

کاربرد روش‌های خوشه‌بندی در شناسایی آنومالی‌های مرکب در اکتشافات ژئوشیمیایی ناحیه‌ای در کردگان خراسان جنوبی

حمید گرانیان^{۱*}

۱- دکتری مهندسی معدن، استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، h.geranian@birjandut.ac.ir

(دریافت ۱۱ مهر ۱۳۹۵، پذیرش ۲۲ آذر ۱۳۹۶)

چکیده

نمونه‌برداری از رسوبات آبراهه‌ای در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ مهم‌ترین ابزار ژئوشیمیایی در پی‌جویی‌های ناحیه‌ای محسوب می‌شود. با توجه به آنالیز چند عنصری این نمونه‌ها، استفاده از روش‌های خوشه‌بندی در تشخیص آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب می‌تواند بر روش‌های تعیین آنومالی تک‌عنصره برتری داشته باشد. در این مقاله چهار روش خوشه‌بندی c- میانگین فازی، سلسله مراتبی چند مرحله‌ای، حداکثر انتظار و DBSCAN استفاده شده است تا آنومالی‌های مرکب حاصل از ۸۴۳ نمونه‌ی رسوبات آبراهه‌ای در ورقه کردگان مشخص شود. برای این منظور از نتایج آنالیز ۲۰ عنصر مرتبط با کانی‌زایی‌های فلزی استفاده شد تا داده‌ها به ۳ خوشه‌ی یا جامعه (جامعه زمینه، جامعه آنومالی ممکن و جامعه آنومالی احتمالی) تفکیک شود. نتایج نشان داد که محدوده‌ی آنومالی‌های ممکن و احتمالی در هر چهار روش با اندیس معدنی ثبت شده در این ورقه همپوشانی بسیار خوبی نشان می‌دهند. همچنین به‌طور متوسط ۷۴٪ از سطح آنومالی ممکن را رسوبات پادگانه و رودخان‌های و ۲۴٪ را سنگ‌های آذرین پوشش می‌دهند. این ارقام برای آنومالی احتمالی نیز به ترتیب ۶۱٪ و ۳۵٪ بود. نتایج آنالیز فاکتوری نیز ضمن تأیید آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست آمده، احتمال کانی‌زایی آهن و منگنز را در اولویت اول و کانی‌زایی عناصر Cr, Pb, Zn, Mo و Sb را در اولویت بعدی برای این ورقه پیش‌بینی کرد. در نهایت محدوده‌های به وسعت ۱۷۳/۴ و ۱۰۱۲/۶ کیلومتر مربع به ترتیب به‌عنوان محدوده‌های آنومالی احتمالی و ممکن معرفی شدند. این محدوده‌ها از روش EM به‌دست آمده‌اند که نسبت به سه روش دیگر نتایج بهتری را نشان می‌دهد. محدوده‌های پیشنهادی در ۵ منطقه مجزا و در دو اولویت مختلف برای انجام اکتشافات تکمیلی پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی

روش c- میانگین فازی، روش سلسله مراتبی چند مرحله‌ای، روش حداکثر انتظار، روش DBSCAN، آنومالی ژئوشیمیایی مرکب، ورقه کردگان

۱- مقدمه

اکتشاف در مقیاس ناحیه‌ای، یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های زیربنایی در هر کشور محسوب می‌شود. زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و دورسنجی نیز مهم‌ترین ابزارهای جمع‌آوری اطلاعات در این مقیاس هستند. طبق تعریف ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور، اکتشافات ناحیه‌ای در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ است که کل کشور با تعداد ۶۵۹ ورقه پوشش داده شده است. اطلاعات به‌دست آمده از اکتشافات ناحیه‌ای می‌تواند در فازهای اکتشافی شناسایی و پی‌جویی به کار رفته و محدوده‌های امیدبخش معدنی را مشخص کند. تعیین این محدوده‌ها نیز با کمک روش‌های مقایسه‌ای، تلفیق و مدل‌سازی لایه‌های اطلاعاتی میسر خواهد بود [۱].

برداشت نمونه‌های ژئوشیمیایی از رسوبات آبراه‌های در این مقیاس انجام می‌شود، که هدف آن شناسایی آنومالی‌های احتمالی و تعیین رابطه‌ی آن‌ها با زون‌های کانی‌زایی است [۲،۳]. تعیین محدوده‌ی آنومالی‌ها اغلب به‌صورت تک‌عنصر و با استفاده از روش‌های ساختاری و غیر ساختاری انجام می‌شود [۴]. اما چون هر نمونه برای تعداد زیاد عنصر (تا حدود ۵۰ عنصر) آنالیز می‌شود، بنابراین استفاده از روش‌های داده‌کاوی چندمتغیره به‌دلیل از بین بردن خطاهای احتمالی بعضی عناصر، بیشتر می‌تواند مؤثر باشد [۵]. روش‌های آماری شناخت الگو برای داده‌های چندمتغیره در سه زمینه رگرسیون، کلاسه‌بندی و خوشه‌بندی تقسیم می‌شوند، که در این مقاله هدف ارائه یک راهکار جدید از کاربرد روش‌های خوشه‌بندی در اکتشافات ژئوشیمیایی است. از جمله کارهای انجام‌شده می‌توان به کاربرد روش خوشه‌بندی فازی در شناسایی آنومالی‌های ضعیف [۶] تعیین محدوده‌های کانی‌زایی مس پرفیری [۷]، بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر توسط روش خوشه‌بندی k-means [۸]، جداسازی جوامع سنگی [۹] و بررسی رفتار آماری داده‌های خوشه‌بندی شده [۱۰] اشاره کرد. همچنین از روش‌های خوشه‌بندی برای تفکیک گروهی عناصر هم‌پاراژنز و ارتباط آن‌ها با واحدهای لیتولوژی [۱۱-۱۳] و یا محدوده‌های کانی‌زایی [۱۴،۱۵] نیز استفاده شده است. روش‌های خوشه‌بندی در سایر مباحث ژئوشیمیایی از قبیل شناسایی و تفکیک آب‌های زیرزمینی آغشته به آرسنیک [۱۶] و تعیین ارتباط توزیع عناصر اصلی و کمیاب با زون‌های اشباع نشده خاک [۱۷] نیز به‌کار رفته است.

محدوده‌ی ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ کردگان در بخش جنوب غربی استان خراسان جنوبی به‌دلیل وجود سنگ‌های آذرین آندزیتی- داسیتی و هاله‌های دگرسانی هیدروترمالی که مستعد کانی‌زایی چند- فلزی شناخته شده است، به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در این مقاله ضمن معرفی روش‌های خوشه‌بندی، از چهار روش خوشه‌بندی در مد Q استفاده خواهد شد تا آنومالی‌های ژئوشیمیایی چند عنصر (مرکب) در محدوده این ورقه مورد شناسایی قرار گیرد. برای این منظور از نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های برداشت شده در این محدوده استفاده خواهد شد تا نواحی دارای پتانسیل کانی‌زایی چند- فلزی برای فازهای بعدی اکتشافی معرفی شود.

۲- روش‌های خوشه‌بندی

خوشه‌بندی به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن مجموعه‌ای از اشیاء (نمونه‌ها) به چندین دسته یا خوشه تقسیم‌بندی می‌شوند، به نحوی که اشیاء در هر خوشه بسیار به هم شبیه بوده و بین خوشه‌ها نیز کمترین شباهت وجود داشته باشد. به‌عبارت دیگر روش خوشه‌بندی یک روش کلاسه‌بندی نظارت نشده محسوب می‌شود [۱۸]. مهم‌ترین معیار شباهت در داده‌کاوی، فاصله بین اشیاء در فضای ابر داده‌ها است. روش‌های خوشه‌بندی به چهار گروه روش‌های مبتنی بر گرانیگاه، روش‌های بر پایه اتصال، روش‌های بر پایه توزیع داده‌ها و روش‌های مبتنی بر چگالی تفکیک می‌شوند [۱۹]. که از هر دسته اصول و الگوریتم یک روش مورد استفاده در این مقاله شرح داده شده است.

۲-۱- روش c- میانگین فازی

در روش‌های خوشه‌بندی فازی از درجه عضویت استفاده می‌شود. این عدد نشان‌دهنده‌ی میزان تعلق یک نمونه به یک خوشه است. بنابراین این روش‌ها جزء روش‌های خوشه‌بندی نرم محسوب می‌شود. روش c- میانگین فازی^۱ (FCM) به دنبال کمینه کردن تابع خطای زیر است [۲۰]:

$$EF_q(U, V) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ij}^q d^2(X_j, \mu_i) \quad (1)$$

که X_j مقدار داده‌ی j ، μ_i مرکز خوشه i ، $d^2(X_j, \mu_i)$ فاصله نمونه‌ی j از مرکز خوشه i ، u_{ij}^q درجه عضویت نمونه‌ی j در خوشه i ، q پارامتر میزان فازی بودن (در این مقاله مقدار این پارامتر ۲ فرض شده است)، c تعداد خوشه و n تعداد نمونه-

نمونه‌های هر خوشه، LS_j مجموع خطی n_j نمونه و SS_j مجموع مربعات n_j نمونه است. به کمک این ویژگی‌ها می‌توان سه پارامتر μ_j مرکز خوشه، R_j شعاع خوشه و D_j قطر خوشه را از روابط زیر به دست آورد [۱۹]:

$$\mu_j = \frac{LS_j}{n_j}$$

$$R_j = \sqrt{\frac{n_j SS_j - 2LS_j^2 + n_j LS_j^2}{n_j^2}}$$

$$D_j = \sqrt{\frac{2n_j SS_j - 2LS_j^2}{n_j(n_j - 1)}}$$

$$j = 1, 2, \dots, k \quad (۶)$$

به منظور کنترل ابعاد درخت نیز از دو فاکتور شاخه‌بندی (حداکثر تعداد فرزندان گره‌های غیر پایانی) و حد آستانه (حداکثر فاصله خوشه‌های ذخیره شده در گره‌های برگ) نیز استفاده می‌شود. الگوریتم خوشه‌بندی داده‌ها در روش SHC در دو مرحله زیر انجام می‌شود [۱۹، ۲۲، ۲۳]:

۱- تشکیل یک CF-Tree اولیه با کنار هم قرار دادن خوشه‌بندی سلسله مراتبی ریز خوشه‌ها؛ در این مرحله هر نمونه به نزدیکترین زیر خوشه (برگ) اختصاص داده شده و اطلاعات آن به ریشه درخت نیز فرستاده می‌شود.

