

## تجزیه و تحلیل هیدروژئوشیمیایی رودخانه بیدخوان بردسیر کرمان با استفاده از آزمون مؤلفه اصلی و آنالیز خوشه‌ای

سارا شیخ فخرالدینی\*<sup>۱</sup>، احمد عباس‌نژاد<sup>۲</sup>

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

Email: abbasnejad35@yahoo.com

۲. دانشیار بخش زمین‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۹/۱۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۶/۳۱

### چکیده

هدف این مطالعه، تعیین منشأ و غلظت عناصر و ترکیبات محلول در آب رودخانه بیدخوان است. این رودخانه زهکش‌کننده دهانه آتشفشان غیرفعال بیدخوان است که در ۴۰ کیلومتری جنوب‌شرق بردسیر کرمان واقع شده است. بدین منظور ۱۲ نمونه در مسیر این رودخانه برداشت و EC، pH و درجه حرارت آن‌ها در صحرا و غلظت یون‌های اصلی و چند فلز سنگین با روش‌های استاندارد تعیین شد. پس از کنترل صحت و دقت نتایج، از تکنیک‌های آماری آنالیز مؤلفه اصلی و خوشه‌ای در نرم‌افزار SPSS و از نرم‌افزار GIS برای تحلیل تغییرات غلظت عناصر استفاده شد. در آنالیز مؤلفه اصلی، عناصر و ترکیبات در ۴ گروه (فاکتور) مختلف قرار گرفتند. در فاکتور اول، کاتیون‌های کلسیم، سدیم، منیزیم، لیتیم، استرانسیم، باریم و آنیون‌های بی‌کربنات، سولفات و کلرید قرار دارند که از فرایندهای غالب اصلی یعنی کیفیت آب باران، هیدرولیز سیلیکات‌ها و احتمالاً هوازدگی پیریت تأثیر پذیرفته‌اند. در فاکتور دوم، عناصر آهن، منگنز و آلومینیوم قرار دارند که منشأ یکسان موجب آزاد شدن آن‌ها به صورت همزمان و رسوب‌گذاری این عناصر به صورت هیدروکسید در برخورد با شرایط قلیایی و اکسیدان آب منطقه شده است. در فاکتور سوم، وانادیم همراه pH قرار دارد که نشان می‌دهد تغییرات وانادیوم از تغییرات pH تبعیت می‌کند. در فاکتور چهارم عنصر کادمیوم قرار دارد که تفاوت در رفتار ژئوشیمیایی این عنصر موجب شده است که در گروهی جداگانه قرار گیرد. نتایج آنالیز خوشه‌ای نیز به طور کلی نتایج آزمون مؤلفه اصلی را تأیید می‌کند. غلظت عناصر لیتیم، استرانسیم، باریم و وانادیم در آب رودخانه انعکاسی از غلظت آن‌ها در سنگ‌های منطقه است که به طور عمده شامل گدازه‌های آندزیتی-داسیتی و ریولیتی و انواع نهشته‌های آذرآواری است و واکنش‌های هیدرولیز سیلیکات‌ها و تا حدی تجزیه پیریت مهم‌ترین عوامل رهاسازی آن‌ها محسوب می‌شوند. غلظت باریم و لیتیم پایین‌تر از حد استاندارد EPA و WHO است، اما وانادیم در مقایسه با آب آشامیدنی سایر کشورها غلظت بالایی دارد.

### کلیدواژه

آزمون مؤلفه اصلی، آنالیز خوشه‌ای، رودخانه بیدخوان، سنگ‌های آذرین بیرونی، هیدروژئوشیمی.

### ۱. سرآغاز

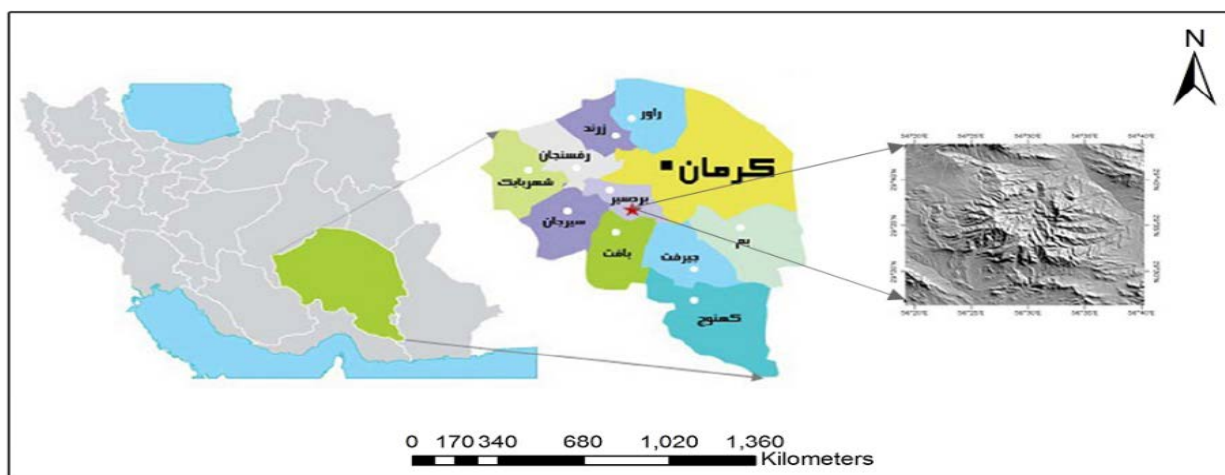
آب سطحی در نواحی کوهستانی از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار است و ترکیب شیمیایی آن بر اساس تعادل آب-سنگ تعیین می‌شود. علاوه بر این، مقادیر EC این آب‌ها عموماً پایین است و برخی از گونه‌های شیمیایی اصلی زیر حد تشخیص قرار دارند. این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که آنالیز شیمیایی این آب‌ها همانند تفسیر ترمودینامیکی داده‌های به‌دست‌آمده مشکل باشد و این موضوع ممکن

تحقیقات هیدروژئوشیمیایی آب‌های سطحی عمدتاً از دیدگاه آلودگی آب انجام می‌گیرند و اکثر تحقیقات بر آب‌های تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی متمرکز می‌شوند. به هر حال به ندرت درباره آب رودخانه‌ها و دریاچه‌هایی که کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته‌اند، تحقیقات علمی صورت گرفته است (Sakurai, et Anazawa and Ohmori, 2001). (Takemura, 1985 al., 1998).

