

کاربرد روش های آماری چند متغیره در شناسایی مناطق امید بخش معدنی مطالعه موردی در ناحیه سرکه‌نو

بابک رجبی نسب^۱، محمد صیدی جوقان^۲، مجید غیاثی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف معدن، شرکت مهندسی مشاور کاوشگران; brajabin@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی، شرکت مهندسی مشاور کاوشگران

۳- کارشناس مهندسی اکتشاف معدن، شرکت مهندسی مشاور کاوشگران

چکیده

روش های آماری چند متغیره امکان آنالیز همزمان چندین متغیر را فراهم نموده و در نتیجه ریسک وابسته به تصمیم گیری از نتایج حاصل از این روش ها به مقدار زیادی کاهش می یابد. ناحیه اکتشافی مورد مطالعه در ۱۲۰ کیلومتری شهر زاهدان قرار دارد. نفوذ تو ده های نیمه عمیق مونزودیوریتی و دایک های دیوریتی در سکانس رسوبی این منطقه، سبب گسلش و دگرسانی گرمایی گسترده ای شده است. تعداد ۶۶۹ نمونه در یک شبکه منظم از رخنمون های این محدوده برداشت گردید. نمونه ها به روش ICP-MS و برای عناصر Zn, Ag, As, Be, Bi, Cd, Cu, Fe, Mo, Pb, S, Sb, Sn, Te, W, و آنالیز و غلظت عنصر Au، با استفاده از روش شعله سنجی (FA) مشخص شد. پردازش اولیه داده ها نشان دهنده غنی شدگی رخنمون های سنگی این محدوده نسبت به برخی از عناصر می باشد. به کمک آنالیز خوشه ای (HC) مهمترین همبدهای عنصری مشخص گردید. با استفاده از آنالیز مولفه های اصلی (PCA) مهمترین ناهنجاری ها (PC1) شنا سایی و با رسم نقشه این متغیر، موقعیت مناطق امید بخش مشخص شد. با مقایسه سطح فرسایش کنونی نسبت به سطح کانی سازی احتمالی، اهمیت این ناهنجاری ها بررسی و مستعد ترین مناطق جهت ادامه عملیات اکتشافی معرفی شد.

کلمات کلیدی: اکتشافات ژئوشیمیایی، ناهنجاری، آنالیز مولفه های اصلی، آنالیز خوشه ای، سرکه‌نو

Using Multivariate Statistical Methods for Determination of Promising Area, A Case Study in Sarkahno Area

B. Rajabinasab, M. Seyedy, M. Ghiasi

Abstract

Multivariate statistical methods would be able to analyze a large number of variables simultaneously so that the risk of decision making will be reduced. The exploration area is located in 120 km southeastern of Zahedan city. The intrusion of subvolcanic monzodiorite bodies and diorite dikes in sedimentary sequence caused faulting and wide hydrothermal alteration. In a regular grid, 669 samples from the outcrops were collected. The samples were analyzed by ICP-MS for elements including Fe, Cu, Cd, Bi, Be, As, Ag, Zn, W, Te, Sn, Sb, S, Pb and Mo. Gold was determined by Fire Assay. Preliminary data processing revealed enrichment in some rock outcrops. The most important paragenesis was determined by using Hierarchical Clustering analysis. Then Principle component analysis (PCA) was used for revealing anomalies. The result showed pc1 as the most important component for mineralization in the study area. The location of anomalous areas was determined by pc1 mapping. The importance of anomalies was investigated with the comparison of erosion surface and probable mineralization surface. Finally the most important promising areas introduced for the further exploration.

