

## شواهد ریزساختاری و ژئوشیمیایی در تعیین منشأ کانسار آهن گل‌گهر

شهریار محمودی\*، عذرا محمودی و بهزاد مهرابی

گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۹

### چکیده

کانسار آهن گل‌گهر در ۵۵ کیلومتری جنوب غرب شهرستان سیرجان، در پهنه ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است. این کانسار توسط مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی و آذرین شامل انواع شیست، گنیس، آمفیبولیت، مرمر و گرانیت‌های میلوئیتی در برگرفته شده است. بررسی‌های انجام‌شده قبلی نشان می‌دهد، فرآیندهای آذرین رخ داده‌های دگرگونی در تشکیل و جایگزینی این کانسار مؤثر بوده است. ولی اتفاق نظر در این زمینه وجود ندارد. بررسی‌های ریزساختاری، بررسی‌های ژئوشیمیایی ترکیب سنگ‌های میزبان، کانی‌سازی و همچنین تجزیه‌های شیمیایی نقطه‌ای انجام‌شده در این پژوهش، بیانگر تأثیر فرآیندهای اسکارن‌زایی به‌عنوان عامل اصلی در تشکیل کانسار آهن گل‌گهر است. همچنین بررسی‌های ریزساختاری انجام‌شده، نشان می‌دهد که مجموعه سنگی گل‌گهر تحت تأثیر حداقل سه فاز دگرشکلی و دگرگونی متوالی واقع شده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که کانسار آهن گل‌گهر طی دو مرحله جایگزین شده است. در مرحله اول، طی یکی از فازهای دگرگونی ناحیه‌ای پیش‌رونده قبل از نفوذ توده‌های گرانیتی تشکیل شده که به‌عنوان مگنتیت نوع یک معرفی شده است و بخش دوم کانسار با توجه به روندهای موازی موجود در کانسار با پهنه برشی و ویژگی‌های فابریکی نشان می‌دهد که مگنتیت نوع دو، بخشی از کانسار است که طی اسکارن‌زایی هم‌زمان با دگرگونی دینامیکی ایجادشده توسط پهنه برشی بعد از جایگزینی توده آذرین و احتمالاً در اثر تحرک و تمرکز دوباره کانسار آهن اولیه جایگزین شده است.

**واژه‌های کلیدی:** دگرگونی سنندج سیرجان، کانسار گل‌گهر، ریزساختار، آهن اسکارنی

### مقدمه

مانند شیست‌های گوناگون، مرمر و گنیس است که در یک دسته پیش‌رونده دگرگونی در حد رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت دگرگون‌شده است. فاز اصلی دگرگونی از ژوراسیک میانی تا کرتاسه بالایی رخ داده (Baharifar, 2003) و فازهای مختلف ماگماتیسیم گرانیتوئیدی در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتیس در این پهنه به‌صورت متوالی در مجموعه‌های دگرگونی نفوذ کرده است (Mohajjel et al., 2003;).

کانسار آهن گل‌گهر در بخش جنوبی پهنه دگرگونی سنندج- سیرجان قرار دارد. این پهنه ساختاری در حاشیه غربی پهنه ساختاری ایران مرکزی واقع است (Aghanabaty, 2004). این پهنه ساختاری حاصل تاریخچه طولانی برخورد اوراسیا و گندوانا طی پالئوزوئیک و مزوزوئیک است (Golonka, 2004). پهنه سنندج- سیرجان شامل انواع سنگ‌های دگرگونی

آمفیولیت، میکاشیست، آندالوزیت، گارنت، استارولیت شیست، مرمر و گرافیت شیست است که تا حد رخساره آمفیولیت دگرگون شده است (شکل ۱).