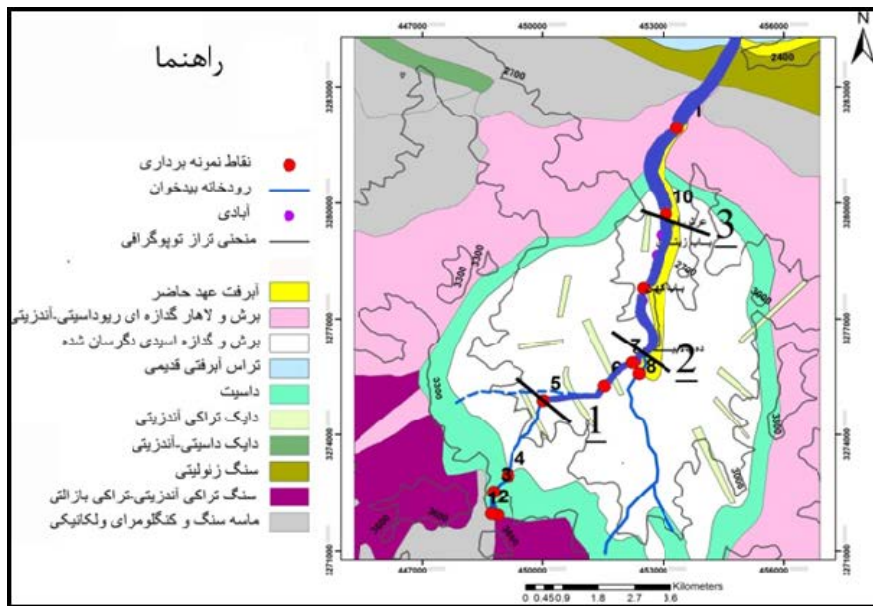
زمستان سرد است. در این منطقه روستاهای متعددی در دره اصلی زهکش کننده کالدراي آتشفشان واقع شده‌اند. حدود ۱۲ كيلومتر از رودخانه بیدخوان در محدوده کالدرا واقع شده که تأمین کننده آب ساکنان روستاهای منطقه است. ایستگاه اندازه‌گیری دبی روی این رودخانه نصب نشده، اما بر اساس مشاهدات صحرايي در اردیبهشت بالاترین دبی در حدود ۶۰۰۰ لیتر در ثانیه بوده است و معمولاً در ماه‌های مرداد تا آبان به طور کامل خشک می‌شود. متوسط دبی آن حدود ۶۱۰ لیتر در ثانیه است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، به سمت پایین دست رودخانه دبی افزایش می‌یابد. بنابر محاسبات انجام شده، وسعت حوضه آبیگیر آن نیز در محل خروج از کالدرا ۸۳/۰۲ كيلومتر مربع و محیط آن ۶۱/۲۹ كيلومتر است. ضریب گردی حوضه ۰/۲۸ و ضریب کشیدگی آن ۰/۵۷ است که حاکی از کشیدگی حوضه است. ارتفاع میانگین حوضه ۲۹۸۸ متر و شیب متوسط حوضه ۰/۳ درصد است. شایان یادآوری است که تغییرات دما در این رودخانه اندک و بین ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. علاوه بر این، تغییرات pH نیز اندک و بین ۶/۹ تا ۷/۴ است.

است به علت مطالعات اندک درزمینه ژئوشیمی آب‌های سطحی نواحی کوهستانی مرتفع باشد. کارهای هیدروشیمیایی در نواحی آتشفشانی به جز برای اکتشاف انرژی حرارتی زمین، به ندرت انجام می‌شود (Anazawa and Ohmori, 2001). از این رو هدف این تحقیق بررسی منشأ عناصر و شیمی آب رودخانه زهکش کننده کالدراي بیدخوان و ارزیابی تأثیر غلظت فلزات در سنگ‌های ولکانیکی در کیفیت آب است.

کالدراي بیدخوان یک استراتوولکان است (درویش‌زاده، ۱۳۸۳) که در جنوب شرق ایران (با فاصله ۱۱۵ كيلومتری از شهرستان کرمان) و در ۴۰ كيلومتری جنوب بردسیر در محدوده‌ای به طول جغرافیایی ۲۵° و ۵۶° تا ۳۰° و ۵۶° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵° و ۲۹° تا ۴۰° و ۲۹° شمالی واقع شده است (شکل ۱). این آتشفشان در بخش جنوب شرقی کمر بند ارومیه دختر قرار دارد (Shahabpour, 2007). بر اساس تقسیم‌بندی دیمتریجویچ (1973)، بیدخوان در کمر بند دهج - ساردوئیة از تقسیمات زمین‌شناسی کرمان واقع شده است. این آتشفشان محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۴۰۰ كيلومتر مربع را اشغال کرده و ارتفاع بلندترین قله آن از سطح دریاهای آزاد حدود ۳۸۰۰ متر است. آب و هوای منطقه در تابستان معتدل و در



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه تغییرات آبدهی متوسط رودخانه بیدخوان  
 (در نقاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲۹۰، ۴۱۰ و ۶۳۰ لیتر بر ثانیه برآورد شده است)

## ۲. زمین‌شناسی

اولین محصول فورانی در آتشفشان بیدخوان را آذرآواری‌های خیزابی تشکیل می‌دهند که با یک دگرشیبی زاویه‌ای روی سنگ‌های ائوسن واقع شده‌اند. با توجه به مشخصات آذرآواری‌های خیزابی و طبق داده‌های سن‌سنجی مطلق انجام‌گرفته روی سنگ‌های بیدخوان، به نظر می‌رسد که فوران از نوع فراتوپلینین بوده و قبل از اشکوب سراوالین یا قبل از  $12/87 \pm 3/12$  میلیون سال پیش صورت گرفته است (Khalili, et al., 2008).

پس از طی مدتی از خاموشی آتشفشان، ماگما اندکی تغییر و به سمت حدواسط پیش رفته و فعالیت آتشفشان به صورت یکسری انفجارات پیاپی پلینین (Plinian) ادامه یافته است. در بین بعضی از فوران‌های آذرآواری جریانی، گدازه‌ها نیز به سطح زمین رسیده‌اند و به صورت بین‌لایه‌ای با مواد آذرآواری دیده می‌شوند. در پایان و پس از اینکه فوران آذرآواری تمام شد، آخرین گدازه به آرامی از دهانه آتشفشان بیرون می‌ریزد و روی آذرآواری‌های قبلی قرار می‌گیرد. 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 فورانی‌اند (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰). ترکیب کانی‌شناسی آندزیت‌ها شامل پلاژیوکلازها، انواع پیروکسن‌ها، آمفیبول (هورنبلند)، میکا (بیوتیت) و آلکالی فلدسپار (سانیدین) است در حالی که در داسیت‌ها انواع پلاژیوکلازها همراه آمفیبول (هورنبلند)، میکا (بیوتیت)، آلکالی فلدسپار (سانیدین) و کوارتز دیده می‌شوند (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰).

