخوان عقیلی، تبادل یونی، روش‌های آماری چندمتغیره، هیدروژئوشیمی.

مقدمه

کیفیت آب زیرزمینی متأثر از عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی، زمان تماس آب با سنگ، لیتولوژی در مسیر حرکت آب، فعالیت‌های انسانی و عوامل بیولوژیکی می‌باشد. مدیریت مناسب مصرف آب زیرزمینی بدون داشتن دانش کافی از توزیع و گسترش آب‌های زیرزمینی شور و شیرین و تعیین فرآیندهای تأثیرگذار در سیر تکاملی آن، امکان‌پذیر نمی‌باشد (Glynn and Plummer, 2005). با بررسی تغییر مقادیر و نوع املاح در مسیر جریان آب زیرزمینی، می‌توان به تأثیر لیتولوژی اطراف آبخوان، سرعت آب در مسیر جریان، مقدار تغذیه و تخلیه و بسیاری از عوامل هیدروژئولوژیکی منطقه، به میزان قابل‌توجهی پی برد (Mokhtari and Espahbod, 2009). چون شناسایی مجموعه‌ای از شرایط هیدرولوژیکی و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی و تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی دشوار است، ازاین‌رو هیدروژئولوژیست‌ها علاوه بر روش‌های گرافیکی از تکنیک‌های آماری چند متغیره

(آنالیزخوشه‌ای[1]، تحلیل مولفه‌های اصلی[2] و ...) نیز استفاده می‌کنند. اغلب روش‌های گرافیکی مورداستفاده، محدودیت تعداد نمونه و پارامتر (T و pH) را دارند. از طرفی هیچ‌یک از روش‌های گرافیکی، قادر به تمایز بین گروه‌ها و آزمایش میزان شباهت در بین گروه‌ها نمی‌باشند. برخلاف روش‌های گرافیکی، روش‌های آماری امکان استفاده از تمامی پارامترها را ارائه می‌دهند. محدودیتی که روش‌های آنالیز خوشه‌ای (اغلب روش‌های آماری) نسبت به روش‌های گرافیکی دارند این است که اطلاعاتی راجع به ترکیب شیمیایی نمونه‌ها در هر گروه ارائه نمی‌کنند (Guler, 2002). تلفیق هر دو روش می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد کیفیت منابع آبی ارائه دهد. در بسیاری از موارد می‌توان از تکنیک‌های چندمتغیره جهت تفسیر داده‌های جمع‌آوری شده برای آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده کرد. بیشتر تکنیک‌های آماری چند متغیره، یک رویکرد کمی می‌باشند که جهت طبقه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی برای بررسی تطابق بین متغیرها (پارامترهای شیمیایی) و ارزیابی شباهت بین مشاهدات (مکان‌های نمونه‌برداری آب زیرزمینی)، به‌کار می‌روند (Cloutier et al., 2008). از روش‌های آماری چندمتغیره در بررسی کیفی، تحلیل کیفیت و مطالعه هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف کره زمین استفاده شده است. Isa et al. (2014) با استفاده از روش آماری PCA، عوامل آلودگی آبخوان جزیره کاپاس[3] در مالزی را فلزات سنگین آرسنیک و منگنز دانسته‌اند. Suresh et al. (2017) با استفاده از روش‌های آماری PCA و HCA به مطالعه تنوع مکانی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه پودوچری[4] در هند پرداخته‌اند و بیشترین عامل تأثیرگذار بر کیفیت را عامل انسانی دانسته‌اند. Igibah and Tanko (2019) در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی شهری در شمال ابوجا در نیجریه با استفاده از روش آماری HCA، نشان دادند که آب زیرزمینی این منطقه در ۴ خوشه مجزا قرا گرفته است. جلالی و اصغری-مقدم (۱۳۹۲) در بررسی وضعیت هیدروژئوشیمیایی و روند شوری دشت خوی با استفاده از شاخص اشباع کانی‌ها، واکنش بین آب و سنگ را عامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی این دشت دانسته‌اند. روحی و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی عوامل مؤثر بر خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی دشت الباجی به این نتیجه رسیدند که عوامل متعددی ازجمله شرایط حوضه رسوبگذاری مواد سازنده لایه آبدار، واکنش آب با مواد آبرفتی دشت، تبخیر از آب زیرزمینی، آب برگشتی کشاورزی و تغذیه از رودخانه کرخه، کیفیت آب زیرزمینی دشت را کنترل می‌کنند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که عامل اول نسبت به سایر عوامل غالب می‌باشد. کریمی و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی آب زیرزمینی و روند تکامل شوری آن در دشت سمنان با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) دریافتند که نمونه‌های آب در سه خوشه‌ی اصلی، (۱) آب‌های با بیشترین مقدار بی‌کربنات و کمترین مقدار جامد محلول، (۲) آب‌های با بیشترین مقدار سولفات و (۳) آب‌های کلروره با حداکثر شوری قرار می‌گیرند. هادیپور هفشجانی و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه فرآیندهای هیدروژئوشیمی آبخوان کوهدشت، نشان دادند که سیر تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی در دشت کوهدشت از تیپ بی‌کربناته کلسیک (منیزیک) با غلظت املاح محلول کم در مناطق تغذیه شمالی آغاز و به تیپ بی‌کربناته (سولفاته) منیزیک ادامه می‌یابد ولی در مناطق تخلیه جنوب غربی دشت (منطقه آلوده به مواد هیدروکربنی) به‌طور ناگهانی تیپ آب زیرزمینی کلروره-سدیک و غلظت املاح محلول زیاد می‌شود. نادری و همکاران (۱۳۹۷) در ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمی آبخوان سلماس با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره، سه عامل اصلی مؤثر بر هیدروشیمی آب زیرزمینی (عامل‌های اول و دوم زمین‌زاد و عامل سوم انسان‌زاد) را تشخیص دادند. کلانتری و همکاران (۱۳۹۷) در بررسی هیدروشیمیایی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بستان با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره سه رخساره هیدروشیمیایی (شوری زیاد، حد واسط و کم) را شناسایی کرده‌اند. حسن‌زاده و عباس‌نژاد (۱۳۹۷) در مطالعه فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی بخش میانی دشت نوق (غرب استان کرمان) نشان دادند که فرآیندهای تبخیر آب، انحلال تبخیری‌ها، رسوبگذاری کلسیت و ژیپس، اکسیدشدن سولفیدها، واجذب بعضی از فلزات سنگین، اثر اشتراک یونی،

