



کاربرد آنالیز مولفه‌های اصلی در جهت شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی در ناحیه هلاک-آباد، سبزوار

ملیحه قورچی^{۱*}، محمد حسن کریم‌پور^۲، خسرو ابراهیمی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۸۹/۹/۱۴، نسخه نهایی: ۹۰/۱/۱۶)

چکیده: منطقه‌ی هلاک آباد در ۳۰ کیلومتری جنوب سبزوار واقع شده است. بازالیت، آندزیت و هورنبلند آندزیت قدیمی‌ترین مجموعه رخنمون یافته در منطقه‌ی مورد بررسی است. مونزونیت، کوارتز دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، کوارتز مونزونیت و هورنبلند کوارتز مونزودیوریت در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند. تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (Principal component analysis) یکی از روش‌هایی است که می‌تواند به هدف آشکارسازی الگوهای پی‌جوئی در درون مجموعه‌ای از متغیرها کمک کند. در پی‌جوئی‌های معدنی، از رایج‌ترین کاربردهای روش تحلیل چند متغیره، شناسایی و به نقشه درآوردن روابط داده‌های ژئوشیمی سطحی در حجم بالا است. این روش برای آشنایی با تغییرات ژئوشیمیایی در منطقه هلاک آباد مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل مولفه‌های اصلی نمونه‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای منطقه‌ی هلاک آباد، به طور کلی تغییرات عناصر را در پنج مولفه مشخص می‌کند. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که مولفه‌ی اول در مورد عناصر Cu, Zn, Co, V و نیز Sr, Cs, Li و Th وزن (بار) مثبت، و عناصر Ba, Rb, Nb, Pb و نیز نیکل-کروم وزن منفی نشان می‌دهد. مولفه‌ی دوم برای عناصر Rb, Sr, Th, Ba وزن منفی و برای عناصر دیگر وزن مثبت دارد. همراهی روی با سرب و فلوئور می‌تواند گویای نوع دیگری از پارائز کانیایی در منطقه باشد. مولفه‌ی PC3 وزن مثبتی برای عناصر Ni, Zn, Cr, Co دارد. این گستره مقادیر بالای مولفه دوم با گستره‌های دگرسانی گرمابی و توده‌های شبه‌آتشفشانی منطقه همبستگی بالایی نشان می‌دهند. تحلیل مولفه‌های اصلی در ناحیه‌ی هلاک‌آباد نشان داد که حداقل در مورد عناصر مس و روی دو نوع همراهی عناصر کانه‌ساز مطرح‌اند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل مولفه‌های اصلی؛ ژئوشیمی؛ دگرسانی؛ سبزوار؛ هلاک آباد.

مقدمه

آبراهه‌ای است. در یک برنامه‌ی پی‌جوئی ژئوشیمی، به‌منظور تحلیل داده‌ها از روش‌های تک متغیره‌ی و نیز روش‌های چند متغیره مختلفی مانند روش‌های زمین آماری، هندسه‌ی فرکتال، حاصل ضرب P.N، منطق فازی، تحلیل شبکه‌ی عصبی، روند سطحی، انجماد دوباره، فاکتوری و خوشه‌ای می‌توان استفاده کرد.

داده‌های ژئوشیمیایی نشان دهنده آنست که فرایندهای زمین‌شناسی به‌ویژه در محیط‌های ثانویه مانند رسوب‌های آبراهه‌ای شکل می‌گیرند. یکی از هدف‌های اصلی بررسی‌های ژئوشیمیایی، تحلیل و پردازش داده‌ها و آشکارسازی بیهنجاری-هاست. کاهش مساحت ناحیه‌ی مورد بررسی و بهینه‌سازی عملیات پی‌جوئی‌ها از هدف‌های مهم بررسی‌های رسوب‌های

یافته در دستگاه داده‌ها هستند. مولفه‌های اصلی در حقیقت همان مقادیر ویژه بردار ماتریس واریانس - کواریانس و یا ماتریس ضرایب همبستگی هستند [۵].

همچنان‌که که اشاره شد، تحلیل مولفه‌های اصلی داده‌های خام ژئوشیمی اولیه را به صورت‌های جدیدی که قابلیت تفسیر آنها بیشتر از داده‌های خام است، تبدیل می‌کند. در این رابطه فناوری GIS به‌طور فزاینده‌ای توسط زمین‌شناسان برای پردازش داده‌های ژئوشیمیایی و ارائه آنها به شکل مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های مکانی مختلفی برای تحلیل داده‌ها در نرم افزار ArcGIS ارائه شده است [۶-۱۰].

روش تحلیل مولفه‌های اصلی در عرصه‌های گوناگونی مانند آب‌های سطحی و زیرزمینی [۱۱، ۱۲]، خاک‌ها [۱۳، ۱۴]، رسوب‌ها [۱۵]، زیستی [۱۶] و منابع آلودگی محیط زیست [۱۷] نیز به‌کار گرفته شده‌اند. در این مقاله کاربرد روش تحلیل مولفه‌ای اصلی (PCA) در مورد نتایج تجزیه رسوب‌های آبراهه-ای و لیتوژئوشیمیایی ناحیه‌ی هلاک آباد بررسی خواهد شد.

منطقه‌ی هلاک‌آباد، در استان خراسان رضوی، در فاصله‌ی ۳۰ کیلومتری جنوب سبزوار، در گستره‌ی شمال غربی ورقه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ششتمد در موقعیت $30^{\circ}57'58''$ تا $30^{\circ}57'35''$ طول جغرافیایی شرقی و $35^{\circ}57'35''$ تا $35^{\circ}59'16''$ عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). در این پژوهش سعی شد تا روند تغییرات ناحیه‌ای عناصر با استفاده از روش چند متغیره‌ی تحلیل مولفه‌های اصلی و برازش آنها با روندهای ساختاری، سنگ‌شناسی و دگرسانی‌های گرمایی بررسی شد. در ناحیه یاد شده، احتمال وجود یک پتانسیل کانی سازی مس-طلای پورفیری مطرح شده است، لذا سعی بر این بوده است تا نتایج تجزیه‌ی شیمیایی داده‌های موجود به بهترین نحو برای هدف‌های پی‌جویی آینده مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه زون‌های دگرسانی گسترده‌ای در منطقه‌ی هلاک‌آباد وجود دارند، از نتایج داده‌های ژئوشیمیایی برای انتخاب محل‌های مناسب برای پی‌جویی‌های تفصیلی استفاده شد.

روش بررسی

الف) پردازش داده‌های سنجنده ASTER به منظور شناسایی زون‌های دگرسان به روش تحلیل مولفه‌های اصلی
ب) تهیه‌ی نقشه‌های رقومی زمین‌شناسی و دگرسانی در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰

در این میان، روش‌های چند متغیره به‌دلیل آن که همزمان به بررسی تغییرات چند متغیر و استنباط‌های آماری ناشی از آنها می‌پردازند، بسیار معتبرتر از روش‌های تک متغیره هستند. در این روش‌ها خطاهای اتفاقی یک متغیره می‌تواند تا حدودی با متغیرهای دیگر جبران شود [۱].

در بررسی ژئوشیمیایی کانسارها و نواحی معدنی، همواره عناصر متعددی با هم همبستگی نشان می‌دهند، لذا غالباً بررسی تک تک عناصر نمی‌تواند اطلاعات چندانی درباره‌ی رابطه‌ی آنها در اختیار قرار دهد. از سوی دیگر اگر تعداد زیادی از عناصر، به ویژه در مراحل اولیه‌ی بررسی قرار داشته باشند، لازم است تا با استفاده از روش‌های مناسب نتایج حاصل تفسیر و پس از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با زمین‌شناسی منطقه در خصوص وجود یا عدم وجود بی‌هنجاری و یا تعیین نوع کانی‌سازی احتمالی نتیجه‌گیری شود [۱].

دو روش اصلی برای تحلیل ناحیه‌ای داده‌های ژئوشیمی وجود دارند که عبارتند از روش‌های آماری^۱ و روش‌های مکانی^۲ [۲-۴]. منظور از روش‌های آماری روش‌هایی است که با استفاده از آن توزیع فراوانی داده‌های ژئوشیمیایی از بین داده‌های آماری (میانگین، میانه، مد) تغییرات داده‌ها (واریانس، انحراف معیار...) به دست می‌آید، در حالیکه تحلیل‌های مکانی روش‌هایی است که با جنبه‌های مکانی داده‌های ژئوشیمیایی، مانند گسترش مکانی بی‌هنجاری‌ها در یک نقشه دو بعدی، سر و کار دارد.