Keywords: Exploration geochemistry, Anomaly, Principle Component Analysis, Hierarchical Clustering Analysis, Sarkahno

۱- مقدمه

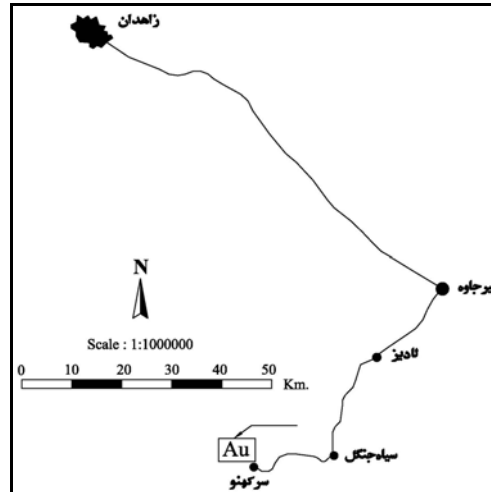
ذخایر معدنی هر کشور تأثیر بسزایی در استقلال صنعتی و توسعه پایدار آن دارد. نیاز بخش صنعت به مواد معدنی خام سبب توسعه روش های مختلف اکتشاف، استخراج و فرآوری مواد معدنی گردیده که در این میان اکتشاف مواد معدنی به عنوان نخستین گام در چرخه تولید اهمیت روز افزون یافته است. از جمله مواد معدنی با ارزش فلز طلا است که به دلیل نبود مدل های ریاضی لازم جهت توصیف نوع منبع، چگونگی تفریق، مهاجرت، ته نشست و تمرکز این عنصر در سنگ ها و همچنین شناسایی نا هنجاریهای مرتبط با کانی سازی از انواع بی اهمیت آن بر روی داده های زمین شیمیایی این عنصر تحلیل آماری صورت می گیرد. در روش های آماری تک متغیره رفتار هر متغیر به طور مجزا و بدون ارتباط با متغیر های دیگر مورد بررسی قرار می گیرد. در مقابل روش های آماری چند متغیره امکان آنالیز همزمان چندین متغیر را فراهم آورده و رفتار عناصر در ارتباط با یکدیگر بررسی می شود [۱]، [۶]. امروزه استفاده از روش های آماری چند متغیره به عنوان ابزاری قدرتمند در پردازش داده های مرتبط با علوم زمین به صورت گسترده ای رو به افزایش است. در مطالعات ژئوشیمیایی اکتشافی با توجه به اندازه گیری مقدار عیار عناصر مختلف، نیاز به پردازش داده ها در یک فضای چند بعدی و در نتیجه استفاده از روش های آماری چند متغیره است [۷]. در مطالعه حاضر داده های ژئوشیمیایی محدوده اکتشافی سرکهنو مورد پردازش آماری چند متغیره قرار گرفت. در ابتدا همبستگی های دو متغیره عناصر محاسبه گردید، سپس با استفاده از تحلیل خوشه ای سلسه مراتبی، مهمترین پاراژنهای کانی سازی شناسایی و در نهایت به کمک تحلیل مولفه های اصلی اساسی ترین فاکتورهای کنترل کننده تغییر پذیری و بی هنجاریهای موجود در منطقه مشخص گردید.