۲- خوشه‌بندی مجدد گره‌های برگ مرحله قبل: در این مرحله فرایند بازسازی با ساختن یک درخت جدید با استفاده از برگ‌های درخت قدیمی انجام می‌شود. بدین صورت که با استفاده از یک الگوریتم تجمیعی زیر خوشه‌هایی که به یکدیگر بسیار نزدیک هستند با یکدیگر ادغام می‌شوند و یا زیر خوشه‌های تنگ^۳ به عنوان داده‌های پرت شناخته و حذف می‌شوند.

۲-۳- روش حداکثر انتظار

الگوریتم روش خوشه‌بندی حداکثر انتظار^۴ (EM) جزو روش‌های بر پایه توزیع داده‌ها است که به دنبال حداکثر کردن درست‌نمایی یا بیشینه کردن برآوردهای پارامترهای آماری مدل‌ها است. این کار در دو گام ۱- گام انتظار (E-Step) و ۲- گام بیشینه‌سازی (M-Step) انجام می‌شود. این گام‌ها می‌توانند برای خوشه‌بندی مدل فازی و خوشه‌بندی مبتنی بر مدل احتمالاتی تعمیم داده شوند [۲۴]. در این مقاله از مدل دوم استفاده شده است، که الگوریتم آن به صورت زیر است [۲۴، ۲۵]:

ها است. الگوریتم این روش شامل مراحل تکراری زیر است [۲۱].

۱- انتخاب مرکز خوشه‌ها به صورت تصادفی
 ۲- محاسبه ماتریس درجه عضویت با فرض $t=0$ در مرحله اول و تصحیح آن با فرض $t \geq 1$ در مراحل بعدی مطابق فرمول زیر:

$$u_{ij}^{(t+1)} = \frac{[d^2(X_j, \mu_i)]^{-1}}{\sum_{l=1}^c [d^2(X_j, \mu_l)]^{-1}} \quad i = 1, 2, \dots, c \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (۲)$$

۳- محاسبه مرکز جدید خوشه‌ها از فرمول زیر:

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^q X_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^q} \quad i = 1, 2, \dots, c \quad (۳)$$

۴- محاسبه مجدد ماتریس درجه عضویت از رابطه ۲ اگر نامعادله زیر برقرار باشد عملیات متوقف شده و آخرین ماتریس درجه عضویت نشان دهنده‌ی میزان تعلق هر نمونه به خوشه‌ها خواهد بود. در غیر این صورت مراحل ۲ تا ۴ مجدداً تکرار می‌گردد.

$$\max_{ij} |u_{ij}^t - u_{ij}^{t+1}| < \varepsilon \quad (۴)$$

که ε به عنوان معیار توقف شناخته می‌شود و عددی بین صفر تا ۱ برای آن در نظر گرفته می‌شود. این روش جزو روش‌های خوشه‌بندی بر پایه گرانیگاه است.

۲-۲- روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی چند مرحله‌ای

روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی چند مرحله‌ای^۲ (SHC) جزو گروه روش‌های خوشه‌بندی بر پایه اتصال هستند. در این روش از الگوریتم اتصال استفاده می‌شود. به این ترتیب که متغیرها و یا نمونه‌ها با شباهت بیشتر با استفاده از روش تجمیعی (اتصال از پایین به بالا) و یا تقسیمی (اتصال از بالا به پایین) به هم متصل می‌شوند [۱۹، ۱۴]. در این مقاله برای اتصال از ماتریس شباهت فاصله اقلیدسی به فرمول زیر استفاده خواهد شد.

$$d_{AB} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_{iA} - X_{iB})^2} \quad (۵)$$

که d_{AB} فاصله نمونه‌ی A از B و m تعداد متغیرها (بعد داده‌ها) است. همچنین در این روش برای نمایش سلسله مراتب خوشه‌ها از درخت ویژگی خوشه‌بندی (CF-Tree) استفاده می‌شود، که هر خوشه دارای سه ویژگی n_j تعداد

الف- اگر q شی هسته و p در شعاع همسایگی آن باشد، می‌گویند p به صورت مستقیم از q قابل دسترس است اگر و تنها اگر q یک شی هسته و p نیز در شعاع همسایگی E از q باشد. همچنین اگر a و b اشیاء هسته و c شی غیر هسته باشد، به طوری که b از a به صورت مستقیم و c از b نیز به صورت مستقیم قابل دسترس باشند، می‌گویند c از a به طور غیر مستقیم قابل دسترس است.

ب- a و b اشیاء متصل شده با چگالی می‌باشند، هر گاه هر دو از شی دیگری مانند c قابل دسترس باشند. این تعریف می‌تواند مناطق متراکم کوچک را به یک منطقه متراکم بزرگ و نهایت تشکیل یک خوشه تبدیل کند. الگوریتم این روش شامل مراحل زیر است [۲۶، ۲۷]:

۱- انتخاب اولین نمونه به صورت تصادفی و بررسی هسته بودن آن شی

۲- در صورتی که نمونه‌ی انتخاب شده شی هسته باشد، اولین خوشه تشکیل می‌شود و کلیه نمونه‌های که توسط این شی هسته به طور مستقیم و یا غیر مستقیم قابل دسترس و یا متصل شده با چگالی باشند، به این خوشه نسبت داده می‌شود.

۳- تکرار مراحل ۱ و ۲ تا اینکه کلیه نمونه‌ها بررسی شوند.

۳- معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی با نام ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ کردگان در بخش شمال غربی چهار گوشه دهسلم قرار دارد. این محدوده در ۱۳۰ کیلومتری جنوب غربی بیرجند و در استان خراسان جنوبی واقع شده است. به لحاظ جغرافیایی این ورقه در مختصات $۵۸^{\circ} ۳۰'$ تا $۵۹^{\circ} ۰۰'$ طول شرقی و $۳۱^{\circ} ۳۰'$ تا $۳۲^{\circ} ۰۰'$ عرض شمالی و به لحاظ زمین‌شناسی- ساختاری در بخش مرکزی بلوک لوت قرار دارد. گسل‌های امتداد لغز، چین‌خوردگی‌های ملایم و فعالیت‌های آتشفشانی شدید و پیوسته در ژوراسیک میانی از مهم‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی لوت مرکزی است.

قدیمی‌ترین واحدهای سنگی مشاهده شده در منطقه مطالعاتی شامل شیل، ماسه سنگ و سنگ‌های آهکی ژوراسیک پایینی تا کرتاسه بالایی است. این واحد بیشتر در بخش جنوبی منطقه مطالعاتی مشاهده می‌شود (شکل ۱) که در بعضی قسمت‌ها به شدت چین خورده است. بخشی از سنگ‌های این واحد دگرگون شده و سنگ‌های شیست و اسلیت را تشکیل داده است. سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی متعلق به آئوسن تا اولیگوسن واحدهای بعدی منطقه می‌باشند. این سنگ‌ها از چهار واحد گدازه‌های آندزیتی تا

۱- انتخاب پارامترهای مدل احتمال به صورت تصادفی به شکل زیر:

$$\theta_j = N(\mu_j, \Sigma_j) \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

که μ_j و Σ_j به ترتیب ماتریس میانگین و ماتریس واریانس خوشه λ_j (با این فرض که توزیع داده‌های هر خوشه از تابع گوسی چند متغیره تبعیت می‌کند) و k تعداد خوشه‌ها است. ۲- گام انتظار: محاسبه احتمال تعلق هر نمونه یا متغیر به هر خوشه با فرمول زیر:

$$Z_i = p(\theta_j | X_i) = \frac{p(X_i | \theta_j)}{\sum_{l=1}^k p(X_i | \theta_l)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

$$p(X_i | \theta_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Sigma_j} e^{-\frac{(X_i - \mu_j)^2}{2\Sigma_j^2}} \quad (9)$$

بنابراین نمونه‌ها به خوشه‌ای تعلق خواهند داشت که بیشترین مقدار Z_i را داشته باشند.

۳- گام بیشینه‌سازی: محاسبه پارامترهای آماری هر خوشه با توجه به نمونه‌های هر خوشه برای رسیدن به حداکثر درست‌نمایی و با استفاده از فرمول‌های زیر:

$$\mu_j = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^n X_i p(\theta_j | X_i)}{\sum_{i=1}^n p(\theta_j | X_i)} \quad (10)$$

$$\Sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p(\theta_j | X_i) (X_i - \mu_j)^2}{\sum_{i=1}^n p(\theta_j | X_i)}} \quad (11)$$

۴- تکرار مراحل ۲ و ۳ تا رسیدن به همگرایی خوشه‌بندی

۲-۴ خوشه‌بندی فضایی برنامه‌های کاربردی همراه با نویز بر پایه چگالی

روش خوشه‌بندی فضایی برنامه‌های کاربردی همراه با نویز بر پایه چگالی^۵ (DBSCAN) اولین بار توسط استرن و همکارانش در سال ۱۹۹۶ ارائه گردید [۲۶]. برای خوشه‌بندی در این روش نمونه‌ها یا متغیرهایی که دارای همسایه‌های متراکم می‌باشند، به‌عنوان اشیاء هسته در نظر گرفته می‌شوند. سپس با اتصال اشیاء هسته و همسایه‌های آن‌ها مناطق متراکم به دست آمده به‌عنوان یک خوشه در نظر گرفته می‌شود. در این روش دو پارامتر ϵ و MinPts نیز توسط کاربر تعریف می‌شود، که اولی شعاع همسایگی و دومی حد چگالی همسایگی نامیده می‌شود. چنانچه در شعاع همسایگی ϵ از یک شی، بتوان حداقل تعداد MinPts نمونه پیدا کرد، آن شی به‌عنوان شی هسته شناخته می‌شود. دو تعریف زیر نیز برای خوشه‌بندی داده‌ها در این روش استفاده می‌شود [۲۸]:

۴- معرفی داده‌های ژئوشیمیایی

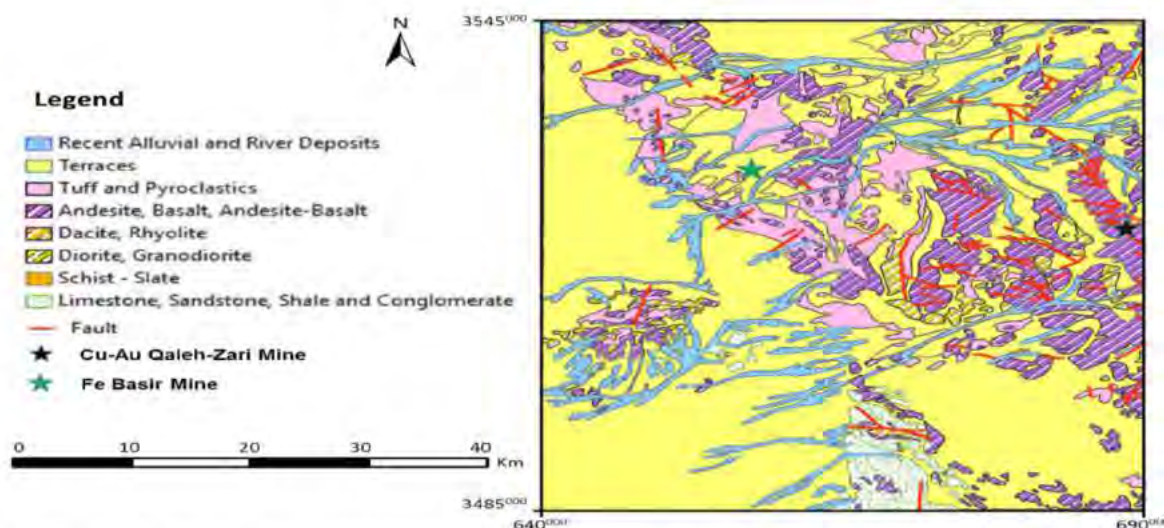
از محدوده‌ای به ابعاد $۵۵/۱ \times ۴۷/۷$ کیلومتر، ۸۴۳ نمونه‌ی ژئوشیمیایی از رسوبات آبراهه‌ای برداشت شده است که موقعیت این نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است (به-منظور نمایش بهتر داده‌ها، محدوده رسم شده در کلیه شکل‌ها کمی از محدوده ورقه کردگان بزرگتر در نظر گرفته شده است). انجام آزمون آماره Z بصورت زیر نشان می‌دهد که داده‌ها دارای یک توزیع تقریباً تصادفی در منطقه مطالعاتی هستند (برای جزئیات بیشتر می‌توان به کتاب تحلیل داده‌های اکتشافی صفحه ۵۰۴، منبع ۴، مراجعه کرد).

$$Z = \frac{\bar{d} - \bar{\delta}}{S_e} = \frac{893.9 - 883.4}{15.9} = 0.66 \quad (۱۲)$$

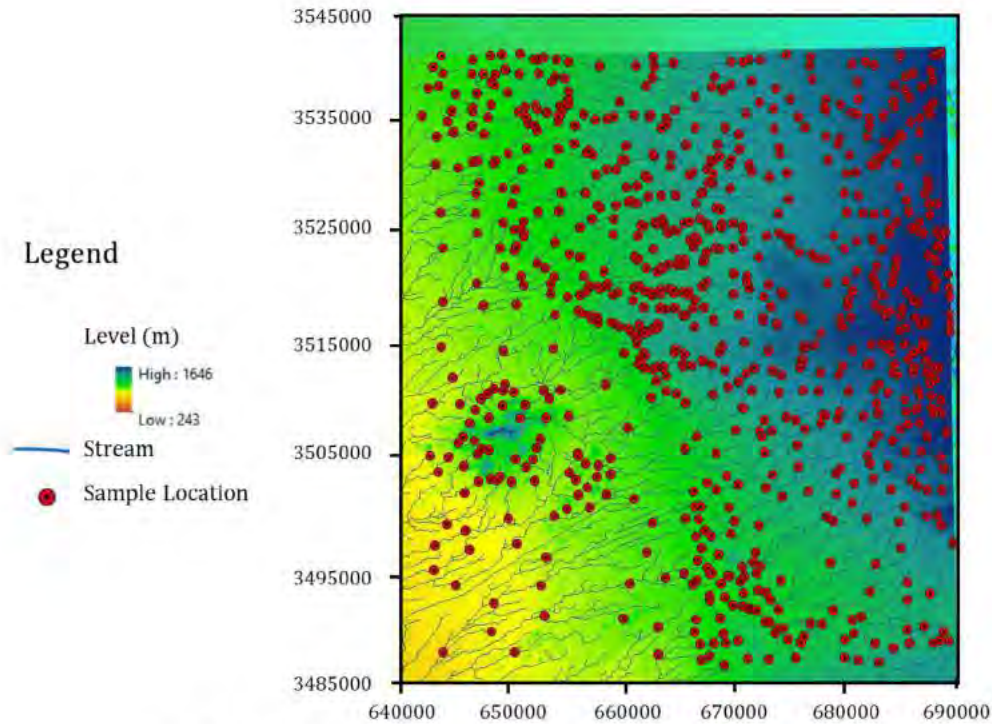
بخش کوچک‌تر از ۸۰ مش نمونه‌ها برای آنالیز شیمیایی ۵۲ عنصر به روش ICP-OES انتخاب شده است. برداشت ۳۰ نمونه‌ی تکراری نشان می‌دهد انحراف معیار نسبی (RSD) که نشان‌دهنده‌ی دقت نمونه‌برداری و آنالیزها به روش تامسون-هاوارث است، برای عناصر اصلی کمتر از ۵ درصد و برای سایر عناصر کمتر از ۱۰ درصد است. چون منطقه مطالعاتی مستعد کانی‌زایی‌های فلزی است، از نتایج آنالیزهای شیمیایی ۲۰ عنصر $Cd, Bi, Ba, Au, As, Ag, Sn, Sb, S, Pb, Ni, Mo, Mn, Hg, Fe, Cu, Cr, Co$ و Zn و W برای تعیین مناطق پتانسیل‌دار معدنی در این مقاله استفاده شده است.

بازالتی تیره رنگ و کمی هوازده شده است که بیشترین گسترش را در منطقه مطالعاتی دارند. دومین واحد آذرین، سنگ‌های تقریباً اسیدی داسیت و ریولیتی با بافت پرفیری است که در بعضی قسمت‌ها دگرسان شده است. این واحد سنگی در بخش مرکزی منطقه قابل مشاهده است (شکل ۱). تنها سنگ آذرین درونی منطقه، سنگ‌های دیوریت و گرانودیوریتی است که توسط آبرفت‌های کوتاه‌تر پوشیده شده و فقط بیرون‌زدگی‌های کوچکی از آن در مرکز محدوده مشاهده می‌شود (شکل ۱). توف‌های بازی تا اسیدی و نهشت‌های پیروکلاستیک چهارمین واحد آذرین در منطقه است که به‌طور گسترده در بخش‌های شمالی و مرکزی ورقه کردگان پراکنده شده است (شکل ۱). رسوبات پادگانه و آبراهه‌های متعلق به کوتاه‌تره نیز جوانترین واحد سنگی منطقه هستند که قسمت‌های اعظم منطقه مطالعاتی را پوشش داده‌اند [۲۸].

گسل‌های امتداد لغز با روند NE-SW و NW-SE و چین-خوردگی متوسط تا ضعیف تا شیب ۳۰ درجه که در اثر چرخش خلاف عقربه‌های ساعت بلوک لوت در هنگام بسته شدن اقیانوس سیستان به‌وجود آمده‌اند، مهم‌ترین پدیده‌های تکتونیکی منطقه مطالعاتی می‌باشند. زون دگرسانی آرژلیکی در بخش مرکزی و زون دگرسانی آرژلیکی، فیلیکی و پروپلیتی در بخش شرقی ورقه کردگان نیز از زون‌های شناخته شده منطقه می‌باشند. وجود سنگ‌های آذرین به همراه هاله‌های دگرسانی هیدروترمالی باعث تشکیل کانسارهای فلزی به‌خصوص مس، طلا، قلع، تنگستن و آهن شده است که معدن مس قلعه‌زری و آهن بصیر از مهم‌ترین معادن این ورقه محسوب می‌شود [۲۹].



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده شده‌ی ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ کردگان (اقتباس از نقشه منتشر نشده سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)



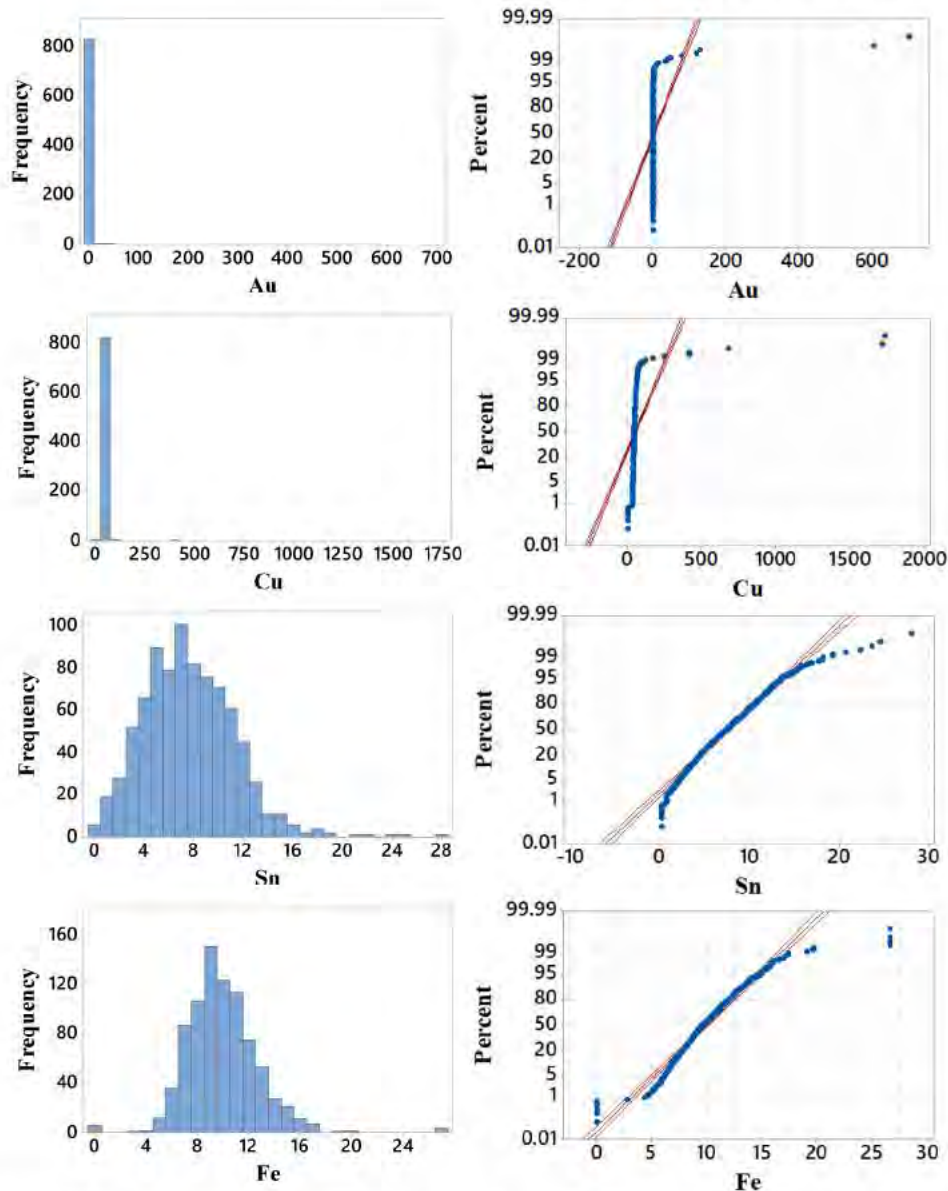
شکل ۲: نقشه پراکندگی نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های در ورقه کردگان