### سنگ‌های دگرگونی و آذرین

بیشترین حجم سنگ‌های دگرگونی پهنه ساختاری سندج-سیرجان در ژوراسیک بالایی تشکیل شده است؛ اما فازهای دگرگونی قدیمی‌تر نیز یافت می‌شود (Baharifar, 2003). سنگ‌های دگرگونی منطقه گل‌گهر گسترده‌گی و تنوع بسیار زیادی دارند. واحدهای سنگی این منطقه اغلب شامل شیست‌های بازیک (بیوتیت شیست و آمفیول شیست) و شیست‌های گروه پلیتی (انواع میکاشیست‌ها، گارنت شیست، آندالوزیت و استارولیت شیست) است. کانی‌های فرعی نظیر کلریتوئید نیز گاهی دیده می‌شود که بیانگر تنوع پروتولیت سنگ دگرگونی است. میان لایه‌هایی با پروتولیت کربناته سنگ‌های کالک شیستی و میان لایه‌های کوارتز فلدسپاری رگه‌هایی از متاسنداستون را به وجود آورده است. بافت‌های جهت‌یافته دگرگونی و توسعه انواع برگ‌وارگی‌های ترکیبی نظیر پورفیروبلاستیک، لیپیدو بلاستیک و گرانوبلاستیک، سرگذشت پیچیده این مجموعه را خاطر نشان می‌کند. این مجموعه دگرگونی تحت تأثیر نفوذ توده‌های آذرین با ترکیب اسیدی تا حد واسط قرار گرفته است و در سنگ‌های همبر خود که اغلب دارای پروتولیت کربناته هستند، دگرگونی فشار پایین دمای بالا به همراه متاسوماتیسم حرارتی و اسکارن‌های با ترکیب کانی‌شناسی متنوع و اغلب حاوی کانسارهای مختلف از جمله آهن ایجاد کرده است. در گزارش‌های قدیمی‌تر واحدهای گنیسی نیز در منطقه معرفی شده است که به نظر می‌رسد اغلب بخش‌هایی از توده گرانیست هستند که تحت تأثیر دگرگونی دینامیکی واقع شده‌اند. این بخش‌ها دارای جهت‌یافتگی ترجیحی هستند و در این پژوهش به‌عنوان میلیونیت و پروتومیلونیت نام‌گذاری شده‌اند. بخش‌های نزدیک‌تر به صفحه اصلی گسل شدیداً خرد و اولترا میلیونیتی شده است. پهنه برشی درون توده

