

Mineralogy, petrography, geochemistry of magnetite ore and sulfide minerals and the possible model of mineralization at Anomaly#3, Gol- e- Gohar, iron mine, Sirjan (Kerman)

Moslem Badavi¹, Habibeh Atapour^{2*} and Mussa Mohammadi³

^{1,2} Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid, Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³ Gohar Zamin Mining and Industrial Company, Sirjan, Kerman, Iran

Abstract

The Gol-e-Gohar anomaly#3 of Sirjan was initially formed by synchronous submarine basaltic volcanism and sedimentary rocks (basalt, shale, dolomite, sandstone, marl, chert-iron hydroxide-oxides) during Neoproterozoic (Ediacaran) and subsequently metamorphosed to greenschist facies during Cimmerian orogeny. The anomaly contains 643 million tons iron ore with an average grade of 52.70% Fe, 0.76% S and 0.11% P and is enclosed by alternation of quartzite, sericite schist, chlorite schist, talc schist, biotite schist, actinolite schist. Magnetite occurs as massive, banded, cataclastic and disseminated ore and is associated with pyrite, minor chalcopyrite and bornite. Pyrite as magnetite, occurs as layered, banded, folded and cataclastic within the magnetite crystals. Minor minerals are tourmaline, apatite, zircon and garnet. Geochemical data demonstrate that enrichment of Cu, Pb, Co, Sn, As and Sb in magnetite ore is 2-10 times higher than the crustal abundance. The enrichment of Cu, Mo, Pb, Zn, Cr, Ni, Co, As and Sb in sulfide minerals is 3-67 magnitudes higher than the crustal abundance. The alternation of different schist bands with banded magnetite-pyrite ores, the presence of dropstones and Al-Fe-Mn, V-Ti as well as the V/Ti-Ni/Ti diagrams indicate that the iron mineralization in anomaly#3 is similar to the Ediacaran-type banded iron formation.

Key words: geochemistry, sulfide minerals, magnetite ore, banded iron formation, Ediacaran, Gol-e-Gohar anomaly#3, Sirjan

* atapour@uk.ac.ir

کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی کانسنگ مگنتیتی و کانی‌های سولفیدی و پیشنهاد الگوی احتمالی کانی‌زایی آهن در آنومالی شماره ۳ معدن گل‌گهر سیرجان (کرمان)

مسلم بدوی^۱، حبیبه عطاپور^{۲*} و موسی محمدی^۳

^{۱،۲} بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳ شرکت سنگ آهن گهر زمین، سیرجان، کرمان، ایران

چکیده

آنومالی شماره ۳ گل‌گهر سیرجان نخست در سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی (بازالت، شیل، دولومیت، ماسه‌سنگ، مارن، چرت و هیدرواکسیدها- اکسیدهای آهن و سولفیدها) در نئوپروتروزویک (ادیاکاران) پدید آمده و سپس هنگام کوهزایی کیمیرین در رخساره شیبست‌سبز دگرگون شده است. این آنومالی ذخیره قطعی ۶۴۳ میلیون تن کانسنگ مگنتیتی با عیار میانگین ۵۲/۷ درصد آهن، ۰/۷۶ درصد گوگرد و ۰/۱۱ درصد فسفر دارد. همچنین، به‌صورت متناوب با لایه‌های کوارتز سربسته‌شسته، کلریت‌شسته، تالک‌شسته، بیوتیت‌شسته، اکتینولیت‌شسته و کوارتزیت دیده می‌شود. مگنتیت به‌صورت توده‌ای، نواری، خردشده و انتشاری دیده می‌شود و با پیریت و مقدار کمی کالکوپیریت و بورنیت همراه است. پیریت همانند مگنتیت، به‌صورت لایه‌ای (نواری)، چین‌خورده و خردشده در میان بلورهای مگنتیت دیده می‌شود. تورمالین، آپاتیت، اسفن، زیرکن و گارنت از کانی‌های فرعی هستند. عنصرهای مس، سرب، کبالت، قلع، آرسنیک و آنتیموان در کانسنگ مگنتیتی نسبت به مقادیرهای پوسته‌ای، ۲ تا ۱۷ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی عنصرها در کانی‌های سولفیدی در برابر ترکیب پوسته زمین برابر با ۳ تا ۶۷ برابر است. تناوب لایه‌های شیبست با کانسنگ مگنتیتی، ساخت و بافت نواری مگنتیت- پیریت، حضور قطعه‌های معلق و نمودارهای زمین‌شیمیایی (V/Ti-Ni/Ti, V-Ti, Al-Fe-Mn) نشان‌دهنده شباهت آنومالی شماره ۳ گل‌گهر به آهن نواری ادیاکاران است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی، کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، آهن نواری، ادیاکاران، آنومالی شماره ۳

گل‌گهر، سیرجان

* atapour@uk.ac.ir

Copyright©2019, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

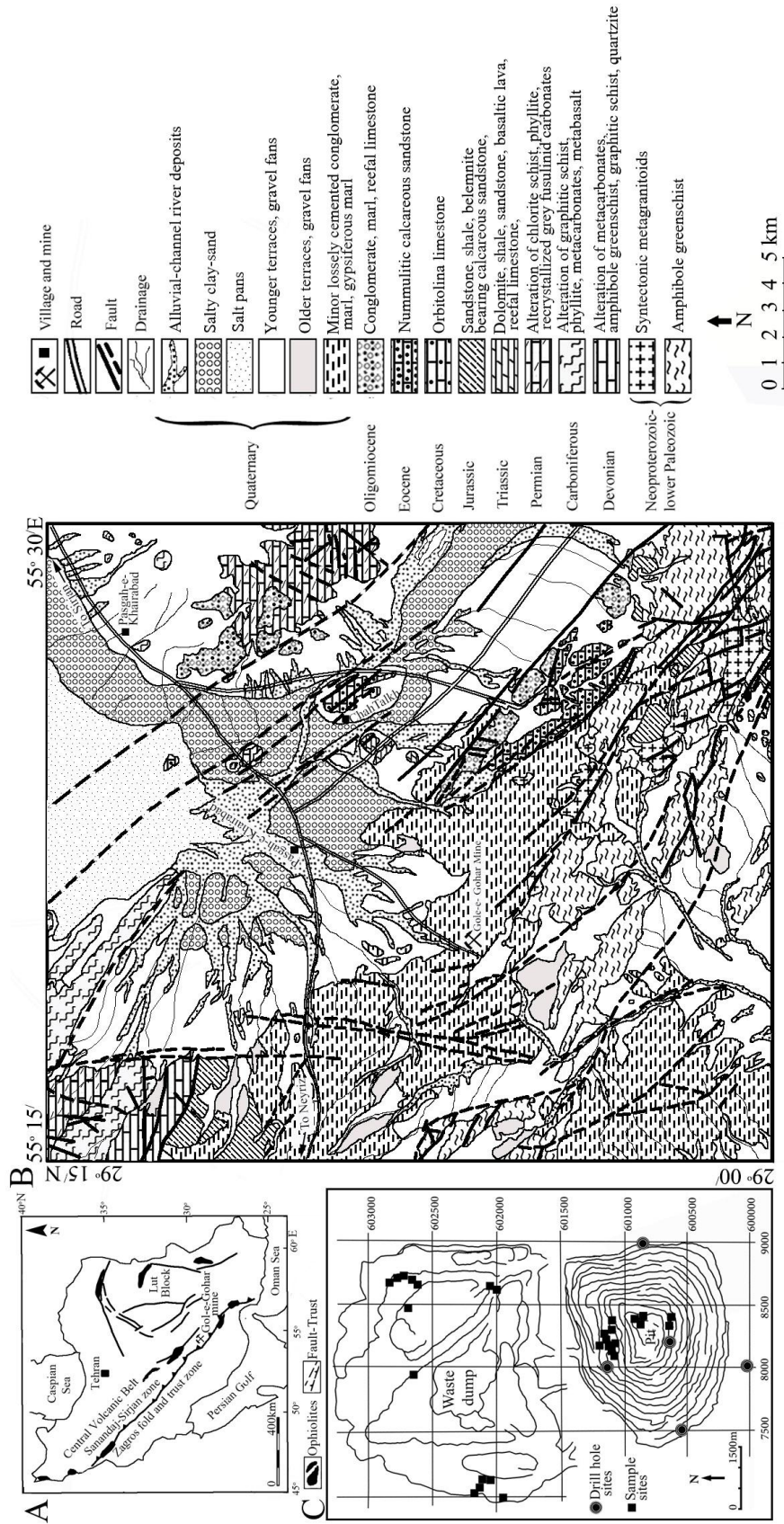
مقدمه

کانسنگ مگنتیتی و کانی‌های سولفیدی و در نهایت پیشنهاد الگوی کانی‌زایی از مهم‌ترین هدف‌های این پژوهش به‌شمار می‌روند.

زمین‌شناسی عمومی آنومالی شماره ۳ گل‌گهر

معدن گل‌گهر در فاصله ۵۳ کیلومتری جنوب‌باختری شهرستان سیرجان (طول جغرافیایی خاوری ۵۵°۱۵' تا ۵۵°۲۴' و عرض جغرافیایی شمالی ۲۹°۰۳' تا ۲۹°۰۷')، در مرز خاوری پهنه سندانج-سیرجان جای گرفته است و ۶ ذخیره معدنی دارد (شکل ۱). کهن‌ترین واحدهای زمین‌شناسی در منطقه گل‌گهر (شکل ۱)، مرم‌های لایه‌ای برایوپوددار به سن کامبرین زیرین هستند (Sabzehei et al., 1994). این مرم‌ها روی گدازه‌های مافیک و الترامافیک مجموعه گل‌گهر رخمون دارند و از این‌رو، سن این مجموعه پرکامبرین بالایی یا نئوپروتروزییک-پالئوزوییک زیرین است. برپایه روش سن‌سنجی اورانیم-سرب (زیرکن)، گرانیتوئیدهای همزمان با کوهزایی (Syntectonic) در جنوب‌خاوری منطقه (شکل ۱)، سن ۵۴۴ تا ۶۰۵ میلیون سال پیش (نئوپروتروزییک-کامبرین زیرین= ادیاکاران) را نشان می‌دهند (Hassanzadeh et al., 2008; Safarzadeh et al., 2016). این سنگ‌ها در رخساره شیست‌سبز دگرگون شده‌اند. همچنین، داده‌های ایزوتوپی گوگرد در پیریت (۲۴٪+) و نیز ترکیب شیمیایی سولفات در آب دریا، بازه زمانی در زمان ادیاکاران را نشان می‌دهند (Dalfardi, 2012). تا کنون نشانه‌ای از هاله دگرگونی همبری در پیرامون توده‌ای گرانیتوئیدی دیده نشده است (Dimitrijevic, 1973; Hassanzadeh et al., 2008; Safarzadeh et al., 2016). از این‌رو، هاله دگرگونی اسکارن که Mahmoudi و همکاران (۲۰۱۷) و Mirzaei و همکاران (۲۰۱۸) پیشنهاد کرده‌اند سؤال برانگیز است.

ناحیه معدنی گل‌گهر ۶ آنومالی با ذخیره معدنی ۱۱۳۵ میلیون تن دارد. پهنه کانی‌سازی به سه بخش مگنتیت بالایی، پهنه اکسیدی یا هماتیتی و مگنتیت پایینی سرشار از سولفید رده‌بندی می‌شود. ذخیره قطعی آنومالی شماره ۳ برابر با ۶۴۳ میلیون تن کانسنگ است. مقدار آهن، گوگرد و فسفر آن در منطقه اکسیدی برابر با ۵۱/۹۶، ۰/۳۴۹ و ۰/۱۱۵ درصدوزنی، در منطقه مگنتیت بالایی برابر با ۵۲/۳۸، ۰/۰۹۱ و ۰/۰۹۲ درصدوزنی و در منطقه مگنتیت پایینی برابر با ۵۳/۸۳، ۱/۸۲۸ و ۰/۱۲ درصدوزنی است (Kusha Madan Consulting Engineers, 2016). درباره پیدایش کانسار گل‌گهر الگوهای آهن‌نواری (Young, 1976)، ماگمایی (Mucke and Golestaneh, 1976)، آتشفشانی-رسوبی (Moxham, 1990; Yaghoubi, 1999; Dalfardi, 2012)، آهن‌نواری آلگوما (Khalili-Mobarhan, 1993)، آهن‌نواری سوپریور (Pourkhak, 2003)، آهن‌نواری راپیتان (Babaki, 2004; Babaki and Aftabi, 2007) اسکارن (Hallaji, 1991; Torabian, 2007; Mahmoudi et al., 2017; Mirzaei et al., 2018) پیشنهاد شده‌اند. همچنین، همکاران (۲۰۱۳) و Badavi (۲۰۱۸) فراوانی عنصرهای کمیاب در مگنتیت‌های کانسار گل‌گهر را ارزیابی کرده‌اند. با وجود بررسی‌های یادشده، تا کنون بررسی جامعی درباره زمین‌شیمی کانسنگ مگنتیتی و کانی‌های سولفیدی و در نهایت الگوی کانسارسازی در آنومالی شماره ۳ انجام نشده است. بررسی ساخت و بافت در کانسنگ مگنتیتی و کانی‌های سولفیدی، بررسی کانی‌شناسی سنگ‌های همبر، زمین‌شیمی



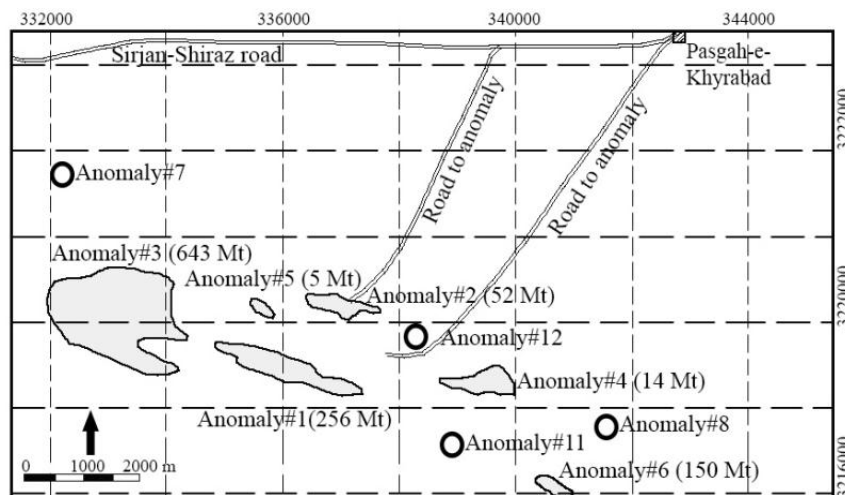
شکل ۱- (A) جایگاه کانسار گل‌گهر در ایران، (B) نقشه زمین‌شناسی منطقه گل‌گهر، (C) محل نمونه‌برداری در پیت معدن، دامپ باطله و چاه‌های اکتشافی در معدن شماره ۳ گل‌گهر (با تغییراتی پس از Sabzehei و همکاران (۱۹۹۴)، Badavi (۲۰۱۸)، Afatbi و Atapour (۲۰۱۹))

آندزیتی ائوسن روی مجموعه‌های پیشین جای دارند. این واحدها را آهک‌های ریفی، کنگلومرای‌های سخت‌نشده و مارن‌های الیگومیوسن پوشانده‌اند. مارن، مارن گچ‌دار (Q^{pl})، کنگلومرای‌های سخت‌نشده (Q^{plc})، پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های کهن (Q^{l1}) و جوان (Q^{l2})، ماسه‌ها و رس‌های نمک‌دار (Q^{ss})، پهنه نمکی (Q^{sp}) و رسوب‌های بستر رودخانه (Q^{al}) از رسوب‌های کواترنر به‌شمار می‌روند. گسل‌های معکوس، عادی و راست‌الغز در رسوب‌های آبرفتی جوان منطقه نشان‌دهنده فعال بودن منطقه از دیدگاه زمین‌ساختی هستند.

زمین‌شناسی معدنی آنومالی شماره ۳ گل‌گهر

آنومالی شماره ۳، بزرگ‌ترین توده معدنی مجموعه گل‌گهر است که در ژرفای ۲۴۰ متری و در پله ۱۷ در حال استخراج است (Kusha Madan Consulting Engineers, 2016) (شکل ۲).

