

ارزیابی توسعه‌ی کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در آبخوانهای شاهو و اسلام‌آباد استان کرمانشاه

امجد ملکی* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه.
سارا محمدی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.
حاجی کریمی - دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام.
علی اکبر زینتی‌زاده - دانشیار گروه شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸

چکیده

بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها در لندفرم‌های کارستی زاگرس می‌تواند راهنمای مناسبی برای تعیین میزان تکامل و توسعه‌ی کارست و مدیریت منابع آب این مناطق باشد. هدف این پژوهش مقایسه‌ی توسعه‌یافتگی کارست به کمک ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی توده‌ی شاهو در زاگرس رورانده و آبخوان اسلام‌آباد در محدوده‌ی زاگرس چین‌خورده است. ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و مطالعات میدانی لندفرم‌های کارستی مناطق مورد مطالعه شناسایی شد. سپس ۱۷ نمونه آب از چشمه‌های دائمی منطقه در فصل تر (اردیبهشت ماه ۹۶) برداشت و در آزمایشگاه شیمی دانشگاه رازی تجزیه گردید. وضعیت هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های فوق با استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور شناسایی فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان‌ها، نمودارهای ترکیبی، نسبت‌های یونی و اندیس‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژیبس نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و جهت صحت‌سنجی داده‌ها از نمودار MRDs استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که سیستم کارستی آبخوان شاهو نسبت به آبخوان اسلام‌آباد توسعه یافته‌تر است. رخساره‌ی کلسیتی، نسبت بالای Ca^{2+} به Mg^{2+} و پایین بودن شاخص اشباع دولومیت در شاهو که بیانگر خلوص بالای آهک است و بالا بودن نسبت دبی حداکثر به حداقل، که بیانگر تراکم بیشتر مجاری باز و وجود جریان مجرای - انتشاری (آشفتة - خطی) در آبخوان شاهو است نیز تایید کننده مطلب است. در مقابل، پایین بودن نسبت Ca^{2+} به Mg^{2+} در آبخوان اسلام‌آباد و بالا بودن شاخص اشباع دولومیت، مبین دولومیتی بودن کارست در این محدوده است. پایین بودن نسبت دبی حداکثر به حداقل در چشمه‌های محدوده‌ی اسلام‌آباد نیز نشان‌دهنده‌ی وجود جریان انتشاری در آبخوان‌های این محدوده و عدم توسعه‌ی کامل کارست است.

واژگان کلیدی: کارست، هیدروژئوشیمیایی، چشمه‌ی کارستی، کرمانشاه.

مقدمه

مساحت زیادی از خشکی‌های کره‌ی زمین از سنگ‌های آهکی و قابل انحلال پوشیده شده است و بیشتر جمعیت جهان بر روی این نواحی زندگی می‌کنند. به این ترتیب محیط زندگی انسان‌ها به گونه‌ای بسیار پیچیده با سنگ‌های کربناتی در هم آمیخته شده است. تقریباً یک پنجم سطح زمین را سنگ‌های کربناتی با خصوصیات فیزیکی پیچیده پوشانده است (لامورکس^۱، ۱۹۹۱).

اهمیت اصلی پهنه‌های کربناته (کارستی) در حجم قابل توجه آب‌های زیرزمینی موجود در سازندهای کارستی است. این مخازن آب هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی عموماً مطلوب‌اند و به مصرف شرب می‌رسند؛ به طوری که براساس تخمین فورد و ویلیامز حدود ۲۵ درصد از جمعیت جهان مخصوصاً در آسیا، مدیترانه و ایالات متحده نیاز آبی خود را از سیستم کارست تأمین می‌کنند (فورد و ویلیامز^۲، ۲۰۰۷). این موضوع برای سرزمینی مانند ایران که از یک سو به دلیل شرایط اقلیمی از منابع آب کافی برخوردار نیست و از سوی دیگر حدود ۱۱ درصد مساحت آن را سنگ‌های کربناته می‌پوشاند، اهمیت دارد (وحدتی و همکاران، ۱۳۸۶، ۸۸). لذا بررسی رفتار آبخوان‌های کارستی ضروری و مهم به نظر می‌رسد.

رفتار آبخوان‌های کارستی به دو نوع پارامترکیفی مهم بستگی دارد که عبارتند از نوع جریان و درجه‌ی کارستی شدن. تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه روش مناسبی برای بررسی نوع جریان است و شناخت ویژگی‌های کارست براساس شاخص‌های هیدروگرافی چشمه‌ها قابل انجام است (بوناجی، ۱۹۹۳). درجه کارستی شدن درونی از روش‌های زیادی استنباط شدنی است که از بین آنها روش‌های هیدروژئوشیمیایی، اطلاعات قابل قبول تری نسبت به سایر پارامترها به دست می‌دهد (قدیمی و همکاران، ۱۳۹۳).

دسته‌بندی‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌های کارستی از جمله روش‌هایی است که می‌تواند بر مبنای توزیع آنیون-کاتیون‌ها و شرایط فیزیکوشیمیایی آب‌های خروجی از منابع کارستی انجام گیرد. این موضوع توسط پژوهشگرانی همچون اندری^۳ (۲۰۰۵)، مراد^۴ (۲۰۱۱)، گاستمن^۵ (۲۰۱۰)، آپلو و پوستما^۶ (۱۹۹۳) مورد بررسی قرار گرفته است.

از آنجاییکه کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی نتیجه کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از لحظه ورود آب جوی تا زمان خروج آن از چشمه بر روی آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد و کارستی شدن در آبخوان‌های کربناته مشروط به ترکیبات شیمیایی و معدنی، لیتولوژی، فرآیندهای ژئوشیمیایی مهم و زمان ماندگاری آب است، تشخیص مجموعه‌ای از شرایط هیدروژئولوژیکی و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی که در آبخوان کارستی کیفیت آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند، ضروری است.

ملاحظات هیدرودینامیکی، هیدروشیمیایی و ویژگی‌های ایزوتوپی در خروجی سامانه‌های کارستی، وابسته به شرایط جریان غالبی است که بر آبخوان حاکم است. به عبارتی چرخه هیدرولوژیکی، سامانه تغذیه و تخلیه و ویژگی‌های یونی و ایزوتوپی چشمه‌ها بیانگر میزان توسعه کارستی حاکم بر یک ناحیه‌اند. از همین رو، در چند دهه اخیر به علت پدید آمدن مشکلات کم آبی و ارتباط پدیده‌های کارستی با مسائل منابع آب، کارست به طور روزافزون مورد توجه قرار گرفته است (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸، ۵۲) و مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است. افرادی از جمله کریمی و همکاران (۲۰۰۵)،

1. La Moreaux
2. Ford , Williams
3. Andre
4. Murad
5. Gastmans
6. Appelo, Postma

ژان باومین^۱ (۲۰۰۹)، وندلند^۲ (۲۰۰۷)، یانگ هان^۳ (۲۰۱۲)، آنتونیو^۴ (۲۰۱۲) و جون^۵ (۱۹۹۳) با استفاده از ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌ها به بررسی توسعه و میزان تکامل هیدروشیمیایی آبخوان‌های کارستی پرداخته‌اند. تقسیم آبخوان‌های کارستی به آبخوان‌های کانالی، افشان و افشان-کانالی نیز می‌تواند انعکاسی از رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی و تحول کارست در یک پهنه کارستی باشد (باقری و همکاران، ۱۳۹۲). روش‌های متعددی برای شناخت رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی وجود دارد. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به روش ایزوتوپ‌های پایدار، هیدروژئولوژی و روش‌های هیدروژئوشیمیایی اشاره کرد (بوناچی، ۱۹۹۳). از اینرو ارزیابی چرخه هیدرولوژیکی، سامانه تغذیه و تخلیه و ویژگی‌های یونی و ایزوتوپی چشمه‌ها بیانگر میزان توسعه کارستی حاکم بر یک ناحیه، شناخت رژیم جریان و تقسیم‌بندی آبخوان‌های کارستی است. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه صورت گرفته است از جمله‌ی این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