۲- زمین شناسی

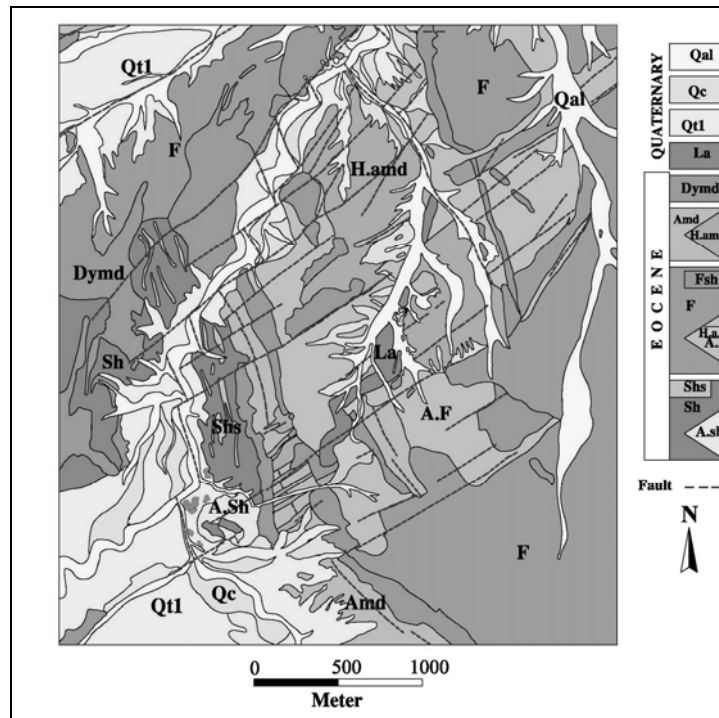
ناحیه مورد نظر در ۱۲۰ کیلومتری شهر زاهدان و در طول جغرافیایی $28^{\circ} 45'$ تا $28^{\circ} 47'$ و عرض جغرافیایی $61^{\circ} 6'$ تا $61^{\circ} 8'$ شمالی قرار دارد. دسترسی به محدوده سرکهنو از جاده اصلی زاهدان به میرجاوه میسر است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه از نقطه نظر تقسیمات زونهای ساختاری ایران در زون فلیش شرق قرار دارد که در بین بلوک لوت و افغان واقع شده است. فعالیت ماگمایی سبب تغییرات شدیدی در این مجموعه و در مواردی تمرکز ذخایر معدنی شده است. جایگیری توده های نفوذی اسید تا متوسط با سن الیگوسن (فاز کوهزایی آلپ میانی) در نقاط مختلف این زون از جمله محدوده مورد بررسی مهم ترین وقایع ماگمایی می باشد که زون فلیش شرق را تحت تأثیر قرار داده است. قدیمی ترین واحد سنگی منطقه مجموعه رسوبی مشتمل بر ماسه سنگ، شیل، سیلتستون، مادستون و مارن است (شکل ۲). ماگماتیسم منطقه که عمدتاً به صورت فازهای نیمه عمیق مونوزدیوریتی و دایک های دیوریتی است در سکانس های رسوبی نفوذ کرده و سبب دگرسانی گرمایی گسترده همراه با گسلش و کانی سازی شده است. دگرسانی گرمایی هم در توده نفوذی و هم در واحدهای رسوبی دیده می شود. معمولی ترین کانی های دگرسانی شامل سریسیت، کائولینیت، مونتوریلونیت، پیریت، ژپس و ژاروسیت است. واحد های سنگی موجود تحت تأثیر سیستم های گسله حاکم بر منطقه به شدت خرد شده و تغییرات و جابجایی در برخی از گسل ها رخ داده است. به طور کلی دو سیستم گسله یکی باروند شمالغرب - جنوبشرقی و دیگری تقریباً عمود بر این روند دیده می شود [۵].

۳- بررسی های ژئوشیمیایی

عملیات اکتشافی در محدوده ای به مساحت $1/4$ کیلومتر مربع انجام گردید. به منظور بررسی پتانسیل معدنی محدوده اکتشافی تعداد ۶۶۹ نمونه در یک شبکه منظم به ابعاد 50×50 متر و در مناطق شدیداً آلتزه به ابعاد 20×20 متر، از رخنمون های سنگی برداشت شد.



شکل ۱- کروکی راههای ارتباطی به محدوده مورد مطالعه



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [۵]

Qal: آبرفت های رودخانه ای؛ Qc: واریزه؛ Qt1: پادگانه ها و مخروط افکنه های قدیمی؛ La: لاتیت آندزیت؛ Dymd: دایک منزودیوریت-دیوریت؛ Amd: منزودیوریت آلتره؛ H.amd: منتودیوریت شدیداً آلتره؛ Fsh: شیل قرمز؛ F: شیل، شیست، ماسه سنگ؛ A.F: فلیش آلتره؛ H.a.F: فلیش شدیداً آلتره؛ Shs: سیلتستون، ماسه سنگ؛ Sh: سیلتستون شیل، مادستون، مارل؛ A.sh: شیل آلتره