برپایه بررسی‌های Sabzehei و همکاران (۱۹۹۴)، مرمر و شیست‌های سبز و متابازالت‌های بالشی از گروه‌های سنگی دونین منطقه هستند و در رخساره شیست‌سبز دگرگون شده‌اند. این سنگ‌ها را میکاشیست، کوارتزیت، توربیدیت‌های آهکی دگرگون‌شده، شیل، ماسه‌سنگ و رادیولاریت به سن کربونیفر پوشانده‌اند. این مجموعه را تناوبی از فیلیت، ماسه‌سنگ‌های آرکوزی دگرگون‌شده، متابازالت، دولومیت و سنگ‌آهک‌های متبلور فوزولین‌دار پرمین دربر گرفته‌اند. تریاس در این منطقه بیشتر دربردارنده آهک‌های ریفی و دولومیت، شیل، ماسه‌سنگ و گدازه‌های بازالتی است و روی آن سنگ آهک‌های ریفی با شیل و ماسه‌سنگ و کنگلومرای ژوراسیک جای می‌گیرند. سنگ آهک‌های اوربیتولین‌دار از واحدهای کرتاسه در این منطقه به‌شمار می‌روند. سنگ آهک‌های رسوبی شبه‌فلیش (شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، ماسه‌سنگ آهکی نومولیت‌دار) همراه با گدازه‌های

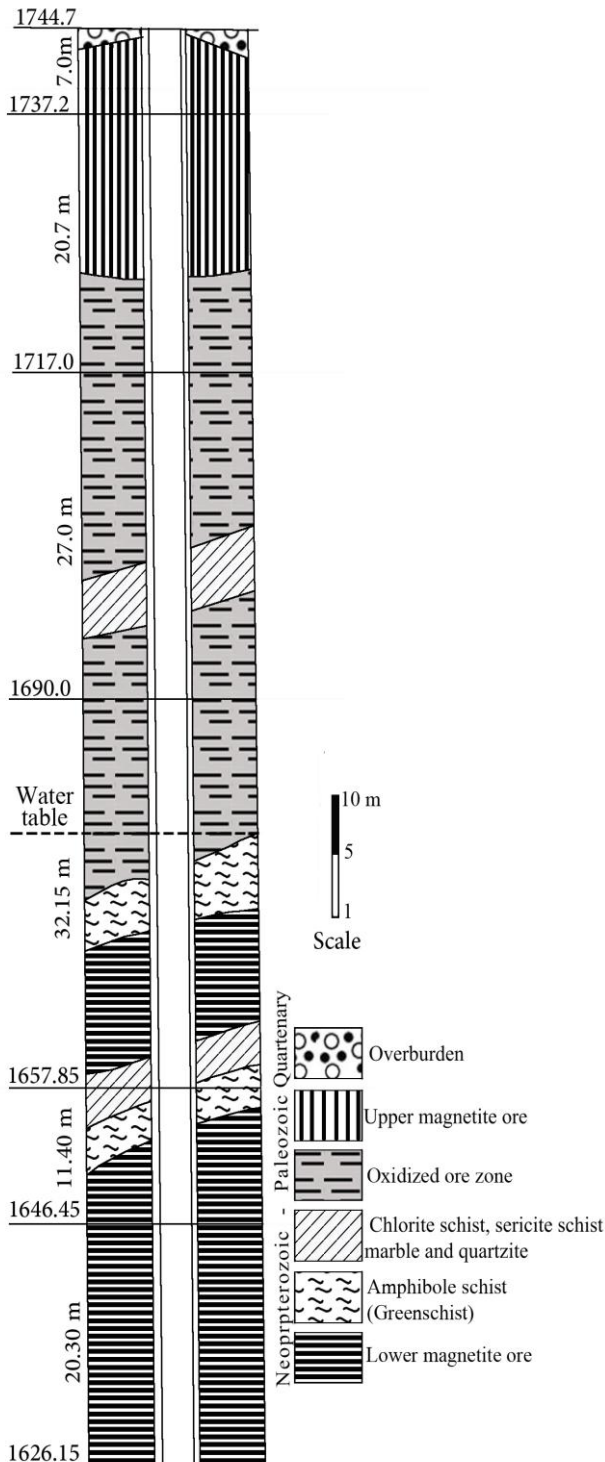


شکل ۲- جایگاه و ذخیره (برپایه میلیون تن) آنومالی‌های گوناگون معدن گل‌گهر (Kusha Madan Consulting Engineers, 2016)

میان آن دیده می‌شوند. این گروه‌های سنگی همانند رخساره‌های سنگی گوناگون در چاه‌های اکتشافی آنومالی شماره ۳ هستند. لایه‌های آمفیبول‌شیست، بالاترین بخش کانسنگ مگنتیت پایینی را می‌سازند و پس از آنها، کانسنگ مگنتیتی به‌طور متناوب با میان‌لایه‌هایی از

ستون چینه‌شناسی یکی از چاه‌های اکتشافی در معدن گل‌گهر که تا ژرفای ۱۱۸/۵۵ متری حفر شده است (شکل ۳) دربردارنده کانسنگ مگنتیت پایینی است و میان‌لایه‌هایی از آمفیبول‌شیست (اکتینولیت‌شیست)، شیست کلریتی و سربستی، مرمر و کوارتزیت در فاصله

ژاروسیت در پی واکنش آب‌های فرورو و زیرزمینی با پیریت روی داده است (Lottermoser, 2007).



شکل ۳- ستون چینه‌شناسی کانسار گل‌گهر (با تغییراتی پس از Anonymous, ۱۹۹۲)

شیست کلریتی و سربستی، مرمر و کوارتزیت دیده می‌شوند. روی آنها، لایه مگنتیت بالایی و رسوب‌های منفصل و کنگلومراهای سخت‌نشده جای می‌گیرند. حضور میان‌لایه‌هایی ریز از کلریت‌شیست و تالک‌شیست در این کانسنگ نیز تایید شده است (Kusha Madan Consulting Engineers, 2016).

پهنه اکسیدی سطحی دربردارنده هماتیت، گئوتیت، لیمونیت، مگهمیت، مارتیت و ژاروسیت است؛ اگرچه مقدار بسیار کمی از مگنتیت، کالکوپیریت و پیریت نیز در آن دیده می‌شود. همچنین، ساخت نواری اکسید آهن همراه با چرت (در ژرفای شش متری) دیده می‌شود (Badavi, 2018).

الف- بخش مگنتیت بالایی از کانی‌های سولفیدی و فسفری فقیر است (۹ میلیون تن ذخیره، ۵۲/۳۸ درصد آهن، ۰/۰۹۱ درصد گوگرد و ۰/۰۹۲ درصد فسفر) و اندازه بلورهای مگنتیت آن ریز تا متوسط است (Badavi, 2018).

ب- بخش کانسار اکسیدی (۱۳/۲۰ میلیون تن ذخیره، ۵۱/۹۶ درصد آهن، ۰/۳۴۹ درصد گوگرد و ۰/۱۱۵ درصد فسفر) که دربردارنده هماتیت، گوتیت و کمی مارتیت و مگهمیت ثانویه است و در زیر مگنتیت بالایی پدید آمده است؛

پ- بخش مگنتیتی پایینی از کانی‌های سولفیدی (۵۶۶/۵ میلیون تن ذخیره، ۵۳/۸۳ درصد آهن، ۱/۸۲۸ درصد گوگرد و ۰/۱۲ درصد فسفر) سرشار است و در زیر بخش کانسار اکسیدی جای می‌گیرد و بزرگ‌ترین بخش آنومالی شماره ۳ را می‌سازد. بخش بزرگی از کانسار از مگنتیت همراه با مقادیر کمی پیریت، کالکوپیریت و پروتیت ساخته شده است (Kusha Madan Consulting Engineers, 2016). در حقیقت، این بخش بخشی از مگنتیت پایینی است که پیریت فراوانی دارد. اکسیداسیون پیریت و مگنتیت به هماتیت، گئوتیت، لیمونیت، مگهمیت، مارتیت و

نمونه‌برداری، آماده‌سازی و روش انجام پژوهش

در این بررسی، نمونه‌برداری به صورت نامنظم، از محدوده پیت اصلی معدن، مغزه‌های حفاری و دامپ باطله انجام شد. در مجموع، ۹۱ نمونه (۳۱ نمونه از بخش روباز معدن، ۲۱ نمونه از پیت معدن، ۴ نمونه از محل سنگ‌شکن و ۶ نمونه از پهنه اکسیدی سطحی، ۳۰ نمونه از مغره‌های حفاری (مگنتیت بالای و پایینی و سنگ‌های همبر) و ۳۰ نمونه از سنگ‌های همبر کانسار که از دامپ باطله گردآوری شد. شمار ۲۸ مقطع نازک از سنگ‌های همبر و ۴۱ مقطع صیقلی از بخش کانه‌ها ساخته شد. این مقطع‌ها در آزمایشگاه کانی‌شناسی بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان بررسی شدند. برای جدایش کانی‌های سولفیدی از کانسنگ مگنتیتی، پس از خردایش نمونه‌های کانسنگ،

کانی‌های سولفیدی نخست جداسازی شدند. سپس نمونه‌های سولفیدی جدا شدند و نمونه‌های کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ‌های همبر با سنگ‌شکن فکی و غلتکی خرد و در آسیای گلوله‌ای و پودرکن دیسکی پودر شدند. در پایان، نمونه‌های یادشده با روش چهاربخشی کردن و سرندهای ASTM (Lapakko, 2002) به قطر ۲۰۰ مش برای تجزیه شیمیایی آماده شدند. شمار ۳۰ نمونه از نمونه‌های آماده‌سازی شده برای تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS به مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران فرستاده شد. داده‌های به دست آمده در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده‌اند. برپایه روش به کاررفته، دقت اندازه‌گیری داده‌ها ۸۵ تا ۹۵ درصد است.

جدول ۱- میانگین، تغییرات و انحراف از معیار عنصرهای اصلی (برپایه درصدوزنی) در گروه‌های نمونه‌برداری شده و شدت غنی‌شدگی کانسنگ در برابر ترکیب پوسته و کانسارهای مهم دنیا (مقدار سیلیس اندازه‌گیری نشده است)

Sample No.	Elements	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	S
	D.L.	-	0.02	0.02	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.001	0.02	0.01
Sulfide minerals	Min	-	0.02	0.19	35.33	0.17	0.28	0.1	0.09	0.01	0.02	4.12
	Max	-	0.05	0.3	62.87	2.95	1.78	0.1	0.09	0.04	0.57	25.35
	Mean	-	0.03	0.22	56.38	1.24	0.89	0.1	0.9	0.02	0.09	19.52
	Sd	-	0.01	0.04	6.96	0.97	0.48	0.0	0.0	0.01	0.15	5.74
Magnetite ores	Min	-	0.03	0.43	53.05	2.12	0.39	0.1	0.09	0.03	0.05	0.77
	Max	-	0.15	3.25	71.45	11.46	6.18	0.26	1.07	0.09	3.34	4.43
	Mean	-	0.08	1.21	63.67	5.27	2.54	0.15	0.23	0.05	0.92	2.2
	Sd	-	0.04	0.97	6.62	3.12	2.33	0.06	0.37	0.02	1.22	1.3
Gossanized zone	Min	-	0.02	0.19	2.51	0.17	0.14	0.1	0.09	0.01	0.02	0.08
	Max	-	0.08	1.98	70.69	0.17	0.28	0.1	0.39	0.04	0.85	0.51
	Mean	-	0.44	0.99	47.36	0.17	0.21	0.1	0.19	0.03	0.42	0.27
	Sd	-	0.35	0.91	38.85	0.0	0.07	0.0	0.17	0.01	0.41	0.22
Host rocks (schist)	Min	-	0.22	5.87	6.31	0.17	0.55	0.1	0.75	0.03	0.09	0.08
	Max	-	2.14	14.64	12.33	4.89	5.29	4.97	3.74	0.14	0.48	1.68
	Mean	-	0.65	10.69	9.63	3.03	1.75	2.57	2.31	0.06	0.23	0.9
	Sd	-	0.83	3.35	2.25	1.93	2	1.76	1.13	0.05	0.15	0.74
Mean	Crust*	-	0.95	15.36	7.18	3.46	5.08	3.81	3.12	0.12	0.27	0.05
	Rapitan **	-	0.27	3.18	40.9	1.24	1.79	0.28	0.45	0.23	0.35	-
	Ediacaran***	-	0.3	0.42	61.81	0.09	0.14	0.3	0.13	0.02	2.84	-
	Superior**	-	0.04	1.5	12.17	1.93	2.24	0.13	0.2	0.49	0.08	0.2
	Algoma**	-	0.12	3.7	14.84	2	1.87	0.43	0.62	0.19	0.23	1.75
Enrichment Magnetite ores	Crust	-	0.08	0.08	8.87	1.52	0.50	0.04	0.07	0.42	3.41	44.00
	Rapitan	-	0.30	0.38	1.56	4.25	1.42	0.54	0.51	0.22	2.63	-
	Ediacaran	-	0.27	2.88	1.03	58.56	18.14	0.50	1.77	2.50	0.32	-
	Superior	-	2.00	0.81	5.23	2.73	1.13	1.15	1.15	0.10	11.50	11.00
	Algoma	-	0.67	0.33	4.29	2.64	1.36	0.35	0.37	0.26	4.00	1.26

Sulfide minerals	Crust	-	0.03	0.01	7.85	0.36	0.18	0.03	0.29	0.17	0.33	390.40
-------------------------	-------	---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	--------

*Levinson (1980); **Gross and Mcleod (1987), Yeo (1981), Maynard (1983); *** Atapour and Aftabi (2017)

جدول ۲- میانگین، تغییرات و انحراف از معیار عنصرهای فرعی (برپایه گرم در تن) و شدت غنی‌شدگی در برابر ترکیب پوسته و کانسارهای مهم دنیا

Sample No.	Elements D.L.	Cu	Mo	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	Sn	V
		1	1	5	5	1	1	1	1	5
Sulfide minerals	Min	200.7	1.56	51.14	37.48	238.4	132.6	278.1	0.75	8.81
	Max	2645	10.7	1219	7291	400.5	1369	3105	16.54	138.3
	Mean	871.65	5.67	190.51	781.84	318.34	600.4	1503.4	3.29	56.11
	Sd	624.1	3.08	317.38	1985.45	56.75	444.4	709.6	4.21	49.05
Magnetite ores	Min	104	1.15	48.97	58.23	1	19.3	30.9	2.7	16.31
	Max	405.8	5.65	71.52	136.4	28.05	202.2	262.3	8.54	641
	Mean	241.64	2.83	60.56	106.34	8.27	94.8	131.6	5.18	306.25
	Sd	120.95	1.56	7.85	31.49	9.45	67.18	80.5	2.48	246.82
Gossanized zone	Min	3.3	0.75	5	5	1	1	4.44	5.24	24.61
	Max	90.3	3.32	56.96	82.09	23.8	133.7	31.25	7.74	809.9
	Mean	61	2.22	39.17	47.44	13.94	84.33	21.7	6.25	459.07
	Sd	49.97	1.32	29.6	39.13	11.71	72.6	15.03	1.32	399.27
Host rocks	Min	5.97	2.99	13.31	35.65	9.85	7.04	9.62	2.52	39.82
	Max	70.25	10.79	40.15	76.9	146.4	72.7	112.2	4.54	183.8
	Mean	31.32	4.93	26.18	57.68	90.72	38.6	54.8	3.55	84.16
	Sd	23.73	3.29	10.45	15.58	50.87	26.6	45.2	0.95	59.35
Mean	Crust*	55	1.5	12.5	70	100	75	25	2	135
	Rapitan **	436	34	-	18	-	6	1.8	4	38
	Ediacaran***	59	-	-	26	27	8	8	-	38
	Superior**	14	-	-	40	112	37	28	-	42
	Algoma**	149	-	-	330	118	103	41	-	109
Enrichment factor	Crust	4.39	1.89	4.84	1.52	0.08	1.26	5.3	2.59	2.27
	Rapitan	0.55	0.08	-	5.91	-	15.8	73.1	1.30	8.06
	Ediacaran	4.10	-	-	4.09	0.31	11.8	16.45	-	8.06
	Superior	17.26	-	-	2.66	0.07	2.56	4.70	-	7.29
	Algoma	1.62	-	-	0.32	0.07	0.92	3.21	-	2.81
	Sulfide minerals	Crust	15.85	3.78	15.24	11.17	3.18	8.01	60.14	1.65

*Levinson (1980); **Gross and Mcleod (1987), Yeo (1981), Maynard (1983); ***Atapour and Aftabi (2017)

جدول ۳- میانگین، تغییرات و انحراف از معیار عنصرهای کمیاب (برپایه گرم در تن) در نمونه‌های گوناگون و شدت غنی‌شدگی در برابر ترکیب پوسته و کانسارهای مهم دنیا