[1] Hierarchical Cluster Analysis
[2] Principal Components Analysis
[3] Kapas
[4] Puducherry

هیدرولیز سیلیکات‌ها و تبادل یونی کمابیش در این سفره آب زیرزمینی صورت گرفته و بر کیفیت آب تأثیر گذاشته‌اند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که آنالیزهای آماری چند متغیره به‌طور قابل‌توجهی برای تشخیص عوامل عمده تأثیر-گذار بر شیمی منابع آب سودمند می‌باشند. نبود بارندگی و خشکسالی‌های اخیر به‌ویژه در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی باعث افت سطح آب زیرزمینی و تغییر کیفیت منابع آبی شده است. با توجه به افزایش شوری آبخوان عقیلی در سال‌های اخیر و اهمیت این آبخوان در بخش کشاورزی، وضعیت هیدروژئوشیمی این آبخوان موردبررسی قرار گرفته است. در این پژوهش به بررسی فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر منابع آب زیرزمینی آبخوان عقیلی با استفاده از روش‌های گرافیکی، شاخص‌های اشباع[5]، نمودارهای تبادلات یونی[6]، نمودار گیبس[7] و روش آماری چند متغیره (PCA و HCA) پرداخته شده است. این پژوهش اهمیت روش‌های آماری در ارزیابی تغییرات مکانی هیدروشیمیایی را نشان می‌دهد و همچنین تفسیر پیچیده داده‌های کیفی منابع آب را میسر می‌سازد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

آبخوان عقیلی با وسعت ۱۴۲/۴۱ کیلومترمربع در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان شوشتر بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی، در استان خوزستان قرارگرفته است (شکل ۱). آبخوان عقیلی با ارتفاع بین ۳۷ تا ۱۴۰ متر از سطح دریا، دارای آب‌وهوای خشک و متوسط سالیانه بارش، تبخیر و دمای هوا به ترتیب ۳۳۹/۷ و ۲۸۶۰/۷ میلی‌متر و ۲۷/۶ درجه سانتی-گراد می‌باشد. سازندهای رخنمون یافته در اطراف این آبخوان آبرفتی به‌ترتیب قدیم به جدید شامل: گچساران، میشان، آغاجاری، بخش لهبری، کنگلومرای بختیاری و رسوبات عهدحاضر می‌باشند (نجاتی جهرمی و همکاران، ۱۳۸۷). نهشته‌های عهدحاضر حاصل هوازدگی، تخریب، فرسایش و انتقال اجزای سازندهای قدیمی‌تر مناطق مجاور می‌باشند. آبخوان عقیلی یک آبخوان آزاد است و سنگ کف آن را سازند آغاجاری تشکیل می‌دهد. ضخامت بخش اشباع و عمق سنگ کف این آبخوان، از شرق به غرب افزایش می‌یابد. عمق رسیدن به سطح ایستابی در آبخوان عقیلی، بین ۴ تا ۱۷ متر متغیر است و عمق آب از شرق به غرب کاهش می‌یابد. در آبخوان عقیلی بالاترین تراز سطح ایستابی در شرق دشت (حدود ۷۸ متری از سطح دریا) و پایین‌ترین تراز (حدود ۴۷ متری) در بخش‌های جنوب‌غربی آبخوان مشاهده می‌شود. با توجه به سطح تراز ایستابی، روند کلی جهت جریان در آبخوان عقیلی از توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند و از بخش‌های شرقی به سمت غرب و جنوب‌غربی آبخوان است. سازند کنگلومرای بختیاری در شمال و شمال شرق و همچنین سازند تبخیری گچساران در بخش‌های شرق و جنوب‌شرقی، بیشترین رخنمون را دارند. به‌دلیل ماهیت لیتولوژیکی و شکستگی‌های موجود در آن‌ها، این سازندها نفوذپذیر شده‌اند و آبخوان عقیلی را تغذیه می‌کنند (شکل ۲). رودخانه کارون مهم‌ترین منبع آب سطحی در غرب منطقه مطالعاتی می‌باشد و آبخوان عقیلی را زهکشی می‌کند. جهت ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی از تعداد ۱۳ حلقه چاه‌های بهره‌برداری آبخوان عقیلی که دارای پراکنش نسبی در منطقه موردمطالعه هستند، در اسفندماه سال آبی (۹۴-۱۳۹۳) نمونه‌برداری مطابق شکل ۱ صورت گرفت و آنالیز شیمیایی آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^{+}، K^{+}، Cl^{-}، SO_4^{2+}، CO_3^{2-} و HCO_3^{-}) در آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان انجام گردید (جدول ۱). در آزمایشگاه مذکور، یون‌های کلسیم، منیزیم، کلرید، کربنات و بی‌کربنات به روش تیتراسیون، سدیم و پتاسیم به روش شعله-سنجی و سولفات به روش اسپکتروفتومتری موردسنجش قرار گرفته است. مقدار pH و هدایت الکتریکی در محل نیز توسط دستگاه دیجیتالی هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شد. در روش آماری، برای استانداردسازی داده‌ها از روش کایزر[8] استفاده شده است که بر اساس آن، نرمال بودن توزیع داده‌ها مشخص می‌شود. در مرحله بعدی مناسب بودن داده‌ها برای انجام تحلیل‌های آماری بررسی شده است که در این پژوهش، از شاخص کایزر–مایر–الکین[9] (KMO) استفاده شده است. این

[5] Saturation Index
[6] Ion Exchange
[7] Gibbs diagram
[8] Kaiser Criterion
[9] Kaiser-Meyer-Olkin