جدول ۱: پارامترهای آمار توصیفی عناصر شیمیایی

عناصر (واحد اندازه-گیری)	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	میان	انحراف مطلق از میان	چولگی	کشیدگی	شاخص غنی-شدگی
نقره (ppm)	۰/۰۶	۱۳/۳۸	۰/۲۴	۰/۶۶	۰/۱۹	۰/۰۵	۱۷/۵	۳۲۴/۸	۳/۴۲
آرسنیک (ppm)	۰/۳	۴۰/۵	۱۲/۸۴	۳/۰۲	۱۲/۵	۱/۵	۲/۲	۱۴/۷	۸/۵۶
طلا (ppb)	۰/۷۵	۷۰۳/۲۵	۳/۶۵	۳۲/۶۲	۱/۴	۰/۳	۱۹/۴	۳۸۹/۱	۳/۳۲
باریم (ppm)	۰/۳۸	۸۶۷/۷۰	۴۵۸/۴۴	۶۴/۰۵	۴۶۰/۱۰	۳۳/۴۹	-۱/۹	۱۹/۹	۱/۳۵
بیس‌موت (ppm)	۰/۱	۵۷/۱۳	۱/۲۶	۵/۱۵	۰/۳۵	۰/۰۵	۷/۰	۵۵/۳	۲۶/۲۵
کادمیوم (ppm)	۰/۰۱	۵/۶۱	۰/۶۶	۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۲۳	۳/۷	۲۰/۹	۶
کبالت (ppm)	۰/۱۵	۵۱/۳۴	۲۵/۴۹	۶/۱۷	۲۵/۱۴	۳/۷۸	۰/۲	۲/۳	۱/۲۷
کروم (ppm)	۱/۵	۱۰۴۳/۷	۲۱۳/۵	۹۲/۴	۱۹۷/۶	۴۶/۹	۲/۱	۱۰/۶	۲/۱۳
مس (ppm)	۰/۱۵	۱۷۳۸/۴۳	۵۲/۱۵	۸۷/۵۱	۴۵/۴	۴/۷۷	۱۷/۴	۳۲۴/۱	۱/۰۴
آهن (%)	۰/۰۱	۲۶/۶۷	۹/۹۳	۲/۸۷	۹/۶۰	۱/۶۶	۱/۰	۵/۶	۲/۴۲
جیوه (ppm)	۰/۰۴	۰/۷۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱	۱۳/۵	۲۲۸/۹	۱
منگنز (ppm)	۱/۵	۶۱۸۳/۷	۱۵۳۴/۴	۳۹۰/۰	۱۵۰/۱۳	۲۱۳/۰	۲/۴	۲۷/۳	۱/۶۲
مولیبدن (ppm)	۰/۶۰	۱۷/۷۲	۱/۵۷	۱/۰۶	۱/۳۷	۰/۱۸	۷/۸	۸۵/۱	۱/۰۵
نیکل (ppm)	۱/۵	۹۰/۴	۴۶/۶	۹/۸	۴۷/۵	۵/۴۹	-۰/۷	۳/۴	۱/۱۳
سرب (ppm)	۰/۱۵	۵۲۰/۴۴	۲۰/۳۲	۳۵/۰۲	۱۴۰/۵	۵/۴۰	۱۰/۳	۱۲۵/۵	۱/۴۵
گوگرد (ppm)	۳۷/۵	۵۶۰۰۰	۸۵۸/۵	۳۰۹۵/۵	۲۶۲/۸	۶۷/۹	۱۲/۱	۱۸۰/۸	۳/۳۰
آنتیموان (ppm)	۰/۴۰	۱۱/۳۰	۱/۱۶	۱/۴۷	۰/۸۵	۰/۱	۵/۳	۲۶/۸	۵/۸۰
قلع (ppm)	۰/۳۸	۱۴۰/۵۱	۵/۶۲	۱۱/۸۹	۰/۹۶	۲/۴۵	۴/۹	۳۸/۹	۲/۵۵
تنگستن (ppm)	۰/۱۵	۲۸/۱۶	۷/۵۹	۳/۶۹	۷/۳۱	۰/۳۱	۰/۷	۱/۹	۶/۹۰
روی (ppm)	۰/۱۵	۵۸۹/۰۴	۱۲۹/۷۶	۴۴/۱۶	۱۲۳/۶۵	۲۱/۲۴	۳/۴	۲۸/۸	۱/۷۳

نامتقارن بوده و از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند (به استثناء عناصر کبالت، نیکل و تنگستن که دارای توزیع تقریباً نرمال هستند). همچنین با توجه به مثبت بودن چولگی (به استثناء عناصر باریم و نیکل) و نمودارهای فراوانی یا احتمال چند جامعه‌ای بودن توزیع عناصر قطعی بوده که می‌تواند نشان‌دهنده وجود آنومالی‌های ژئوشیمیایی در منطقه مطالعاتی باشد. به‌طور مثال در شکل ۳ نمودارهای فراوانی و احتمال چهار عنصر (عناصری که با توجه به وجود محدوده‌های معدنی موجود، احتمال بالاتری برای کانی‌زایی در منطقه دارند) که نشان‌دهنده چند جامعه بودن توزیع داده‌ها است، به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

در جدول ۱ پارامترهای آماری عناصر انتخابی ارائه شده است. مقادیر میانگین کلیه عناصر از عدد کلارک بالاتر است (به استثناء جیوه). پارامتر شاخص غنی‌شدگی (نسبت میانگین به عدد کلارک) نیز نشان دهنده غنی‌شدگی منطقه مطالعاتی نسبت به کلیه عناصر است. همچنین مقادیر انحراف معیار برای ۹ عنصر (بیشتر عناصر کالکوفیل) از مقدار میانگین بیشتر و برای ۱۱ عنصر (بیشتر عناصر لیتوفیل) از مقدار میانگین کمتر است. مقدار حداکثر نیز برای کلیه عناصر از آستانه‌ی میانگین بعلاوه دو برابر انحراف معیار یا میانه به‌علاوه دو برابر انحراف مطلق از میانه بیشتر است. این نکته نشان دهنده وجود مقادیر آنومالی در داده‌ها است. مقادیر بالای چولگی و کشیدگی عناصر نیز نشان می‌دهد که توزیع آن‌ها



شکل ۳: نمودارهای فراوانی (نمودارهای سمت چپ) و احتمال (نمودارهای سمت راست) چهار عنصر طلا، مس، قلع و آهن

ژئوشیمیایی محسوب می‌شوند. عناصر کالکوفیل رفتارهای متفاوتی در محیط اکسیداسیون سطحی از خود نشان می‌دهند. به طوری که عناصری از قبیل کادمیوم، مس و روی دارای قابلیت تحرک بالا، نقره با قابلیت تحرک متوسط، آرسنیک دارای قابلیت کم و سرب و آنتیموان غیر متحرک هستند [۳۲]. در حالی که از عناصر گروه سیدروفیل طلا و مولیبدن عناصر هستند که قابلیت تحرک نسبتاً کمی داشته و به ترتیب می‌توانند به شکل کلریدی و کلونیدی در آب انتقال یابند. این عناصر در شرایط احیا به سرعت راسب می‌شوند. ولی عناصر نیکل و کبالت در همین گروه در محلول‌های دارای سولفات متحرک هستند. در مقابل عنصر سیدروفیل و لیتوفیل کروم یک عنصر نامحلول در آب است [۳۲، ۳۳]. عنصر لیتوفیل باریم قابلیت انحلال کمی در آب دارد. هوازدگی شیمیایی می‌تواند باعث آزاد شدن این عنصر و انتقال آن بیشتر به صورت ذرات جامد و ترکیبات کمپلکس در آب شود [۳۴]. بنابراین انتظار می‌رود، عناصری که دارای قابلیت انحلال بالاتری در آب‌های سطحی هستند بتوانند در نمونه‌های رسوبات آبراه‌های تمرکز بهتر را نشان دهند.

جدول ۲: نتایج خوشه‌بندی داده‌های ژئوشیمیایی در مدل R

شماره خوشه	عناصر	تعداد عناصر
اول	Au-Ag-Cu-Pb-Hg-S-W-Mo-Te-Tl-Bi-Sb-Cd	۱۳
دوم	Al-Ba-Ca-Rb-K-Na	۶
سوم	Mg-Y-P-Sc-Zr-La	۶
چهارم	Nd-Ce-Li-Nb-Er-Gd-Sm-Eu-Dy	۹
پنجم	Fe-Co-Ni-Th	۴
ششم	U-Cs-V-Yb-Ga-Be-Ge	۷
هفتم	Mn-Zn-Cr-Sr-As-Sn	۶
هشتم	Ti	۱

به منظور شناسایی تأثیر این سه عامل در تشکیل آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب از روش‌های خوشه‌بندی ذکر شده استفاده شده است. تعداد خوشه‌ها در تحقیق ۳ عدد در نظر گرفته شده است که شامل خوشه اول (داده‌های زمینه)، خوشه دوم (داده‌های آنومالی ممکن) و خوشه سوم (داده‌های آنومالی احتمالی) است. نتایج تفکیک داده‌های ژئوشیمیایی ۲۰ عنصر به این سه جامعه در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مقاله، برای خوشه‌بندی داده‌ها از نرم افزار متلب و برای ترسیم

به منظور تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب به روش‌های خوشه‌بندی نیاز به تعدیل داده‌های سنسورد و استانداردسازی آن‌ها است. برای این منظور از مقادیر $4/3$ حد حساسیت برای تعدیل داده‌های سنسورد و از فرمول زیر برای استاندارد سازی آن‌ها استفاده شده است.