بعد از فرونشینی کالدرای به علت خالی‌بودن مخزن ماگمایی، دگرسانی رخساره مرکزی، توده ساب و لکانیک و دیگر سنگ‌های کالدرای صورت گرفته و موجب تمرکز سولفیدهای سرب، روی، نقره و طلا در بخش مرکزی شده است. طبق داده‌های سن‌سنجی، تزریق دایک‌ها و پلاگ باید به ترتیب  $10/17 \pm 0/69$  و  $9/49 \pm 2/88$  میلیون سال پیش رخ داده باشد که از این زمان به بعد دیگر آتشفشان فعالیت نداشته است. تمامی این اتفاقات نشان می‌دهند که بیدخوان مراحل تکاملی و بلوغ آتشفشان مرکب را پشت سر گذاشته و تاکنون تحت تأثیر فرسایش آبی (خلیلی‌مهرن، ۱۳۹۰)

و یخچالی و پیرایخچالی (Periglacial) در قسمت‌های مرتفع قرار گرفته است.

### ۳. روش تحقیق

در این تحقیق ۱۲ نمونه آب از بالادست به پایین‌دست رودخانه بیدخوان در تاریخ ۱۳۹۱/۴/۲۰ برداشت شد (شکل ۳). ظرف نمونه‌برداری از جنس پلی‌اتیلن ۱ لیتری بود. ظروف مورد استفاده قبل از نمونه‌برداری با اسید و آب مقطر و هنگام نمونه‌برداری نیز ۳ بار با آب مورد استفاده برای نمونه‌گیری، شستشو شدند. در هر نقطه نمونه‌برداری، ۳ ظرف آب برداشته شد که در یکی اندازه‌گیری آنیون‌های اصلی و ۲ ظرف دیگر اندازه‌گیری کاتیون‌ها و فلزات مد نظر بود. نمونه کاتیونی و فلزات با استفاده از اسیدنیتریک ۶۵ درصد تا pH زیر ۲ اسیدی شدند تا از رسوب احتمالی کاتیون‌ها و رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری شود و جذب سطحی از طریق 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 موقعیت جغرافیایی محل نمونه‌برداری با GPS اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس، نمونه‌های کاتیون و آنیون برای آنالیز به سازمان آب منطقه‌ای استان کرمان و فلزات به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید باهنر کرمان فرستاده شدند. برای اندازه‌گیری کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات و کلر از روش تیتراسیون، سدیم از روش فلیم فتومتری (Flame photometry) و مقدار سولفات نمونه‌ها از روش وزن‌سنجی استفاده شد. فلزات سنگین نیز با روش ICP-OES در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید باهنر کرمان اندازه‌گیری شدند.

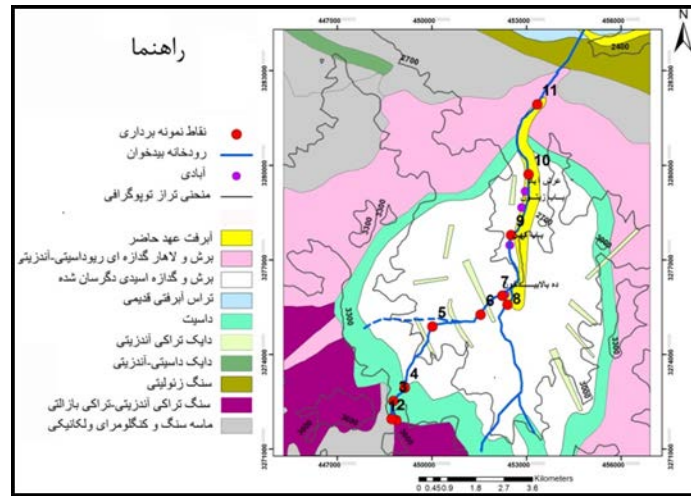
برای بررسی دقت اندازه‌گیری، یک نمونه تکراری در بین نمونه‌های ارسالی قرار گرفت و همراه سایر نمونه‌ها تجزیه شیمیایی شد. با بررسی مقادیر عناصر در نمونه تکراری و تعیین درصد خطا از طریق فرمول  $(\frac{TS}{X} \times 1000)$  مشخص شد که خطای به دست آمده کمتر از ۱۰ درصد و بنابراین، تجزیه شیمیایی عناصر از دقت قابل قبولی

برخوردار بوده است. برای پردازش و تحلیل مقادیر عناصر از نرم‌افزارهای SPSS.18، Excel و Arc Map در محیط Windows 7 استفاده شد.

### ۱.۳. تکنیک‌های آماری

آنالیز چندمتغیره، تکنیکی آماری است که در تحلیل متغیرها به ما کمک می‌کند. کاربرد و توسعه این روش آماری عمدتاً در زمینه علوم اجتماعی بوده، اما به تازگی عملکرد بالا و قیمت پایین کامپیوترهای شخصی موجب شده است استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره برای تجزیه و تحلیل در زمینه‌های ژئوشیمیایی و هیدروژئوشیمیایی بهبود یابد (Anazawa and Yoshida, 1996؛ Anazawa and Ohmori, 2001). استفاده از این تکنیک در تبدیل حجم زیادی از داده‌ها به پارامترهای کمتر و تجزیه و تحلیل همبستگی میان آن‌ها بسیار مفید است، بنابراین تجزیه و تحلیل از این طریق نتایج قابل قبولی به دنبال خواهد داشت. تنوع گسترده‌ای از تکنیک‌های آنالیز چندمتغیره در دسترس است، لذا انتخاب مناسب‌ترین تکنیک به ماهیت داده‌ها، مشکلات موجود و اهداف بستگی دارد.

در ارتباط با آنالیز چندمتغیره، فاکتور آنالیز (FA) تکنیک آماری شناخته شده است و کاربرد بسیاری دارد که به ما امکان می‌دهد فاکتورهای معمولی که الگوهای رفتاری را کنترل می‌کنند، استخراج کنیم. این تکنیک برای استخراج و درک اطلاعات مربوط به منشأ و تغییر هر یک از عناصر محلول در نمونه‌های آب طبیعی به کار برده می‌شود (Anazawa and Ohmori, 2001). همچنین، برای دسته‌بندی عناصر بر اساس روابط ژئوشیمیایی می‌توان از آنالیز خوشه‌ای (CA) استفاده کرد. در آنالیز خوشه‌ای عناصر یا متغیرهای آماری بر اساس میزان همبستگی آماری به خوشه‌هایی تقسیم می‌شوند که بیانگر میزان ارتباط آن‌ها با یکدیگر است. 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 (Pearson) مرتب شده‌اند.