شاخص در بازه صفر تا یک قرار دارد. اگر مقدار شاخص KMO نزدیک به یک باشد، داده‌های موردنظر (اندازه نمونه) برای تحلیل آماری مناسب هستند وگرنه نتایج تحلیل آماری برای داده‌های موردنظر چندان مناسب نیست. در این پژوهش، تمام پارامترهای هیدروشیمیایی مقادیر KMO بیشتر از ۰/۵ را دارا بودند و برای تحلیل آماری مناسب می‌باشند. در این پژوهش برای شناخت عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی و منابع شوری آبخوان عقیلی از روش‌های گرافیکی، شاخص اشباع کانی‌ها، نمودارهای تبادلات یونی، نمودار گیبس و روش آماری چندمتغیره (تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA)) استفاده شده است. جهت دستیابی به اهداف این پژوهش، نرم‌افزارهای PHREEQC، Excel، AqQA، XLSTAT و Arc GIS10.3 مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

کد نمونه	pH	EC (µs/cm)	TDS (mg/L)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	k^{+} (meq/L)	HCO_3^-	$S0_4^{2-}$	Cl^-
AG5	۷/۴	۱۷۵۲	۱۱۳۹	۶/۲	۳/۱	۷/۸	۰/۰۸	۴/۳	۳/۲	۹/۴
AG6	۷/۶	۱۶۴۴	۱۱۸۸	۷/۶	۱/۳	۷/۵	۰/۰۳	۴/۹	۲/۸	۸/۵
AG7	۸/۱	۱۵۵۸	۱۰۱۳	۶/۸	۱/۵	۷/۳	۰/۰۶	۴/۵	۲/۴	۸/۳
AG8	۷/۴	۴۱۴۰	۲۶۹۱	۱۵	۱۰/۲	۲۰/۶	۰/۱۲	۴/۲	۱۶/۳	۲۳/۶
AG9	۷/۵	۱۶۲۷	۱۰۵۸	۵/۲	۳/۸	۷/۷	۰/۰۹	۳/۹	۴/۳	۸/۱
AG10	۷/۵	۳۶۸۰	۲۳۱۸	۹/۸	۷/۱	۲۱/۱	۰/۰۹	۶/۲	۸/۱	۲۳/۴
AG11	۷/۷	۶۷۶	۳۷۲	۳/۳	۲/۳	۱/۹	۰/۰۸	۴/۳	۲	۱
AG17	۷/۵	۱۵۹۳	۱۰۲۰	۶	۲۷	۷/۵	۰/۰۶	۴	۳/۶	۸/۳
AG20	۷/۶	۷۳۷	۵۵۴	۳/۱	۲/۳	۲/۳	۰/۰۲	۲/۷	۲/۲	۱/۲
AG26	۷/۳	۲۳۵۰	۱۵۲۸	۷/۸	۴/۴	۱۲	۰/۰۵	۳/۸	۹/۹	۱۰/۲
AG27	۷/۳	۱۸۴۷	۱۲۰۱	۷/۷	۳/۳	۸/۵	۰/۰۶	۵/۲	۵	۹
AG29	۸/۳	۱۶۷۸	۲۶۶۴	۱۶/۳	۱۰/۷	۸/۷	۰/۱۴	۴/۷	۲۲	۸/۷
AG36	۷/۲	۱۴۹۵	۹۵۷	۸/۴	۳/۲	۹	۰/۰۷	۳/۶	۶/۱	۷/۲

شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی و نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

شکل ۲- نقشه جهت جریان آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

نتایج و بحث

شاخص اشباع

نمایه‌های اشباع (SI) می‌توانند ب منظور شناسایی احتمال انحلال و رسوب برخی از کانی‌ها در سیستم آب زیرزمینی یک منطقه به‌کار روند. چنانچه شاخص اشباع برای یک کانی بیشتر از صفر باشد، این کانی در آب فوق‌اشباع و ممکن است در آب رسوب کند ولی اگر شاخص اشباع کمتر از صفر باشد، آب نسبت به این کانی تحت‌اشباع و می‌تواند بیشتر از آن نیز انحلال یابد (Rajmohan and Elango, 2004). شاخص اشباع کانی‌ها طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$SI=\log {}^{AIP}/_{KS} \qquad (۱)$$

بر اساس رابطه ۱ SI، IAP و Ks به‌ترتیب معرف شاخص اشباع، محصول فعالیت یونی و ثابت انحلال‌پذیری کانی موردنظر می‌باشد. در این پژوهش برای تعیین تعادل شیمیایی بین کانی‌های اصلی موجود در آب زیرزمینی منطقه موردمطالعه، شاخص اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت محاسبه گردید (شکل ۳). همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، شاخص اشباع کلیست و دولومیت در اکثر نمونه‌ها بیشتر از صفر است و نمونه‌ها در این حالت فوق‌اشباع می‌باشند. این موضوع نشان‌دهنده رسوب این کانی‌ها در آب زیرزمینی آبخوان عقیلی می‌باشد. چون نمونه‌ها دارای pH قلیایی هستند، در pHهای قلیایی، عموماً کانی‌های کربناته مانند کلسیت و دولومیت شروع به رسوبگذاری می‌کنند. شاخص اشباع کلسیت نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی به‌دلیل وجود کلسیم در سازندهای گچساران، وجود کنگلومرای آهکی و سیمان آهکی در بین ذرات آبرفتی موجود در سازند بختیاری و همچنین رسوباتی از جنس آهک به‌صورت میان لایه در سازند آغاجاری و بخش لهبری فوق‌اشباع می‌باشد. علاوه بر آن، در نمونه‌هایی که تبادلات یونی معکوس در تبادل یونی معکوس، کانی‌های رسی مانند مونت‌موریلونیت و دگرسانی فلدسپات‌ها باعث تبادل یونی کلسیم و منیزیم به‌جای سدیم موجود در آب می‌شوند (Hounslow, 1995). در آن‌ها رخ داده است نیز باعث افزایش یون کلسیم و فوق‌اشباع شدن نمونه‌ها شده است. آب‌هایی که از مناطق ژیپسی یا انیدریتی (سازند گچساران) عبور می‌کنند ازنظر سولفات به حد اشباع می‌رسند و افزایش SO_4^{2-} در آب باعث افزایش Ca^{2+} و Mg^{2+} می‌شود، زیرا در مناطق ژیپسی به‌جز $CaSO_4$، $MgSO_4$ نیز وجود دارد (مقیمی، ۱۳۸۵).