نمونه برداری به روش ردیفی - تصادفی (Random Stratified) و به صورت قطعه ای (Chip Sampling) از سطح هر سلول شبکه برداشت گردید، بطوریکه هر نمونه شامل ۳۵-۴۰ قطعه ۱۵۰-۲۰۰ گرمی است [۳]. آنالیز نمونه ها در آزمایشگاه امدل (Amdel) در کشور استرالیا و به روش ICP- MS، برای عناصر Fe, Cu, Cd, Bi, Be, As, Ag, Zn, W, Te, Sn Sb, S, Pb, Mo و غلظت عنصر Au، با استفاده از روش شعله سنجی (FA) تعیین شد. در نتایج حاصل از آنالیز نمونه ها غلظت برخی از عناصر به صورت سنسورد گزارش شد. با توجه به اینکه اغلب تحلیل های آماری نیازمند یک مجموعه کامل از داده های غیر سنسورد است، بنابراین در ابتدا بر اساس روش درستمایی کوهن [۱]، مقدار مناسبی برای آنها جایگزین و فایل داده ها برای پردازش در نرم افزار SPSS آماده گردید.

۴- بررسی های آماری تک متغیره

به منظور درک چگونگی تغییرپذیری عناصر در محدوده اکتشافی، پارامترهای آماری شامل بیشترین و کمترین مقدار، میانگین، میانه، مد، انحراف معیار، واریانس، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی محاسبه و هیستوگرام فراوانی، نمودارهای P-P، Q-Q و جعبه ای ترسیم گردید. تحلیل های آماری حاکی از آن است که مقادیر میانگین عناصر Ag, Au, S, As, Bi, Te و Pb به ترتیب ۵۰۰، ۳۲۹، ۲۸۹، ۶۵، ۶۱، ۳۱ و ۲۳ برابر مقدار زمینه جهانی، غنی شدگی نشان می دهند. عناصر Cu و W, Zn, Mo به ترتیب ۴/۵، ۳/۵، ۲/۳ و ۱/۵ برابر غنی شدگی دارند. در مقابل عناصر Fe و Sb, Cd, Be در قیاس با مقدار زمینه جهانی تهیه شدگی نشان می دهند. حضور بی هنجاری هایی از عناصر W, Sn, Bi, Mo Sb, Ag, As, Au, Pb و Cd، در محدوده اکتشافی، بر اساس روش های $\bar{x} + ns$ و $P.N$ تأیید شد. این بی هنجاری ها، انطباق کاملی با زون های دگرسانی آرژیلیتی توده های نفوذی دیوریتی - مونوزودیوریتی، مناطق بشدت دگرسان یافته واقع در امتداد گسل های با روند شمال خاور - جنوب باختری، رگه و رگچه های سیلیسی، اکسیدهای آهن و منگنز نشان می دهند.

اگرچه عناصر زیادی رفتار ژئوشیمیایی بی هنجار از خود نشان می دهند، اما تنها عنصر Au در پاره ای از نمونه های لیتوژئوشیمیایی محدوده سرکهنو از عبارات قابل توجه و اقتصادی برخوردار می باشد. تحلیل های آماری بر روی ردیاب های ذخایر طلای ایپی ترمال و مزوترمال، ثابت نموده است که ۷ عنصر به ترتیب ضریب غنی شدگی عبارتند از: طلا، گوگرد، آرسنیک، تلور، سلنیوم، بیسموت و نقره در مقایسه با مقادیر زمینه ضریب غنی شدگی های معمولی آنها بین ۱۰ تا ۱۰۰ است. علاوه بر عناصر فوق، ده عنصر دیگر از ضریب غنی شدگی بیشتر به کمتر شامل، Cd, Sn, Mo, Cl, Ti, Cu, B, W, Hg, Sb در کانسارهای طلا غنی شدگی انتخابی دارند. محدوده تغییرات ضریب غنی شدگی این عناصر بین ۱ تا ۱۴ است [۲]. از اینرو، با احتمال زیاد می توان گفت که رفتار ژئوشیمیایی عناصر در محدوده اکتشافی سرکهنو همانند کانسارهای طلا باشد.