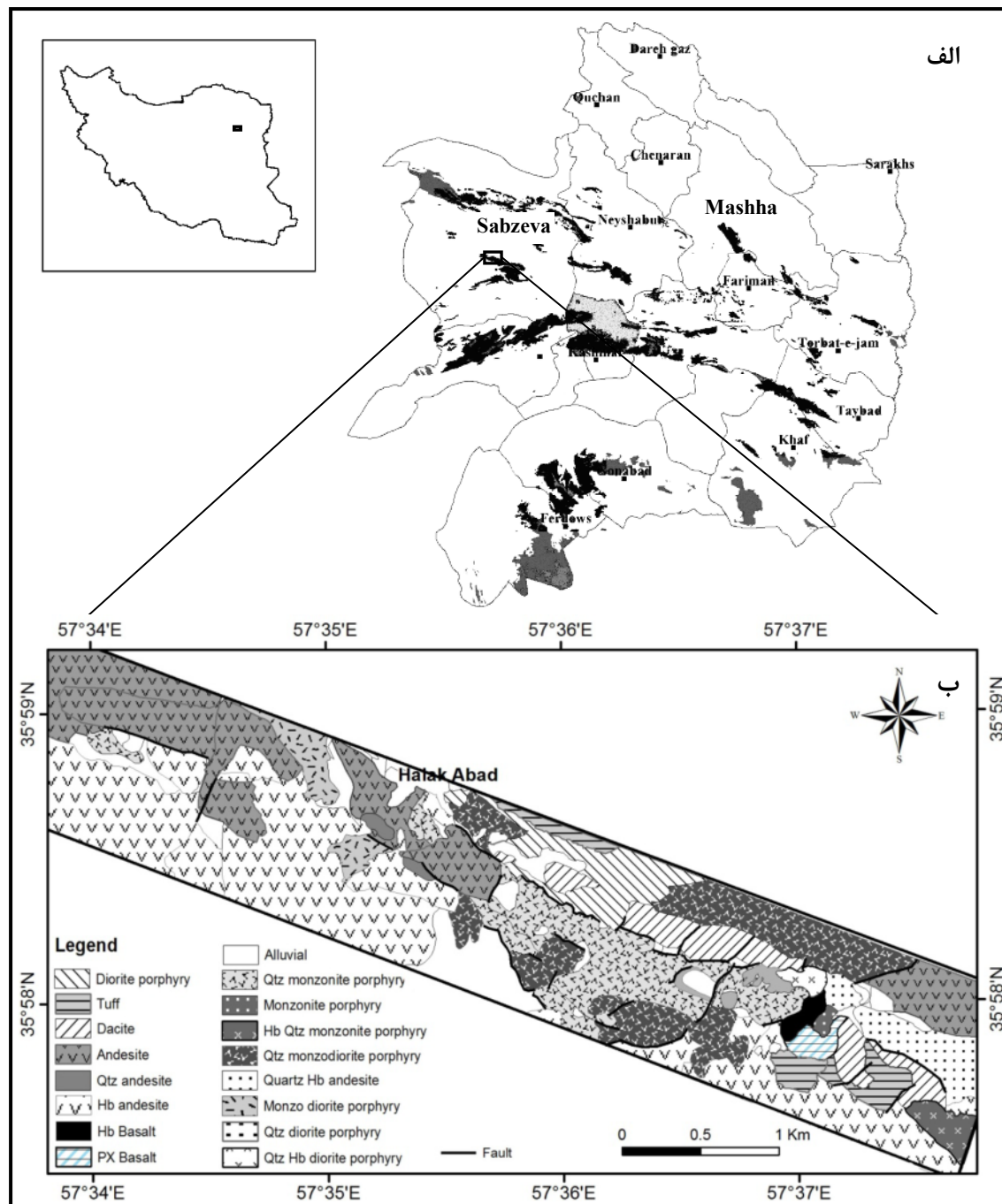
نتیجه‌گیری از داده‌های ژئوشیمیایی به خصوص زمانی که تعداد زیادی از عناصر آنالیز شیمیایی شده باشند، به خاطر داشتن ابعاد زیاد کار دشواری است. روش مولفه‌های اصلی یکی از روش‌های کاهش ابعاد داده‌هاست. این روش با بردارها و مقادیر ویژه سر و کار دارد و روشی است که برای یافتن ترکیب‌های خطی از متغیرهای اولیه، به صورتی که تشکیل یک دستگاه مختصات جدید را بدهند، سروکار دارد. به این ترکیب-های خطی مولفه‌های اصلی گفته می‌شود [۱]، و تمامی متغیرها نسبت به هم سنجیده می‌شوند. یکی از محورهای اصلی، مولفه‌ی اصلی اول (PC1) نام دارد و اطلاعات بیشتری نسبت به سایر مولفه‌های دیگر به دست می‌دهد. مولفه اصلی دوم (PC2) عمود بر مولفه‌ی اصلی اول است. مولفه‌های سوم و چهارم و پنجم و ... شامل مقادیر یکنواخت واریانس کاهش

ث) تهیه‌ی نقشه‌های رده‌ی تک عنصری از نتایج تجزیه‌های شیمیایی

ج) بررسی داده‌های ژئوشیمیایی به روش تحلیل مولفه‌های اصلی در ArcGIS و تفسیر نتایج

پ) برداشت بیش از ۲۰۰ نمونه برای بررسی سنگ‌نگاری و دگرسانی

ت) ایجاد بانک اطلاعاتی از داده‌های ژئوشیمیایی (۸۵ نمونه رسوب آبراهه‌ای و ۶۸ نمونه‌ی خرده‌سنگی) و اطلاعات دیگر زمین‌شناسی و ساختاری



شکل ۱ الف. رخنمون سنگ‌های آذرین در استان خراسان رضوی. موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی به شکل مستطیل روی کمربند جنوب سبزوار نمایش داده شده است. ب. نقشه زمین‌شناسی منطقه‌ی هلاک آباد.

زمین‌شناسی

گستره‌ی مورد بررسی جزئی از کمربند ولکانوپلوتونیک جنوب سبزوآر است (شکل ۱) و از نظر ساختاری بخشی از پهنه‌ی ایران مرکزی محسوب می‌شود [۱۸]. قدیمی‌ترین مجموعه‌ی رخنمون یافته شامل آندزیت و بازالت (کرتاسه) اند که در بخش‌های جنوبی قابل مشاهده‌اند. بیشتر فعالیت‌های ماگمایی در منطقه‌ی مورد بررسی در ائوسن رخ داده است [۱۹]. در بررسی‌های اولیه از این ماگماتیسم به عنوان فعالیت‌های آتشفشانی با ترکیب غالب آندزیت و داسیت نام برده شده است [۱۹]. بررسی‌های دقیق‌تر حاکی از آن است که در بخش شمالی گستره‌ی مورد بررسی، بخش عمده‌ای از این واحدها، توده‌های شبه آتشفشانی شامل انواع مونزونیت و دیوریت‌اند که در واحدهای توفی، داسیتی و آندزیتی نفوذ کرده‌اند [۲۰]. واحدهای نفوذی در بخش‌های شرقی رخنمون بیشتری دارد و شامل توده‌های شبه آتشفشانی مونزودیوریت پورفیری، کوارتز دیوریت پورفیری، کوارتز مونزودیوریت پورفیری، کوارتز-مونزونیت پورفیری و هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری است. واحد دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری گسترش محدودی دارد. طیف ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی منطقه شامل بازالت، آندزیت، هورنبلند آندزیت، کوارتز آندزیت، هورنبلند داسیت و هورنبلند کوارتز لاتیت است (شکل ۱).

بررسی کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که غالب سنگ‌های منطقه بافت پورفیری و گلومروپورفیری نشان می‌دهند. فراوان‌ترین واحد آتشفشانی، آندزیت است که به‌طور مشخص دگرسانی پروپلیتیک نشان می‌دهد. مجموعه واحدهای آندزیتی بر اساس فراوانی کانی یا کانی‌های خاص به واحدهای کوارتز آندزیت، هورنبلند آندزیت، پیروکسن آندزیت تقسیم شده‌اند. رخنمون‌های پراکنده‌ای از هورنبلند داسیت و هورنبلند کوارتز لاتیت در شمال غرب این گستره وجود دارند. رخنمون واحدهای داسیتی، به‌صورت یک نوار کشیده در شمال منطقه و واحدهای بازالتی بیشتر در جنوب است. حفره‌های فراوانی در سنگ‌های آتشفشانی با کانی‌های ثانویه مانند کربنات، کلریت و زئولیت پر شده‌اند. روند توده‌های شبه آتشفشانی با جهت کلی زون دگرسانی برازش دارد. مرز بیشتر این واحدها با واحدهای همجوار از نوع گسلی است. محیط زمین ساختی این مجموعه به‌طور دقیق شناسایی نشده است و احتمالاتی مبنی بر زون فرورانش حاشیه‌ی قاره‌ای و جزایر قوسی داده شده‌اند [۲۲، ۲۱].