این امر باعث افزایش یون منیزیم و فوق‌اشباع شدن شاخص دولومیت شده است. شاخص اشباع ژیپس و هالیت کمتر از صفر می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده تحت‌اشباع بودن نمونه‌های آب زیرزمینی است و در این شرایط آب قادر به انحلال بیشتر کانی‌های ژیپس و هالیت می‌باشد. قابلیت انحلال ژیپس و هالیت خیلی بیشتر از دولومیت و کلسیت می‌باشد و به‌سختی این کانی‌ها به مرحله فوق‌اشباع می‌رسند. کمترین میزان شاخص اشباع هالیت و ژیپس در نمونه‌های AG11 و AG20 مشاهده می‌شود که نزدیک به منطقه تغذیه سازند کنگلومرای بختیاری قرار دارند و نمونه‌ها نسبت به این شاخص‌ها تحت‌اشباع هستند.

شکل ۳- شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

تبادلات یونی

تبادلات یونی (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. فرآیند تبادل یونی عادی در جایی رخ می‌دهد که کانی‌های رسی غنی از سدیم مانند مونت-موریلونیت بر اساس رابطه ۲ با کلسیم و منیزیم وارد واکنش شده و باعث ورود سدیم به آب زیرزمینی می‌شوند (کلانتری و همکاران، ۱۳۹۱). برعکس فرآیند یعنی جذب سدیم توسط کانی‌ها و آزاد شدن یون کلسیم و منیزیم در آب زیرزمینی را تبادل یونی معکوس نامیده می‌شود. رخداد فرایند تبادل یونی به‌صورت واکنش‌های زیر است:

$$Ca+Na\ clay \rightarrow Ca\ clay+2Na \qquad (۲)$$

جهت بررسی فرآیندهای مؤثر بر میزان شوری آب زیرزمینی آبخوان عقیلی نمودارهای ترکیبی مختلفی ترسیم گردید. در شکل ۴ (الف) نمودار میزان هدایت الکتریکی در مقابل نسبت مولی ($^{Na}/_{Cl}$) ارائه شده است. نسبت مولی ($^{Na}/_{Cl}$) نشان می‌دهد که چه مقدار سدیم از انحلال هالیت حاصل می‌شود. نمونه‌هایی که در بالای خط $Na/Cl = 1$ قرار گرفته‌اند، فرآیند تبادل یونی 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، جانشینی کلسیم محلول در آب به‌جای سدیم موجود در کانی-های 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 یونی معکوس رخ می‌دهد. در تبادل یونی معکوس، کانی‌های رسی مانند مونت‌موریلونیت و دگرسانی فلدسپات‌ها باعث تبادل یونی کلسیم و منیزیم به‌جای سدیم و کاهش نسبت مولاریته ($^{Na}/_{Cl}$) می‌شوند (Hounslow, 1995). در شکل ۴ (ب) نمودار Ca+Mg در مقابل $SO_4+HCO_3^-$ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار نمونه‌هایی که در امتداد خط ۱:۱ قرار دارند، انحلال غالب کلسیت، دولومیت، ژیپس و نمونه‌هایی که در زیر و بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند به‌ترتیب نشان‌دهنده تبادل یونی عادی و تبادل یونی معکوس هستند. همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، در آبخوان عقیلی تغذیه از سازند کنگلومرای بختیاری و سازند تبخیری گچساران صورت می-گیرد. این سازندها و همچنین مواد ژیپسی موجود در آبرفت

آبخوان عقیلی باعث افزایش غلظت Ca^{2+} و Mg^{2+} شده است که این عناصر می‌توانند با Na^{+} موجود در کانی هالیت یا کانی-های رسی جایگزین شوند. غلظت یون‌های Cl^{-}، SO_4^{2-} و HCO_3^{-} نشان‌دهنده انحلال کانی‌های تبخیری مانند هالیت، ژیپس، کلسیت و دولومیت است. بر اساس هر دو نمودار، نمونه-هایی که در نواحی مرکزی آبخوان قرار دارند (نمونه‌های AG8، AG10، AG27، AG5، AG6، AG17، AG7، AG29 و AG9) به‌دلیل دوری از منطقه تغذیه تبادل یونی معکوس در آن‌ها رخ داده است.

نمودار گیبس

یکی دیگر از نمودارهایی که عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی را شناسایی می‌کند، نمودار گیبس (Gibbs, 1970) می‌باشد. نمودار گیبس یا همان TDS در مقابل نسبت کاتیونی (Na/Na+Ca) نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی در شکل (۵) نشان داده شده است. بر اساس نمودار گیبس، ترکیب آب زیرزمینی توسط سه پارامتر تغذیه از باران، تبخیر و واکنش آب و سنگ کنترل می‌شود. با توجه به رخنمون زیاد سازند گچساران در شرق و جنوب‌شرقی و همچنین برون‌زدگی سازند کنگلومرای بختیاری در بخش‌های شمالی آبخوان و آبرفت موجود، باعث شده است که اکثر نمونه‌ها در قسمت واکنش آب با سنگ این نمودار واقع شوند. تبخیر نیز نقش کمتری را در تغییر کیفیت آب زیرزمینی ایفا می‌کند. قابلیت انحلال بیشتر کانی‌های سازند تبخیری گچساران نسبت به سازند بختیاری نشان‌دهنده تأثیر سازند گچساران بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

الف ب

شکل ۴- الف و ب) نمودارهای تبادلات یونی نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