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{min_j}}{X_{max_j} - X_{min_j}} \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m$$

۵- خوشه‌بندی داده‌های ژئوشیمیایی

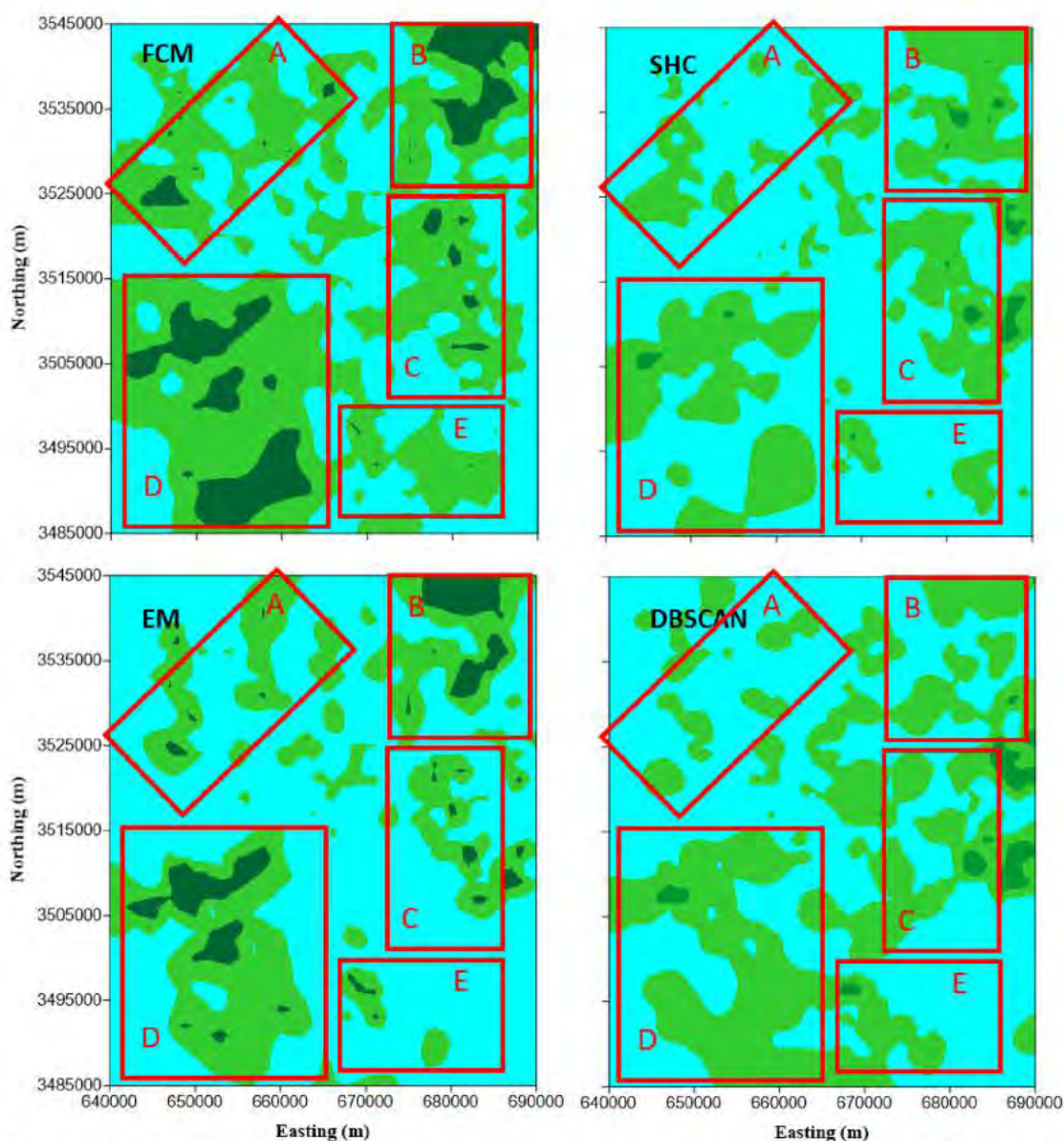
در جدول ۲ نتایج خوشه‌بندی داده‌های ژئوشیمیایی به روش سلسله مراتبی به کمک روش اتصال وارد و در مدل R ارائه شده است. عناصر فلزی که در منطقه دارای پتانسیل کانی-زایی هستند در خوشه‌های اول، پنجم و هفتم قرار دارند. عنصر باریم و تا حدودی عنصر کروم به عنوان عناصر لیتوفیل شناخته می‌شوند. در حالی که عناصر طلا، کبالت، کروم، آهن، منگنز، مولیبدن، نیکل و تنگستن نقش عناصر سیدروفیل و بقیه عناصر (شامل نقره، آرسنیک، بیسموت، کادمیوم، مس، جیوه، سرب، گوگرد، آنتیموان، قلع و روی) نقش عناصر کالکوفیل را در محیط شیمیایی دارند. ماگمای کالک-آلکان که منبع تشکیل سنگ‌های آذرین منطقه است، می‌تواند باعث غنی‌شدگی سنگ‌ها نسبت به عناصر سیدروفیل و کالکوفیل به خصوص عناصری از قبیل Cu، Ni، Co، Cr، Pb، Zn و Mo شود [۳۰]. توزیع مجدد عناصر بعد از فرآیندهای ماگماتیسم اولیه که باعث تشکیل سنگ‌های آذرین در منطقه مطالعاتی شده است را می‌توان ناشی از دو فرآیند آلتراسیون هیدروترمالی در توزیع هاله‌های ژئوشیمیایی اولیه و هوازدگی در توزیع هاله‌های ژئوشیمیایی ثانویه دانست. گسترش آنومالی‌های ژئوشیمیایی عناصر در اثر فرآیندهای آلتراسیون هیدروترمالی به قابلیت تحرک عناصر بستگی دارد. به طور کلی عناصر لیتوفیل نسبت به دو گروه دیگر قابلیت تحرک بیشتری در چنین محیط‌هایی دارند. آلتراسیون هیدروترمالی می‌تواند باعث کاهش مقدار SiO_2 در آلتراسیون آرژیلیکی و پراکنده کردن آن در آلتراسیون‌های سریسیتی و پروپلیتیکی شود که نتیجه آن کاهش غلظت عناصر سیدروفیل و کالکوفیل در آلتراسیون آرژیلیکی و افزایش اندک آن‌ها در دو آلتراسیون دیگر شود [۳۰، ۳۱].

مورفولوژی مهم‌ترین عامل در هوازدگی فیزیکی و قابلیت انحلال عناصر و یا ترکیبات کمپلکسی آن‌ها در آب نیز مهم-ترین عامل در هوازدگی شیمیایی عناصر و تشکیل آنومالی‌های

مناطق D و B در اولویت اول و مناطق A و C در اولویت دوم و در نهایت منطقه E قرار دارد. درصد همپوشانی هر یک از جوامع با واحدهای لیتولوژی نیز در جدول ۳ آورده شده است. بیشترین مساحت آنومالی‌های ژئوشیمیایی در رسوبات پادگانه و کمترین مساحت در سنگ‌های دگرگونی اتفاق افتاده است. سنگ‌های آندزیتی و بازالتی نیز در میان سنگ‌های آتشفشانی بیشترین همپوشانی را با آنومالی‌ها نشان می‌دهند.

نقشه‌ی آنومالی‌ها (شکل ۴) از نرم افزار ArcMap استفاده شده است.

برای محاسبه درجه عضویت بهینه در روش FCM، مقدار پارامتر E برابر 10^{-3} در نظر گرفته شده است. بنابراین درجه عضویت هر نمونه تا دقت سه رقم اعشار محاسبه شده است. با توجه به مقادیر درجه عضویت، از ۸۴۳ نمونه، ۲۶۶ نمونه در جامعه زمینه، ۳۷۳ نمونه در جامعه آنومالی ممکن و ۲۰۴ نمونه در جامعه آنومالی احتمالی قرار دارند. نقشه محدوددهی هر یک از این جوامع در شکل ۴-FCM و مساحت آن‌ها نیز در جدول ۳ نشان داده شده است. در این شکل، ۵ منطقه با پتانسیل دارای آنومالی چند-فلزی قابل مشاهده است، که



شکل ۴: نقشه پراکندگی آنومالی ژئوشیمیایی مرکب در ورقه کردگان براساس چهار روش خوشه‌بندی مورد استفاده (رنگ آبی فیروزه‌ای منطقه زمینه، رنگ سبز کم رنگ منطقه آنومالی ممکن و رنگ سبز پررنگ منطقه آنومالی احتمالی است)

دگرگونی شیبست و اسلیت نیز فاقد آنومالی ژئوشیمیایی می-باشند (جدول ۳).

در روش خوشه‌بندی DBSCAN دو پارامتر شعاع همسایگی و حداقل تعداد نمونه به روش سعی و خطا بهینه شده‌اند. معیار انتخاب این دو پارامتر داشتن سه خوشه‌ی بوده است که بیشترین شباهت را با روش‌های خوشه‌بندی قبلی داشته باشند. بهترین مقادیر برای این دو پارامتر به ترتیب $\epsilon=0/44$ و $MinPts=3$ است. با توجه به این پارامترها و الگوریتم این روش خوشه‌بندی، ۴۳۲ نمونه در جامعه زمینه، ۳۵۶ نمونه در جامعه آنومالی ممکن و ۵۵ نمونه در جامعه آنومالی احتمالی قرار گرفته‌اند. محدوده آنومالی‌های ژئوشیمیایی این روش در شکل ۴-DBSCAN نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مناطق C و D به‌عنوان بهترین نواحی دارای آنومالی و مناطق A، B و E به‌عنوان اولویت دوم دارای پتانسیل آنومالی ژئوشیمیایی معرفی شده‌اند. وسعت آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست آمده از این روش و درصد همپوشانی آن‌ها با واحدهای لیتولوژی، بیشترین شباهت را با روش SHC دارد.

وسیع‌ترین آنومالی‌های ممکن و احتمالی متعلق به روش FCM است. در حالی که کوچک‌ترین آنومالی‌های ممکن و احتمالی به‌ترتیب با روش‌های EM و SHC به‌دست آمده است (جدول ۳). همچنین رسوبات پادگانه بیشترین سطح آنومالی‌های ژئوشیمیایی را پوشش می‌دهد. این نکته به دو دلیل ۱- این واحد لیتولوژی بیشترین سطح منطقه مطالعاتی را پوشش می‌دهد و ۲- چون نمونه‌های ژئوشیمیایی متعلق به رسوبات آبراه‌ای هستند، بنابراین وجود آنومالی در سنگ‌های بالا دست خود را در رسوبات پایین دست نشان می‌دهد، است. سنگ‌های دگرگونی شیبست و اسلیت نیز تقریباً فاقد آنومالی ژئوشیمیایی هستند (جدول ۳). این نکته نیز دو دلیل دارد، اول این که این واحد لیتولوژی کمترین سطح پوشش را در منطقه دارد و دوم این که سنگ‌های دگرگونی فاقد کانی‌زایی فلزی هستند.