براساس مطالعاتی که پلامر^۷ (۲۰۰۲)، بلخیری^۸ (۲۰۱۰)، استوتلر^۹ (۲۰۰۹) و راجموهان و النگو^{۱۰} (۲۰۰۴) انجام دادند برهم کنش آب-سنگ، جهت جریان یا ارتباط هیدرولیکی آبخوان‌ها با هم و نیز احتمال اثرات غیر روتین در آب‌های زیرزمینی و کارست را می‌توان از تحلیل‌های هیدروژئوشیمی استنباط کرد. لذا هدف این پژوهش مقایسه‌ی توسعه‌یافتگی کارست با تاکید بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی به عنوان مهمترین عوامل پاسخ دهنده به شرایط ژئومورفولوژی و سنگ‌شناسی کربناته در دو سیستم کارستی تاقدیس شاهو و آبخوان‌های اسلام‌آباد است. با وجود اهمیت این موضوع تاکنون مطالعه‌ی جامعی در این زمینه و با هدف پایش منابع آب انجام نشده است. بخش اعظمی از مساحت استان کرمانشاه در محدوده‌های کارستی زاگرس واقع شده است. آبخوان‌های موجود در این محدوده متأثر از سازندها و شرایط اقلیمی حاکم بر آن‌ها از میزان تحول متفاوتی برخوردار می‌باشند. شناسایی نوع و میزان این تحول می‌تواند در مدیریت و بهره‌برداری از آن‌ها در شرایط حساس بحران آب در کشور و استان بسیار حائز اهمیت باشد، زیرا آگاهی از میزان تحول می‌تواند اطلاعات ذی‌قیمتی درخصوص تغذیه و جریان و تخلیه‌ی آبخوان‌ها در اختیار متخصصین مربوطه قرار دهد. بنابراین بررسی خصوصیات هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی جهت مقایسه درجه‌ی تحول و حجم ذخیره‌ی آب زیرزمینی و و ارائه راهکارهای مدیریتی به منظور مدیریت بهینه‌ی آن‌ها لازم و ضروری است. لذا در پژوهش حاضر به بررسی میزان تحول این آبخوان‌ها با استفاده از مطالعات هیدروژئوشیمیایی پرداخته شده است.

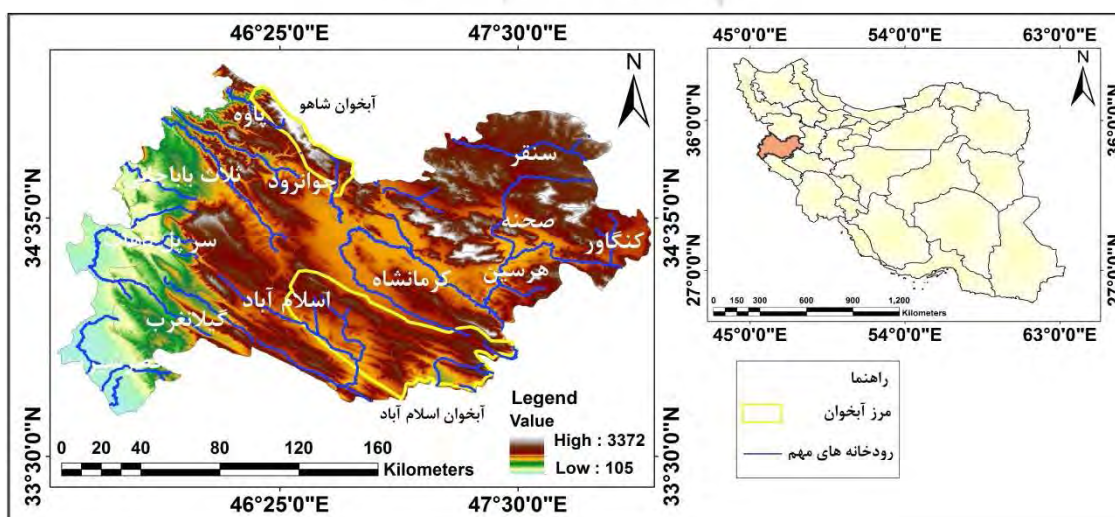
محدوده‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه به ترتیب در توده‌ی شاهو در واحد زاگرس شکسته (مرتفع) و آبخوان‌های اسلام‌آباد در زاگرس چین‌خورده در استان کرمانشاه قرار گرفته است. جهت یافتگی اصلی تاقدیس شاهو و آبخوان‌های اسلام‌آباد، شمالغربی جنوب‌شرقی است. هریک از این واحدها در دوره‌های زمین‌شناسی با توجه به موقعیتی که دارند شرایط رسوبی و تکتونیکی متفاوتی داشته‌اند. همین امر در شکل‌گیری لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی متفاوت در هر دو تاثیر اساسی داشته است. توده‌ی

1. Zhang Baomin
2. Wendland
3. Yong Han
4. Antonio
5. John
6. Bonacci
7. Plummer
8. Belkhiri
9. Stotler
10. Rajmohan N, Elango L

شاهو با مساحت ۳۶۹ کیلومتر مربع در محدوده‌ی سیاسی استان‌های کردستان و کرمانشاه بین عرض‌های شمالی ۱۲" ۴۵' ۳۴° تا ۱۰' ۴۸" ۳۵° و طول‌های شرقی ۴۸' ۱۶" ۴۶° تا ۴۵' ۴۶° واقع شده است. شهرهای پاوه و روانسر در دامنه جنوبی این ناهمواری قرار گرفته‌اند. جریان‌های خروجی از ارتفاعات شاهو اعم از چشمه و رودخانه از طریق دو شبکه جداگانه، یکی در شرق (حوضه آبریز قره‌سو) و دیگری در غرب (حوضه آبریز سیروان) وارد کشور عراق شده و از آنجا به حوضه آبریز خلیج فارس می‌پیوندند.

در منطقه شاهو، عوارض کارستی عمدتاً در سازند آهکی بیستون شکل گرفته‌اند. آهک‌های ضخیم بیستون (تقریباً ۳۰۰۰ متر) رسوب‌های پلاتفرمی به شدت چین‌خورده‌ای هستند که تکوین آن‌ها از تریاس بالایی تا کرتاسه میانی - پایانی (سنومنین) به طول انجامیده است و تفاوت آن با رسوب‌های زاگرس چین‌خورده از نظر رخساره و ضخامت نشان می‌دهد که در قلمرو پارینه جغرافیایی مشخصی، جدا از پلاتفرم عربی تشکیل شده است. از منظر زمین‌ساختی، آگارد و همکاران (۲۰۰۵)، به چند مرحله عمده در اواخر کرتاسه، اواخر ائوسن و پس از میوسن میانی اشاره می‌کنند که ناهمواری‌های این منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند و مر (۱۹۷۷) به بالا آمدگی‌های بزرگ و گسترده پلیوسن اشاره می‌کنند که سبب ارتفاع یافتن سطوح فلویو و کارست و پایین آمدن سطح اساس شده و توسعه عظیم کانیون‌های حاشیه‌ای شاهو را به همراه داشته است. مجموعه این حرکات زمین‌ساختی، سبب بالا آمدگی و خرد شدن طاقدیس‌ها و ناودیس‌ها، رورانگی و ایجاد گسل‌ها و سیستم درز و شکاف‌های متعدد در جهات مختلف شده است و تأثیر مستقیمی در تحول کارست‌های این منطقه بر جای گذاشته است (قربانی و همکاران، ۱۳۸۸ به نقل از آگارد و مر). البته با وجود وسعت زیاد سازند بیستون در آبخوان شاهو، کارست سطحی شامل فروچاله‌های کارستی با مساحت ۱۴۰ کیلومتر مربع در بخش محدودی (تقریباً یک چهارم مساحت این سازند در ارتفاع ۱۹۰۰ متر به بالا) توسعه پیدا کرده است (شکل ۲-الف). برای بررسی نقش زمین‌ساخت در توسعه کارست‌های منطقه، میتوان به انطباق جهت‌یافتگی قطر طویل فروچاله‌ها با اختلاف اندکی بر جهت غالب گسل‌های منطقه که شمال غربی - جنوب شرقی است و تأثیر گسل‌ها بر تحول کارست اشاره کرد (قربانی و همکاران، ۱۳۸۸). آبخوان‌های حوضه‌ی اسلام‌آباد با مساحت ۱۸۰۸ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۱۲" ۱۷' ۴۶° تا ۲۴" ۲۹' ۴۷° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶" ۴۵' ۳۳° تا ۲۴" ۲۰' ۳۴° شمالی قرار گرفته است. ارتفاع بلندترین قله‌ی آن ۱۷۰۰ متر است. مهمترین سازندهای کربناته در آبخوان‌های اسلام‌آباد، آهک آسماری و سازند تله زنگ است (شکل ۱). به دلیل متفاوت بودن قابلیت انحلال سازندهای مختلف زاگرس، در این پژوهش به بررسی میزان انحلال کانیون‌ها، آنیون‌ها به منظور تعیین میزان کارستی شدن دو منطقه پرداخته شده است.