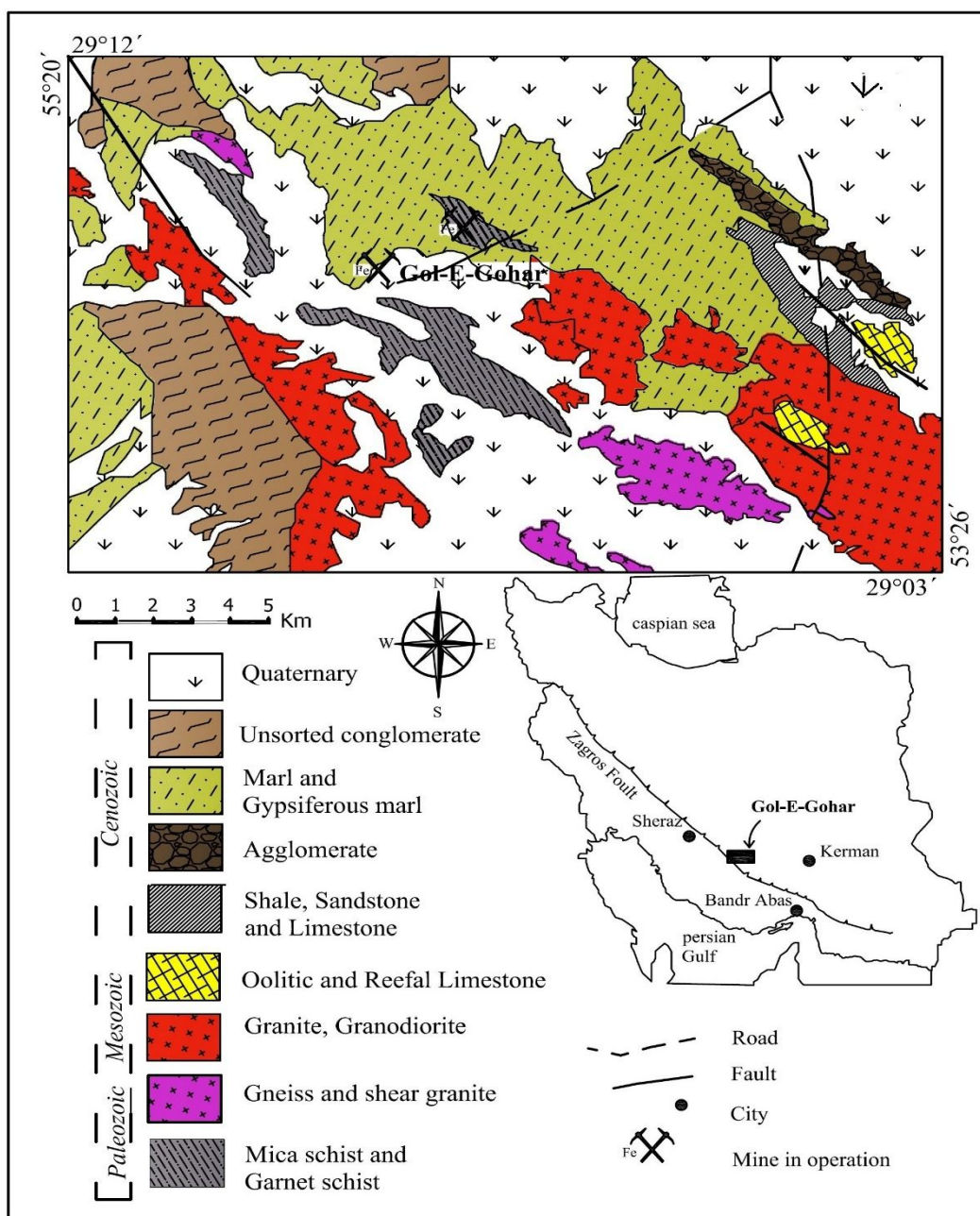
(Mahmoudi et al. 2011). برخی محققان منشأ ماگمایی (Mucke and Golestaneh, 1982)، برخی دیگر از صاحب‌نظران منشأ مشترک اسکارنی و دگرگونی (Hallaj and Jacobpor, 1991; Torabian, 2007) و تعدادی دیگر، آذرین (Jacobite, 1999; Porkhak, 2003) را برای کانسار آهن گل‌گهر پیشنهاد کرده‌اند. پژوهشگران مختلف با استفاده از توزیع عناصر اصلی و کمیاب کانی‌مگنتیت منشأ این گروه از کانسارها را مورد بازنگری قرار داده‌اند (Tong et al., 2011). (Celine and Beaudoin, 2011) همچنین بررسی‌های ریزساختاری کاربردی و سودمندی در زمینه نحوه جایگزینی، تمرکز و شکل‌گیری کانسارهای آهن درون مجموعه‌های دگرگونی وجود دارد (Archanjo and Bouchez, 1997; Mendes and Lagoeiro, 2012). در این پژوهش، با توجه به داده‌های ژئوشیمیایی و شواهد ریزساختاری جمع‌آوری شده، منشأ و نحوه جایگزینی کانسار آهن گل‌گهر مورد بررسی قرار گرفته است.

