



مطالعات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای جهت تعیین پتانسیل کانه‌زایی فلزات پایه مطالعه موردی، منطقه غرب فردوس اسفندقه - جنوب کرمان

مجتبی سلیمانی*^۱، محمد یزدی^۲، امین اله کامالی^۳

^۱ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین شناسی، تهران mojtaba.soleymani.d@gmail.com

^۲ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین شناسی، تهران m-yazdi@sbu.ac.ir

^۳ پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، گروه باستان سنجی و علوم طبیعی، تهران a.kamali@richt.ir

چکیده

منطقه مورد مطالعه در غرب فردوس اسفندقه - جنوب کرمان واقع شده است. منطقه اسفندقه قسمتی از زون زمین‌شناسی - ساختمانی سنندج - سیرجان است. بررسیهای ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای از جمله روشهای بسیار متداول و پرکاربرد در اکتشافات مواد معدنی و به ویژه فلزات پایه می باشد. تعداد ۲۴۰ نمونه ژئوشیمی و ۵۶ نمونه کانی‌سنگین بر اساس نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مطالعاتی، شبکه ای و پروفیلی طراحی و برداشت گردید. در این مطالعه ابتدا با بررسیهای آماری تک متغیره و به کمک روشهای آماری چند متغیره مانند آنالیز خوشه‌ای، مؤلفه‌های با اهمیت و همچنین عناصری که با هم ارتباط و همبستگی نزدیکی دارند، شناسایی گردید. این تحلیلها حاکی از با اهمیت بودن منابع معدنی شناسایی شده در این پهنه با توزیع مقادیر بالای عناصر Co, Cr, Ni, Fe در بخش جنوبی منطقه و پتانسیل کانی‌سازی عناصر Pb, Cu, Zn, Au, Mn, Au و تا حدودی Ag در بخش شمالی پهنه می‌باشد. بررسی‌های ژئوشیمیایی-کانی‌سنگین، زمین‌شناسی و کانی شناسی انجام گرفته منجر به معرفی ۱۴ ناحیه امیدبخش کانه‌زایی در پهنه اسفندقه گردید. با توجه به نتایج نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای ژئوشیمی و کانی‌سنگین، تنها موفق به شناسایی محدوده‌هایی از کرومیت شده است که در حال حاضر به عنوان معدن در حال استخراج هستند.

واژه‌های کلیدی: رسوبات آبراهه‌ای، کانی سنگین، کرومیت، اسفندقه



Geochemical studies of sediment data for determining the potential of base metal mineralization: A case study in the western region of Esfandagh - southern Kerman

Abstract

The studied area is located in the western part of Esfandagh in the south of Kerman. The Esfandagh region is a part of the Sanandaj-Sirjan tectonic-structural zone. Geochemical studies of sediment data are among the widely used methods in mineral exploration, especially for base metals. A total of 240 geochemical samples and 56 heavy mineral samples were collected and analyzed based on a 1:25,000 topographic map of the study area, using a grid and profile design. In this study, statistical analyses, including univariate statistical examinations and multivariate statistical methods such as cluster analysis, important components, and elements with close relationships and correlations, were used for initial identification. These analyses revealed the significance of identified mineral resources in this area with high distributions of Co, Cr, Ni, and Fe in the southern part, indicating mineralization potential for Cu, Pb, Zn, Au, Mn, and to some extent, Ag in the northern part of the region. Geochemical and heavy mineral investigations, along with geological and mineralogical studies, led to the recognition of 14 promising ore-bearing regions in the Esfandagh area. Based on the results of sedimentary geochemistry and heavy mineral samples, limited chromite deposits have been identified, currently being extracted as a mining resource.

Key word: sediment data, heavy mineral, chromite, Esfandagh



۱. مقدمه

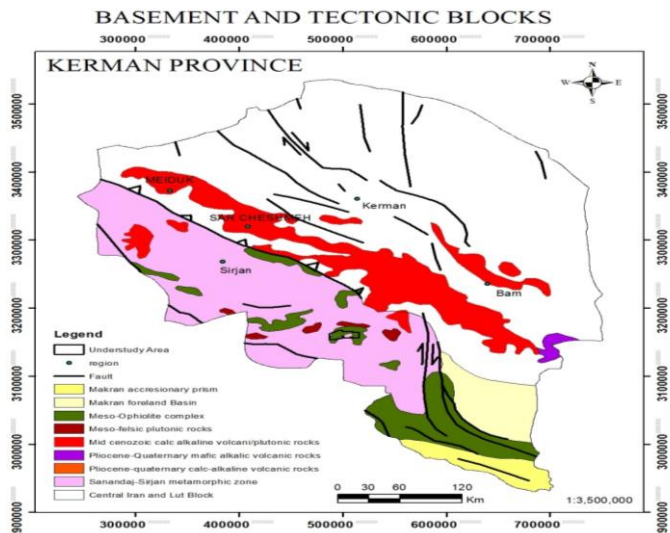
اکتشافات ناحیه ای ژئوشیمیایی با هدف تعیین پتانسیل کانی زایی منطقه وسیعی انجام می گیرد که در هر منطقه با توجه به شرایط موجود اقدام به نمونه برداری می شود. یکی از متداول ترین روش های اکتشاف ناحیه ای، نمونه برداری از رسوبات آبراهه ای است که حاصل تخریب فیزیکی و شیمیایی لیتولوژی های موجود، کانی سازی، زون های آلتراسیونی و احتمالاً آلودگی در منطقه مورد بررسی است (محمد زاده و همکاران ۱۳۸۸). رسوبات آبراهه ای در واقع نمونه ترکیبی از مواد فرسایش یافته از سنگ های بالا دست حوضه آبریز هستند. بنابراین وجود ناهنجاری در این رسوبات از وجود یک منبع پرعیار در بالادست آنها حکایت می کند. اساس روش اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه ای بر مبنای هاله های ثانویه انتقال یافته نمایان قرار دارد. این هاله ها در واقع بر اساس مهاجرت عناصر در رسوبات آبراهه ای ایجاد می شوند (بیزدی، ۱۳۸۱).

در مطالعات ژئوشیمیایی ناحیه ای، نمونه برداری در مناطقی انجام می گیرد که حداقل بخشی از سنگ های بستر در سطح زمین رخنمون دارند و به علاوه دارای سیستم های آبریز توسعه یافته ای نیز می باشد. در چنین مناطقی روش بررسی رسوبات آبراهه ای در حوضه آبریز، تنها روشی است که برای ناحیه مورد مطالعه، اطلاعات ژئوشیمیایی سیستماتیک را به طور کامل در اختیار قرار می دهد. در این میان، رسوبات آبراهه ای به عنوان محیط نمونه گیری مهم در برداشت های ژئوشیمی اکتشافی مطرح هستند (Borovec, 1996).

محدوده مورد کاوش براساس پهنه بندی سراسری مناطق مستعد و امیدبخش اکتشافی به وسعت ۲۷۶ کیلومتر مربع، تحت عنوان پهنه اکتشافی جنوب کرمان (اسفندقه) در انحصار دو ورقه یک صد هزارم زمین شناسی اسفندقه و بزار (دهسرد) می باشد. این محدوده دارای شکل نامنظم است که در دامنه طول جغرافیایی $486957 E - 515491 E$ و عرض جغرافیایی $3154150 N - 3167777 N$ قرار گرفته است. محدوده مورد مطالعه در حوزه نظارت سازمان صنعت، معدن و تجارت جنوب استان کرمان و نزدیک به منتهی الیه جنوب استان، به فاصله حدود ۳۰ کیلومتری از مرز شمالی استان هرمزگان واقع گردیده است. بر پایه مطالعات صورت گرفته، ویژگی های زمین شناسی ناحیه ای استان کرمان را بدین گونه می توان تشریح نمود:

این پهنه واقع در جنوب شرق صفحه ایران زمین از دیدگاه ریخت شناسی سیمای بسیار متنوعی دارد. نواحی شرقی این استان محدود به پهنه های کویری بسیار گسترده ای است که تا استان سیستان و بلوچستان ادامه دارد. نواحی مرکزی آن مرتفع و کوهستانی و مهم ترین رشته کوه آن سلسله جبال بارز است، زمستان ها و پاییز سرد و بهار و تابستان نسبتاً معتدل دارد. این استان در نواحی جنوب غربی با رشته کوه های زاگرس مجاور است. این وضعیت ریختاری و اقلیمی، موجب تنوع بسیار زیاد اقلیم های کوچک و بزرگ شده است که هر کدام دارای ویژگی های آب و هوایی خاص خود هستند.

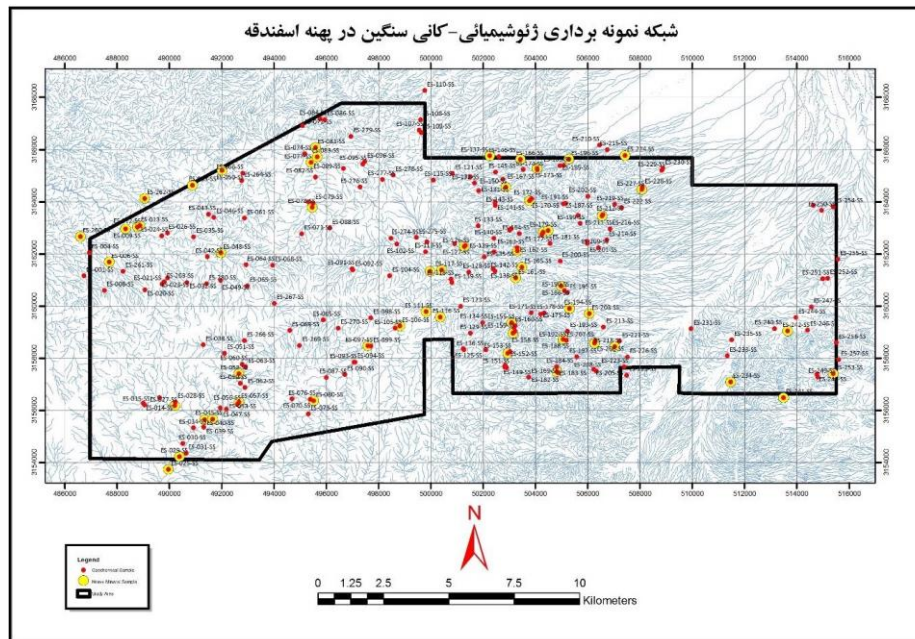
از دیدگاه زمین ساخت بزرگ مقیاس نیز، استان کرمان تنوع ساختاری زیادی دارد. در جنوب غرب بخشی از زون ساختاری زاگرس و زون خردشده آن، و در جنوب، بخشی از زون ساختاری مکران را شامل می شود. زون سندج - سیرجان، از نواحی غرب شهر بابک، تا نزدیکی زون گسله زندان در کهنوج، در این استان رخنمون داشته و رشته کوه های آتش فشانی ارومیه - دختر، به صورت کمربندی با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی، از نزدیکی انار تا جنوب شرقی بم در آن امتداد می یابد. پلاتفرم پالتوزوئیک - مزوزوئیک ایران مرکزی، بخش عمده ای از شرق، شمال و شمال شرق استان را پوشش داده است (شکل ۱).



شکل ۱. وضعیت پهنه بندی ماگماتیسم و تقسیمات رسوبی - ساختاری در گستره استان کرمان و موقعیت جایگیری محدوده مورد مطالعه در این پیکره (آقانبانی، ع.، ۱۳۸۳)

۱.۱. نمونه برداری

به منظور تشخیص آنومالیهای واقعی و تمییز انواعی که به نهشته‌های کانساری مرتبط می‌باشند، از سایر انواع آن لازم است تا جزء ثابتی از نمونه‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه ای با سایز ۸۰ مش و نمونه‌های کانی‌سنگین با سایز ۲۰ مش مورد آزمایش قرار گیرد. بدین منظور تعداد ۲۴۰ نمونه ژئوشیمی و ۵۶ نمونه کانی‌سنگین بر اساس نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه طراحی و برداشت شده است. چگالی شبکه نمونه برداری اندکی کمتر از یک نمونه برای هر کیلومتر مربع بوده است. در شکل ۲ شبکه نمونه برداری ژئوشیمی و کانی‌سنگین طراحی شده در این پهنه مشاهده می‌گردد. کلیه نمونه‌های ژئوشیمی و کانی‌سنگین به صورت خشک سرد شده و در پایان به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال گردیده‌اند. کلیه ۲۴۰ نمونه ژئوشیمی مربوط به این پروژه به آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی تحویل داده شد. روش تجزیه برای کلیه عناصر ICP-MS و برای Fired Assay Au بوده است. ۵۶ نمونه کانی‌سنگین به آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری معدنی تحویل داده شد. این نمونه‌ها پس از طی مراحل آماده سازی اعم از گل شویی، لاوک شویی، جدایش مغناطیسی و برموفرم گیری، مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفته‌اند. از بین ۵۶ نمونه کانی‌سنگین برداشت شده در محدوده پهنه اسفندقه، تعداد ۲۸ نمونه حاوی مقادیر مختلفی از کانی‌های با ارزش کانساری بوده‌اند. تمرکز نمونه‌های آنومال عمدتاً در بخش شرقی منطقه بوده است.



شکل ۲. آبراهه های محدوده مطالعاتی و نقاط نمونه برداری

۱. تحلیل داده‌های ژئوشیمی

۱.۱. بررسی های آماری تک متغیره

از کل ۵۷ عنصر اندازه‌گیری شده، به دلیل سنسورد بودن کامل، عنصر ایندیوم از مراحل پردازش کنار گذاشته شده و عملیات پردازش داده بر اساس ۵۶ عنصر انجام شده است. که از این تعداد نیز عناصر معرف و ردیاب کانی‌سازی‌های محتمل در منطقه که عمدتاً شامل ۳۲ عنصر هستند در مراحل پردازش لحاظ شده‌اند. تمامی داده‌های خام ۳۲ عنصر منتخب پس از جایگزینی مقادیر سنسورد به وسیله مقادیر محاسبه شده، مجدداً مورد فایل‌بندی در نرم‌افزارهای Excel و SPSS قرار گرفتند تا پردازش‌های آماری مناسب بر روی آنها انجام پذیرد.

بدین منظور اقدام به ترسیم نمودارهای هیستوگرام، Q-Q Plot و Box Plot گردید (شکل ۳). اطلاعات مربوط به ۱۱ پارامتر آماری محاسبه شده برای ۳۲ عنصر مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. پارامترهای آماری آمده در این جدول شامل تعداد نمونه‌های معتبر به کار رفته در تحلیل، مقدار میانگین، میانه، انحراف‌معیار، چولگی، کشیدگی، کمینه، بیشینه و مقادیر نظیر ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ فراوانی هستند. از آن جایی که مقدار ۵۰٪ فراوانی معادل مقدار میانه می‌باشد لذا می‌توان گفت که در این جدول ۱۰ پارامتر آماری محاسبه شده است.



جدول ۱. پارامترهای آماری محاسبه شده بر اساس داده های خام در منطقه مطالعاتی

Statistics																	
Statistical Parameters		Au (ppb)	Ag (ppm)	As (ppm)	Ba (ppm)	Be (ppm)	Bi (ppm)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Li (ppm)	Mn (ppm)	Mo (ppm)	Nb (ppm)	Ni (ppm)
N	Valid	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
	Mean	1.04	0.11	9.85	313.18	3.94	0.43	0.10	38.08	548.23	59.47	47795.83	22.06	1147.89	0.17	8.04	394.54
	Median	0.75	0.08	9.90	324.50	3.80	0.40	0.08	29.10	270.00	53.00	48888.00	20.00	1112.00	0.08	7.95	118.50
	Std. Deviation	1.04	0.36	4.60	145.64	1.98	0.11	0.07	19.92	549.26	26.97	5754.03	8.80	201.84	0.20	3.53	461.53
	Skewness	3.75	14.30	1.26	1.04	0.35	0.73	4.81	1.10	1.90	2.73	0.47	1.37	1.15	2.67	1.53	1.32
	Kurtosis	14.11	212.77	4.34	4.66	0.10	1.51	25.68	-0.03	3.48	14.32	-0.30	2.86	3.46	8.64	7.14	0.28
	Minimum	0.75	0.08	0.50	62.00	0.15	0.20	0.08	16.10	89.00	22.00	36225.00	7.00	731.00	0.08	0.75	53.00
	Maximum	7.40	5.50	32.40	1088.00	10.40	0.80	0.60	93.80	3102.00	262.00	64760.00	63.00	2228.00	1.40	30.30	1652.00
Percentiles	25	0.75	0.08	6.63	213.50	2.70	0.40	0.08	23.33	196.00	44.00	43891.25	16.00	1008.50	0.08	5.55	91.00
	50	0.75	0.08	9.90	324.50	3.80	0.40	0.08	29.10	270.00	53.00	48888.00	20.00	1112.00	0.08	7.95	118.50
	75	0.75	0.08	12.20	391.75	5.20	0.50	0.09	48.65	732.00	70.00	51472.75	26.00	1259.75	0.20	10.00	632.00
Statistical Parameters		Pb (ppm)	S (ppm)	Sb (ppm)	Sc (ppm)	Se (ppm)	Sn (ppm)	Sr (ppm)	Ta (ppm)	Te (ppm)	Th (ppm)	Ti (ppm)	Tl (ppm)	U (ppm)	V (ppm)	W (ppm)	Zn (ppm)
N	Valid	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
	Mean	17.74	179.72	0.55	20.60	1.06	1.37	176.59	0.68	0.92	4.04	4357.04	0.17	0.93	123.41	1.45	85.91
	Median	14.00	152.50	0.50	20.30	0.98	1.30	170.00	0.67	0.89	3.62	4502.50	0.17	0.90	122.50	1.40	85.00
	Std. Deviation	26.27	110.96	0.29	6.14	0.57	0.43	38.43	0.26	0.72	3.31	1374.50	0.08	0.42	34.16	0.43	41.13
	Skewness	11.59	5.46	3.59	0.56	0.77	0.84	1.32	3.56	2.00	7.90	0.36	1.02	3.57	0.57	1.50	2.86
	Kurtosis	160.94	45.31	17.88	0.54	0.54	0.83	2.80	26.44	5.20	93.93	1.78	1.53	29.21	1.24	7.00	10.87
	Minimum	1.00	80.00	0.38	8.10	0.38	0.60	100.30	0.26	0.08	0.29	1061.00	0.08	0.30	47.00	0.75	52.00
	Maximum	385.00	1266.00	2.50	41.60	3.37	3.10	338.90	2.95	4.23	44.56	9103.00	0.52	4.80	246.00	3.80	340.00
Percentiles	25	8.00	119.25	0.38	16.40	0.54	1.10	151.30	0.52	0.44	2.50	3777.50	0.11	0.70	102.00	1.20	74.50
	50	14.00	152.50	0.50	20.30	0.98	1.30	170.00	0.67	0.89	3.62	4502.50	0.17	0.90	122.50	1.40	85.00
	75	23.00	203.50	0.60	24.00	1.42	1.60	192.85	0.81	1.18	5.18	4964.00	0.21	1.10	139.00	1.70	97.75

جهت تعیین عناصر پر پتانسیل و ناهنجر در منطقه در پردازش‌های تک‌متغیره از شکل تابع و مقادیر مربوط به پارامترهای بیشینه و چولگی استفاده شده است. بدین ترتیب عناصر **Pb, Ag, Th** با مجموع چولگی و کشیدگی بیش از ۱۰۰، بیشترین انحراف از حالت نرمال را دارد که بالا بودن این مقدار عمدتاً به دلیل وجود داده‌های خارج از ردیف است. در میان این سه عنصر، **Pb** با مقدار بیشینه ۳۸۵ گرم در تن دارای پتانسیل کانی‌سازی احتمالی در منطقه می‌تواند باشد. بعد از این سه عنصر، عناصر **S, Cd, Sb, Au, Cu, Zn, Mo** دارای مجموع چولگی و کشیدگی بین ۱۰ تا ۵۰ هستند که انحراف زیادی از حالت نرمال از خود نشان می‌دهند. در این میان **S** با بیشینه ۱۲۶۶ گرم در تن، **Cu** با بیشینه ۲۶۲ گرم در تن، **Zn** با مقدار ۳۴۰ گرم در تن و **Au** با بیشینه ۷/۴ میلی‌گرم در تن دارای پتانسیل نسبی کانی‌سازی در منطقه هستند. البته بالا بودن مقدار **S** در منطقه می‌تواند معرف توسعه کانی‌سازی سولفوری یا سولفات به صورت پیریت یا کانه‌های دیگر فلزات پایه در منطقه باشد. از دیگر مقادیر قابل توجه در میان داده‌ها، مقدار گزارش شده برابر ۱۰۸۸ گرم در تن برای **Ba**، مقدار ۳۱۰۲ گرم در تن برای **Cr**، مقدار ۲۲۲۸ گرم در تن برای **Mn** و مقدار ۹۱۰۳ گرم در تن **Ti** است که مقادیر قابل توجهی برای نمونه رسوب آبراهه‌ای است.

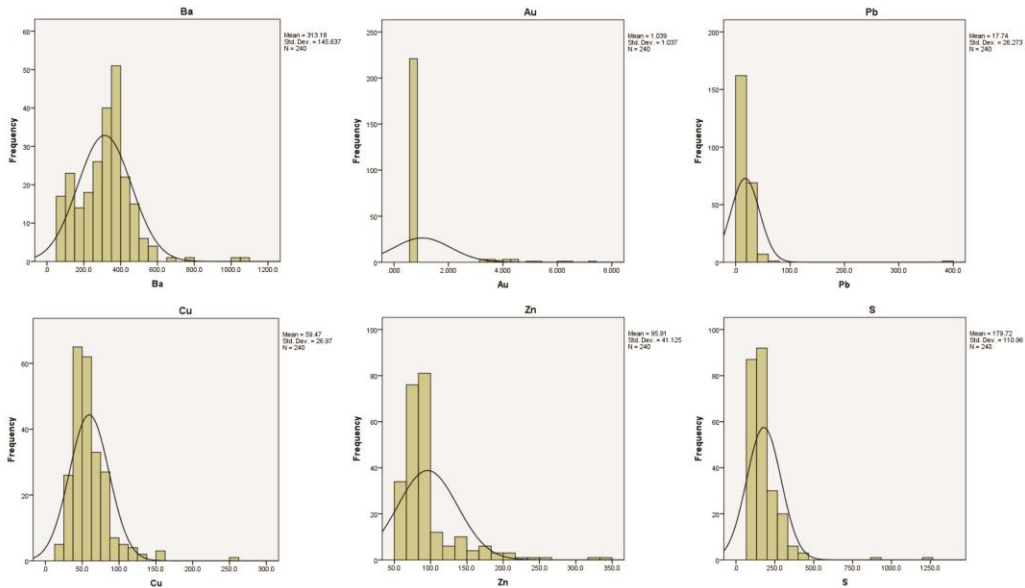
مقایسه مقادیر گزارش شده برای عناصر مختلف با حدود معرفی شده توسط ژینزبرگ تقریباً معرف کانی‌سازی غنی شده برای **Cr** و **Ni** و کانی‌سازی پراکنده برای **Pb, Zn, Ag, Cu, Co** و **Ba** در منطقه مورد بررسی است.

با توجه به هیستوگرامهای ترسیم شده می‌توان عناصر مورد مطالعه را بر اساس تابع توزیع آنها در چند دسته زیر رده‌بندی کرد:
 الف- توزیع نزدیک به **L** برای عناصر **Ag, Au**.

ب- توزیع نزدیک به لاگ‌نرمال برای عناصر **Zn, W, U, Ti, Th, Te, Sb, S, Pb, Ni, Mo, Cu, Cr, Co, Cd**.

ج- توزیع نزدیک به نرمال برای عناصر **As, Be, Bi, Fe, Cr, Li, Mn, Nb, Sc, Sn, Sr, Ta, Ti, V**.

برای برخی عناصر نیز شاهد دو جامعه آماری به صورت دو مد کاملاً مشخص هستیم، نظیر عناصر **As, Ba, Be, Sr**. در شکل ۳ هیستوگرام عناصر **Ba, Cu, Pb, S** و **zn** که دارای پتانسیل کانی‌سازی هستند نمایش داده شده است.



شکل ۳. هیستوگرام عناصر دارای پتانسیل کانی‌سازی با تابع توزیع غیر نرمال.

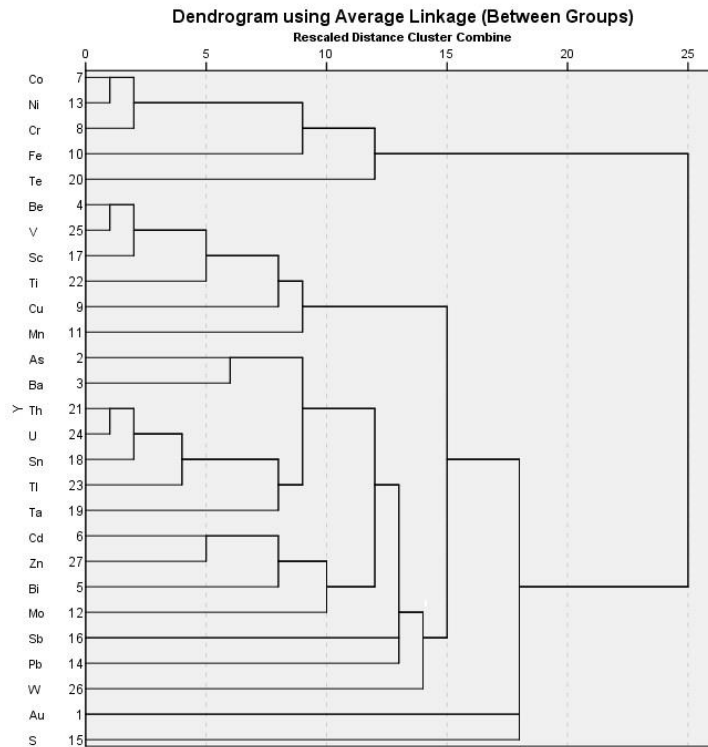
۲.۱. بررسی آماری چند متغیره

در این تحقیق روشهای آنالیز خوشه‌ای و مؤلفه‌های اصلی انجام گرفت چرا که نتایج حاصل از این روشها میتواند به نوعی مکمل همدیگر برای تصمیم گیری هرچه بهتر در ارزیابی عناصر باشد.

یکی از روشهای چند متغیره روش تجزیه خوشه‌ای یا تجزیه کلاستر است. برای آنالیز خوشه‌ای متغیرهای مورد مطالعه از چند روش استفاده شده است. یکی از این چند روش منجر به ترسیم دندروگرام مناسبتری می‌گردد که از تقارن بیشتری برخوردار است. در این روش مقادیر نرمال شده ۲۷ عنصر استفاده شده است. هر ۲۷ متغیر مورد تحلیل قرار گرفته و دندروگرام همبستگی مربوطه ترسیم شده است. نتیجه آنالیز خوشه‌ای رسم دندروگرام شکل ۴ است. تحلیل داده های این دندروگرام شامل موارد زیر است:

این دندروگرام دارای دو شاخه اصلی است. شاخه فوقانی که معرف بخش مرتبط با سنگ‌های اولترامافیک و کانی‌سازی همراه آن است با ۵ عنصر شامل Cr, Ni, Co, Fe و Te مشخص شده است. میزان تشابه عناصر Cr, Ni, Co بسیار بالا است و مجموعه آنها به Fe متصل شده است و در نهایت همگی به Te متصل شده‌اند که توجیه خاصی برای آن وجود ندارد (ممکن است به دلیل خطای بالای تجزیه این عنصر (۶۳/۶) باشد).

پس از شاخه مذکور، تمامی عناصر در یک گروه طبقه بندی شده‌اند، که خود به دو زیر شاخه تقسیم می‌شوند. دو عنصر Au و S نیز به دلیل خطای نسبی بالا و عدم تشابه ساختار داده‌ها با سایر عناصر این گروه، با فاصله زیاد به سایر عناصر متصل شده و ارتباط معنی داری از خود نشان نمی‌دهند. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد زیر شاخه فوقانی این شاخه که حاوی Cu و Mn است احتمالاً معرف کانی‌سازی‌های Cu مرتبط با سنگ‌های آذرین بازیک تا حد واسط می‌باشد. عناصر زیر شاخه دوم که شامل As, Pb, Zn, Sb و Ba هستند با همراهی عناصر سنگ‌ساز مرتبط با توده‌های آذرین فلسیک در منطقه هستند که در بخش شمالی منطقه بیشتر رخمون دارند.

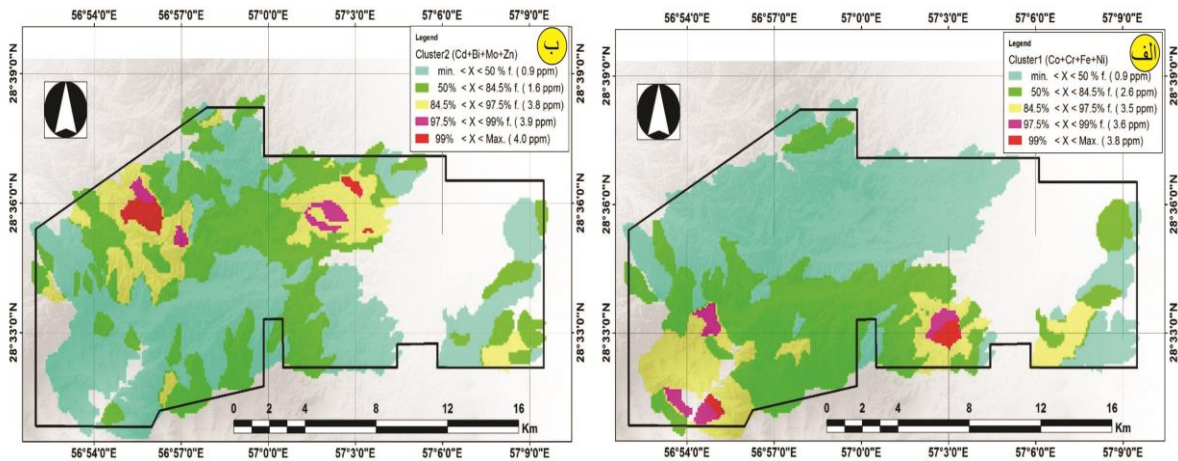


شکل ۴. دیاگرام درختی ترسیم شده بر اساس داده‌های نرمال، جهت تعیین پاراژنهای احتمالی کانی‌سازی با توجه به موارد مطرح شده در مورد تجزیه خوشه‌ای انجام شده، دو متغیر مفید که می‌تواند در معرفی مناطق پرپتانسیل پهنه اسفندقه مفید باشد به صورت مجموعه عناصر (Cr+Ni+Co+Fe) و (Cd+Bi+Mo+Zn) به عنوان دو متغیر مرکب به عنوان ردیاب کانی‌سازی‌های احتمالی در این منطقه معرفی می‌شوند. برای ساخت این متغیرها، به دلیل دامنه متفاوت موجود در داده‌ها، از مقادیر نرمالایز شده این عناصر در بازه (۰-۱) استفاده خواهد شد. همانطور که در بخش پردازش آماری چند متغیره اشاره گردید بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای انجام شده دو متغیر ذیل که دارای تشابه و همبستگی بالایی بودند به عنوان دو متغیر جدید که مناطق محتمل کانی‌سازی را می‌تواند نمایش دهد انتخاب شدند:

$$\text{متغیر اول} = \text{Cr} + \text{Co} + \text{Ni} + \text{Fe}$$

$$\text{متغیر دوم} = \text{Bi} + \text{Cd} + \text{Mo} + \text{Zn}$$

و همانطور که ذکر گردید به منظور حذف انحرافات در نتایج حاصل به دلیل بالا بودن دامنه اعداد غلظت یک عنصر مانند Fe و حذف اثر سایر عناصر، برای ساخت متغیر مرکب از مقادیر نرمالایز شده بین صفر و یک استفاده شده است. از ویژگی‌های متغیرهای مرکب، حذف خطاهای تصادفی نظیر خطای تجزیه شیمیایی در تعیین نقاط امیدبخش می‌تواند باشد. در شکل ۵ نقشه توزیع دو متغیر مرکب ساخته شده نمایش داده شده است. در شکل ۵-الف نقشه مناطق امیدبخش برای کانی‌سازی Cr و عناصر هم خانواده آن که در سنگ‌های اولترامافیک محتمل هستند، پیشنهاد شده است. در شکل ۵-ب نقشه مناطق امیدبخش برای کانی‌سازی پلی متال از جمله Cu، Pb، Zn و حتی Au و Ag پیشنهاد شده است.



شکل ۵. الف) نقشه توزیع فضایی متغیر Cr+Co+Ni+Fe در پهنه اسفندقه، ب) نقشه توزیع فضایی متغیر Bi+Cd+Mo+Zn در پهنه اسفندقه

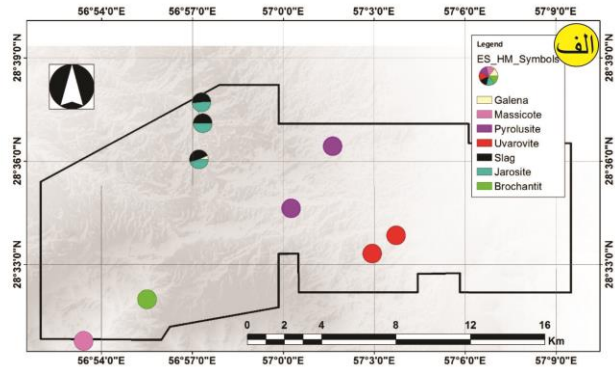
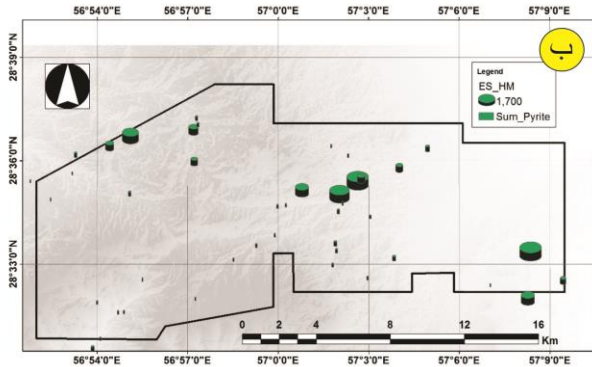
۳.۱. روش معرفی آنومالی‌های کانی‌سنگین

همانگونه که گفته شد در مجموع تعداد ۵۶ نمونه کانی‌سنگین برداشت شده است. این نمونه‌ها پس از شستشو و مگنت گیری و سپس بروموفرم گیری، مورد مطالعه قرار گرفتند. هریک از نمونه‌های کانی‌سنگین برای ۴۱ کانی فلزی و غیر فلزی مورد مطالعه واقع شده‌اند. بسیاری از کانی‌ها، کانی‌های سنگ ساز بوده و به جز در موارد خاص، نمی‌توانند راهنمای خوبی برای کانی سازی باشند. از میان این ۴۱ کانی، مقادیر تعدادی از کانی‌های با ارزش جدا شده و کار تفکیک و مشخص سازی آنومالی‌های کانی‌سنگین بر اساس آنها صورت گرفته است. به دلیل حجم کم بخش کنسانتره کانی‌سنگین موارد گزارش شده برای اغلب موارد گزارش شده در نتایج این مطالعات اغلب در حد تعداد ذرات کانی مشاهده شده می‌باشد و مواردی که برای همه پارامترهای گزارش شده داده کافی وجود داشته باشد زیاد نیست. لذا امکان تهیه نقشه توزیع فضایی پارامترها برای تمامی موارد گزارش شده میسر نیست. بر اساس میزان فراوانی موارد گزارش شده برای ۷ مورد که شامل نقشه توزیع مجموع مقادیر کانی‌های Fe، کانی‌های پیریت، کانی‌های Ti دار، باریت، اپیدوت و کلریت امکان تهیه نقشه وجود داشته است. پس از ساخت متغیرهای فوق، مشابه متغیرهای ژئوشیمیایی، بر اساس حوضه آبریز بالادست تعیین شده برای هر نمونه با روش تخمین شبکه‌ای نقشه مربوطه ترسیم شده است.

برای سایر نتایج مطالعات کانی‌سنگین که داده کافی برای تهیه نقشه به روش تخمین شبکه‌ای وجود ندارد از روش نقشه‌های نمادین (Symbol Map) استفاده شده است. در این روش مقدار گزارش شده در محل نمونه مربوطه به وسیله یک نماد خاص مشخص می‌شود و بر اساس میزان فراوانی یا مقدار عددی گزارش شده در هر نقطه می‌توان مقدار بزرگی یا رنگ نمادها را تغییر داد. در شکل ۶-الف توزیع کانی‌های دارای Pb، Cu، Mn، Cr و ... ارائه شده است. بر اساس این نقشه کانی‌های دارای Pb (گالن و ماسیکوت^۱) در بخش شمالی و جنوب غربی منطقه مشاهده می‌شوند. کانی Cr دار (اووارویت^۲) در محدوده معدن کرومیت جنوب شرقی منطقه مشاهده می‌گردد. موارد سرباره و ژاروسیت نیز در بخش شمالی در محدوده گزارش کانی گالن مشاهده می‌گردد. تنها مورد کانی بروکانتیت در جنوب شرقی مشاهده می‌گردد و کانی‌های Mn (پیرولوزیت) در بخش مرکزی و شرقی محدوده مشاهده می‌گردند. مقایسه این نقشه با نقشه‌های ژئوشیمیایی عناصر انطباق خوبی را با یکدیگر نشان می‌دهند و نتایج کانی‌سنگین مناطق امیدبخش ژئوشیمی را خوبی تایید می‌نمایند. در شکل ۶-ب نیز توزیع مقادیر مجموع کانی‌های پیریت نمایش داده شده است که مناطق کانی‌سازی احتمالی عناصر مختلف در فاز سولفور را می‌تواند مشخص نماید. در این نقشه مقدار پیریت بر اساس شدت عیار آن با یک دایره مشخص شده است. مقادیر بزرگتر با دایره بزرگ و مقادیر کم پیریت با دایره کوچکتر مشخص شده است.

^۱ Massicot

^۲ Uvarovite



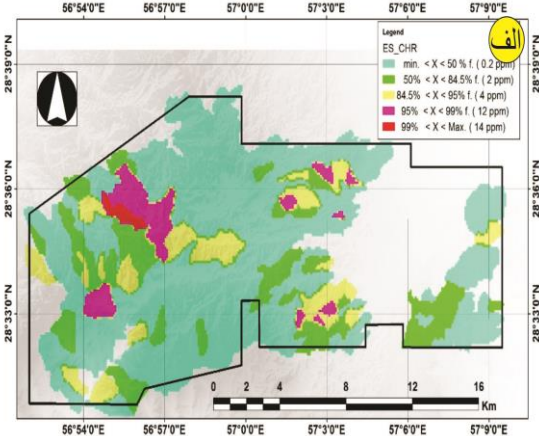
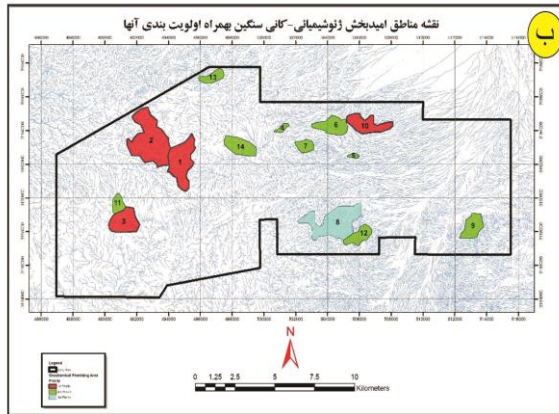
شکل ۶- الف) نقشه کانی‌های با ارزش گزارش شده در نمونه‌های کانی‌سنگین برداشت شده در پهنه اسفندقه. ب) نقشه مجموع کانی‌های پیریت در نمونه‌های کانی‌سنگین برداشت شده در پهنه اسفندقه

۴.۱. مناطق امیدبخش ژئوشیمیایی

به منظور جمع بندی مناطق امیدبخش ژئوشیمیایی، از روش تجزیه ویژگی (Characteristic Analysis) استفاده شده است. در این روش بر اساس تمامی عوامل موثر (عنصر مورد بررسی یا متغیر مرکب ساخته شده) در تعیین نقاط امیدبخش که شامل موارد ذیل هستند، انتخاب صورت می‌گیرد.

- عناصر معرف یا ردیاب کانی‌سازی احتمالی در منطقه (۳۰ عنصر شامل Au, Ag, As, Bi, Ba, Cd, Co, Ni و ...)
- فاکتورهای استخراج شده که معرف کانی‌سازی احتمالی در منطقه هستند (۴ فاکتور شامل فاکتورهای ۲، ۳، ۴ و ۶)
- دو متغیر مرکب ساخته شده بر اساس تجزیه خوشه ای

بر اساس تمامی موارد مذکور، برای هر نمونه برای هر یک از موارد فوق، در صورت آنومال بودن پارامتر مقدار ۱ و در صورت غیر آنومال بودن مقدار صفر برای آن پارامتر در نمونه مورد بررسی جایگزین شده است. پس از کنترل تمامی عوامل فوق در همه نمونه‌های موجود (۲۴۰ نمونه رسوب آبراهه) یک ماتریس با درایه‌های صفر و یک حاصل می‌گردد (یک ماتریس با ابعاد ۲۴۰ در ۳۶). این ماتریس به روش تجزیه ویژگی مورد پردازش قرار می‌گیرد. در این روش تجزیه، ماتریس حاصله در ماتریس ترانهاد خود ضرب می‌گردد. در صورتیکه درایه‌های آنومال (مقادیر ۱ در یک عنصر یا عامل خاص) با سایر موارد در عوامل دیگر سازگار باشد، مقادیر (۱) در هم ضرب شده و تقویت می‌شوند و در صورتیکه مقادیر آنومال در عوامل مختلف با یکدیگر سازگار نباشد، مقادیر (۱) در مقادیر (۰) ضرب شده و تضعیف می‌شوند. در نهایت برای هر نمونه بر اساس نتایج تجزیه یک امتیاز بدست می‌آید که این مقادیر برای تهیه نقشه استفاده شده است. نتیجه ترسیم امتیازات محاسبه شده در تجزیه ویژگی برای هر نمونه در شکل ۷-الف نمایش داده شده است. در این شکل مناطق بالای ۰.۹۵ درصد فراوانی مقادیر تخمینی به عنوان مناطق امیدبخش ژئوشیمی قابل معرفی هستند.



شکل ۷. الف) نقشه توزیع فضایی نتایج تجزیه ویژگی پارامترهای ژئوشیمیایی در پهنه اسفندقه. ب) مناطق امیدبخش معرفی شده بر اساس شواهد ژئوشیمیایی و کانی سنگین

با توجه به نقشه فوق، نقشه‌های کانی سنگین و نیز کلیه مشاهدات صحرایی موجود، در نهایت تعداد ۱۴ محدوده امیدبخش مجموعاً به مساحت تقریبی ۲۶ کیلومترمربع معرفی شده است (شکل ۷-ب) حداقل مساحت این محدوده‌ها ۰/۱۳ کیلومترمربع و حداکثر ۵/۸ کیلومترمربع بوده است. پاراژنهای عنصری نمونه‌ها از ۱ عنصر تا ۸ عنصر در محدوده‌های مختلف متغیر بوده است. به دلیل عدم وجود نقاط مشخص در منطقه جهت نامگذاری هر یک از محدوده‌های امیدبخش، این محدوده‌ها با شماره مشخص و معرفی شده‌اند. شماره‌ها ربطی به اولویت بندی این محدوده‌ها نداشته و اولویت‌ها بر اساس رنگ هر محدوده مشخص شده است.

۲. بحث

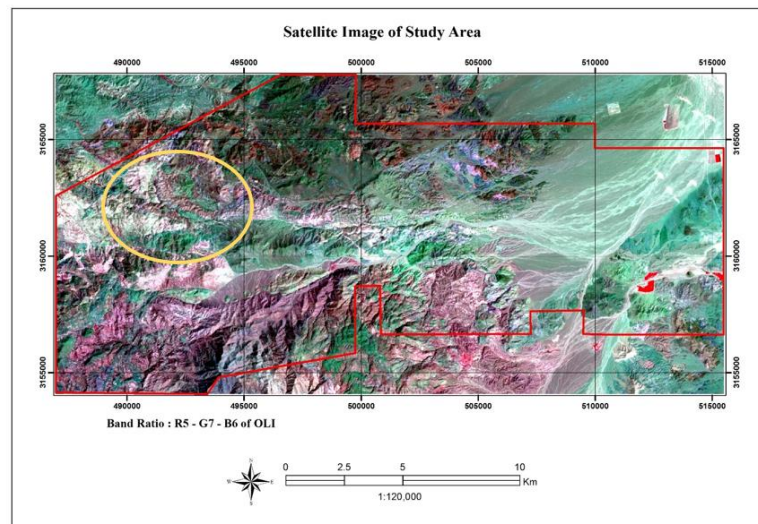
در این پژوهش بیشترین حجم عملیات را مطالعات ژئوشیمیایی تشکیل می‌دهد. توانایی اکتشافات ژئوشیمیایی در محدوده کانسارهایی است که قادر به تولید هاله ژئوشیمیایی (هاله اولیه یا ثانویه) باشند. بنابر این مطالعات ژئوشیمیایی در مورد کانسارهایی که مهاجرت یا تمرکز عناصر با سیال مرتبط است بسیار پاسخ مناسبی می‌دهد. به طور مثال عمده کانساری گرمابی با درجه حرارت‌های مختلف نظیر انواع کانسارهای پورفیری، رگه‌ای، اسکارنی و حتی کانسارهایی که تحت شرایط سوپرژن و توسط آب‌های سطح‌الارضی و زیرزمینی حمل و نقل یافته و متمرکز می‌شوند (چه به صورت پنهان و چه دارای رخنمون)، بخوبی با روش‌های ژئوشیمیایی قابل شناسایی هستند. ولی نقطه ضعف روش‌های ژئوشیمیایی در مورد شناسایی کانسارهایی است که فاقد هاله ژئوشیمیایی می‌باشند. کانسارهای ماگماتوژن، از قبیل کانسارهای Pt, Ni, Cr و ... که به روش ثقلی در مخزن ماگمایی تشکیل می‌شوند و هیچ هاله‌ای (حتی یک میلیمتر) ندارد، تنها به شرط وجود رخنمون کانی‌سازی و توسعه هاله‌های ثانوی محصولات حاصل از فرسایش و هوازدگی کانسار، اکتشاف کانسار توسط روش‌های ژئوشیمیایی میسر خواهد بود.

در محدوده مطالعاتی بر اساس شواهد زمین‌شناسی و تنوع پترولوژیکی موجود در منطقه، به دو بخش شمالی و جنوبی قابل تقسیم است. این دو نیمه به لحاظ شواهد ژئوشیمیایی بدست آمده و ارائه شده دارای الگوی ژئوشیمیایی کاملاً متفاوت و متمایز هستند و الگوی توزیع فضایی عناصر بخوبی در این دو بخش قابل تفکیک هستند. در نیمه جنوبی شاهد رخنمون واحدهای عمدتاً مافیک تا اولترامافیک نظیر دونیت، هارزبورگیت، سرپانتینیت، پیروکسنیت به همراه چرت‌های رادیولاریتی و آهک‌های پلاژیک، دیاباز و بازالت و مجموعه متنوعی از سنگ‌های دگرگونی هستیم. طیف سنگ‌های موجود در این سکانس معرف وجود یک پوسته اقیانوسی در بخش جنوبی این پهنه است که به لحاظ مورفولوژی نیز بخش مرتفع این پهنه را تشکیل داده است. نیمه جنوبی پهنه اسفندقه به طور معنی داری با توزیع مقادیر بالای عناصر Co, Cr, Ni, Fe, Ca مشخص می‌گردند و مرز مقدار زمینه این عناصر بخوبی با مرز واحدهای لیتولوژیکی این منطقه انطباق دارد.

در نیمه شمالی پهنه اسفندقه، سه دسته واحد پترولوژیکی آذرین حضور دارند که بیشترین تکاپو و جنبش‌های گرمایی متأثر از جایگیری آنها است. دسته اول، سنگ‌های نفوذی سیاه‌کوه می‌باشند که دارای طیفی از سنگ‌های مافیک تا فلسیک با ترکیب گابرو تا لوکوگرانیت هستند (واحد Gr) (شکل ۸). تزریق و جایگیری این واحد سنگی آذرین با تاثیر حرارتی بر واحدهای Jf (رسوبات فلیش) همراه



بوده است که به طور قطع دیرینه این توده نفوذی را به حداقل جوانتر از ژوراسیک انطباق می دهد. بررسی این دسته از واحدهای نفوذی به خصوص در مناطق تماس با واحدهای جوانتر به عنوان مثال واحدهای سنگی Jt (گنبدهای داسیت - ریوداسیت) و نیز واحد Jb (اساساً بازالت به شدت دگرسان و اپیدوتی شده به همراه شیل، چرت، توف و کمی هم حضور پیکره های داسیت) از اهمیت بالایی برخوردار است. در پیرامون مناطق تماس این توده های نفوذی با واحدهای قدیمی تر از نوع پیکره های بازالت و نیز واحدهای ساب و لکانیک رگه های سیلیسی کانه دار مشاهده می شوند که شاید بتوان حضور آنها را به فازهای پسماند گرمایی ناشی از تزریق این واحدهای نفوذی دانست.



شکل ۸. جانمایی واحدهای نفوذی با ترکیب گابرو تا لوکوگرانیت به رنگ سفید (شمال غرب پهنه) در داخل پیکره های ولکانیک میزبان (به رنگ صورتی کم رنگ و سبز تیره) (گزارش مطالعات فاز شناسایی منابع معدنی پهنه اسفندقه ایمیدرو ۱۳۹۶)

دسته دوم پیکره های داسیت، ریوداسیت و به عقیده نگارنده در پاره ای موارد ریولیت با ایجاد پیکره های سترگ در محدوده شمال غرب پهنه اسفندقه توانسته آثار تکاپوی حرارتی قابل توجهی را به جا گذارد. دگرسانی از نوع سیلیسی فایده، رسی شدن در حد رخساره آرژیلیک متوسط از جمله این عوارض است. اما آنچه که توانسته بیش از دیگر موارد بر اهمیت کاوش های دقیق تر در این منطقه خاص بیافزاید، رخداد کانه زایی در قالب دو نوع متفاوت است.

کانه زایی نوع اول مربوط می شود به حضور رگه های سیلیس کانه دار به رنگ سفید شیری که با اجتماع کانه های مختلف از جمله کربنات و سولفید Cu و Pb و Zn همراه است. این دسته رگه های کانه دار در ابعاد گوناگون و در امتدادهای متفاوت در داخل پیکره های ساب ولکانیک منطقه جای گرفته اند. اما در پسماند این فرایند کانه زاد، تشکیل زون های اکسایش و تراکم بالای اکسید - هیدروکسید Fe توانسته یک توالی مناسب و مستعد از کلاهدک اکسیدان به سمت بخش های عمیق تر ایجاد نماید. در پاره ای موارد در این منطقه خود پیکره های ساب ولکانیک که سیلیسی شدن و تا حد ضعیفی رسی شدن در آنها اتفاق افتاده است، مورد کاوش چکشی و نمونه برداری قرار گرفته اند، که در یک نمونه با کد P17-MZ-20 حدود ۳۰۰ میلی گرم در تن Au وجود داشته است.

اما کانه زایی نوع دوم به شکل حضور کانه زایی کربنات Cu (مالاکیت) و سولفید Cu (کالکوپیریت، کالکوسیت و کولیت) در داخل پیکره بازالت های اسپیلیت و نیز اسپیلیت های به شدت دگرسان شده است. مطالعات میدانی و کاوشهای چکشی در این منطقه از رخنمون های متعدد Cu با ساختار افشان در داخل این پیکره های آذرین خبر می دهد. نکته قابل توجه دیگر تشکیل یک سنگ پوش سیلیسی به شدت برشی است (شکل ۹). سیمای کانه زایی در این ناحیه به صورت زون های اکسیده نمایان است. که دو نمونه با کد P13-MZ-66 و P13-67 از آنها برداشت شده است که به ترتیب میزان ۶/۹ و ۷۰ میلی گرم در تن Au را نشان می دهد. با استناد به این دسته نتایج شاید بتوان پیدایش کانه های مس دار را با مدل کانه زایی ماسیوسولفاید نزدیک دانست که البته اثبات حضور و یا عدم آن نیاز به مطالعات ژرف تر و دقیق تر دارد.



شکل ۱۰. مناطق واجد پتانسیل کانه‌زایی Au و نهشته چند فلزی در پهنه اسفندقه (نقشه یکصد هزار سازمان زمین شناسی)

۳. نتیجه گیری

با توجه به مطالعات انجام شده در پروژه حاضر و جمع آوری شواهد و مستندات مربوط به پتانسیل کانی‌سازی در محدوده مورد مطالعه، منابع معدنی پلی متال شناسایی شده در این پهنه، به غیر از وجود منابع معدنی Cr در بخش جنوبی، شامل پتانسیل کانی‌سازی عناصر Cu, Mn, Au, Zn و Pb و تا حدودی Ag در بخش شمالی پهنه می‌باشد. با توجه به گسترش واحدهای سنگی اولترامافیک تا مافیک در نیمه جنوبی پهنه اسفندقه، نتایج اکتشافات انجام شده بر اساس نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای ژئوشیمی و کانی‌سنگین، تنها موفق به شناسایی محدوده‌های دارای رخنمون Cr شده است که در حال حاضر به عنوان معدن در حال استخراج هستند و شاهد وجود پتانسیل منابع معدنی دیگری در این بخش نبوده‌ایم. برای عنصر Cu از حدود ۱۰۰ نمونه مینرالیزه برداشت شده در ۱۲ نمونه (با مقدار Cu بالای ۱٪) مقدار متوسط Cu برابر ۲٪ بوده است و مقدار ماگزیمم گزارش شده برای Cu برابر ۳٪ می‌باشد. برای عناصر Zn و Pb در این پهنه نتایج و شواهد بسیار جالبی بدست آمده است. بر اساس مطالعات ژئوشیمیایی شاهد پارائنز Pb با عناصر Ag, As, Ba, Bi, Cd, Cu, K, Mo, S, Sb Ta, Zn به همراه عناصر Sn, Th, U, Zr هستیم. که بیانگر پتانسیل بالای کانی‌سازی احتمالی Pb مرتبط با سیالات گرمایی مرتبط با توده‌های آذرین فلسیک است. در مورد پتانسیل کانی‌سازی احتمالی Au، مقادیر آنومال ژئوشیمیایی این عنصر در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای دارای ارتباط معنی‌داری با سایر عناصر نیست که ممکن است ناشی از خطای نسبتاً بالای این عنصر (تا حدود ۳۰٪) باشد. حداکثر مقدار طلای گزارش شده در نمونه‌های برداشت شده برابر ۲/۶ گرم در تن بوده است که در محدوده امید بخش اول و پروفیل شماره ۱۷ گزارش شده است. به غیر از نمونه فوق در دو نمونه نیز مقادیر ۱/۱ و ۱/۲ گرم در تن Au گزارش شده است. کانی‌سازی Mn در بخش شمالی پهنه بوده است. با توجه به شواهد زمین‌شناسی تیپ محتمل کانی‌سازی Mn در این پهنه از نوع Mn رسوبی-اگرالاتیو یا Mn ولکانوژن می‌تواند در نظر گرفته شود. پارائزهای عنصر Mn در این محدوده عبارتند از عناصر Be, Bi, Cd, Sr, V که بیشتر بر آنومالی‌های بخش شمال شرقی پهنه منطبق است.

منابع

- Abrams, M., Hook, S. ASTER Users Handbook, Version 2, Jet Propulsion Laboratory, 202p.
- Batanova, V. G., Suhr, G. & Sobolev, A. V. (1998). Origin of Geochemical Heterogeneity in the Mantle Peridotites from the Bay of Islands Ophiolite, Newfoundland, Canada: Ion Probe Study of Clinopyroxenes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 853-866.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential statistical applications in the earth sciences. *Geol Survey Canada Paper* 89-9:171-183
- Carranza, E., (2208). Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS.
- Carranza, E.J.M., Hale, M. 2001. Geologically Constrained Fuzzy Mapping of Gold Mineralization Potential, Baguio District, Philippines. *Natural Resources Research*, Vol. 10, No. 2.
- Ferreir, G., White, K., Griffiths, G., Bryant, r., Stefofuli, M., 2002, The mapping of hydrothermal alteration zones on the island of Levos, Greece using an integrated remote sensing dataset, *International of journal of Remote sensing*, Vol. 23, pp. 341-356.
- Fonseca, A., 2005. Podiform Chromites, British Columbia Geological Survey.
- Guocheng, P., DeVerle, P. H. (2000). Information synthesis for mineral exploration. Oxford University Press.
- Hellebrand, E., Snow, J. E., Dick, H. J. B. & Hofmann, A. W. (2001). Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites. *Nature* 410, 677-681.
- Kamenetsky, V. S., Crawford, A. J. & Meffre, S. (2001). Factors Controlling Chemistry of Magmatic Spinel: an Empirical Study of Associated Olivine, Cr-spinel and Melt Inclusions from Primitive Rocks. *Journal of Petrology* 42, 655-671.



- McCall, G. J. H. (1985a). Explanatory text of the Minab Quadrangle Map; 1:250,000; No.J13, Geological Survey of Iran, Tehran, 530pp.
- Muntean, J. L., Cline, J. S., Simon, A. C., Longo, A. A. (2010). Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposit. *Nature Geoscience* 4, 122–127.
- Rollinson, H. (2008). The geochemistry of mantle chromitites from the northern part of the Oman ophiolite: inferred parental melt compositions. *Contrib. Mineral. Petrol.* 156: 273-288.
- Sabzehi, M., 1974. Les Mélanges Ophiolitiques de Region D'Esfandagheh (Iran Meridional). *Etude Petrologique et Structurale, Interpretation Dans le Cadre Iranian, Universite de Grenoble*, 205p.
- Tangestani, M. H., & Moore, F., 2002. Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran, *International Journal of Remote Sensing*, 23, p. 4815–4826.
- Uysal, I., Sadiklar, M. B., Tarkian, M., Karsli, O., & Aydin, F. (2005). Mineralogy and composition of the chromitites and their platinum-group minerals from Ortaca (Mugla- SW Turkey): evidence for ophiolitic chromitite genesis. *Mineralogy and Petrology* 83, 219-242.
- Yousefi, M., Carranza, E.J.M., 2015a. Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping. *Computers&Geosciences* 74:97-109.