از نظر ساختاری سیستم گسلی کلی منطقه روند کلی شمال غربی- جنوب شرقی را نشان می‌دهد. این روند مشابه جهت کلی رشته کوه‌های شمال غربی ورقه ششم و ارتفاعات منطقه است. گسل‌های گستره‌ی مورد بررسی را می‌توان به ترتیب فراوانی به انواع معمولی، راستا لغز و واژگون تقسیم کرد. روند کلی گسل‌های راندگی، شرقی- غربی است و شیب آن‌ها نیز بیشتر به سمت شمال است. جوان‌ترین گسل‌های منطقه گسل‌های راستا لغزند که روند آنها شمال شرقی - جنوب غربی است و دارای حرکت‌های چپ‌رو هستند. البته گسل‌های راستا لغز با روند شمال غربی- جنوب شرقی و عملکرد راست‌رو نیز وجود دارد.

پردازش تصاویر ماهواره‌ای و دگرسانی

در گستره‌ی مورد بررسی، زون‌های دگرسانی گسترش زیادی با روند تقریبی شمال غربی - جنوب شرقی دارند، و سیمای مشخصی در منطقه ایجاد کرده‌اند. بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی در بخش‌هایی از این کمربند دگرسانی‌های آرژیلیک، پروپلیتیک، سیلیسی و کربناتی را مشخص کرده که در مواردی تداخل‌هایی با هم نشان می‌دهند. دگرسانی پروپلیتیک در بخش جنوبی دگرسانی آرژیلیک بیشتر گسترش یافته است. در بخش‌های شمالی، دگرسانی سیلیس همراه کانی‌های رسی وجود دارد ولی به‌طور کلی، در زون سیلیسی گسترش محدودی دارند و گاهی سیلیسی شدن در زمینه‌ی سنگ دیده می‌شود، و زون سرسیت رخنمون محدودی دارد. کانی سرسیت از تبدیل فلدسپارها ایجاد شده است.

روش PCA بطور گسترده‌ای در پردازش تصاویر ماهواره‌ای نیز به‌کار گرفته شده است [۲۳]. تحلیل مولفه‌های اصلی جهت‌دار (روش کروستا) با کاهش تعداد نوارها برای تحلیل، احتمال نقشه‌برداری پدیده‌ی مورد نظر را در یکی از مولفه‌های اصلی افزایش می‌دهد. تصاویر سنجنده‌ی ASTER از منطقه‌ی مورد بررسی با استفاده از روش‌های آنالیز مولفه‌های اصلی [۲۴] و روش کروستا پردازش شده و مناطق دگرسانی‌های گرمابی در ناحیه‌ی مورد بررسی، شناسایی شدند [۲۵].

به منظور پردازش داده‌های ماهواره‌ای از نرم افزار ENVI ویراست 4.3 استفاده شد. داده‌های استر سطح 1B گستره‌ی مورد بررسی یک برش ۱۷۱۶ x ۷۸۴ از سین استر است که در سال ۲۰۰۱ تصویربرداری شده است. به منظور کاهش اثرهای جوی و بهنجار کردن داده‌های L1B، نخست این داده‌ها با

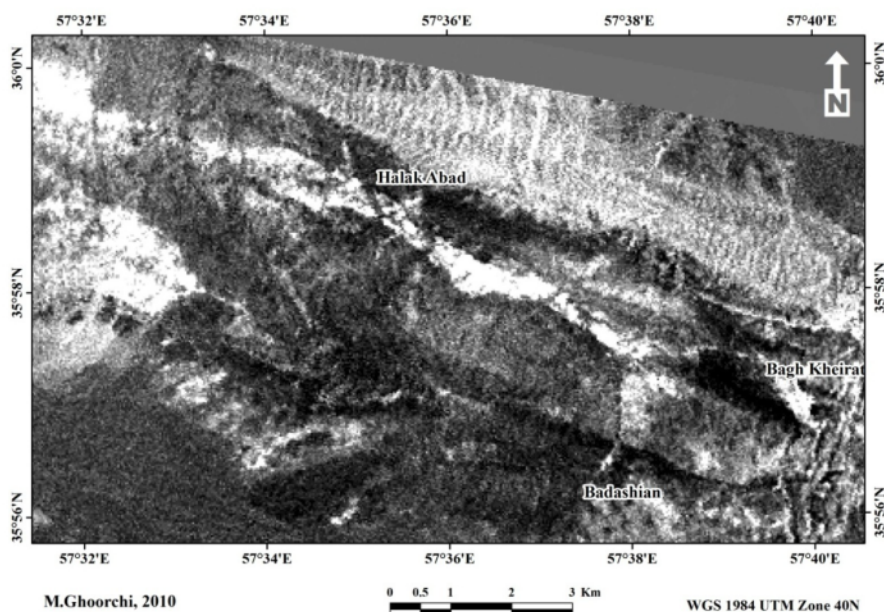
روشن آلونیت را نشان می‌دهند. از نوارهای ۱، ۴، ۶ و ۹ برای نشان دادن بهتر اسمکتیت و کائولینیت و از نوارهای ۱، ۳، ۵ و ۶ برای ایلیت استفاده شد [۲۵].

پی‌جوئی‌های ژئوشیمیایی

یکی از هدف‌های پی‌جوئی‌های دستیابی به تمرکز غیرعادی عناصری است که به کانی‌سازی وابسته باشند. در منطقه‌ی مورد بررسی دو رشته نمونه‌برداری از رسوب‌های آبراهه‌ای و نمونه‌برداری سنگی انجام شده است. بخشی از داده‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده در این پژوهش، به برداشت‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای برگه ششتم وابسته است که توسط کارشناسان شرکت جیانگسی (Jiangxi) چین انجام شده است. این شرکت طی قراردادی که با سازمان زمین‌شناسی ایران دارد، بررسی‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای ۲۶ برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ در کمربند سمنان- کاشمر را بر عهده داشته است. برای برداشت این نمونه‌ها از یک شبکه‌ی نمونه‌برداری منظم به ابعاد تقریبی

استفاده از روش بازتابش متوسط نسبی داخلی (IARR) تعدیل شدند. سپس گستره‌ی ۶ نوارى فروسرخ موج کوتاه (SWIR) با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر بر اساس گستره‌ی ۳ باندى مرئى-فروسرخ نزدیک (VNIR) با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر بازنویسی شدند. برای جلوگیری از تغییر مقادیر DN پیکسل‌ها، تصحیحات ژئومتریک تصاویر ماهواره‌ای به مرحله‌ی آخر موکول شدند.

با تحلیل مولفه‌های اصلی جهت‌دار از نوارهای ۱، ۴، ۶ و ۷ برای بارزسازی کائولینیت، مقادیر مناسب برای به نمایش درآوردن آن، در تصویر مولفه‌ی اصلی چهارم با رنگ روشن مشخص شد (شکل ۲). به‌منظور نشان دادن بهتر آلونیت با توجه به ویژگی‌های طیف جذب و بازتاب آن، نوارهای ۱، ۳، ۵ و ۷ برای انجام PCA مورد استفاده قرار گرفتند. آلونیت در نوار ۵ با نوار جذبی و در نوار ۷ بازتاب دارد. بررسی آماری تصاویر (جدول ۱) نشان داد که در مولفه‌ی سوم منفی شده نواحی



شکل ۲ تصویر مولفه‌ی چهارم که از تحلیل مولفه‌ی اصلی روی نوارهای ۱، ۴، ۶ و ۷ برای نمایش کائولینیت به‌دست آمده است.

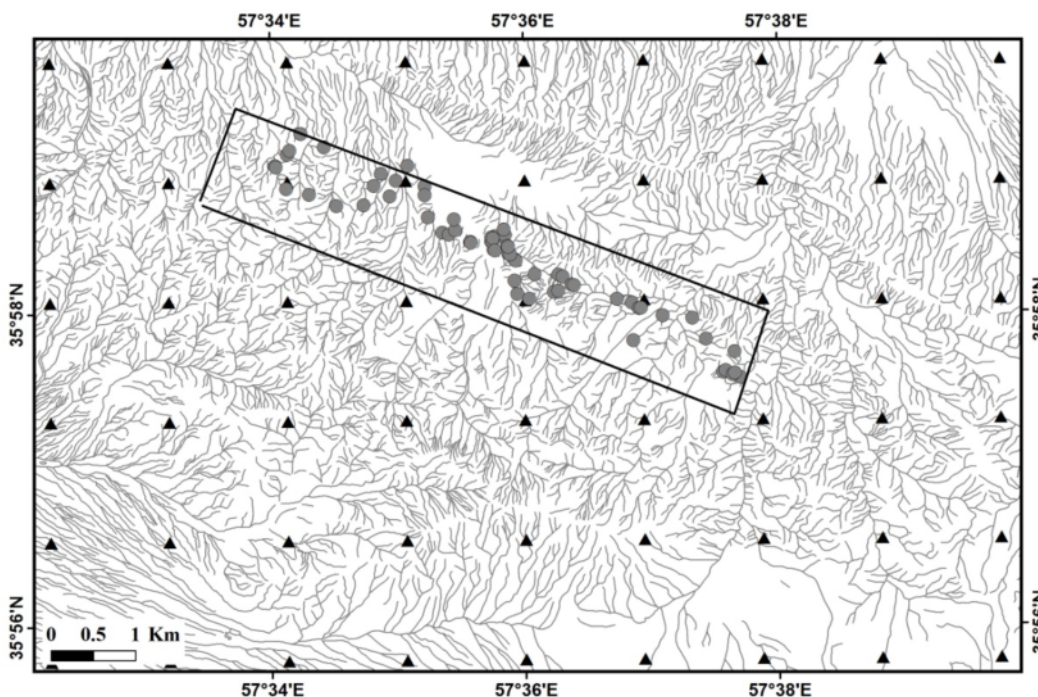
جدول ۱ نتایج روش کروستا برای بارزسازی آلونیت.