### زمین‌شناسی عمومی

ناحیه معدنی گل‌گهر در ۵۳ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان سیرجان در استان کرمان به مختصات جغرافیایی  $29^{\circ}20'$  تا  $29^{\circ}24'$  شرقی و عرض‌های  $29^{\circ}07'$  تا  $29^{\circ}02'$  شمالی بخشی از پهنه ساختاری سندج-سیرجان است که از شهرستان ارومیه در شمال‌غربی تا شرق شهرستان میناب در جنوب‌شرقی ایران به طول ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر کشیده شده است. پهنه ساختاری سندج-سیرجان طی فرورانش اقیانوس نتوتیس تحت تأثیر فازهای دگرگونی و ماگماتیسم قرار گرفته است. در برخی مناطق از این پهنه ساختاری بقایای پی‌سنگ قدیمی‌تر دیده می‌شود (Baharifar, 2003; Jamshidi Badr et al., 2012). این کانسار در محل برخورد گسل گل‌گهر در امتداد شمالی جنوبی و شاخه‌های فرعی راندگی زاگرس با روند شمال‌غربی جنوب شرقی قرار دارد. سنگ‌های در برگیرنده کانسار شامل واحدهای دگرگونی کمپلکس گل‌گهر متشکل از

آمفیبول و کانی‌های اوپیک به‌عنوان کانی فرعی با بافت تمام بلورین تشکیل شده که در مرکز محدوده مورد بررسی نفوذ کرده است.

گرانیتی و سپس در شیب‌ها و آمفیبولیت‌های مجموعه دگرگونی گسترش پیدا کرده است. در بخش میانی محدوده معدنی توده گرانیتی تا گرانودیوریتی که از ۴ درصد پلاژیوکلاز، ۲۵ درصد فلدسپار الکلن، ۳۰ درصد کوارتز و مابقی بیوتیت و



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه گل گهر، اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ نیریز (Eshraghi et al., 1999) منطقه معدنی با علامت چکش نشان داده شده است.

**Fig. 1.** Geological map of Gol-Gohar based on 1:100,000 geological map of Nyriz (Eshraghi et al., 1999). Crosses hammers is mining location.

### مینرالوگرافی کانسار

در بررسی‌های ماکروسکپی نمونه‌های مغزه و رخنمون‌های صحرایی مگنتیت در دو نوع رگه‌ای و توده‌ای دیده می‌شود. بنا بر گزارش موکه و گلستانه (Mucke and Golestaneh, 1982) مگنتیت‌های زیرین معدن شماره یک به دو نسل مگنتیت خاکستری-آبی و مگنتیت نوع کرم-قهوه‌ای که در زون اکسیدان متمرکز است، تقسیم شده است. از نظر ویژگی میکروسکپی در نور بازتابی دو نوع خاکستری-آبی (زون زیرین) و نوع کرم و قهوه‌ای که در بخش اکسیدان متمرکز شده از یکدیگر قابل تشخیص است. اغلب رنگ قهوه‌ای روشن در مگنتیت به دلیل خارج نشدن Ti از شبکه مگنتیت و تبلور به صورت اکسلوشن که احتمالاً به دلیل کاهش دمای سریع مذاب غنی از اکسید آهن (Ramdohr, 1980) و یا سرد شدن آهسته طی دگرگونی است (Saurabh and Raj Kumar, 2011)، مگنتیت آبی تا خاکستری رنگ در بخش مجاور توده و سنگ‌های کالک سیلیکاته دیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های حلاج و یعقوب پور (Hallaj and Jacobpor, 1991) نمونه‌های بخش رگه‌ای دارای اکسلوشن‌های بروسیت و کلریت (نوع ۱) و متن ریزدانه دارای ادخال‌های پروتیت است. در بررسی مقاطع صیقلی در این پژوهش که بر روی نمونه‌های تهیه شده از مغزه‌های حفاری مگنتیت‌دار نوع رگه‌ای معدن شماره ۳ انجام شد، تنها اختلاف مشاهده شده در بررسی‌های میکروسکپی انعکاسی بین این دو نوع کانی‌سازی، ابعاد درشت‌تر بلورها در نوع رگه‌ای است. مشاهدات انجام شده نشان می‌دهد، پروتیت به صورت اولیه در مغزه‌های عمیق‌تر معدن تبلور شده و بیشتر به صورت ادخال در داخل مگنتیت و بافت چشم پرنده‌ای و گاهی به صورت رگه‌چه‌های کشیده وجود دارد. پیریت به مقدار زیاد با بافت میرمکیتی در اغلب نمونه‌ها وجود دارد و مقدار آن از سطح به عمق افزایش می‌یابد (شکل ۳-A). کالکوپیریت به میزان کمتر از پیریت و پروتیت و به صورت رگه‌ای، دانه‌ای و ادخال درون مگنتیت و پیریت دیده می‌شود. توالی پاراژنتیکی کانسار و کانی‌های منطقه مورد