برای خوشه‌بندی داده‌ها در روش سلسله مراتبی چند مرحله-ای، مقادیر فاکتور شاخه‌بندی و حد آستانه به روش سعی و خطا و برای داشتن سه خوشه بهینه تخمین زده شده است. این مقادیر برای فاکتور شاخه‌بندی و حد آستانه به‌ترتیب ۸ عدد و ۳ سطح به‌دست آمده است. در این حالت از ۸۴۳ نمونه، ۵۳۰ نمونه در جامعه زمینه، ۲۵۹ نمونه در جامعه آنومالی ممکن و ۵۴ نمونه در جامعه آنومالی احتمالی قرار گرفته‌اند. در شکل ۴-SHC نتیجه نهایی خوشه‌بندی نشان داده شده است. در این شکل علاوه بر محدوده آنومالی‌های ممکن و احتمالی، محدوده هر ۵ منطقه پیشنهادی نیز نشان داده شده است. مناطق B، C و D به‌عنوان نواحی با پتانسیل بالایی کانی‌زایی و مناطق A و E به‌عنوان محدوده‌هایی با پتانسیل کانی‌زایی متوسط پیشنهاد می‌شود. در حالی که مساحت آنومالی‌های ژئوشیمیایی در این روش از روش قبلی کمتر است (جدول ۳)، اما درصد همپوشانی آنومالی‌ها مختلف با واحدهای لیتولوژی همانند روش FCM است.

شکل ۴-EM نتایج خوشه‌بندی داده‌های ژئوشیمیایی را به سه جامعه به روش حداکثر انتظار نشان می‌دهد. در روش خوشه-بندی EM برای انتخاب اولیه‌ی پارامترهای مدل احتمال می-توان از روش‌های مختلف طبقه‌بندی استفاده کرد، که در این مقاله روش طبقه‌بندی کننده نزدیک‌ترین میانگین به‌کار رفته است. سپس در گام‌های تکراری این پارامترها بهینه شده است. نتایج نهایی خوشه‌بندی نشان داده است که از ۸۴۳ نمونه، ۳۷۰ نمونه در جامعه زمینه، ۳۰۱ نمونه در جامعه آنومالی ممکن و ۱۷۲ نمونه در جامعه آنومالی احتمالی قرار دارند. به لحاظ پتانسیل کانی‌زایی مناطق B و D در اولویت اول و مناطق A، C و E در اولویت دوم قرار دارند. وسعت آنومالی‌های ممکن و احتمالی در این روش از روش SHC بیشتر و از روش FCM کمتر است (جدول ۳). همچنین بعد از واحد رسوبات پادگانه، آنومالی‌های ژئوشیمیایی بیشتر با سنگ‌های آندزیتی و بازالتی همپوشانی دارد. در حالی که سنگ‌های

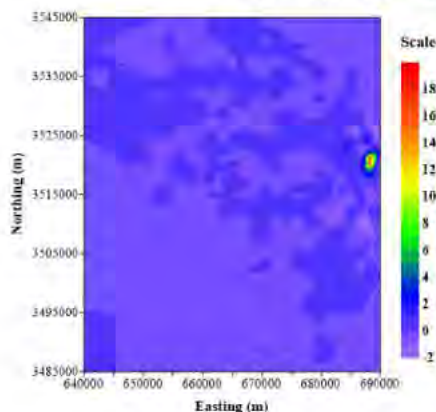
جدول ۳: مساحت هر یک از آنومالی‌ها و درصد همپوشانی با واحدهای لیتولوژی منطقه مطالعاتی

روش خوشه-بندی	مساحت آنومالی (کیلومتر مربع)	درصد همپوشانی آنومالی با هر یک از واحدهای لیتولوژی منطقه								
										
FCM	ممکن	۱۶۵۴/۴	۱۲/۶	۶۳	۶/۹	۱۳/۲	۱/۸	۰/۳	۰/۱	۲/۱
	احتمالی	۳۰۰/۱	۱۰/۴	۶۵	۴/۲	۱۵/۱	۲/۳	۱/۶	۰	۱/۴
SHC	ممکن	۱۰۰۲۵	۱۲/۹	۵۹/۳	۷/۵	۱۶/۱	۱/۹	-/۵	۰/۱	۱/۷
	احتمالی	۴۱/۲	۱۰/۸	۴۵/۵	-/۸	۳۱/۶	۴/۴	۳/۴	۰	۳/۵
EM	ممکن	۱۰۱۲/۶	۱۱/۹	۶۳/۸	۶/۸	۱۳/۸	۱/۵	۰/۴	۰	۱/۸
	احتمالی	۱۷۳/۴	۱۲/۱	۵۳/۱	۵/۶	۲۰/۴	۴/۱	۱/۷	۰	۳
DBSCAN	ممکن	۱۲۱۰/۴	۱۲/۰	۵۹/۸	۶/۹	۱۴/۲	۲/۷	۰/۴	۰	۴/۰
	احتمالی	۵۸/۸	۱۲/۳	۳۴/۷	۶/۹	۳۵/۸	۴/۷	۰/۶	۰	۵/۰

به‌منظور بررسی صحت آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب به-دست آمده از روش‌های خوشه‌بندی (شکل ۴) می‌توان از روش‌های مختلف آمار چند متغیره استفاده کرد، که در این مقاله از روش آنالیز فاکتوری در ادامه استفاده شده است. در جدول ۵ مقادیر ویژه، درصد پوشش تغییرپذیری داده‌ها توسط هر فاکتور و بارهای فاکتوری ۱۰ فاکتور اول آورده شده است. برای انجام آنالیز فاکتوری روش مؤلفه‌های اصلی ماتریس همبستگی و چرخش Varimax استفاده شده است. برای انتخاب تعداد فاکتورها نیز به دو نکته داشتن مقادیر ویژه بزرگ‌تر از نیم واحد و پوشش تمامی متغیرها توسط فاکتورها توجه شده است.

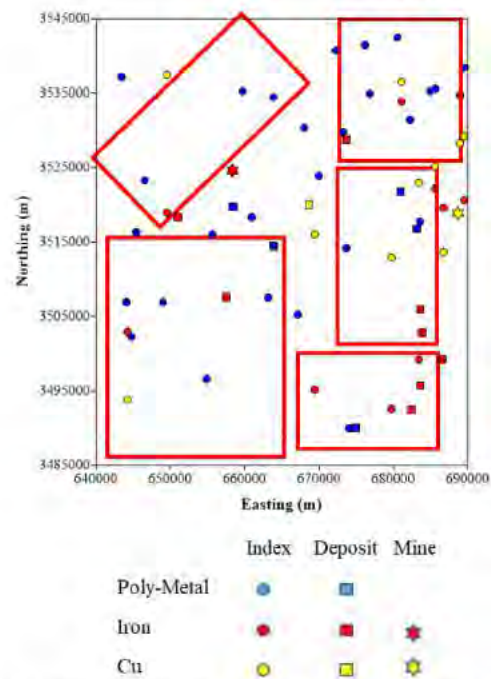
داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهد که ۱۰ فاکتور اول حدود ۹۲ درصد از تغییرپذیری متغیرها را توجیه می‌کند. همچنین عناصر طلا، نقره، سرب و مس در فاکتور اول، عناصر کبالت، آهن، منگنز، روی و کرم در فاکتور دوم، عناصر آنتیموان، بیسموت، مولیبدن و کادمیوم در فاکتور سوم و بقیه عناصر هر کدام در یک فاکتور از فاکتور چهارم تا دهم خود را نشان می-دهند.

در شکل ۶ نقشه کنتوری امتیاز فاکتور اول نمونه‌ها نشان داده شده است. مطابق شکل منطقه کوچکی در بخش شرقی ورقه دارای آنومالی است. این منطقه منطبق بر محدوده اطراف معدن قلعه‌زری می‌باشد (شکل ۱) که دارای کانی‌زایی اقتصادی مس-طلا و نقره است. در اطراف محدوده معدنی کانی‌زایی‌هایی از سرب به‌صورت گالن نیز مشاهده می‌شود. بنابراین شواهد زمین‌شناسی با عناصر فاکتور اول (جدول ۵) به‌طور کامل مطابقت دارد. از نکات قابل توجه عدم تشکیل آنومالی برای عناصر فاکتور اول در ۵ منطقه پیشنهادی است. این مطلب نشان می‌دهد که در تشکیل آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست آمده از روش‌های خوشه‌بندی عناصر فاکتور اول نقش کمی را دارند.



شکل ۶- نقشه کنتوری امتیاز فاکتور اول نمونه‌های ژئوشیمیایی

در محدوده ورقه کردگان ۵۳ محدوده اکتشافی به ثبت رسیده است، که ۱۰ محدوده دارای کانی‌زایی مس-طلا، ۱۵ محدوده برای آهن و ۲۸ محدوده برای کانی‌زایی چند-فلزی در حال اکتشاف است. در این ورقه علاوه بر دو معدن مس قلعه‌زری و آهن بصیر به ترتیب ۴، ۸ و ۳ کانسار چند-فلزی، آهن و مس نیز وجود دارد. موقعیت و پراکندگی این محدوده‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. به‌جز چند محدوده، سایر اندیس‌ها در ۵ منطقه پیشنهادی قرار دارند. مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نیز نشان می‌دهد که اکثر اندیس‌ها اکتشافی و کانسارها در داخل آنومالی‌های ژئوشیمیایی افتاده‌اند. در جدول ۴ درصد همپوشانی آنومالی‌های به‌دست آمده با این محدوده‌ها آورده شده است. روش EM با همپوشانی بیش از ۶۵ درصد بهترین عملکرد و روش SHC با ۵۰ درصد همپوشانی پایین‌ترین عملکرد را دارند. این نکته نشان‌دهنده دقت بالا و قابل قبول روش‌های خوشه‌بندی در شناسایی و تعیین موقعیت آنومالی‌های ژئوشیمیایی است.