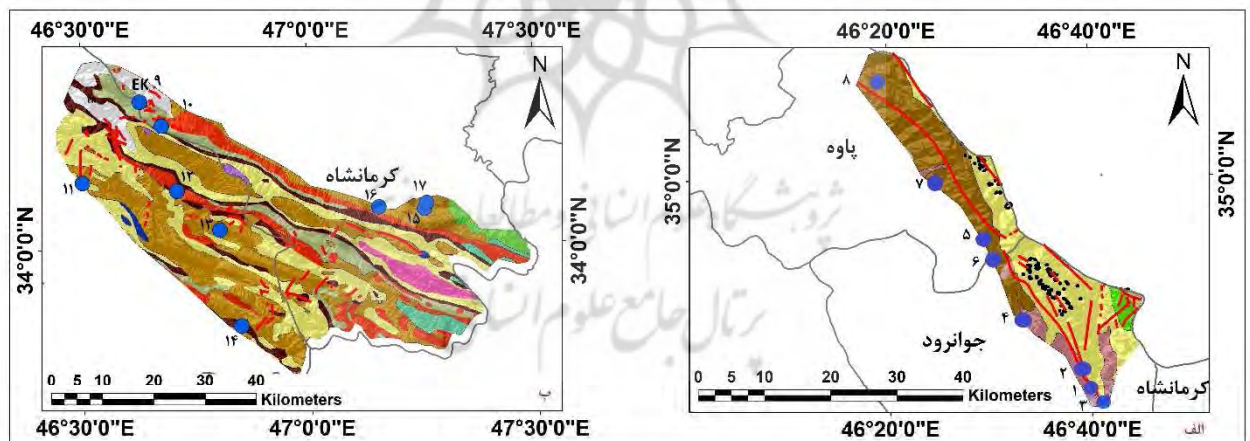


شکل ۱: موقعیت آبخوان شاهو و آبخوان های اسلام آباد در استان کرمانشاه

مواد و روش

روابط کمی و هیدروژئوشیمیایی متعددی جهت توضیح رفتار هیدرودینامیک چشمه ها وجود دارد. در هر چشمه ی کارستی یک یا چند رژیم جریان خطی یا آشفته به تخلیه ی آبخوان کارستی می پردازد. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی در آبخوان شاهو و آبخوان های اسلام آباد است. با استفاده از روابط یونی، نمودارهای ترکیبی و اندیس های اشباع کلسیت و دولومیت می توان بسیاری از ویژگی های آبخوان های کارستی و میزان انحلال آنیون، کاتیون ها و کارستی شدن دو منطقه را بررسی کرد.

جهت نیل به این منظور، پس از بازدیدهای صحرایی از محدوده های مورد مطالعه، اشکال و لندفرم های کارستی، گسل ها و شکستگی ها شناسایی و موقعیت هر یک از آن ها با استفاده از GPS مشخص گردید. با توجه به تفاوت های دو محدوده از منظر توسعه یافتگی کارست، زمین شناسی، تفاوت در سنگ شناسی کربناته، شرایط ژئومورفولوژی و شرایط اقلیمی، پس از تهیه ی نقشه ی زمین شناسی و محاسبه میانگین بارش و دمای بلندمدت محدوده های مورد مطالعه، جهت ارزیابی هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی، ۱۷ نمونه آب از یک آبخوان کارستی مشتمل بر ۸ چشمه در شاهو و پنج آبخوان کارستی شامل ۹ چشمه در اسلام آباد در فصل تر (اردیبهشت ماه ۱۳۹۶) برداشت گردید که موقعیت آن ها در شکل ۲ و ویژگی های آن ها در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: نقشه ی زمین شناسی، چاله های کارستی و موقعیت چشمه ها در الف) آبخوان شاهو ب) آبخوان اسلام آباد (شماره ی چشمه ها روی نقشه و نام چشمه در جدول شماره ۳ آورده شده است)

پارامترهای محیطی از قبیل هدایت الکتریکی (EC)، pH و دمای آب علاوه بر محل نمونه‌برداری در آزمایشگاه نیز در ۲۵ درجه‌ی سلیسوس اندازه‌گیری شد. سپس یون‌های این نمونه‌ها شامل کاتیون‌های (Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^{2+} و K^{2+}) و آنیون‌های (HCO_3^- ، Cl^- ، SO_4^{2-}) طبق روش استاندارد در آزمایشگاه شیمی دانشگاه رازی مورد تجزیه قرار گرفت. برای کلیه‌ی نمونه‌ها موازنه یونی انجام گرفته و در نمونه‌هایی که خطای تعادل یونی بیش از ۵ درصد بود تکرار گردید. پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز با توجه به هدف کار از نرم افزار PhreeQC (جهت محاسبه‌ی نمایه‌ی اشباع کلسیت، دولومیت و ژپیس)، دیگرام ترکیبی احمد جهت تشخیص تیپ آب و نرم افزار تخصصی آماری R (محاسبه‌ی تحلیل عاملی و ماتریس همبستگی) استفاده شد. نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم، TDS، تغییرات نسبت‌های ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) و غلظت SO_4^{2-} در نمونه‌های آب با استفاده از داده‌های موجود محاسبه گردید.

کل مواد جامد محلول در آب (TDS)

کل مواد جامد محلول عبارت است از مجموع مقادیر تمام کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر (تود)، (۱۹۸۰).

سختی کل

سختی آب به غلظت کاتیون‌های دو ظرفیتی (کلسیم و منیزیم) وابسته است و معمولاً واحد آن میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم است. سختی آب به دو گروه تقسیم می‌شود: سختی کربناته و سختی غیرکربناته. سختی کربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم است که با آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات ترکیب می‌شوند. سختی غیرکربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم است که با آنیون‌های غیر از کربنات و بی‌کربنات (مانند سولفات) ترکیب می‌شوند. در مطالعه‌ی سختی آب معمولاً این دو نوع سختی (سختی کربناته و غیرکربناته) از یکدیگر تفکیک نمی‌شوند و به صورت مجموع محاسبه می‌شوند که به آن سختی کل گفته می‌شود. برای محاسبه‌ی سختی کل نمونه‌های آب از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌شود.

$$H = 2.5 * (\text{Ca}) + 4.5 * \text{Mg} \quad (1)$$

که در آن H مقدار سختی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم است. Ca^{2+} و Mg^{2+} به ترتیب غلظت‌های کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌گرم در لیتر است. برای تعیین نوع آب، براساس سختی از رابطه‌ی رایج تاد (۱۹۸۰) استفاده می‌شود. در این طبقه‌بندی بر اساس سختی کل آب‌ها به چهار گروه تقسیم شدند. مقادیر مثبت SI نشان‌دهنده‌ی فوق اشباع بودن آب نسبت به کانی است و مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی تحت اشباع بودن است و مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی حالت تعادل است (تود، ۱۹۸۰).

جدول ۱: طبقه‌بندی آب‌ها براساس سختی کل (قدیمی و همکاران، ۱۳۹۲)

گروه	۱	۲	۳	۴
میزان سختی کل	کمتر از ۷۵	۷۵-۱۵۰	۱۵۰-۳۰۰	بیشتر از ۳۰۰
نوع آب	نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت

نسبت کلسیم به منیزیم ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$)

نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم در سفره‌های کارستی کربناته شاخص بسیار مناسبی برای تشخیص سفره‌های کارستی آهکی از سفره‌های کارستی دولومیتی است. به طور کلی، نسبت‌های نزدیک به ۱ مربوط به سفره‌های کارستی

دولومیتی و نسبت‌های بین ۲ تا ۱۰ مربوط به سفره‌های کارستی آهکی است. در صورتی که نسبت‌های بالای ۱۰ در آب های کارستی مشاهده شود، نشان‌دهنده درصد خلوص بالاتر آهک و یا وجود کانی‌های ژیبس یا انیدریت در تشکیلات آهکی است. معمولاً نسبت‌های کمتر از ۱ در تشکیلات کربناته مشاهده نمی‌شود، به استثنای مواردی که فرار گاز دی‌اکسیدکربن از آب زیرزمینی در لایه آبدار دولومیتی موجب رسوب آراگونیت یا کلسیت شود و بدین ترتیب غلظت یون منیزیم در آب بالا می‌رود. برای محاسبه‌ی این پارامتر، غلظت‌های دو کاتیون کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر در نظر گرفته می‌شود (فوردر و ویلیامز، ۲۰۰۷).

کیفیت آب چشمه‌ها و شاخص اشباع

محاسبات تعادل کانی‌ها در آب زیرزمینی، در پیش‌بینی حضور کانی‌های واکنشی و برآورد میزان واکنش این کانی‌ها دارای اهمیت است. چنانچه شاخص اشباع (SI) برای یک کانی بیشتر از صفر باشد، آب از این کانی فوق اشباع بوده و ممکن است در آن رسوب کند ولی اگر شاخص اشباع کمتر از صفر باشد، آب نسبت به این کانی تحت اشباع بوده و می‌تواند بیشتر از آن نیز انحلال یابد و چنانچه شاخص اشباع صفر باشد به این معنی است که محلول نسبت به کانی اشباع و واکنش در حالت تعادل می‌باشد از این رو محاسبه‌ی شاخص اشباع کانی‌ها لازم و ضروری است. دو روش برای محاسبه‌ی شاخص اشباع وجود دارد. روش اول محاسبه‌ی شاخص اشباع به کمک رابطه‌ی ۲ است (فوردر و ویلیامز، ۲۰۰۷).

$$\text{SI} = \text{Log}(\text{IAP}/\text{KS}) \quad ۲$$

در این رابطه (IAP) محصول فعالیت یونی و (KS) ثابت انحلال‌پذیری کانی مورد نظر در حالت تعادل است. مقدار KS از منابع مربوطه اخذ و IAP با توجه به فعالیت‌های شیمیایی کانی تجزیه شده محاسبه می‌شود و از نسبت این دو، اشباعیت کانی در آب زیرزمینی از رابطه ۲ به دست می‌آید (جوانمرد و همکاران، ۱۳۹۵). روش دوم استفاده از نرم افزار PhreeQC برای محاسبه شاخص اشباع است. میزان شاخص اشباع کانی‌ها بسته به نوع مواد محلول، اسیدیته، دما و کل مواد جامد محلول متغیر است. در این مطالعه برای تعیین میزان اشباع آب چشمه‌ها از کلسیت و دولومیت شاخص اشباع این کانی‌ها برای نمونه‌های آب زیرزمینی با استفاده از نرم افزار PhreeQC محاسبه شده است.

تحلیل عاملی

در این مطالعه، داده‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب توسط نرم افزار SPSS 19 پردازش و تحلیل آماری شد و فرآیند تحلیل عاملی برای داده‌های فوق با سطح معنای $P < 0.05$ محاسبه گردید. نخست با استفاده از آماره KMO مناسب بودن داده برای تحلیل عاملی بررسی شد.

فرآیندهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی معمولاً پیچیده هستند و این پیچیدگی با توزیع‌های غیریکنواخت در بسیاری از اندازه‌گیری‌ها نمایان تر می‌شود. اندازه‌گیری‌های زمانی و مکانی فرآیندهای فیزیکی یا شیمیایی معمولاً نمی‌توانند به وضوح فرآیندهای اصلی حاکم را با کاهش داده‌ها و طبقه‌بندی، تفسیر یا آشکار کنند. تحلیل عاملی روش آماری چند متغیره‌ای است که هدف آن ساده کردن مجموعه‌های پیچیده و مختلفی است که بین متغیرهای مشاهده‌ای وجود دارد. تحلیل عاملی ارتباط بین واریانس-کوواریانس یک تعداد از متغیرهای کمی مشاهده‌ای است که بر حسب چند کمیت اصلی تصادفی اما غیرمشاهده‌ای که عامل نامیده می‌شود، بیان می‌شود. تعدادی از متغیرها که بیشترین همبستگی را با یکدیگر دارند، عامل اصلی نامیده می‌شوند. در بررسی‌های هیدروژئوشیمی، نتایج تجزیه شیمیایی آب و داده‌های اندازه-گیری شده صحرايي که تحت فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی موجود در سفره آبدار تغییر می‌کنند، به عنوان متغیرهای مشاهده‌ای در نظر گرفته شده‌اند. اولین گام در این روش تهیه یک ماتریس همبستگی از تمام متغیرهای بررسی شده است.

اساس ماتریس همبستگی، ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد (رابطه ی ۳).

رابطه‌ی ۳

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n - 1)s_1 s_2}$$

X و Y مقادیر مربوط به هریک از متغیرها، \bar{x} و \bar{y} میانگین ریاضی این متغیرها، n تعداد داده‌ها، s_1 کرده، از میان عوامل حاصل اولین عامل بیشترین واریانس را شامل می‌شود و به ترتیب عوامل بعدی مقادیر کمتری از واریانس را نشان می‌دهد. ضرایب بالای پارامترهای به دست آمده (مثبت یا منفی) که تشکیل دهنده هریک از عوامل هستند نشان‌دهنده تأثیر بالای آن متغیر (مثبت یا منفی) می‌باشد. همچنین می‌توان از چرخش عامل‌ها برای تفسیر ساده‌تر عوامل مؤثر ماتریس عامل‌های حاصل استفاده کرد که به این وسیله ماتریس عامل‌ها به یک ساختار ساده ارتوگنال تبدیل می‌شوند (جوانمرد و همکاران، ۱۳۹۵).

نمودار ترکیبی احمد (MRDs¹)

برای بررسی نوع آب زیرزمینی و واکنش‌های موجود در آبخوان از دیاگرام ترکیبی ابداعی توسط احمد و همکاران در سال ۲۰۰۳ استفاده شد و سپس این نمودار به روش احمد تفسیر شد. این گراف به وسیله‌ی کاتیون‌هایی که در مجاور آنیون‌ها قرار می‌گیرند طراحی شده است (شکل ۳). در این روش، کاتیون‌های کلسیم، منیزیم و سدیم+پتاسیم روی محور افقی و آنیون‌های کربنات+بی‌کربنات، سولفات و کلراید روی محور عمودی قرار می‌گیرند. هر کدام از محورهای افقی و عمودی به سه محور کوچکتر که از صفر تا صد تقسیم‌بندی شده است تقسیم می‌شود. بر روی محور عمودی هریک از سه بخش کوچک تغییرات کاتیون‌ها و بر روی محور افقی آن‌ها تغییرات آنیون‌ها درج شده است. در این روش (سدیم+پتاسیم) و (کربنات+بی‌کربنات) می‌شود زیرا در نمودار پایپر از نظر ترکیبات شیمیایی مشابه هستند. پس به جای جمع سدیم و پتاسیم یون سدیم را درج می‌کنیم و به جای جمع کربنات و بی‌کربنات، یون بی‌کربنات را درج می‌کنیم. با استفاده از نه پلات کوچک در گراف MRDs، آب به کلسیم بی‌کربنات، منیزیم بی‌کربنات، سدیم بی‌کربنات، کلسیم سولفات، منیزیم سولفات، سدیم سولفات، کلسیم کلراید، منیزیم کلراید و سدیم کلراید تقسیم می‌شود. غلظت کاتیون و آنیون‌ها به صورت درصد کلی آن‌ها روی دیاگرام نشان داده می‌شود (نیاز احمد و همکاران، ۲۰۰۳).

جهت مشخص کردن نوع آب که سازند تغذیه‌کننده‌ی چشمه را مشخص می‌کند پس از آنالیز ۱۷ نمونه آب که آنالیز دو مورد آن در جدول ۲ آورده شده است. درصد هر کدام از کاتیون‌ها و آنیون‌ها را گرفته و نتایج آن در جدول شماره ۳ آمده است. سپس از بین هر کاتیون و آنیون، بالاترین مقدار مشخص شده و بر روی نمودار به صورت یک نقطه نشان داده شده است. برای مثال در این پژوهش در چشمه‌ی شماره یک (سراب قوری قلعه) بالاترین درصد مربوط به کاتیون کلسیم با ۶۹٫۸۰ درصد و بالاترین درصد آنیون مربوط به بی‌کربنات با ۸۷٫۴۴ درصد می‌باشد. این بالاترین درصدها به صورت جفتی بر روی دیاگرام آورده شده و تیپ آب برای هریک از چشمه‌ها به همین ترتیب مشخص شده است. از بین درصدهای گرفته شده مقادیر بالاتر از ۵۰ درصد در کاتیون‌ها به عنوان کاتیون غالب و مقادیر بالاتر از ۵۰ از بین آنیون‌ها به عنوان آنیون غالب شناخته شده است. اگر در جایی درصد کاتیون بیشتر از ۵۰ و درصد آنیون از ۵۰ کمتر باشد در آن قسمت کاتیون غالب و آنیون غالب نیست (نیاز احمد و همکاران، ۲۰۰۳).

جدول شماره ۲: آنالیز شیمیایی دو نمونه از آب در دو زون مختلف

Name	Temperature	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	CO3	HCO ³	SO4	Cl
------	-------------	----	----	----	----	----	---	-----	------------------	-----	----

چشمه قوری قلعه (آبخوان شاهو)	10.5	7.82	0.332	2.4	1	0.03	0.01	0.00	3.52	0.11	0.4
چشمه کاشنبه (آبخوان اسلام آباد)	14.3	7.60	0.412	2	2.4	0.01	0.05	0.00	4.6	0.17	0.4

EC برحسب (mS/cm) و واحد اندازه گیری یون‌ها میلی اکی والان بر لیتر است.

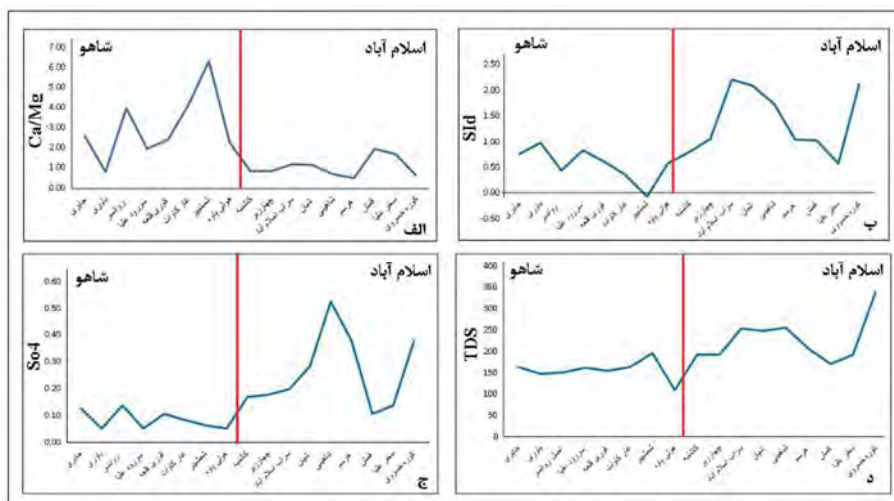
در روش احمد با توجه به هدف کار، می‌توان علاوه بر نمایش بالاترین درصد کاتیون و آنیون‌ها در هر چشمه بر روی نمودار، کمترین مقادیر کاتیون و آنیون را نیز بر روی نمودار نمایش داد.

بحث و یافته‌ها

نتایج حاکی از تحلیل کمی داده‌های هیدروشیمیایی آب، کمک فراوانی به تشریح ویژگی‌های کارستی منطقه می‌کند. به طور کلی ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب همراه با ترکیبات سازندهای زمین‌شناسی، بازگوکننده‌ی میزان انحلال ترکیبات آهکی و به نوبه‌ی آن میزان توسعه‌ی کارست در منطقه است. لذا همان‌طور که گفته شد برای ارزیابی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی ۱۷ نمونه آب از چشمه‌های دائمی در دو آبخوان شاهو و آبخوان‌های اسلام‌آباد گرفته و نتایج حاصله به روش‌های هیدروژئوشیمیایی بررسی شد. از آنجایی که نمونه‌های آب در آبخوان‌ها و سازندهای مختلف و شرایط اقلیمی متفاوت قرار گرفته‌اند، برای ارزیابی میزان توسعه و تکامل کارست در این دو آبخوان، پس از بررسی شرایط اقلیمی دراز مدت حاکم بر آن‌ها (میانگین سالیانه‌ی بارش ۷۵۰ میلی‌متر و دمای حدود ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در ارتفاعات شاهو و ۵۰۰ میلی‌متر بارش و دمای ۱۳٫۷ درجه‌ی سانتی‌گراد در آبخوان اسلام‌آباد)، به کمک نقشه‌ی زمین‌شناسی، نوع سازند تغذیه-کننده‌ی چشمه شناسایی و با محاسبه نسبت‌های یونی صحت‌سنجی گردید.

نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg)

با تحلیل اطلاعات هیدروشیمیایی در منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که بهترین فاکتور برای تشخیص سازندهای آهکی از دولومیتی نسبت Ca^{2+}/Mg^{2+} است. برای محاسبه‌ی این پارامتر غلظت‌های دو کاتیون کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/L)، در نظر گرفته شد و این نسبت برای چشمه‌های هر دو محدوده محاسبه شده و نتایج در شکل ۳-الف نشان داده شده است. براساس شکل ۳-الف نسبت کلسیم به منیزیم برای اکثر چشمه‌های محدوده‌ی اسلام‌آباد به ۱ نزدیک است و این مقدار برای هیچ‌یک از چشمه‌های این محدوده از ۲ فراتر نمی‌رود. در حالیکه در اکثر چشمه‌های محدوده‌ی شاهو بالاتر از ۲٫۵ و حتی در بعضی چشمه‌ها مثل شمشیر به عدد ۶ می‌رسد چنین حالتی خلوص بالای آهک را نشان می‌دهد. نسبت پایین کلسیم به منیزیم در چشمه‌های آبخوان اسلام‌آباد در مقایسه با آبخوان شاهو به روشنی گویای آبخوان کارستی دولومیتی در محدوده‌ی اسلام‌آباد (سازند آسماری و شهبازان) و وجود آبخوان کارستی آهکی در محدوده‌ی شاهو (آهک‌های بیستون) است. مقادیر نمایه‌ی اشباع و بالاتر بودن انحلال دولومیت نسبت به کلسیت در آبخوان‌های اسلام‌آباد نسبت به شاهو نیز این امر را تایید می‌کند (شکل ۳-ب). این امر بیانگر ارتباط زیاد آب زیرزمینی با لیتولوژی آبخوان، ناخالصی در آهک منطقه، انتشاری بودن سیستم کارست و زمان ماندگاری زیاد است که همه‌ی موارد گفته شده، دال بر عدم توسعه‌ی کارست و شکستگی‌ها در محدوده‌ی اسلام‌آباد است. پایین بودن میانگین سالیانه‌ی بارش، بالا بودن دما که باعث کند شدن انحلال دی‌اکسیدکربن می‌شود و پایین بودن آبدهی چشمه‌های این محدوده و نوسانات کم دبی در دو فصل تر و خشک تاییدکننده‌ی مطلب است.



شکل ۳: نمودار الف- نسبت کلسیم به منیزیم در آب چشمه‌ها، ب- شاخص اشباع دولومیت SIa در چشمه‌ها، ج- یون سولفات‌ها محلول در آب چشمه‌ها، د- مقادیر مواد جامد محلول در آب چشمه‌ها

کل مواد جامد محلول در آب (TDS)

شکل (۳-د) کل مواد جامد محلول در آب چشمه‌های دو آبخوان را نشان می‌دهد. بین میزان املاح موجود در آب و هدایت الکتریکی آن، رابطه‌ی مستقیم وجود دارد و هر تغییری در میزان املاح جامد محلول در آب، هدایت الکتریکی آن را نیز تغییر می‌دهد. مقدار املاح جامد محلول و هدایت الکتریکی آب می‌توانند بیانگر میزان توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی باشند (ساوتر^۱، ۱۹۹۳). نتایج حاصل از آنالیز آب نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی همه‌ی چشمه‌های آبخوان شاهو بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و میزان مواد جامد محلول در آن کمتر از ۲۰۰ پی پی ام است که نشان دهنده‌ی عدم دخالت ناخالصی‌های محلی در کیفیت آب این چشمه‌هاست ولی در چشمه‌های آبخوان اسلام‌آباد هدایت الکتریکی بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ و میزان املاح موجود در آن بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ پی پی ام است (شکل ۳-د). با توجه به موارد گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که بالا بودن مواد جامد محلول (سختی آب) در آب چشمه‌های آبخوان اسلام‌آباد نسبت به شاهو نشان از افزایش زمان ماندگاری آب در سیستم کارستی و عدم توسعه‌ی شکستگی‌ها و کارست در آبخوان اسلام‌آباد است. بالا بودن میزان یون سولفات در چشمه‌های کارستی اسلام‌آباد به عنوان یکی از عوامل افزایش دهنده‌ی مواد جامد محلول در آب نیز بیانگر این امر است که در نتیجه‌ی رسوب بیشتر کانی‌ها در مسیر حرکت آب زیرزمینی و مجاورت بیشتر جریان با لیتولوژی میزان سولفات آب افزایش یافته است.

کیفیت آب چشمه‌ها و شاخص اشباع

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود شاخص اشباع دولومیت آب چشمه‌های آبخوان شاهو بسیار کمتر از چشمه‌های آبخوان اسلام‌آباد است و این امر بیانگر توسعه‌ی بیشتر شکستگی‌ها و جریان مجرای-انتشاری در مسیر چشمه‌های آبخوان شاهو و عدم گسترش شکستگی‌ها و جریان انتشاری در آبخوان اسلام‌آباد است. همچنین مقادیر اشباع‌هالیت در منطقه نشان می‌دهد که هر دو محدوده نسبت به ژپس، هالیت و انیدریت غیر اشباع است. نمایه‌ی اشباع آراگونیت در همه‌ی چشمه‌ها بالای یک است.

جدول ۳: شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس، هالیت و انیدریت در ۱۷ چشمه در منطقه مورد مطالعه

ID	name	SI Ca	SI Do	SI G	SI H	SI An	SI Ar
1	چشمه جابری	0.46	0.76	-2.67	-8.91	-2.91	0.31
2	چشمه یآوری	0.33	0.98	-3.28	-9.52	-3.54	0.17
3	سراب روانسر	0.43	0.44	-2.57	-9.74	-2.83	0.28
4	چشمه سرود علیا	0.47	0.84	-3.03	-9.50	-3.92	0.32
5	چشمه قوری قلعه	0.43	0.61	-2.71	-9.62	-2.97	0.27
6	چشمه کاوات	0.40	0.36	-2.62	-8.81	-2.87	0.25
7	چشمه شمشیر	0.28	-0.07	-2.82	-9.10	-3.07	0.12
8	چشمه هولی	0.36	0.58	-3.09	-9.41	-3.34	0.20
9	چشمه کاشنه	0.26	0.80	-2.70	-10.27	-2.95	0.11
10	چشمه چهارزبر	0.37	1.06	-2.68	-8.79	-2.93	0.22
11	سراب اسلام آباد	1.00	2.21	-1.57	-9.34	-1.81	0.85
12	چشمه شیان	0.91	2.10	-2.39	-8.41	-2.62	0.77
13	چشمه شاهینی	0.64	1.74	-2.28	-7.88	-2.52	0.49
14	چشمه هرسم	0.21	1.05	-2.55	-8.20	-2.78	0.06
15	چشمه قمش	0.53	1.03	-2.72	-8.96	-2.96	0.38
16	چشمه سخرعلیا	0.28	0.58	-2.64	-8.62	-2.88	0.13
17	چشمه کوره خسروی	0.82	2.13	-2.43	-8.93	-2.66	0.67

تحلیل عاملی

در تحقیق حاضر به منظور بررسی عوامل موثر بر کیفیت آب زیرزمینی از تحلیل عاملی استفاده شد. در تحلیل عاملی هر چقدر آماره ی KMO به عدد یک نزدیکتر باشد همبستگی داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب‌تر است. این مقدار برای داده های هیدروشیمیایی چشمه‌های نمونه‌برداری شده قابل قبول است.

در روش پیشنهادی کیسر^۱ (۱۹۶۰)، تعداد مقادیر ویژه بیشتر از یک را به عنوان تعداد عامل‌ها در نظر می‌گیرند. بنابراین با این تعریف، تعداد عامل‌ها در محدوده‌ی شاهو برابر ۲ خواهد بود. براساس روش کیسر به عامل‌هایی که تعداد مقادیر ویژه‌ی آن‌ها کمتر از یک باشد توجهی نمی‌شود و به نظر می‌رسد که معلول خطا باشند. جدول ۴ سهم متغیرها را در عامل‌های بعد از چرخش در محدوده‌ی شاهو نشان می‌دهد. هر متغیر در عاملی قرار می‌گیرد که با آن همبستگی بالایی معنی‌داری داشته باشد. نتایج مدل عاملی نشان می‌دهد که ۲ عامل در نظر گرفته شده در محدوده‌ی شاهو، درصد زیادی از کل ترکیب آب چشمه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به این ترتیب که عامل اول ۴۵٫۲۶ و عامل دوم ۲۵٫۰۹ درصد از واریانس کل را نشان می‌دهند. از میان ضرایب هر عامل، ضرایب بالای ۰٫۶ که به صورت پررنگ در جدول ۲ نشان داده شده‌اند، نشانگر پارامترهای مؤثر در آن عامل هستند. بر این اساس، در عامل یک بین TDS، کلسیم و بی‌کربنات همبستگی بالایی وجود دارد که دلیل آن انحلال کلسیت و تاثیر زیاد آهک‌های سازند بیستون بر منابع آب این محدوده است، لذا این تحلیل با زمین‌شناسی منطقه قابل توجیه است. در عامل دوم TDS و سولفات دارای بار عاملی بالایی هستند که افزایش سولفات ممکن است به علت تغذیه‌ی ناشی از آب‌های سطحی و انحلال کانی‌های تبخیری سولفات باشد.

در محدوده‌ی اسلام آباد نیز دو عامل مشخص شده است که متغیرهای تاثیرگذار در عامل اول منیزیم و TDS است. با توجه به لیتولوژی منطقه می‌توان گفت که منشاء منیزیم در آب زیرزمینی دولومیت‌های ناشی از هوازدگی سازند آسماری جهرم است. در عامل دوم بیشترین همبستگی بین سدیم، کلر و پتاسیم وجود دارد که دلیل آن به احتمال زیاد ناشی از افزایش زمان ماندگاری آب در آبخوان و انحلالی کانی‌های تبخیری است.

جدول ۴: ماتریس عاملی دوران یافته آبخوان شاهو

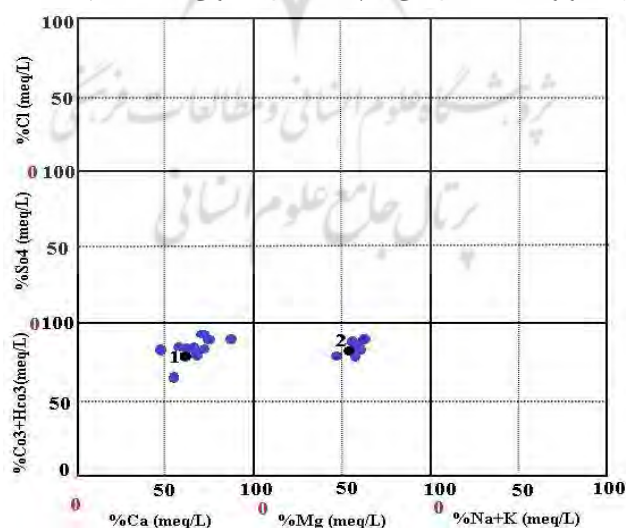
Factor	Ca	Mg	Na	K	SO4	Hco3	Cl	TDS	debi
Component	0.95	0.18	0.71	0.98	0.19	0.96	0.79	0.97	0.20
	0.08	0.56	0.11	0.41	0.89	0.10	0.31	0.81	0.91

جدول ۵: ماتریس عاملی دوران یافته آبخوان اسلام آباد

Factor	Ca	Mg	Na	K	SO4	Hco3	Cl	TDS	debi
Component	0.31	0.86	0.53	0.17	0.86	0.71	0.19	0.84	0.42
	0.54	0.15	0.66	0.72	0.37	0.30	0.77	0.46	0.50

نمودار ترکیبی معروف به احمد (MRDs)

با توجه به بالا بودن سختی آب چشمه‌های آبخوان اسلام آباد، برای تعیین نوع آب براساس سختی از نمودار ترکیبی احمد استفاده شد. نتایج حاصل از این نمودار در شکل ۴ و جدول ۶ نشان می‌دهد که نوع آب بیشتر چشمه‌های آبخوان شاهو از نوع کلسیم بی‌کربناته (بی‌کربنات کلسیت) و آب اکثر چشمه‌های آبخوان‌های اسلام آباد از نوع منیزیم بی‌کربناته است. این نمودار نیز تایید کننده‌ی سازند آهکی در آبخوان شاهو و سازند کارستی دولومیتی در آبخوان‌های اسلام آباد است. همانطور که در شکل مشخص است در همه‌ی چشمه‌های هر دو محدوده، آنیون غالب بی‌کربنات است و تفاوت اصلی آن‌ها در کاتیون‌هاست که در چشمه‌های آبخوان شاهو کاتیون غالب کلسیم و در اکثر چشمه‌های محدوده‌ی اسلام آباد کاتیون غالب منیزیم است. این امر بیانگر انحلال بیشتر کلسیت در محدوده‌ی شاهو و در نتیجه توسعه‌ی شکستگی‌ها و کارست در این محدوده (چون کلسیت زودتر از دولومیت انحلال می‌یابد) در مقابل آبخوان‌های اسلام آباد است.



شکل ۴، نمودار ترکیبی تجزیه و تحلیل شیمیایی آب، نیاز احمد و همکاران، ۲۰۰۳

جدول شماره ۶: درصد آنیون، کاتیون‌های نمونه‌های برداشت شده جهت نمایش نقاط روی نمودار نیاز احمد

ID	name	%Ca	%Mg	%Na+K	Sum cations	%(Co3+HCO3)	%SO4	%Cl	sum cations	Water type
1	قوری قلعه	69.85	29.10	1.05	100	87.44	2.64	9.92	100	کلسیم بی کربناته
2	کاشینه	44.91	53.89	1.19	100	89.69	3.30	7.01	100	منیزیم بی کربناته
3	چابری	68.39	26.40	5.22	100	88.09	3.12	8.80	100	کلسیم بی کربناته
4	یاوری	43.10	54.85	2.05	100	90.98	1.45	7.57	100	منیزیم بی کربناته
5	اصل روانسر	78.71	19.68	1.61	100	91.06	3.65	5.29	100	کلسیم بی کربناته
6	سرود علیا	65.18	33.64	1.18	100	90.00	1.30	8.70	100	کلسیم بی کربناته
7	غار کاوات	78.80	18.89	2.31	100	93.03	1.02	5.95	100	کلسیم بی کربناته
8	شمشیر	83.47	13.23	3.29	100	92.36	1.35	6.29	100	کلسیم بی کربناته
9	هولی	66.68	29.64	3.68	100	89.25	1.84	8.91	100	کلسیم بی کربناته
10	چهارزبر	43.24	52.32	4.45	100	86.29	3.53	10.18	100	منیزیم بی کربناته
11	اسلام آباد	52.25	44.11	3.64	100	67.22	30.43	2.35	100	کلسیم بی کربناته
12	شیان	49.13	43.11	7.76	100	88.54	4.51	6.95	100	کلسیم بی کربناته
13	شاهینی	33.62	49.03	17.35	100	80.56	8.49	10.94	100	منیزیم بی کربناته
14	هرسم	27.45	57.20	15.35	100	84.97	7.14	7.88	100	منیزیم بی کربناته
15	قمش	63.98	32.83	3.19	100	88.18	2.39	9.43	100	کلسیم بی کربناته
16	سخر علیا	57.84	34.45	7.71	100	89.43	3.05	7.52	100	کلسیم بی کربناته
17	کوره خسروی	38.46	57.69	3.85	100	86.87	7.34	5.79	100	منیزیم بی کربناته

با توجه به نتایج بدست آمده می توان دریافت که شرایط زمین شناسی و ساختمانی و اقلیم حاکم بر مناطق مورد مطالعه در ایجاد میزان تحول کارست در آبخوان ها موثر بوده و نشان دهنده شرایط کاملا متفاوت در نوع و میزان تغذیه، تخلیه و دبی چشمه های آبخوان های مورد مطالعه است که ضرورت انجام این پژوهش را در زمینه شناخت و چگونگی بهره برداری از آن ها با مدیریت خاص و متفاوت از هم را آشکار می سازد.

نتیجه گیری

تحلیل کمی داده های هیدروشیمیایی آب کمک فراوانی به تشریح ویژگی های کارستی منطقه می کند. به طور کلی ویژگی های هیدروشیمیایی آب همراه با ترکیبات سازندهای زمین شناسی بازگو کننده ی میزان انحلال ترکیبات آهکی است (قدیمی و همکاران، ۱۳۹۲). گستردگی سازند آهکی بیستون در آبخوان کارستی شاهو که قابلیت انحلالی زیادی دارد زمینه را برای شکل گیری و توسعه ی اشکال کارستی فراهم نموده است. وجود انواع مختلفی از اشکال سطحی و عمقی کارست از جمله لاپیه ها، فروچاله ها و غارها بیانگر انحلال پذیری بالای کوه های شاهو است. در بخشی از آبخوان شاهو رادیولاریت ها (آهک های میکروبرشی و زیست آواری) گسترش یافته و مجرای غارهای کاوات و قوری قلعه در آن واقع شده است. کارست در شاهو به صورت دو میدان کارستی اصلی (پاوه و روانسر) و تعدادی سطوح کارستی در حد فاصل و حاشیه میدان های اصلی خود نمای می کنند. مساحت محدوده ای که فروچاله های کارستی (دولین، مگادولین و جاما) را در خود جای داده است، حدود ۱۴۰ کیلومتر مربع (تقریبا یک چهارم مساحت این سازند) است. این محدوده با نفوذپذیری نزدیک به ۱۰۰ درصد، منطقه اصلی تغذیه سفره ها و آبخوان های زیرزمینی است.

به دلیل نقش زمین ساخت در شکل گیری و توسعه ی فروچاله های کارستی، مساحت برخی از مگادولین ها و دولین های متداخل حدود یک کیلومتر مربع است. عمق کارست سطحی در این محدوده بر بخش فوقانی آهک های بیستون با ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر منطبق است. براساس مطالعات لویز عمق جاماها (غارهای عمودی) در سطح کارستی پاوه شامل غارهای کوروش بزرگ، شهبانو، بن دور و کله مار به ترتیب ۳۰۵، ۳۱۵، ۱۸۲- و ۱۳۵- متر است. این غارهای عمودی شاخص مناسبی برای تخمین عمق کارست شدگی محسوب می شوند. بر همین اساس عمق متوسط کارست شدگی حدود ۳۰۰ متر تخمین زده می شود. از دیگر عوارض کارستی منطقه می توان به غارهای افقی، دره های خشک،

دره‌های کارستی، لاپیه و چشمه‌های کارستی اشاره کرد (قربانی به نقل از لویز، ۱۳۸۹). همه‌ی این اشکال بیانگر توسعه-یافتگی کارست در منطقه و وجود شکستگی‌ها و مجراهای کارستی و در نتیجه نفوذ آب و تغذیه‌ی آبخوان‌ها و بالا بودن آبدهی چشمه‌های کارستی است که با بررسی‌های ژئوشیمی آب هم تایید شد. از جمله مهمترین اختلافات بین دو محدوده‌ی شاهو و آبخوان اسلام آباد، علاوه بر تفاوت در تکتونیک و لیتولوژی، تفاوت در بارش و دما است که باعث اختلاف در انحلال‌پذیری مناطق و شکل‌گیری چشمه‌ها با رژیم‌های آبدهی متفاوت در این دو محدوده شده است. بالا بودن بارش، برف‌گیر بودن و پایین بودن دما که باعث انحلال بیشتر دی‌اکسیدکربن در آب می‌شود از ویژگی‌های لیتولوژی و ژئومورفولوژی آبخوان شاهو است که باعث توسعه‌یافتگی کارست در این منطقه شده است. اگرچه آهک آسماری در محدوده‌ی اسلام آباد نیز از سازندهای مستعد انحلال است اما جوانی، خلوص و ضخامت کمتری نسبت به آهک بیستون دارد. بارش کمتر، دمای بیشتر (انحلال کمتر دی‌اکسیدکربن) و تاثیر عوامل ژئومورفولوژیک مانند شکل آبخوان، ارتفاع و تاثیر متفاوت عملکرد تکتونیک سبب شده که درجه‌ی توسعه‌ی کارست در اسلام آباد از شاهو کمتر باشد که با بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی در پژوهش حاضر این امر بررسی و تایید شد.

همان‌طور که گفته شد آنالیز شیمیایی آب چشمه‌ها می‌تواند بیانگر توسعه‌یافتگی یا عدم توسعه‌ی کارست در ناحیه باشد. در محدوده‌ی کوه‌های شاهو آب چشمه‌ها با رخساره‌ی کلسیتی و نسبت بالای Ca^{2+} به Mg^{2+} که در مواردی مانند چشمه‌ی زنجیر به عدد ۶ می‌رسد خلوص بالای آهک در منطقه را نشان می‌دهد. در مقابل، پایین بودن نسبت Ca^{2+} به Mg^{2+} در آبخوان‌های کارستی اسلام آباد مبین دولومیتی بودن کارست در این محدوده است که نتایج حاصل از تحلیل عاملی نیز این امر را تایید کرد. بالا بودن شاخص اشباع دولومیت در چشمه‌های محدوده‌ی اسلام‌آباد نشان‌دهنده‌ی وجود جریان انتشاری در آبخوان‌های این محدوده و توسعه‌ی کمتر پدیده کارست است. در حالی که در محدوده‌ی شاهو پایین بودن شاخص اشباع دولومیت بیانگر تراکم بیشتر شکستگی‌ها و وجود جریان مجرای-انتشاری (آشفته-خطی) است. بالا بودن میزان مواد جامد محلول و یون سولفات در منابع آب آبخوان اسلام‌آباد، نشان‌دهنده‌ی مسافت زیادی است که آب برای رسیدن به خروجی چشمه باید طی کند. قرار گرفتن چشمه‌ها در قلمرو غلبه‌ی کاتیون منیزیم نسبت به سایر کاتیون‌ها در نمودار احمد (MRDs)، نیز تایید کننده‌ی این مطلب است. با توجه به مطالب گفته شده، وجود فرم‌های توسعه‌یافتگی سطحی کارست (فروچاله‌ها) و مجاری وسیع و ویژگی‌های لیتولوژی کوه‌های شاهو نشان‌دهنده‌ی مساعدت ژئومورفولوژی در توسعه‌ی کارست این منطقه است که بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی دو محدوده نیز تاییدکننده‌ی توسعه‌یافتگی کارست شاهو نسبت به اسلام آباد است.