بررسی در شکل ۲ آمده است. بر اثر اکسیداسیون سطحی قسمت اعظم کانی‌های سولفیدی در زون اکسیدان به هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. شاهد این امر وجود ساختمان‌های زونه در گوتیت‌های برجای مانده است که گاهی هنوز بقایای پیریت به صورت هسته‌های کوچک بی‌شکل درون آنها به چشم می‌خورد. گوتیت به صورت پراکنده درون درز و شکاف‌ها و در لبه حفرات زون اکسیدان دیده می‌شود.

در مشاهدات میکروسکپی با نور عبوری و انعکاسی نیز دو نسل مگنتیت تشخیص داده شده، مگنتیت‌های نوع دوم بدون جهت یافتگی ترجیحی خودشکل و دارای ادخال‌های بروسیت، اسپینل و موناژیت هستند (شکل ۳-B). مگنتیت‌های نوع اول دارای جهت‌یافتگی ترجیحی است که با ظاهری کشیده در امتداد یکدیگر قرار گرفته و باعث ایجاد شکستگی‌های مثلثی شکل شده است و هم‌رشد با لیزاردیت و در ارتباط با شریذانیت هستند (شکل ۳-C و D).

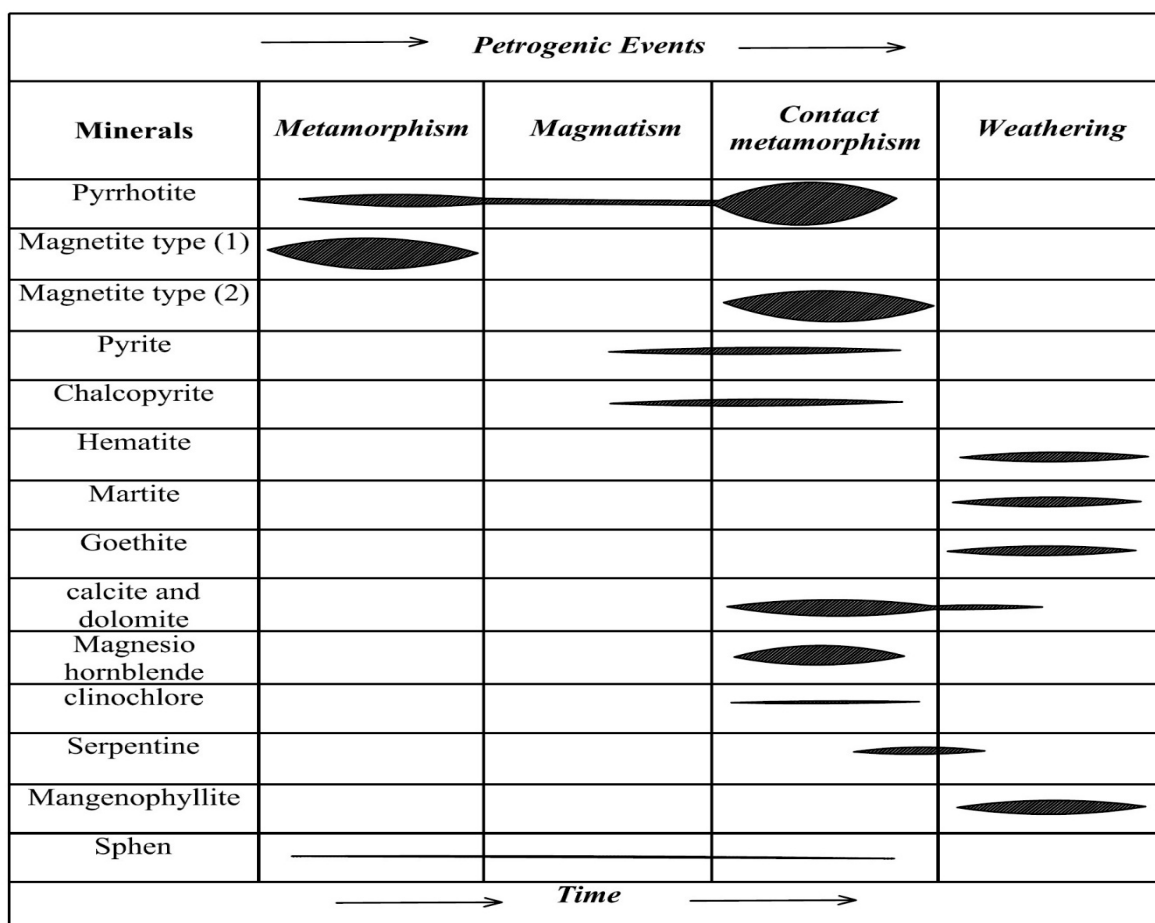