شکل ۵- نمودار گیبس نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

PCA یکی از روش‌های تبدیل داده است که برای ایجاد یک ساختار اساسی در یک مجموعه چندمتغیره به‌کار می‌رود (Davis, 1986). تحلیل مؤلفه‌های اصلی تبدیلی در فضای برداری است که بیشتر برای کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. PCA مؤلفه‌های اصلی را شناسایی کرده و به‌جای بررسی تمام ویژگی‌ها، یک‌سری ویژگی‌هایی که ارزش بیشتری دارند را تحلیل کرده و استخراج می‌کند. در تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، بر مبنای معیار کایزر، مؤلفه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که مقدار بردار ویژه آنها بزرگ‌تر یا مساوی ۱ باشد (Stat Soft Inc, 2004). مقدار بردار ویژه ۱ در فضای برداری یعنی ویژگی مورد بررسی دارای بیشترین ارزش و تأثیر را در تحلیل دارد. در نتیجه همه عواملی که حاوی یک واریانس بیشتر از متغیرهای اصلی استانداردشده باشند، پذیرفته می‌شوند (Davis, 1986). عامل‌ها به‌ترتیب ارزش، درجه‌بندی می‌شوند. عامل اول یا مؤلفه‌هایی که دارای بالاترین مقدار بردار ویژه هستند، دارای بیشترین اهمیت در منشأ تغییرات در داده‌ها می‌باشند و آخرین عامل به‌عنوان حداقل فرآیند ایجاد کننده تغییرات شیمیایی است. همبستگی یا رگرسیون[10] در میان متغیرهای کیفیت آب نیز می‌تواند برخی از ارتباط‌های هیدروشیمیایی را آشکار سازد (Wu et al., 2014) این ابزار آماری برای اندازه‌گیری و ایجاد ارتباط بین دو متغیر استفاده می‌شود (Belkhiri et al., 2011). بر اساس میزان غلظت پارامترهای شیمیایی، تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار XLSTAT برای نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی که شامل ۹ متغیر (مقدار کربنات صفر است) است، صورت گرفت. غلظت عناصر اصلی بر اساس میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/L) و میزان هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر (µs/cm) می‌باشد و در دمای ۱۹ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. مقادیر آماری شامل بیشینه و کمینه مقدار، میانگین و انحراف معیار برای عناصر به دست آمد (جدول ۲). ماتریس همبستگی عناصر شیمیایی بر اساس ضریب پیرسون برای متغیرها در جدول ۳ نشان داده شده است. ضریب پیرسون میزان همبستگی خطی بین دو متغیر تصادفی را می‌سنجد. مقدار این ضریب بین ۱- تا ۱ متغیر است که بر اساس آن ۱ به معنای همبستگی مثبت کامل، مقدار صفر به معنی نبود همبستگی و ۱- به معنی همبستگی منفی کامل است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بین مقدار هدایت الکتریکی با عناصر سدیم، کلرید، کلسیم و منیزیم همبستگی زیادی وجود دارد. این همبستگی زیاد نشان‌دهنده این مطلب است که عامل شوری و نامطلوب شدن کیفیت آب، زیاد بودن غلظت عناصر ذکر شده می‌باشد. همبستگی زیاد یون کلرید با سدیم نشان دهنده وجود منبع مشترک برای این دو یون یعنی انحلال هالیت و همچنین همبستگی زیاد میان سولفات با یون‌های کلسیم و منیزیم نشان دهنده انحلال ژیپس و سولفات منیزیم در آب زیرزمینی منطقه موردمطالعه است.

جدول ۲- خلاصه آماری متغیرها.

متغیرها	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
Ca^{2+}	۳/۱	۱۶/۳	۷/۷	۴
Mg^{2+}	۱/۳	۱۰/۷	۴/۳	۳/۱
Na^{+}	۱/۹	۲۱/۱	۹/۴	۵/۷
K^{+}	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۳
SO_4^{2-}	۲	۲۲	۶/۸	۶/۱
Cl^{-}	۱	۲۳/۶	۹/۸	۶/۷
HCO_3^{-}	۲/۷	۶/۲	۴/۳	۰/۸
EC	۶۷۶	۴۱۴۰	۱۹۰۶	۹۹۲/۷
pH	۷/۲	۸/۳	۷/۶	۰/۳

[10] Correlation Coefficient

جدول ۳- ماتریس همبستگی عناصر شیمیایی بر اساس ضریب پیرسون.

متغیرها	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na+	K^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	EC	pH
Ca^{2+}	۱								
Mg^{2+}	**۰/۸۹۷**	۱							
Na^{+}	**۰/۶۵۱**	**۰/۶۶۶**	۱						
K^{+}	**۰/۷۲۹**	**۰/۸۳۸**	۰/۴۶۱	۱					
SO_4^{2-}	**۰/۹۱۷**	**۰/۹۴۶**	۰/۵۲۹	**۰/۷۷**	۱				
Cl^{-}	**۰/۶۶۳**	**۰/۶۴۸**	**۰/۹۸۵**	۰/۴۷۵	۰/۴۸۹	۱			
HCO_3^{-}	۰/۴۱۵	۰/۲۶۲	۰/۵۰۹	۰/۳۲۴	۰/۱۶۶	۰/۵۵۹	۱		
EC	**۰/۶۶۹**	**۰/۶۶۶**	**۰/۹۸۶**	۰/۴۵۵	۰/۵۲۳	**۰/۹۸۷**	۰/۴۴۷	۱	
pH	۰/۳۴۷	۰/۲۲۲	۰/۲۴۸	۰/۳۲۳	۰/۳۱	۰/۱۹۵	۰/۱۵۳	۰/۲۵۱	۱