شکل ۳. نقشه پراکندگی نقاط نمونه‌برداری

آنورتیت در پلاژیوکلازهای 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 (Mason and Moore, 1982). علاوه بر این، استرانسیم با داشتن ماهیتی ناسازگار معمولاً در انتهای تفریق جانشین کلسیم و پتاسیم در پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم‌دار می‌شود (Mason and Moore, 1982). 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 شود (عطاپور، ۱۳۸۹). لیتیم عنصری است که جانشین سدیم، پتاسیم و منیزیم در کانی‌های سیلیکاته از جمله فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، آمفیبول و کانی‌های رسی می‌شود (عطاپور، ۱۳۸۹). منیزیم در کانی‌های کلینوپیروکسن، میکا و آمفیبول سنگ‌های منطقه و سدیم نیز در کانی‌های سیلیکاته سدیم‌دار مانند فلدسپارها وجود دارند. به طور کلی هوازگی از نوع هیدرولیز سیلیکات‌ها عامل مهم و اصلی رهاسازی این یون‌ها از داخل شبکه کانی‌های سیلیکاتی اولیه سنگ‌هاست، اما انحلال کربن‌دی‌اکسید و تا حدی اکسید شدن پیریت که با آزاد شدن یون  $H^+$  همراهند، این فرایند را تشدید کرده‌اند.

#### ۴. نتایج و بحث

نتایج حاصل از تکنیک‌های آماری آزمون مؤلفه اصلی، آنالیز خوشه‌ای و ماتریس همبستگی به ترتیب در جدول ۲، شکل ۴ و جدول ۳ ارائه شده‌اند. علاوه بر این، غلظت فلزات در آب رودخانه از نظر تأثیرپذیری از غلظت عناصر در سنگ‌ها و مقایسه با مقادیر استاندارد بحث و بررسی شده است که در ادامه به این موارد پرداخته می‌شود. شایان یادآوری است که خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی در جدول ۱ آورده شده است.

#### ۴.۱. تفسیر فاکتورها

##### ۴.۱.۱. 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 واریانس داده‌ها وجود دارد. کلسیم عموماً در پلاژیوکلازها و به میزان کمتر در کلینوپیروکسن‌ها متمرکز می‌شود (Mason and Moore, 1982) که علت این کاهش عمدتاً مربوط به تشکیل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز است که فنوکریست اصلی در آندزیت‌ها و داسیت‌ها طی فرایند تبلور است (Temel, et al., 1998). بر اساس مطالعات کانی‌شناسی انجام‌گرفته از سوی خلیلی (۱۳۹۰)، پلاژیوکلازها ۶۵ و آندزیت‌ها ۷۵ درصد از داسیت‌های منطقه را تشکیل می‌دهند که درصد

جدول ۱. خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی در نمونه‌های آب رودخانه بیدخوان (میکروگرم بر لیتر) و مقادیر استاندارد جهانی

پارامتر	دامنه تغییرات	ماکزیمم	میانگین	میانه	انحراف از معیار	متوسط آب رودخانه‌ها (Levinson, 1980; Hamilton and Helsel, 1995)	سازمان بهداشت جهانی (۲۰۰۶)	سازمان حفاظت از محیط‌زیست (۲۰۰۳)
Al	<5-60/07	60/07	17/81	10/16	21/47	-	100-200	50-200
As	<5-8/24	8/24	4/16	3/75	1/35	2	10	10
Ba	0/28-23/56	23/56	11/9	13/01	8/16	10	700	2000
Cd	<0/5-4/54	0/54	1/39	0/38	1/44	-	3	5
Cr	<1	-	-	-	-	1	50	100
Cu	<10	-	-	-	-	7	2000	1000
Fe	<2-199/2	199/2	26/52	4/09	59/67	-	-	300
Li	1/07-20/85	20/85	8/69	5/068	7/88	3	-	-
Mn	<0/4-19/54	19/54	3/8	0/8	5/97	7	400	50
Mo	<2	-	-	-	-	1	70	70
Ni	<10	-	-	-	-	0/3	70	0/1
Pb	<10-14/19	14/19	8/11	7/5	2/02	3	10	15
Sr	25/47-394/14	394/14	163/49	145/77	138/46	50	-	-
V	<20-59/21	59/21	28/12	24/03	14/68	0/9	-	-
Zn	<10	-	-	-	-	20	3000	5000
Ca <sup>++</sup>	10000	100000	40000	40000	28270	-	-	-
Mg <sup>++</sup>	2400	33600	6400	11454	11300	-	-	-
Na <sup>+</sup>	6900	41000	9200	15654	12742	-	-	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	54900	274000	195000	164518	89296	-	-	-
Cl <sup>-</sup>	3550	14200	6656	7418	4029	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	4800	171000	9600	35967	52047	-	-	-
pH	7/9-7/4	7/4	-	-	-	-	-	-
EC	95-653	653	-	-	-	-	-	-

در میان آنیون‌ها، کلر در بیشتر سنگ‌های آذرین به مقدار ناچیز وجود دارد و از این رو آب باران به‌منزله منبع اصلی کلر در نظر گرفته می‌شود. منبع سولفات نیز می‌تواند کانی‌های پیریت، ژیپس، انیدریت، آب باران و خاک باشد (Hounslow, 1995). منشأ آنیون غالب در منطقه یعنی بیکربنات، دی‌اکسیدکربن جوی و تا حدی هیدرولیز

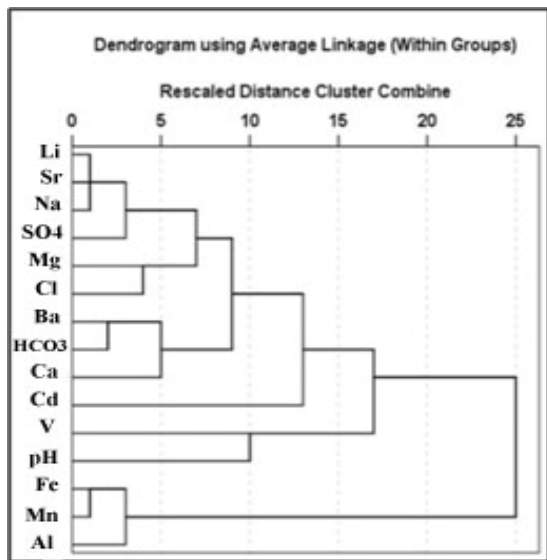
سیلیکات‌هاست (Hounslow, 1995). بنابراین، آب باران دارای کلر و سولفات که در تماس با دی‌اکسیدکربن جوی دارای آنیون بی‌کربنات نیز است، در نتیجه واکنش با سنگ‌ها و ایجاد هوازدگی شیمیایی، عناصر لیتیم، استرانسیم، باریم، کلسیم، سدیم و منیزیم را از سنگ می‌شوید و با خود حمل می‌کند. لذا منشأ تمامی این عناصر

منیزیم محلول در آب به صورت کمپلکس کلرید منیزیم وجود دارد.

جدول ۲. شبکه مؤلفه‌های اصلی پارامترهای شیمیایی در نمونه‌های آب رودخانه بیدخوان

پارامتر	Rotated Component Matrix <sup>a</sup>			
	Component			
	1	2	3	4
Ba	۰/۵۹			
Li	۰/۹۶			
Sr	۰/۹۶			
Ca <sup>2+</sup>	۰/۶۵			
Mg <sup>2+</sup>	۰/۷۸			
Na <sup>+</sup>	۰/۹۳			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	۰/۸۱			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	۰/۸۳			
Cl <sup>-</sup>	۰/۷۷			
Al		-۰/۸۹		
Fe		-۰/۹۲		
Mn		-۰/۹۳		
V			۰/۸۶	
PH			۰/۸۳	
Cd				۰/۸۲

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



شکل ۴. آنالیز خوشه‌ای پارامترهای شیمیایی در آب رودخانه بیدخوان

از سنگ‌های منطقه و آب باران است و همین موضوع یکی از دلایلی است که موجب شده این عناصر در مؤلفه اول آزمون مؤلفه‌های اصلی قرار گیرند. علاوه بر این، روند تغییرات غلظت این عناصر مشابه است و به سمت پایین دست رودخانه افزایش می‌یابد.

برای تفکیک بهتر عناصر این فاکتور از آنالیز خوشه‌ای استفاده شده است (شکل ۴). تحلیل خوشه‌های مربوطه به شرح زیر است:

باریم همراه بی‌کربنات در یک خوشه قرار می‌گیرند که در مرتبه بالاتری با کلسیم و سایر عناصر مؤلفه اول آزمون مؤلفه‌های اصلی ارتباط دارند. بنابراین، بر اساس همبستگی کلسیم و باریم می‌توان نتیجه گرفت که باریم بیشتر جانشین کلسیم در سیلیکات‌ها شده است و بر اساس همبستگی باریم و بی‌کربنات این احتمال وجود دارد که علاوه بر روند تغییرات مشابه این دو پارامتر، کمپلکس باریم در آب بیشتر به صورت بی‌کربنات باریم است. علاوه بر این، عنصر دارای ضریب همبستگی معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ با عناصر استرانسیم، کلسیم، بی‌کربنات و کلر است.

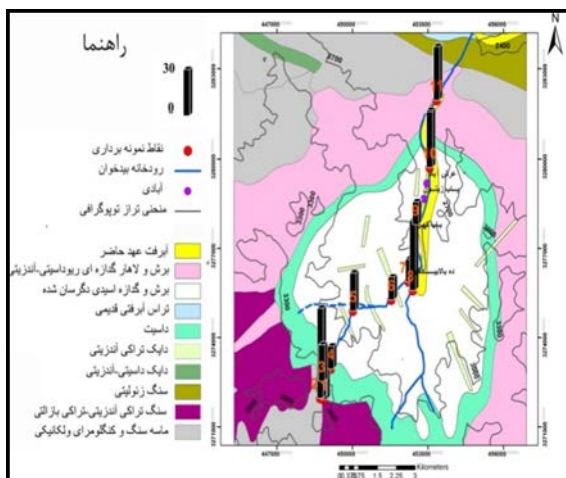
عناصر لیتیم، استرانسیم و سدیم در یک گروه واقع شده‌اند و سولفات در مرتبه بالاتری نسبت به این عناصر قرار دارد. لیتیم از نظر جانشینی تا حدی متفاوت با استرانسیم است، اما رفتار ژئوشیمیایی و روند تغییرات مشابه این دو عنصر در آب منطقه موجب شده است که در یک گروه قرار گیرند. عنصر سدیم نیز از لحاظ روند تغییرات مشابه عناصر استرانسیم و لیتیم است. این در حالی است که ترکیبات فلوریدی، کربناتی و فسفاتی لیتیم در شرایط طبیعی غیر محلول‌اند (عطاپور، ۱۳۸۹). بر اساس همبستگی میان لیتیم و سولفات، احتمالاً لیتیم در آب به صورت کمپلکس سولفات لیتیم وجود دارد. علاوه بر این، استرانسیم نیز در pH=۵-۷/۵ منطقه غالباً به صورت سولفات استرانسیم یافت می‌شود (عطاپور، ۱۳۸۹).

عناصر منیزیم و کلر در یک گروه قرار دارند و این نشان می‌دهد که علاوه بر روند تغییرات مشابه احتمالاً





میانگین ۲۸/۱۲ میکروگرم بر لیتر است (شکل ۵). میانۀ وانادیم ۲۴/۰۳ میکروگرم بر لیتر است که نسبت به متوسط آب رودخانه ۴/۴۸ برابر افزودگی نشان می‌دهد. بیشتر بودن غلظت وانادیم نسبت به متوسط آب رودخانه‌ها موجب شد که غلظت این عنصر را در سنگ‌های منطقه ارزیابی کنیم. بدین منظور از داده‌های خلیلی (۱۳۹۰) استفاده و با متوسط سنگ‌ها مقایسه شد. نتایج نشان دادند که میانگین وانادیم در گدازه‌های آندزیتی، داسیتی، تراکی آندزیتی و تراکی داسیتی غیرهوازده نسبت به عیار این عنصر در سنگ‌های حدواسط به ترتیب ۳/۱۱، ۲/۴۵، ۴/۲۶ و ۵/۱۷ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های عطاپور (۱۳۸۶) نیز میانگین وانادیم در گدازه‌های آندزیتی، داسیتی و تراکی آندزیتی هوازده نسبت به عیار این عنصر در سنگ‌های حدواسط به ترتیب ۳/۸۴، ۲/۷۸ و ۲/۸۸ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. لذا، بالابودن غلظت وانادیم در آب را می‌توان به غلظت این عنصر در سنگ‌ها و محلول‌های گرمایی که موجب دگرسانی سنگ‌ها شده‌اند نسبت داد. همچنین، نمی‌توان با افزایش دبی برای این عنصر روند مشخصی در نظر گرفت که به نظر می‌رسد علاوه بر رفتار ژئوشیمیایی و میزان انحلال، میزان جذب از طریق هیدروکسیدهای آهن و منگنز و کانی‌های رسی ناشی از دگرسانی مهم‌ترین فرایندها در روند تغییرات غلظت باشد.



شکل ۵. نمودار ستونی غلظت عنصر وانادیم آب رودخانه بیدخوان (بر حسب ppb)

#### ۴.۱.۴. فاکتور ۴

در این فاکتور عنصر کادمیوم قرار دارد که ۱۰/۷۷ درصد از واریانس داده‌ها را شامل می‌شود. این عنصر همبستگی معناداری با سایر عناصر ندارد و در آنالیز خوشه‌ای نیز در فاصله‌ای دورتر، با پارامترهای شیمیایی در فاکتور اول مرتبط است. کادمیوم عنصری است که در شرایط اکسیدان و در  $pH=5-8$  اندکی متحرک و در  $pH < 4$  نسبتاً متحرک است. این عنصر در شرایط احیایی نامتحرک است (Rose, et al., 1979; Selinus, 2004). از این رو با توجه به غلظت پایین این عنصر در سنگ‌های منطقه (خلیلی مبرهن، ۱۳۹۰) و شرایط Eh و pH آب، غلظت این عنصر در آب نیز پایین است.

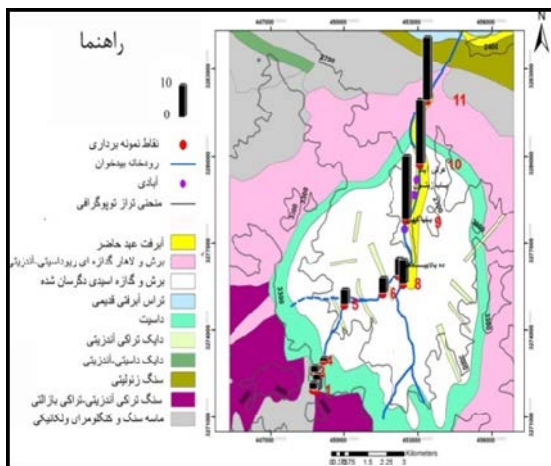
#### ۲.۴. بررسی غلظت عناصر فرعی و کمیاب در آب رودخانه

حد تشخیص دستگاه برای عناصر روی، مس و نیکل ۱۰، مولیبدن ۲ و کروم ۱ میکروگرم بر لیتر بوده است که این عناصر در تمامی نمونه‌ها زیر حد تشخیص‌اند. علاوه بر این، غلظت این عناصر نسبت به استاندارد حفاظت از محیط‌زیست آمریکا و سازمان بهداشت جهانی مقدار کمتری است. از این رو کیفیت آب از لحاظ این فلزات سنگین مناسب است. حد تشخیص برای عناصر آرسنیک و سرب نیز به ترتیب ۵ و ۱۰ میکروگرم بر لیتر بوده است که تنها یک نمونه بالاتر از حد تشخیص دستگاه دارند. غلظت آرسنیک در این نمونه ۸/۶۴ میکروگرم بر لیتر است که پایین‌تر از حدود استاندارد ذکر شده و غلظت سرب در این نمونه ۱۴/۱۹ میکروگرم بر لیتر است که پایین‌تر از حد استاندارد سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا و بالاتر از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی است. در ادامه نیز غلظت عناصر وانادیم، کادمیوم، استرانسیم، باریم و لیتیم شرح داده شده است.

#### ۱.۲.۴. وانادیم

تغییرات غلظت وانادیم ۲۲/۵۹-۲۰ میکروگرم بر لیتر با

میکروگرم بر لیتر است که نسبت به متوسط آب رودخانه ۱/۷ برابر افزودگی نشان می‌دهد و خطری برای سلامتی انسان نیز ندارد (شکل ۷) (Merian, et al., 2004). شایان یادآوری است که میانگین عیار باریم و لیتیم در سنگ‌های آندزیتی و داسیتی منطقه (خلیلی، ۱۳۹۰) نسبت به عیار این عنصر در سنگ‌های حدواسط افزودگی نشان نمی‌دهند. علاوه بر این، غلظت این عناصر به سمت پایین دست رودخانه با افزایش میزان انحلال و افزایش دبی افزایش یافته است.



شکل ۷. نمودار ستونی غلظت عنصر لیتیم آب رودخانه بیدخوان (بر حسب ppb)

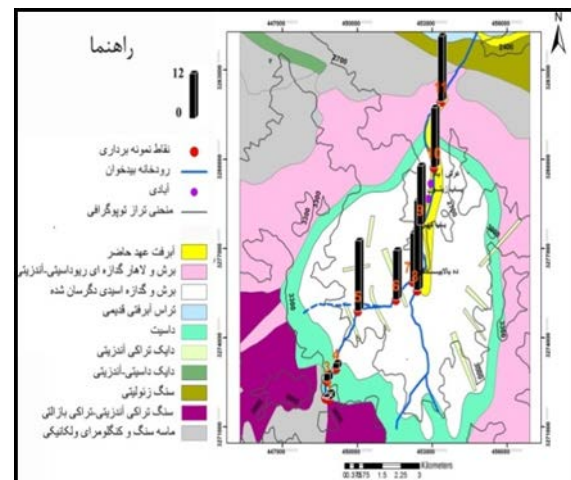
#### ۳.۲.۴. استرانسیم

تغییرات غلظت استرانسیم ۲۵/۴۷-۳۹۴/۱۴ میکروگرم بر لیتر با میانگین ۱۶۳/۴۹ میکروگرم بر لیتر است (شکل ۸). میانه استرانسیم ۱۴۵/۷۶۷ میکروگرم بر لیتر است که نسبت به متوسط آب رودخانه ۲/۹ برابر افزودگی نشان می‌دهد. در بررسی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌ها، با استفاده از داده‌های خلیلی (۱۳۹۰) مشخص شد که میانگین استرانسیم در گدازه‌های آندزیتی، داسیتی، تراکی آندزیتی و تراکی داسیتی غیرهوازده نسبت به عیار این عنصر در سنگ‌های حدواسط به ترتیب ۱/۴۱، ۲/۴، ۱/۶۴ و ۳/۲ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های عطاپور (۱۳۸۶) نیز میانگین

با توجه به اینکه برای وانادیم استاندارد ا ارائه نشده است، مقایسه‌ای میان غلظت این عنصر در آب منطقه با آب آشامیدنی برخی کشورها انجام شد. بر اساس مطالعات، غلظت وانادیم در آب آشامیدنی آلمان بین ۰/۱۸ تا ۱/۱۰ میکروگرم بر لیتر و در آمریکا و ژاپن نیز در همین حد تغییر می‌کند (Merian, et al., 2004). از این رو، نتایج نشان می‌دهند که غلظت این عنصر در آب رودخانه در مقایسه با آب آشامیدنی کشورهای ذکر شده بالاست. وانادیم به منزله ریزمغذی ضروری برای جلوگیری از پوسیدگی دندان مفید است (Snyder, 1999)، اما در مقایسه بالا موجب مشکلات معده‌ای از جمله اسهال می‌شود (Eby, 2004).

#### ۲.۲.۴. باریم و لیتیم

تغییرات غلظت باریم ۲۳/۵۶-۰/۲۸ با میانگین ۱۱/۹ میکروگرم بر لیتر است (شکل ۶).



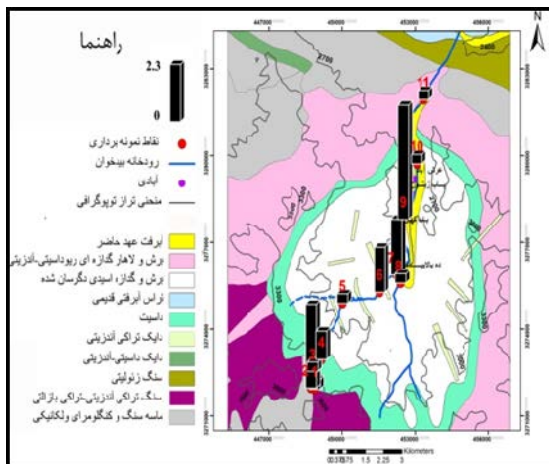
شکل ۶. نمودار ستونی غلظت عنصر باریم آب رودخانه بیدخوان (بر حسب ppb)

میانه باریم ۱۳/۰۱ میکروگرم بر لیتر است که نسبت به متوسط آب رودخانه ۱/۳ برابر افزودگی نشان می‌دهد. حداکثر مقدار باریم آب رودخانه نسبت به استاندارد سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا و سازمان بهداشت جهانی کمتر است. تغییرات غلظت عنصر لیتیم نیز ۲۰/۸۵-۱/۰۸ با میانگین و میانه به ترتیب ۸/۵۸۶ و ۵/۸۶

از طریق کانی‌های رسی و هیدروکسیدهای آهن و منگنز قرار می‌گیرد لذا، غلظت آن به سمت پایین‌دست رودخانه با افزایش میزان انحلال افزایش یافته است.

#### ۴.۲.۴. کادمیوم

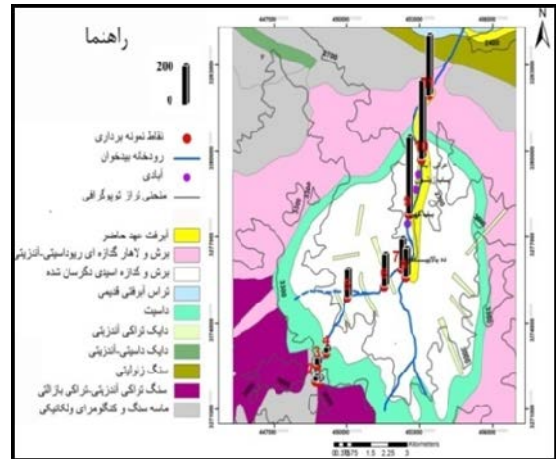
تغییرات غلظت کادمیوم ۴/۵۴-۰/۵ < با میانگین ۱/۳۹ و میانه ۰/۳۸ میکروگرم بر لیتر است که در مقایسه با دامنه تغییرات این عنصر در آب‌های طبیعی (۳-۰/۱ میکروگرم بر لیتر) (Merian, et al., 2004)، فقط نمونه‌های ۲ و ۹ اندکی بالاترند (شکل ۹) که نمونه ۹ با غلظت ۴/۵ میکروگرم بر لیتر از استاندارد سازمان بهداشت محیط‌زیست آمریکا پایین‌تر و از استاندارد سازمان بهداشت جهانی بالاتر است و احتمالاً مربوط به استفاده از کودهای شیمیایی در کشاورزی یا افزایش میزان هوازدگی سنگ بستر و تحرک بیشتر این عنصر است.



شکل ۹. نمودار ستونی غلظت عنصر کادمیوم آب رودخانه بیدخوان (بر حسب ppb)

بر اساس داده‌های خلیلی (۱۳۹۰)، غلظت کادمیوم در تمامی سنگ‌های غیرهوازه کمتر از ۲ میکروگرم بر لیتر است که در مقایسه با عیار این عنصر در سنگ‌های حدواسط افزودگی نشان نمی‌دهد. داده‌های عطاپور (۱۳۸۶) نیز نشان می‌دهند که سنگ‌های آندزیتی دگرسان در مقایسه با سنگ‌های حدواسط، ۲/۵۴ برابر افزودگی دارند. علاوه بر این، بر اساس غلظت این عنصر در سنگ

استرانسیم در گدازه‌های آندزیتی، داسیتی و تراکی آندزیتی هوازه، نسبت به عیار این عنصر در سنگ‌های حدواسط به ترتیب ۳/۸۴، ۱/۶۹ و ۱/۲۳ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. بنابراین، غلظت استرانسیم در آب‌های منطقه انعکاسی از غلظت این عنصر در سنگ‌هاست.



شکل ۸. نمودار ستونی غلظت عنصر استرانسیم آب رودخانه بیدخوان (بر حسب ppb)

استرانسیم عنصری با سمیت اندک برای انسان و حیوان است (Merian, et al., 2004). در واقع، اگرچه هنوز اطمینان از فعالیت بیولوژیکی آن وجود ندارد، اما عنصری ضروری برای انسان محسوب می‌شود (Schroeder, et al., 1972). در نهایت به علت کمیاب بودن داده‌های مرتبط با جذب و سمیت استرانسیم، سازمان بهداشت جهانی هیچ مقدار پیشنهادی برای جذب روزانه و حد استاندارد استرانسیم ارائه نکرده است. از این رو میان غلظت این عنصر در آب منطقه با آب آشامیدنی برخی کشورها مقایسه‌ای انجام شد. بر این اساس غلظت استرانسیم در آب آشامیدنی کانادا ۰/۱۹ تا ۳/۲ میلی‌گرم بر لیتر (Skoryna, 1981)، در نروژ ۱/۵ تا ۵۷۰ میکروگرم بر لیتر (Flaten, 1984) و در آب آشامیدنی آلمان ۰/۳۶ تا ۲۴/۵ میلی‌گرم بر لیتر (Merian, et al., 2004) تغییر می‌کند و بنابراین غلظت این عنصر در آب رودخانه را می‌توان مشابه سایر کشورها در نظر گرفت. شایان یادآوری است که این عنصر دارای تحرک نسبتاً بالایی است و کمتر تحت تأثیر جذب

بستر و رفتار ژئوشیمیایی آن، احتمالاً کانی‌های رسی ناشی از دگرسانی و جذب و واجذب از طریق آن‌ها مهم‌ترین عوامل در تغییرات غلظت این عنصر محسوب می‌شوند.

#### ۵.۲.۴. آلومینیوم، آهن و منگنز

تغییرات غلظت آلومینیوم  $60/07-5$  با میانگین  $17/81$  میکروگرم بر لیتر، تغییرات غلظت آهن  $2-199/2$  با میانگین  $267/52$  میکروگرم بر لیتر و تغییرات غلظت منگنز  $0/4-19/54$  با میانگین  $3/8$  میکروگرم بر لیتر است. حداکثر غلظت آلومینیوم، آهن و منگنز اندازه‌گیری شده نسبت به استانداردهای سازمان حفاظت از محیط زیست و سازمان بهداشت جهانی مقادیر کمتری است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

ممکن است منشأ بعضی از عناصر، آب باران یا خاک باشد، اما در مجموع منبع مهم ورود کاتیون‌های اصلی، فلزات سنگین و سایر عناصر، هوازدگی از نوع هیدرولیز سیلیکات‌هاست. همچنین، سنگ‌های آذرین از کلر فقیرند لذا، منبع مهم کلر آب باران فرض می‌شود. سولفات در آب‌های منطقه می‌تواند از هوازدگی پیریت رها شده باشد. در عین حال که معمولاً در آب باران مناطق خشک، نظیر منطقه مورد مطالعه، غلظت سولفات نیز می‌تواند بالا باشد. همچنین، روند تغییرات و تقسیم‌بندی عناصر در ۴ فاکتور و بررسی روابط ژئوشیمیایی بین آن‌ها نشان داد که این عناصر در آب و سنگ از اصول و روابط طبیعی پیروی می‌کنند. در بررسی غلظت عناصر نیز مشاهده شد که غلظت عناصری مانند باریم، لیتیم، استرانسیم و وانادیم

#### منابع

- خلیلی مبرهن، ش. ۱۳۹۰. «آتش‌فشان‌شناسی، ژئوشیمی و پتروژنز آتش‌فشان بیدخوان واقع در جنوب بردسیر- استان کرمان»، رساله دکتری، رشته پترولوژی، استاد راهنما: دکتر حمید احمدی‌پور، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۶۵ صفحه.
- درویش‌زاده، ع. ۱۳۸۳. آتش‌فشان‌ها و رخساره‌های آتش‌فشانی، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۸۷ صفحه.

فراتر از غلظت متوسط این عناصر در آب رودخانه‌هاست که برای مثال غلظت عنصر وانادیم حدود ۵ برابر بیشتر از متوسط آب رودخانه‌هاست و این نشان از غلظت بالاتر عناصر در سنگ‌های منطقه نسبت به متوسط جهانی دارد. سایر عناصر مانند مس، کروم و ... به علت شرایط Eh و pH به صورت محلول در آب نمی‌توانند موجود باشند. در واقع هیدروکسیدهای آلومینیوم، منگنز و آهن در رسوبات عاملی برای جذب فلزات و کاهش مقدار آن‌ها در آب است و بنابراین در صورت نبود این هیدروکسیدها غلظت عناصر می‌توانست خیلی بالاتر از متوسط آب رودخانه‌ها باشد. در واقع با توجه به تغییرات اندک دما و pH به نظر می‌رسد که روند تغییرات غلظت عناصر به رفتار ژئوشیمیایی، میزان انحلال و به خصوص میزان جذب از طریق کانی‌های رسی و هیدروکسیدهای آهن و منگنز و تا حدی به میزان دبی بستگی دارد به گونه‌ای که عناصری مانند استرانسیم، لیتیم و باریم به سمت پایین دست رودخانه با افزایش انحلال و دبی افزایش می‌یابند و به علت تحرک بالا، کمتر جذب هیدروکسیدها و کانی‌های رسی می‌شوند. این در حالی است که عناصری مانند وانادیم و کادمیم بیشتر تحت تأثیر فرایندهای جذب و واجذب قرار دارند. لذا، پیشنهاد می‌شود با آنالیز ژئوشیمیایی رسوبات، در خصوص غلظت عناصر در رسوبات نیز بحث شود تا بتوان دید بهتری از میزان کل ورود عناصر به آب و رفتارهای جذب و واجذب داشت.

عطاپور، ح؛ طاهری، م؛ رحمانی، ف. ۱۳۸۹. «ژئوشیمی زیست‌محیطی سنگ، خاک، آب و گیاه در محدوده ورقه ۵۰۰۰۰:۱ کرمان با نگرشی بر زمین‌شناسی پزشکی»، وزارت صنایع و معادن، ۴۹۶ صفحه.

عطاپور، ح. ۱۳۸۶. «تکوین ژئوشیمیایی و متالوژنی سنگ‌های آذرین پتاسیم‌دار در کمربند آتشفشانی - نفوذی دهج - ساردوئی استان نگرش ویژه به عناصر خاکی»، رساله دکتری، رشته زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۴۰۱ صفحه.

Anazawa, K., and 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., and 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.

EPA. 2003. National Primary and Secondary Drinking Water Regulations.

Eby, G. N. 2004. Principles of Environmental Geochemistry, Cengage Learning , 528p.

Flaten, T. P. 1984. Drinking water geochemistry as a basis for geomedical research in Norway, In: Hemphill DD, ed., Trace Substances in Environmental Health-XVIII, University of Missouri, Columbia, pp. 149-153.

Hamilton, P. A., and Helsel, D. A. 1995. Effects of Agriculture on Ground-Water quality in five region of the United States, *Ground Water*, V. 33, pp. 217-226.

Hounslow, A.W. 1995. WATER QUALITY DATA: Analysis and Interpretation, Lewis Publishers, 397p.

Khalili, Sh., Viccaro, M., Cristofolini, R. and Ahmadipour, H. 2008. Differentiation of high-K calcalkaline magmas at Mount Bidkhan volcano (Central Iranian Volcanic Belt), *Geochemica and cosmochemica Acta. Special supplement*, A467.

Levinson, A. A. 1980. Introduction to exploration geochemistry, Appl.pnb.Co, 924p.

Mason, B. H., and Moore, C. B. 1982. Principles of geochemistry, Wiley, 344p.

Merian, E., Anke, M. and Stopler, M. 2004. Element and thire compound in the environment, Wiley- VCH GMBH & CO. KGA, Weinheim, Second Edition, p. 976.

Rose, A. W., Hawkes, H. E. and Webb, J. S. 1979. Geochemistry in Mineral Exploration, Academic Press, 2<sup>nd</sup> edition, London, 657p.

Sakurai, T., Kazuo, K., and 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.

Schroeder, H. A., Tipton, I. H. and Nason, A. P. 1972. Trace metals in man: strontium and barium, *J. Chron Dis*, 25: 491-517.

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 Bell, *Journal of Asian Earth Sciences*, No. 30, pp. 625- 665.

Skoryna, S. C. 1981. Effects of oral supplementation with stable strontium, *Can Med Assoc*, 125: 703-712.

Snyder. 1999. Vanadium. In C.P. Marshall and R.W. Fairbridge, *Encyclopedia of Geochemistry*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 656.

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. and Gourgau, 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., and 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., and Stumm, W. 1989. Vanadyl in natural waters: adsorption and hydrolysis promote oxygenation, Geochem. Cosmochim. Acta 53, 69-77.

WHO. 2006. Guidelines for drinking water quality, Electronic version for the Web, 3<sup>th</sup> ed., Vol. 1.