شکل ۵: موقعیت و پراکندگی محدوده‌های اکتشافی، کانسارها و معادن ثبت شده در ورقه کردگان

جدول ۴: درصد همپوشانی آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست آمده از روش‌های خوشه‌بندی با محدوده‌های معدنی در ورقه کردگان

DBSCAN	EM	SHC	FCM	محیط ژئوشیمیایی
۴۴/۳	۳۴/۳	۵۰	۴۸/۵	زمینه
۴۸/۶	۵۴/۲	۴۵/۷	۴۰	آنومالی ممکن
۷/۱	۱۱/۵	۴/۳	۱۱/۵	آنومالی احتمالی
۵۵/۷	۶۵/۷	۵۰	۵۵/۵	جمع آنومالی‌ها

جدول ۵: بارهای فاکتوری و مقادیر ویژه آنالیز فاکتوری با روش مؤلفه‌های اصلی ماتریس همبستگی و چرخش Varimax

متغیر	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳	فاکتور ۴	فاکتور ۵	فاکتور ۶	فاکتور ۷	فاکتور ۸	فاکتور ۹	فاکتور ۱۰
Au	۰/۹۴۷	۰/۰۲۹	۰/۱۳۲	۰/۰۰۱	۰/۰۴۸	-۰/۰۴۲	۰/۰۵۳	۰/۰۴۴	۰/۰۵۹	۰/۱۶۴
Hg	۰/۱۰۶	۰/۰۴۶	۰/۱۸۰	۰/۰۰۲	۰/۰۲۱	۰/۰۱۵	۰/۹۷۳	۰/۰۶۴	۰/۰۲۲	۰/۰۲۷
As	-۰/۰۷۸	۰/۰۰۷	-۰/۱۴۹	۰/۰۱۷	-۰/۹۷۶	-۰/۰۰۱	-۰/۰۲۱	-۰/۰۲۲	-۰/۰۶۳	-۰/۰۲۸
Sb	۰/۰۹۸	-۰/۰۴۷	۰/۹۲۵	۰/۰۳۰	۰/۱۱۲	۰/۰۸۰	۰/۱۳۴	۰/۱۴۷	۰/۱۲۱	۰/۰۶۵
Bi	۰/۴۷۵	-۰/۰۷۸	۰/۸۰۴	۰/۰۱۵	۰/۱۱۰	۰/۰۹۲	۰/۰۷۶	۰/۰۶۸	۰/۱۱۰	۰/۰۶۶
Mo	۰/۳۳۲	۰/۰۸۲	۰/۸۳۱	-۰/۰۵۱	-۰/۰۴۶	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۸۳	۰/۱۱۳	۰/۰۲۹
W	۰/۴۰۸	۰/۰۱۲	۰/۱۶۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳۷	۰/۰۴۷	۰/۰۳۴	۰/۰۲۴	۰/۰۱۲	۰/۸۸۲
Ag	۰/۹۲۳	۰/۰۳۷	۰/۲۰۲	-۰/۰۱۱	۰/۰۳۷	-۰/۰۳۹	۰/۰۳۷	۰/۰۴۲	۰/۰۶۰	۰/۱۲۷
Co	-۰/۰۶۵	۰/۸۵۰	-۰/۰۵۷	۰/۰۳۹	۰/۰۸۸	۰/۱۶۴	-۰/۰۰۱	۰/۱۳۳	-۰/۱۷۴	۰/۱۷۹
Pb	۰/۷۴۱	-۰/۱۱۷	۰/۴۲۸	۰/۰۲۲	-۰/۰۱۳	۰/۰۵۱	۰/۰۴۶	۰/۰۶۵	-۰/۰۹۲	-۰/۰۰۶
Ni	-۰/۰۹۴	۰/۲۴۹	-۰/۲۷۴	۰/۰۵۱	-۰/۰۷۴	۰/۰۱۸	-۰/۰۳۳	۰/۰۰۴	-۰/۸۹۷	-۰/۰۰۵
Cd	۰/۱۹۹	۰/۲۷۷	۰/۷۴۷	۰/۰۳۹	۰/۱۷۶	-۰/۰۲۹	۰/۱۲۰	۰/۱۸۷	۰/۰۷۱	۰/۱۵۴
Sn	۰/۱۱۱	۰/۱۱۲	۰/۲۴۵	۰/۰۴۱	۰/۰۲۳	۰/۰۵۲	۰/۰۶۹	۰/۹۴۸	-۰/۰۰۲	۰/۰۲۰
Cu	۰/۹۵۰	۰/۰۷۹	۰/۱۷۱	۰/۰۰۶	۰/۰۴۴	-۰/۰۲۳	۰/۰۵۶	۰/۰۵۲	۰/۰۵۳	۰/۱۳۰
Fe	-۰/۰۰۷	۰/۹۶۸	-۰/۰۱۹	۰/۰۲۹	-۰/۰۰۵	۰/۰۴۲	۰/۰۲۱	۰/۰۳۵	۰/۰۵۷	-۰/۰۲۹
Mn	۰/۰۰۳	۰/۹۱۳	۰/۰۰۴	۰/۰۳۳	-۰/۰۲۳	۰/۱۷۲	-۰/۰۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۲۵	-۰/۰۲۱
Zn	۰/۵۱۸	۰/۷۸۱	۰/۱۶۴	۰/۰۲۳	۰/۰۵۲	۰/۰۴۴	۰/۰۴۵	۰/۰۵۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶
Ba	-۰/۰۵۰	۰/۱۸۲	۰/۱۱۲	۰/۰۶۱	۰/۰۰۱	۰/۹۶۳	۰/۰۱۶	۰/۰۴۹	-۰/۰۰۷	۰/۰۳۶
Cr	-۰/۰۵۳	۰/۷۹۶	۰/۰۹۰	۰/۰۰۳	-۰/۱۲۰	۰/۱۲۳	۰/۰۵۶	۰/۰۲۴	-۰/۳۹۷	-۰/۰۹۳
S	-۰/۰۰۶	-۰/۰۶۱	-۰/۰۱۴	-۰/۹۹۴	۰/۰۱۶	-۰/۰۵۶	-۰/۰۰۲	-۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	-۰/۰۰۱
مقدار ویژه	۶/۳۱۶	۴/۱۳۱	۱/۹۹۳	۱/۰۸۷	۱/۰۱۳	۰/۹۰۲	۰/۸۴۶	۰/۷۸۷	۰/۷۰۲	۰/۶۳۸
درصد تجمعی واریانس	۳۱/۵۷	۵۲/۲۳	۶۲/۱۹	۶۷/۶۳	۷۲/۷۰	۷۷/۲۱	۸۱/۴۴	۸۵/۳۷	۸۸/۸۹	۹۲/۰۸

دارند. بنابراین می‌توان گفت که آنومالی‌های ژئوشیمیایی به- دست آمده در شکل ۴ بیشتر متأثر از دو عنصر Fe و Mn است. البته وجود کانی‌زایی‌های احتمالی عناصر Cr, Zn و Pb را نیز بایستی در نظر داشت. نقشه کنتوری امتیاز فاکتور سوم نمونه‌ها نیز در شکل ۸ آورده شده است. در یک نقشه محدوده‌ای به وسعت حدود ۶۰ کیلومتر مربع را مستعد کانی- زایی نشان می‌دهد. این محدوده در منطقه‌ی پیشنهادی C قرار دارد. با توجه به شواهد زمین‌شناسی و داده‌های جدول ۵ کانی‌زایی Sb و Mo در این محدوده محتمل به نظر می‌رسد.

در شکل ۷ نقشه امتیاز فاکتور دوم نمونه‌ها ارائه شده است. آنومالی‌های به‌دست آمده از امتیاز فاکتور دوم با آنومالی‌های ژئوشیمیایی نشان داده شده در شکل ۴ همخوانی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز تصویر نشان داده است که این آنومالی‌ها با نقشه ۴-FCM و پس از آن با نقشه ۴-EM بیشترین شباهت را دارد. شواهد زمین‌شناسی بیشتر نشان‌دهنده‌ی کانی‌زایی آهن به‌صورت کانی‌های مگنتیت و هماتیت و منگنز به‌صورت کانی‌های پسیلوملان و پیرولوزیت است. این دو عنصر بالاترین بار فاکتوری در فاکتور دوم را نیز

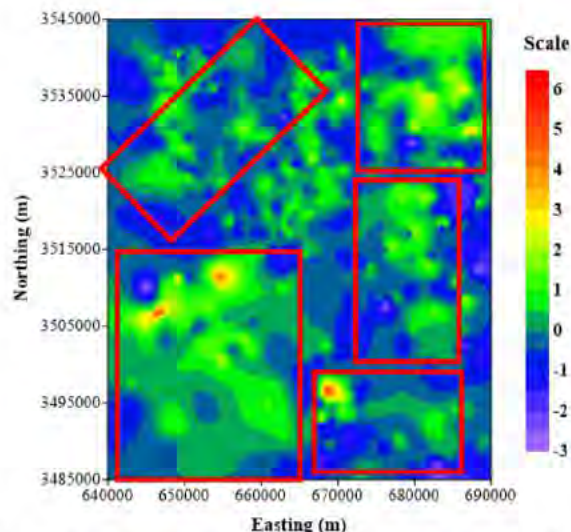
توسط رسوبات کواترنری با توجه و وسعت بالای این واحد لیتولوژی در منطقه و نوع نمونه‌ها که متعلق به رسوبات آبراهه‌ای هستند، بدیهی به نظر می‌رسد. اگر چه آنومالی‌های ژئوشیمیایی با محدوده‌های اکتشافی ثبت شده در این ورقه همپوشانی خوبی را در هر چهار روش نشان می‌دهد، ولی وسعت محدوده‌های آنومالی‌ها در روش FCM از همه بیشتر است. در حالی که این مساحت در روش‌های SHC و DBSCAN کمترین مقدار است. بنابراین محدوده‌های آنومالی به دست آمده با روش EM بعلاوه بالاترین درصد همپوشانی با محدوده‌های معدنی می‌تواند به عنوان انتخاب ممکن مد نظر قرار گیرد. نتایج آنالیز فاکتوری نیز نشان دهنده تایید آنومالی‌های ژئوشیمیایی به دست آمده با روش‌های خوشه‌بندی و همخوانی آن‌ها با آنومالی فاکتور دوم برای احتمال کانی‌زایی آهن و منگنز می‌باشد. همچنین احتمال کانی‌زایی‌های عناصر Cr, Pb, Zn, Mo و Sb را در اولویت بعدی برای محدوده مطالعاتی پیش‌بینی می‌شود. در این ورقه محدوده‌ای به وسعت تقریباً ۱۷۰ کیلومتر مربع به عنوان محدوده آنومالی احتمالی و محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۱۰۱۰ کیلومتر مربع به عنوان محدوده آنومالی ممکن معرفی شده است. این محدوده‌ها در ۵ منطقه و در دو اولویت مختلف برای اکتشافات بعدی پیشنهاد می‌شوند.