### بررسی‌های ریز ساختاری

شواهد ریزساختاری در مناطق دگرگون شده از جمله پهنه‌های دگرگونی و پهنه‌های برشی به بررسی روابط بین دانه‌ها و زمینه سنگ دگرگونی می‌پردازد (Passchier and Troaw, 2005). نتایج حاصل از این بررسی‌ها علاوه بر کنترل نتایج بررسی‌های ساختاری بزرگ مقیاس، نقشی مهم در اندازه‌گیری میزان دگرشکلی، سازوکار و نحوه عملکرد این فرآیند دارد. به علاوه این بررسی‌ها نتایج ارزشمندی از نظر حجم داده‌های تولید شده نسبت به هزینه‌های انجام شده در زمینه روندهای دگرگونی (پیش‌رونده و پس‌رونده)، تاریخچه دگرشکلی تقدم و تأخر تبلور کانی‌ها نسبت به فازهای دگرشکلی قبلی و بعدی و همچنین نسبت به سایر پورفیروبلاست‌ها در دسترس قرار می‌دهد (Bell and Rubenach, 1983).

بر اساس مشاهدات انجام شده در شیب‌های در برگیرنده کانسار آهن گل‌گهر، دو فاز دگرشکلی اصلی رخ داده است که پی‌آمد آن برگه‌وارگی‌های  $S_1$  و  $S_2$  است (شکل ۴-A).