بر اساس نتایج PCA، مقدار ویژه، درصد تغییرات، درصد تغییرات تجمعی و بارهای عاملی در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق این جدول، ۲ عامل که در مجموع ۸۲/۲ درصد کل تغییرات را شامل می‌شوند، کیفیت منابع آب آبخوان عقیلی را کنترل می‌کنند. عامل اول که ۶۱/۴ درصد و بیشترین تأثیر را بر کیفیت آب آبخوان گذاشته است، مربوط به پارامترهای Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^{+}، K^{+}، Cl^{-}، SO_4^{2-} و EC و عامل دوم که ۲۰/۸ درصد تغییرات را به خود اختصاص می‌دهد، مربوط به pH و HCO_3^{-} می‌باشد. عامل اول مربوط به انحلال کانی‌های تبخیری سازند گچساران مانند ژیپس، انیدریت، هالیت و سیلویت می‌باشد. منشأ این کانی‌ها، سازند گچساران در شرق آبخوان و همچنین انحلال کانی‌های تبخیری موجود در آبرفت است. pH نمونه‌های آب زیرزمینی بین ۷/۲ (AG36) و ۸/۳ (AG29) است و نشان‌دهنده نسبتاً قلیایی بودن منابع آب آبخوان عقیلی می‌باشد. pH در اکثر منابع آبی عمدتاً تحت تأثیر انحلال بی‌کربنات قرار می‌گیرد و در فرآیند انحلال و رسوبگذاری کانی‌هایی مثل کلسیت و دولومیت نقش دارد. با توجه به فوق‌اشباع بودن شاخص کلسیت و دولومیت نمونه‌ها، این کانی‌ها در آب زیرزمینی آبخوان عقیلی رسوب می‌کنند.

جدول ۴- درصد تغییرات، مقدار ویژه و بارهای عاملی.

متغیرها	عامل ۱	عامل ۲
Ca^{2+}	۰/۰۸۶	**۰/۸۳۲**
Mg^{2+}	۰/۰۸۲	**۰/۸۳۶**
Na^{+}	۰/۲۱۱	**۰/۷۶۴**
K^{+}	۰/۱۶۹	**۰/۵۹۴**
SO_4^{2-}	۰/۱۸۹	**۰/۶۹**
Cl^{-}	۰/۲۰۱	**۰/۷۶۶**
HCO_3^{-}	**۰/۶۲۲**	۰/۲۷۵
EC	۰/۲۰۹	**۰/۷۶۱**
pH	**۰/۶۸۳**	۰/۰۱۲
مقدار ویژه	۱/۸۷۰	۵/۵۳
درصد تغییرات	**۲۰/۷۷۴**	**۶۱/۴۴۵**
درصد تغییرات تجمعی	**۸۲/۲۱۹**	**۶۱/۴۴۵**

نتایج PCA یک تفسیر جامع از خصوصیات فیزیکوشیمیایی برخی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد و در شکل ۶ نمودار اسکتر پلات[11] مجموع عامل PC1 بر روی PC2 نشان داده شده است. مطابق این نمودار، چاه AG29 در ربع اول، چاه‌های AG11 و AG20 در ربع دوم، چاه‌های AG8 و AG10 در ربع سوم و همچنین سایر نمونه‌ها در یک قسمت از نمودار در کنار هم متمرکز شده‌اند. برای توضیح این مطلب از نمودار پایپر[12] استفاده شده است. این نمودار توسط نرم‌افزار Aq.QA ترسیم گردیده است.

شکل ۶- نمودار اسکتر پلات مجموع ترکیبات PC1 بر روی PC2.

نمودار پایپر جهت تعیین نوع آب‌ها، رخساره‌های هیدروشیمیایی و مسیرهای تکامل هیدروژئوشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت مشخص کردن تیپ آب در نمودار پایپر از کاتیون‌ها و آنیون‌های عمده استفاده می‌شود. بدین صورت که آنیون‌ها و کاتیون‌هایی که دارای بیشترین غلظت هستند، تعیین کننده تیپ آب زیرزمینی می‌باشند، به‌طوری‌که ابتدا نام آنیون غالب و سپس نام کاتیون غالب می‌آید. با توجه به نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی شکل ۷، آنیون و کاتیون غالب به ترتیب کلرید و سدیم و همچنین تیپ غالب آب زیرزمینی کلرید-سدیم می‌باشد. نمونه AG29 یک چاه نیمه‌عمیق در شمال غرب آبخوان و به عمق ۴ متر است. انحلال نهشته‌های نمکی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی (آبیاری) در فصل مرطوب و همچنین عمق کم چاه، باعث شده است که غلظت عناصری مانند کلرید و سدیم افزایش یابد. در نتیجه افزایش غلظت سدیم و کلرید هالیت رسوب کرده و با خروج سدیم از ترکیب آب و جایگزینی کلسیم به جای آن توسط کانی‌های رسی (تبادل یونی معکوس)، تیپ آب در نمونه AG29 سولفاته-کلسیک شده است. نمونه‌های AG11 و AG20 در شمال شرق آبخوان قرار دارند. به دلیل مجاورت و تغذیه (ابتدای جریان) از سازند کنگلومرای بختیاری، این دو نمونه دارای تیپ آب بی‌کربنات-کلسیم می‌باشند و از کیفیت خوبی نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار هستند. نمونه‌های AG8 و AG10 در مرکز آبخوان قرار گرفته و دارای تیپ آب سدیم-کلرید هستند. هر چند که این محدوده از آبخوان در میانه مسیر تکاملی ژئوشیمیایی آب (بی‌کربناته-سولفاته-کلروره) قرار دارد ولی به علت تغذیه از سازند تبخیری گچساران و مجاور بودن به سازند آغاجاری و بخش لهبری (وجود رسوبات ریزدانه و زمان ماندگاری طولانی آب)، آب این چاه‌ها کیفیت نامطلوبی دارند. بقیه نمونه‌ها (نمونه‌های AG36، AG27، AG5، AG6، AG17، AG7، AG26 و AG9) در نواحی مرکزی و انتهای

[11] Scatter-Plot

[12] Piper Diagram

جهت جریان واقع شده‌اند و به‌جز نمونه AG6، دارای تیپ آب سدیم -کلرید می‌باشند. تیپ آب نمونه AG6 کلسیم-کلرید (تبادل یونی معکوس) است. از سال ۱۳۹۰ به بعد با آبگیری سد گتوند علیا (واقع بر رودخانه کارون)، غلظت عناصر اصلی و همچنین دبی تخصیص‌یافته به شبکه آبیاری و زهکشی (استفاده از آب رودخانه کارون برای آبیاری) آبخوان عقیلی افزایش یافته است (شکل ۸). در مرکز آبخوان تمرکز روستاها و زمین‌های کشاورزی نسبت به سایر نقاط بیشتر است و این امر باعث نفوذ فاضلاب روستاها از طریق چاه‌های جذبی و آب برگشتی کشاورزی به درون آبخوان می‌شود که خود می‌تواند تا حدودی باعث تخریب کیفیت آب زیرزمینی شود. در نتیجه برگشت پساب کشاورزی و روستایی باعث افزایش شوری در این مناطق شده است.

