Petrological Journal

E-ISSN: 2322-2182

16th Year, No. 63, 2025, pp. 101-120

Petrological Journal

Research Article

Kuroko-type Pb-Zn sulfide deposit at Chah Gaz region, Sanandaj-Sirjan Zone, Kerman Province

Azam Zahedi[1]✉, Mehrdad Karimi[2]

[1] Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran, azamzahra1358@gmail.com

[2] Assistant Professor, Department of Geology, Islamic Azad University Shiraz Branch, Shiraz, Iran, karimimehrdad@yahoo.com

ARTICLE INFO

Received: 28 July 2025
Accepted: 22 September 2025

Keywords
Chah-Gaz
Massive Sulfide
Kuroko
Shahr-e Babak
Kerman

10.22108/ijp.2025.146146.1368

Introduction

The Chah Gaz Pb-Zn ore deposit is an inactive mineralization located approximately 70 km southwest of Shahr-e Babak in Kerman Province, Iran. It lies within the geologically significant Sanandaj-Sirjan zone, a region renowned for its massive sulfide deposits and thus the focus of extensive previous research (Mousivand et al., 2007; Badrzadeh, 2009; Mousivand, 2011). Numerous consulting engineering companies have studied the Chah Gaz deposit in the past, primarily with an exploratory focus (Sabzehei and Afrooz, 1989; Kavoshgaran Co., 1990; Tehran Padir Co., 1991; Minook Co., 1993; Sabzehei et al., 1993). The most recent scientific research by Mousivand (2011) indicated that, based on a brine pool model, the Chah Gaz deposit closely resembles the siliciclastic felsic type or Bathurst-type deposits, such as those in the Bathurst mining district in Canada and the Iberian Pyrite Belt in Spain and Portugal. The deposit also shows strong geological similarities to volcano-sedimentary volcanogenic Kuroko deposits (Soleimani Alh-Dadi, 2017). Kuroko-type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits are significant submarine hydrothermal mineralizations formed in back-arc basins, associated with bimodal volcanic activity. They are key sources of base metals such as copper and zinc, characterized by low- to medium-temperature hydrothermal fluids and bimodal magmatism. These genetic features are essential for identifying exploration targets and understanding metallogenic processes in extensional tectonic settings (Ohmoto, 1996).

The principal objectives of this study were to investigate the genesis of the deposit through an integrated approach, including geochemistry, petrography, trace element distribution, and fluid inclusion studies. Additionally, the Chah Gaz deposit is compared to global massive sulfide analogues based on key characteristics such as host rock sequences, mineral paragenesis, and tectono-magmatic setting.

✉ Corresponding Author

To cite this article: Zahedi, A,. and Karimi, M (2025) Kuroko-type Pb-Zn sulfide deposit at Chah Gaz region, Sanandaj-Sirjan Zone, Kerman Province. Petrological Journal, 16(3), 101-120.

Method

The concentrations of 23 trace elements and 14 rare earth elements were determined in the ore and metamorphic host rocks using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), conducted by ZarAzma Mineral Studies. Six ore samples were analyzed for gold content using Fire Assay and ICP methods. Eleven samples of ore and associated alteration rocks were examined via X-ray Diffraction (XRD) to identify major and minor minerals. Temperature-pressure measurements of fluid inclusions were carried out using a Linkam heating-cooling stage model THMSG600, TMS94, with a temperature range of -196 to +600 °C, equipped with a computer-linked simultaneous imaging system for video and slide recording.

Results and Discussion

Regional Geology

The Chah Gaz Pb-Zn ore deposit is situated southwest of Shahr-e Babak, within the southern Sanandaj-Sirjan structural zone. This area comprises metamorphosed rocks such as slate, schist, metarhyolite, metabasalt, and gneiss. The gneisses are likely metamorphosed Cambrian granites transformed into orthogneisses. These rocks are metamorphosed to the greenschist facies and display diverse structures including boudinage, foliation, and mylonitization. The studied host rocks are mainly weakly to moderately metamorphosed and include semi-gneiss, schist, mineralized mylonite, quartzite, metarhyolite, and metabasalt. The schists exhibit chloritic and sericitic alteration, with chlorite contributing to preferred foliation. Black slates contain mica and quartz minerals with relatively weak foliation. Rhyolites in the area have been tectonically transformed into mylonites, showing secondary mineralization such as sericite and goethite veinlets, identified by XRD due to their fine grain size.

Mineralization

Both hypogene and supergene mineralization are present. Hypogene minerals include sphalerite, galena, pyrite, and chalcopyrite, while supergene minerals comprise covellite, chalcocite, smithsonite, cerussite, malachite, and iron oxides, especially in the oxidized zone. The gangue minerals mainly consist of sericite, quartz, chlorite, feldspar, siderite, ankerite, dolomite, and barite. Pyrite is the most abundant primary sulfide in the hypogene zone, occurring as euhedral, vein, and cataclastic forms, indicating intense deformation and metamorphic processes. Secondary pyrite appears rregular and veinlet-like, with iron oxide inclusions reflecting asynchronous sulfide and oxide phases. Chalcopyrite forms after pyrite as fracture-fillings, while sphalerite is a secondary sulfide enriched in zinc. Covellite is the dominant supergene oxidation mineral, formed by the alteration of chalcopyrite along its fractures. Azurite and malachite are observed in oxidized zones alongside goethite and limonite.

Geochemistry

The highest concentrations of major elements in the host rocks are silica, aluminum, iron, potassium, and magnesium. The elevated Al_2O_3 and LOI values in the host rocks are attributed to clay alteration, resulting from the formation of minerals rich in volatile components such as illite, halloysite, montmorillonite, and other hydrated minerals, consistent with XRD results. The highest average concentrations of minor elements include zinc (5.2 wt%), lead (4.1 wt%), copper (1.9 wt%), sulfur (9.5 wt%), calcium (0.06 wt%), and barium (3.6 wt%), indicating the abundance of sulfide minerals such as galena, sphalerite, chalcopyrite, and barite. The anomalous arsenic content in most ore samples suggests the presence of gold in the area. Fire assay analysis of six sulfide ore samples revealed an average gold content of 8 ppm, exceeding the economic threshold. In contrast, the silver content in the sulfide ore is significantly below the economic grade, with an average concentration of 0.003574 wt%, compared to the economic grade of 0.01 wt%. The absence of silver in this deposit may serve as an important indicator for determining the ore deposit type (Santagulda and Hannington, 1996; Tajeddin et al., 2019).

Conclusion

The Chah Gaz deposit represents a typical Kuroko-type volcanogenic massive sulfide system formed in a back-arc basin setting, characterized by acidic volcanic host rocks, stratiform to semi-massive sulfide mineralization, and a paragenetic sequence dominated by chalcopyrite, sphalerite, galena, and abundant barite. It contains economically significant lead, zinc, and copper, with gold concentrations reaching up to 8 ppm. The mineralizing fluids exhibit moderate salinities of 10–15 wt% NaCl and are associated with intense sericitic alteration. Unlike previous classifications as Bathurst-type, Chah Gaz differs by its higher gold -to -silver ratio (~1.4), moderate fluid salinity (vs. >25 wt% NaCl in Bathurst), dominance of sulfide minerals over sulfosalts, and a distinctive abundance of barite. These geological, geochemical, and mineralogical features support the reclassification of Chah Gaz as a Kuroko-type massive sulfide deposit.

پتـــــرولوژی
شاپا الکترونیکی: ۲۱۸۲-۲۳۲۲
سال شانزدهم، شماره شصت و سوم، ۱۴۰۴، ص. ۱۰۱-۱۲۰

Petrological Journal
E-ISSN: 2322-2182
16th Year, No. 63, 2025, pp. 101-120

مقالهٔ پژوهشی

کانسار سولفیدی سرب-روی نوع کوروکو در منطقهٔ چاه‌گز، پهنهٔ سنندج-سیرجان، استان کرمان

اعظم زاهدی[۱]✉، مهرداد کریمی[۲]

[۱] استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران، azam.zahedi@gonabad.ac.ir
[۲] استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز، ایران، karimimehrdad@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کلید واژه‌ها
چاه‌گز
سولفید توده‌ای
کوروکو
شهر بابک
کرمان

چکیده

کانسار چاه‌گز، یک کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد غنی از طلاست که در لبهٔ خاوری پهنهٔ دگرگونی سنندج-سیرجان در جنوب‌باختری ایران در ۶۰ کیلومتری جنوب شهربابک جای دارد. این کانسار در مجموعه سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی دگرگون‌شده به سن ژوراسیک میانی جای دارد. سنگ‌های میزبان کانه‌زایی شامل توف ریولیتی دگرگون‌شده و متاریولیت هستند. کانه‌زایی بیشتر به شکل چینه‌سان در چندین افق در سنگ میزبان دگرگونی رخ داده است و کانی‌های سولفیدی کانسار بیشتر شامل کالکوپیریت، پیریت، اسفالریت و گالن هستند. بیشترین فراوانی فلزات پایه مربوط به عنصرهای سرب (۴/۱wt%)، روی (۵/۲wt%)، مس (۱/۹wt%) است. بررسی میانبارهای سیال نشان می‌دهد کانه‌زایی در ارتباط با یک سیال دما متوسط (۲۱۷ تا ۲۹۰ درجهٔ سانتیگراد) با شوری کم تا متوسط ۱۰ تا ۱۵ درصدوزنی معادل NaCl همراه بوده است. بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی، دگرسانی و خاستگاه سیالات در منطقهٔ چاه‌گز نشان داد این کانسار در پی فعالیت‌های آتشفشانی زیردریایی در یک پهنهٔ کمانی به‌صورت سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد نهشته شده است. مقایسه این کانسار با دیگر نهشته‌های مشابه جهانی نشان داد بیشترین شباهت را به تیپ کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد طلادار نوع کوروکو دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت چه‌بسا پتانسیل اکتشافی چشمگیری برای کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در پهنهٔ سنندج سیرجان وجود دارد.

10.22108/ijp.2025.146146.1368

مقدمه

کانسار سرب و روی چاه‌گز در استان کرمان در ۷۰ کیلومتری جنوب‌باختری شهرستان شهربابک و در جنوب‌خاوری چاه‌گز و در پهنهٔ ساختاری سنندج- سیرجان

✉نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: زاهدی، ا.، کریمی، م (۱۴۰۴) کانسار سولفیدی سرب-روی نوع کوروکو در منطقهٔ چاه‌گز، پهنهٔ سنندج-سیرجان، استان کرمان. پترولوژی ۱۶ (۳)، ۱۰۱-۱۲۰.

جای دارد که در زمان صفویان فعال بوده است و سرب استخراجی این منطقه به‌شمار می‌رفته است (Sabzehei and Afrooz, 1989). پهنهٔ ساختاری سنندج- سیرجان و به‌ویژه بخش جنوبی آن به‌علت داشتن کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد گوناگون اهمیت ویژه‌ای دارد؛ به‌گونه‌ای‌که این تیپ کانسارها را افراد بسیار بررسی کرده‌اند؛ مانند کانسار غنی از طلای تیپ کوروکو[1] باریکا (Yarmohammadi et al., 2008)، کانسار مس-روی-نقره تیپ بشی بوانات (Mousivand et al., 2007)، کانسار مس- روی تیپ نوراندا سرگز (Badrzadeh, 2009). شرکت‌های مهندسین مشاور بسیاری در گذشته به بررسی کانسار چاه‌گز به‌ویژه از دیدگاه اکتشافی پرداخته‌اند (Sabzehei and Afrooz, 1989; Kavoshgaran Co., 1990; Tehran Padir Co., 1991; Minook Co., 1993; Sabzehei et al., 1993). بررسی‌های آنها نشان داد سیالات مرتبط با توده‌های نفوذی جوان به سن سنوزوییک عامل اصلی رخداد کانه‌زایی بوده‌اند که به کانه‌زایی در راستای گسل‌های اصلی در سنگ‌های دگرگونی پالئوزوییک بالایی انجامیده‌اند. تازه‌ترین بررسی‌های علمی روی کانسار چاه‌گز (Mousivand, 2011) نشان داد کانسار چاه‌گز بر پایهٔ مدل استخر شورابه‌ای بیشترین شباهت را به نهشته‌های تیپ سیلیسی کلاستیک فلسیک یا تیپ باتورست کانسارهای معدنی باتورست کانادا، و کمربند پیریتی ایبریا اسپانیا و پرتغال نشان می‌دهد. کانسارهای سولفیدی تیپ کوروکو نمونهٔ برجسته‌ای از ذخیره‌های سولفیدی توده‌ای آتشفشانی (VMS[2]) هستند که نقش مهمی در تأمین فلزات پایه، به‌ویژه مس و روی بازی می‌کنند ویژگی‌های ژنتیکی این کانسارها، در شناسایی پهنه‌های مستعد اکتشافی اهمیت فراوان دارد. در این مقاله زایش کانسار بررسی‌شده با استفاده از بررسی‌های زمین‌شیمیایی، سنگ‌نگاری و میان‌بارهای سیال شناخته می‌شود و با دیگر کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد جهانی مقایسه می‌شود.

[1] Kuroko-type
[2] volcanogenic massive sulfide

روش انجام پژوهش

برای پی‌بردن به ویژگی‌های زمین‌شیمیایی کانسار و سنگ میزبان همراه آن، تجزیه‌های زمین شیمیایی متفاوتی برای عنصرهای مختلف انجام شد. مقدار ۲۳ عنصر کمیاب و ۱۴ عنصر کمیاب درون کانسنگ و سنگ خاستگاه دگرگونی با روش طیف‌سنجی پلاسمای جفتیدهٔ القایی (ICP-MS) در شرکت دانش‌بنیان مطالعات مواد معدنی زرآزما به‌دست آورده شد (جدول ۱). برای اندازه‌گیری فراوانی عنصرهای اصلی و شماری از عنصرهای کمیاب کانسنگ‌ها و سنگ‌های میزبان، ۱۰ نمونه با دستگاه فلورسانس پرتوی X (XRF) تجزیه شدند (جدول ۲). برای بررسی میزان فراوانی طلا، ۶ نمونه کانسنگ سولفیدی به روش Fire assay در آزمایشگاه زرآزما در تهران تجزیه شدند (جدول ۳). برای ارزیابی کانی‌شناسی کیفی و شناسایی فازهای اصلی و فرعی در کانسنگ و سنگ‌های دگرسان همراه آن، شمار ۱۱ نمونه به روش XRD بررسی شدند (جدول ۴). برای شناسایی خاستگاه سیال گرمابی در کانسار چاه‌گز، ریزدماسنجی میانبارهای سیال روی کانی کوارتز انجام شد. اندازه‌گیری‌های دما-فشارسنجی با صفحه گرمایش- سرمایش مدل THMSG600, TMS94 ساخت شرکت Linkam با تغییرات دمایی ۶۰۰+۱۹۶- درجهٔ سانتیگراد و سامانهٔ نمایش همزمان متصل به رایانه با تهیه فیلم و اسلاید انجام شد (جدول ۵).

زمین‌شناسی منطقه

کانسار چاه‌گز در نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زردو جای گرفته است (شکل ۱) (Sabzehei, 1994). این محدوده با رویدادهای زمین‌ساختاری فراوانی روبرو بوده است. به باور سرکاری‌نژاد و عزیزی (Sarkarinejad and Azizi, 2008)، بخش جنوبی پهنهٔ سنندج-سیرجان از سنگ‌های دگرگون و دگریخت‌شده در تریاس میانی تا پسین و همزمان با فاز کوهزایی سیمرین پیشین ساخته است. کانسار چاه‌گز روی واحدهای دگرگونی مانند اسلیت، شیست، متاریولیت و متابازالت جای گرفته است (شکل ۱-B).

جدول ۱. مقادیر عنصرهای اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی (بر پایهٔ ppm) در کانسنگ و سنگ میزبان دگرسان وابسته به آن در کانسار چاه‌گز.

Table 1. Major, trace, and rare earth element contents (in ppm) in the ore and associated altered host rock from the Chah-Gaz deposit.

Sample No.	CH-29	CH-26	CH-23	CH-17	CH-16	CH-15	CH-3	CH-1
	Pb-Zn Ore	Chy Ore	Meta Basalt	Py-Chy-host	Py-Pb-Zn Ore	Shale	Green Schist	Schist
Nb	3.7	<1	<1	9.2	1.1	10.5	3.2	2.7
Nd	13.5	<0.5	1.4	24.4	2.6	28.2	14.5	19.6
Ni	22	4	12	14	12	52	36	17
P	191	268	77	357	71	443	1044	425
Pb	20896	>3%	>3%	170	>3%	83	66	192
Pr	4.48	0.34	0.66	7.72	1.12	7.96	3.43	5.46
Rb	34	<1	7	54	15	86	19	36
S	2914	>3%	>3%	>3%	>3%	11446	83	139
Sb	23.3	33.2	41.8	4.1	25.7	5.9	2.1	1.4
Sc	0.9	<0.5	<0.5	6	<0.5	14.1	31.8	6.9
Se	1.48	3.98	9.79	0.85	7.62	<0.5	<0.5	<0.5
Sm	2.82	0.17	0.29	4.09	0.41	5.19	3.45	3.75
Sn	1.7	1.5	0.7	1.7	1	2.3	0.7	1.5
Sr	854	3	10	29	5	74	409	37
Ta	0.18	<0.1	<0.1	0.78	<0.1	0.7	0.22	0.12
Tb	0.29	<0.1	<0.1	0.32	<0.1	0.36	0.39	0.32
Te	<0.1	<0.1	0.35	0.31	0.22	<0.1	<0.1	<0.1
Th	14.46	0.98	2.07	15.71	1.85	11.14	1.78	6.53
Ti	256	<10	<10	1406	<10	4463	5000	4247
Tl	2.01	1.1	1.85	1.2	1.4	2.11	0.13	0.28
Tm	0.11	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	0.14	<0.1
U	5.7	1.1	1.5	3.5	0.7	2.9	<0.5	1
V	21	8	33	48	32	164	235	85
W	1.8	1.6	1.2	6.4	1.1	3.7	0.6	0.7
Y	7.1	<0.5	0.6	6.9	0.8	4	10.8	5.6
Yb	1.2	<0.05	0.1	0.8	0.1	0.6	0.9	0.7
Zn	>3%	>3%	>3%	10245	>3%	352	117	117
Zr	52	7	15	79	15	45	31	41
Ag	4.7	26.4	76.3	0.1	66.5	<0.1	<0.1	<0.1
Al	47988	1746	8601	65774	17257	91119	77832	54929
As	34.2	40.8	0.1	9.9	1.6	69.3	7.1	21.5
Ba	5028	19	21	465	200	1300	190	393
Be	1.3	0.4	0.4	1.5	0.6	2.8	0.8	1.5
Bi	3.5	20.6	169.8	3.1	165.4	0.4	<0.1	0.1
Ca	1790	132	365	1102	191	2738	85424	27878
Cd	6.2	399.5	677.4	0.7	566.7	4.1	0.4	0.2
Ce	49	3	5	76	9	77	29	51
Co	9.5	2.2	3.2	15.6	4.1	17.6	33.3	5

جدول ۱. ادامه.

Table 1. Continued.

Sample No.	CH-29	CH-26	CH-23	CH-17	CH-16	CH-15	CH-3	CH-1
	Pb-Zn Ore	Chy Ore	Meta Basalt	Py-Chy-host	Py-Pb-Zn Ore	Shale	Green Schist	Schist
Cr	12	12	8	54	9	134	159	64
Cs	4.4	<0.5	<0.5	2.2	0.7	3.2	1.5	2.2
Cu	1784	36627	1919	44	812	90	170	23
Dy	1.69	0.12	0.17	1.68	0.22	1.54	2.43	1.62
Er	0.97	0.06	0.11	0.92	0.12	0.61	1.33	0.82
Eu	0.9	<0.1	<0.1	0.69	<0.1	1.25	1.12	0.84
Fe	46965.2	51794	66293.6	47923.5	>10%	42401.3	46972.4	24275.7
Gd	2.38	0.17	0.24	3.25	0.35	3.82	3.35	3.17
Hf	1.25	<0.5	<0.5	1.64	<0.5	1	<0.5	0.53
In	<0.5	0.86	0.77	<0.5	4.56	<0.5	<0.5	<0.5
K	10878	<100	2639	20496	5363	36437	14637	18579
La	31	1	3	47	6	39	13	26
Li	41	<1	3	49	6	32	43	20
Lu	0.13	<0.1	<0.1	0.13	<0.1	0.1	0.12	0.11
Mg	13727	137	2132	>2%	3508	11004	>2%	5989
Mn	2110	68	289	914	295	286	2088	468
Mo	13.2	40.2	78.7	7.5	63.1	1.2	0.7	1.2
Na	1753	300	586	1354	378	2660	17828	12754

جدول ۲. داده‌های اکسید عنصرهای اصلی (بر پایهٔ درصدوزنی) و فرعی (بر پایـهٔ ppm) بـه روش XRF در کانسـنگ و سـنگ میزبـان دگرسان وابسته به آن در کانسار چاه‌گز.

Table 2. XRF data for major element oxides (in wt%) and minor elements (in ppm) in the ore and associated altered host rock from the Chah-Gaz deposit.

Sample No.	CH-4	CH-5	CH-6	CH-9	CH-10	CH-12	CH-24	CH-26	CH-29	CH-30	Average
SiO_2	22.63	42.96	25.74	36.52	23.21	45.63	56.03	32.12	30.52	24.96	34.032
Al_2O_3	4.45	37.34	1.56	35.86	7.32	26.03	24.52	0.86	18.15	6.98	16.307
Fe_2O_3	2.65	0.92	0.87	2.66	9.68	1.52	4.56	8.84	11.02	12.32	5.504
CaO	0.15	0.32	0.24	0.07	0.21	0.01	0.08	0.03	0.13	0.12	0.136
Na_2O	0.08	0.06	0.03	0.26	0.05	0.56	0.62	0.07	0.05	0.03	0.181
K_2O	0.75	0.05	0.16	0.83	1.86	6.53	6.59	0.03	0.96	0.31	1.807
MgO	0.29	0.26	0.27	1.25	0.39	0.9	1.32	0.02	17.88	0.08	2.266
TiO_2	0.073	0.183	0.048	0.41	0.06	0.31	0.274	0.017	0.271	0.051	0.1697
MnO	0.008	0.006	0.123	0.014	0.007	0.005	0.009	0.006	0.315	0.006	0.0499
P_2O_5	0.008	0.005	0.004	0.006	0.005	0.009	0.004	0.008	0.006	0.005	0.006
L.O.I	10.69	17.25	16.05	7.51	9.62	14.26	4.91	2.62	10.72	10.48	10.411

جدول ۲. ادامه.

Table 2. Continued.

Sample No.	CH-1	CH-3	CH-15	CH-17	CH-4	CH-16	CH-23	CH-26	CH-29	Average
Zn	117	117	352	1024	103300	55458	51045	198670	54805	51654
Pb	192	66	83	170	73100	46450	122003	105900	20896	40984
Cu	23	170	90	44	44900	812	1919	48300	1784	10893
Ba	393	190	1300	465	168700	200	21	100	13000	20485
S	139	83	11446	32000	46100	30000	189000	190432	20896	57788
Ca	27878	85424	2738	1102	1000	191	365	132	1790	13402
Fe	24276	46972	42401	47923	18500	100000	66294	51794	46965	494581
Ni	17	36	52	14	34	12	12	4	22	22.6
Cr	64	159	134	54	5	9	8	12	12	50.8
Ag	0.1	0.1	0.1	0.1	8	66.5	76.3	26.4	4.7	22.46
Ti	4247	5000	4463	1406	400	10	10	10	256	1756
As	21.5	7.1	69	9.9	18	1.6	0.1	40.8	34.2	18.9
Rb	36	19	86	54	39	15	7	1	34	32
Co	5	33	18	16	18	4.1	3.2	2.2	9.5	12
U	1	0.5	2.9	3.5	1	0.7	1.5	1.1	5.7	1.98
Th	6.53	1.78	11	16	9	1.85	2.07	0.98	14.5	7.07

جدول ۳. مقدار طلا در کانسنگ سولفیدی چاه‌گز (به روش Fire assay).

Table 3. Gold contents in Chah Gaz sulfide ore (determined by Fire Assay method).

Sample %	CH-19	CH-26	CH-6	CH-18	CH-23	CH-28	Average
Clark (ppm)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Economic grade (ppm)	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10	5.5
Sample grade (ppm)	3.86	0.107	4.61	0.05	3.95	0.098	7.99

جدول ۴. داده‌های کانی‌شناسی کیفی (XRD) در کانسنگ و سنگ میزبان دگرسان وابسته به آن در کانسار چاه‌گز.

Table 4. Qualitative mineralogical (XRD) results in the ore and associated altered host rock from the Chah-Gaz deposit.

Sample No.	CH-30	CH-26	CH-24	CH-12	CH-11
Main Mineral	Cerussite, Quartz	Quartz, Sphalerite, Galena, Chalcopyrite	Quartz, Muscovite	Quartz, Muscovite	Cerussite, Quartz, Muscovite, Goethite
Secondary Mineral	Barite, Muscovite, Goethite	Pyrite	Pyrite, Chlorite	Cerussite, Jarosite	Montmorillonite, Barite
Name Alteration	Phyllic to Oxidation alteration	Phyllic alteration, Propylitic alteration, Silicification	Phyllic alteration, Propylitic alteration	Phyllic alteration, Oxidation alteration	Phyllic alteration, oxidation alteration, Argillic alteration

جدول ۴. ادامه.

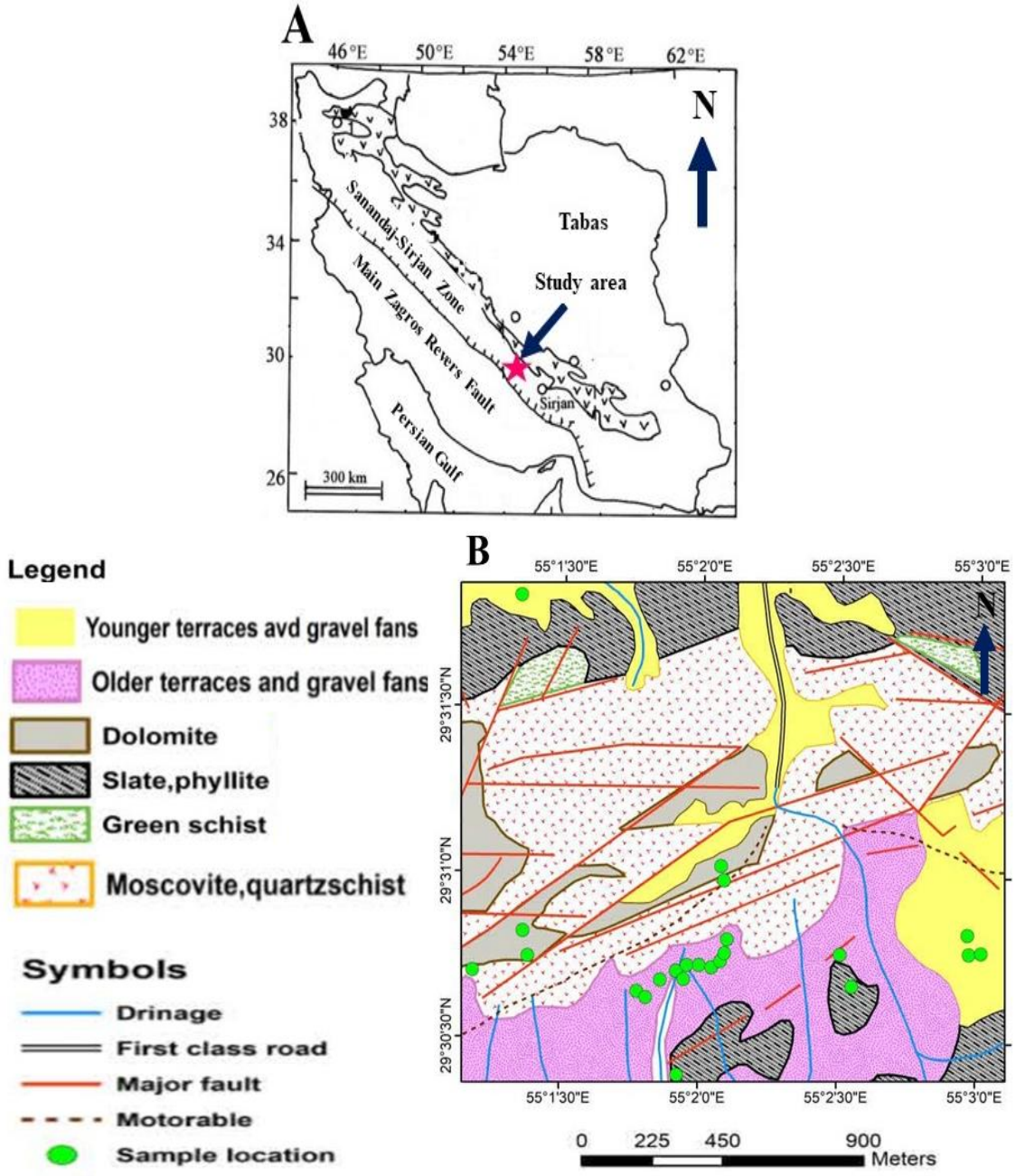
Table 4. Continued.

Sample No.	Main Mineral	Secondary Mineral	Name Alteration
CH-10	Cerussite, Quartz, Muscovite	Montmorillonite, Barite, Azurite, Malachite	Phyllic, Oxidation alteration
CH-9	Natroalunite, Chlorite, Quartz, Halloysite	Muscovite	Advanced Argillic
CH-8	Cerussite, Goethite	Quartz, Chlorite, Hematite	High oxidation alteration, Propylitic alteration
CH-6	Cerussite, Quartz	Azurite, Malachite	Oxidation alteration
CH-5	Halloysite	-	Advanced Argillic alteration
CH-4	Cerussite, Quartz, Barite, Smithsonite	Muscovite, Chlorite, Malachite, Azurite	Phyllic alteration, Propylitic alteration, Supergene oxide alteration

جدول ۵. نتایج بررسی میانبارهای سیال در کوارتزهای کانسار چاه‌گز.

Table 5. Fluid inclusion results in quartz from the Chah Gaz deposit.

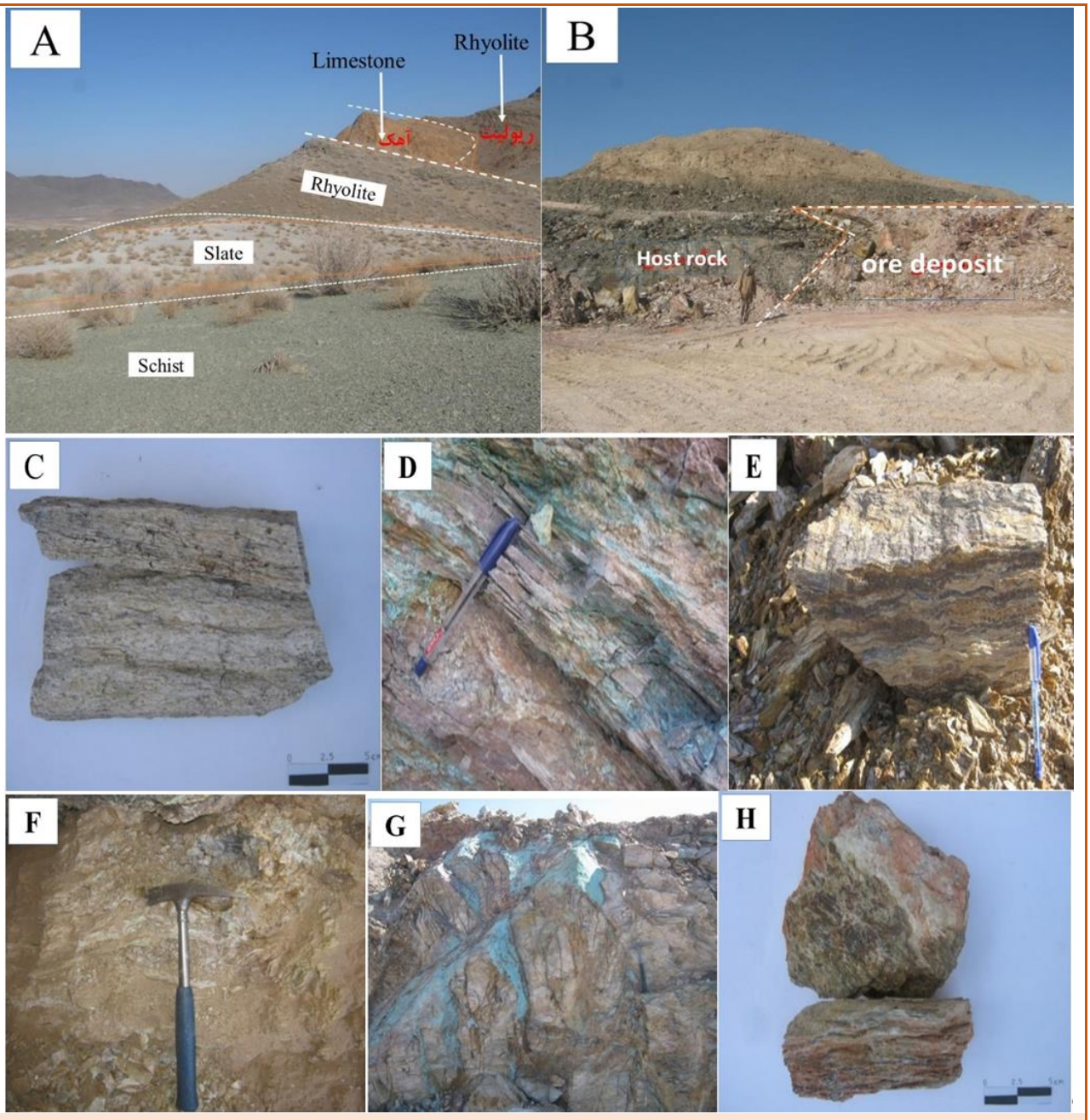
Sample No.	Size (µm)	Filling degree (%)	T (°C)	Tmi (°C)	Salinity (wt.% NaCl)	Pressure (bar)
CH-31	8	20	450	-5.6	8.649	6208
	12	85	294.4	-8.8	12.63	6268
	12	90	213.1	-8.6	12.402	6264
	9	90	252.9	-7.5	11.101	6244
	8	85	243.2	-4.3	6.815	6183
	9	90	308.1	-7.4	10.978	6242
	8	85	229.8	-8.3	12.055	6259
	11	90	272.3	-12.4	16.333	6328
	16	85	283.4	-7.9	11.583	6251
	15	95	302.1	-9.5	13.408	6280
	11	15	210.5	-14.3	18.03	6357
	8	95	279.2	-13.6	17.423	6346
	11	70	321.3	-10.9	14.876	6303
	8	90	358.8	-4.2	6.669	6181
	11	25	345.4	-7.3	10.855	6241
CH-25	13	90	188.7	-5.2	8.098	6201
	11	95	139.5	-4.1	6.522	6179
	10	15	384.8	-6.3	9.583	6222
	17	95	279.8	-9.1	12.967	6273
	10	5	393.7	-12.3	16.24	6326
	9	85	280.4	-7.9	11.583	6251
	6	85	223.5	-5.9	9.054	6214
CH-14	14	10	218.9	-3.1	5.012	6159
	13	90	265.5	-7.1	10.606	6237
	15	90	422.8	-4.8	7.536	6193
	11	90	236.9	-6.7	10.101	6229
	11	10	289.6	-11	14.977	6305
	12	90	166.0	-6.2	9.452	6220
	15	20	225.4	-4.2	6.669	6181
	17	80	278.6	-8.8	12.63	6268
	18	70	386.9	-9.7	13.624	6283
	14	30	423.2	-12.2	16.145	6324
	17	90	232.2	-5.7	8.785	6210
	16	85	210.0	-5.9	9.054	6214
Average	-	68.7	282.7	-7.85	11.25	6248.35



شکل ۱. A) جایگاه منطقهٔ بررسی‌شده در بخش جنوبی پهنهٔ ساختاری سنندج- سیرجان؛ **B**) نقشهٔ زمین‌شناسی ناحیه‌ای ساده‌شده منطقهٔ چاه‌گز، در جنوب شهربابک، استان کرمان (برگرفته از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ زردو با تغییرات (Sabzehei, 1994).

Figure 1. A) The location of the studied area in the southern part of the Sanandaj–Sirjan structural zone; **B**) Simplified regional geological map of the Chah Gaz area, south of Shahr-e Babak, Kerman Province (adapted from the 1:100,000 Zardou geological map, with modifications (Sabzehei, 1994)).

رخنمون مادهٔ معدنی به‌صورت توده‌های عدسی شکل در مجاورت ریولیت‌های دگرگون‌شده دیده می‌شود (شکل B۲). شواهد صحرایی در منطقهٔ چاه‌گز نشان داده است شرایط دگرگونی در محدودهٔ گسترده‌ای، سنگ‌شناسی منطقه را تحت‌تأثیر قرار داده است. ساخت گنیسی، شبه گنیسی، بودیناژ، رگه‌ای و رگچه‌ای از مهم‌ترین ساخت‌های دیده شده در سنگ میزبان و کانسنگ هستند. گنیس‌های دیده‌شده چه‌بسا گرانیت‌های دگرگون‌شدهٔ کامبرین هستند که تحت‌تأثیر فازهای دگرگونی بعدی به ارتوگنیس تبدیل شده‌اند (شکل C-۲).



شکل ۲. تصویرهای صحرایی از سنگ میزبان و کانسنگ در منطقهٔ چـاه‌گـز. **A**) تـوالی سـنگ‌شناسـی محـدودهٔ معـدنی به‌گونه‌ای‌کـه رویدادگی باعث برون‌زدگی آهک‌های کرتاسه از درون واحدهای قدیمی سنگ‌های آذرین شده است؛ **B**) همبری تدریجی مادهٔ معدنی در کنار سنگ میزبان در محل حفرهٔ معـدن؛ **C**) فابریـک شبه‌گنیسـی در سـنگ میزبـان؛ **D**) سـاخت برگـوارگی در شیسـت‌های منطقـهٔ بررسی‌شده؛ **E**) ساخت چین‌خورده در شیست‌های سبز؛ **F**) ساخت بودیناژ حاصل از کوارتز مقاوم درون سنگ میزبان با مقاومت کمتر؛ **G**) پیدایش کربنات و سولفات مس به‌صورت رگه‌ای در سنگ میزبان؛ **H**) متاریولیت‌های دارای کانی‌های سرب و روی.

Figure 2. Field photographs of the host rock and ore from the Chah-Gaz area. **A**) Lithological sequence of the mineralized zone, showing that overthrusting has caused Cretaceous limestones to outcrop within older igneous units; **B**) Gradual contact between the ore material and the host rock at the mine pit; **C**) Gneissic-like fabric in the host rock; **D**) Foliation structure in the schists of the studied area; **E**) Folded structure in the green schists; **F**) Boudinage structure formed by resistant quartz within the less competent host rock; **G**) Occurrence of copper carbonates and sulfates as veins and veinlets within the host rock; **H**) Metarhyolites containing lead- and zinc-bearing minerals.

فرایندهای زمین‌ساختی فراوانی در پهنهٔ سنندج-سیرجان به برگوارگی و چین‌خوردگی در سنگ‌های دگرگونی منطقه به‌ویژه شیست‌های سبز انجامیده است (شکل‌های D-۲ و E-۲). در منطقهٔ بررسی‌شده قطعات کوارتزی مقاوم در میان شیست‌های نامقاوم تحت‌تأثیر شرایط زمین‌ساختی حاکم بر منطقه پیدایش ساخت بودیناژ داده‌اند (شکل F-۲). ساخت‌های رگه‌ای و رگچه‌ای فراوان در سنگ میزبان با حضور سولفات‌ها و کربنات‌های مس و اکسیدهای آهن روی داده‌اند (شکل G-۲). مشاهدات صحرایی نشان می‌دهند سنگ‌های منطقه بررسی‌شده تا حد رخسارهٔ شیست سبز دگرگون‌شده‌اند و بیشتر شامل مسکوویت شیست، اسلیت و میلونیت هستند. کانی‌های سرب و روی در متاریولیت‌های منطقه دیده می‌شوند (شکل H-۲).

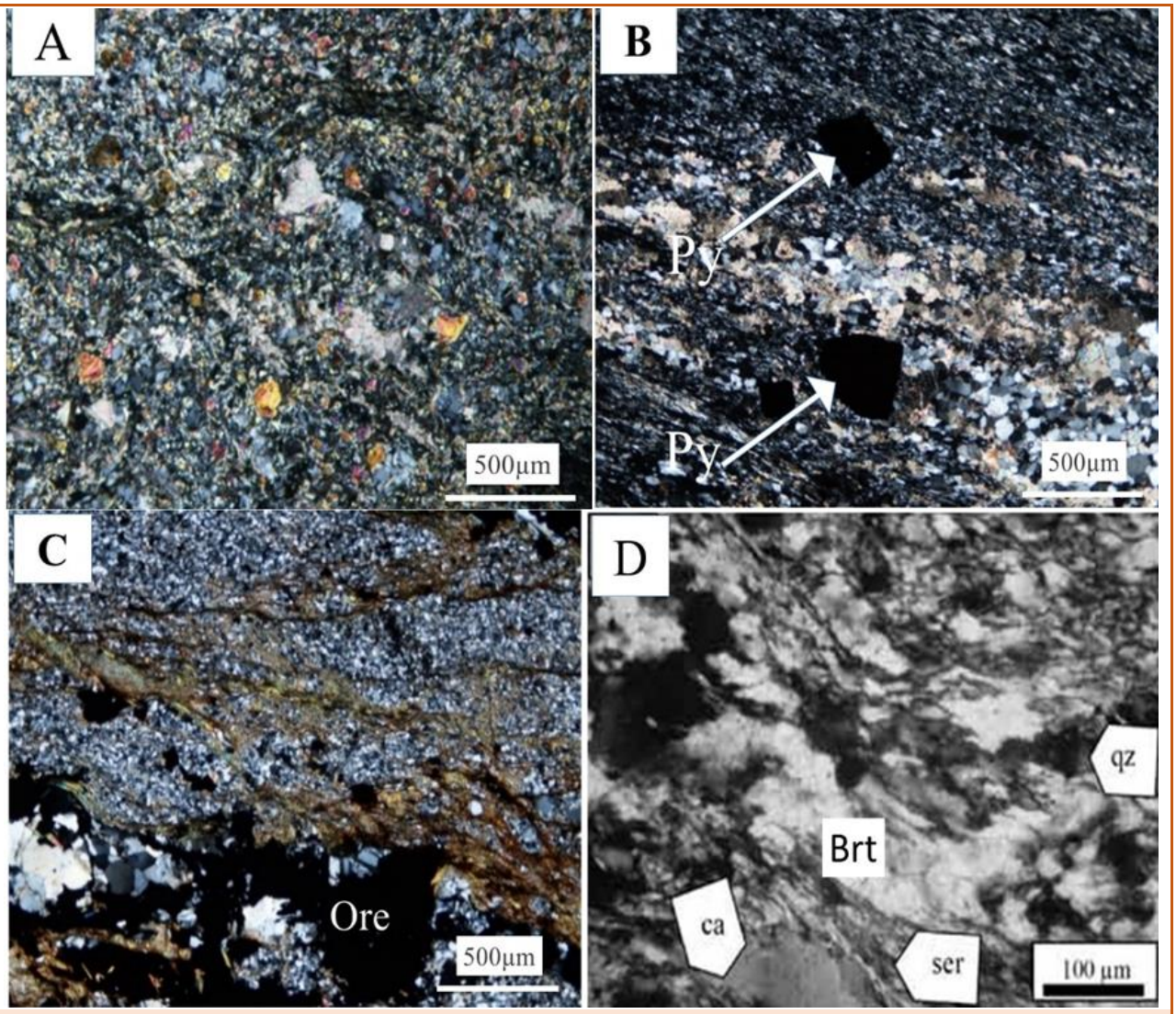
سنگ‌نگاری

سنگ‌های میزبان بررسی‌شده بیشتر سنگ‌های دگرگونی درجات ضعیف تا متوسط هستند که شامل شیست، اسلیت و میلونیت‌های کانه‌دار هستند. شیست‌های منطقه دگرسانی کلریتی و سریستی را نشان می‌دهند و به‌علت وجود کلریت در سنگ جهت‌یافتگی ترجیحی را نشان می‌دهد (شکل A-۳). اسلیت‌های سیاه رنگ در منطقه کانی‌های میکایی و کوارتز دارند که جهت‌یافتگی نسبتاً ضعیفی را نشان می‌دهد. بلورهای پیریت در اسلیت‌ها تقریباً به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند (شکل B-۳). ریولیت‌های منطقه تحت‌تأثیر فشارهای زمین‌ساختی میلونیتی شده‌اند که کانه‌زایی ثانویه مانند سروزیت و گوتیت به‌صورت رگچه‌ای در آن دیده شده است و به‌علت ریزدانه‌بودن شناسایی آنها با روش XRD میسر شده است (شکل C-۳). باریت نیز به‌صورت بی‌شکل در میلونیت‌ها به‌همراه کوارتز، سریسیت و کلسیت حضور دارد (شکل D-۳).

کانه‌زایی

مادهٔ معدنی در کانسار چاه‌گز به‌صورت پیکره‌های لایه‌ای و عدسی‌مانند رخنمون یافته است که با ساختار لایه‌بندی سنگ‌های درونگیر همخوانی دارد. این پیکره‌ها که ضخامت متغیری از چندین سانتیمتر تا ۴ متر و طولی تا ۵۰ متر دارند، دچار چین خوردگی، گسل‌خوردگی و ساخت بودیناژ شده‌اند. شکل کانه‌زایی در کانسار چاه‌گز به‌صورت عدسی و استراتیفرم است. مادهٔ معدنی بافت توده‌ای، نیمه‌توده‌ای، نواری، لامینه، افشان و رگه-رگچه‌ای دارد. کانه‌زایی در کانسار چاه‌گز به دو صورت هیپوژن و سوپرژن دیده می‌شود. کانه‌زایی هیپوژن در کانسار چاه‌گز شامل اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت است و کانه‌زایی سوپرژن شامل کوولیت، کالکوسیت، اسمیت‌زونیت، سروزیت، مالاکیت و اکسیدهای آهن نیز به‌ویژه در پهنه اکسیدان دیده می‌شوند. کانی‌های باطله بیشتر شامل سریسیت، کوارتز، کلریت، فلدسپار، سیدریت، آنکریت، دولومیت و باریت هستند.

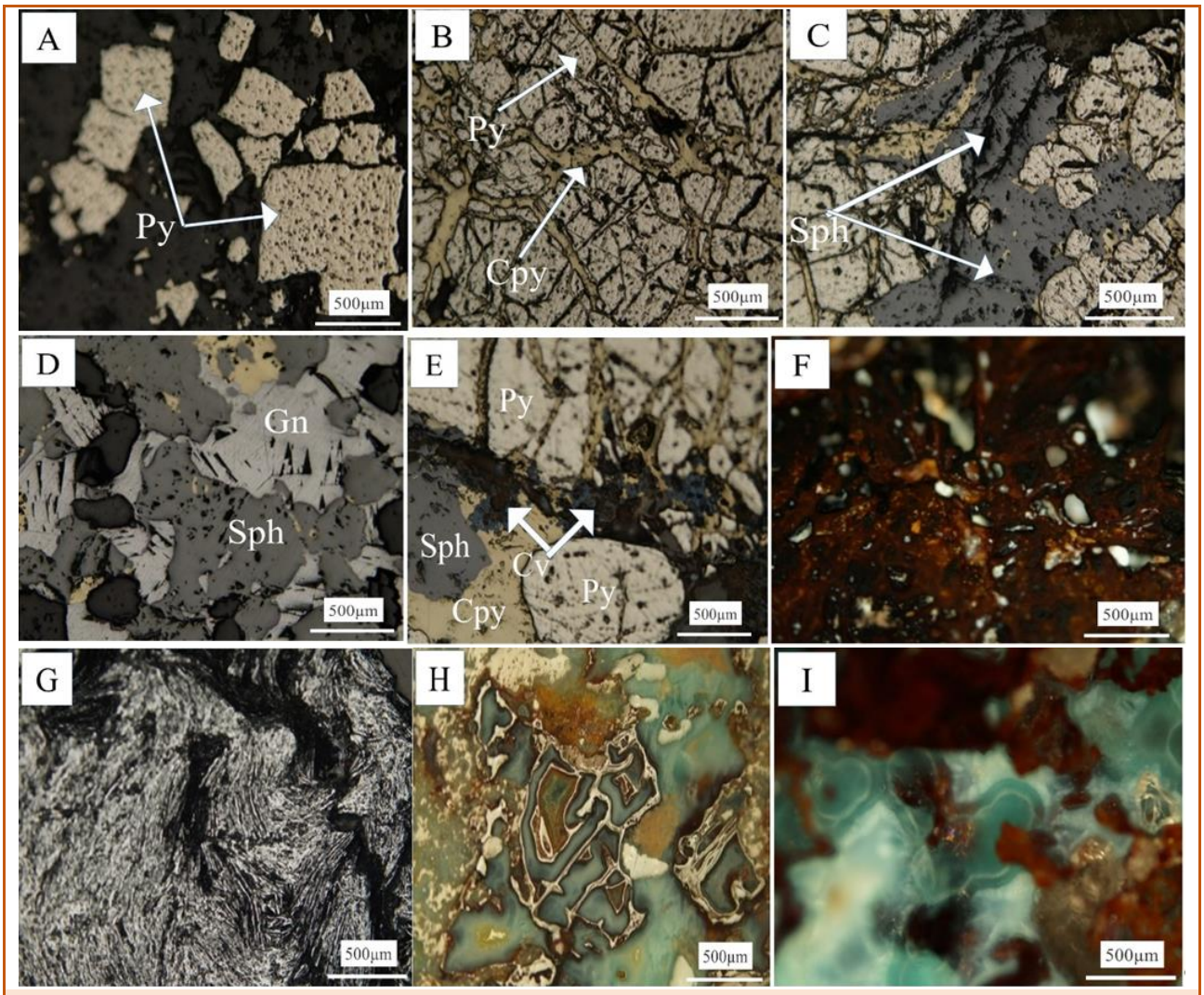
پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی اولیه در پهنهٔ هیپوژن است که به دو صورت شکل‌دار (پیریت اولیه)، رگه‌ای و کاتاکلاستی (پیریت ثانویه) دیده می‌شود. پیریت‌های کاتاکلاستی نشان‌دهندهٔ شدت فرایندهای دگرگونی در منطقه است که در پی رویدادهای دینامیکی تشکیل شده است و خردشدگی شدید را نشان می‌دهد (شکل A -۴). پیریت‌های ثانویه به‌صورت بی‌شکل و رگچه‌ای دیده می‌شوند که به اکسیدهای آهن تجزیه شده‌اند. کالکوپیریت به‌همراه پیریت اولیه، کوولیت، گالن و اسفالریت دیده شده است و به‌صورت شکافه‌پرکن پس از پیدایش پیریت اولیه پدید آمده است (شکل B-۴). اسفالریت در فاز سولفیدی ثانویه پس از پیدایش پیریت‌ها پدید آمده است و غنی‌سازی عنصر روی در فاز کانه‌زایی ثانویه انجام شده است.



شکل ۳. تصویرهای میکروسکوپی (در XPL) از سنگ‌های میزبان بررسی‌شده **A**) شیست‌های دگرسان شده به کلریت و سریسیت **B**) اسلیت‌هایی که دارای کانه‌زایی پیریت به‌صورت پراکنده هستند؛ **C**) ریولیت میلونیتی شده دارای کانی‌های فلزی در زمینه‌ای از کوارتز، فلدسپار؛ **D**) حضور باریت بی‌شکل در میلونیت‌ها در همراهی با کانی‌های کوارتز، سریسیت و کلسیت که دچار دگریختی شده‌اند (Mosivand et al., 2011) (نام اختصاری کانی‌ها از وار (Warr, 2021) برگرفته شده است).

Figure 3. Photomcrographs (in XPL) of the host rocks **A**) Schists altered to chlorite and sericite;s **B**) Slates with scattered pyrite mineralization; **C**) Mylonitized rhyolite containing metallic minerals in a matrix of quartz, feldspar; **D**) The presence of Anhedral barite in mylonites accompanies deformed minerals such as quartz, sericite, and calcite (Mosivand et al., 2011) (Mineral abbreviations are adapted from Warr (2021)).

بافت پرکنندهٔ فضای خالی و حضور میانبارهای اسفالریت و گالن در پیریت نشان‌دهندهٔ تأخیر زمانی غنی‌سازی کانسار است (شکل ۴- C). گالن به‌صورت شکل‌دار و بیشتر همراه اسفالریت دیده شده است. درهم‌رشدی گالن در اسفالریت نشان‌دهندهٔ تأخیر زمانی پیدایش گالن نسبت به اسفالریت و دیگر سولفیدهای فلزی است. کشیدگی رخ سه‌گوش‌شکل گالن نشان‌دهندهٔ فرایندهای زمین‌ساخت اثرگذار در منطقه است (شکل ۴- D). کوولیت فراوان‌ترین کانی منطقه اکسیداسیون در پهنهٔ سوپرژن است و در پی دگرسانی سوپرژن کالکوپیریت پدید آمده است و در راستای شکستگی‌های کالکوپیریت جانشین شده است (شکل ۴- E).



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی از کانسنگ بررسی‌شده. **A**) پیریت‌های ثانویه و کاتاکلاستیک که نشان‌دهندهٔ فرایند دگرگونی هستند؛ **B**) پیدایش کالکوپیریت به‌صورت شکافه‌پرکن که بعد ازپیدایش پیریت ایجاد شده است؛ **C**) پیدایش اسفالریت به‌صورت شکافه پرکن که نشان دهنده تأخیر زمانی در پیدایش این کانی پس از کانه‌زایی پیریت و کالکوپیریت است؛ **D**) درهم رشدی گالن در اسفالریت و رخ تیغه‌ای (سه‌گوش) منحصر به فرد در گالن و طویل شدگی آن در اثر فرایندهای زمین‌ساختی؛ **E**) درهم رشدی کوولیت و کالکوپیریت؛ **F**) پیدایش هماتیت پفکی در فرایند مارتیتی‌شدن در نواحی اکسیدان با شدت هوازدگی بالا را نشان می‌دهد که منجر به پیدایش بافت حفره‌ای در درون اکسیدهای اولیه آهن شده است؛ **G**) حضور هماتیت با بافت جارویی یا بادبزنی (اسپکیولاریت) که نشان دهنده ی شرایط اکسیدان بالا است؛ **H**) ایجاد ساختار جعبه‌ای در اثر آبشویی ثانویه سولفیدهای آهن و تبدیل آن به گوتیت و لیمونیت؛ **I**) مالاکیت‌های دیده شده بافت کلوفرمی (گل کلمی) دارند (نام اختصاری کانی‌ها از وار (Warr, 2021) برگرفته شده است).

Figure 4. Microscopic images of the studied ore. **A**) Secondary and cataclastic pyrites indicating metamorphic processes; **B**) Chalcopyrite formed as fracture fillings after pyrite formation; **C**) Sphalerite formed as fracture fillings, indicating a time delay in its formation after pyrite and chalcopyrite mineralization; **D**) Intergrowth of galena in sphalerite and a unique blade-like (triangular) habit in galena, elongated due to tectonic processes; **E**) Intergrowth of covellite and chalcopyrite; **F**) Formation of spongy hematite during martitization in oxidizing zones with intense weathering, leading to porous texture within primary iron oxides; **G**) Presence of hematite with broom or fan-shaped (specularite) texture indicating highly oxidizing conditions; **H**) Formation of boxwork structure due to secondary leaching of iron sulfides and their transformation into goethite and limonite; **I**) Visible malachite occurrences exhibiting colloform (cauliflower-like) textue (Mineral abbreviations are adapted from Warr (2021)).

مگنتیت در کانسنگ اولیه در اثر فرایند سوپرژن که در دمای پایین و عمق کم‌تر از ۵۰ متر رخ می دهد تبدیل به هماتیت شده است. گاهی شدت هوازدگی به اندازه‌ای بوده است که تنها قطعات کوچکی از مگنتیت اولیه باقی مانده است و بافت حفره‌ای به سنگ می‌دهد که به این بافت مارتیت-هماتیت پفکی (هماتیت حفره ای) گفته می‌شود (Cook., 1998) (شکل F-۴). اسپیکولاریت به‌همراهی کالکوپیریت، ارسنوپیریت و گالن در کانسار چاه‌گز تشکیل شده است (شکل G-۴) که می‌تواند پیامد سیالات حاصل از نفوذی‌های کلسیمی-قلیایی باشد (Chen et al., 2023 and Fan et al., 2021). گوتیت در دگرسانی سوپرژن به‌همراه دیگر اکسیدهای آهن پیدایش بافت جعبه‌ای را داده است (شکل H-۴). این بافت در نتیجه آبشویی ثانویه سولفیدهای آهن و تبدیل آن به گوتیت و لیمونیت تشکیل شده است. آزوریت و مالاکیت کانی‌های کربناتی مس در پهنهٔ اکسیدان هستند که به‌همراه گوتیت و لیمونیت دیده می‌شوند. مالاکیت‌های دیده‌شده بافت کلوفرمی (گل کلمی) دارند (شکل I-۴). این بافت در اثر حضور محلول‌های سطحی که باعث آبشویی کربنات‌های موجود در پهنهٔ سطحی شده است باعث پیدایش مالاکیت به‌صورت دوایر متحدالمرکز شده است (Barrie et al., 2009).

توالی پاراژنزی

توالی پاراژنزی محتمل با توجه به شواهد صحرایی و بررسی‌های کانه‌نگاری به‌صورت سه مرحله ۱) رسوب‌گذاری اولیه رسوبات آتشفشانی زیردریایی، ۲) دگرگونی ناحیه‌ای منطقه و اکسایش و ۳) غنی‌شدگی سوپرژن تشریح می‌شود. در مرحله اولیه، اجزای تخریبی شامل کوارتز، فلدسپار و کانی‌های رسی به‌همراه فرایندهای آتشفشانی زیردریایی اجزای معدنی اولیه را به‌صورت سولفیدی در حوضه نشست داده‌اند و دیاژنز اولیه انجام شده که در این مرحله احتمالا کانی‌های اولیه شامل پیریت‌های اولیه، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، مگنتیت، ته نشست داشته‌اند و پاراژنز اولیه را تشکیل داده‌اند. بیشتر ساختارهای توده‌ای و نواری در این گونه کانه‌ها دیده می‌شود. در مرحله دوم فرایندهای دگرگونی در حد رخسارهٔ شیست‌سبز بیشتر سنگ‌های منطقه را تحت‌تأثیر خود قرار داده و باعث کانه‌زایی مجدد شده است. شواهد آن تبلور مجدد و رشد پورفیروبلاست‌های نسل دوم است به طوری که پورفیروبلاست‌های نسل دوم گاهی بقایای اولیه کانسار را در خود احاطه کرده‌اند مانند در هم رشدی پیریت‌ها و کالکوپیریت و یا رشد دوباره کالکوپیریت در شکاف‌های کاتاکلاستی پیریت‌ها که پیامد شکستگی زمین‌ساختی پیریت‌های اولیه در فرایندهای دگرگونی بوده است (شکل ۴). در نهایت پس از فرایند دگرگونی در اثر فرایندهای سوپرژن و آبشویی یک غنی‌سازی ثانویه در پهنه‌های سطحی به وقوع پیوسته است که نتایج آن در کانسار چاه‌گز در میکاشیست‌های هوازده به‌صورت کانی‌های رسی و افق اکسیدان دیده می‌شود که در نتیجه این فرایند مجموعه کانی‌های مالاکیت، اسمیت‌زونیت، سروزیت شکل گرفته‌اند.

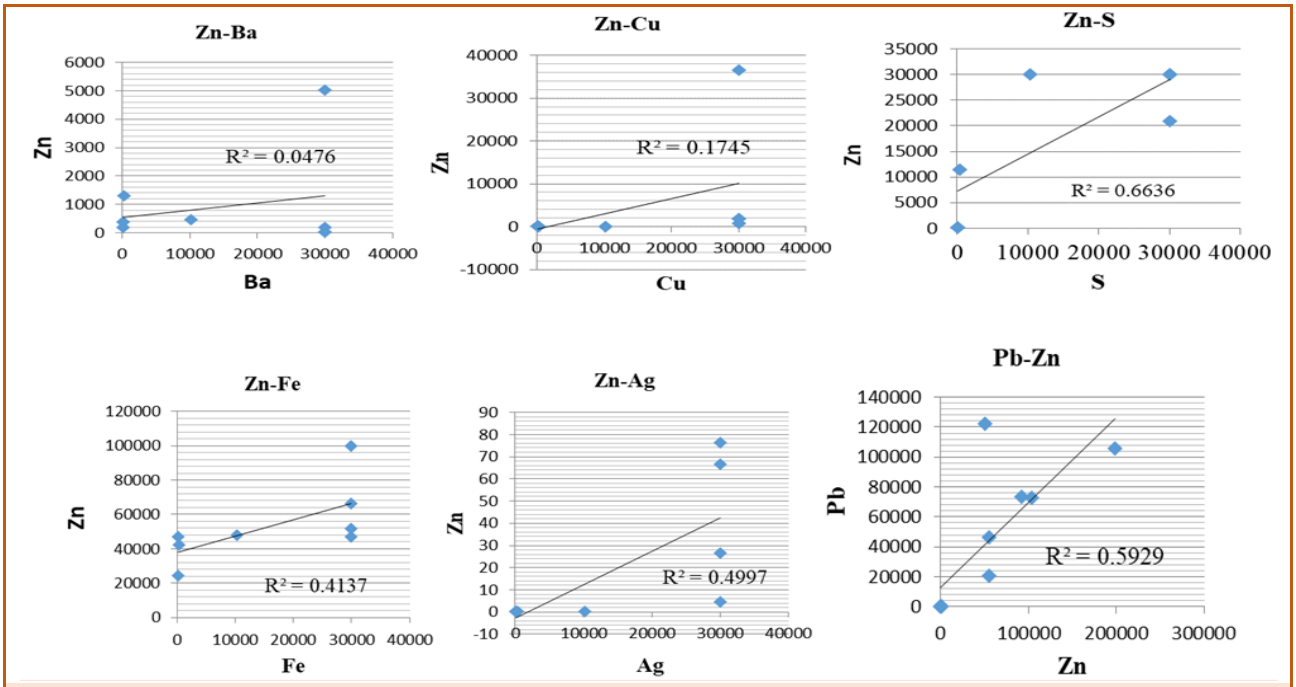
دگرسانی

مشاهدات صحرایی، سنگ‌نگاری و نتایج XRD (جدول ۴) از سنگ میزبان و کانسنگ سولفیدی نشان داد مهم ترین دگرسانی‌های دیده شده در منطقه شامل دگرسانی سریسیت، آرژیلیک و کلریتی هستند. در یال شمال‌باختری معدن شواهد صحرایی نشان‌دهندهٔ حضور دگرسانی رسی در شیست‌های منطقه است که بررسی‌های سنگ‌نگاری و نتایج XRD حضور کانی های مونت‌مریلونیت، هالویزیت و سریسیت را تایید می‌کند (جدول ۴). حضور کانی‌های میکایی نشان‌دهندهٔ دگرسانی سریسیتیک در شیست‌های منطقه است (شکل A-۳). دگرسانی کلریتی در متاریولیت‌های منطقه بررسی‌شده، در بیوتیت‌ها و آمفیبول‌ها دیده شده است که در نتایج XRD حضور کلریت‌ها تایید شده است. به طور کلی نتایج کانی‌شناسی کیفی (XRD) روی نمونه‌های بررسی‌شده به دو فاز اصلی و فرعی تقسیم شده است (جدول ۴). کانی‌های اصلی شناخته شده در این تجزیه به چهار گروه سیلیکاتی، کربناتی، سولفیدی و اکسیدی دسته‌بندی می‌شود (جدول ۴). در گروه سیلیکات‌ها، بیشترین مقدار به کوارتز، مسکوویت، کلریت،

هالوینریت و مونت موریلونیت اختصاص داده می‌شود. کربنات‌های شناسایی شده در پهنهٔ اکسیدان شامل سروزیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت و آزوریت است که بیشترین کانی کربناتی مربوط به سروزیت است. مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی و سولفاتی دیده‌شده به‌ترتیب شامل پیریت، اسفالریت، گالن، کالکوپیریت، باریت و جاروسیت هستند. بیشترین میزان اکسیدها و هیدروکسیدها مربوط به کانی‌های گوتیت و هماتیت است.

زمین‌شیمی

مقادیر عنصرهای اصلی، فرعی و کمیاب در کانسنگ و سنگ میزبان دگرسان‌شده در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است. بیشترین درصد عنصرهای اصلی در سنگ میزبان دگرسان شده به سیلیسیم، آلومینیم، آهن، پتاسیم و منیزیم تعلق دارد. مقادیر بالای Al_2O_3 و LOI در سنگ میزبان می‌تواند پیامد دگرسانی رسی در نتیجه پیدایش کانی‌های غنی از مواد فرار مانند ایلیت، هلوییزیت، مونت مریلونیت و دیگر کانی‌های آبدار است که منطبق با نتایج XRD در سنگ‌های میزبان است (جدول ۴). بیشترین عنصرهای فرعی در کانسنگ مربوط به عنصرهای روی (۵/۲wt%)، سرب (۴/۱wt%)، مس (۱/۱wt%)، گوگرد (۵/۸wt%)، آهن (۵wt%) و باریم (۲/۱wt%) است (جدول‌های ۱ و ۲). همبستگی مثبت عنصرهای سرب و روی نشان‌دهندهٔ خاستگاه مشترک این دو عنصر با یکدیگر است (شکل ۵).



شکل ۵. نمودار همبستگی عنصرهای Pb، Ag، Ba، Cu و Fe با عنصر Zn.

Figure 5. Correlation diagram of Pb, Ag, Ba, Cu, and Fe elements with Zn.

همبستگی مثبت روی و سرب با گوگرد نشان‌دهندهٔ حضور کانی‌های گالن و اسفالریت در کانسنگ سولفیدی است (شکل ۵). همبستگی مثبت روی با عنصرهای نقره، مس آهن و سرب نشان‌دهندهٔ شباهت گرایش زمین‌شیمیایی این عنصرها و تحرک همزمان آن با فلزات پایه در شرایط فیزیکوشیمیایی محیط است که با همراهی کانی‌های گالن و اسفالریت با پیریت و کالکوپیریت اثبات می‌شود (شکل ۵). مقدار کم عنصرهای نیکل، کبالت و کروم در کانسار چاه‌گز ارتباط کانه زایی سرب و روی در سنگ‌های حد واسط و اسیدی را در منطقه توجیه می‌کند. وجود مقدارهای غیرعادی آرسنیک در بیشتر کانسنگ‌ها نشان‌دهندهٔ حضور طلا در منطقه است (جدول ۳). ازاین‌رو، تجزیهٔ ۶ نمونه کانسنگ سولفیدی به روش Fire

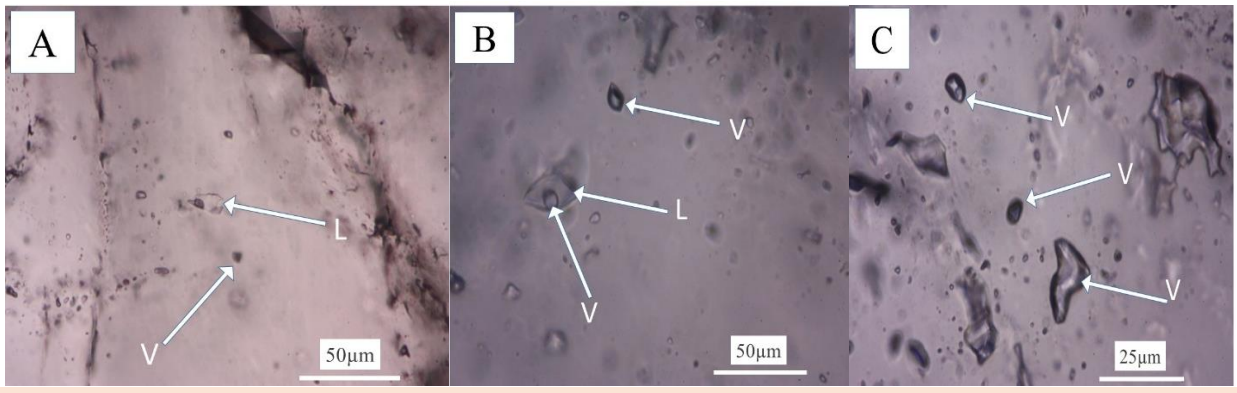
assay نشان داد میانگین میزان طلا در کانسنگ سولفیدی برابر ۸ppm است که این میزان طلا از عیار اقتصادی طلا فراتر است (Ahmadi, 2019) (جدول ۳)؛ اما میزان نقره در کانسنگ سولفیدی تفاوت بسیاری با عیار اقتصادی آن دارد (Dergacheva and Eremin, 2018)؛ به‌گونه‌ای‌که میانگین نقره در کانسنگ سولفیدی برابر ۰/۰۰۳۵۷۴wt% است که تفاوت بسیاری با عیار اقتصادی نقره (۰/۰۱wt%) دارد. نبود نقره در این کانسار خود چه‌بسا از شواهد مهم در تعیین تیپ کانسار باشد (Santagulda and Hannington, 1996; Tajeddin et al., 2019).

زمین‌دماسنجی میان‌بارهای سیال

آزمایش‌های سرمایش و گرمایش در تعیین دمای همگن‌شدگی (Th) و دمای ذوب نهایی یخ (Tm) در میان‌بارهای سیال دو فازی اولیه در رگه‌های کوارتزی در ریولیت‌های دگرگون‌شده انجام شد که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده‌اند. درجهٔ شوری میان‌بارهای سیال دو فازی بدون نمک‌طعام، بر پایهٔ دمای ذوب نهایی یخ از طریق معادلات بودنار (Bodnar and Sterner, 1985) با فرض سیستم $NaCl-H_2O$ به‌دست آورده شده است (جدول ۵). بیشتر میانبارهای سیال در کانسار چاه‌گز، دو فاز فراوان گازی و مایع-گاز هستند (شکل ۶). دامنهٔ تغییرات دمای ذوب آخرین قطعهٔ یخ (Tm) در میانبارهای سیال دو فازی از ۳/۱- تا ۱۴/۳- درجهٔ سانتیگراد تغییر می‌کند (جدول ۵). این دماها به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ شوری کم تا متوسط معادل ۵/۱ تا ۱۸/۰۳ درصدوزنی معادل نمک طعام هستند. بر پایهٔ نمودار شکل ۷ می‌توان چنین نتیجه گرفت کانه‌زایی در ژرفای بالای ۱۶۰۰ متر در بازهٔ دمایی ۴۵۰ درجهٔ سانتیگراد آغاز شده است و با کم‌شدن دما، کانه‌زایی کم‌کم در دمای نزدیک به ۲۱۷ تا ۲۹۵ درجهٔ سانتیگراد و در ژرفای ۶۵۰ تا ۳۰۰ متر روی داده است. در پایان تا دمای ۱۳۶ درجهٔ سانتیگراد کانه‌زایی در ژرفای کم به پایان رسیده است. در نمودار دوتایی میزان شوری در برابر دمای همگن‌شدگی (Kesler, 2005) خاستگاه سیالات گرمابی را می‌توان پیش‌بینی کرد (شکل ۸). همان‌گونه‌که در شکل ۸ دیده می‌شود، بیشتر میانبارهای سیال کانسار چاه‌گز در محدودهٔ آب‌های اقیانوسی و دگرگونی جای می‌گیرند.

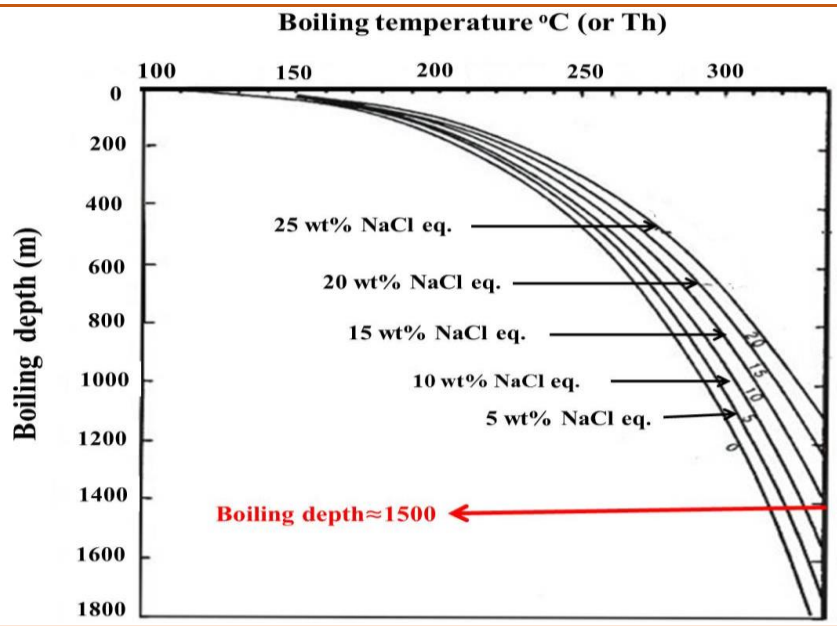
بررسی زایش کانسار چاه‌گز

کانسارهای سولفید توده‌ای به‌ویژه نوع سولفید توده‌ای میزبان آتشفشانی (VMS)، بر پایهٔ ویژگی‌هایی مانند توالی سنگ‌های میزبان، کانی‌های همایند و فرایندهای تکتونوماگمایی با کانسارهای سولفید توده‌ای جهانی مقایسه می‌شوند (Xu et al., 2024). کانسار چاه‌گز بر پایهٔ ویژگی‌های یادشده همانند دو نوع از کانسارهای سولفید توده‌ای نوع کوروکو و نوع باتورست است (جدول ۶).



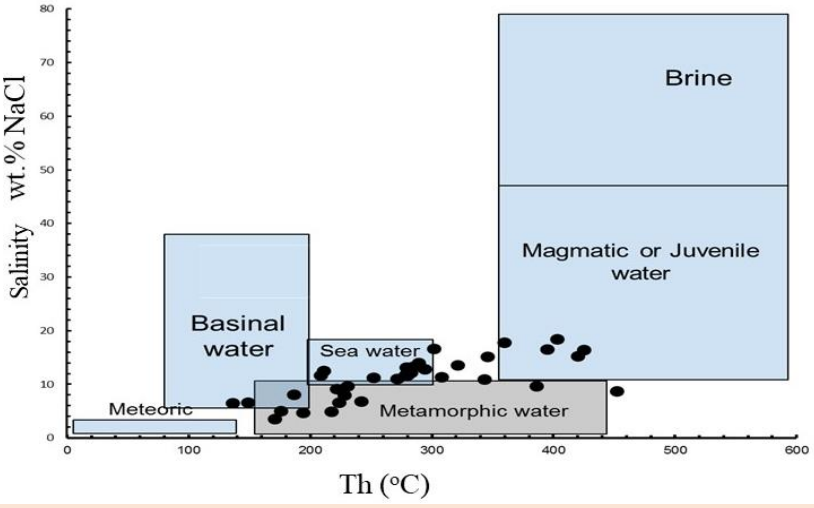
شکل ۶. تصویرهای میکروسکوپی از میان‌بارهای سیال در رگهٔ کوارتزی در کانسار چاه‌گز (V: بخار؛ L: مایع).

Figure 6. Photomicrographs of fluid inclusions in quartz veins of the Chah Gaz deposit (Abbreviations: L: liquid; V: vapor).



شکل ۷. برآورد ژرفای جوشش با کمک منحنی‌های جوشش H_2O-NaCl در برابر ژرفا (Hass, 1971) در کوارتزهای کانسار چاه‌گز.

Figure 7. Determination of boiling depth using depth versus H_2O-NaCl boiling curves plot (Hass, 1971) in the quartz from the Chah Gaz deposit.



شکل ۸. برآورد نوع سیال کانسنگ‌ساز با کمک نمودار دمای همگن‌شدگی در برابر میزان شوری (برگرفته از Kesler, 2005).

Figure 8. Determination of ore-forming fluid type using homogenization temperature versus salinity plot (adapted from Kesler, 2005).

کانسار چاه‌گز با توجه به جای‌گرفتن در پهنهٔ پشت‌کمانی (Soleimani Alh-Dadi, 2017; Mousivand, 2010)، میزبان‌های آتشفشانی اسیدی، الگوی کانه‌زایی استراتیفرم و عدسی‌شکل، و توالی پاراژنتیکی غالب شامل کالکوپیریت، اسفالریت، گالن و باریت فراوان ویژگی‌های شاخصی از کانسارهای سولفیدی توده‌ای نوع کوروکو را نشان می‌دهد. این کانسار عیارهای اقتصادی چشمگیری از سرب، روی و مس را دارد و مقدار طلای آن تا ۸ppm می‌رسد. همچنین، شوری سیال‌های کانه‌زا در بازهٔ ۱۰ تا ۱۵ درصدوزنی NaCl جای دارد و سنگ‌های میزبان دچار دگرسانی سریسیتیک شدید شده‌اند. بررسی‌های پیشین (Mousivand, 2010) این کانسار را از شمار ذخیره‌های نوع باتورست رده‌بندی کرده‌اند؛ اما یافته‌های پژوهش کنونی نشان‌دهندهٔ تفاوت‌های چشمگیر با این رده‌بندی است. نسبت طلا به نقره در کانسار چاه‌گز

نزدیک به ۱/۴ppm است؛ اما در ذخیره‌های باتورست نسبت نقره به طلا بیشتر است. افزون‌بر این، بر پایهٔ الگوی استخر نمکی که موسیوند (Mousivand, 2010) پیشنهاد کرده است، در بیشتر موارد، شوری سیال‌های باتورست از ۲۵ درصدوزنی NaCl بیشتر است؛ اما کانسار چاه‌گز شوری ۱۰ تا ۱۵ درصدوزنی NaCl نشان می‌دهد.

جدول ۶. مقایسه کانسار چاه‌گز با کانسارهای سولفید توده‌ای تیپ کوروکو در ژاپن و کانسارهای منطقه معدنی تیپ باتورست در کانادا (Ohmoto, 1996; Goodfellow et al., 2003; Mercier-Langevin et al., 2011; Tajeddin et al., 2019; Xu et al., 2024).

Table 6. Comparison of the Chah-Gaz ore deposit with the typical Kuroko-type massive sulfide deposits in Japan and Batorst-type mining district deposits in Canada (Ohmoto, 1996; Goodfellow et al., 2003; Mercier-Langevin et al., 2011; Tajeddin et al., 2019; Xu et al., 2024).

Feature	Kuroko-type	Bathurst-type	Chah-Gaz deposit
Formation Environment	Submarine volcanic arcs, predominantly felsic volcanic rocks (felsic > mafic) in back-arc basins	Rifted continental margins and back-arc basins with mixed felsic volcanic and sedimentary rocks (felsic > mafic)	back-arc basins
Host Rock Composition	Dominantly felsic volcanic rocks with subordinate mafic	Mixed volcanic and sedimentary rocks, with significant felsic volcanic dominance and sedimentary intercalations	Rhyolite, Metamorphic rock
Deposit Structure	Stratiform massive sulfide lenses with barite-rich caps; underlying stockwork zones; slumped/redeposited ore	Stratiform massive sulfide lenses with stockwork and disseminated sulfides; abundant barite	Stratiform massive sulfide lenses
Main Mineralization	Pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, barite, Au	Pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, barite, Ag	Pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, barite, Au
Metal Zoning and Ratios	Strong vertical zoning: Cu-rich base, Zn-Pb-rich top; Au and Ag present	Pb-Zn rich, Zn/Pb >1; Cu moderate; Ag elevated	Cu-rich base, Zn-Pb-rich top; Au and Ag present
Alteration	Silicification, sericitization, chloritization; zeolites, montmorillonite	Sericitization, silicification; chlorite alteration; abundant barite	Silicification, sericitization, chloritization
Salinity of Ore Fluids	low to medium salinities	Moderate salinity	low to medium salinities
Global Examples	Hokuroko (Japan), Kidd Creek (Canada), Penn (USA)	Bathurst Mining Camp (Canada), Buchans (Canada)	

از نظر توالی کانی‌زایی، ذخیره‌های باتورست با حضور غالب سولفوسالت‌ها شناخته می‌شوند؛ اما توالی پاراژنتیک در کانسار چاه‌گز بیشتر شامل کانی‌های سولفیدی است. افزون‌بر این، فراوانی بالای باریت در چاه‌گز ویژگی متمایزی است که با ویژگی‌های ذخیره‌های نوع کوروکو همخوانی دارد. مجموع شواهد زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی، نشان‌دهندهٔ رده‌بندی کانسار چاه‌گز به‌عنوان یک ذخیره سولفیدی توده‌ای نوع کوروکو به جای نوع باتورست است.

برداشت

با توجه به شواهد زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی، مانند جایگاه زمین‌ساختی کانسار که شباهت بسیاری به حوضه‌های پشت‌کمانی دارد، میزان شوری متوسط سیالات معدنی و نسبت بالای طلا به نقره که ویژگی مهمی در تمایز ذخیره‌های سولفیدی است، کانسار چاه‌گز را می‌توان یک نمونه بارز از ذخیره‌های سولفیدی توده‌ای آتشفشان‌زاد (VMS) نوع کوروکو طلادار دانست. همچنین، بازهٔ دمای پیدایش کانسار که ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجهٔ سانتیگراد است و وجود دگرسانی‌های سریسیتیک گسترده در میزبان‌های سنگی از ویژگی‌های متمایز این نوع ذخیره است.

توالی پاراژنتیک غالب کانی‌های کالکوپیریت، اسفالریت و گالن همراه با باریت فراوان نشان‌دهندهٔ شرایط خاص کانه‌زایی در این کانسار است. همهٔ این عوامل در کنار هم، به نزدیکی چاه‌گز و ذخیره‌های کوروکو انجامیده‌اند و نشان می‌دهند این کانسار نمونه‌ای از ذخیره‌های سولفیدی آتشفشان‌زاد با پتانسیل اقتصادی بالاست و می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای بررسی‌های اکتشافی و ارزیابی کانسارها در پهنه‌های مشابه باشد.

Reference

Ahmadi, M.R. (2019) Cutoff grades optimization in open pit gold mines. Journal of Mining Science, 55, 123-135. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.12.001

Badrzadeh, Z. (2009) Petrology and geochemistry of pillow basaltic lavas in northwest Jiroft with special attention to Cu-Zn (VMS) mineralization associated. 350 p. PhD thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (In Persian).

Barrie, C. D., Boyce, A. J., Boyle, A. P., Williams, P. J., Blake, K., Wilkinson, J. J., Lowther, M., McDermott, P., and Prior, D. J. (2009) On the growth of colloform textures: a case study of sphalerite from the Galmoy ore body, Ireland. Journal of the Geological Society, 166(3), 563-582. https://doi.org/10.1144/0016-76492008-080

Bodnar, R.J., and Sterner, S.M. (1985) Synthetic fluid inclusions in natural quartz. II. Application to PVT studies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49(9), 1855–1859. https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90080-8

Chen, G., Yang, X., Ke, C., Tang, Y., and Chen, M. (2023) The shallow marine VMS copper deposit of Yushui, Eastern Guangdong, South China: Evidence from geology, geochronology and geochemistry. Research Square, https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3501335/v1

Cook, N.J. (1998) Transformation of magnetite to hematite and its influence on the geochemistry of iron formations. Economic Geology, 93 (3), 405-420. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00144.x

Dergacheva, A. L., and Eremin, N. I. (2018) Volcanogenic Massive Sulfide Deposits Enriched in Gold. Geologiya, 2018(3), 3–11, https://doi.org/10.3103/S014587521804005

Fan, X., Sun, F., Xu, C., Xin, W., Wang, Y., and Zhang, Y. (2021) Genesis of Harizha Ag–Pb–Zn deposit in the eastern Kunlun Orogen, NW China: Evidence of fluid inclusions and C–H–O–S–Pb isotopes. Resource Geology, 71(1), 51–70, https://doi.org/10.1111/rge.12256

Goodfellow, W. D., McCutcheon, S. R., and Peter, J.M. (2003) Massive sulfide deposits of the Bathurst mining camp, New Brunswick and northern Maine. Society of Economic Geologists. Economic Geology Monograph 11, 930 p. https://doi.org/10.5382/Mono.11

Hass, J.L. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. Economic Geology, 66, 940-946. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.6.940

Kavoshgaran Consulting Engineers Co (1990) Introduction to geology and mineralogy of Pb–Zn at Chah Gaz and preparation of 1:5000 map, 210 p. Tehran, Iran (In Persian).

Kesler, E.S (2005) Ore-Forming Fluids. Elements., 1, 13-18, https://doi.org/10.2113/gselements.1.1.13

Mercier-Langevin, P., Hannington, M. D., Dubé, B., and Bécu, V. (2011) The gold content of volcanogenic massive sulfide deposits. Mineralium Deposita, 46, 509–539. https://doi.org/10.1007/s00126-010-0300-0

Minook Consulting Engineers Co. (1993) Final report on processing and analysis of geochemical data in the Chah Gaz area, 1:5000 geochemical survey, detailed Pb–Zn exploration project, Ministry of Mines and Metals, 150 p (In Persian).

Mosivand, F., Rastad, E., Emami, M. H., Peter, J., and Solomon, M. (2011) Volcanogenic massive sulfide (VMS) Zn–Pb–Cu mineralization of Bathurst type in the Chah Gaz area, south of Shahrbabak, Sanandaj-South Sirjan Zone. Earth Sciences, 21(82), 151–164. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (In Persian).

Mousivand, F. (2003) Mineralogy, geochemistry and genesis of copper mineralization in the volcanic-sedimentary complex of Sourian in Bavanat area, Fars Province. 300 p. MSc thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (In Persian).

Mousivand, F. (2010) Geology, geochemistry and formation model of Zn-Pb-Cu deposit of Chah-Gaz and comparison with volcanogenic massive sulfide Cu-Zn-Ag deposit of Bavanat in Sanandaj-Sirjan zone. 505 p. Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (In Persian).

Mousivand, F., Rastad, E., Hoshino, K., Watanabe, M. (2007) The Bavanat Cu-Zn-Ag orebody: First recognition of a Besshi-type VMS deposit in Iran. Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, 183, 297–315. https://doi.org/10.1127/0077-7757/2007/0075

Ohmoto, H. (1996) Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: The Kuroko perspective. Ore Geology Reviews, 10, 135- 177. https://doi.org/10.1016/0169-1368(95)00021-6

Sabzehei, M. (1994) Geological map of the Zardu area, scale 1:100,000, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.

Sabzehei, M. and Afrooz, A. (1989) Geological framework report of the Chah Gaz Pb–Zn deposit and proposed semi-detailed and detailed exploration program. 70 p. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (In Persian).

Sabzehei, M., Eshraghi, S., and Roshanravan, J. (1993) 1:100000 Zardo map. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (In Persian).

Santagulda, F., and Hannington, M. D. (1996) Characteristics of gold mineralization in volcanogenic massive sulphide deposits of the Notre Dame Bay area, central Newfoundland. Canadian Journal of Earth Sciences, 33(2), 286–302. https://doi.org/10.1139/e96-024

Sarkarinejad, K. and Azizi, A. (2008) Slip partitioning and inclined dextral transpression along the Zagros Thrust System, Iran. Journal of Structural Geology, 30, 116-136. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.06.008

Soleimani Alh-Dadi, S. (2017) Geochemical study and genesis of the polymetallic Chah-Gaz ore deposit, Sanandaj–Sirjan structural zone. 200 p. M.Sc. thesis, Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran (In Persian).

Tajeddin, H. A., Rastad, E., Yaghoubpour, A., Maghfouri, S., Peter, J. M., Goldfarb, R. J., and Mohajjel, M. (2019) The Barika gold-bearing Kuroko-type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. Ore Geology Reviews, 113, 103081. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103081

Tajedin, H.A., Rastad, E., Yaghoubpour, A., Maghfouri, S., Goldfarb, R., and Mohajjel, M. (2019) The Barika gold-bearing Kuroko-type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. Ore Geology Review, 113, 103081. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103081

Tehran Padir Consulting Engineers Co. (1991) Geophysical exploration using IP and RS methods at Chah Gaz mine, northwest Sirjan. 100 p. Ministry of Industry, Mine and Trade, Tehran, Iran (In Persian).

Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. Mineralogical Magazine, 85, 291–320. https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43

Xu, H., Yang, Y., Ding, H., and Jiang, S. (2024) Classification of volcanogenic massive sulfide deposits in North Qilian, China: Evidenced from lithostratigraphy and geodynamic setting. Ore Geology Reviews, 173, 106228. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106228

Xu, Z., Wang, Y., Zhang, Q., and Li, H. (2024) Classification of volcanogenic massive sulfide deposits in North Qilian Orogenic Belt, NW China. Ore Geology Reviews, 173, 103228, https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106228

Yarmohammadi, A., Rastad, E., Mousivand, F. and Watanabe, M. (2008) Barika Au-Ag- (Zn-Pb-Cu) deposit: First recognition of gold-rich Kuroko-type VMS mineralization in Iran. 33rd International Geology Congress, Oslo, Norway.