Sample No.	Elements D.L.	As	Sb	Ga	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Dy	Er	Yb
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sulfide minerals	Min	19.63	1.49	1	0.8	0.8	-	0.8	-	0.8	0.8	-	-
	Max	439.2	14.59	13.78	1.9	3.8	-	2.3	-	1.5	1.3	-	-
	Mean	121.35	4.41	4.69	0.9	1.7	-	0.9	-	0.8	0.8	-	-
	Sd	109.45	3.73	3.73	0.4	1	-	0.5	-	0.2	0.2	-	-
Magnetite ores	Min	7.64	1.44	4.51	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	Max	114.2	2.72	46.38	10	20	3.6	21	7.4	8.6	6.3	3.4	2.1
	Mean	31.15	2.16	25.7	4.1	11	1.7	7.5	2.6	2.9	2.3	1.4	1.1
	Sd	37.5	0.54	14.1	3.8	8	1.2	8.1	2.6	3.2	2.3	1.1	0.6
Gossanized zone	Min	15.82	1.09	29.4	0.8	1.1	0.8	0.8	0.8	-	-	-	-
	Max	91.99	2.73	58.8	6.7	19	2.1	6.9	1.4	-	-	-	-
	Mean	43.44	1.75	47.5	3.4	9.3	1.3	4.4	1	-	-	-	-
	Sd	42.18	0.87	15.84	3	8.8	0.7	3.2	0.4	-	-	-	-
Host rocks	Min	6.03	1.15	7.39	-	41	1.2	4.7	1	0.8	1.1	0.8	0.8
	Max	55.66	2.6	16.42	-	137	8.9	35	8.5	9.2	8.4	4.6	3.8
	Mean	18.26	1.67	12.93	-	85	5.9	23	5.3	5.2	4.9	2.7	2.3
	Sd	21.25	0.55	3.74	-	35	3.1	13	2.8	3	2.7	1.4	1.2
Mean	Crust*	1.8	0.2	15	30	60	8.2	28	6	5.4	3	2.8	3
	Rapitan **	-	-	16	22	27	2.1	5.4	0.8	1.1	0.7	0.5	0.4
	Ediacaran***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Superior**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Algoma**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Enrichment Factor	Crust	17.31	10.80	1.71	0.14	0.18	0.21	0.27	0.43	0.54	0.77	0.50	0.37
	Rapitan	-	-	1.61	0.19	0.40	0.81	1.39	3.25	2.64	3.29	2.80	2.75
	Ediacaran	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Superior	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Algoma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sulfide minerals	Crust	67.42	22.05	0.31	0.03	0.03	-	0.03	-	0.15	0.27	-

*Levinson (1980); **Gross and Mcleod (1987), Yeo (1981), Maynard (1983); ***Atapour and Aftabi (2017)

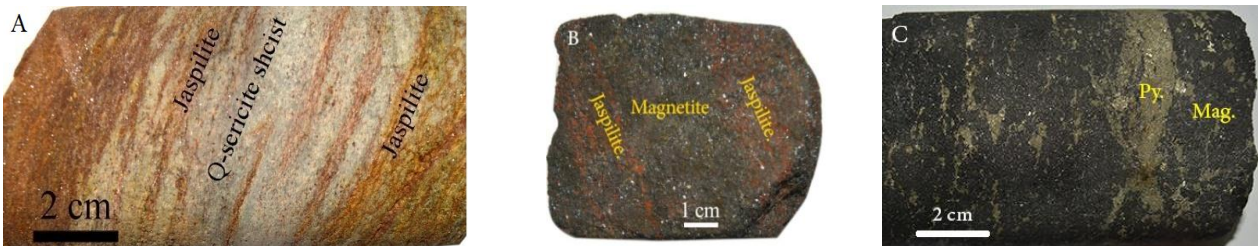
ساخت و بافت در توده معدنی و سنگ همبر

مهم‌ترین ساخت‌ها و بافت‌های دیده‌شده در نمونه معدنی و سنگ همبر به شرح زیر هستند:

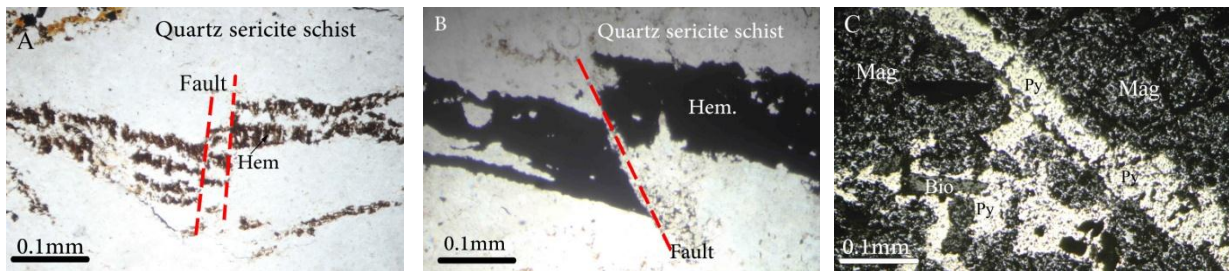
الف- ساخت و بافت لایه‌ای یا نواری: این ساخت و بافت در بردارنده تناوبی از لایه‌ها یا نوارهایی از مگنتیت و هماتیت با کانی‌های سولفیدی (بیشتر پیریت و در مواردی کالکوپیریت و بورنیت) (شکل ۴) است و در نمونه‌های معدنی و یا در سنگ‌های همبر (مانند: بیوتیت‌شیست، اکتینولیت‌شیست، ژاسپیلیت و کوارتزیت) (شکل‌های ۵- A و ۵- B)

دیده می‌شود.

ب- ساخت و بافت توده‌ای: این ساخت و بافت در بردارنده بلورهای متراکم مگنتیت است که در پی غلظت بالای یون آهن در محلول‌های گرمایی نسبت به اسید سیلیسیک پدید آمده است (Maynard, 1983). چگونگی پیدایش مگنتیت در کانسارهای آهن نواری گوناگون بدین‌گونه است که نخست ژل‌های اکسیدی و هیدروکسیدی نخستین پدید می‌آیند؛ سپس در پی فرایند دیاژنز و دگرگونی بلورهای مگنتیت و هماتیت جایگزین آنها می‌شوند (Maynard, 1983).



شکل ۴- ساخت لایه‌ای ژاسپیلیت و شیست در کانسنگ پهنه اکسیدی سطحی؛ (B) ژاسپیلیت و مگنتیت در کانسنگ مگنتیتی؛ (C) ساخت لایه‌ای پیریت درون مگنتیت



شکل ۵- A, B) بافت لایه‌ای و گسلیده هماتیت در کوارتز سریسیت‌شیست با نیکل موازی؛ (C) ساخت رگه‌ای پیریت نیکل موازی (پیریت: Py؛ مگنتیت: Mag؛ هماتیت: Hem؛ بیوتیت: Bio)

هماتیتی پدید می‌آید و بیشتر در مگنتیت و به‌ندرت در پیریت دیده می‌شود. از این‌رو، این بافت و ساخت نشان‌دهنده فرایندهای زمین‌ساختی و دگرگونی پس از رسوب‌گذاری است (شکل‌های ۵- A و ۵- B).

ث- ساخت و بافت رگه‌ای و رگچه‌ای: این ساخت و بافت بیشتر از رگچه‌های کلسیتی، سیلیسی،

ب- بافت انتشاری: این بافت در بردارنده بلورهای شکل‌دار یا نیمه‌شکل‌دار مگنتیت در زمینه‌ای از پیریت است.

ت- ساخت و بافت چین‌خورده و گسلیده: این ساخت و بافت در پی فرایندهای کوهزایی و دگرگونی روی ساختارهای رسوبی- آتشفشانی و نوارهای مگنتیتی-

گنایس سئوال برانگیز است. همچنین، حضور متاچرت‌های چشمی شکل در شیست‌ها (شکل ۶- A) همراه با سربیسیت و کلریت، هر چند بافتی همانند گنایس را در سنگ نشان می‌دهد، اما نشان‌دهنده دگرگونی گرانیته‌ها در رخساره شیست‌سبز است.

ح- ساخت و بافت قطعات معلق: در این ساخت و بافت، حضور پاره‌های کمابیش گردشده کربناتی و کوارتزی درون شیست‌ها و نمونه‌های معدنی (شکل ۶- B) نشان‌دهنده حضور افتان‌سنگ‌ها (dropstones) باشد. این قطعات نابرجا هستند و نشان‌دهنده حضور فعالیت‌های یخچالی در زمان پیدایش رسوب‌ها و هیدرواکسیدهای آهن هستند (Pettijohn, 1975).



شکل ۶- A) ساخت گنایسی با لایه‌هایی از شیست‌های سربیسیتی و کلریتی؛ B) قطعات معلق درون لایه‌های شیست‌سبز

نخستین کانی‌های پدیدآمده از اکسیداسیون هستند که با گذشت زمان با لیمونیت، گنوتیت و هماتیت جایگزین می‌شوند (Guilbert and Park, 1997).

کانی‌شناسی توده معدنی و سنگ همبر

شکل ۷ توالی کانی‌شناسی کانی‌های آنومالی شماره ۳ معدن گل‌گهر را نشان می‌دهد. نخستین مرحله نشان‌دهنده فوران‌های زیردریایی بازالتی همراه با رسوبگذاری رسوبات آواری (کوارتز) و شیمیایی (کلسیت و دولومیت) همراه با کانی‌های دگرسانی زیردریایی است. در مرحله دوم، در پی دیاژنز، سنگ‌های رسوبی آواری (ماسه‌سنگ، چرت و شیل)،

سولفیدی (پیریت) ساخته شده است که توده معدنی و سنگ‌های همبر را قطع می‌کنند (شکل ۵- C).

ج- ساخت و بافت برشی یا کاتاکلاستیک: این ساخت و بافت از پاره‌های خردشده کانسنگ اولیه (مگنتیت) در زمینه‌ای از شیست‌های منطقه و توده معدنی ساخته شده و نشان‌دهنده دگرگونی و گسلش است.

چ- ساخت و بافت گنایسی: این ساخت و بافت که در بررسی‌های صحرایی در آنومالی شماره ۳ گل‌گهر، چندین نمونه ساخت مشابه گنایس دیده شد، از سربیسیت، کلریت و کوارتز ساخته شده است. این پارائنز کانی‌شناسی با اینکه ساخت گنایسی نشان می‌دهد، اما به رخساره شیست مربوط است. از این رو، به کاربردن واژه

خ- ساخت و بافت چین‌خورده و گسلیده: این ساخت و بافت پیامد فرایندهای کوهزایی و دگرگونی روی ساختارهای رسوبی-آتشفشانی و نوارهای مگنتیتی-هماتیتی است و بیشتر در مگنتیت و به‌ندرت در پیریت دیده می‌شود. از این رو، نشان‌دهنده فرایندهای زمین‌ساختی و دگرگونی پس از رسوب گذاری است.

د- ساخت و بافت سوپرژن (پهنه اکسیدی سطحی): این ساخت و بافت به‌صورت ساخت جعبه‌ای (Boxwork) ثانویه در پی اکسیدشدن مانند مگنتیت و نوارهای پیریت و کالکوپیریت توسط آب‌های سطحی و فرورو پدید می‌آید. اکسی‌هیدروکسیدهای آهن از

نشانه‌هایی از هاله دگرگونی همبری در پیرامون این توده‌ها دیده نشد؛ اما فراوانی سرب‌سیت و کلریت جهت یافته نشان‌دهنده دگرگونی ناحیه‌ای این نوع سنگ‌هاست. کاربرد روش سن‌سنجی اورانیم-سرب برای زیرکن این توده‌ها سن‌نئوپروتروزویک-کامبرین (ادیاکاران) را نشان می‌دهد (Safarzadeh *et al.*, 2016). در مرحله پایانی، به دنبال هوازدگی شیمیایی و اکسیداسیون، مگنتیت و سولفیدها با هماتیت، گئوتیت، مگمیت، مارتیت جایگزین می‌شوند.

شیمیایی (سنگ‌های کربناتی) همراه با مرحله اصلی کانی‌زایی مگنتیت-هماتیت در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی پدید می‌آیند. در مرحله سوم، به دنبال دگرگونی ناحیه‌ای هنگام کوهزایی کیمیرین همه توالی‌های رسوبی و اکسیدهای آهن به کوارتزیت، شیست، مگنتیت درشت بلور و جهت یافته و متابازالت تبدیل می‌شوند. به دنبال افزایش فشار و دما در ژرفایی بیشتر از رخساره شیست سبز، سنگ‌های گرانیتویدی همزمان با کوهزایی در پی آناکسی پدید می‌آیند.

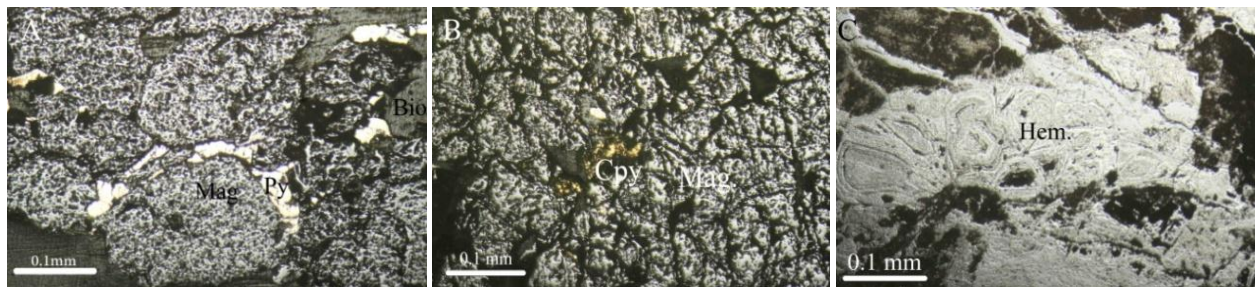
Minerals	Submarine basaltic volcanism and sedimentation	Sedimentation, mineralization and diagenesis	Regional metamorphism and syntectonic metagranitoids			Supergene oxidation zone
			Greenschist	Metabasalt	Metagranite	
Oligoclase	—————	-----	-----	—————	—————	
Albite	—————	—————	—————	—————		
Alkali feldspar	-----	-----	-----		—————	
Silica gel	—————					
Quartz	—————	—————	—————		—————	—————
Actinolite	—————	—————	—————	—————		
Epidote	—————	—————	—————	—————	-----	
Biotite			—————		-----	
Talc	-----	—————	—————			
Chlorite	—————	—————	—————	—————	—————	
Sericite	-----	—————	—————	—————	—————	
Garnet			—————			
Tourmaline	-----	-----	-----			
Zircon			-----		-----	
Sphene						
Iron oxide gel	—————					
Magnetite		—————	—————	—————	-----	
Hematite		—————	—————			—————
Goethite						—————
Maghemite						-----
Martite						-----
Sulfide gel	—————					
Pyrite		—————	—————		-----	
Chalcopyrite		-----	-----			
Bornite		-----	-----			
Calcite	—————	—————	—————	-----		
Dolomite	—————	—————	—————	-----		
Apatite	-----	-----	-----		-----	
Clay minerals		-----				—————

شکل ۷- پاراژنهای احتمالی کانی‌ها هنگام مراحل گوناگون پیدایش آنومالی شماره ۳ گل‌گهر

می‌آید (Klein, 2005). مگمیت کانی ثانویه‌ای است که به رنگ نارنجی مایل به سرخ و زرد با سختی کمابیش کم دیده می‌شود. نخستین فراورده‌های دگرسانی و اکسیداسیون، مگنتیت و کینومگنتیت و سپس مگمیت و در پایان مارتیت هستند (Harding, 2009; Maynard, 1983). در مقطع صیقلی، کینومگنتیت به رنگ قهوه‌ای مایل به خاکستری در پیرامون مگنتیت دیده می‌شود. گئوتیت، پایدارترین اکسید آهن و فراورده پایانی اکسیداسیون مگنتیت است که هنگام دگرسانی و هوازگی پدید می‌آید (Harding, 2009; Maynard, 1983).

مگنتیت: این کانی به صورت شکل‌دار (شکل ۸- A)، توده‌ای (شکل ۸- B)، لایه‌ای، انتشاری و خردشده در کانسنگ آنومالی شماره ۳ یافت می‌شود. مگنتیت توده‌ای در شرایطی پدید می‌آید که در زمان پیدایش کانسار، غلظت آهن در برابر اسیدسیلیسیک (H_4SiO_4) بالا باشد (Maynard, 1983). مگنتیت انتشاری به صورت پراکنده در میان کانی‌های سیلیکاتی یا سولفیدی دیده می‌شود.