شکل ۷- نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

شکل ۸- نمودار تغییرات درازمدت عناصر اصلی آب رودخانه کارون (ایستگاه سد تنظیمی گتوند).

تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA)

تحلیل خوشه‌ای برای تعیین شباهت نسبی به کار می‌رود که این شباهت، همگنی در ویژگی‌های اندازه‌گیری شده پارامترها را نشان می‌دهد. این روش آماری، کاربرد زیادی در بررسی داده‌های چندمتغیره ازجمله بررسی ارتباط بین متغیرها، سازماندهی نمونه‌ها در قالب ساختارهای معنی‌دار و

نمایش ترکیب کل آب زیرزمینی یک منطقه به تعداد محدودی از خوشه‌ها دارد. تحلیل خوشه‌ای مجموعه‌ای از متغیرها را در داخل خوشه‌های همگن جای می‌دهد (Shrestha and Kazama, 2007). روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی داده‌ها وجود دارد ولی خوشه‌بندی آماری یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که به‌طور گسترده‌ای در علوم زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Belkhiri et al., 2011). شباهت (به‌هم پیوستگی) بین خوشه‌ها و جداسازی خوشه‌های همگن برای مکان‌های نمونه‌برداری براساس فاصله اقلیدسی[۱۳] تعیین می‌شود. فاصله اقلیدسی کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه است و بر طبق رابطه فیثاغورث محاسبه می‌شود. مکان‌های نمونه‌برداری با بیشترین شباهت در گروه اول (خوشه اول) قرار می‌گیرند و سپس با استفاده از یک قانون به‌هم پیوستگی بین نمونه‌ها با انجام تکرار مراحل تا زمانی که همه نمونه‌ها خوشه‌بندی شوند ادامه می‌یابد. برای خوشه‌بندی و قرار دادن نمونه‌ها در گروه‌های جداگانه روش‌های مختلفی وجود دارد. با این مجموعه داده‌های هیدروشیمیایی، روش وارد[۱۴]موفقیت بیشتری برای تشکیل گروه‌هایی (خوشه‌ها) با همگنی و نیز تمایز ژئوشیمیایی بیشتر و یا کم‌تر در مقایسه با روش‌های دیگر مثل میانگین گروه‌های جفت شده وزنی[۱۵] دارد (Cloutier et al., 2008). در شکل ۹ نتایج حاصل از انجام تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی HCA ارائه شده است. تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی HCA، ۲ خوشه برای داده‌های هیدروشیمیایی در نظر گرفته است که بر اساس این داده‌ها، در خوشه اول نمونه‌های AG8 و AG10 (بیشترین شباهت)، در زیر گروه اول از خوشه دوم نمونه‌های AG11 و AG20، زیرگروه دوم از خوشه دوم نمونه AG29 در یک زیر خوشه مجزا و سایر نمونه‌ها (نمونه‌های AG36، AG27، AG5، AG6، AG17، AG7، AG26 و AG9) با یکدیگر تشکیل زیر خوشه‌ی مجزایی را داده‌اند. همان‌طور که در توضیحات بالا ذکرشده است، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و همچنین تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) دارای نتایج یکسانی می‌باشند که علاوه بر نمودارهای گرافیکی (شاخص اشباع، تبادلات یونی، نمودار گیبس، پایپر و ...) می‌توانند اطلاعات سودمندی درباره وضعیت کیفی منابع آبی ارائه دهند. نمونه-هایی که در خوشه‌ها و زیرگروه‌ها در کنار هم قرار گرفته‌اند در نمودارهای تبادلات یونی و شاخص‌های اشباع نیز، نزدیک هم مشاهده می‌شوند.

شکل ۹- نمودار خوشه‌ای نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی.