باند/ مؤلفه	۱	۳	۵	۷
Pc1	۰٫۲۴۴۲۹	۰٫۲۲۴۴۴	۰٫۶۸۵۹	۰٫۶۴۷۶۱
Pc2	۰٫۶۹۵۴۴	۰٫۶۳۵۴۱	-۰٫۲۰۴۱۲	-۰٫۲۶۶۳۴
Pc3	-۰٫۰۰۱۸۹	۰٫۰۷۶۸۰	-۰٫۶۹۷۲۷	۰٫۷۱۲۶۷
Pc4	۰٫۶۷۵۷۷	-۰٫۷۳۴۸۲	-۰٫۰۳۹۸۶	۰٫۰۴۱۹۸

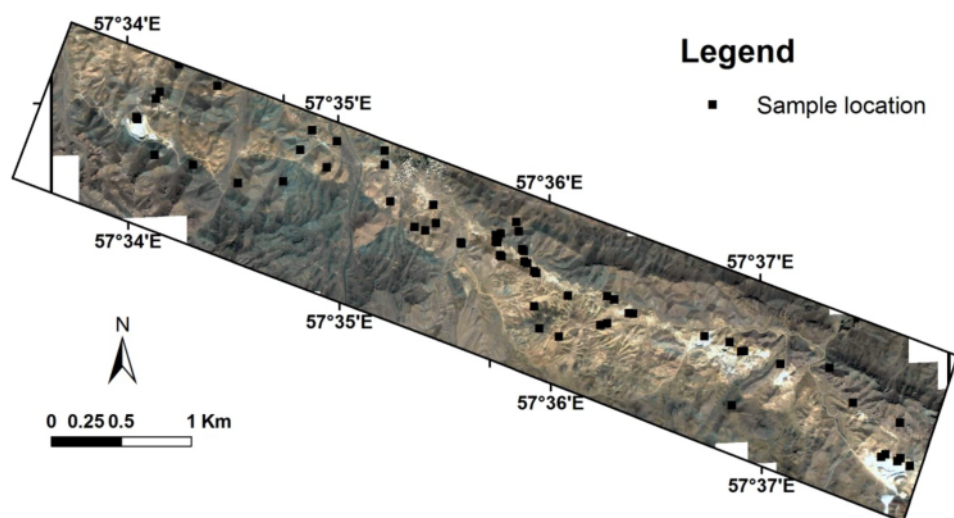
سازی در دانشگاه فردوسی مشهد، به روش طیف‌سنجی جذب اتمی، برای عناصر مس، سرب، روی، نقره، آنتیموان و در تعدادی از نمونه‌ها برای مولیبدن تجزیه شدند. در این پژوهش نتایج تجزیه‌ی ۳۱ نمونه ژئوشیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای و ۶۸ نمونه خرده‌سنگی از پی‌جویی‌های بالا مورد بررسی قرار گرفتند. موقعیت برداشت نمونه‌های رسوب‌های آبراهه‌ای و خرده‌سنگی در شکل‌های (۳ و ۴) نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج تجزیه، در رسوب‌های آبراهه‌ای منطقه، تنها دو عنصر مس و روی ناهنجاری نشان داده و عناصر نقره، آنتیموان و مولیبدن مقادیر کمی نشان می‌دهند. بیشترین میزان فراوانی عنصر مس و روی در قسمت‌های مرکزی و به سمت غرب گستره گزارش شده است. در این مناطق فراوانی مس از ۱۳۳ تا ۲۰۸ پی‌پی‌ام [P.P.M] و روی از ۱۰۰ تا ۴۲۰ پی‌پی‌ام [P.P.M] متغیر است [۲۰]. نمونه‌های سنگی از زون‌های کانی‌سازی و دگرسانی وابسته به روش لپری-شیاری برداشت شدند. فراوانی مس بین ۱۰۰ پی‌پی‌ام [P.P.M] در شرق تا ۵۹۵ پی‌پی‌ام [P.P.M] در مرکز و فراوانی روی بین ۱۰۰ تا بیش از ۹۰۰ پی‌پی‌ام [P.P.M] گزارش شده است [۲۷-۲۹]. بر این اساس ناهنجاری مس و روی بیشتر در مرکز و بخشی از شمال گستره‌ی مشخص شده است.

۱/۴×۱/۴ کیلومتر استفاده شد. از هر سلول ۲، ۳ و یا ۴ زیرنمونه از رسوب‌های آبراهه‌ای برداشت شدند و با ترکیب آن‌ها نمونه‌ی مرکب حاصل به سلول نمونه‌برداری نسبت داده شد. در این نمونه‌برداری سعی بر آن بود تا نمونه‌های آبراهه‌ای حتی المقدور از سرشاخه‌ها (آبراهه‌های درجه‌ی یک و دو) برداشته شود. به همین دلیل داده‌های حاصل به مرکز سلول مورد نمونه‌برداری نسبت داده شده‌اند. از کل گستره‌ی محدوده نمونه‌برداری شده در منطقه‌ی مورد بررسی، نتایج تجزیه ۵۴ نمونه برای بررسی ناحیه‌ی هلاک‌آباد استفاده شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده‌ی ۲۸ عنصر (نقره، آرسنیک، طلا، بر، باریوم، بیسموت، کبالت، کرم، مس، سزیم، فلوتور، جیوه، لیتیم، مولیبدن، نیوبیم، نیکل، فسفر، سرب، روبیدیم، آنتیموان، قلع، استرنسیم، توریم، اورانیوم، وانادیم، تنگستن و روی) و یک اکسید فلزی (اکسید سدیم Na_2O) تجزیه شیمیایی شده‌اند [۲۶].

بخشی دیگر نمونه‌های ژئوشیمیایی توسط شبانی [۲۷]، پناهی [۲۸] و مظلوم [۲۹] برداشت شدند. محل‌های مناسب برای برداشت نمونه‌ها براساس نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای پردازش‌شده، انتخاب شدند. نمونه‌ها پس از فرآیندهای خردایش، نرمایش و آماده-



شکل ۳ موقعیت نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای (نقاط ● از [۲۰، ۱۹، ۱۳، ۲۱] و ▲ از [۱۸] استخراج شده است).



شکل ۴ موقعیت نمونه‌های ژئوشیمیایی خرده‌سنگی روی تصویر ماهواره‌ای.

آماده سازی و سامان‌دهی اطلاعات در پایگاه داده اطلاعات جغرافیایی

یکی از مدل‌های داده‌ای که نرم‌افزار ArcGIS از آن پشتیبانی می‌کند مدل داده‌ای ژئودیتابیس^۳ است. با ایجاد آن می‌توان تمامی اطلاعات جغرافیایی را در یک پایگاه داده نگهداری و مدیریت کرد. از مزایای دیگر استفاده از این مدل امکان ویرایش هم زمان چندین کاربر روی یک پایگاه داده، نگهداری داده‌های حجیم و ایجاد سرعت عمل بیشتر در تحلیل‌هاست. برخی از کاربردهای نرم افزار ArcGIS منوط به استفاده از این مدل داده‌ای است. لذا در این پروژه نخست یک پایگاه منسجم و استاندارد آماده شد. نقشه‌های زمین‌شناسی، گسل‌ها، اطلاعات دگرسانی و کانی‌سازی، نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای و موقعیت نمونه‌های ژئوشیمی در پایگاه داده‌ی جغرافیایی یاد شده به صورت رقومی ذخیره شدند. لایه‌ی ژئوشیمی شامل اطلاعات تجزیه‌ی شیمیایی ۶۸ نمونه‌ی سنگی و ۸۵ نمونه‌ی رسوبهای آبراهه‌ای است. غالب نمونه‌ها شامل اطلاعات عناصر Ag, As, Au, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn, F, B, Sr, Ba, Sb, Sn, Th and Li هستند.