هماتیت، مگمیت و گئوتیت: این کانی‌ها پس از مگنتیت و هماتیت نخستین فراوانی بیشتری دارند. هماتیت ثانویه در پی دگرسانی و هوازگی مگنتیت (شکل ۸- C) در کناره‌ها پدید



شکل ۸- A) مگنتیت شکل‌دار با پیریت؛ B) مگنتیت توده‌ای با کالکوپیریت؛ C) جایگزینی مگنتیت با هماتیت در بخش پهنه اکسیدی سطحی کانسار (پیریت: Py؛ کالکوپیریت: Cyp؛ مگنتیت: Mag؛ هماتیت: Hem؛ بیوتیت: Bio)

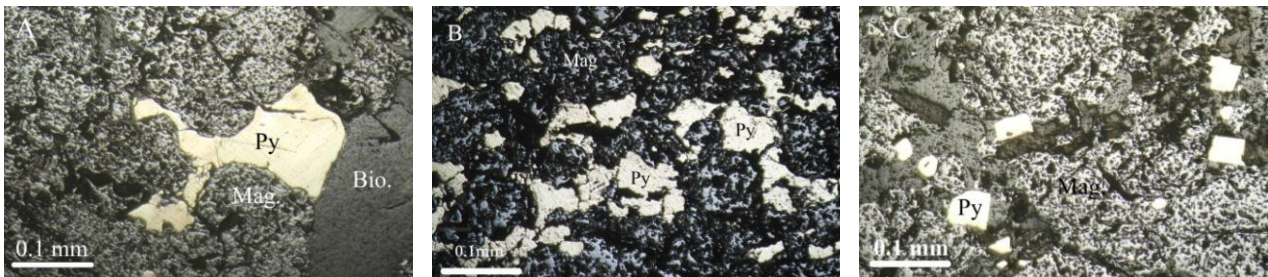
مگنتیت و گاه هماتیت و بیوتیت، اکتینولیت و سیلیکات‌های دیگر دیده می‌شود. این ویژگی نشان‌دهنده کانه‌زایی همزاد سولفیدها با اکسیدهای آهن و رسوب‌های شیلی-کربناتی در پهنه رسوبی است. جهت‌یابی کانی‌های سیلیکاتی دگرگونی با مگنتیت و پیریت (شکل ۴- C) همزادبودن این کانی‌ها را نشان می‌دهد. در تایید این نکته، در مقیاس چینه‌شناسی ساخت لایه‌ای (شکل ۳) میان شیست‌ها گوناگون و مگنتیت پایینی و بالایی نشان‌دهنده لایه‌ای بودن یا نوری بودن کانسار گل‌گهر و آنومالی شماره ۳ است. افزون‌براین، برپایه یافته‌های Maynard (۱۹۸۳)، در

پیریت: این کانی به شکل پیریت انتشاری بی‌شکل (شکل ۹- A) و نیمه‌شکل‌دار (شکل ۹- B) و شکل‌دار (شکل ۹- C) همراه با مگنتیت پدید می‌آید. همان‌گونه که در هر سه شکل دیده می‌شود، هیچ نشانه‌ای که نشان‌دهنده قطع‌شدگی مگنتیت با این کانی‌ها باشد دیده نمی‌شود. از این رو، این کانی‌چه‌بسا به صورت همزاد با مگنتیت پدید آمده باشد. برپایه داده‌های به‌دست‌آمده، پیریت‌های شکل‌دار چه‌بسا از تبلور دوباره پیریت‌های نیمه‌شکل‌دار در هنگام دیاژنز و یا دگرگونی (Spry et al., 2000) پدید می‌آیند (شکل ۹- C). همچنین، پیریت به صورت لایه‌ای میان‌لایه‌ای

کالکوپیریت: این کانی در فاصله بلورهای مگنتیت (شکل ۸- B) دیده می‌شود. بررسی‌های بافتی نشان می‌دهند این کانی در کانسارهای آهن نواری به دنبال ته نشینی از ژل اولیه مگنتیت پدید آمده است (Bralia *et al.*, 1979; Maynard, 1983). بورنیت به مقدار بسیار کم در شماری از نمونه‌ها دیده می‌شود.

کانی‌های دیگر: کوارتز، در شیب‌های گوناگون، کوارتزیت و کوارتز سربست‌شیبست به فراوانی در اندازه‌های مختلف تا به اندازه چشم‌های کوارتزی درشت بلور (چند سانتیمتری) دیده می‌شود. بیوتیت کانی اصلی در بیشتر شیبست‌هاست و در متاگرانیت نیز دیده می‌شود.

بیشتر کانسارهای آهن نواری، بیشتر سولفیدها به‌ویژه پیریت همزاد با هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن پدید می‌آید. پیریت خردشده، هنگام گسلش پس از دیاژنز و با احتمال بیشتر هنگام دگرگونی و در پی تنش‌های زمین‌ساختی پدید آمده است. حضور گسل‌های فراوان در کانسار بررسی‌شده (Anonymous, 1992) چه‌بسا علت خردشدگی پیریت‌ها باشد. پیریت رگه‌ای، در پی سرد شدن محلول‌های دگرگون‌زاد (چه‌بسا دگرگونی پس‌رونده) در مرحله پایانی کانی‌زایی پدید آمده است (شکل ۵- C). این نوع پیریت‌ها در منطقه اکسیدان به دنبال فرایندهای سوپرژن و هوازدگی با گئوتیت جایگزین شده‌اند.



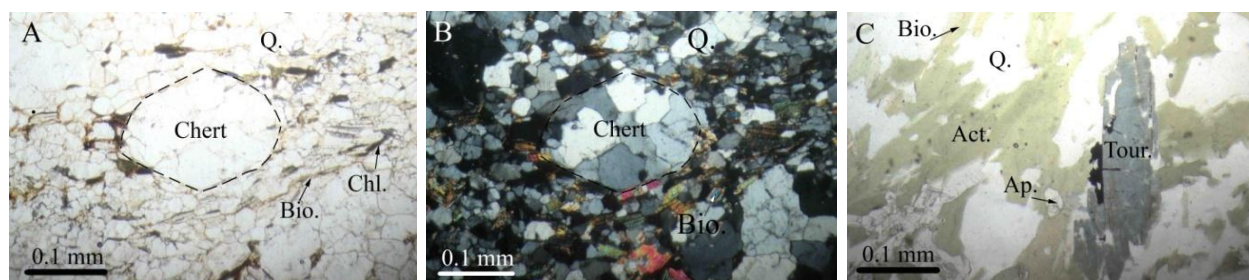
شکل ۹- پیریت‌های انتشاری گوناگون که به صورت انتشاری درون مگنتیت دیده می‌شوند: (A) پیریت انتشاری بی‌شکل؛ (B) پیریت نیمه‌شکل‌دار؛ (C) پیریت شکل‌دار (پیریت: Py؛ مگنتیت: Mag؛ بیوتیت: Bio)

کلریت در دمایی نزدیک به ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد پدید می‌آید (Faure, 1992). تالک به شکل کانی‌های جهت‌یافته و ورقه‌ای فراوان در تالک‌شیبست دیده می‌شود. پیش‌کانی تالک، کلریت و رس‌های اولیه نونرونیست هستند که با پیشرفت دیاژنز و دگرگونی با تالک آهن‌دار جایگزین شده‌اند (Faure, 1992). پیدایش تالک و انواع آن پیامد واکنش منیزیم آب دریا با مذاب بازالتی و کانی‌های سیلیکاتی در محیط رسوبی است. همچنین، چه‌بسا پیدایش تالک‌ها پیامد واکنش سیلیس محلول با گرینالیت یا کلریت باشد

کلریت به شکل بلورهای کشیده و شکل‌دار در میان توالی‌های اکسیدی و سولفیدی دیده می‌شود. انواع با مرزهای گردشده (قدیمی‌تر) چه‌بسا به قطعات معلق مربوط باشند. سربست‌ها در سربست‌شیبست‌ها و کوارتز شیبست‌ها، فلدسپارها (آلبیت، الیگوکلاز، ارتوز و میکروکلین)، در سنگ‌های بیوتیت‌شیبست، سربست‌شیبست و متاگرانیت‌ها، اکتینولیت در شیبست‌های سبز دیده می‌شود. اپیدوت در شیبست‌سبز (متابازالت) دیده می‌شود؛ اگرچه در فرایندهای دگرگونی درجه پایین، در پی واکنش کلسیت با کانی‌های رسی و

و آواری هستند. تورمالین چه بسا در پی دگرسانی و واکنش میان محلول‌های گرمایی زیردریایی (که از بور سرشار هستند) با کانی‌های سیلیکاتی پدید می‌آید (Spry *et al.*, 2000). گاه این کانی به صورت میانبار درون اکسیدها دیده می‌شود (شکل ۱۰- C). آپاتیت درشت دانه (۵ درصد) نسبت به انواع ریزدانه (کمتر از ۵ درصد) فراوان تر است و در شیست‌ها یافت می‌شود. آپاتیت به صورت ژل اولیه فسفاتی همراه با پیش کانی‌های هیدروکسیدفریک یا هیدرومگنتیت در پهنه‌های رسوبی ته‌نشین می‌شود و سپس هنگام دیازنز و دگرگونی بلورهای آپاتیت را می‌سازد (Trendall and Morris, 1983).

(Trendall and Morris, 1983). تالک در مغزه‌های حفاری معدن شماره ۳ گل‌گهر با ضخامت ۹ متر در ژرفای ۴۱۸ تا ۴۲۷ متری دیده شد (Badavi *et al.*, 2018). از سوی دیگر، تالک همراه با سرپانتین از دگرگون شدن دولومیت‌های سیلیسی و شیلی نیز پدید می‌آید که در کانسنگ آنومالی شماره ۳ گل‌گهر این واکنش گمان می‌رود منطقی‌تر باشد (Deer *et al.*, 1992). تورمالین، به صورت بلورهای شکل‌دار و سوزنی از کانی‌های بسیار مهم کانسارهای آهن نواری است (Slack *et al.*, 2000) و در برخی نمونه‌ها تا ۱۵ درصد از شیست‌های سبز را دربر می‌گیرد. تورمالین‌های شکل‌دار و گردشده نسبت به نوع سوزنی قدیمی‌تر



شکل ۱۰- A, B) فراوانی قطعات چرتی در شیست‌ها (A: تصویر در PPL؛ B: تصویر در XPL)؛ C) تورمالین در شیست‌های سبز (تصویر در PPL) (اکتینولیت: Act؛ آپاتیت: Ap؛ کلریت: Chl؛ تورمالین: Tour؛ کوارتز: Q؛ بیوتیت: Bio)

در رخنمون‌های سنگی و مغزه‌های حفاری آنومالی شماره ۳ دیده نشدند؛ اگرچه Jafari و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات شدید رخساره آمفیبولیت در محدوده‌ای به مساحت کمتر از یک کیلومتر مربع را در آنومالی شماره یک گزارش کرده‌اند. این نکته نیاز به بررسی بیشتر دارد؛ زیرا در فاصله چند متری تغییرات دما و فشار را از رخساره آمفیبولیت تا شیست به طور جانبی یا عمودی دیده نمی‌شود.

ب- **متاگرانیت:** آلکالی‌فلدسپار پرتیتی (۳۵ درصد حجمی)، کوارتز (۳۰ درصد حجمی)، الیگوکلاز (۲۵ درصد حجمی)، بیوتیت (۱۰ درصد حجمی) از

سنگ‌نگاری کانسنگ معدنی و سنگ‌های همبر

شیست‌ها از فراوان‌ترین سنگ‌های همبر کانسنگ هستند اگرچه متابازالت، متاگرانیت و کوارتزیت نیز در بررسی‌های صحرایی دیده می‌شوند (جدول ۴).

الف - شیست‌ها: سریسیت شیست، تالک شیست، مسکویت شیست، بیوتیت سریسیت شیست، بیوتیت کلریت شیست، مسکویت کلریت شیست، بیوتیت شیست، کلریت مسکویت اکتینولیت شیست، کلریت بیوتیت اکتینولیت شیست و اکتینولیت شیست از سنگ‌های خانواده شیست در آنومالی شماره ۳ گل‌گهر هستند (جدول ۴). در این بررسی، شواهد پیدایش آمفیبولیت

ماسه‌سنگ ناخالص بوده است.

ت - متابازالت: بازالت دگرگون‌شده از اپیدوت، کلریت، آلبیت و کلسیت و اکتینولیت ساخته شده است. بیشتر اکتینولیت‌شیست‌ها در آنومالی شماره ۳، پیامد دگرگونی ناحیه‌ای گدازه‌های زیردریایی بازالتی هستند.

کانی‌های اصلی این سنگ و زیرکن، آپاتیت و کانیه‌های کدر (۵ درصدحجمی) از کانیه‌های فرعی آن به‌شمار می‌روند.

پ - کوارتزیت (شیست‌های کوارتزیتی): این سنگ با بافت موزایکی بیش از ۹۵ درصدحجمی کوارتز دارد و سنگ اولیه آنها،

جدول ۴- ویژگی‌ها و فراوانی کانیه‌ها (بر پایه درصدحجمی) در سنگ‌های خانواده شیست در کانسار شماره ۳ گل‌گهر

Protolith rocks: shale + dolomite + basalt + sandstone + marl + chert)	Quartz	Feldspar	Biotite	Chlorite	Muscovite	Sericite	Actinolite	Tourmaline	Talc	Epidote	Calcite	Garnet, Apatite, Sphene, Zircon, Opaque
Sericite schist	30	-	10	-	5	40	-	-	-	5	-	<10
Talc schist	10	-	-	-	-	-	-	-	75	-	-	<10
Muscovite schist	55	-	5	-	25	-	-	-	-	5	-	<10
Biotite- sericite schist	35	25	10	-	10	-	-	15	-	-	-	<5
Biotite- chlorite schist	30	-	15	30	-	10	-	-	-	-	10	<5
Muscovite- chlorite schist	20	40	-	10	5	-	-	5	-	-	-	<5
Biotite schist	30	15	35	6	2	-	-	-	-	5	3	<10
Chlorite- muscovite- actinolite schist	30	-	5	-	20	-	30	5	-	-	-	<5
Chlorite- biotite- actinolite schist	30	-	20	5	5	-	3	-	-	۵	-	<5
Actinolite schist	25	8	12	6	-	-	40	-	-	5	-	<10

کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی (Gossanized zone) و سنگ همبر به‌ترتیب برابر ۵۶/۳۸، ۶۳/۶۷، ۴۷/۳۶ و ۹/۶۳ درصدوزنی است. غنی‌شدگی کانسنگ مگنتیتی ۸/۸۷ برابر پوسته، ۱/۵۶ برابر کانسار راپیتان و ۱/۰۳ برابر کانسار ادیاکاران است (جدول ۱) و ازاین‌رو، این کانسنگ به کانسار ادیاکاران شباهت بیشتری دارد.

میانگین اکسیدآلومینیم در کانیه‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ همبر، به‌ترتیب برابر ۰/۲۲، ۱/۲۱، ۰/۹۹ و ۱۰/۶۹ درصدوزنی (جدول ۱) و از میانگین پوسته کمتر است. کمبود این اکسید ویژه

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی

داده‌های زمین‌شیمیایی عنصرهای اصلی، فرعی و کمیاب در سولفیدها، کانسنگ مگنتیتی، بخش اکسیدی سطحی کانسار و سنگ‌های همبر در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده‌اند. هدف از تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی عنصرها، بررسی غنی‌شدگی عنصرهای اصلی، فرعی و کمیاب در کانسنگ مگنتیتی در برابر ترکیب پوسته و کانسارهای آهن‌گوناگون و در پایان، پی‌بردن به نوع کانیه‌زایی آهن است.

الف - اکسیدهای عنصرهای اصلی: بر پایه جدول ۱، میانگین اکسیدآهن ($Fe_2O_3^{total}$) در

سولفیدی (۳۹۰ برابر) چشمگیر است. میانگین اکسیدهای عنصرهای اصلی دیگر تغییرات معنی داری را نشان نمی‌دهد و گاه نزدیک به مقدار آن در ترکیب پوسته و یا کمتر از آن است.

ب- عنصرهای فرعی و کمیاب: تغییرات مقدار عنصرهای فرعی و کمیاب و شدت غنی‌شدگی آنها در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، بخش پهنه اکسیدی سطحی کانسار و سنگ‌های همبر آنومالی شماره ۳ گل‌گهر، در برابر ترکیب پوسته زمین و کانسنگ کانسارهای ادیاکاران، راپیتان، سوپریور و آگوما، در جدول‌های ۲ و ۳ و شکل ۱۱ مقایسه شده است. بر این پایه، مس، سرب، روی فراوان‌تر از عنصرهای دیگر هستند.

مس (Cu): میانگین مس در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ‌های همبر به ترتیب برابر با ۸۷۱/۶۵، ۲۴۱/۶۴، ۶۱ و ۳۱/۳۲ گرم در تن است (جدول ۲). شدت غنی‌شدگی مس در کانسنگ مگنتیتی در برابر ترکیب پوسته افزودگی (۴/۳۹) دارد (جدول ۲) و حداکثر مس (۲۶۴۵ گرم در تن) در کانی‌های سولفیدی حضور کالکوپیریت و بورنیت را نشان می‌دهد.

مولیبدن (Mo): مقدار میانگین مولیبدن در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، سوپرژن و سنگ همبر به ترتیب برابر با ۵/۶۷، ۲/۸۳، ۲/۲۲ و ۴/۹۳ گرم در تن است (جدول ۲) که نسبت به میانگین پوسته‌ای افزودگی نشان می‌دهد (جدول ۲).

سرب (Pb): میانگین غلظت سرب در کانی‌های سولفیدی برابر با ۱۹۰/۵۱ گرم در تن، در کانسنگ مگنتیتی برابر با ۶۰/۵۶ گرم در تن، در پهنه اکسیدی سطحی برابر با ۳۹/۱۷ گرم در تن و در سنگ همبر برابر با ۲۶/۱۸ گرم در تن و بیشترین

کانسارهای آهن نواری است (Maynard, 1983) که به کانسارهای آهن نواری ادیاکاران نزدیک‌تر است. در میان کانسارهای آهن گوناگون بیشترین مقدار آلومینیم مربوط به کانسارهای آهن ائولیتی است (Maynard, 1983).