تشکر و قدردانی

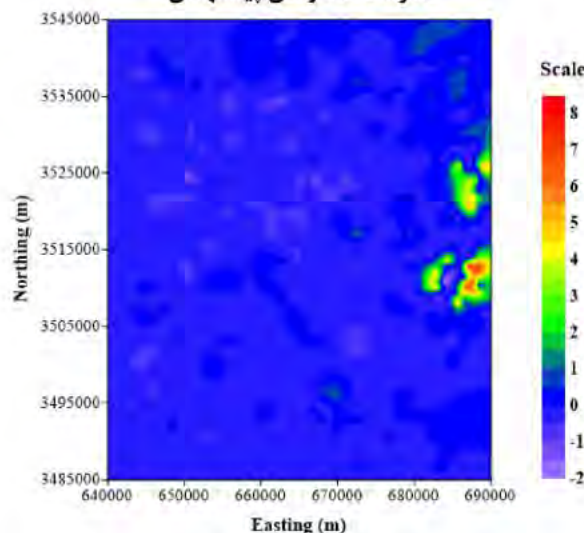
از سازمان زمین‌شناسی کشور به دلیل استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی ورقه کردگان در این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از سازمان صنعت، معدن و تجارت استان خراسان جنوبی به خاطر همکاری در ارائه اطلاعات محدوده‌های معدنی ثبت شده قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1]. Haldar, S.K., 2013, "Mineral Exploration: Principles and Applications". Elsevier, 372 p.
- [2]. Grunsky, E.C., Drew, L.J., Sutphin, D.M., 2009, "Process recognition in multi-element soil and stream-sediment geochemical data". Applied Geochemistry 24(8), 1602-1616.
- [3]. Qiuming Cheng, Q., 2007, "Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China". Ore Geology Reviews 32(1-2), 314-324.
- [4]. حسنی پاک، علی اصغر؛ شرف الدین، محمد؛ ۱۳۸۰؛ "تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران"، تهران، ۹۸۷ صفحه.
- [5]. Denis, D.J., 2016, "Applied Univariate, Bivariate, and Multivariate Statistics". Wiley & Sons, 760 p.



شکل ۷: نقشه کنتوری امتیاز فاکتور دوم نمونه‌های ژئوشیمیایی به همراه ۵ محدوده پیشنهادی



شکل ۸: نقشه کنتوری امتیاز فاکتور سوم نمونه‌های ژئوشیمیایی

۶- نتیجه‌گیری

حدود ۵۰ درصد از سطح ورقه کردگان را سنگ‌های آذرین پوشش داده‌اند. همراهی این سنگ‌ها با پدیده‌های تکتونیکی و آلتراسیون‌های هیدروترمالی باعث مستعد بودن احتمال کانی‌زایی‌های فلزی در این منطقه شده است. خوشه‌بندی داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای با چهار روش مختلف FCM, SHC, EM و DBSCAN وجود آنومالی‌های ممکن و احتمالی را در ۵ منطقه مجزا در محدوده ورقه کردگان نشان می‌دهد. نتایج همپوشانی آنومالی‌ها با نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد که به طور متوسط ۷۴٪ از سطح آنومالی ممکن را رسوبات پادگانه و رودخانه‌ای و ۲۴٪ را سنگ‌های آذرین می‌پوشانند. در حالی که ۶۱٪ از سطح آنومالی احتمالی را رسوبات پادگانه و رودخانه‌ای و ۳۵٪ را سنگ‌های آذرین پوشش داده‌اند. بالا بودن سطح پوشش

- [16]. Jiang, Y., Guo, H., Jia, Y., Cao, Y., Hu, C., 2015, "Principal component analysis and hierarchical cluster analyses of arsenic groundwater geochemistry in the Hetao basin, Inner Mongolia", *Chemie der Erde-Geochemistry* 75(2), 197-205.
- [17]. Bam, E.K.P., Akiti, T.T., Osa, S.D., Ganyaglo, S.Y., Gibrilla, A., 2011, "Multivariate cluster analysis of some major and trace elements distribution in an unsaturated zone profile, Densu river basin, Ghana". *African Journal of Environmental Science and Technology* 5(3), 155-167.
- [18]. Aggarwal, C.C., Reddy, C.K., 2013, "Data Clustering: Algorithms and Applications". CRC Press, 652 p.
- [19]. Han, J., Kamber, M., Pei, J., 2011, "Data mining: concepts and techniques, 3rd Edition". Morgan Kaufmann, 744 p.
- [20]. Kesemen, O., Tezel, O., Ozkul, E., 2016, "Fuzzy c-Means Clustering Algorithm for Directional Data". *Expert Systems with Applications* 58, 76-82.
- [21]. Ding, Y., Fu, X., 2016, "Kernel-based fuzzy c-means clustering algorithm based on genetic algorithm". *Neurocomputing* 88, 233-238.
- [22]. Zhao, Y., Karypis, G., Fayyad, U., 2005, "Hierarchical Clustering Algorithms for Document Datasets". *Data Mining and Knowledge Discovery* 10(2), 141-168.
- [23]. Zhang, T., Ramakrishnan, R., Livny, M., 1997, "BIRCH: A New Data Clustering Algorithm and Its Applications". *Data Mining and Knowledge Discovery* 1, 141-182.
- [24]. Quost, B., Dencœux, T., 2016, "Clustering and classification of fuzzy data using the fuzzy EM algorithm". *Fuzzy Sets and System* 286(1), 134-156.
- [25]. González, M., Minuesa, C., Puerto, I., 2016, "Maximum likelihood estimation and expectation-maximization algorithm for controlled branching processes". *Computational Statistics & Data Analysis* 93, 209-227.
- [26]. Tran, T.N., Drab, K., Daszykowski, M., 2013, "Revised DBSCAN algorithm to cluster data with dense adjacent clusters". *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 120, 92-96.
- [27]. Kumar, K.M., Reddy, A.R.M., 2016, "A fast DBSCAN clustering algorithm by accelerating neighbor searching using Groups method". *Pattern Recognition* 58, 39-48.
- [28]. خراشادی زاده، محمد؛ ۱۳۹۲؛ "تحلیل داده‌های ژئوشیمی اکتشافی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کردگان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۹۵ صفحه.
- [29]. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۰؛ "گزارش اکتشافی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کردگان"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- [30]. Pirajno, F., 2009, "Hydrothermal Processes and Mineral Systems", Springer Publication, Australia, 1273 p.
- [31]. Georgieva, S., Hikov, A., Stefanova, E., 2012, "Mobility of major and trace elements during hydrothermal alteration of volcanic rocks from the [6]. محمدزاده، محمد جعفر؛ شهین‌فر، حمید؛ ناصری، آینور، ۱۳۹۰، "توصیف الگوهای ژئوشیمیایی با استفاده از روش‌های تحلیل مولفه‌های اصلی و کلاستر فازی میان مرکز برای ثبت بی‌هنجاری‌های ضعیف (منطقه قولان - آذربایجان شرقی)". فصلنامه علوم زمین، سال بیست و یکم، شماره ۸۱، صفحه ۱۴۲-۱۵۰.
- [7]. عباس‌زاده، سمیه؛ رحیمی‌پور، غلامرضا؛ نجم‌الدین، مجید؛ ۱۳۹۲؛ "شناسایی مناطق کانی‌زایی مس پورفیری با استفاده از روش‌های تک متغیره و چند متغیره بر روی داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های در منطقه قلعه عسکر، استان کرمان"، نشریه علمی- پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۶، صفحه ۶۹-۸۲.
- [8]. رودپیما، ترانه؛ هزارخانی، اردشیر؛ قنادپور، سعید؛ گل‌محمدی، عباس؛ ۱۳۹۴؛ "ترکیب روش‌های رگرسیون خطی و کلاسه بندی K-Means به منظور شناسایی رفتار ژئوشیمیایی عناصر؛ مطالعه موردی: آنومالی A، معدن سنگان"، دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، تهران.
- [9]. محمدزاده، محمد جعفر؛ ناصری، آینور؛ محمودیان، امید؛ ۱۳۸۸؛ "مقایسه روش‌های جداسازی جوامع سنگی و خوشه-بندی فازی میان مرکز برای حذف مولفه سنژتیک در اکتشافات ناحیه‌ای رسوبات آبراه‌های قره چمن- آذربایجان شرقی"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره چهارم، شماره هشتم، صفحه ۵۱ تا ۵۸.
- [10]. معینی، حمید؛ محمد تراب، فرهاد؛ کیخانی حسین‌پور، مجید؛ ۱۳۹۴؛ "بررسی کاربرد نگاشت‌های خودسازمانده در خوشه-بندی داده‌های آبراه‌های و مقایسه آن با دندوگرام اکتشافی داده‌های ترکیبی"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره دهم، شماره ۲۷، صفحه ۹۵ تا ۱۰۷.
- [11]. Shiva, M., Aryafar, A., Zaremotlagh, S., 2011, "Fuzzy c-means cluster analysis, a robust multivariate technique in stream sediment geochemical exploration, a case study in Eastern part of Iran, Birjand". *Journal of Geology and Mining Research* 3(1), 1-6.
- [12]. Kramar, U., 1995, "Application of limited fuzzy clusters to anomaly complex geological environments". *Journal of Geochemical Exploration* 55, 81-92.
- [13]. Ellefsen, K.J., Smith, D.B., Horton, J.D., 2014, "A modified procedure for mixture-model clustering of regional geochemical data". *Applied Geochemistry* 51, 315-326.
- [14]. Ellefsen, K.J., Smith, D.B., 2016, "Manual hierarchical clustering of regional geochemical data using a Bayesian finite mixture model". *Applied Geochemistry*, In Press.
- [15]. Morrison, J.M., Goldhaber, M.B., Ellefsen, K.J., Mills, C.T., 2011, "Cluster analysis of a regional-scale soil geochemical dataset in northern California". *Applied Geochemistry* 26, S105-S107.

Chelopech high-sulphidation epithermal Cu-Au deposit, Central Srednogie, Bulgaria". Bulgarian Geological Society, National Conference with international participation "GEOSCIENCES 2012", 47-48.

[32]. Salminen, R., 2005, "Geochemical Atlas of Europe (part 1): Background information, methodology and maps", Geological Survey of Finland, 526 p.

[33]. Ma, J.L., Wei, G.J., Xu, Y.G., Long, W.G., Sun, W.D., 2007, "Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China". *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 3223–3237.

[34]. Middelburg, J.J., Van Der Weijden, C.H., Woittiez, J.R.W., 1988, "Chemical processes affecting the mobility of major and trace elements during weathering of granitic rocks". *Chemical Geology* 68, 253-273.

پی‌نوشت

-
- 1- Fuzzy C-Means Method
 - 2- Staged Hierarchical Clustering Method
 - 3- Sparse
 - 4- Expectation-Maximization Clustering Method
 - 5- Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise