

خنثی سازی اثر سنژنتیک داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های در منطقه شمال تکاب با استفاده از خوشه بندی فازی

سعید سلطانی محمدیⁱ، دکتر فیروز علی نیاⁱⁱ، دانیال کاویانیⁱⁱⁱ

چکیده

در اکتشافات ژئوشیمیایی به روش رسوبات آبراه‌های، روش‌های متعددی برای خنثی سازی اثر لیتولوژی ارائه شده است که عبارتند از: روش جداسازی جوامع سنگی، تحلیل مولفه‌های اصلی و خوشه بندی فازی. در این مقاله اثر مؤلفه سنژنتیک در داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل نمونه‌های رسوبات آبراه‌های منطقه شمال تکاب با استفاده از روش خوشه بندی فازی خنثی و نتایج حاصل با نتایج حاصل از روش جداسازی جوامع سنگی مقایسه شده است. نتایج مؤید این مطلب است که در نتایج حاصل از خوشه بندی فازی، آنومالی‌های جدیدی نشان داده شده است که در روش جداسازی سنگ بالادست نشان داده نشده است و از طرف دیگر، یک سری از آنومالی‌های دروغین؛ که از روش جداسازی سنگ بالادست حاصل شده بودند، محو شدند. به منظور تسهیل استفاده از این روش، اقدام به طراحی نهایتاً اعتبارسنجی یک مجموعه نرم افزاری گردید که کلیه مراحل مربوط به پردازش داده‌ها را به صورت مرحله ای انجام دهد.

کلمات کلیدی

خنثی سازی اثر سنگ بالادست، خوشه بندی فازی، اکتشافات ژئوشیمیایی، روش رسوبات آبراه‌ای

Removing The Effect Of The Syngenetic Component From Geochemical Stream Sediment Data Using Fuzzy C-Means Clustering Method: A Case Study From North Of Takab

Saeid Soltani Mohammadi, Firouz Alinia, Danial Kaviani

ABSTRACT

Geochemical exploration, using the stream sediment method, involves two components which control the concentration of elements in the samples: syngenetic and epigenetic. The epigenetic component is the useful component for exploration. However, usually as the syngenetic component is stronger, it dwarfs the effect of epigenetic component. There are several methods that are used to eliminate the effect of syngenetic component on geochemical data; for example, separation of upstream rock groups, principal component analysis (PCA) and fuzzy c-means clustering method (FCM). The effect of the syngenetic component, from stream sediment samples obtained from North of Takab, was removed, using the fuzzy clustering method. Then results from this method were compared to results obtained from the separation of upstream rock groups method. Based on this comparison, FCM distinguished new anomalies and removed weak and virtual anomalies in some place. Furthermore, the software that was created for this purpose was explained.

i دانشجوی دکترای مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

ii استادیار دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

iii دانشجوی دکتری مهندسی نفت، دانشگاه Texas-A&M

جدول (۱): مشخصات آماری داده‌های خام

ELEMENT	Cu	Pb	Zn	Ag	Fe	As	Sb	An*
number	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲
average	۲/۲۱۸۷۵	۸/۲۱۴۲۹	۱۱۰/۰۲۲۳	۰/۲۷۸۱۹۶	۲/۵۷۹۹۱۱	۲۲۰/۷۱۸۸	۴۴/۹۲۷۲۳	۱۶/۸۹۵۵۴
median	۱۹	۲۵	۶۷	-/۲	۲/۴۵۵	۱۱۷	۷/۳	۳/۷۵
var	۱۰۸/۳۰۵۳	۸۰۴۱۵/۴	۱۶۶۳۱/۵۷	-/۰۳۳۱۳۴	۲/۵۸۱/۹۹۹	۵۴۴۱۹۰/۲	۱۷۶۴۵/۳۹	۲۱۶۱/۴۰۵
min	۳	۵	۹	-/۱۲۳	-/۶۸	۶	-/۳۷۵	-/۳
max	۶۸	۲۸۹۲	۸۶۸	۱/۱	۱۷/۱۸	۵۱۳۴	۸۹۱	۳۶۳/۴
skew	۱/۴۸۰۲۲۳	۸/۹۹۵۴۵۶	۳/۶۴۰۶۳۶	۱/۶۲۱۷۹۲	۶/۸۵۸۷۸۸	۴/۳۶۳۰۷۱	۴/۷۹۵۱۷۵	۵/۲۸۶۴۵۸
kurt	۳/۷۵۵۱۷۳	۸۸/۳۵۷۰۸	۱۶/۰۳۴۷۷	۴/۰۹۶۱۸۷	۶۱/۹۴۲۶	۲۱/۱۸۸۱۹	۲۴/۱۹۰۵۸	۳۲/۸۹۱۷۴

جدول (۲): مشخصات آماری داده‌های نرمال شده

ELEMENT	Cu	Pb	Zn	Ag	Fe	As	Sb	An*
number	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲
average	۴/۷۲	۲/۰۴۷۴	۳/۱۵۸	-۲/۸	-/۸	۳/۵۶۲۱	۱/۷۲۲	۱/۱۹۸
median	۴/۶۵	۲/۰۰۹۴	۳/۱۱۸۵	-۲/۹	-/۹	۳/۱۲۷۵	۱/۶۸۷	۱/۱۵۴
var	۱/۳۴	-/۱۱۱۶	-/۱۷۵۸	۲/۴۹	-/۱	-/۵۰۸۴	۱/۰۵۶	-/۹
min	۱/۲۹	۱/۲۵۷۸	۱/۸۷۱۸	-۴/۵	۰	۱/۱۱۲۲	-۱/۰۷	-۱/۳۷
max	۸/۲۷	۲/۸۸۱۱	۴/۲۵۰۵	۰/۰۹	۰/۴	۰/۳۴۴۹	۰/۰۲۹	۰/۳۸۱
skew	۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۴	۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۲۱	۰/۰۱۳
kurt	۱/۰۸	-۰/۲۲۴	-/۵۱۲۷	-۱/۷	۲/۸	۰/۳۶۴۷	-۰/۱۴	-۰/۱۵

کاکس و باکس داده‌ها نرمال شدند. برای این منظور، ماکرو ویزوال بیسکی در نرم افزار اکسل نوشته شد که با استفاده از این نرم‌افزار ضریب بهینه اهمیت چولگی نسبت به کشیدگی ۲/۲ محاسبه شد. جداول شماره (۱) و (۲) خصوصیات آماری داده‌های اولیه و داده‌های نرمال شده نشان داده شده است.

ع- معرفی روش خوشه بندی فازی C-means (FCMC)

روش خوشه‌بندی C-means بی‌انعطاف مبتنی بر فرآیند تکرار است و هدف آن به حداقل رساندن بزرگ‌ترین فاصله یک نمونه (متغیر) تا مرکز خوشه است. در این روش در نهایت هر نمونه یا متغیر به یک خوشه تعلق می‌گیرد [۴]. فرض کنید n نمونه داشته باشیم که برای هر یک m متغیر اندازه‌گیری شده باشد. می‌خواهیم این نمونه‌ها را به C کلاستر با مرکز معلوم تخصیص دهیم. برای این کار از الگوریتم تحلیل خوشه‌بندی فازی C-means به صورت زیر استفاده می‌شود:

- تعیین درجه عضویت هر نمونه به هر خوشه به طور تصادفی.
- محاسبه مختصات جدید مرکز خوشه‌ها با استفاده از درجه عضویت و مختصات مراکز خوشه‌ها و با استفاده از رابطه زیر:

در راستای گسل بزرگ قینرجه، نهشته‌های گسترده‌ای از تراورتن دیده می‌شود که حاصل فعالیت چشمه‌های آهک ساز در زمان کواترنری هستند.

منطقه مورد بررسی از نظر ساختمانی در زون خوی- مهاباد قرار گرفته و جای‌گیری سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین در زیر رسوبات و سنگ‌های آتشفشانی الیگومیوسن نشان از وجود یک برجستگی کهن از زمان پرکامبرین تا الیگوسن و نبود رسوبگذاری یا فرسایش شدید در فاصله زمانی یاد شده در منطقه است [۴]، [۵].

۳- پردازش اولیه داده‌های منطقه شمال تکاب

منطقه مورد مطالعه با وسعتی در حدود ۴۰۰ کیلومتر مربع در ۱۸ کیلومتری شمال شهرستان تکاب واقع شده است و از نظر زمین شناسی، بخش شرقی منطقه بخشی از برگه ۱:۱۰۰،۰۰۰ تخت سلیمان و قسمت غربی منطقه بخشی از چهارگوش ۱:۱۰۰،۰۰۰ شاهین‌دژ است. ۱۱۲ نمونه رسوبات آبراهه‌ای در عملیات صحرایی برداشت و پس از طی مراحل آماده سازی در آزمایشگاه ACME کشور کانادا برای ۳۱ عنصر به روش ICP آنالیز شدند [۳]. به منظور استفاده از داده‌های خام (داده‌های حاصل از آنالیز نمونه‌های منطقه) در اولین گام با استفاده از روش بیشترین درست‌نمایی کوهن داده‌های سنسورد جایگزین شد؛ سپس با استفاده از روش

$$F = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n \frac{\mu_{ik}^2}{n} \quad (1)$$

از این دو پارامتر در تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها استفاده می‌شود به این گونه که تعداد خوشه بهینه را حالتی در نظر می‌گیریم که F نزدیک به یک و H به صفر نزدیک باشد [۱]، [۲]، [۸].

۵- تهیه نرم افزار خوشه بندی فازی و اعتبار سنجی نرم افزار

با استفاده از قابلیت تهیه ماکرو در نرم افزار اکسل، نرم افزاری به زبان ویژوال بیسیک در فرم ماکرو اکسل نوشته شد که قادر به خوشه‌بندی فازی داده‌ها بر اساس الگوریتم فوق بود (نمودار ۱). به منظور اعتبار سنجی نرم افزار از مثال ارائه شده در کتب مرجع استفاده شد و نتایج به دست آمده از نرم افزار با نتایج ارائه شده در منبع مذکور مقایسه گردید. که نتایج اعتبار نرم افزار تهیه شده را به اثبات رساند (جدول ۳) [۹].

۶- خوشه بندی داده های منطقه شمال تکاب با استفاده روش خوشه‌فازی C-means

با استفاده از برنامه تهیه شده، آنتروپی افزاز (H) و ضریب جداسازی (F) برای تعداد خوشه‌های مختلف (۱۲ تا ۱) با ضریب فازی‌شدگی ۲ تعداد خوشه بهینه محاسبه شد که نتیجه آن در نمودار (۱) و همچنین جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار (۱) مشاهده می‌شود حداکثر مطلق ضریب افزاز و حداقل مطلق آنتروپی افزاز در $n=2$ حاصل شده است؛ اما حداکثر نسبی ضریب افزاز و حداقل نسبی آنتروپی در $n=5$ حاصل شده است و از آنجا که تعداد خوشه ۵ با طبیعت سنگ شناسی منطقه تطابق بیشتری دارد، بنابراین تعداد خوشه‌ها را برابر ۵ در نظر می‌گیریم.

در مرحله بعد، نوبت به تعیین درجه فازی‌شدگی یا شولایی مناسب می‌رسد که برای این منظور، پراش تخصیص برای درجات فازی‌شدگی مختلف بین ۱/۱ تا ۳ برای تعداد خوشه‌های مختلف محاسبه شد که کوچک‌ترین مقدار پراش تخصیص برای ضریب فازی‌شدگی ۱/۳ به دست آمد.

مسئله‌ای که اینجا پیش می‌آید این است که تعداد بهینه خوشه‌ها با ضریب فازی‌شدگی ۲ محاسبه شده است، حال آنکه ضریب بهینه ۱/۳ است. در پاسخ به این ابهام بار دیگر تعداد بهینه خوشه‌ها با ضریب فازی‌شدگی ۱/۳ محاسبه شد که هیچگونه تغییری در تعداد بهینه خوشه‌ها مشاهده نشد.

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ki})^q X_{ki}}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ki})^q} \quad (1)$$

در این رابطه C_{ij} مقدار متغیر زام از مرکز خوشه i ام، μ_{ki} درجه عضویت نمونه k ام به خوشه i ام و X_{kj} مقدار متغیر زام در نمونه k ام است. q معرف شدت شولایی یا فازی شدن متغیر زام در نمونه k ام است. اگر این مقدار برابر واحد باشد فازی‌شدگی در حداقل مقدار ممکن خود است (حالت غیر فازی) و اگر مقدار q به سمت بی نهایت میل کند همه مراکز خوشه‌ها به مرکز کل داده‌ها همگرا می‌شود و درجه عضویت همه نمونه‌ها به مراکز خوشه‌ها برابر $\frac{1}{C}$ شود.

(۳) پس از محاسبه مراکز جدید خوشه‌ها لازم است درجه عضویت هر نمونه به همه مراکز خوشه جدید بر مبنای فاصله اقلیدسی از رابطه (۲) محاسبه شود:

$$\mu_{ik} = \frac{(d_{ik}^2)^{\frac{-1}{q-1}}}{\sum_{k=1}^c (d_{ik}^2)^{\frac{-1}{q-1}}} \quad (2)$$

که در این رابطه μ_{ik} درجه عضویت نمونه k ام به خوشه i ام و d_{ik} فاصله نمونه k ام تا مرکز خوشه i ام است که به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$(d_{ik})^2 = \sum_{j=1}^m \left[\frac{(X_{kj} - C_{ij})}{S_j} \right]^2 \quad (3)$$

در این رابطه X_{kj} مقدار متغیر زام در نمونه k ام و C_{ij} مقدار متغیر زام از خوشه i ام و S_j انحراف معیار متغیر زام است.

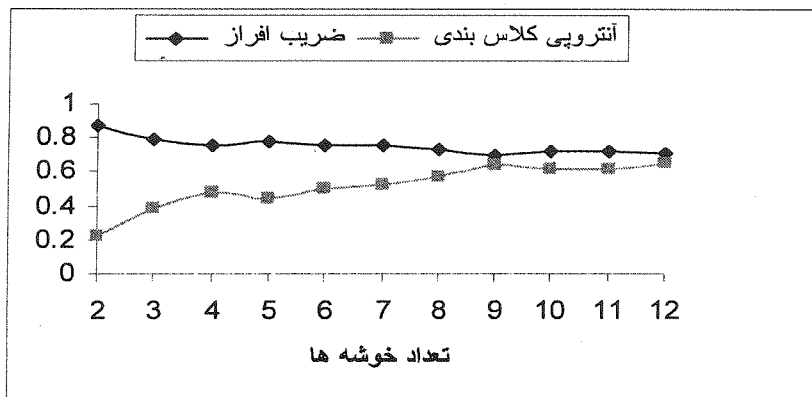
(۴) محاسبه تابع هدف: تابع هدف متغیر زام در محیطی که به درجه q فازی‌شدگی دارد به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$J_q = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^q (d_{ik}^2)^q \quad (4)$$

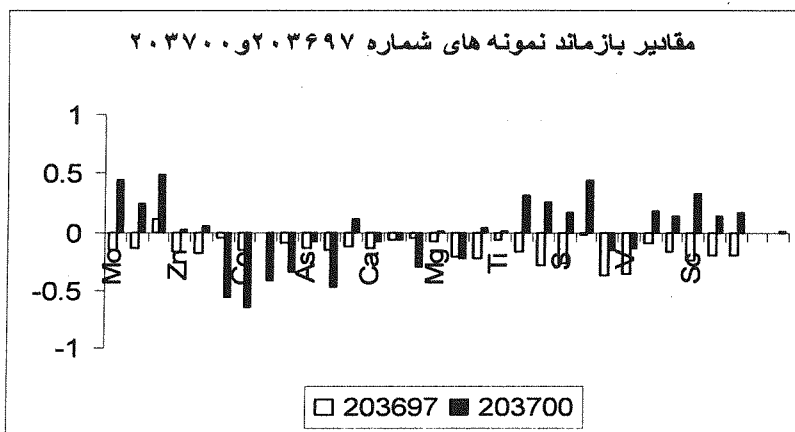
در این رابطه مقادیر μ_{ik} و d_{ik}^2 از روابط قبلی محاسبه می‌شود.

(۵) تکرار محاسبات از مرحله دوم تا چهارم تا جایی که اختلاف بین دو مرحله متوالی محاسبه J_q کمتر از دقت مورد نظر شود. تعداد بهینه خوشه‌ها با محاسبه پارامترهای آنتروپی کلاس‌بندی (H) و ضریب جداسازی (F) به صورت زیر تعیین می‌شوند.

$$H = - \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n \frac{\mu_{ik} \log(\mu_{ik})}{n} \quad (5)$$



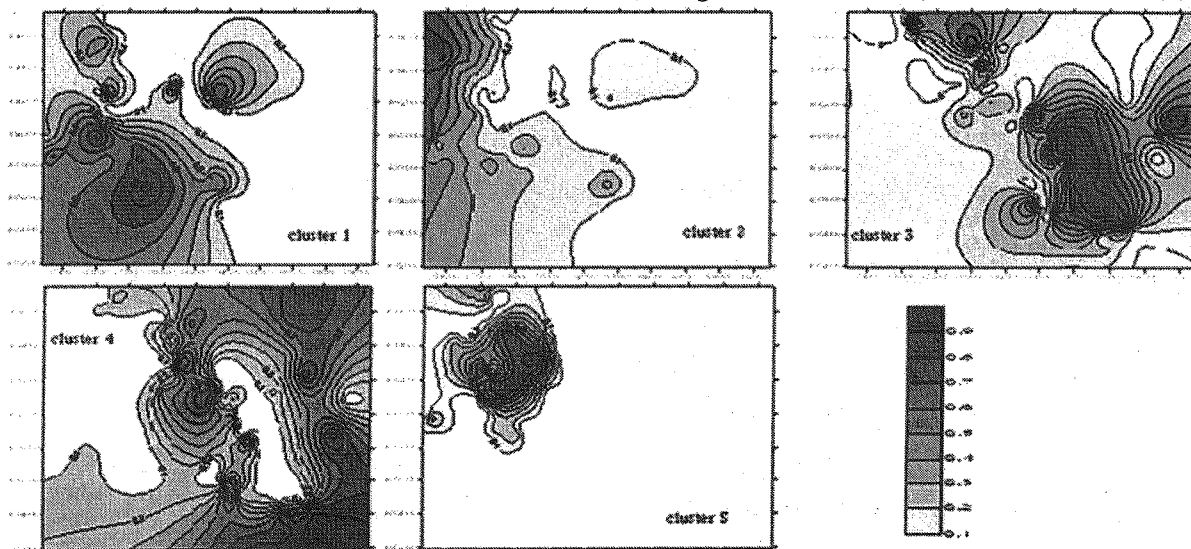
نمودار (۱): نمودار ضریب افراز و آنتروپی در برابر تعداد خوشه ها



نمودار (۲): توزیع مقادیر بازماند دو نمونه انتخابی از سری داده های منطقه تکاب

شده باشد (۳) مولفه اپی ژنتیک تغییر پذیری مرتبط با کانی سازی احتمالی نیز؛ که در جستجوی آن هستیم، وجود نداشته باشد (۴) انتخاب تعداد خوشه ها و سایر پارامترهای تحلیل فازی درست صورت گرفته باشد، در این صورت باید میانگین مقادیر بازماند نزدیک به صفر باشد [۸]، [۱۰].

در جدول (۴) ترکیب شیمیایی مرکز خوشه ها؛ که به روش تحلیل خوشه فازی محاسبه شده است، نشان داده شده است. اگر همه عملیات اکتشافی و محاسباتی درست انجام شده باشد به طوری که (۱) عوامل آلودگی یا خطای آنالیز وجود نداشته باشد (۲) مولفه سنژنتیک تغییرپذیری به طور صحیح خنثی



شکل (۳) نقشه های کنٹوری درجه عضویت نمونه ها در هر خوشه

جدول (۴) ترکیب شیمیایی مرکز خوشه‌ها محاسبه شده به روش تحلیل خوشه فازی

ELEMENT	Cu(ppm)	Pb(ppm)	Zn(ppm)	Ag(ppm)	Fe(%)	As(ppm)	Sb(ppm)	Au*(ppb)
خوشه ۱	۲۳/۱۳۰۳۸	۲۱/۹۹۸۸	۷۴/۵۱۷۸۱	۰/۱۴۲۹۱۵	۲/۳۸۵۳۳۳	۱۳۹/۸۲۷۱	۵/۶۳۱۳۸	۲/۹۹۸۲۷۳
خوشه ۲	۲۶/۹۱۷۳۳	۱۱۳/۹۳۲۷	۱۸۴/۷۲۱۴	۰/۳۸۸۲۵۹	۳/۱۷۵۸۹۵	۲۷۸/۹۹۸۸	۴۶/۴۷۰۶۸	۱۳/۶۹۵۶۵
خوشه ۳	۱۳/۵۶۶۵۵	۱۱/۳۲۹۷۴	۲۸/۵۴۹۳۳	۰/۱۲۸۸۳۳	۱/۱۷۹۳۷۹	۸۵/۸۰۳۳۳	۴/۳۰۸۲۳۷	۲/۶۴۶۲۷۷
خوشه ۴	۱۷/۹۵۵۹۴	۲۳/۳۹۸۲۲	۵۷/۶۵۸	۰/۳۴۵۵۴۱	۲/۴۴۷۴۶۴	۳۳/۵۸۲۳۸	۲/۳۸۹۵۶۵	۱/۷۶۴۸۰۶
خوشه ۵	۷/۷۷۶۷۰۴	۳۰/۶۸۴۶۳	۵۲/۷۶۰۳۳	۰/۱۶۰۴۸	۲/۱۴۳۲۸۲	۱۲۹/۷۲۰۳	۲/۵۲۱۴۸	۱۴/۹۱۰۷۱

۷- مقایسه نتایج آمار کلاسیک با خوشه‌بندی فازی C-means

به منظور مقایسه نتایج حاصل از دو روش آنومالی‌های حاصل با هم مقایسه شد (جدول (۳) و (۴)):

۱) آنومالی طلا: در نتایج حاصل از خوشه بندی فازی تنها در سه نمونه آنومالی احتمالی تشخیص داده شده است حال آنکه این نمونه‌ها در نتایج حاصل از روش جداسازی جوامع سنگی آنومالی ممکن تشخیص داده شده اند. نکته دیگر اینکه سایر آنومالی‌های حاصل از روش جداسازی جوامع سنگی در نتایج حاصل از روش خوشه بندی فازی آنومالی تشخیص داده نشدند که این می‌تواند ناشی از اثرات ناحیه ای (به غیر از لیتولوژی) باشد.

۲) آنومالی آرسنیک: آرسنیک یکی از عناصری است که از نظر خصوصیات ژئوشیمیایی توانایی ردیابی طلا در رسوبات آبراه‌های را دارد و یکی از عناصری است که در اکتشافات طلا توجه خاصی به آن می‌شود؛ به همین دلیل در این مقایسه، به این عناصر توجه خاصی شد و مشاهده گردید که روش خوشه بندی فازی آنومالی جدیدی تشخیص نداده است و تنها آنومالی‌های حاصل از روش جداسازی جوامع سنگی را تشدید کرده است.

۳) آنومالی آنتیموان: یکی از خاصیت‌های ژئوشیمیایی طلا و آنتیموان این است که این دو عنصر با یکدیگر سازگار بوده و آنومالی‌های طلا و آنتیموان علی‌الخصوص در ذخائر اپی‌ترمال همپوشانی دارند. در نتایج حاصل از روش خوشه بندی فازی تنها در سه نمونه آنومالی طلا، آنومالی آنتیموان نیز تشخیص داده شده است و سایر آنومالی‌های آنتیموان تشخیص داده شده در نتایج روش جوامع سنگی محو شده‌اند.

۴) آنومالی سرب و روی: در نتایج حاصل از روش خوشه بندی فازی علاوه بر اینکه تمامی آنومالی‌های روش جداسازی جوامع سنگی تشدید شده‌اند، یکسری آنومالی جدید نیز تشخیص داده شده‌اند که می‌تواند برای کاوش بیشتر منطقه

در نمودار (۲) توزیع مقادیر بازماند برای دو نمونه انتخاب شده از مجموعه نمونه‌های منطقه آقدره تکاب نشان داده شده است.

البته ذکر این نکته لازم است که نزدیکی میانگین مقادیر بازماند به صفر برای تمام نمونه‌ها به این وضوح نبود که می‌توان آن‌را نتیجه یکی از چهار دلیل شرح داده شده دانست؛ ولی تقریباً میانگین مقادیر اکثر آنها بین یک و منفی یک قرار دارد که می‌تواند نتیجه مطلوبی تلقی شود.

پس از محاسبه مقادیر بازماند و مقادیر درجه عضویت می‌توان دو نوع نقشه رسم کرد:

۱- نقشه تغییرات درجه عضویت: در این نقشه، درجه عضویت نمونه‌های مختلف به یک خوشه در یک نقشه؛ که معمولاً از نوع کنتوری است رسم می‌شود. در این نقشه‌ها می‌توان محدوده‌هایی را که بیشتر متأثر از یک خوشه است را مشاهده کرد. اگر این خوشه‌ها در اثر نا همگنی محیط نمونه‌برداری؛ که خود ناشی از اثر لیتولوژی و خنثی شدن مؤلفه سنژنتیک است، از یکدیگر جدا شده باشند می‌توانند مرز محیط‌های مختلف از نظر ژئوشیمیایی را نشان دهند. که این نقشه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. ذکر این نکته لازم است که به جای نقشه کنتوری، می‌توان نقشه‌هایی با سایر روشها همچون تخمین شبکه‌ای تهیه نمود.

۲- نقشه مقادیر بازماند: با توجه به اینکه در این نقشه‌ها اثر مؤلفه سنژنتیک خنثی شده است می‌توانند شفاف‌تر موقعیت مؤلفه‌های اپی‌ژنتیک کانی‌سازی را که همان موقعیت آنومالی واقعی در منطقه است را به نمایش بگذارند.

به منظور تعیین آنومالی‌های موجود در منطقه بر اساس مقادیر بازماند عناصر از روش $\bar{x} + 2s$ استفاده شده است [۱۱]، [۱۲]. برای این منظور نیز برنامه‌ای نوشته شد تا مقادیر بازماند عناصر مختلف را نرمال و سپس انواع آنومالی‌ها را برای عناصر مختلف در تمامی نمونه‌ها مشخص کند [۹].

استفاده شود.

۵) آنومالی آهن: در نتایج حاصل از روش خوشه بندی فازی علاوه بر تشدید تک آنومالی تشخیص داده شده در روش جداسازی جوامع سنگی، سه آنومالی جدید مرتبط با هم در بخش شمالی منطقه تشخیص داده شده است که برای ادامه مطالعات و بررسی بیشتر پیشنهاد شده است.

۸- نتیجه گیری و پیشنهاد

روش خوشه بندی فازی کمتر تحت تأثیر استنباطهای شخصی بوده و بسیار سریعتر از روش جدایش سنگ بالادست صورت می‌گیرد و در ضمن آنومالی‌های جدیدی را نشان می‌دهد که در روش جداسازی سنگ بالادست نشان داده نشده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود تا در پروژه‌های ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای؛ به مانند این پروژه، علاوه بر استفاده از روش جدایش سنگ بالادست از روش خوشه بندی فازی نیز استفاده شود و در مرحله چک کردن آنومالی‌ها هر دو دسته آنومالی‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. این امر موجب استفاده بیشتر و بهتر از داده‌های ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای می‌گردد.

۹- منابع:

- [۱] حسنی‌پاک، علی‌اصغر- شرف‌الدین، محمد؛ تحلیل داده‌های اکتشافی، / موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، (۱۳۸۰)
- [۲] کاویانی، دانیال؛ اکتشافات ژئوشیمیایی در محدوده ۱:۵۰۰۰۰ چاه گل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۷۹)

- [۳] میرمرتضوی، امیراحسان؛ "اکتشافات نیمه تفصیلی ژئوشیمیایی در منطقه شمال تکاب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- [۴] سازمان زمین شناسی کشور، "نقشه زمین شناسی تخت سلیمان"، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، (۱۳۷۴)
- [۵] سازمان زمین شناسی کشور، "نقشه زمین شناسی شاهین دژ، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰"، (۱۳۷۲)
- [۶] وانگ، لی؛ "سیتمهای فازی و کنترل فازی"، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، (۱۳۷۸)

- [۷] Bouchang Y., Xiang X., "Fuzzy cluster Analysis in geochemical exploration", Journal of Geochemical exploration, vol.23.p.p. 28-29 1985
- [۸] Rantitsch. G., "Application of fuzzy clusters to quantify lithological background concentrations in stream-sediment geochemistry", Applied Geochemistry, vol. 7, p.p. 73-82, 2000
- [۹] سلطانی محمدی، سعید؛ "مقایسه نتایج حاصل از روش حذف اثر سنگ بالا دست با منطق فازی در مورد داده‌های اکتشافی منطقه شمال تکاب"، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۲)
- [۱۰] Singh, M., Ansari, A., Muller, G. Singh, I.B., "Heavy metals in freshly deposited sediments of the Gomati River" Environmental Geology, 1997
- [۱۱] Selinus, O.S., Esbensen, K., "Separating anthropogenic from natural anomalies in environmental geochemistry", Journal of Geochemical Exploration, Vol. 55, p.p. 5566 1995
- [۱۲] Karner, U., "Application of limited fuzzy cluster to anomaly reorganization in complex geological environments", Geochemical Exploration, Vol. 55, p.p. 8-92 1995

جدول ۳- نمونه های آنومالی به دست آمده و نوع آنومالی آنها از روش خوشه بندی فازی

ELEMENT	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Mn	Fe	As	Cd	Sb	Ba	Th	Au*
203551			P.R.A	P.R.A									
203552	C.A		C.A	C.A									
203553		C.A					P.R.A						
203554							C.A						
203555			P.R.A				C.A						
203556	P.R.A											P.R.A	
203557												P.R.A	
203558	P.R.A											P.R.A	
203559	C.A											P.R.A	
203573		P.R.A											
203587		P.R.A											
203590								R.R.A					
203593								P.R.A		P.R.A			P.R.A
203594													
203596								P.R.A		P.R.A	P.R.A		P.R.A
203609				P.R.A			C.A						
203610				P.R.A									
203506	P.R.A												
203697		P.R.A	P.R.A	P.R.A	P.R.A	C.A		P.R.A		P.R.A	P.R.A		P.R.A
203698											C.A		
203700	P.R.A												
203617	P.R.A												
203633								P.R.A	P.R.A				
203640						C.A		P.R.A			P.R.A		
AD42					P.R.A								

جدول ۴- نمونه های آنومالی به دست آمده و نوع آنومالی آنها از روش جداسازی جوامع سنگی

ELEMENT	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Mn	Fe	As	Cd	Sb	Ba	Th	Au*
203506	P.A												
203552			P.A	P.A									
203553		P.A											
203556												P.A	
203557												P.A	
203558												P.A	
203559												P.A	
203561												P.A	
203565													P.R.A
203573		P.A			P.A								
203587		P.A				P.A							
203590								P.A		P.A	P.A		
203592										P.A			P.A
203593			P.A					P.A		P.A	P.A		P.A
203596			P.A					P.A	P.A	P.A	P.R.A		P.A
203609				P.R.A			P.R.A	P.A		P.A			
203610				P.A					P.A				P.A
203611					P.A								
203617	P.A												
203628										P.A			P.A
203630										P.A			P.A
203633								P.A	P.A				
203640						C.A		P.A	P.A		P.A		
203697	P.A	P.A	C.A	P.R.A	P.A	C.A		P.R.A	P.A	P.R.A	P.R.A		P.A
203698		P.A									C.A		
2036700	P.A												

P.A: Possible Anomaly
 P.R.A: Probable Anomaly
 C.A: Confirmed Anomaly