پیش از تهیه‌ی نقشه‌های ژئوشیمی باید نتایج تجزیه از نظر آماری مورد بررسی قرار گیرند. روش آماری مورد استفاده (PCA) برای بیان سطح اعتماد، فرض بهنجار بودن داده‌ها را به عنوان شرط اولیه در نظر می‌گیرد. لذا نخست با اعمال فرمول زیر داده‌های ورودی بهنجار شدند:

$Z = \frac{X - \bar{X}}{S}$ مقدار بهنجار شده

X مقدار اولیه

$\bar{X}$ میانگین

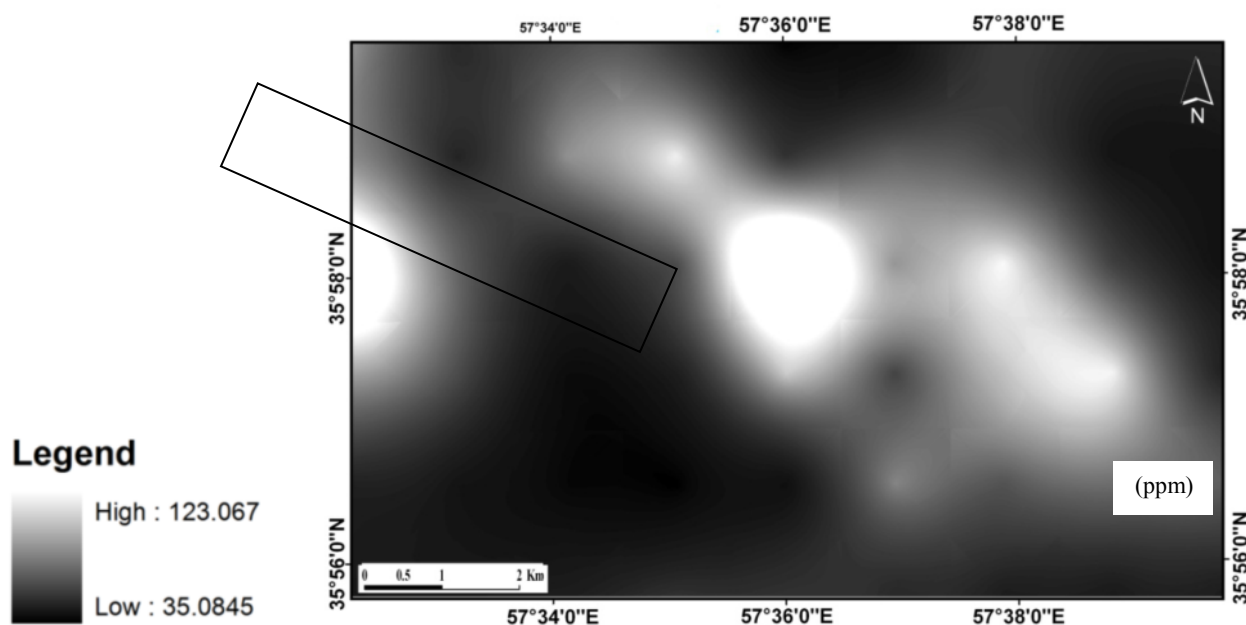
S انحراف معیار

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{S}$$

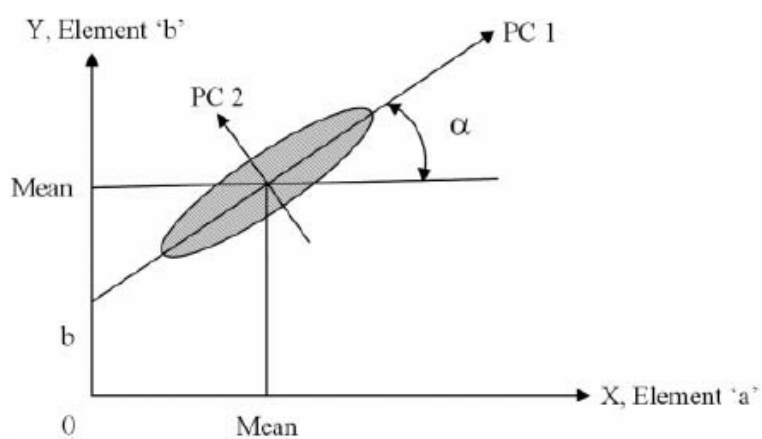
از آنجایی که بررسی همبستگی عناصر با روش تحلیل مولفه‌های اصلی نسبت به بررسی تک تک عناصر سودمندتر است، نخست در نرم افزار ArcGIS پراکندگی ژئوشیمیایی کلیه‌ی عناصر به صورت نقشه‌های رستری تهیه و با فرمت گرید ذخیره شدند. نقشه‌های درجه‌بندی شده به صورت مجزا آماده و برای تحلیل به کار گرفته شدند. برای مثال شکل ۵ یک نمونه نقشه‌ی درجه‌بندی شده در مورد عنصر مس را نشان می‌دهد. در شکل ۶ به منظور نمایش ساده‌ی مقایسه مقادیر بردارهای ویژه، تنها برای دو مولفه اصلی نسبت بهم ارائه شدند.

آنالیز داده‌ها

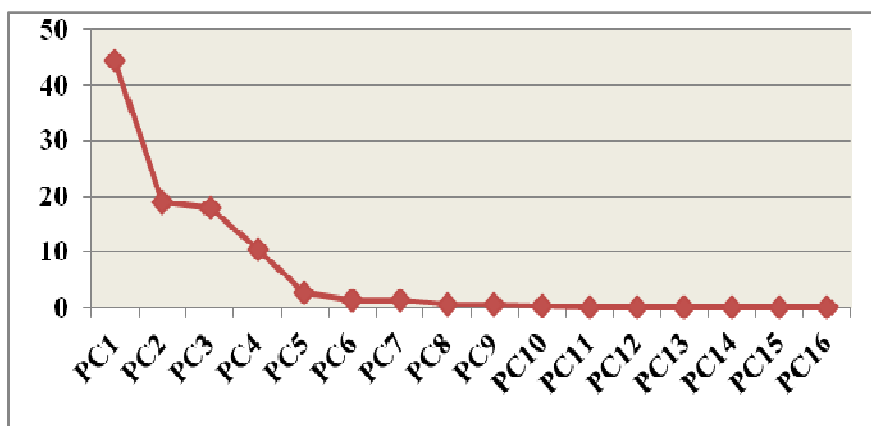
با استفاده از الگوریتم محاسباتی در نرم افزار ArcGIS تحلیل مولفه‌ی اصلی روی داده‌های درجه‌بندی شده صورت گرفت. تحلیل مولفه‌های اصلی روی داده‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای منطقه مورد بررسی اعمال شدند که در آن ۱۶ عنصر آنالیز شده شرکت داده شدند و ۱۶ مولفه‌ی اصلی (PC) تشکیل شدند. نمایش سهم اطلاعات و متغیرها در ۱۶ مولفه اصلی به دست آمده از بررسی رسوب‌های آبراهه‌ای در شکل ۷ ارائه شده‌اند.



شکل ۵ نقشه‌ی درجه‌ی توزیع عنصر مس در رسوب‌های آبراهه‌ای منطقه. گستره‌ی مورد بررسی به شکل مستطیل باریک دیده می‌شود.



شکل ۶ مقایسه‌ی مقادیر بردار ویژه نسبت به یکدیگر برای دو مولفه اصلی [۲۳].



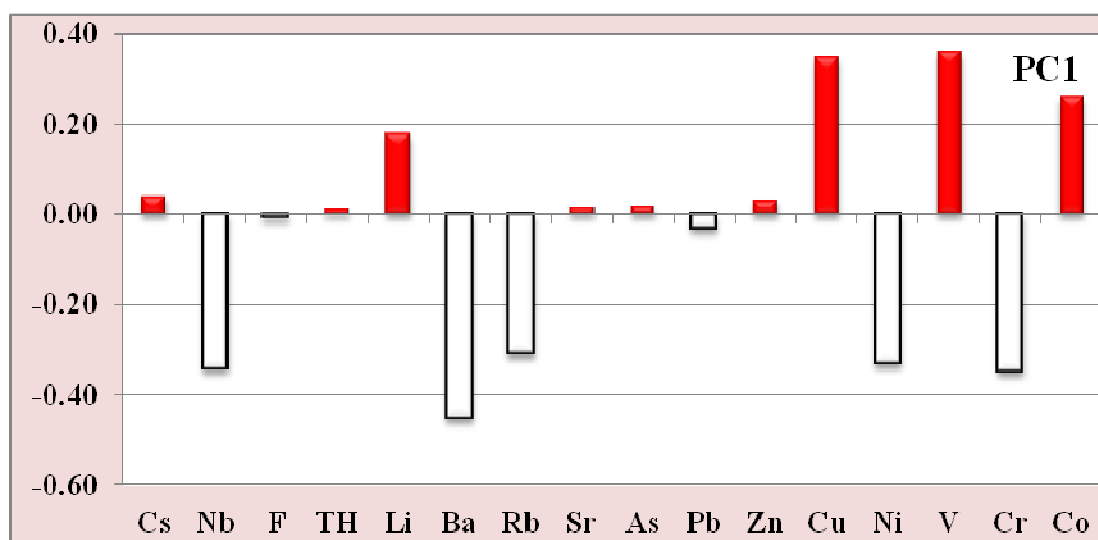
شکل ۷ نمایش سهم اطلاعات و متغیرها در ۱۶ مولفه‌ی اصلی به دست آمده از بررسی رسوب‌های آبراهه‌ای.

های اصلی، پنج مولفه‌ی اول برای بررسی روند تغییرات ناحیه‌ای عناصر مناسب تشخیص داده شدند (جدول ۲). این پنج مولفه در مجموع حاوی ۹۵ درصد تغییراتند. شکل‌های ۸ تا ۱۰ مولفه‌های اول تا سوم وابسته به نتایج رسوب‌های آبراهه‌ای را نشان می‌دهد.

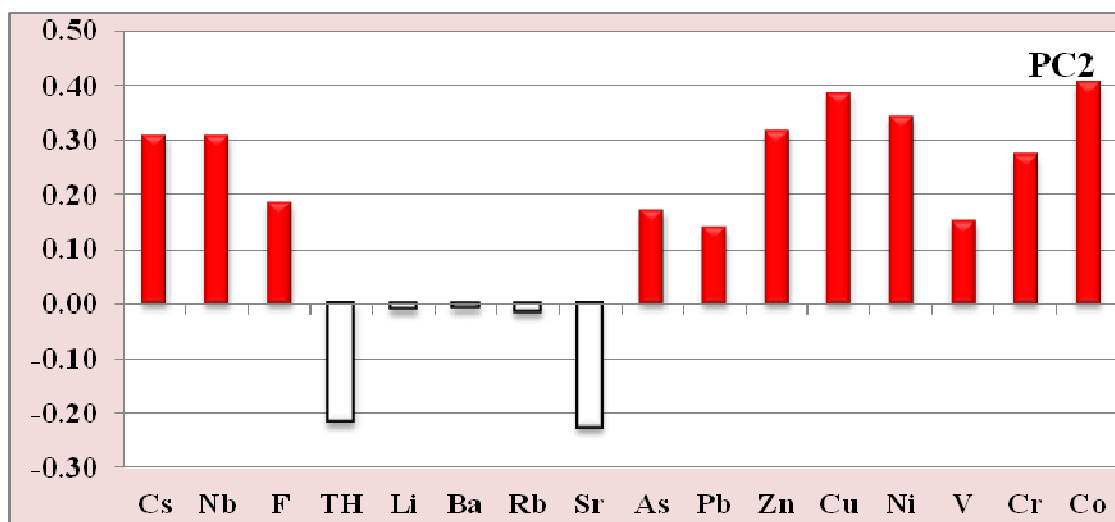
مقادیر بردارهای ویژه در مولفه‌های اول تا دهم وابسته به عناصر تجزیه شده در رسوب‌های آبراهه‌ای در جدول ۲ ارائه شده‌اند. هر مولفه معرف همراهی عناصری خاص است. در جدول بردارهای ویژه مقادیر کمتر از ۰/۳ و بیشتر از ۰/۳ - حذف شدند. با توجه به جدول بردارهای ویژه عناصر در مولفه-

جدول ۲ مقادیر بردار ویژه ده مولفه اصلی رسوبات آبراهه‌ای (مقادیر کمتر از ۰/۳ و بیشتر از ۰/۳ - حذف شده است).

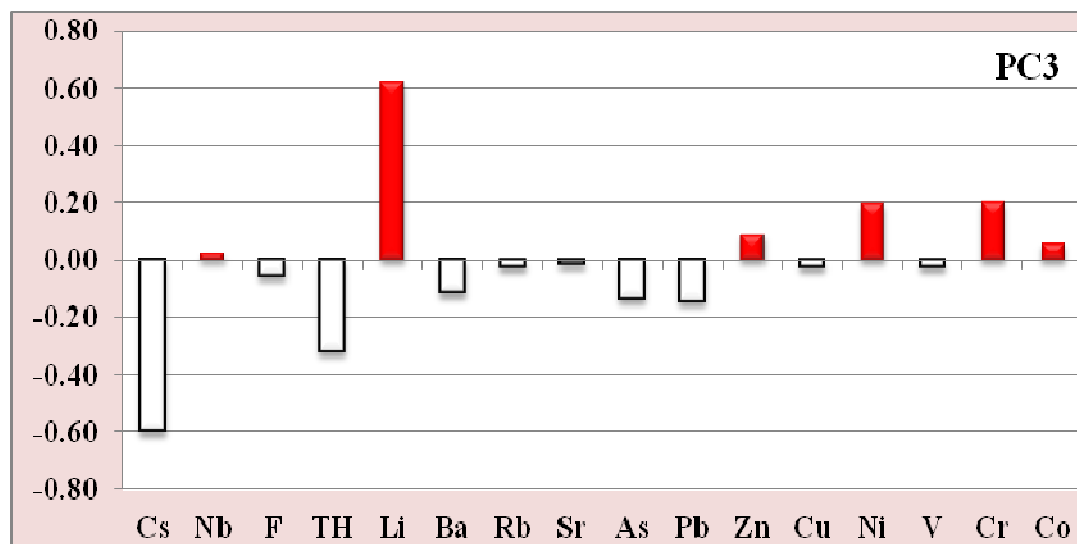
nput	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
Cs		۰/۳۱	-۰/۶۰	۰/۳۱	۰/۳۰		-۰/۳۵		۰/۳۴	
Nb	-۰/۳۴	۰/۳۱				-۰/۷۲				
F					۰/۳۹		۰/۳۱			
TH			-۰/۳۲	۰/۳۴					-۰/۴۶	
Li			۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۳۸					
Ba	-۰/۴۵						۰/۴۶	۰/۳۷		
Rb	-۰/۳۱			۰/۴۶						
Sr								-۰/۳۳		
As								۰/۶۰		
Pb							۰/۳۰		-۰/۴۸	
Zn		۰/۳۲				۰/۴۷				
Cu	۰/۳۵	۰/۳۹			-۰/۳۳					-۰/۵۴
Ni	-۰/۳۳	۰/۳۴								
V	۰/۳۶									۰/۶۱
Cr	-۰/۳۵						-۰/۴۱			۰/۳۹
Co		۰/۴۰			-۰/۳۵		۰/۳۲			



شکل ۸ نمایش مقادیر بردارهای ویژه عناصر در مولفه اصلی شماره یک وابسته به رسوب‌های آبراهه‌ای.



شکل ۹ نمایش مقادیر بردارهای ویژه برای عناصر در مولفه‌ی اصلی شماره دو وابسته به رسوب‌های آبراهه‌ای.



شکل ۱۰ نمایش مقادیر بردارهای ویژه‌ی عناصر در مولفه‌ی اصلی شماره سه وابسته به رسوب‌های آبراهه‌ای.

مولفه‌ی اصلی شماره‌ی یک

مولفه‌ی PC1 بسیار قوی و حاوی ۴۵ درصد اطلاعات است و در مورد عناصر Cu, Zn, Co, V و نیز Li و Sr, Th و وزن مثبتی نشان می‌دهد (شکل ۸). عناصر Ba, Rb, Nb, Pb و نیز نیکل-کروم در این مولفه وزن منفی دارند. شکل ۱۲ نتیجه به-دست آمده برای مولفه‌ی اصلی شماره‌ی یک را نشان می‌دهد. بررسی‌ها حاکی از آن است که مناطق مثبت این مولفه‌ی اصلی با نقشه‌ی کانی‌سازی منطقه همبستگی دارند. چنین به نظر می‌رسد که زون‌های کانی‌سازی اصلی در مولفه‌ی اصلی وزن مثبت و هاله‌های ثانویه ژئوشیمیایی وزن منفی دارند.

مولفه اصلی شماره‌ی دو

این مولفه حدود ۲۰ درصد کل تغییرات را داراست. این مولفه وزن منفی برای عناصر Ba, Th, Sr, Rb و برای عناصر دیگر وزن مثبت دارند مولفه‌ی PC2 عناصر Ni, Cr و نیز Ba, Zn, F, Pb, Rb وزن مثبت نشان می‌دهند. علی‌رغم کانی‌سازی مس مشاهده می‌شود که عنصر مس در این مولفه وزن منفی دارد (شکل ۹). همراهی روی با سرب و فلوئور می‌تواند گویای نوع دیگری از پاراژنز کانیایی در منطقه باشد.

در مولفه دوم نواحی ناهنجاری مثبت عناصر روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی دارد و با روند توده‌های شبه

فلوئور - آرسنیک دیده می‌شود.

با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که روابط عناصر مورد بررسی در مولفه‌های دیگر نیز قابل مشاهده است. مثلاً در مولفه‌ی هفتم همراهی سرب - روی - فلوئور و باریم به صورت وزن مثبت و در مولفه‌ی دهم همراهی سرب - روی با مس بصورت وزن منفی دیده می‌شود (جدول ۳). لذا با توجه به اینکه روند تغییرات ناحیه‌ای عناصر در پنج مولفه‌ی اول قابل نمایش است از توضیح سایر مولفه‌ها خودداری می‌شود.

مقایسه‌ی نقشه‌های زمین‌شناسی و دگرسانی منطقه (شکل‌های ۱ و ۲) با مولفه‌های اصلی اول و دوم نشان می‌دهد که نواحی ناهنجاری مس - روی و عناصر همراه آن‌ها، یک روند تقریبی شمال‌غربی - جنوب‌شرقی دارد که با روند سنگ‌های آذرین و مناطق دگرسانی همخوانی دارد.

مشابه آنچه که در بخش قبلی توضیح دادیم، تحلیل مولفه‌های اصلی در مورد نتایج تجزیه لیتوژئوشیمیایی نیز انجام شد. مولفه‌ی سوم این تحلیل در شکل ۱۱ و مولفه‌ی اول در شکل ۱۲ ارائه شده است. این مولفه برای عناصر سرب، روی و نقره وزن مثبت دارد. برای مقایسه‌ی بهتر سعی شد تا یک گستره‌ی تقریباً یکسان از شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شود. بررسی‌ها نشان داد که نتایج بدست آمده با توجه به انحلال و دور شدن از خاستگاه (سنگ‌های خاستگاه) همخوانی دارند.

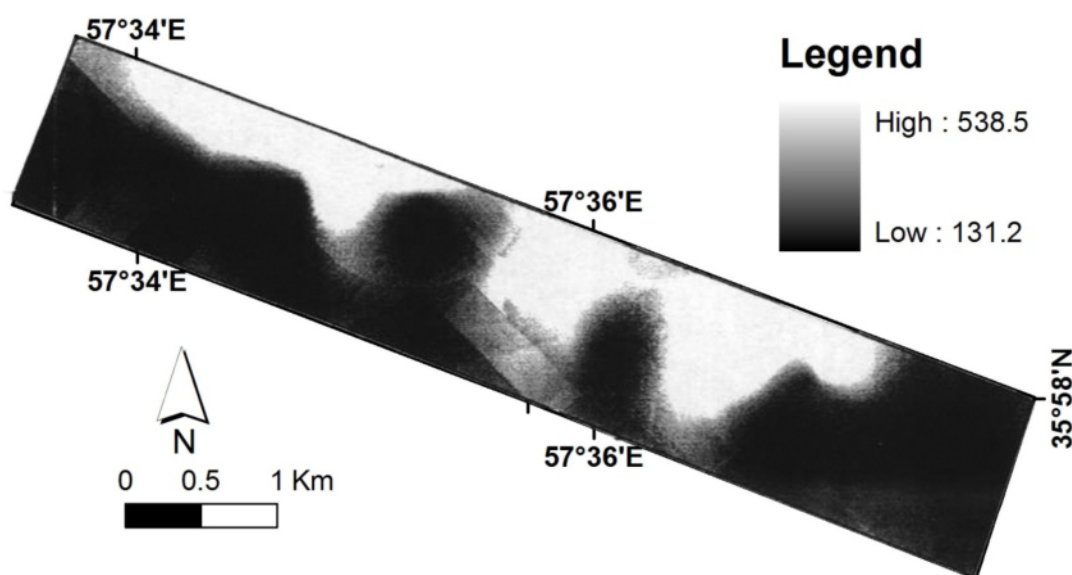
آتشفشانی همخوانی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این مناطق (وزن مثبت) با نقشه‌ی دگرسانی منطقه همبستگی بالایی دارند.

مولفه اصلی شماره سه

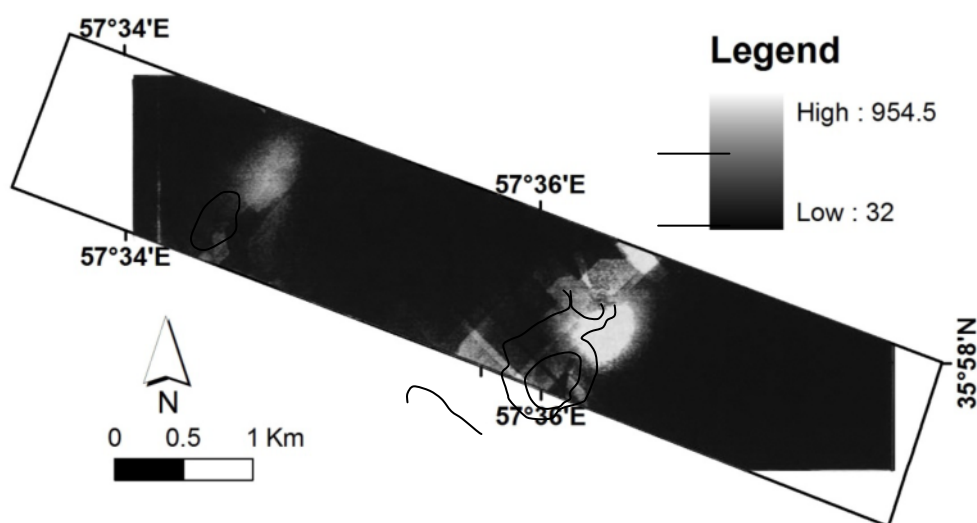
مولفه سوم شامل ۱۸ درصد کل تغییرات است (شکل ۱۰). عناصر Ni, Zn, Cr, Co در مولفه‌ی سوم وزن مثبت دارند. مس در این مولفه وزن منفی دارد. در مولفه‌های دوم و سوم همراهی روی با نیکل و کروم مشهودتر است تا با مس. در مورد عنصر روی با توجه به مجموعه‌ی همراه آن، مشخص می‌شود که بر خلاف نظر پناهی [۲۰] روی و مس همه جا همبستگی مثبت ندارند. همراهی ناهنجاری روی در منطقه دو گونه دیده می‌شود. اول همراه با مس که در مولفه‌ی اول به صورت همراهی مثبت دیده می‌شود و دیگری در مولفه‌های دوم و سوم که همراه باریم، سرب و فلوئور و یا نیکل - کروم است. مقدار بالای Li در این مولفه به هاله‌های ثانویه ژئوشیمیایی وابسته است.

مولفه اصلی شماره‌های چهار و پنج

مولفه‌ی چهارم شامل ۱۰ درصد کل تغییرات است. عناصر Ni, Cr, Zn, As با وزن منفی در این مولفه مشخص می‌شوند. عناصر Cs, Rb, Th, Li بالاترین وزن‌های مثبت را به خود اختصاص داده‌اند. در مولفه‌ی پنجم همراهی سرب - روی -



شکل ۱۱ مولفه‌ی اصلی شماره سه عناصر تجزیه شده در نمونه‌های سنگی. مناطق روشنتر همراهی عناصر Cu, Zn, F, Sr را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲ مولفه اصلی شماره یک وابسته به نمونه‌های سنگی. مناطق روشنتر همراهی عناصر سرب، روی و نقره را نشان می‌دهد.

جدول ۳ مقادیر بردار ویژه ده مولفه اصلی رسوبات آبراهه‌ای (مقادیر کمتر از ۰/۳ و بیشتر از ۰/۳ - حذف شده است).

Input	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
Cs		۰/۳۱	-۰/۶۰	۰/۳۱	۰/۳۰		-۰/۳۵		۰/۳۴	
Nb	-۰/۳۴	۰/۳۱				-۰/۷۲				
F					۰/۳۹		۰/۳۱			
TH			-۰/۳۲	۰/۳۴					-۰/۴۶	
Li			۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۳۸					
Ba	-۰/۴۵						۰/۴۶	۰/۳۷		
Rb	-۰/۳۱			۰/۴۶						
Sr								-۰/۳۳		
As								۰/۶۰		
Pb							۰/۳۰		-۰/۴۸	
Zn		۰/۳۲				۰/۴۷				
Cu	۰/۳۵	۰/۳۹			-۰/۳۳					-۰/۵۴
Ni	-۰/۳۳	۰/۳۴								
V	۰/۳۶									۰/۶۱
Cr	-۰/۳۵						-۰/۴۱			۰/۳۹
Co		۰/۴۰			-۰/۳۵		۰/۳۲			

برداشت

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در منطقه‌ی هلاک-آباد کاربرد روش‌های آنالیز چند متغیره علاوه بر اعتبار آماری بالاتر نسبت به روش‌های تک متغیره، در پی‌جویی‌های ناحیه-ای، نتایج بهتری نیز دربردارد. این امر علاوه بر اینکه اطلاعاتی در مورد همبستگی عناصر در اختیار می‌گذارد که نسبت به

بررسی تک تک عناصر سودمندتر است؛ نشان داد که فراوانی عناصر در تحلیل مولفه‌ی اصلی روند تغییرات عناصر بهتر است. امتیازات فاکتوری نشان می‌دهد که عناصر مجزا در هر فاکتور تا چه حدی با یکدیگر قابل همراهی هستند. با توجه به آنالیز مولفه‌های اصلی نمونه‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای، تغییرات عناصر را به‌طور کلی می‌توان در پنج مولفه

روی و عناصر همراه آن‌ها، در مولفه‌های اول و دوم روند تقریبی شمال غربی - جنوب شرقی دارند که با روند سنگ‌های آذرین و مناطق دگرسانی همخوانی دارد.

مراجع

[۱] حسینی پاک ع. ا.، شرف الدین م.، "تحلیل داده های اکتشافی"، دانشگاه تهران، (۱۳۸۴) ۱۰۱۴ صفحه.

