

## بررسی تأثیر هوازگی بر هیدروژنوشیمی رودخانه‌های زهکش‌کننده سنگ‌های آتشفشانی (مطالعه موردی: رودخانه بیدخوان واقع در جنوب شرق بردسیر کرمان)

سارا شیخ فخرالدینی<sup>۱</sup>  
احمد عباس‌نژاد<sup>۲</sup>

### چکیده

رودخانه بیدخوان کالدرای آتشفشان غیرفعال بیدخوان را زهکش می‌کند که در ۴۰ کیلومتری جنوب شرق بردسیر کرمان واقع شده است. هدف این تحقیق تعیین منشأ عناصر و ترکیبات محلول در آب و ارزیابی تأثیر هوازگی شیمیایی بر کیفیت آب آن است. بدین منظور تعداد ۱۲ نمونه از نقاط مختلف مسیر این رودخانه برداشت و هدایت الکتریکی (EC)، pH و درجه حرارت آن‌ها در صحرا و غلظت یون‌های اصلی و چند فلز سنگین با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی تعیین گردید. پس از کنترل صحت و دقت نتایج آنالیز، از نمودار پایپر، نسبت‌های یونی و تکنیک‌های آماری (آنالیز چندمتغیره، آنالیز خوشه‌ای و ماتریس همبستگی) برای تحلیل و تفسیر داده‌ها استفاده شد. بر مبنای آن، تمامی نمونه‌ها در محدوده آب‌های با سختی موقت قرار داشته و تیپ آن‌ها بی‌کربناته کلسیک و بی‌کربناته منیزیک می‌باشد. نسبت‌های یونی هوازگی سیلیکات را نشان می‌دهند. در تفسیر فاکتورها، کاتیون‌های لیتیم، استرانسیم، باریم، کلسیم، سدیم و منیزیم و آنیون‌های بی‌کربنات، سولفات و کلرید در فاکتور ۱ قرار گرفتند که منشأ کاتیون‌ها هوازگی سیلیکات، منشأ عمده کلرید آب باران، منشأ بی‌کربنات گاز دی‌اکسیدکربن هوا و خاک و منشأ سولفات آب باران و احتمالاً تا حدی هوازگی پیریت در نظر گرفته می‌شود. آهن، منگنز و آلومینیوم هر سه در فاکتور ۲ قرار دارند که به معنی منشأ یکسان است (هوازگی سیلیکات‌های تیره). لذا منبع اصلی کاتیون‌های اصلی و فلزات سنگین هیدرولیز سیلیکات‌های منطقه است. براساس ترکیب شیمیایی آب، هم سیلیکات‌های روشن و هم تیره، نقش داشته‌اند. این امر با تنوع جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده این آتشفشان هماهنگی دارد.

**واژگان کلیدی:** هوازگی شیمیایی؛ هیدروژنوشیمی؛ رودخانه بیدخوان؛ سنگ‌های آتشفشانی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست محیطی، دانشگاه شهید باهنر کرمان E-mail: msheikh94@ymail.com

۲- دانشیار بخش زمین‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

## مقدمه

تحقیقات هیدروژئوشیمیایی آب‌های سطحی عمدتاً از دیدگاه آلودگی آب انجام می‌گیرد و غالب تحقیقات بر روی آب‌های تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی متمرکز می‌شود. به هر حال گزارش‌های علمی بر روی آب رودخانه و دریاچه‌هایی که کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته‌اند، به‌ندرت صورت گرفته است (Anazawa and Ohmori, 2001: 808; Sakurai et al, 1998: 87; Takemura, 1985: 128).

آب سطحی در نواحی کوهستانی از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار است و ترکیب شیمیایی آن بر اساس تعادل آب - سنگ تعیین می‌شود. به‌علاوه مقادیر EC این آب‌ها عموماً پایین است و برخی از گونه‌های شیمیایی اصلی زیر حد تشخیص هستند. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که آنالیز شیمیایی این آب‌ها همانند تفسیر ترمودینامیکی داده‌های به‌دست آمده مشکل باشد و این موضوع ممکن است به‌دلیل مطالعات اندک بر روی ژئوشیمی آب‌های سطحی نواحی کوهستانی مرتفع باشد. مخصوصاً کارهای هیدروژئوشیمیایی در نواحی ولکانیکی به‌جز برای اکتشافات ژئوترمال، به‌ندرت انجام می‌شود (Anazawa and Ohmori, 2001: 808). از این‌رو هدف این تحقیق درک بهتر شیمی آب رودخانه زهکش‌کننده کالدرای بیدخوان و ارزیابی تأثیر هوازدگی شیمیایی سنگ‌های ولکانیکی بر آن است. حدود ۱۲ کیلومتر از این رودخانه در محدوده کالدرای بیدخوان واقع شده است که تأمین‌کننده آب ساکنان روستاهای موجود در منطقه می‌باشد.

کالدرای بیدخوان یک استراتوولکان است (درویش‌زاده، ۱۳۸۳) که در جنوب شرق ایران (با فاصله ۱۱۵ کیلومتری از شهرستان کرمان) و در ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان بردسیر در محدوده‌ای به طول جغرافیایی ۲۵° و ۵۶° تا ۳۰° و ۵۶° و عرض جغرافیایی ۳۵' و ۲۹° تا ۴۰' شمالی واقع شده است. این آتشفشان در بخش جنوب‌شرقی کمربند آتشفشانی ایران مرکزی قرار دارد (Shahabpour, 2007: 625). براساس تقسیم‌بندی دیمیتریچویچ (۱۹۷۳)، بیدخوان در کمربند دهج - ساردوئیه از تقسیمات زمین‌شناسی کرمان واقع شده است (شکل ۱). این آتشفشان محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۴۰۰ کیلومترمربع را اشغال کرده است و ارتفاع بلندترین قله آن از سطح دریاهای آزاد حدود ۳۸۰۰ متر می‌باشد. آب و هوای

منطقه در تابستان معتدل و در زمستان سرد است. در این منطقه روستاهای متعددی نظیر خواجه سهیل، ده بالا، باب کهن، باب زیتون و عرش‌آباد وجود دارد که همگی در دره اصلی زهکش‌کننده کالدرای آتشفشان واقع شده‌اند.

### پیشینه تحقیق

در منابع خارجی، کلیدی‌ترین مطالعات مربوط به هوازُدگی با کیفیت آب رودخانه‌ها به‌طور عمده در دهه ۱۹۷۰ صورت گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، گیپس<sup>۳</sup> (۱۹۷۲: ۱۰۶۶-۱۰۶۱) به‌طور مفصل تغییرات کیفیت آب رودخانه آمازون را در طی مسیر این رودخانه مورد مطالعه قرار داده است. همچنین، ریدر<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۷۲: ۸۶۵-۸۲۵) هیدروژئوشیمی رودخانه مکنزی کانادا را مطالعه نموده‌اند. لینکس<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۷۷: ۱۳۵-۹۰) تأثیر هوازُدگی شیمیایی بر کیفیت آب رودخانه هوبارد در نیوهمشایر را توضیح داده‌اند. مطالعات مشابهی نیز توسط میلر<sup>۶</sup> و درور<sup>۷</sup> (۱۹۷۷: ۱۷۰۲-۱۶۹۳) روی رودخانه نورث‌فورک<sup>۸</sup> واقع در شمالغرب و یومینگ آمریکا صورت گرفته است.

در تحقیقات دیگری، احمد<sup>۹</sup> و همکاران (۱۹۹۸: ۳۴۶-۳۳۹)، خصوصیات ژئوشیمیایی آب و رسوب رودخانه اینداس<sup>۱۰</sup> در هند را براساس میزان هوازُدگی و فرسایش مطالعه نموده‌اند. یو<sup>۱۱</sup> و همکاران نیز (۲۰۰۵: ۵۲۹۴-۵۲۷۹)، هوازُدگی شیمیایی در رودخانه زرد که زهکش‌کننده قسمت شرقی فلات تبت است را بررسی کرده‌اند و ریو<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۰۸: ۸۰-۶۶)، بر روی هوازُدگی شیمیایی کربنات‌ها و سیلیکات‌ها در حوزه رودخانه هان<sup>۱۳</sup> در جنوب کره کار کرده‌اند.

- 1- Gibbs
- 2- Reeder
- 3- Likens
- 4- Miller
- 5- Drever
- 6- North Fork
- 7- Ahmad
- 8- Indus
- 9- Wu
- 10- Ryu
- 11- Hun

متأسفانه به‌ندرت در کتب هیدرولوژی که به مطالعه آب‌های رودخانه‌ها می‌پردازند به شیمی آب آن‌ها توجه می‌شود. ولی در این میان، مهدوی (۱۳۸۴: ۲۶۰-۲۰۵) و علیزاده (۱۳۸۵: ۵۶۳-۵۲۵) هر کدام در قالب یک فصل به این موضوع پرداخته‌اند. رامشت و سیف (۱۳۷۳: ۸۸-۸۷) تأثیر گنبد‌های نمکی بر افزایش املاح رودخانه دالکی را توضیح داده‌اند و شهسواری‌پور و همکاران (۱۳۸۶: ۱۶۷-۱۶۶) کیفیت آب رودخانه هراز را مطالعه نموده‌اند. در عین حال، هوشمند و همکاران (۱۳۸۶: ۱۲۸) کیفیت آب رودخانه کارون در محدوده ملاثانی تا اهواز را بررسی نموده‌اند.

لازم به ذکر است که تاکنون بر روی هیدروژئوشیمی و ارزیابی هوازدگی شیمیایی بر کیفیت آب رودخانه بیدخوان مطالعه‌ای انجام نشده است. سایر مطالعات انجام شده در منطقه نیز توسط کیانی (۱۳۷۸) که به بررسی پترولوژی و ژئوشیمی و خلیلی (۱۳۹۰: ۲۶۵) که به بررسی آتشفشان‌شناسی، ژئوشیمی و پتروژنز این آتشفشان پرداخته‌اند، صورت گرفته است.

#### زمین‌شناسی

اولین محصول فورانی در آتشفشان بیدخوان را آذرآواری‌های خیزابی تشکیل می‌دهند که با یک دگرشیبی زاویه‌ای بر روی سنگ‌های ائوسن واقع شده‌اند. با توجه به مشخصات آذرآواری‌های خیزابی بیدخوان، به‌نظر می‌رسد که فوران از نوع فراتولپنین بوده است (Khalili et al, 2008). به‌علاوه، بر طبق داده‌های سن‌سنجی مطلق انجام گرفته بر روی سنگ‌های بیدخوان، به نظر می‌رسد که این فوران باید قبل از اشکوب سراوالین یا قبل از ۱۲/۸۷±۳/۱۲ میلیون سال پیش صورت گرفته باشد زیرا قدیمی‌ترین نمونه گدازه تعیین‌شده مربوط به ۱۲/۸۷±۳/۱۲ میلیون سال پیش می‌باشد که با یک توقف زمانی بر روی این خیزابی‌ها قرار دارد. سپس آتشفشان مدت زمانی خاموش مانده و این از روی خاک‌های قدیمی نازکی که در منطقه وجود دارد و سطوح فرسایشی بالای خیزابی‌ها مشخص می‌شود (خلیلی مبرهن، ۱۳۹۰: ۲۳۷).

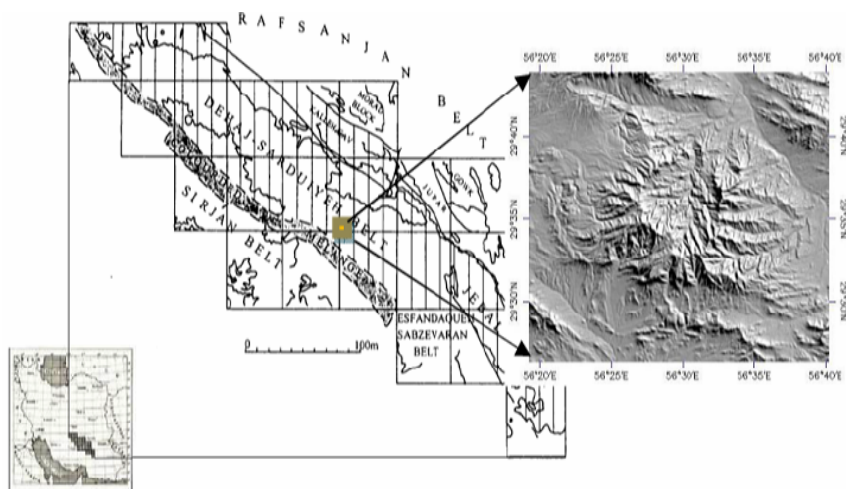
همزمان با تشکیل کالدرای ماگما اندکی تغییر یافته و به سمت حدواسط پیش می‌رود. در این هنگام، هم زمان با بالا رفتن فشار بخار آب و سایر مواد فرار ماگما، فشار ماگما از فشار

لیتواستاتیک سنگ پوششی که قبلاً تشکیل شده است فراتر رفته و فعالیت آتشفشان به صورت یکسری انفجارات پیایی پلینین (Plinian) ادامه می‌یابد. در بین بعضی از فوران‌های آذرآواری‌های جریانی، گدازه‌ها نیز به سطح زمین می‌رسند و به‌صورت بین لایه‌ای با مواد آذرآواری قرار می‌گیرند. در پایان و پس از اینکه فوران آذرآواری تمام شد، آخرین گدازه به آرامی از دهانه آتشفشان بیرون ریخته و بر روی آذرآواری‌های قبلی قرار گرفته است. بنابراین ساختمان این آتشفشان از تناوب گدازه‌های آندزیتی - داسیتی و ریولیتی و انواع نهشته‌های آذرآواری و اپی‌کلاستیک تشکیل شده است که حاصل چندین دوره فعالیت فورانی می‌باشد (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰: ۲۳۸-۲۳۷). بعضی از فوران‌های سازنده محصولات بیدخوان بسیار انفجاری و فقط حاوی آذرآواری بوده‌اند و نهشته‌هایی هم‌چون خیزابی‌ها یا نهشته‌های جریانی حاوی قطعه و خاکستر را ساخته‌اند؛ اما بعضی از فوران‌ها حاوی آذرآواری‌ها و گدازه بوده‌اند. ترکیب کانی‌شناسی آندزیت‌ها شامل پلاژیوکلازها، انواع پیروکسن‌ها، آمفیبول (هورنبلند)، میکا (بیوتیت) و آلکالی فلدسپار (سانیدین) می‌باشد در حالی که در داسیت‌ها انواع پلاژیوکلازها همراه با آمفیبول (هورنبلند)، میکا (بیوتیت)، آلکالی فلدسپار (سانیدین) و کوارتز دیده می‌شود (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰: ۱۲۲).

بعد از فرونشینی کالدرا، ماگمای فقیر از آب، از داخل مخزن کم عمق زیر آتشفشان و از طریق شکستگی‌های مختلف به سمت سطح حرکت کرده و دگرسانی رخساره مرکزی و توده ساب ولکانیک و دیگر سنگ‌های موجود در کالدرا صورت گرفته است. طبق داده‌های سن سنجی، تزریق دایک‌ها و پلاگ باید به‌ترتیب  $۱۰/۱۷ \pm ۰/۶۹$  و  $۹/۴۹ \pm ۲/۸۸$  میلیون سال پیش رخ داده باشد (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰: ۲۴۰). در نهایت محصولات دوره‌ای گدازه و آذرآواری‌ها، اپی‌کلاستیک، ریزش کالدرا و سپس ایجاد انواع دایک‌های حلقوی و شعاعی و تشکیل پلاگ‌ها و دگرسانی گرمابی کالدرا همگی نشان می‌دهند که بیدخوان مراحل تکاملی و بلوغ یک آتشفشان مرکب را پشت سر گذاشته است (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰: ۲۵۰).

این آتشفشان از  $۹/۴۹ \pm ۲/۸۸$  میلیون سال پیش دیگر فعالیت نداشته و تاکنون تحت تأثیر فرسایش قابل ملاحظه قرار گرفته است. فرسایش آن از نوع آب‌های جاری است (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰: ۲۴۱) ولی فرسایش یخچالی و پیرایخچالی (Periglacial) در

قسمت‌های مرتفع آن به چشم می‌خورد. لازم به ذکر است که بخش مرکزی آتشفشان قابلیت تمرکز کانی‌های رسی، پیریت و همچنین سولفیدهای سرب، روی، نقره و طلا را دارد (احمدی‌پور، ۱۳۷۲: ۳۵۸).

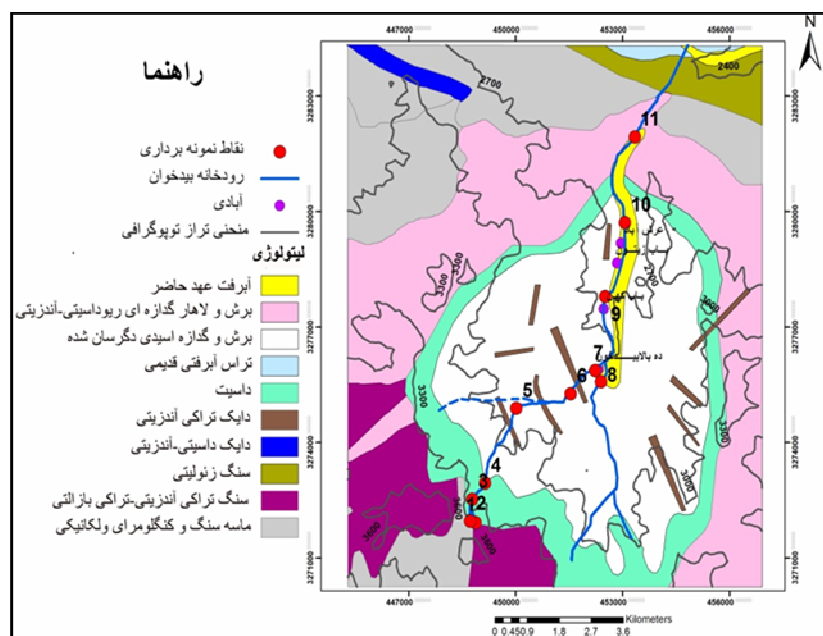


شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۱۲ نمونه آب از بالادست به سمت پایین دست رودخانه بیدخوان در تاریخ ۱۳۹۱/۴/۲۰ برداشت گردید (شکل ۲). ظرف نمونه‌برداری از جنس پلی‌اتیلن ۱ لیتری بود. ظروف مورد استفاده قبل از نمونه‌برداری اسیدشویی شده و با آب مقطر نیز شسته شدند؛ در موقع نمونه‌برداری نیز سه بار با آب مورد استفاده جهت نمونه‌گیری، شستشو صورت گرفت. در هر نقطه نمونه‌برداری، سه ظرف آب برداشته شد که در یکی اندازه‌گیری آنیون‌های اصلی و دو ظرف دیگر اندازه‌گیری کاتیون‌ها و فلزات مد نظر بود. نمونه کاتیونی و فلزات با استفاده از اسیدنیتریک ۶۵ درصد تا pH زیر ۲ اسیدی گردید تا از رسوب احتمالی کاتیون‌ها و رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری شود و همچنین جذب سطحی توسط دیواره‌های ظرف به حداقل برسد. در محل نمونه‌برداری، دما با استفاده از دماسنج و pH نمونه‌ها با استفاده از

PH متر PH-201 Lutron و همچنین موقعیت جغرافیایی محل نمونه‌برداری با GPS اندازه‌گیری و ثبت گردید. سپس نمونه‌های کاتیون و آنیون جهت آنالیز به سازمان آب و منطقه‌ای استان کرمان و فلزات به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید باهنر کرمان فرستاده شدند. برای اندازه‌گیری کاتیون‌ها از روش کروماتوگرافی یونی (IC)، کربنات و بی‌کربنات با روش تیتراسیون و مقدار سولفات و کلر نمونه‌ها با روش اسپکتروفتومتری استفاده شد. فلزات سنگین نیز با روش ICP-OES اندازه‌گیری شدند.



شکل (۲) نقشه پراکندگی نقاط نمونه‌برداری

برای بررسی دقت اندازه‌گیری، یک نمونه تکراری در بین نمونه‌های ارسالی قرار داده شد و همراه با سایر نمونه‌ها مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. با بررسی مقادیر عناصر در نمونه تکراری و تعیین درصد خطا توسط فرمول  $(\frac{2s}{\bar{x}} \times 1000)$  مشخص شد که خطای به دست آمده کمتر از ۱۰ درصد بوده و لذا تجزیه شیمیایی عناصر از دقت قابل قبولی برخوردار

است. برای پردازش و تحلیل مقادیر عناصر از نرم‌افزارهای SPSS.18، Chemistry و Excel در محیط Windows 7 استفاده گردید.

### یافته‌ها و بحث

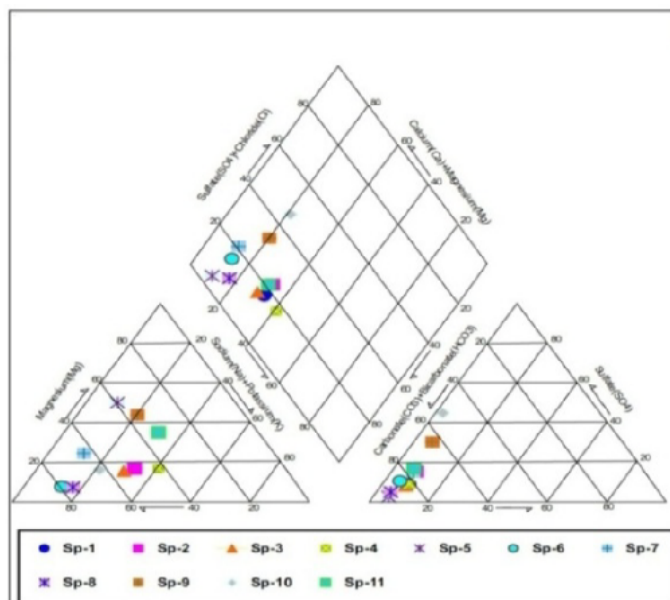
به‌منظور بررسی منشأ عناصر و ترکیبات محلول در آب رودخانه بیدخوان و بررسی تأثیر هوازدگی شیمیایی سنگ‌ها بر آن، از دیاگرام پایپر، ترکیب و نسبت‌های یونی و تکنیک‌های آماری استفاده گردید که در ادامه به بررسی هریک پرداخته شده است. لازم به ذکر است که خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی در نمونه‌های آب رودخانه بیدخوان (میکرو گرم بر لیتر)

| پارامتر                       | حداقل | حداکثر | دامنه تغییرات | میانگین | میانه  | نما   | انحراف از معیار | کشیدگی | چولگی |
|-------------------------------|-------|--------|---------------|---------|--------|-------|-----------------|--------|-------|
| Al                            | ۳/۷۵  | ۶۰/۰۷  | ۵۶/۳۲         | ۱۷/۸۱   | ۱۰/۱۶  | ۳/۷۵  | ۲۱/۴۷           | ۱/۴۳   | ۱/۶۹  |
| Fe                            | ۱/۵   | ۱۹۹/۲  | ۱۹۷/۷         | ۲۶/۵۲   | ۴/۰۹   | ۱/۵   | ۵۹/۶۷           | ۸/۷۵   | ۲/۹۲  |
| Mn                            | ۰/۳   | ۱۹/۵۴  | ۱۹/۱۲۴        | ۳/۸     | ۰/۸    | ۰/۳   | ۵/۹۷            | ۴/۹    | ۲/۱۷  |
| Li                            | ۱/۰۸  | ۲۰/۸۵  | ۱۹/۷۷         | ۸/۶۸۵   | ۵/۰۶۸  | ۱/۰۷۶ | ۷/۸۸            | -۰/۹۲  | ۰/۹۷  |
| Ba                            | ۰/۲۸  | ۲۳/۵۶  | ۲۳/۲۸         | ۱۱/۹    | ۱۳/۰۱  | ۰/۲۸۱ | ۸/۱۶            | -۱/۴۹  | -۱/۹۸ |
| Sr                            | ۲۵/۴۷ | ۳۹۴/۱۴ | ۳۶۸/۶۷        | ۱۶۳/۴۹  | ۱۴۵/۷۷ | ۲۵/۴۷ | ۱۳۸/۴۶          | -۰/۸۷  | ۰/۷۴  |
| Cd                            | ۰/۳۸  | ۴/۵۴   | ۴/۱۷          | ۱/۳۹    | ۰/۳۸   | ۰/۳۸  | ۱/۴۴            | ۰/۹۱   | ۱/۳۵  |
| pb                            | ۷/۵   | ۱۴/۲   | ۶/۷           | ۸/۱۱    | ۷/۵    | ۷/۵   | ۲/۰۲            | ۱۱     | ۳/۳۲  |
| As                            | ۳/۷۵  | ۸/۲۴   | ۴/۴۹          | ۴/۱۶    | ۳/۷۵   | ۳/۷۵  | ۱/۳۵            | ۱۱     | ۳/۳۲  |
| V                             | ۱۵    | ۵۹/۲۲  | ۴۴/۲۲         | ۲۸/۱۲   | ۲۴/۰۳  | ۱۵    | ۱۴/۶۸           | ۰/۴۳   | ۱/۰۷  |
| Ca <sup>2+</sup>              | ۱۰۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰ | ۹۰۰۰۰         | ۴۰۰۰۰   | ۴۰۰۰۰  | ۱۲۰۰۰ | ۲۸۲۷۰           | ۰/۴۱   | ۰/۸۱  |
| Mg <sup>2+</sup>              | ۲۴۰۰  | ۳۳۶۰۰  | ۳۱۲۰۰         | ۱۱۴۵۴   | ۶۴۰۰   | ۲۴۰۰  | ۱۱۳۰۰           | -۰/۴۸  | ۰/۹۴  |
| Na <sup>+</sup>               | ۶۹۰۰  | ۴۱۰۰۰  | ۳۴۱۰۰         | ۱۵۶۵۴   | ۹۲۰۰   | ۶۹۰۰  | ۱۲۷۴۲           | ۰/۲۱   | ۱/۳۴  |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | ۵۴۹۰۰ | ۲۷۴۰۰۰ | ۲۱۹۱۰۰        | ۱۶۴۵۱۸  | ۱۹۵۰۰۰ | ۵۴۹۰۰ | ۸۹۲۹۶           | -۱/۸۲  | -۰/۲۸ |
| Cl <sup>-</sup>               | ۳۵۵۰  | ۱۴۲۰۰  | ۱۰۶۵۰         | ۷۴۱۸    | ۶۶۵۶   | ۳۵۵۰  | ۴۰۲۹            | -۰/۵۳  | ۰/۷۹  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | ۴۸۰۰  | ۱۷۱۰۰۰ | ۱۶۶۲۰۰        | ۳۵۹۶۷   | ۹۶۰۰   | ۴۸۰۰  | ۵۲۰۴۷           | ۴/۵    | ۲/۱۴  |

## دیاگرام پایپر

در شکل (۳)، موقعیت نمونه‌ها در دیاگرام پایپر نشان داده شده است. با توجه به آن، تمامی نمونه‌ها در محدوده آب‌های با سختی موقت قرار می‌گیرند. به‌علاوه تیپ آب در تمامی نمونه‌ها بی‌کربناته و رخساره آب نیز در نمونه‌های ۵، ۹ و ۱۱ منیزیک و در سایر نمونه‌ها کلسیک می‌باشد. بنابراین تیپ و رخساره نمونه‌های ۵، ۹ و ۱۱ بی‌کربناته منیزیک و در سایر نمونه‌ها بی‌کربناته کلسیک می‌باشد.



شکل (۱) دیاگرام پایپر نمونه‌های آب رودخانه بیدخوان

## ترکیب و نسبت یونی

در ابتدا جهت تعیین این‌که این آب که ناشی از بارندگی و ذوب برف‌ها می‌باشد، منشأ اولیه خود را حفظ کرده و یا این‌که هوازدگی سنگ‌های مختلف، شیمی و غلظت عناصر در آب را تحت تأثیر قرار داده است، از دو نسبت  $\frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-}$  و  $\frac{Cl^-}{\text{مجموع آنیون‌ها}}$  استفاده گردید (جدول ۲). با

توجه به این که نسبت  $\frac{Cl^-}{\sum \text{کاتیون ها}}$ ، در تمامی نمونه‌ها بسیار پایین و کمتر از ۰/۸ می‌باشد، هوازگی سنگ صورت گرفته است (Hounslow, 1995: 85). بر اساس نسبت  $\frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-}$ ، فرضیه آب باران نیز رد می‌شود. به این دلیل که این نسبت برای تمامی نمونه‌ها بزرگ‌تر از ۰/۵ می‌باشد.

بر اساس نسبت  $\frac{HCO_3^-}{\sum \text{کاتیون ها}}$  می‌توان به فرایند انحلال و هوازگی سنگ‌ها پی برد (Hounslow, 1995: 85). این نسبت در نمونه‌های ۱، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ بالاتر از ۰/۸ و بنابراین هوازگی سیلیکات یا کربنات رخ داده است که با توجه به اینکه TDS تمامی نمونه‌ها کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد، هوازگی سیلیکات محتمل است. در نمونه‌های ۲، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۱ این نسبت کمتر از ۰/۸ می‌باشد و به‌نظر می‌رسد که علاوه بر هوازگی، انحلال مقادیر اندکی پیریت و شاید ژپس صورت گرفته باشد. منبع سولفات کلسیم (ژپس) در این منطقه آب باران است.

منشأ کلسیم را می‌توان براساس نسبت  $\frac{Ca^{Z+}}{Ca^{2+} + So_4^{2-}}$  تعیین نمود. با توجه به این که این نسبت برای تمامی نمونه‌ها بزرگ‌تر از ۰/۵ می‌باشد بنابراین، منشأ کلسیم علاوه بر انحلال ژپس (کلسیم و سولفات موجود در آب باران)، هوازگی سیلیکات‌ها می‌باشد (Hounslow, 1995: 85).

با استفاده از نسبت  $\frac{Mg^{Z+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$  و بر این اساس که هوازگی سیلیکات‌ها در منطقه رخ می‌دهد می‌توان تا حدی نوع هوازگی را تعیین نمود. با توجه به این که این نسبت برای تمامی نمونه‌ها به‌جز نمونه‌های ۵، ۹ و ۱۱ کوچک‌تر از ۰/۵ است، از این‌رو هوازگی کانی‌های روشن (هوازگی سنگ آذرین اسیدی) غالب می‌باشد. این نسبت در نمونه‌های ۵، ۹ و ۱۱ اندکی بزرگ‌تر از ۰/۵ می‌باشند که این موضوع نشان می‌دهد کانی‌های فرومینیزین بیش‌تر تحت تأثیر هوازگی قرار گرفته‌اند.

تحلیل چندمتغیره، یک گروه از تکنیک‌های آماری است که در تحلیل متغیرها به ما کمک می‌نماید. کاربرد و توسعه این روش آماری عمدتاً در زمینه علوم اجتماعی بوده اما اخیراً عملکرد بالا و قیمت پایین کامپیوترهای شخصی موجب شده است که استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره جهت تجزیه و تحلیل در زمینه‌های ژئوشیمیایی و هیدروژن‌شیمیایی بهبود یابد (Anazawa and Yoshida, 1996: 355؛ Anazawa and Ohmori, 2001: 808).

جدول (۲) تعیین منبع ورود عناصر به آب‌های منطقه

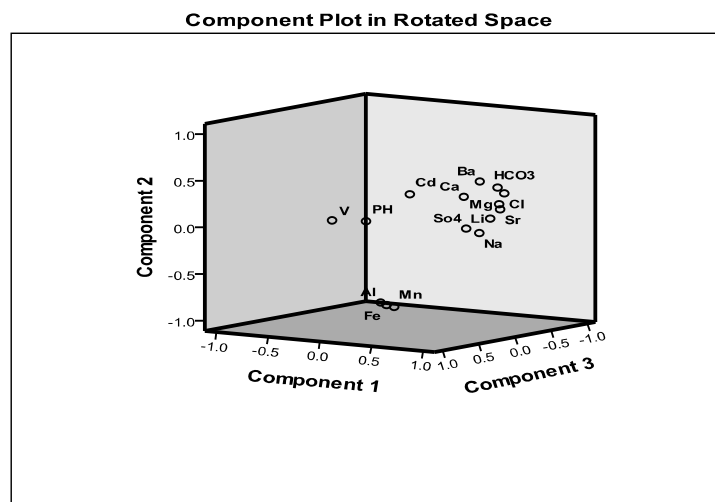
| پارامترها                               | مقادیر                                                                                                 | نتایج                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\frac{Cl^-}{\text{مجموع آنیون‌ها}}$    | $TDS > 500$ و $0/8 >$<br>$TDS < 100$ و $0/8 <$<br>$<0/8$                                               | آب دریا یا شوراب یا نهشته‌های تخییری<br>آب باران<br>هوازدهی سنگ                                                                             |
| $\frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-}$              | $0/5 >$<br>$=0/5$<br>$TDS \square 500$ و $0/5 <$<br>$50 < TDS < 500$ و $0/5 <$<br>$TDS < 50$ و $0/5 <$ | منبع سدیم علاوه بر هالیت، آلبیت و تبادل<br>یونی<br>انحلال نمک<br>تبادل یونی معکوس<br>خطای آنالیز<br>آب باران                                |
| TDS                                     | $\square 500$<br>$< 500$                                                                               | هوازدهی کربنات یا شوراب یا آب دریا<br>هوازدهی سیلیکات                                                                                       |
| $\frac{HCO_3^-}{\text{مجموع آنیون‌ها}}$ | $0/8 >$<br>$<0/8$ sulfate high<br>$<0/8$ sulfate low                                                   | هوازدهی سیلیکات یا کربنات<br>انحلال ژئیس<br>آب دریا یا شوراب                                                                                |
| $\frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + So_4^{2-}}$   | $=0.5$<br>$<0.5 \text{ pH} < 5.5$<br>$<0.5$ neutral<br>$<0.5$                                          | انحلال ژئیس<br>اکسیداسیون پیریت<br>حذف کلسیم از طریق تبادل یونی یا<br>رسوبگذاری کلسیت<br>منشا کلسیم علاوه بر ژئیس، کربنات یا<br>سیلیکات است |
| $\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg_4^{2+}}$   | $>0.5$<br>$<0/5$                                                                                       | هوازدهی کانی‌های فرومنیزین<br>هوازدهی گرانیتیک                                                                                              |

استفاده از این تکنیک‌ها در تبدیل حجم زیادی از داده‌ها به پارامترهای کم‌تر و تجزیه و تحلیل همبستگی میان آن‌ها بسیار مفید است و بنابراین تجزیه و تحلیل از این طریق نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. تنوع گسترده‌ای از تکنیک‌های آنالیز چندمتغیره در دسترس است لذا انتخاب مناسب‌ترین تکنیک بستگی به ماهیت داده‌ها، مشکلات موجود و اهداف دارد.

در ارتباط با آنالیز چندمتغیره، فاکتور آنالیز (FA) یک تکنیک آماری شناخته شده و دارای کاربرد بسیاری می‌باشد که ما را قادر می‌سازد تا فاکتورهای معمولی که الگوهای رفتاری را کنترل می‌نمایند، استخراج کنیم. این تکنیک برای استخراج و درک اطلاعات مربوط به منشأ و تغییر هریک از عناصر محلول در نمونه‌های آب طبیعی به کار برده می‌شود (Anazawa & Ohmori, 2001: 810). همچنین برای دسته‌بندی عناصر بر اساس روابط ژئوشیمیایی می‌توان از آنالیز خوشه‌ای (CA) استفاده نمود. در آنالیز خوشه‌ای عناصر و یا متغیرهای آماری براساس میزان همبستگی آماری به خوشه‌هایی تقسیم می‌شوند که بیانگر میزان ارتباط آن‌ها با یکدیگر است (یوسفی و مرادیان، ۱۳۹۱: ۱۳۸). در این تکنیک از روش آماری بین گروهی برای رسم نمودار خوشه‌ای استفاده شده است و فواصل بین خوشه‌ها نیز با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون مرتب شده‌اند.

#### تفسیر فاکتورها

برای تفسیر بهتر هر یک از فاکتورهای آزمون مولفه اصلی (جدول ۳ و شکل ۴)، از آنالیز خوشه‌ای (شکل ۵) و ماتریس همبستگی (جدول ۴) استفاده شده است.



شکل (۴) نمودار سه بعدی آزمون مولفه‌های اصلی در آب رودخانه بیدخوان

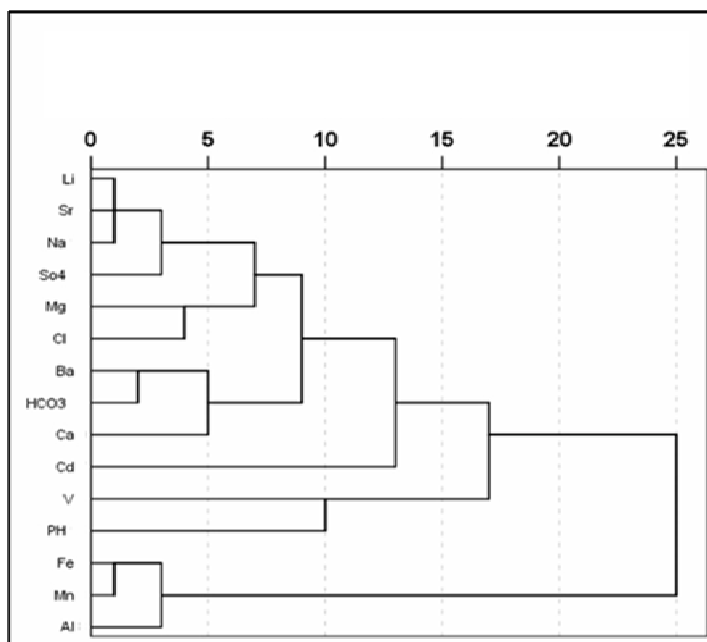
جدول (۳) شبکه مولفه‌های اصلی پارامترهای شیمیایی در نمونه‌های آب رودخانه بیدخوان

| Rotated Component Matrix <sup>a</sup> |   |        |       |                               |
|---------------------------------------|---|--------|-------|-------------------------------|
| Component                             |   |        |       |                               |
| ۴                                     | ۳ | ۲      | ۱     |                               |
|                                       |   |        | ۰/۵۹۳ | Ba                            |
|                                       |   |        | ۰/۹۵۷ | Li                            |
|                                       |   |        | ۰/۹۶۱ | Sr                            |
|                                       |   |        | ۰/۶۵۲ | Ca <sup>2+</sup>              |
|                                       |   |        | ۰/۷۸۴ | Mg <sup>2+</sup>              |
|                                       |   |        | ۰/۹۲۷ | Na <sup>+</sup>               |
|                                       |   |        | ۰/۸۱۵ | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|                                       |   |        | ۰/۷۶۹ | Cl <sup>-</sup>               |
|                                       |   |        | ۰/۸۳۳ | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
|                                       |   | -۰/۸۹۴ |       | Al                            |
|                                       |   | -۰/۹۲۰ |       | Fe                            |
|                                       |   | -۰/۹۳۰ |       | Mn                            |

Extraction Method: Principal Component Analysis.  
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.  
a. Rotation converged in 6 iterations.

جدول (۴) ضریب همبستگی پارامترهای شیمیایی در آب رودخانه بیدخوان

[illegible]



شکل (۵) آنالیز خوشه‌ای پارامترهای شیمیایی در آب رودخانه بیدخوان

#### فاکتور ۱

در فاکتور ۱ کاتیون‌های لیتیم، استرانسیم، باریم، کلسیم، سدیم، منیزیم و آنیون‌های بی‌کربنات، سولفات و کلر قرار دارند. در این فاکتور ۴۱/۶۴ درصد از داده‌ها وجود دارد. کلسیم عموماً در پلاژیوکلازها و به میزان کم‌تر در کلینوپیروکسن‌ها متمرکز می‌شود (میسون و مور، ۱۹۸۲) و این کاهش عمدتاً مربوط به تشکیل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز است که فنوکریست اصلی در آندزیت‌ها و داسیت‌ها در طی بلورش می‌باشند (Temel et al, 1995: 329). براساس مطالعات کانی‌شناسی انجام گرفته توسط خلیلی (۱۳۹۰)، پلاژیوکلازها ۶۵ درصد از آندزیت‌ها و ۷۵ درصد از داسیت‌های منطقه را تشکیل می‌دهند که درصد آنورتیت در پلاژیوکلازهای موجود در گدازه‌ها و قطعات آندزیتی آتشفشان بین ۳۴ تا ۵۶ درصد و در داسیت‌ها بین ۳۵/۱ تا ۶۰ درصد متغیر است. باریم بیش‌تر در بیوتیت و فلدسپار پتاسیم‌دار حضور دارد البته

می‌تواند در ساختار پلاژیوکلاز نیز پذیرفته شود (میسون و مور، ۱۹۸۲: ۱۹۷). به‌علاوه استرانسیم با داشتن ماهیتی ناسازگار معمولاً در انتهای تفریق جانشین کلسیم و پتاسیم در پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم‌دار می‌شود (میسون و مور، ۱۹۸۲: ۱۹۸). استرانسیم از لحاظ شیمیایی به کلسیم و باریم شباهت زیادی دارد و علاوه بر جانشین شدن کلسیم در کانی‌های پلاژیوکلاز می‌تواند جانشین باریم در فلدسپارهای تخریبی منطقه گردد (عطاپور، ۱۳۸۹: ۲۰۷). لیتیم عنصری است که جانشین سدیم، پتاسیم و منیزیم در کانی‌های سیلیکاته از جمله فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، آمفیبول و کانی‌های رسی می‌گردد (عطاپور، ۱۳۸۹: ۲۰۸). منیزیم در کانی‌های کلینوپیروکسن، میکا و آمفیبول سنگ‌های منطقه و سدیم نیز در کانی‌های سیلیکاته سدیم‌دار مانند فلدسپارها وجود دارند.

در میان آنیون‌ها، کلر در بیش‌تر سنگ‌های آذرین به مقدار ناچیز وجود دارد و از این‌رو آب باران به‌عنوان منبع اصلی کلر در نظر گرفته می‌شود. منبع سولفات نیز می‌تواند کانی‌های پیریت، ژپس، انیدریت، آب باران و خاک باشد (Hounslow, 1995: 80). منشأ آنیون غالب در منطقه یعنی بیکربنات، دی‌اکسیدکربن جوی و تا حدی هیدرولیز سیلیکات‌ها است (Hounslow, 1995: 80). بنابراین آب باران دارای کلر و سولفات که در تماس با دی‌اکسیدکربن جوی دارای آنیون بی‌کربنات نیز می‌باشد، در نتیجه واکنش با سنگ‌ها و ایجاد هوازدگی شیمیایی، این عناصر را از سنگ شسته و با خود حمل می‌نماید. لذا منشأ تمامی این عناصر از سنگ‌های منطقه و آب باران است و همین موضوع یکی از دلایلی است که موجب شده است این عناصر در مولفه اول آزمون مولفه‌های اصلی قرار بگیرند. به‌علاوه غلظت این عناصر به سمت پایین دست رودخانه افزایش می‌یابد.

برای تفکیک بهتر عناصر موجود در این فاکتور از آنالیز خوشه‌ای استفاده شده است (شکل ۵). تحلیل خوشه‌های مربوطه به شرح زیر است:

- باریم به همراه بیکربنات در یک خوشه قرار می‌گیرند که در مرتبه بالاتری با کلسیم و سپس با سایر عناصر مؤلفه اول آزمون مولفه‌های اصلی ارتباط دارند. بنابراین براساس همبستگی کلسیم و باریم می‌توان نتیجه گرفت که باریم بیش‌تر جانشین کلسیم در

سیلیکات‌ها شده است و براساس همبستگی باریم و بی‌کربنات این احتمال وجود دارد که کمپلکس باریم در آب بیش‌تر به‌صورت بی‌کربنات باریم است و غالباً در زمان ته‌نشینی، کربنات باریم تشکیل می‌شود. به‌علاوه این عنصر دارای ضریب همبستگی معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ با عناصر استرانسیم، کلسیم، بیکربنات و کلر می‌باشد.

- عناصر لیتیم و استرانسیم در یک گروه قرار می‌گیرند و سدیم و سولفات در مرتبه بالاتری نسبت به این عناصر قرار دارند. لیتیم اگرچه از نظر جانشینی تاحدی متفاوت با استرانسیم است اما رفتار ژئوشیمیایی و روند تغییرات مشابه این دو عنصر در آب منطقه موجب شده است که در یک گروه قرار گیرند. عنصر سدیم نیز از لحاظ روند تغییرات مشابه عناصر استرانسیم و لیتیم است. با توجه به این‌که ترکیبات فلوریدی، کربناتی و فسفاتی لیتیم در شرایط طبیعی غیر محلول می‌باشند (عطاپور، ۱۳۸۹: ۲۰۹) و براساس همبستگی میان لیتیم و سولفات می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً لیتیم در آب به‌صورت کمپلکس سولفات لیتیم وجود دارد. به‌علاوه استرانسیم نیز در  $pH=5-7$  منطقه غالباً به‌صورت سولفات استرانسیم یافت می‌شود (عطاپور، ۱۳۸۹: ۲۰۷). عنصر لیتیم دارای ضریب همبستگی معنی‌داری در سطوح ۰/۰۱ و ۰/۰۵ با عناصر استرانسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، سولفات، بیکربنات و کلر می‌باشد.

- عناصر منیزیم و کلر در یک گروه قرار دارند و این نشان می‌دهد که احتمالاً منیزیم محلول در آب به‌صورت کمپلکس کلرید منیزیم وجود دارد.

## فاکتور ۲

در این فاکتور عناصر آهن، منگنز و آلومینیوم قرار دارند. این فاکتور ۲۳/۰۵ درصد از داده‌ها را دربرمی‌گیرد. آهن و منگنز از نظر ژئوشیمیایی در کانی‌های مشابهی مانند پیروکسن و آمفیبول یافت می‌شوند. به‌علاوه منگنز به دلیل نزدیک بودن شعاع یونی آن به آهن، جانشین این عنصر در کانی‌ها می‌گردد (میسون و مر، ۱۹۸۲: ۲۰۱). آهن به آسانی در محیط‌های قلیایی و یا کمی اسیدی به حالت سه ظرفیتی اکسیده می‌شود و پتانسیل اکسیداسیون نیز سریعاً به عدد منفی کاهش می‌یابد در حالی که منگنز زمان بیش‌تری در

محلول باقی‌مانده و نهایتاً در شرایط اکسیدکننده؛ بیش‌تر به‌صورت دی‌اکسید منگنز بدون آهن رسوب می‌کند (میسون و مر، ۱۹۸۲: ۲۶۱). بنابراین با توجه به این‌که وضعیت آب منطقه اکسیدان و قلیایی ( $\text{pH}=7-8$ ) است، از این‌رو به‌صورت هیدروکسیدهای آهن و منگنز رسوبگذاری می‌نمایند.

آلومینیوم نیز همانند آهن به‌عنوان عنصری نامتحرک در بسیاری از مطالعات هوازگی در نظر گرفته می‌شود و غلظت کل آلومینیوم در محلولی که در تعادل با گیبسیت است، در محدوده  $\text{pH}=5-8$  اندک می‌باشد (Eby, 2004: 430). عنصر آلومینیوم در آب‌های منطقه دارای ضریب همبستگی معنی‌داری در سطح  $0.05$  با عناصر آهن و منگنز است. این عناصر همچنین در مولفه دوم آزمون مولفه‌های اصلی قرار می‌گیرند و در آنالیز خوشه‌ای نیز آهن و منگنز در یک خوشه قرار می‌گیرند و آلومینیوم در مرتبه بالاتری نسبت به این عناصر قرار دارد.

### فاکتور ۳

وانادیم به‌همراه  $\text{pH}$  در این فاکتور قرار دارند. این فاکتور  $12/59$  درصد از داده‌ها را دربرمی‌گیرد. این عنصر ضریب همبستگی معنی‌داری در سطح  $0.05$  با  $\text{pH}$  دارد و در آنالیز خوشه‌ای نیز وانادیم و  $\text{pH}$  در یک خوشه قرار می‌گیرند که احتمالاً به دلیل روند تغییرات مشابه این دو پارامتر و تبعیت غلظت وانادیم از  $\text{pH}$  می‌باشد.

وانادیم در محیط‌های سطحی، در شرایط اکسیدی و در  $\text{pH}<4$  و  $\text{pH}=5-8$  نسبتاً متحرک و در شرایط احیایی نامتحرک می‌باشد (Rose et al, Selinus, 2004: 39). وانادیم محلول در آب‌های طبیعی در دو وضعیت اکسیدان  $\text{V}^{5+}$  و  $\text{V}^{5+}$  وجود دارد (Wehrli and Stumm, 1989: 69-; Wang and Sanudo Wilhelmy, 2009: 52). به‌نظر می‌رسد که وانادیم در شرایط Eh و  $\text{pH}$  محیط به‌صورت  $\text{V}^{5+}$  و به شکل کمپلکس متاوانادات ( $\text{V}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) در آب حضور داشته باشد (Weeks, 1961: 447).

## فاکتور ۴

در این فاکتور عنصر کادمیوم قرار دارد که ۱۰/۷۷ درصد داده‌ها را شامل می‌شود. این عنصر دارای همبستگی معناداری با سایر عناصر نمی‌باشد و در آنالیز خوشه‌ای نیز در یک فاصله دورتر، با پارامترهای شیمیایی موجود در فاکتور اول مرتبط می‌باشد. کادمیم عنصری است که در شرایط اکسیدان و در  $pH=5-8$  اندکی متحرک و در  $pH < 4$  نسبتاً متحرک می‌باشد. این عنصر در شرایط احیایی نامتحرک است (Rose et al, 1979؛ Selinus, 2004: 39). از این‌رو با توجه به غلظت پایین این عنصر در سنگ‌های منطقه (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰) و شرایط اکسیداسیون و اسیدیته آب، غلظت این عنصر در آب نیز پایین و تغییرات غلظت این عنصر در محل‌های نمونه‌برداری به شرایط زمین‌شناسی و میزان هوازدگی بستگی دارد.

## نتیجه‌گیری

براساس شواهدی که ارائه شد نظیر دیاگرام پایپر، نسبت‌های یونی و تکنیک‌های آماری، نتیجه‌گیری می‌شود که تیپ غالب آب رودخانه بیکربناته کلسیک و دارای سختی موقت می‌باشد و اگرچه ممکن است منشأ بعضی از عناصر، آب باران یا خاک باشد ولی در مجموع منبع مهم ورود کاتیون‌های اصلی، فلزات سنگین و سایر عناصر، هوازدگی از نوع هیدرولیز سیلیکات‌ها است. دی‌اکسیدکربن ناشی از آب باران و همچنین دی‌اکسیدکربن تولید شده در خاک منطقه پس از حل شدن در آب به طور عمده به صورت آنیون بی‌کربنات و کاتیون  $H^+$  درمی‌آید که اسیدیته محیط را افزایش می‌دهد. عامل اسیدیته کاتیون‌های داخل شبکه بلورین سیلیکات‌ها را گرفته و  $H^+$  را به سیلیکات می‌دهد. این فرایند که هیدرولیز سیلیکات‌ها نامیده می‌شود، عامل مهم ترکیبات فوق به آب‌های منطقه است. در ارتباط با منبع دو آنیون اصلی دیگر (کلر و سولفات) لازم به یادآوری است که سنگ‌های آذرین از کلر فقیرند لذا منبع مهم کلر آب باران فرض می‌شود. سولفات موجود در آب‌های منطقه از هوازدگی پیریت (به عنوان کانی ثانویه در سنگ‌های منطقه) می‌تواند رها شده باشد. در عین حال که معمولاً در آب باران مناطق خشک نظیر منطقه مورد مطالعه، غلظت سولفات نیز می‌تواند بالا باشد. به‌علاوه روند تغییرات و رفتار ژئوشیمیایی این عناصر در آب رودخانه موجب شده است که

این عناصر براساس آزمون مولفه‌های اصلی در ۴ فاکتور قرار گیرند. بر این اساس، در فاکتور اول، کاتیون‌های لیتیم، استرانسیم، باریم، کلسیم، سدیم، منیزیم و آنیون‌های بی‌کربنات، سولفات و کلر قرار دارند که آنالیز خوشه‌ای نشان می‌دهد که احتمالاً باریم و کلسیم به‌صورت بی‌کربنات باریم و کلسیم، لیتیم، استرانسیم و سدیم به‌صورت سولفات لیتیم، استرانسیم و سدیم و منیزیم به‌صورت کلرید منیزیم در آب وجود دارند. در فاکتور دوم عناصر آهن، منگنز و آلومینیوم قرار دارند که پس از رهاسازی از سنگ‌ها، در شرایط اکسیدان و قلیایی آب منطقه به‌صورت هیدروکسیدهای آلومینیوم، آهن و منگنز رسوبگذاری می‌کنند. در فاکتور سوم وانادیم به همراه pH قرار دارد که ممکن است به دلیل روند تغییرات مشابه این دو پارامتر و همچنین تبعیت غلظت وانادیم از pH باشد. در فاکتور چهارم کادمیم قرار دارد که تفاوت در روند تغییرات و رفتار ژئوشیمیایی این عنصر در آب موجب شده که در گروهی جداگانه قرار گیرد.

## منابع

- احمدی‌پور، حمید (۱۳۷۲)، «بررسی دینامیزم فعالیت‌های آتشفشانی کوه مزاحم (شهربابک)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۶۶ صفحه.
- ایبای، جی‌نلسون (۲۰۰۴)، «مبانی زمین‌شیمی زیست‌محیطی»، ترجمه فریدمر، سروش مدبری و گیتی فرقانی تهرانی، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول، دانشگاه شیراز، ۶۷۰ صفحه.
- خلیلی‌مهرهن، شهرام (۱۳۹۰)، «آتشفشان‌شناسی، ژئوشیمی و پتروژنز آتشفشان بیدخوان واقع در جنوب بردسیر- استان کرمان»، رساله دکترا، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۶۵ صفحه.
- درویش زاده، علی (۱۳۸۳)، «آتشفشان‌ها و رخساره‌های آتشفشانی»، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۸۷ صفحه.
- راشت، محمدحسین و سیف، عبدالله (۱۳۷۳)، «دیاپیرسم و نقش آن در آلودگی رودخانه دایکی»، نهمین کنگره جغرافیدانان ایران، دانشگاه تبریز، صص ۸۸-۸۷.
- شهسوارپور، ناهید؛ اسماعیلی‌ساری، عباس؛ صالحی، آزاده؛ موسوی‌کشکا؛ معصومه و ملازاده، نسترن (۱۳۸۶)، «بررسی کیفیت آب رودخانه هراز جهت آبیاری و تعیین منابع آلوده کننده آب رودخانه»، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، صص ۱۶۷-۱۶۶.
- عطاپور، حبیبه؛ طاهری، مژگان و رحمانی، فرح (۱۳۸۹)، «ژئوشیمی زیست محیطی سنگ، خاک، آب و گیاه در محدوده ورقه ۱:۵۰۰۰ کرمان با نگرشی بر زمین‌شناسی پزشکی»، وزارت صنایع و معادن، ۴۹۶ صفحه.
- عطاپور، حبیبه (۱۳۸۶)، «تکوین ژئوشیمیایی و متالورژی سنگ‌های آذرین پتاسیم‌دار در کمربند آتشفشانی - نفوذی دهج- ساردوئیه استان کرمان با نگرش ویژه به عناصرخاکی»، رساله دکترای دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۴۰۱ صفحه.
- علیزاده، امین (۱۳۸۵)، «اصول هیدرولوژی کاربردی»، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ بیستم، ۸۰۷ صفحه.
- مهدوی، محمد (۱۳۸۴)، «هیدرولوژی کاربردی»، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۴۱ صفحه.
- میسون، برایان و کارلتون ب.مر (۱۹۸۲)، «اصول ژئوشیمی»، ترجمه فریدمر و اصغر شرفی، مرکز نشر دانشگاه شیراز، چاپ هفتم، دانشگاه شیراز، ۵۶۶ صفحه.

- هوشمند، عبدالرحیم؛ سیدکابلی، حسام و دلقندی، مهدی (۱۳۸۶)، «مطالعه وضعیت کیفی آب رودخانه‌ها با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب (WQI, OWQI, CWQI) (مطالعه موردی: بازه ملاثانی- اهواز رودخانه کارون)»، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، صفحه ۱۲۸.

- یوسفی، جابر و مرادیان، عباس (۱۳۹۱)، «الگوی کانه‌زایی کانسار مس- طلا چهارگنبد (سیرجان)، با استفاده از مطالعات کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمیایی و آزمون‌های آماری چندمتغیره»، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، جلد ۴، صص ۱۵۳-۱۳۵.

- Ahmad, T., Khanna, P.P., Chakrapani, G.J., Balakrishnan, S., (1998), "Geochemical characteristics of water and sediment of the Indus river, Trans-Himalaya, India: constraints on weathering and erosion, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 16, pp. 333-346.
- Anazawa, K., Ohmori, H., (2001), "Chemistry of surface water at a volcanic summit area, Norikura, Central Japan: Multivariate statistical approach", *Chemosphere*, No 45: 807-816.
- Anazawa, K., Yoshida, M., (1996), "Multivariate analysis of Japanese volcanic rocks: Volatile and major elements", *J. Geochem*, No. 30: 355-372.
- Dimitrijevic, M.D., (1973), "*Geology of Kerman Region: Geological survey of Iran*", Rep.Noyu/52, 334p.
- Gibbs, R.J., (1972), "Water Chemistry of the Amazon River", *Geochemica et Cosmochemica Acta*, Vol. 36, pp 1061-1066-  
Hounsflow, A.W., (1995), *WATER QUALITY DATA: Analysis and Interpretation*, Lewis Publishers, 397p.
- Khalili, Sh., Viccaro, M., Cristofolini, R., Ahmadipour, H., (2008), "Differentiation of high-K calcalkaline magmas at Mount Bidkhan volcano (Central Iranian Volcanic Belt)", *Geochemica and Cosmochemica Acta. Special supplement*, A467.
- Likens, G.E., Borman, F.H., Pierce, R.S., Eaton, J.S., Johnson, N.M., (1977), "*Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*", Springer-Verlag, 135p.

- Miller, W.R., Drever, J.K., (1977), "Chemical weathering and related controls on surface water chemistry in the Absarok Mountains, Wyoming", *Geochemica et Cosmochemica Acta*, Vol. 41, pp. 1693-1702.
- Reeder, S.W., Hitchon, B., Levinson, A.A., (1972), "Hydrogeochemistry of the surface waters of the Mackenzie River drainage basin, Canada I. Factors controlling inorganic composition", *Geochemica et cosmochemica Acta*, Vol. 36, pp. 825-865.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E., Webb, J.S., (1979), "*Geochemistry in Mineral Exploration*", Academic Press, 2<sup>nd</sup> edition, London, p. 657.
- Ryu, J.S., Lee, K.S., Chang, H.W., Shin, H.S., (2008), "Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea", *Chemical Geology*, 247, 66-80.
- Sakurai, T., Kazuo, K., Yamada, T., (1998), "Characteristics of river water quality in relation to geological environments at the eastern foot of the Hida Mountains", *Jpn, J. Limnol*, No 59, 87-100.
- Selinus, O., (2005), "*Essentials of Medical Geology, Impact of the Natural Environment on Public Health*", Elsevier, Academic Press, 811p.
- Shahabpour, J., (2007), "Island Arc Affinity of the Central Iranian Volcanic Belt", *Journal of Asian Earth Sciences*, No. 30, pp. 625-665
- Takamura, M., (1985), "Classification of river waters in different parent rocks from their chemical compositions", *Jpn, J. Limnol*, No 46, 128-134
- Temel, A., Gundogdu, M.N., Gourgaud, A., (1998), "Petrological and geochemical characteristic of Cenozoic high-k calc-alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey", *J. Volcanology and Geothermal Research*, 85, 327-354.
- Wang, D., Sanudo Wilhelmy, S.A., (2009), "Vanadium speciation and cycling in coastal waters", *Marine Chemistry*, 117, 52-58.

- Weeks, A., (1961), "Mineralogy and Geochemistry of vanadium in the Colorado Plateau", ***J. Less-Common Metals***, No. 3, pp. 443-450.
- Wehrli, B., Stumm, W., (1989), "Vanadyl in natural waters: adsorption and hydrolysis promote oxygenation", ***Geochem. Cosmochim. Acta*** 53, 69-77.
- Wu, L., Huh, Y., Qin, J., Du, G., Van Der Lee, S., (2005), "Chemical weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai-Tibet Plateau", ***Geochimica et Cosmochimica Acta***, Vol. 69, No. 22, pp. 5279-5294.