[13] Eucliden Distanc
[14] Ward Method
[15] Weighted Pair-Group Average

نتیجه‌گیری

کیفیت آب زیرزمینی متأثر از عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی، زمان تماس آب با سنگ، لیتولوژی در مسیر جریان آب، فعالیت‌های انسانی و عوامل بیولوژیکی می‌باشد. در این پژوهش به بررسی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان عقیلی با استفاده از روش‌های گرافیکی (شاخص اشباع، نمودارهای تبادلات یونی، نمودار گیبس و نمودار پایپر) و آماری (PCA و HCA) پرداخته شده است. شاخص‌های اشباع نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به دولومیت و کلسیت فوق‌اشباع و نسبت به ژیپس و هالیت تحت‌اشباع می‌باشند. کانی‌های کلسیت و دولومیت در آب زیرزمینی در حال رسوبگذاری و ژیپس و هالیت در حال انحلال هستند. نمودارهای تبادلات یونی نیز نشان می‌دهد که برخی نمونه‌ها که از محل تغذیه دور هستند، تبادل یونی معکوس را متحمل شده‌اند. نمودار گیبس نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر واکنش میان آب و سنگ است و تبخیر نقش کمتری را در تغییر کیفیت ایفا می‌کند. بر اساس نمودار پایپر، تیپ غالب نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان عقیلی، کلرید-سدیم است. ماتریس همبستگی عناصر شیمیایی بیان‌کننده وجود همبستگی زیاد میان یون کلرید با سدیم و همبستگی زیاد بین یون سولفات با یون‌های کلسیم و منیزیم می‌باشد. این همبستگی به‌ترتیب نشان دهنده انحلال هالیت، انحلال ژیپس و سولفات منیزیم در آب زیرزمینی منطقه موردمطالعه است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان می‌دهد که دو عامل در مجموع ۸۲/۲ درصد کل تغییرات را شامل می‌شوند، کیفیت منابع آب آبخوان عقیلی را کنترل می‌کنند. عامل اول که ۶۱/۴ درصد و بیشترین تأثیر را بر کیفیت آب آبخوان گذاشته است، مربوط به پارامترهای Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^{+}، K^{+}، Cl^{-} و SO_4^{2} و عامل دوم که ۲۰/۸ درصد تغییرات را به خود اختصاص می‌دهد، مربوط به pH و HCO_3^{-} می‌باشد. نتایج تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) نیز نشان داد که نمونه‌های آب زیرزمینی در دو خوشه قرار گرفته‌اند. بر اساس این پژوهش، روش‌های گرافیکی و آماری دارای نتایج یکسان و بیان کننده این مطلب هستند که مهم‌ترین عامل در تخریب کیفیت آب زیرزمینی آبخوان عقیلی می‌توان به تغذیه از سازند گچساران و واکنش آب و سنگ در مسیر جریان اشاره کرد. همچنین تبخیر و فعالیت‌های انسانی (پساب کشاورزی و مناطق روستایی) در تغییر کیفیت و افزایش شوری آب زیرزمینی آبخوان عقیلی تا حدودی دخیل هستند.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی و گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز که در انجام این پژوهش، همکاری و مساعدت کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

جلالی، ل.، اصغری مقدم، ا.، ۱۳۹۲. تشخیص وضعیت هیدروژئوشیمیایی و روند شوری در سفره آب زیرزمینی دشت خوی به روش‌های آماری و هیدروشیمیایی. مجله محیط‌شناسی، ۳۹(۲): ۱۱۳-۱۲۲.

حسن‌زاده، ب.، عباس‌نژاد، ا.، ۱۳۹۷. فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی بخش میانی دشت نوق (غرب استان کرمان). مجله هیدروژئولوژی، ۳(۲): ۴۶-۵۸.

روحی، ح.، کلانتری، ن.، محمدی بهزاد، ح.، دانشیان، ح.، ۱۳۹۲. بررسی عوامل مؤثر بر خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت الباجی). مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۳(۳,۹): ۱-۹.

کریمی، ث.، محمدی، ض.، سامانی، ن.، ۱۳۹۶. بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی آب زیرزیرزمینی و روند تکامل شوری آن در دشت سمنان. هیدروژئولوژی، ۲(۱): ۱-۱۹.

کلانتری، ن.، پوراکبری، س.، محمدی بهزاد، ح.، عقدکی، ی. ۱۳۹۱. بررسی هیدروژئوشیمیایی مناب آب تاقدیس کارستی کی نو، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، تهران.

کلانتری، ن.، عنبری، ا.، محمدی، ه.، ۱۳۹۷. بررسی هیدروشیمیایی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بستان با استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره. مجله تحقیقات منابع آب، ۱۴(۲): ۲۳۶-۲۴۸.

مقیمی، ه.، ۱۳۸۵، هیدروژئوشیمی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۲۱۳ ص.

نادری، ک.، ندیری، ع.، اصغری مقدم، ا.، کرد، م.، ۱۳۹۷. ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمی آبخوان دشت سلماس با

استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره. مجله اکوهیدرولوژی، ۵(۳): ۷۹۱-۸۰۰.

نجاتی جهرمی، ز.، چیت‌سازان، م.، میرزایی، ی.، ۱۳۸۷. بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت عقیلی با استفاده از GIS با تأکید بر مصارف کشاورزی. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، بهمن‌ماه ۱۳۸۷، دانشکده مهندسی علوم و آب، چمران اهواز.

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

Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., 2011. A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data. International Journal of Environmental Research, 5(2): 537-544.

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): 294-313.

Davis, J.C., 1986. Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons Inc New York, 646 p.

Igibah, Ch., Tanko, J., 2019. Assessment of urban groundwater techniques: a case study in the Abuja, quality using Piper trilinear and multivariate North -central, Nigeria. Environmental Systems Research, 8:(14).

Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170(3962): 1088-1090.

Glynn, P.D., Plummer, L.N., 2005. Geochemistry and the understanding of ground-water systems, Hydrogeology Journal. 1:263-287.

Guler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, A.K., 2002 .Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology journal, 10: 455-474.

Hounslow, A., 1995. Water quality data: analysis and interpretation. CRC press.

Isa, N.M., Aris, A.Z., Lim, W.Y., Sulaiman, W.N.A.W., Praveena, S.M., 2014. Evaluation of heavy metal contamination samples from Kapas Island, Terengganu, Malaysia. Arabian Journal of Geosciences in groundwater, 7(3): 1087-1100.

Mokhtari, H., Espahbod, M.R., 2009. Hydrodynamic parameters of water potential of Varamin plain with regard to salinity gradient changes, Quarterly Journal of Earth, 4(2).

Rajmohan, N., Elango, L., 2004. Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. Environmental Geology, 46(1): 47-61.

Shrestha, S., Kazama, F., 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. Journal of Environmental Modeling & Software, 22(4): 464-475.

Stat Soft Inc. 2004. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 6.

Suresh Nathan, N., Saravanane, R., Sundararajan, T., 2017. Spatial Variability of Ground Water Quality Using HCA, PCA and MANOVA at Lawspet, Puducherry in India. Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 6: 243-268.

Wu, J., Li, P., Qian, H., Duan, Z., Zhang, X., 2014 .Using correlation and multivariate statistical analysis to identify hydrogeochemical processes affecting the major ion chemistry of waters: a case study in Laoheba phosphorite mine in Sichuan, China. Arabian Journal of Geosciences, 7(10): 3973-3982.