[2] Grunsky E.C., "Statistical analysis in the geosciences", In: Atkinson, P.M. (ed.) *Encyclopaedia of Life Support Systems (EOLSS)*. EOLSS Publishers, Oxford, UK (2002).

[3] Harris J.R., Wilkinson L., Grunsky E.C., "Effective use and interpretation of lithogeochemical data in regional mineral exploration programs; application of geographic information systems (GIS) technology; exploration geochemistry", selected papers from "Exploration '97". *Ore Geology Reviews*, 16 (2000) (3-4), 107-143.

[4] Xu Y., Cheng Q., "A fractal filtering technique for prospecting regional geochemical maps for mineral exploration. *Geochemistry*", *Exploration, Environment, Analysis*, 1(2001) 147-156.

[5] Davis J.C., "Statistics and Data Analysis in Geology", John Wiley and Sons (WIE) (2002).

[6] Ali K., "Application of GeoDAS and other advanced GIS technologies for modeling Stream Sediment Geochemical distribution patterns to assess gold resources potential in Yunnan Province, South China", MSc thesis. York University, Toronto (2005).

[7] Ali K., Cheng Q., "Separation of Geochemical Anomalies from Backgrounds using Multifractal Power-Spectrum Analysis: a Case Study from Yunnan Province, South China", In: Cheng, Q. & Bonham-Carter, G. (eds) *Proceedings for the IAMG Conference 2005*, Toronto: GIS and Spatial Analysis, 1 (2005) 464-469.

[8] Bonham-Carter G.F., "Geographic Information Systems for Geoscientist: Modeling with GIS", Pergamon, Oxford (1994).

[9] Grunsky E.C., Cheng Q., Agterberg F.P., Merriam D.F., "Applications of spatial factor analysis to multivariate geochemical data; geologic modeling and mapping", In: 25th Anniversary Meeting of the International Association for Mathematical Geology. Prague, Czech Republic. 25th, 1 (1993).

[10] Panahi A., Cheng Q., Bonham-Carter G.F., "Modeling lake sediment geochemical distribution

بررسی کرد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مولفه‌ی اول در مورد عناصر Sr, Cs, Li و نیز Cu, Zn, Co, V و Th وزن مثبتی نشان می‌دهد. عناصر Ba, Rb, Nb, Pb و نیز نیکل-کروم در این مولفه وزن منفی دارند. بررسی‌ها حاکی از آن است که مناطق مثبت این مولفه اصلی با نقشه‌ی کانی‌سازی منطقه همبستگی دارند.

مولفه اصلی شماره دو برای عناصر Rb, Sr, Th, Ba وزن منفی و برای عناصر دیگر وزن مثبت دارد. مولفه‌ی PC2 در مورد عناصر Cr, Ni و نیز Ba, Zn, F, Pb, Rb وزن مثبتی نشان می‌دهد. آثار نیکل و کروم در رابطه با واحدهای الترامافیک و مافیک کوه میش در جنوب منطقه است. علی‌رغم شواهد کانی‌سازی مس، مشاهده می‌شود که عنصر مس در این مولفه وزن منفی دارد.

همراهی روی با سرب و فلوئور در این مولفه می‌تواند گویای نوع دیگری از پارائنز کانیایی در منطقه باشد. در مولفه‌ی دوم نواحی با ناهنجاری مثبت، عناصر روند شمال غربی - جنوب شرقی دارند و با روند توده‌های شبه آتشفشانی همخوانی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این مناطق (با وزن مثبت) با نقشه دگرسانی منطقه همبستگی بالایی دارند. در مولفه سوم عناصر Ni, Zn, Cr, Co وزن مثبت دارند. در مولفه‌های دوم و سوم همراهی روی با نیکل و کروم مشاهده می‌شود. در حالیکه ناهنجاری مس در مولفه‌ی اول همراه نیکل و کروم (با وزن مثبت) است. به‌طور کلی ناهنجاری روی گاهی همراه با مس و گاهی همراه باریم، سرب و فلوئور و یا نیکل-کروم است. عناصر Ni, Cr, Zn و نیز As با وزن منفی در مولفه‌ی چهارم مشخص می‌شوند و عناصر Cs, Rb, Th, Li بالاترین وزن‌های مثبت را به خود اختصاص داده‌اند. در مولفه‌ی پنجم همراهی سرب - روی - فلوئور - آرسنیک دیده می‌شود.

تحلیل مولفه‌های اصلی در ناحیه‌ی هلاک‌آباد نشان داد که حداقل در مورد عناصر مس و روی دو نوع همبستگی عناصر کانه‌ساز مطرح‌اند: بخشی از ناهنجاری مس همراه با نیکل و کروم (در مولفه‌ی دوم) و بخشی همراه با روی (مولفه‌ی اول). همچنین عنصر روی گاه همراه با مس (مولفه‌ی اول) و گاهی همراه باریم، سرب و فلوئور (مولفه‌ی پنجم) و یا نیکل-کروم (در مولفه دوم) است.

ناهنجاری‌های مس و عناصر دیگر با نقشه‌ی زمین‌شناسی و دگرسانی منطقه تطبیق داده شدند. نواحی ناهنجاری مس-

- آباد (جنوب سبزوار) با نگرشی بر اکتشاف مس پورفیری، زمین شناسی اقتصادی، شماره ۱، (جلد ۲) (۱۳۸۹).
- [۲۱] صادقی ع.، "پترولوژی و ژئوشیمی توده گرانیتی ششتمد (جنوب سبزوار)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شاهرود (۱۳۸۸).
- [۲۲] حسینی نژاد س.، "کانی شناسی، آلتراسیون، ژئوشیمی و کانی‌سازی در بخش شرقی معدن هلاک‌آباد (جنوب سبزوار) با نگرشی بر اکتشاف مس پورفیری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۷).
- [23] Jensen J.R., "Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective", 2nd. Prentice Hall (1996).
- [24] Tangestani M. H., Moore F., "Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping: a case study, Meiduk area, Kerman, Iran", Canadian Journal of Remote Sensing, 27(2) (2001), 176-182.
- [۲۵] قورچی م.، کریم‌پور م.ح.، ابراهیمی خ.، "بارسازی زونهای دگرسانی با استفاده از باندهای سنجنده استر مطالعه موردی منطقه هلاک‌آباد، خراسان رضوی". هیجدهمین همایش بلورشناسی و کانی شناسی ایران، تبریز (۱۳۸۹).
- [۲۶] سازمان زمین شناسی کشور، پروژه اکتشاف ژئوشیمیایی ناحیه‌ای رسوبات رودخانه‌ای سمنان - کاشمر (۱۹۹۶).
- [۲۷] شبانی ف.، "سنگ شناسی، آلتراسیون، ژئوشیمی و کانی‌سازی محدوده معدن کائولن همدی با نگرشی بر کانی‌سازی مس پورفیری (جنوب غرب سبزوار)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۷).
- [۲۸] پناهی م.، "زمین‌شناسی، پتروگرافی، کانی‌سازی و ژئوشیمی بخش شرقی معدن کائولن همدی هلاک‌آباد (جنوب غرب سبزوار)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۶).
- [۲۹] مظلوم ف.، "بررسی و مطالعه پتروگرافی، دگرسانی و ژئوشیمی در غرب معدن هلاک‌آباد سبزوار با رویکرد اکتشاف مس پورفیری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۶).

using principal component, indicator kriging and multifractal power-spectrum analysis: A case study from Gowganda, Ontario", Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 4 (2004), 59–70.

[11] Kuppusamy M.R., Grirdhar V.V., "Factor analysis of water quality characteristics including trace metal speciation in the coastal environmental system of Chennai Ennore", Environment International, (2006) 2, 174–179.

[12] Chen K., Jiao, J.J., Huang J., Huang R., "Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen, China", Environmental Pollution, (2007) 147, 771–780.

[13] Boruvka L., Veccek O., Jenlika, "Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soil", Geoderma, (2005) 128, 289–300.

[14] Zhang C., "Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland", Environmental Pollution, (2006) 142, 501–511.

[15] Spencer K.L., "Spatial variability of metals in the inter-tidal sediments of the Medway Estuary, Kent, UK", Marine Pollution Bulletin, (2002) 44, 933–944.

[16] Yawei W., Lina L., Jianbo S., Guibin J., "Chemometrics methods for the investigation of methylmercury and total mercury contamination in mollusks samples collected from coastal sites along the Chinese Bohai Sea", Environmental Pollution, (2005) 135, 457–467.

[17] Mudge S.M., Duce C.E., "Identifying the source, transport path and sinks of sewage derived organic matter", Environmental Pollution, (2005) 136, 209–220.

[۱۸] آقائباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور، (۱۳۸۳) ۶۴۰ صفحه.

[۱۹] جعفریان م. ب.، جلالی ع.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۰۰۰۰۰ ششتمد"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران.

[۲۰] پناهی شهری م.، کریم‌پور م.ح.، شبانی ف.، "کانی‌سازی و اکتشافات ژئوشیمیایی در کمر بند ولکانیکی- پلوتونیک هلاک-