۵- بررسی همبستگی عناصر

تحلیل های آماری دو متغیره با محاسبه ضرایب همبستگی عناصر به روش اسپیرمن انجام شده است. نتایج بدست آمده، همبستگی به نسبت قوی را میان عناصر Au با مجموعه عناصر Ag ($r = 0.67$)، As ($r = 0.17$)، Sb ($r = 0.58$)، S ($r = 0.66$)، W ($r = 0.6$)، Bi ($r = 0.6$)، Pb ($r = 0.59$)، Sn ($r = 0.69$) در سطح اعتماد ۹۹ درصد نشان می دهد، که در این میان بیشترین همبستگی با عنصر As است.

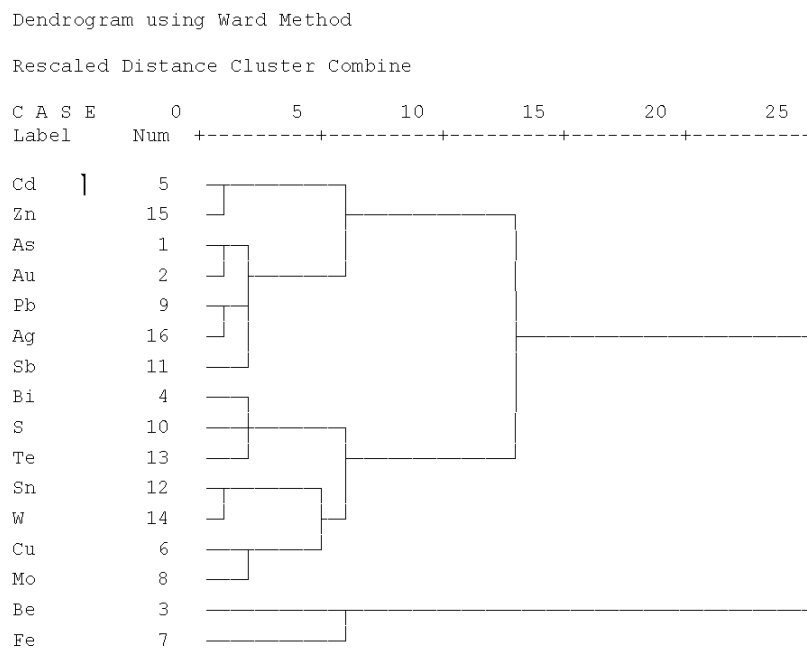
۶- آنالیز خوشه ای

جهت بررسی توأم همبستگی های موجود و درک ملموس تر روابط پارائزنی بین عناصر لازم است از روش هایی استفاده کرد که در آنها گروههای همگن و مشابه از یکدیگر متمایز شوند. آنالیزخوشه ای یک ابزار مناسب برای جداسازی متغیرهای مشابه است [۷]. در روش خوشه بندی سلسله مراتبی (Hierarchical Clustering) هر متغیر به صورت یک خوشه مجزا در نظر گرفته شده، سپس بر اساس شباهت بیشتر متغیرها، خوشه ها با هم ترکیب می گردد. روش های مختلفی برای اتصال خوشه ها ارائه شده که در بین آنها روش وارد (Ward)، اصولاً نتیجه خوب و ساختار خوشه ای مناسبی ارائه می کند [۴]. نمایش

گرافیکی این اتصالها به صورت یک نمودار به نام دندروگرام است. میزان شباهت توسط یک مقیاس خطی افقی که در بالای آن قرارداده شده مشخص می گردد. دندروگرام حاصل از داده ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد به غیر از عناصر Be و Fe که از بقیه جدا افتاده اند، بقیه عناصر دارای ارتباط پاراژنزی خوبی هستند. مهمترین این مجموعه ها عبارتند از :

- مجموعه Au, As, Ag, Sb, Pb
- مجموعه Bi, Te, S
- مجموعه Sn, W, Cu, Mo
- مجموعه Zn, Cd

بطور کلی تجزیه خوشه ای داده های لیتوژئوشیمیایی، مجموعه عناصر As, Ag, Sb و Pb را به عنوان مهمترین پاراژنزی کانی سازی طلا در منطقه معرفی می نماید، که با توجه به تمایل اپی ترمال این عناصر، نوع کانی سازی طلا و عناصر همراه، اپی ترمال فرض می شود.



شکل ۳- دندروگرام حاصل از آنالیز خوشه ای

۷- تحلیل مولفه های اصلی

در این روش با شناسایی امتدادهایی با حداکثر تغییر پذیری تعداد متغیرهای اولیه کاهش یافته و امکان بررسی و شناسایی ساختارهای موجود بین داده ها آسانتر می گردد [۶]، [۷]. بدین ترتیب می توان به متغیرهای تک عنصری و چند عنصری که پتانسیل کانی سازی را در یک منطقه معرفی می کنند دست یافت [۱]. تحلیل مولفه های اصلی داده های محدوده مورد مطالعه، نتایج مشابه ای نظیر آنالیز خوشه ای نشان می دهد. در جدول ۱ نتایج این روش در محدوده، نشان داده شده است. در این جدول مقادیر ویژه برای هر مولفه به همراه درصدی از تغییرپذیری که توسط آن مولفه توجیه گردیده آمده است. در مولفه اول، بیشترین درصد تغییرپذیری بین متغیرها توجیه گردیده و عناصر Au, As, Ag, Bi و Pb از اوزان بالایی برخوردار می باشند. با توجه به خصلت بیشتر اپی ترمال مجموعه عناصر فوق، فرض وجود یک نا هنجاری اپی ترمال، در محدوده اکتشافی تقویت می شود. در شکل ۳ نقشه توزیع این مولفه، به عنوان مهمترین راهنمای اکتشافی در محدوده مورد بررسی نشان داده

شده است. بر این اساس سه محدوده امید بخش جهت ادامه عملیات اکتشافی قابل شناسایی است. در مولفه های دوم تا پنجم به ترتیب مجموعه عناصر (F5: Cu, Mo, W) و (F4: Pb, Sn, Ag), (F3: Cd, Zn), (F2: W, S, Sn, Bi, Te) بر خوردار می باشند و هر مولفه بخشی از تغییر پذیری دادها را توجیه نموده و معرف حضور ناهنجاری است.

جدول ۲- نتایج حاصل از آنالیز مولفه های اصلی

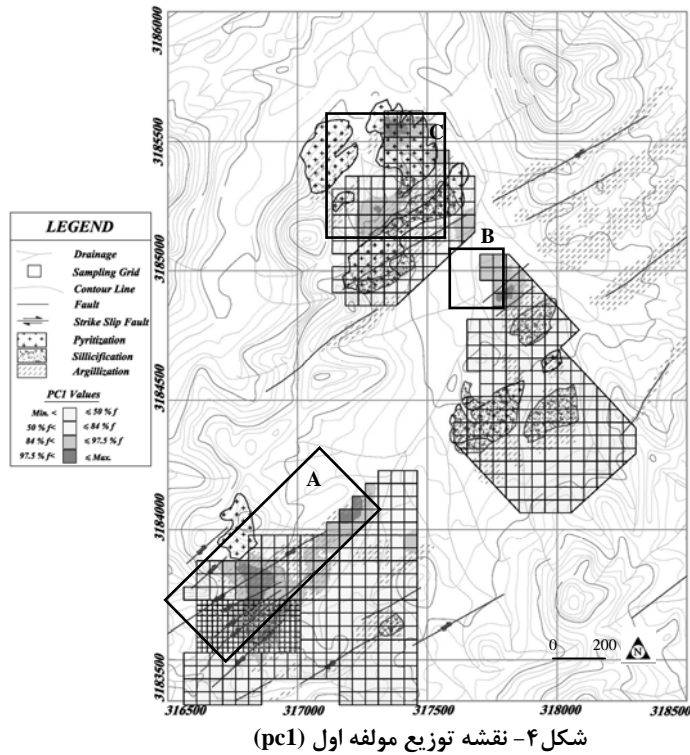
Variables	Principle Components					
	PC1	PC2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6
As	0.961	0.122	0.046	0.05	-0.004	-0.008
Au	0.946	0.247	0.032	0.057	0.018	-0.009
Ag	0.764	0.053	0.097	0.452	0.041	-0.01
Te	-0.027	0.797	0.022	0.007	-0.097	-0.208
Bi	0.574	0.686	-0.017	0.031	0.006	-0.095
Sn	0.228	0.685	-0.03	0.265	0.221	0.37
S	0.367	0.546	0.049	0.342	0.253	-0.007
W	0.125	0.501	-0.111	-0.087	0.489	0.436
Fe	0.36	0.493	0.169	0.447	0.078	0.021
Zn	0.06	0.005	0.952	0.02	-0.017	0.014
Cd	0.084	0.014	0.934	0.036	0.006	-0.031
Sb	0.091	0.116	-0.042	0.861	-0.019	-0.035
Pb	0.584	0.054	0.162	0.598	0.039	-0.023
Mo	-0.02	-0.108	-0.133	-0.034	0.873	-0.12
Cu	0.034	0.277	0.268	0.127	0.597	0.201
Be	-0.087	-0.113	0.007	-0.042	-0.009	0.91
Variance	21.46	16.03	12.20	10.78	9.31	7.91

۸- ارزیابی سطح فرسایش کنونی نسبت به سطح کانی سازی

تعیین سطح فرسایش کنونی نسبت به سطح کانی سازی در ارزیابی بی هنجاریهای واقعی از کاذب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. سطح کانی سازی را می توان یک سطح استاتیک فرض نمود ولی سطح فرسایش کنونی سطحی دینامیک است و با افزایش فرسایش، این سطح پایین رفته و وضعیت آن نسبت به سطح کانی سازی ممکن است بالاتر، هم سطح و یا در زیر آن قرار گیرد. حالت اول امید بخش، حالت دوم بهترین حالت و حالت سوم گمراه کننده است. در این مطالعه جهت تعیین موقعیت سطح فرسایش کنونی نسبت به سطح کانی سازی از نتایج آنالیز خوشه که در آن مجموعه های عنصری (Sb, As, Ag) و (Mo, W, Sn) که در دو خوشه مجزا قرار گرفته و به ترتیب تمایل فوق کانساری و تحت کانساری نشان می دهند، استفاده شد. با استفاده از مجموعه های عنصری فوق متغیر جدیدی که معرف سطح فرسایش کنونی نسبت به سطح کانی سازی است به صورت زیر تعریف گردید:

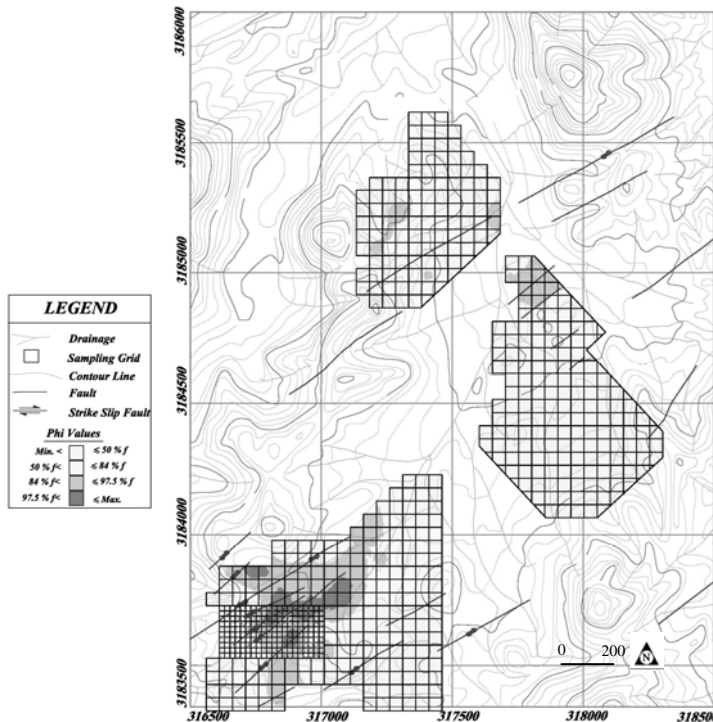
$$Phi = \frac{Ag + As + Sb}{Sn + W + Mo} \quad (1)$$

در شکل ۴ توزیع این متغیر در محدوده اکتشافی نشان داده شده است. در محدوده بی هنجاری A، سطح فرسایش از موقعیت مطلوبی برخوردار است و کانی سازی احتمالی در زیر سطح فرسایش کنونی قرار دارد و بنابراین امید بخش است. در این محدوده بخش مجاورگسل ها، دارای سطح فرسایش بالاتری است. در محدوده های بی هنجاری B و C، سطح فرسایش بالا است و بنابراین این محدوده ها نیز امید بخش می باشند. در نتیجه محدوده های بی هنجاری شناسایی شده در در محدوده مورد بررسی، از سطح فرسایش بالاتری نسبت به سطح کانی سازی برخوردار بوده و به احتمال زیاد در محدوده بی هنجاری A که مقدار بالایی از طلا شناسایی شده، زون کانی سازی رخنمون یافته است.



۹- نتیجه

مطالعات اکتشافی انجام شده در ناحیه سرکه‌نو حاکی از باروری برخی از توده‌های سنگی رخنمون یافته در این محدوده، خصوصاً کانی‌سازی طلا است. در این محدوده واحدهای رسوبی مشتمل بر شیل و ماسه سنگ توسط توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب منزودیوریت و دایک‌های دیوریتی قطع شده‌اند. این واحدهای سنگی تحت تأثیری سیستم‌های گسله بشدت خرد شده و آلتراسیون گسترده‌ای در آنها بوقوع پیوسته است. آلتراسیون غالب از نوع آرژیلیتی - فیلیک است که هم در توده نفوذی و هم در سکانس رسوبی دیده می‌شود. مطالعات آماری چند متغیره دلالت بر کانی‌سازی طلای اپی‌ترمال با مجموعه پاراژنز عناصر As، Ag، Sb، Bi و Pb دارد. همبستگی قویتر عنصر طلا با عنصر آرسنیک دلالت بر ردیاب بودن درجه اول این عنصر برای اکتشاف محدوده‌های طلا دارد منطقه است. با استفاده از نقشه مولفه اول در تحلیل مولفه‌های اصلی، سه محدوده مستعد کانی‌سازی طلا شناسایی گردید. ارزیابی سطح فرسایش کنونی نسبت به سطح کانی‌سازی احتمالی معرف بالا بودن سطح فرسایش کنونی و اهمیت بیشتر بی‌هنجاری‌های موجود است. با توجه به توزیع مقادیر عنصر طلا و مجموعه عناصر پاراژنز آن (مولفه اول)، به ترتیب محدوده‌های A، B و C جهت ادامه عملیات اکتشافی پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۵- نقشه سطح فرسایش کنونی نسبت به سطح کانی سازی (Phi)

۱۰- مراجع

- [۱] حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۸۰، تحلیل داده های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۲] حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۷۸، اکتشافات ذخایر طلا، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۳] حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۷۱، نمونه برداری معدنی، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۴] شایسته فر، محمد رضا؛ رسا، ایرج؛ ۱۳۸۴؛ "تحلیل داده های چند متغیره کانسار سرب و روی قنات مروان کرمان"، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سال پانزدهم، شماره ۵۷، ص ۱۳۴ تا ۱۴۵.
- [۵] شرکت تحقیقات و کاربرد مواد معدنی ایران؛ ۱۳۸۴، "گزارش نهایی اکتشاف مقدماتی طلا در منطقه سیاه جنگل"، مهندسین مشاور کاوشگران.
- [6] Kumru, M.N.; Bakac, M.; 2003; "R-mode factor analysis applied to the distribution of elements in soils from the Aydin basin, turkey", Journal of Geochemical Exploration, No.77, Elsevier, pp. 81-91.
- [7] Robert, R.G.; Grunsky, E.C.; 2001; "Weighted sums-Knowledge based empirical indices for use in exploration geochemistry", Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, Vol. 1, Geological Society, London, pp. 135-141.