با توجه به مطالب گفته شده، شناخت رفتار هیدروژئوشیمیایی کارست توأم با بررسی‌های زمین‌شناسی-ژئومورفولوژی و هیدروژئومورفولوژی-هیدروژئولوژی می‌تواند دیدی واقع‌گرایانه برای بررسی آبخوان‌های کارستی ارائه دهد. با توجه به اهمیت سرزمین‌های کارستی غرب ایران و به ویژه استان کرمانشاه و آسیب‌پذیر بودن آبخوان‌های کارستی، بررسی ویژگی‌های ذاتی آن‌ها جزو اساسی‌ترین رویکردهای مدیریتی برای مواجهه یا پیش‌مواجهه با خطرات احتمالی از جمله آلودگی کارست است. بررسی توسعه و تحول کارست می‌تواند دیدی واقع‌گرایانه برای بررسی سیستم کارست ارائه دهد به گونه‌ای که به کمک این نتایج علاوه بر شناخت دقیق ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی این آبخوان‌ها می‌توان مدیریت بهینه‌تری را در خصوص میزان و زمان استفاده از آن‌ها اعمال نمود که باید مورد توجه مسئولین مربوطه قرار گیرد. زیرا با توجه به شرایط بحرانی کشور و استان در ارتباط با منابع آب به ویژه منابع آب کارستی، عدم توجه به آن‌ها صدمات جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد.

- باقری سیدشکری سجاد، یمانی مجتبی، جعفریگلو منصور، کریمی حاجی، مقیمی ابراهیم، ۱۳۹۲، ارزیابی ویژگی های هیدرودینامیکی آبخوان های کارستی با استفاده از آنالیز سری های زمانی (مطالعه موردی آبخوان های کارستی گیلانغرب و خورین در استان کرمانشاه)، مجله ی پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ی ۲، شماره ۳، ص ۲
- بهرامی شهرام، زنگنه اسدی محمدعلی، جهانفر علی، ۱۳۹۵، ارزیابی توسعه ی کارست با استفاده از ویژگی های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی در زاگرس (منطقه مورد مطالعه: تاقدیس قلاجیه و آبخوانپراو بیستون)، جغرافیا و توسعه ۴۴، پاییز ۹۵، صص ۱۱۸-۱۱۷
- جوانمرد زهرا، اصغری مقدم اصغر، ۱۳۹۵، استفاده از مدل های آماری و هیدروشیمیایی در تحلیل کیفی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مهربان آذربایجان شرقی)، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۳/۲، صص ۳۸-۴۰
- قدیمی مهرنوش، احمدی حسن، مقیمی ابراهیم، جعفریگلو منصور، ۱۳۹۵، بررسی هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی اشترانکوه در ارتباط با سازندهای زمین شناسی منطقه، نشریه ی مرتع و آبخیزداری، مجله ی منابع طبیعی ایران، دوره ۶۷، شماره ۲، صص ۴-۶
- قربانی محمد صدیق، محمودی فرج الله، یمانی مجتبی، مقیمی ابراهیم، ۱۳۸۸، نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله های کارستی (مطالعه موردی: ناهمواری شاهو، غرب ایران)، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، صص ۱-۱۶، صص ۴-۸
- مقصودی مهران، کریمی حاجی، صفری فرشاد، چهارراهی ذبیح الله (۱۳۸۸)، بررسی توسعه ی کارست در آبخوانپراو بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۹، پاییز ۱۳۸۸، صص ۵۱-۶۵
- وحدتی سید مهران، طاهری کمال (۱۳۸۶): دستهبندی ساختاری چشمه های کارستی حوضه ی الوند جنوب غربی استان کرمانشاه. کنفرانس بررسی منابع آب استان، شرکت آب منطقه ای کرمانشاه، صص ۸۷-۹۹
- Andre, L. Franceschi, M. Puchan, P. Atteia, O. 2005. Using geochemical and modeling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer. Aquitaine Basin. South-west of France. *Journal of Hydrology*. 305: 40- 42.
- Antonio, Gonza ´lez-Ramo ´n. Manuel Lo ´pez-Chicano. Juan Carlos Rubio-Campos. 2012. Piezometric and hydrogeochemical characterization of groundwater circulation in complex karst aquifers. A case study: the Mancha Real-Pegalajar aquifer (Southern Spain). *Environ Earth Sci* p: 923
- Appelo, C.A.J. Postma. D. 1993. *Geochemistry. Groundwater pollution*. Balkema Rotterdam. the Netherlands. 536.
- Baomin, Zhang. Jingjiang, Liu. 2009. Classification and characteristics of karst reservoirs in John in China and related theories. *PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT*. pp 12-15.
- Belkhiri, L. Boudoukha, A. Mouni, L. Baouz, T. 2010. Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater. A case study: Ain Azel plain (Algeria). *Geoderma* 159(3-4) p: 390.
- Bonacci, O. (1993). Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrological Sciences*. 38 (1). P: 52.
- Ford, D. Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd
- Gastmans, D. Chang, H.K. & Hutcheon, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to the diagenetic features. *Appl. Geochem*. 25 (2010). p: 16.

- Hess, W. William, B. White. 1992. *Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer. southcentral Kentucky. U.S.A. Applied Geochemistry. Vol. 8. P:189*
- Karimi, Haji. Raeisi, Ezatollah. Bakalowicz, Michel. 2005. *Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin, northwest of Zagros. Iran. by a hydrogeochemical approach. Hydrogeology Journal. pp: 790-796*
- Kaiser, H.F. (1960). *The application of electronic computers to factor analysis. Educational and Psychological Measurement, 20, 141-151.*
- La Moreaux, P.E. .(1991). *History of karst hydrogeological studies. Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas -I.G.U.- U.I.S.- Italy 15-27 Sept. 1991. Quaderni del Dipartimento di Geografia n. 13. 1991 -Università di Padova. p: 216*
- Murad, A.A. Garamoon, H. Hussein, S. Al-Nuaimi, H.S. 2011. *Hydrogeochemical characterization and isotope investigations of a carbonate aquifer of the northern part of the United Arab Emirates. J. Asian Earth Sci. p: 214*
- Niaz, Ahmad. Sen, Zekia. Manzoor, Ahmad. 2003. *Ground Water Quality Assessment Using Multi Rectangular Diagram. Radiation and isotope application division. Pakistan institute of Nuclear science and technology. p.o. Nilor. Islamabad. Pakistan. pp: 828-832*
- Plummer ,LN. Laura, MB. Anderholm, SK. 2002. *How ground-water chemistry helps us understand the aquifer. In: Ground-water resources of the Middle Rio Grande Basin, Bartolino JR. Cole JC (eds). U.S. Geological Survey Circular 1222. pp: 92-94.*
- 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). p:47*
- Sauter, M. (1992). *Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer. (Gallusquelle, Malm, SW, Germany. Report, Tubinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), TGA. C13, 1993*
- Stotler, RL. Frape, SK. Ruskeeniemi, T. Ahonen, L. Onstott, TC. Hobbs, MY. 2009. *Hydrogeochemistry of groundwaters in and below the base of thick permafrost at Lupin. Nunavut. Canada. Journal of Hydrology 373(1-2): p:80*
- Todd, D. K. 1980. *Groundwater Hydrology (2nd edn). Wiley, New York. 552 pp.*
- Wendland, F. Blum, A. Coetsiers, M. Gorova, R. Griffioen, J. Grima, J. Hinsby, K. Kunkel, R. Marandi, A. Melo, T. Panagopoulos, A. Pauwels, H. Ruisi, M. Traversa, P. Vermooten, J S A. Walraevens, K. 2007. *European aquifer typology. a practical framework for an overview of major groundwater composition at European scale. Environ Geol p: 77*
- Yong Han. Guangcai Wang. Charles, A. Cravotta, III. Weiyue, Hu. Yueyue, Bian. Zongwen Zhang and Yuanyuan Liu. 2012. *Hydrogeochemical evolution of Ordovician limestone groundwater in Yanzhou. North China, HYDROLOGICAL PROCESSES China and related theories. PETROL. EXPLOR. DEVELOP. p:12.*