میانگین اکسیدمنیزیم در کانسنگ مگنتیتی برابر با ۵/۲۷ درصدوزنی، در کانی‌های سولفیدی برابر با ۱/۲۴ درصدوزنی، در پهنه اکسیدی سطحی برابر با ۰/۱۷ درصدوزنی و در سنگ همبر برابر با ۳/۰۳ درصدوزنی است (جدول ۱). غنی‌شدگی اکسیدمنیزیم در کانسنگ مگنتیتی، در برابر ترکیب پوسته و همه کانسارهای آهن نواری چشمگیر است. این ویژگی چه بسا پیامد انحلال جامد منیزیم به جای مگنتیت ($MgFe_2O_4$) منیزیوفریت، (Dupuis and Beaudion, 2011) باشد. از طرفی مقدار زیاد منیزیم شاید پیامد حضور نوارهای بسیار ریز تالک‌شست و مرم‌های دولومیتی در کانسنگ باشد.

میانگین اکسیدفسفر در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ همبر به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۹۲، ۰/۴۲ و ۰/۲۳ درصدوزنی است (جدول ۱). غنی‌شدگی اکسیدفسفر در کانسنگ مگنتیتی در برابر ترکیب پوسته و کانسارهای آهن نواری راپیتان بیشتر است.

مقادیر گوگرد تغییرات چشمگیری در پوسته و انواع کانسارها نشان می‌دهد به گونه‌ای که در کانی‌های سولفیدی برابر با ۱۹/۵۲ درصدوزنی، در کانسنگ مگنتیتی برابر با ۲/۲ درصدوزنی، در پهنه اکسیدی سطحی برابر با ۰/۲۷ درصدوزنی و در سنگ همبر برابر با ۰/۹ درصدوزنی است (جدول ۱). میانگین این عنصر در کانسنگ مگنتیتی، در برابر میانگین پوسته ۴۴ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. غنی‌شدگی شدید این عنصر در کانی‌های

غنی‌شدگی نشان می‌دهد (جدول ۲) و بیشترین مقدار آن در پهنه اکسیدی سطحی برابر با ۸۰۹/۹ گرم در تن است.

آرسنیک (As): تغییرات مقدار میانگین آرسنیک در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ همبر به ترتیب برابر با ۱۲۱/۳۵، ۳۱/۱۵، ۴۳/۴۴ و ۱۸/۲۶ گرم در تن است (جدول ۳) و غنی‌شدگی آن در کانسنگ مگنتیتی، نسبت به میانگین پوسته‌ای نزدیک به ۱۷/۳۱ برابر است. بیشترین مقدار آرسنیک در کانی‌های سولفیدی برابر با ۴۳۹/۲ گرم در تن است؛ زیرا آرسنیک در پیریت تمرکز پیدا می‌کند (Levinson, 1980).

آنتیموان (Sb): میانگین آنتیموان در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ همبر به ترتیب برابر با ۴/۴۱، ۲/۱۶، ۱/۷۵ و ۱/۶۷ گرم در تن است (جدول ۳). آنتیموان در کانسنگ مگنتیتی، نسبت به میانگین پوسته‌ای نزدیک به ۱۰/۸ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. بیشترین مقدار آنتیموان در کانی‌های سولفیدی برابر با ۱۴/۵۹ گرم در تن است (جدول ۳).

پ - عنصرهای خاکی کمیاب: عنصرهای خاکی کمیاب در شناسایی کانسارهای آهن نواری گوناگون نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. غنی‌شدگی و تغییرات عنصرهای خاکی کمیاب در برابر ترکیب کندریت و شیل آمریکای شمالی به دست آورده شده‌اند (جدول ۳؛ شکل ۱۱). برپایه شکل ۱۱، تغییرات آشکاری در غنی‌شدگی عنصرهای خاکی کمیاب دیده نمی‌شود؛ اگرچه عنصرهای سنگین غنی‌شدگی ضعیفی را نشان می‌دهند. مهم‌ترین نکته نبود آنومالی آشکار یوروپیم است. این ویژگی از

مقدار آن در کانی‌های سولفیدی برابر با ۱۲۱۹ گرم در تن (جدول ۲) و به دلیل جانشینی سرب در پیریت (Levinson, 1980) است.

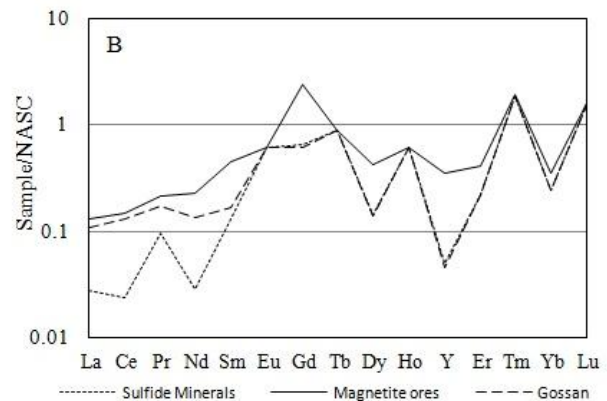
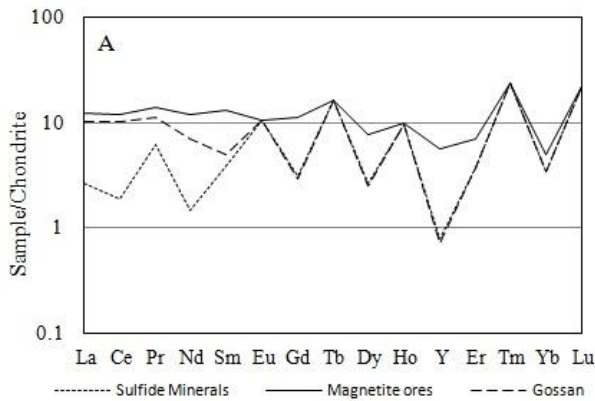
روی (Zn): تغییرات میانگین روی در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ همبر به ترتیب برابر با ۷۸۱/۸۴، ۱۰۶/۳۴، ۴۷/۴۴ و ۵۷/۶۸ گرم در تن است که در برابر ترکیب پوسته، کانسار ادیاکاران، کانسار راپیتان، کانسار سوپریور و کانسار آگوما به ترتیب برابر با ۱/۵۲، ۵/۹۱، ۴/۰۹، ۲/۶۶ و ۰/۳۲ است (جدول ۲). بیشترین مقدار روی در کانی‌های سولفیدی برابر با ۷۲۹۱ گرم در تن است (جدول ۲) که به علت جانشینی روی در پیریت (Levinson, 1980) و یا حضور احتمالی اسفالریت است.

کبالت (Co): میانگین کبالت در کانی‌های سولفیدی برابر با ۱۵۰۳/۴۳ گرم در تن، در کانسنگ مگنتیتی برابر با ۱۳۱/۵۹ گرم در تن، در پهنه اکسیدی سطحی برابر با ۲۱/۷۷ گرم در تن و در سنگ همبر برابر با ۵۴/۷۷ گرم در تن است. شدت غنی‌شدگی کبالت در کانسنگ مگنتیتی، در برابر ترکیب پوسته، کانسارهای ادیاکاران، راپیتان، سوپریور و آگوما به ترتیب برابر با ۵/۳، ۷۳/۱، ۱۶/۴۵، ۴/۷ و ۳/۲۱ (جدول ۲) است. بیشترین مقدار کبالت در پیریت برابر با ۳۱۰۵/۳۴ گرم در تن است و جانشین آهن در ساختار پیریت می‌شود (Levinson, 1980).

وانادیم (V): مقدار متوسط وانادیم در کانی‌های سولفیدی برابر با ۵۶/۱۱ گرم در تن، در کانسنگ مگنتیتی برابر با ۳۰۶/۲۵ گرم در تن، در پهنه اکسیدی سطحی برابر با ۴۵۹/۰۷ گرم در تن و در سنگ همبر برابر با ۸۴/۱۶ گرم در تن است. وانادیم در کانسنگ مگنتیتی، نسبت به میانگین پوسته‌ای، کانسارهای ادیاکاران، راپیتان، سوپریور و آگوما به ترتیب برابر با ۲/۲۷، ۸/۰۶، ۸/۰۶، ۷/۲۹ و ۲/۸۱

معلق است (Baldwin, 2014). برپایه یافته‌های Aftabi و Mohseni (۲۰۱۴)، Baldwin (۲۰۱۵) و Atapour و Aftabi (۲۰۱۷)، این نوع آنومالی‌ها ویژه کانسارهای آهن نواری در محیط یخچالی (ادیاکاران و راپیتان) است.

ویژگی‌های کانسارهای آهن نواری نوع ادیاکاران و راپیتان است (Baldwin, 2014). آنومالی مثبت گادولونیم، تربیم و تولیم در شکل ۱۱، به دلیل تمرکز عنصرهای یادشده در کانی‌های آواری (مونازیت، زینوتیم و زیرکن) درون قطعات



شکل ۱۱- نمودار غنی‌شدگی عنصرهای خاکی کمیاب در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی و پهنه اکسیدی سطحی آنومالی شماره ۳ گل‌گهر در برابر: (A) ترکیب کندریت؛ (B) ترکیب ماسه‌سنگ آمریکای شمالی

در نمونه‌های کانسنگ مگنتیتی (جدول ۵- B) آهن همبستگی اندکی با بیشتر عنصرها نشان می‌دهد. این پدیده چه‌بسا پیامد اکسی‌فیل بودن آهن و فراوانی کانسنگ مگنتیتی است؛ اگرچه با وانادیم، مس و گوگرد همبستگی متوسطی نشان می‌دهد. این ویژگی پیامد جانمایی وانادیم به‌جای آهن در ساختار مگنتیت و حضور مس و گوگرد در پیریت است. همچنین، وابستگی زمین‌شیمیایی قوی میان گوگرد- سرب (۰/۵۱۱)، گوگرد- کبالت (۰/۹۵۴)، گوگرد- آرسنیک (۰/۶۵۷)، گوگرد- آنتیموان (۰/۵۳۰)، سرب- روی (۰/۸۸۹)، سرب- کبالت (۰/۶۷۵)، سرب- قلع (۰/۸۶۶)، سرب- آرسنیک (۰/۹۷۴)، سرب- آنتیموان (۰/۹۹۵)، قلع- آنتیموان (۰/۸۸۷)، قلع- آرسنیک (۰/۸۹۵)، قلع- کبالت (۰/۶۲۲)، روی- کبالت (۰/۶۵۷)، روی- قلع (۰/۸۵۹)، روی- آرسنیک (۰/۹۶۹)، روی- آنتیموان (۰/۹۹۳) و آرسنیک- آنتیموان (۰/۹۷۷) دیده می‌شود.

عنصرهای دیگر: میانگین مقدار کروم، نیکل، قلع، گالیم، نیوبیوم، لانتانیم، سربیم به مقدار آنها در ترکیب پوسته زمین (جدول ۳) نزدیک است و تغییرات معنی‌داری را نشان نمی‌دهند.

بررسی‌های آماری

الف- ضریب همبستگی: ضریب همبستگی عنصرها در کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ همبر در جدول ۵ نشان داده شده است. در کانی‌های سولفیدی (جدول ۵- A) همبستگی خوبی میان گروه‌های آهن- گوگرد (۰/۵۷۳)، آهن- مس (۰/۵۰۹)، آهن- کروم (۰/۶۲۰)، آهن- کبالت (۰/۶۱۶)، گوگرد- نیکل (۰/۶۵۷)، گوگرد- کبالت (۰/۶۱۰)، روی- سرب (۰/۹۲۹)، سرب- قلع (۰/۸۶۵)، سرب- آنتیموان (۰/۸۲۹)، روی- قلع (۰/۷۶۳)، روی- آنتیموان (۰/۵۹۷)، قلع- آنتیموان (۰/۸۶۴) و وانادیم- گالیم (۰/۸۵۵) دیده می‌شود.

جدول ۵- ضریب همبستگی عنصرهای درون کانی‌های سولفیدی (A)، کانسنگ مگنتیتی (B)، پهنه اکسیدی سطحی (C) و سنگ‌های همبر (D) در آنومالی شماره ۳ گل‌گهر

A

	Fe	p	S	Cu	Mo	Pb	Zn	Ni	Cr	Co	Sn	V	As	Sb	Ga	Ce
Fe	1.000	.333	.573	.509	.439	.087	.034	.098	.620	.616	.301	.267	.089	.178	.321	.265
p		1.000	-.202	-.010	.056	.473	.200	-.370	.460	.019	.295	-.084	.172	.338	.128	.141
S			1.000	.200	-.055	-.236	-.190	.657	.069	.610	-.253	-.229	.460	-.330	-.347	.049
Cu				1.000	.406	.030	-.059	.284	.434	.257	.114	-.151	-.360	.223	.012	-.064
Mo					1.000	-.019	-.042	-.493	.367	.470	.121	.420	-.548	.109	.394	-.178
Pb						1.000	.929	-.460	.212	-.065	.865	-.165	.161	.829	-.143	.025
Zn							1.000	-.438	.066	-.084	.763	-.015	.231	.597	-.046	-.062
Ni								1.000	-.129	.086	-.441	-.469	.355	-.391	-.441	.059
Cr									1.000	.269	.313	.247	-.165	.419	.250	.083
Co										1.000	-.021	-.077	-.114	-.086	-.003	.017
Sn											1.000	.027	.099	.864	.137	.088
V												1.000	-.277	-.207	.855	-.005
As													1.000	-.017	-.333	.348
Sb														1.000	-.071	.148
Ga															1.000	.211
Ce																1.000

B

	Fe	p	S	Cu	Mo	Pb	Zn	Ni	Cr	Co	Sn	V	As	Sb	Ga	Ce
Fe	1.000	-.325	.456	.442	-.269	-.025	-.037	.031	-.019	.102	.236	.479	.001	.026	-.230	-.012
p		1.000	-.002	-.141	.310	-.229	-.229	.035	-.267	-.091	-.163	.442	-.231	-.270	.348	.370
S			1.000	.111	.213	.511	.494	.218	.469	.945	.467	-.534	.658	.530	-.693	-.471
Cu				1.000	-.029	-.025	-.040	.092	-.071	.304	.067	-.028	.020	.003	.044	-.251
Mo					1.000	.289	.287	.211	.231	.247	.301	.136	.250	.266	.019	.101
Pb						1.000	0.889	.335	-.495	.675	.866	-.340	.974	.995	-.442	-.337
Zn							1.000	.340	.497	.658	.859	-.323	.969	.993	-.424	-.331
Ni								1.000	.348	.333	-.058	.062	.240	.302	.143	-.241
Cr									1.000	.332	.446	-.310	.363	.286	-.402	-.351
Co										1.000	.621	-.539	.488	.295	-.655	-.505
Sn											1.000	-.494	.895	.887	-.575	-.112
V												1.000	-.422	-.423	.447	.352
As													1.000	.977	-.550	-.401
Sb														1.000	-.514	-.359
Ga															1.000	.377
Ce																1.000

C

	Fe	P	S	Cu	Mo	Pb	Zn	Ni	Cr	Co	Sn	V	As	Sb	Ga	Ce
Fe	1.000	.119	.740	.399	.254	.599	.931	.497	.350	.759	-.975	.934	.586	-.976	.286	.205
P		1.000	.192	.237	.153	-.245	.272	.169	-.257	.201	-.925	.170	.015	-.925	.203	.323
S			1.000	.762	.307	.771	.935	.682	-.313	.720	-.870	.331	-.111	-.870	.341	.295
Cu				1.000	.264	.767	.942	.593	.260	.398	-.982	.245	.560	-.982	.191	.324
Mo					1.000	.468	.297	.427	.353	.445	-.997	.398	.318	-.997	.491	.245
Pb						1.000	.947	.492	.264	.497	-.985	.250	.547	-.985	.193	.232
Zn							1.000	.398	.298	.419	-.988	.443	.250	-.988	.278	.266
Ni								1.000	.221	.599	-.954	.202	.351	-.954	.369	.153
Cr									1.000	.240	-.996	.399	.305	-.995	.289	.350
Co										1.000	-.968	.223	.611	-.969	.281	.286
Sn											1.000	-.990	-.394	-.998	-.598	-.216
V												1.000	.259	-.990	.280	.364
As													1.000	-.394	.444	-.219
Sb														1.000	-.998	-.915
Ga															1.000	.392
Ce																1.000

D

	Fe	P	S	Cu	Mo	Pb	Zn	Ni	Cr	Co	Sn	V	As	Sb	Ga	Ce
Fe	1.000	.246	.514	.354	-.171	.561	.445	.397	-.412	-.132	.283	.952	.604	-.458	.114	-.525
P		1.000	.037	.244	-.046	.274	.341	.262	.075	.162	-.045	.593	.039	-.600	.260	-.178
S			1.000	.044	.053	.206	.213	.149	.156	.577	-.515	-.176	-.468	.214	-.422	.056
Cu				1.000	-.064	.575	.545	.345	-.365	-.110	.121	.249	.477	-.226	.243	-.382
Mo					1.000	.004	.260	.169	.458	.227	-.698	-.144	-.157	-.228	-.312	.101
Pb						1.000	.616	.451	-.364	-.100	.037	.364	.558	-.414	.237	-.304
Zn							1.000	.354	.344	.431	-.515	.201	.022	-.540	.163	.008
Ni								1.000	-.051	.302	.011	.369	.460	-.470	.249	-.476
Cr									1.000	.132	-.780	-.310	-.594	-.070	-.601	.113
Co										1.000	-.544	-.070	-.300	-.085	-.292	.028
Sn											1.000	.235	.332	.381	.359	-.734
V												1.000	.389	-.523	.209	-.479
As													1.000	-.381	.362	-.379
Sb														1.000	-.339	-.229
Ga															1.000	-.704
Ce																1.000

۱۲-A تا ۱۲-D نشان داده شده است. کانی‌های سولفیدی سه خوشه اصلی دارند (شکل ۱۲-A). این ارتباط چه‌بسا پیامد حضور عنصرهای کالکوفیل در ساختار پیریت و کالکوپیریت باشد. Jiang و Zhao (۲۰۰۷) همراهی سریم با عنصرهای کالکوفیل و جانشینی آن در سولفیدها را نشان دادند. از سوی دیگر، ارتباط سریم با فسفر چه‌بسا پیامد حضور میانبارهای ریز آپاتیت در سولفیدهاست.

خوشه دوم دربردارنده دو زیرشاخه وانادیم-گالیم-مولیبدن و زیرشاخه آهن-کروم-مس-کبالت است. در زیرشاخه نخست وانادیم و گالیم جانشین پیریت و کالکوپیریت می‌شوند (Sahlström *et al.*, 2017)؛ اگرچه احتمال جانشینی این عنصرها در کانی ژرمانیت [Germanite = $Cu_3, (Ge, Ga, Fe) (S, As_4)$] را نباید نادیده گرفت (Sahlström *et al.*, 2017). همبستگی مولیبدن با این عنصرها شاید پیامد حضور مولیبدنیت در کانسار گل‌گهر است (Mucke and Golestaneh, 1982). در خوشه سوم همبستگی خوبی میان گوگرد-نیکل-آرسنیک دیده می‌شود که پیامد جانشینی نیکل و آرسنیک در ساختار پیریت و کالکوپیریت است (Levinson, 1980)؛ اگرچه Mucke و Golestaneh (۱۹۸۲) حضور سولفید نیکل [Linnaeite = $(Co, Ni)_3S_4$] را در کانسار گل‌گهر نیز گزارش کرده‌اند.

در نمودار خوشه‌ای کانسنگ مگنتیتی (شکل ۱۲-B)، دو خوشه اصلی دیده می‌شود. خوشه اول شامل سرب-روی-کروم-آنتیموان-آرسنیک-قلع-گوگرد-کبالت-نیکل-مس و آهن است. زیرخوشه آهن با همه عنصرهای یادشده همبستگی نشان می‌دهد. این همبستگی

ارتباط قوی این عنصرها با یکدیگر پیامد ویژگی کالکوفیلی و جانشینی آنها در ساختار پیریت و کالکوپیریت (Levinson, 1980; Rose *et al.*, 1979) است که همراه با کانسنگ مگنتیتی دیده می‌شوند.

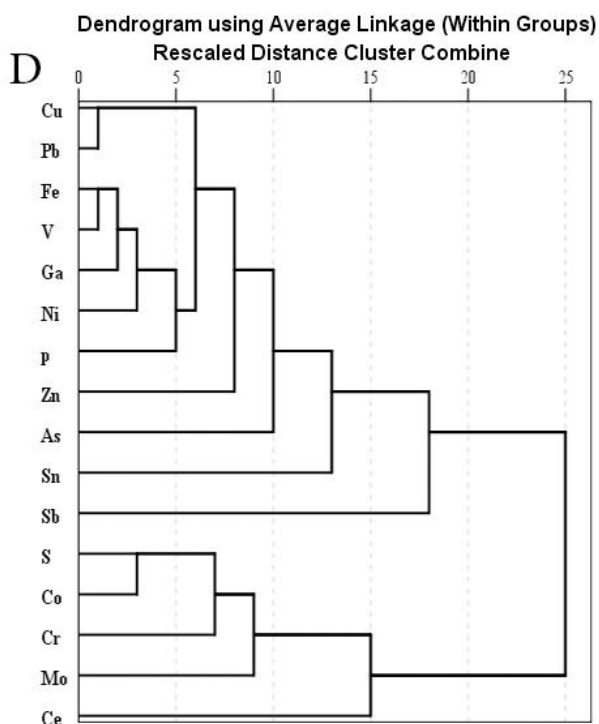
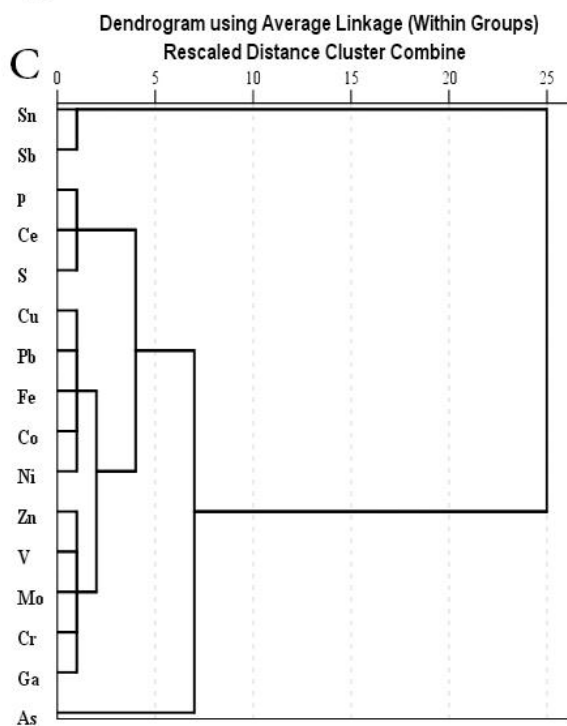
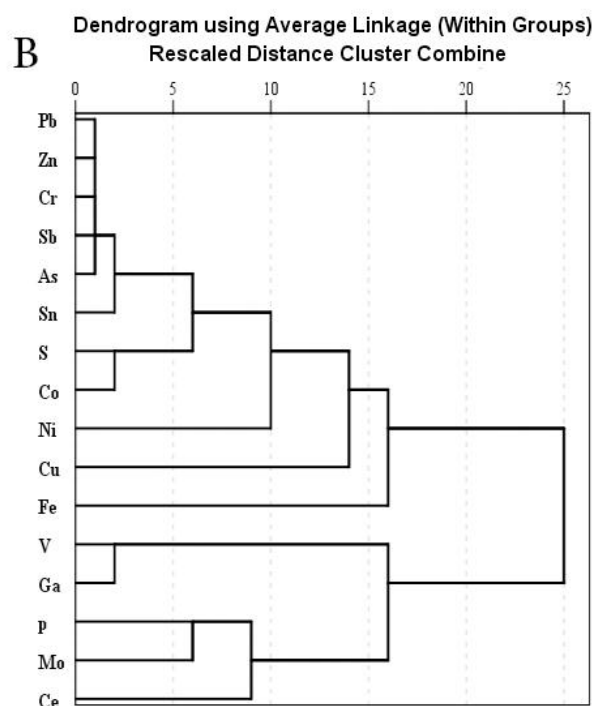
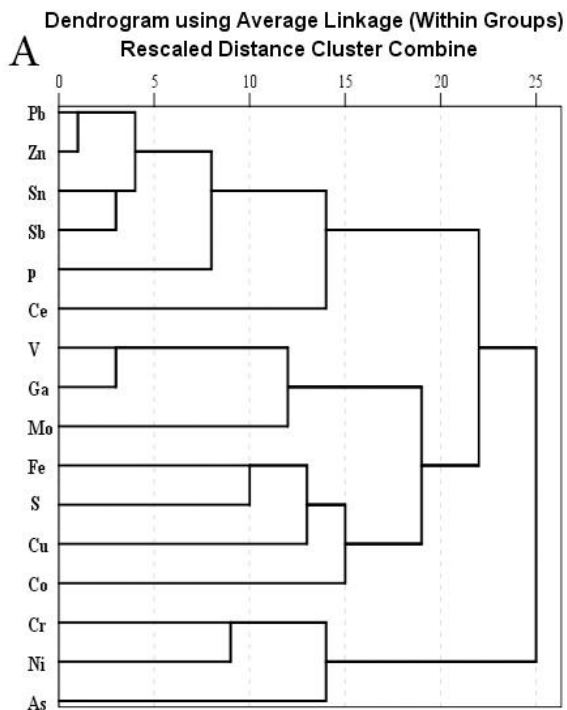
بررسی همبستگی عنصرها در نمونه‌های پهنه اکسیدی سطحی منطقه ویژگی جالبی را نشان می‌دهد (جدول ۵-C)؛ به‌گونه‌ای که میان آهن و گوگرد، سرب، روی، کبالت، وانادیم و آرسنیک همبستگی بیشتر از ۰/۵ دیده می‌شود. حضور هماتیت، گنویت و کانی‌های رسی در پهنه اکسیدی سطحی نشان می‌دهد این عنصرها را کانی‌های کلوییدی که از اکسیداسیون سولفیدها و مگنتیت و سیلیکات‌ها پدید آمده‌اند، جذب کرده‌اند. از سوی دیگر، میان گوگرد و عنصرهای کالکوفیل همبستگی کمابیش قوی دیده می‌شود. این همبستگی در پی تمرکز این عنصرهای کالکوفیل در ساختار پیریت و شاید سولفات‌های فلزی پدیدآمده از اکسیداسیون سولفیدهاست (Rose *et al.*, 1979).

در سنگ‌های همبر ارتباط زمین‌شیمیایی متوسطی میان عنصرهای گوناگون دیده می‌شود (جدول ۵-D). این ارتباط برای گروه‌های آهن، مس، گوگرد، سرب، وانادیم، آرسنیک و روی روشن‌تر است. ارتباط آهن با عنصرهای کالکوفیل، به‌علت جانشینی عنصرهای کالکوفیل در ساختار پیریت و کالکوپیریت (Levinson, 1980; Rose *et al.*, 1979; Shao *et al.*, 2018) درون شیست‌ها توجیه‌پذیر است.

ب- نمودار خوشه‌ای: نمودار خوشه‌ای برای کانی‌های سولفیدی، کانسنگ مگنتیتی، پهنه اکسیدی سطحی و سنگ‌های همبر در شکل‌های

کبالت، نیکل و مس در ساختار پیریت و کالکوپیریت است (Levinson, 1980).

پیامد جانشینی روی، کروم و قلع در ساختار مگنتیت و جانشینی سرب، آنتیموان-آرسنیک،



شکل ۱۲- نمودار خوشه‌ای عنصرهای درون: (A) کانی‌های سولفیدی؛ (B) کانسنگ مگنتیتی؛ (C) پهنه اکسیدی سطحی؛ (D) سنگ‌های همبر در آنومالی شماره ۳ گل‌گهر

در بردارنده مس - سرب - آهن - وانادیم - گوگرد - کبالت - مولیبدن - کروم - گالیم - نیکل - فسفر - روی - آرسنیک - قلع - آنتیموان و خوشه دوم در بردارنده گوگرد - کبالت - کروم - مولیبدن - سرب است. ارتباط اندک هر دو شاخه نشان دهنده تمرکز بسیار کم عنصرها و پراکندگی نامنظم سولفیدها و مگنتیت در سنگ های همبر است.

پ- آزمون مؤلفه های اصلی: نتایج آزمون مؤلفه های اصلی (PCA = Principal component analysis) در کانی های سولفیدی (شکل ۱۳) نشان دهنده حضور ۵ مؤلفه است. نمودار مکانی سه بعدی مولفه نخست با واریانس ۲۸/۳۲۳ درصد، همبستگی عنصرهایی مانند فسفر - سرب - روی - قلع - آنتیموان را نشان می دهد. همچنین، مؤلفه دوم با واریانس ۲۰/۱۸۰ درصد شامل همبستگی عنصرهای مولیبدن - وانادیم - گالیم و مؤلفه سوم با واریانس ۱۸/۰۹۷ درصد همبستگی میان آهن - گوگرد - مس - کبالت را نشان می دهند. این ویژگی های زمین شیمیایی گویای کالکوفیل بودن بسیاری از عنصرها در نمودار خوشه ای (شکل ۱۲ - A) است.

مؤلفه چهارم با واریانس ۱۱/۰۷۶ درصد شامل همبستگی کروم - نیکل - آرسنیک و مؤلفه پنجم با واریانس ۷/۸۶۳ درصد شامل فسفر - سرب (شکل ۱۳) است و ویژگی عنصرهای کالکوفیل همانند نمودار خوشه ای را (شکل ۱۲ - A) نشان می دهند.

نمودار آزمون مؤلفه های اصلی در کانسنگ مگنتیتی (شکل ۱۴) ۵ مؤلفه اصلی را نشان می دهد. مولفه نخست با واریانس ۴۸/۳۰۱، و همبستگی سرب - روی - کروم - قلع - آرسنیک - آنتیموان، مؤلفه دوم با واریانس ۱۷/۷۷۹

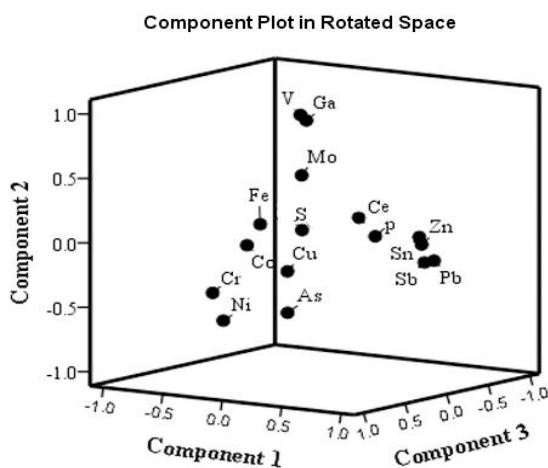
در خوشه دوم وانادیم - گالیم - فسفر - مولیبدن - سرب دیده می شوند. وانادیم - گالیم زیر خوشه نخست و فسفر - مولیبدن - سرب زیر خوشه دوم هستند. همبستگی وانادیم - گالیم پیامد جانشینی آنها به جای آهن در ساختار مگنتیت است (Rose et al., 1979). همبستگی فسفر با سرب پیامد تمرکز هر دو عنصر در آپاتیت است و همراه با مگنتیت دیده می شود (Levinson, 1980). همچنین، حضور مولیبدن در این خوشه شاید پیامد جانشینی آن به جای آهن در ساختار مگنتیت باشد (De Vos and Tarvainen, 2006).

در پهنه اکسیدی سطحی منطقه (شکل ۱۲ - C) دو خوشه اصلی دیده می شود. در پی پیدایش هیدرواکسید قلع $[Sn(OH)_4]$ و اکسید آنتیموان (Valentinite = Sb_2O_3)، قلع - آنتیموان خوشه مستقلی را می سازند (Kabata-Pendias, 2011). خوشه دوم شامل فسفر - سرب - گوگرد - مس - سرب - آهن - کبالت - نیکل - روی - وانادیم - مولیبدن - کروم - گالیم - آرسنیک است که به دو زیرشاخه رده بندی می شود. زیرشاخه نخست شامل فسفر - سرب - گوگرد - مس - سرب - آهن - کبالت - نیکل - روی - وانادیم - مولیبدن - کروم - گالیم است و از آنجایی که هیدروکسیدهای آهن و کانی های رسی آنها را جذب می کنند، در یک گروه جداگانه رده بندی می شوند (Rose et al., 1979; De Vos and Tarvainen, 2006). زیرشاخه مستقل آرسنیک به علت آرسنات آهن (Scorodite = $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) پدید آمده است (Levinson, 1980).

نمودار خوشه ای نمونه های سنگ های همبر (شیست های گوناگون) (شکل ۱۲ - D) نیز نشان دهنده دو خوشه اصلی است. خوشه اول

نشان دهنده همبستگی آهن و مس است. توزیع بیشتر عنصرهای کالکوفیل در نمودار سه‌بعدی نشان‌دهنده فراوانی پیریت و کالکوپیریت درون کانسنگ مگنتیتی است؛ اگرچه فسفر و سریم به‌علت حضور در آپاتیت از عنصرهای دیگر دور شده‌اند.

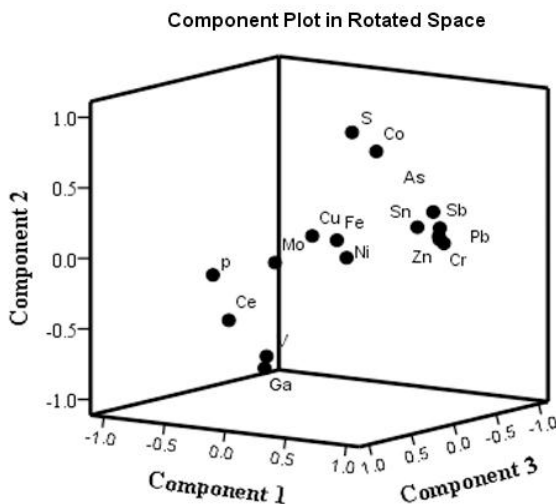
همبستگی گوگرد و کبالت، مؤلفه سوم با واریانس ۱۰/۴۷۴ فسفر-مولیبدن-سریم را نشان می‌دهند و نتایج مشابهی با نمودار خوشه‌ای (شکل ۱۲- B) دارند. مؤلفه چهارم با ۹/۰۳۲ همبستگی آشکاری میان نیکل-مس نشان می‌دهد؛ اما مؤلفه پنجم با واریانس ۸/۰۲۱



	Component				
	1	2	3	4	5
Fe	.126	.229	.834	.270	.351
p	.479	.045	-.043	-.337	.783
S	-.245	-.335	.875	.773	-.031
Cu	.005	-.220	.785	-.189	.048
Mo	.091	.527	.286	-.112	-.186
Pb	.981	-.092	-.033	-.023	.051
Zn	.916	.035	.025	-.215	-.154
Ni	-.530	-.656	.341	.621	.067
Cr	.232	.194	.344	.332	.389
Co	-.019	.045	.336	.240	-.097
Sn	.907	.094	.037	.089	.222
V	-.088	.943	.045	-.024	-.018
As	.136	-.331	.288	.361	.302
Sb	.830	-.135	-.133	.320	.364
Ga	-.078	.893	-.011	-.113	.224
Ce	-.059	.055	.068	-.221	.847
Initial total	4.532	3.229	2.895	1.772	1.258
eigen. % variance	28.323	20.180	18.097	11.076	7.863
values %cumulative	28.323	48.503	66.600	77.676	85.539

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

شکل ۱۳- نمودار سه‌بعدی و مؤلفه‌های اصلی عنصرها در کانی‌های سولفیدی



	Component				
	1	2	3	4	5
Fe	.030	.060	-.165	-.207	.894
p	-.218	-.052	.943	.103	-.183
S	.307	.884	.052	.275	-.079
Cu	-.085	.097	-.039	.426	.763
Mo	.281	.084	.922	.133	-.077
Pb	.968	.201	-.028	.141	-.040
Zn	.971	.179	-.031	.142	-.053
Ni	.241	-.017	.021	.771	.037
Cr	.974	.146	-.079	.137	-.062
Co	.495	.765	.034	.360	.136
Sn	.884	.277	.105	-.231	.214
V	-.256	-.732	.255	.377	-.291
As	.913	.368	-.040	.116	-.022
Sb	.958	.255	-.053	.095	.007
Ga	-.329	-.835	.174	.354	-.080
Ce	-.185	-.390	.802	-.384	.032
Initial total	7.728	2.845	1.676	1.445	1.283
eigen. % variance	48.301	17.779	10.474	9.032	8.021
values %cumulative	48.301	66.080	76.554	85.586	93.607

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

شکل ۱۴- نمودار سه‌بعدی و مؤلفه‌های اصلی عنصرها در کانسنگ مگنتیتی

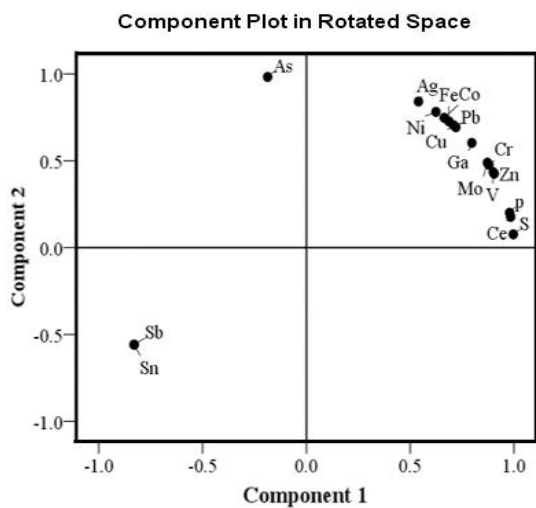
وانادیم-گالیم-سریم (شکل ۱۵) به‌عنوان مؤلفه اصلی اول با واریانس ۸۸/۹۷۸ چشمگیر است. همان‌گونه‌که

برپایه شکل ۱۵، همبستگی آهن-فسفر-گوگرد-مس-مولیبدن-سرب-روی-نیکل-کروم-کبالت-

همبستگی عنصرهای آهن- فسفر- مس- سرب- روی- نیکل- وانادیم و گالیم، مؤلفه دوم با واریانس ۲۹/۰۶۲ شامل گوگرد- مولیبدن- روی- کروم- کبالت، مؤلفه سوم با واریانس ۱۰/۴۲۰ شامل آنتیموان و قلع و مؤلفه چهارم با واریانس ۶/۹۷۶ شامل سرب و آرسنیک است. جدایش گروه‌های عنصری شاید پیامد پراکندگی نامنظم و کمبود سولفیدها و مگنتیت در برابر فراوانی کانی‌های سیلیکاتی است.

در باره نمودار خوشه‌ای (شکل ۱۲- C) گفته شد، این همبستگی چه‌بسا پیامد جذب این عنصرها به هیدروکسیدهای آهن و کانی‌های رسی در پهنه اکسیدی سطحی است. جایگاه آرسنیک در نمودار شکل ۱۵ شاید در پی پیدایش آرسنات آهن (Scorodite= $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) روی داده است (Levinson, 1980).

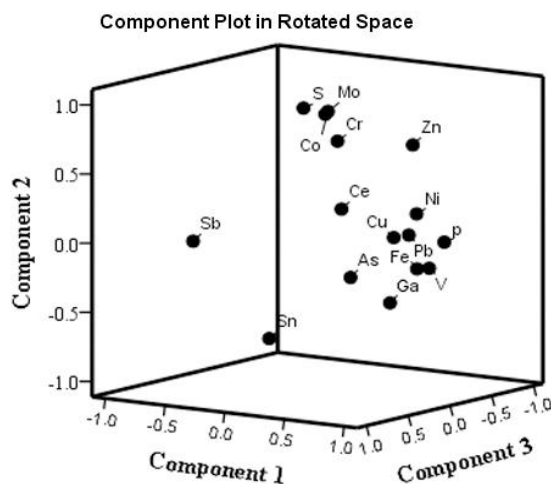
نمودار آزمون مؤلفه‌های اصلی در سنگ‌های همبر (شکل ۱۶) ۴ مؤلفه اصلی دارد. مؤلفه نخست با واریانس ۴۴/۲۷۴ نشان‌دهنده



	Rotated Component Matrix	
	Component 1	Component 2
Fe	.687	.727
p	.980	.201
S	.997	.077
Cu	.710	.704
Mo	.872	.489
Pb	.720	.694
Zn	.905	.426
Ni	.624	.781
Cr	.879	.477
Co	.664	.747
Sn	-.830	-.558
Ag	.540	.841
V	.901	.434
As	-.186	.982
Sb	-.829	-.559
Ga	.797	.603
Ce	.984	.177
Initial total	15.126	1.874
eigen % variance	88.978	11.022
values %cumulative	88.978	100.000

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

شکل ۱۵- نمودار مؤلفه‌های اصلی عنصرها در پهنه اکسیدی سطحی



	Rotated Component Matrix			
	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4
Fe	.919	-.124	.122	.331
p	.945	.031	-.167	-.264
S	-.035	.942	.117	-.233
Cu	.739	.087	.143	.457
Mo	-.085	.844	-.215	.171
Pb	.754	.084	-.015	.536
Zn	.613	.686	-.265	.081
Ni	.894	.267	.090	.214
Cr	-.145	.610	-.447	-.554
Co	.071	.909	-.024	-.245
Sn	.115	-.620	.743	.077
V	.982	-.121	.065	.090
As	.302	-.261	.037	.828
Sb	-.547	.013	.708	-.211
Ga	.825	-.352	.311	.225
Ce	-.389	.037	-.843	-.229
Initial total	7.084	4.650	1.667	1.116
eigen % variance	44.274	29.062	10.420	6.976
values %cumulative	44.274	73.336	83.756	90.732

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

شکل ۱۶- نمودار سه‌بعدی و مؤلفه‌های اصلی عنصرها در سنگ‌های همبر

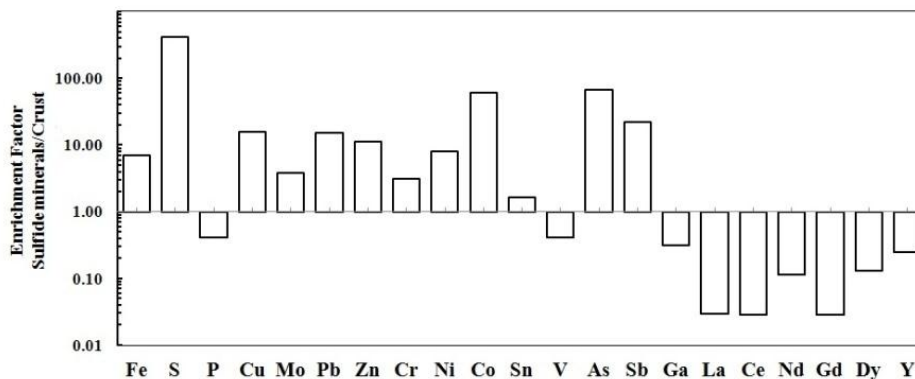
بحث

مگنتیتی نسبت به کانسار راپیتان نیز برای عنصرهای مس (۴/۱)، روی (۴/۱)، نیکل (۱۱/۸) و کبالت (۱۶/۴) چشمگیر است (شکل ۱۸). غنی‌شدگی بیشتر از ۱۰ برابر برای عنصرهای کالکوفیل مخصوصاً گوگرد نشان‌دهنده خاستگاهی سرشار از گوگرد است که هنگام فوران‌های بازالتی زیردریایی از آب دریا خاستگاه می‌گیرد. میانگین ایزوتوپی گوگرد (+۰.۲۴) در پیریت‌های لایه‌ای با مگنتیت نشان‌دهنده این ویژگی هستند (Dalfardi, 2012).

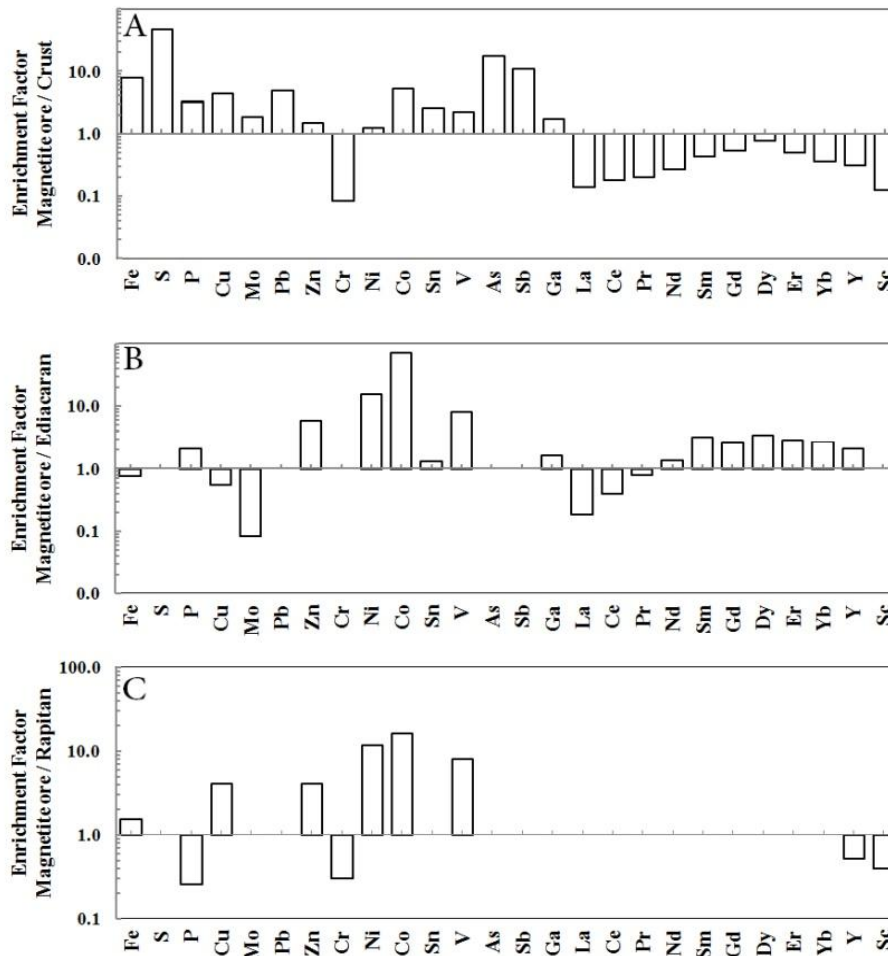
برپایه داده‌های شکل ۱۸، غنی‌شدگی آهن در کانسنگ آنومالی شماره ۳ گل‌گهر در برابر ترکیب پوسته (شکل ۱۸ - A) بیشتر از ۱۰ برابر و در مقایسه با کانسارهای ادیاکاران (شکل ۱۸ - B) نزدیک به یک است. بیشتر عنصرهای کالکوفیل در کانسنگ مگنتیتی در برابر کانسارهای ادیاکاران (شکل ۱۸ - B) و راپیتان (شکل ۱۸ - C) بیشتر از دو برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهند. این ویژگی نشان‌دهنده خاستگاه سرشار از گوگرد در آب دریا و آزادشدن عنصرهای کالکوفیل از فوران‌های بازالتی زیردریایی است (Spry et al., 2000).

شکل ۱۷ نمودار افزودگی - کاهیدگی عنصرها در کانی‌های سولفیدی در برابر ترکیب پوسته را نشان می‌دهد. در این نمودار شدت غنی‌شدگی آهن (۶/۹)، گوگرد (۴۱۸/۶)، مس (۱۵/۸)، مولیبدن (۳/۸)، سرب (۱۵/۲)، روی (۱۱/۲)، کروم (۳/۲)، نیکل (۸)، کبالت (۶۰)، قلع (۱/۶)، آرسنیک (۶۷/۴) و آنتیموان (۲۲) چشمگیر است (شکل ۱۷).

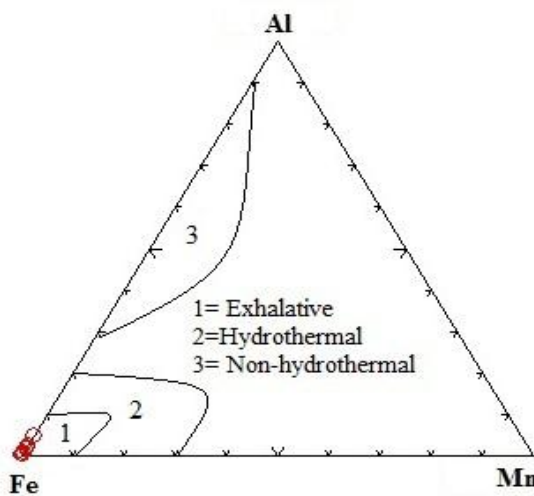
غنی‌شدگی عنصرها در کانسنگ مگنتیتی در برابر ترکیب پوسته، برای مس (۴/۴)، مولیبدن (۱/۹)، سرب (۴/۸)، روی (۱/۵)، کبالت (۵/۳)، قلع (۲/۶)، وانادیم (۲/۳)، آرسنیک (۱۷/۳)، آنتیموان (۱۰/۸) و گالیم (۱/۷۱) نزدیک به ۲ تا بیشتر از ۱۰ برابر است (شکل ۱۸). غنی‌شدگی عنصرها در کانسنگ مگنتیتی نسبت به کانسار ادیاکاران، روی (۵/۹)، نیکل (۱۵/۸)، کبالت (۷۳/۱) و وانادیم (۸/۱) و عنصرهای خاکی کمیاب ساماریم (۳/۲)، گادولنیم (۲/۷)، دیزپروزیوم (۳/۴)، اربیم (۲/۹)، ایتربیم (۲/۷) و ایتربیم (۲/۱) برابر با ۲ تا بیشتر از ۱۰ برابر است. تغییرات غنی‌شدگی کانسنگ



شکل ۱۷- نمودار افزودگی و کاهیدگی عنصرها در کانی‌های سولفیدی در برابر ترکیب پوسته

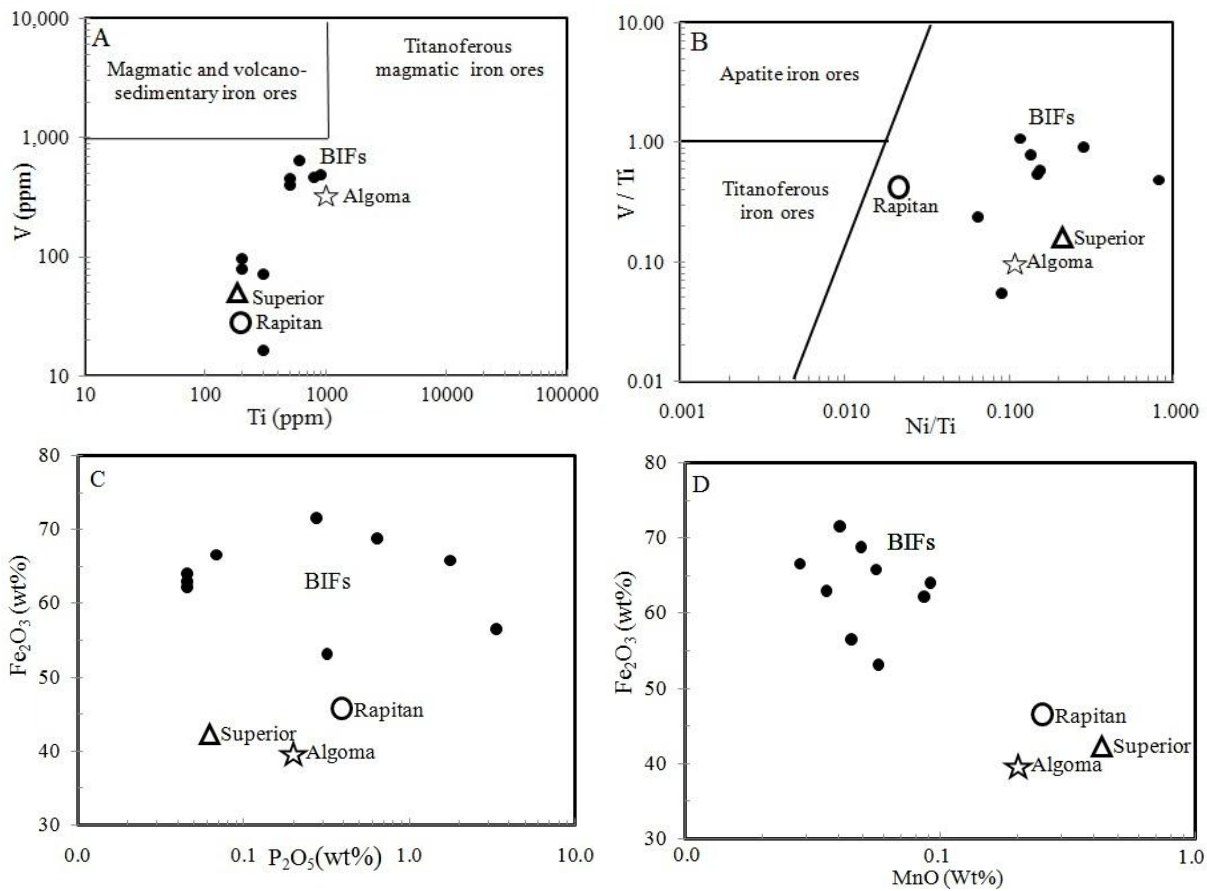


شکل ۱۸- افزودگی و کاهیدگی عنصرها در کانسنگ مگنتیتی در برابر: (A) ترکیب پوسته؛ (B) ترکیب کانسار ادیاکاران؛ (C) ترکیب کانسار راپیتان (Gross and Mcleod, 1987; Yeo, 1981; Maynard, 1983; Atapour and Aftabi, 2017)



شکل ۱۹- نمودار درصد مولی Al- Fe- Mn (Spry et al., 2000) برای کانسنگ مگنتیتی

برپایه شکل ۱۹ (نمودار سه‌تایی Al- Fe- Mn)، خاستگاه محلول‌های کانی‌زا در کانسنگ مگنتیتی از نوع متصاعدی زیردریایی است که با الگوی کانسارسازی آهن نواری نئوپروتوزویک- پالئوزویک زیرین (ادیاکاران) سازگار است. برپایه Atapour و Aftabi (۲۰۱۹)، دمای پیدایش کانسار برابر با ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهند خاستگاه کانی‌زایی آنومالی شماره ۳ گل‌گهر و دیگر آنومالی‌ها از نوع آهن نواری است و اختلاف بسیاری با الگوی کانی‌زایی اسکارن و آهن اتولیتی دارد. نمودارهای شکل ۲۰ نیز الگوی کانی‌زایی آهن نواری را نشان می‌دهند.



شکل ۲۰- مقایسه ترکیب شیمیایی کانسنگ آنومالی شماره ۳ گل‌گهر (●) در مقایسه با میانگین کانسارهای آهن نواری دیگر دنیا (Loberg and Hornidal, 1983; Nystrom and Henriques, 1994; Mirzaie, 2004) در: (A) نمودار Ti برابر V؛ (B) نمودار Ni/Ti برابر V/Ti؛ (C) نمودار P₂O₅ برابر Fe₂O₃؛ (D) نمودار MnO برابر Fe₂O₃

نتیجه‌گیری

برپایه بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت و زمین‌شیمی در آنومالی شماره ۳ گل‌گهر سیرجان یافته‌های زیر به دست آمدند:

مگنتیت مهم‌ترین کانسنگ اقتصادی است که همراه با پیریت و مقدار کمی کالکوپیریت و بورنیت دیده می‌شود. آشکارترین ساخت کانسنگ با توجه به موقعیت آنومالی شماره ۳، ساخت توده‌ای مگنتیت و نواری مگنتیت و پیریت است که به طور متناوب با نوارهای کوارتز سربیسیت شیسیت، سربیسیت، کلریت شیسیت و

امفیبول شیسیت دیده می‌شود. تناوب نوارهای مگنتیت با شیسیت‌های گوناگون نشان‌دهنده نواری بودن کانسار است. این بررسی‌ها تا کنون هیچ شواهدی از اسکارن، گنایس و آمفیبولیت را نشان نمی‌دهند. از ساخت‌های جالب دیگر حضور قطعات معلق است که قطر آنها نسبت به زمینه سنگ دگرگونی بیش از ۱۰ برابر است و باید از محیطی غیر از محیط دریایی خاستگاه گرفته باشد. این ویژگی نشان‌دهنده کانسارهای راپیتان و ادیاکاران است؛ اما برپایه سن کانسار (۵۴۴ تا ۶۰۵ میلیون سال پیش)، به کانسار ادیاکاران نزدیک‌تر است. نمودار سه‌تایی Al-Fe-

سپاس‌گزاری

نگارندگان از همکاری‌های ارزنده کارشناسان شرکت صنعتی و معدن گهر زمین، به‌ویژه مهندس حدادی، مهندس شمس‌الدینی و مهندس عصارای برای همکاری در برداشتهای صحرایی سپاس‌گزاری می‌کنند. همچنین، پشتیبانی مالی شرکت محترم ایمیدرو برای تجزیه شیمیایی نمونه‌های معدنی شایسته سپاس است. از هیئت تحریریه و داوران گرامی مجله پترولوژی برای دیدگاه‌های دقیق و پیشنهادهای سازنده سپاس‌گزاری می‌شود.

Mn و نمودارهای دو محوری V-Ti و V/Ti- Ni/Ti نشان می‌دهند کانی‌زایی آهن در آنومالی شماره ۳ گل‌گهر به کانسارهای آهن‌نواری ادیاکاران نزدیک‌تر است و شباهتی به کانسارهای آهن اسکارن و آهن ائولیتی ندارد. مقدار عنصرهای کالکوفیل در برابر ترکیب پوسته، در کانی‌های سولفیدی از ۲ تا ۱۰ برابر و در کانسنگ مگنتیتی بیش‌تر از ۲ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی آهن در کانسنگ مگنتیتی نسبت به کانسار نواری ادیاکاران نزدیک به یک است.

منابع

- Anonymous (1992) Gol-e-Gohar expansion iron ore project, ADC Project No.1253. Gol-e-Gohar Mines Cooperation.
- Atapour, H. and Aftabi, A. (2017) The possible synglaciogenic Ediacaran banded iron salt formation (BISF) at Hormuz Island, southern Iran: Implications for new style of exhalative hydrothermal iron-salt system. *Ore Geology Reviews* 89: 70-95.
- Atapour, H. and Aftabi, A. (2019) Comment on "Two-tiered magmatic-hydrothermal and skarn origin of magnetite from Gol-e-Gohar iron ore deposit of SE Iran: In situ LA-ICP-MS analyses" by Mirzaei *et al.* (2018): (*Ore geology Reviews*, 102, 639-653). *Ore Geology Reviews*. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102942.
- Babaki, A. (2004) Investigation on the model of iron mineralization at Gol-e-Gohar iron mine, Sirjan, Kerman. M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran (in Persian).
- Babaki, A. and Aftabi, A. (2006) Investigation on the model of iron mineralization at Gol-e-Gohar deposit, Sirjan, Kerman. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 16: 40-59 (in Persian).
- Badavi, M. (2018) Exploration and economic evaluation of trace, special and precious elements (Au, Pt and Pd) in sulfide minerals at Gohar Zamin iron deposit, Sirjan, Kerman. M.Sc. thesis, Shaid Bahonar University, Kerman, Iran (in Persian).
- Badavi, M., Atapour, H. and Mohammadi, M. (2018) Petrography, structure-texture of iron oxide ores at anomaly #3 of Gol-e-Gohar deposit, Sirjan, Iran. 36th Symposium of Geosciences. Geological Survey of Iran (in Persian).
- Baldwin, G. J. (2014) The stratigraphy and geochemistry of the rapitan iron formation, northwest Territories and Yukon, Canada. Unpublished Ph.D. thesis, Laurentian University.
- Bayati-Rad, Y., Mirnejad, H. and Ghalamghash J. (2013) Distribution and abundance of rare earth elements in magnetite from Gol-e-Gohar iron ore deposit, Sirjan, Kerman. *scientific quarterly journal, Geosciences* 23(90): 217-224 (in Persian).

- Bralia, A., Sabatini, G. and Troja, F. (1979) A reevaluation of the Co, Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problem. *Mineralium Deposita* 14: 353-374.
- Dalfardi, M. (2012) Investigation of sulfur genesis of sulfide minerals in the anomalous 1, 2 and 3 Gol-E-Gohar iron mine, Sirjan. M.Sc. thesis, School of Earth Science, Damghan University, Damghan, Iran (In Persian).
- De Vos, W. and Tarvainen, T. (2006) Geochemical atlas of Europe. Part 2, Geochemistry of Elements. Geological Survey of Finland, Otamedia Oy, Espoo.
- Deer, W. A., Howie R. A. and Zussman, J. (1992) An introduction to rock forming minerals. Longman Scientific & Technical, New York, US.
- Dimitrijevic, M. (1973) Geology of Kerman region. Institute for Geological and Mining Exploration and Investigation of Nuclear and other Mineral Raw Materials. Geology Survey of Iran, Report Yu/53.
- Dupuis, C. and Beaudion, G. (2011) Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit type. *Mineralium Deposita* 46: 319-335.
- Faure, G. (1992) Principles and applications of inorganic geochemistry. Macmillan Coll Div.
- Gross, G. A. and McLeod, C. R. (1987) Metallic mineralization on the deep seabed. *Geological Survey of Canada* 34: 21-86.
- Guilbert, J. M. and Park, C. F. (1997) The geology of ore deposits. Freeman Company, New York, US.
- Hallaji, A. (1991) Mineralogy study of trace elements and the origin of Gol Gohar ore deposit. Tehran Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Harding, C. J. (2009) Origin of the Zeekoebaart and Nauga East high-grade iron ore deposit, Northern Cape Province, South Africa., M.Sc. thesis, Rand Aficaans, University.
- Hassanzadeh, J., Stockli, D. F., Horton, B. K., Stockli, L. D., Grove, M., Schmitt, A. K. and Walker, J. D. (2008) U-Pb zircon geochronology of Late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran. Implications for paleogeography, magmatism and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics* 451: 1-21
- Jafari, A., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Askari, M. (2018) Mineralogy, the nature of magmatic and tectonic setting of amphibolite protolith from Gol-e-Gohar iron ore deposit (No. 1) Sirjan, Kerman. *Iranian Journal of Petrology* 35: 27-54 (in Persian).
- Kabata-Pendias, A. (2011) Trace elements in soils and plants. Taylor & Francis Press.
- Khalili-Mobarhan, S. (1993) The genesis of the Gole-e-Gohar iron ore deposit. M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran (in Persian).
- Klein, C. (2005) Some Precambrian banded iron formation (BIFs) from around the world, their age, geological setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist* 90: 1473-1499.
- Kusha Madan Consultant Engineers Co. (2016) Internal Report of Mine (In Persian).
- Lapakko, K. (2002) Metal mine rock and waste characterization tools: an overview. IIED/WBCSD project.
- Levinson, A. A. (1980) Introduction to exploration geochemistry. Applied Publishing Company.
- Loberg, B. E. H. and Hornidal, A. K. (1983) Ferried geochemistry of Swedish Precambrian Iron ores. *Mineralium Deposita* 2: 228-242.

- Lottermoser, B. G. (2007) Mine wastes characterization, treatment and environmental impacts. Springer, Verlag.
- Mahmoudi, S., Mahmoudi, A. and Mehrabi, B. (2017) Microstructure and geochemical evidences for genesis of the Gol-e-Gohar iron deposit. Iranian Journal of Economic Geology 9(2): 463-481 (in Persian).
- Maynard, J. B. (1983) Geochemistry of sedimentary ore deposits. Springer, Verlag.
- Mirzaei, R., Ahmadi, A., Mirnejad, H., Gao, J. F., Nakashima, K. and Boomeri, M. (2018) Two-tiered magmatic-hydrothermal and skarn origin of magnetite from Gol-e-Gohar Iron ore deposit of SE Iran: In situ LA-ICP-MS analyses. Ore Geology Reviews 102: 639-653.
- Mirzaie, H. (2004) Investigation on the model of iron mineralization at Gohar-e-Hadid, Ferdos and Chah-e-Choghok indications, Sirjan-Hajiabad. M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran (in Persian).
- Mohseni, S. and Aftabi, A. (2015) Structural, textural, geochemical and isotopic signatures of synglaciogenic Neoproterozoic banded iron formations (BIFs) at Bafq mining district (BMD, Central Iran. The possible Ediacaran missing link of BIFs in Tethyan metallogeny. Ore Geology Review 71: 215-236.
- Moxham, R. L. (1990) Geology and ore characteristics of the gol-e-gohar iron deposit. Sseminar at Tehran University.
- Mucke, A. and Younessi, R. (1994) Magnetite-apatite deposits (Kiruna-type) along the Sanandaj-Sirjan zone and in the bafq area, Iran. Mineralogy and Petrology 50(4): 219-244.
- Mucke, A. and Golestaneh, F. (1982) The genesis of the Gol-e-Gohar iron ore deposit (Iran). Chemie der Erde - Geochemistry 41(3): 193-212.
- Nystrom, J. O. and Henriquez, F. (1994) Magmatic features of iron ore of Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magmatic geochemistry. Economic geology 89: 820-839.
- Pettijohn, F. J. (1975) Sedimentary Rocks. 3rd Edition, Harper and Row, New York.
- Pourkhak, F. (2003) Paragenesis, petrogenesis, petrochemical of Gol-e-Gohr Iron ore deposit (Anomaly3). M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran (in Persian).
- Reich, M., Palacios, C., Bara, P. and Chryssoulis, S. (2013) "Invisible" silver in chalcopyrite and bornite from the Mantos Blancos Cu deposit, northern Chile. European Journal of Mineralogy 25: 453-460.
- Rose, W. R., Hawkes, H. E. and Webb, J. S. (1979) Geochemistry in Mineral Exploration. 2nd Edition, Academic Press, London, UK.
- Sabzehei, M., Eshraghi, S. A., RoshanRavan, J. and Seraj, M. (1994) Geological map of Iran, 100,000 series, Gol-e-Gohar Quadrangle. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Safarzadeh, E., Masoudi, F., Hassanzadeh, J. and Pourmoafi, S. M. (2016) The presence of Precambrian basement in Gol-e-Gohar of Sirjan, south of Iran. Iranian Journal of Petrology 26: 153-170 (in Persian).
- Sahlström, F., Arribas, A., Dirks, P., Corral, I. and Chang, Z. (2017) Mineralogical distribution of germanium, gallium and indium at the Mt Carlton high-sulfidation epithermal deposit, NE Australia, and comparison with similar deposits worldwide. Minerals 7: 213-241.
- Shao, Y. J., Wang, W. S., Liu, Q. Q. and Zhang, Y. (2018) Trace element analysis of pyrite from the Zengchong gold deposit, northeast Hunan province, China: implications for the ore-forming processes. Fortschr. Minerals 8: 262.

- Slack, J. F., Shaw, D. R., Leitch, C. H. B. and Turner, R. J. W. (2000) Tourmalinites and coticles from the Sullivan Pb-Zn-Ag deposit and vicinity, British Columbia. *Economic Geology* 21-47.
- Spry, P. G., Marshal, B. and Vokes, F. M. (2000) Metamorphosed and metamorphogenic ore deposits. *Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologist, Inc.
- Torabian, S. (2007) Minerals and ore genesis anomaly3 Gol-e-Gohar. M.Sc. thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Trendall, A. F. and Morri, R. C (1983) *Iron-formation: facts and problems*. Elsevier.
- Yaghoubi, A. (1999) Geochemical study of Golgohar deposit. M.Sc. thesis, University of Shiraz, Shiraz, Iran.
- Yeo, G. M. (1981) The late Proterozoic Rapitan glaciation in the northern Cordillera. In: *Proterozoic Basins of Canada* (Ed. Campbell, F. H. A.) 25–46. Geological Survey of Canada.
- Young, G. M. (1976) Iron-formation and glaciogenic rocks of the rapitan group, Northwest Territories Canada. *Precambrian Research* 3: 137-158.
- Zhao, K. D. and Jiang, S. Y. (2007) Rare earth elements and yttrium analyses of sulfides from the Dachang Sn-polymetallic ore field, Guangxi Province, China: implication for ore genesis. *Geochemical Journal* 41: 121-134.