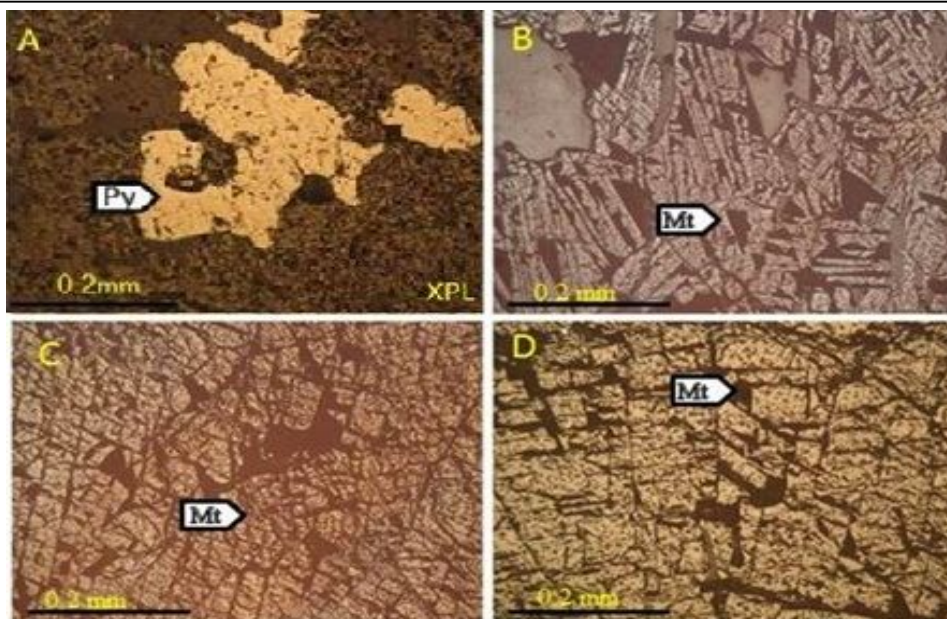
بخش غنی از کوارتز<sup>۱</sup> و درون برگ‌وارگی S<sub>2</sub> دیده می‌شوند. پورفایروبلاست‌های هم‌زمان با S<sub>1</sub> اغلب حاوی ادخال‌های کوارتز دارای جهت یافتگی با زاویه ۲۰ تا ۳۰ درجه با جهت برگ‌وارگی S<sub>2</sub> است. از جمله پورفایروبلاست‌های استارولیت و آندالوزیت که با برگ‌وارگی S<sub>1</sub> به‌صورت هم‌زمان با زمین‌ساخت رشد کرده و برگ‌وارگی S<sub>2</sub> آنها را دور زده است (شکل ۴-B). بلورهای نسل اول مگنتیت که طی فاز اول دگرشکلی متأثر شده و شکل‌های ماهی‌گون و سایه فشاری در اطراف آنها ایجاد شده است (شکل ۴-C).

لایه‌بندی اولیه (S<sub>0</sub>) به‌دلیل تحمل فازهای دگرشکلی، در نمونه‌های برداشت‌شده از چاه‌های اکتشافی دیده نمی‌شود. اندازه‌گیری‌های صحرایی و میکروسکوپی در نمونه‌های جهت‌یافته نشان می‌دهد برگ‌وارگی S<sub>1</sub> یک برگ‌وارگی پیوسته در بیشتر نقاط است و روند عمومی N18W تا N24W و شیب متوسط ۴۵ تا ۶۰ درجه به سمت شرق دارد. برگ‌وارگی S<sub>2</sub> با زاویه ۱۵-۳۰ (N17~2E) بر روی برگ‌وارگی S<sub>1</sub> قرار گرفته است که در گروه پلیتی شامل میکاشیست، آندالوزیت شیست، گارنت شیست و استارولیت شیست با تبلور دو نسل بیوتیت طی مراحل فاز دگرگونی M<sub>1</sub> و در راستای برگ‌وارگی S<sub>1</sub> و به‌صورت فابریک‌های حفظ‌شده قبل از زمین‌ساخت در



شکل ۲. توالی هم‌یافتگی حین رخ دادهای سنگ‌زایی در کانسار آهن گل‌گهر

Fig. 2. Generalised paragenetic sequence in the petrogenic events from the Gol-Gohar iron deposit



شکل ۳. A: پیریت با بافت میرمیکیتی، B: بلورهای مگنتیت توده‌ای خاکستری نسل اول مربوط به زون زیرین که با زاویه ۱۲۰ درجه با یکدیگر هم‌مرز هستند، C: شکستگی‌های مثلثی شکل مگنتیت کرم-قهوه‌ای زون اکسیدان و D: بافت جهت‌یافته در مگنتیت نسل دوم در معدن شماره ۳ گل‌گهر. Mt: مگنتیت و Py: پیریت. (kretz, 1983)

**Fig. 3.** A: pyrite with myrmekitic texture, B: Gray tint magnetite crystals of the first generation from lower magnetite zone showing a 120 junction angle, C: Triangular-shaped milky-brown magnetite particles in oxide zone, and D: Preferred orientation structure in second magnetite generation in number 3 Gol-Gohar Mine. Mt: magnetite and Py: pyrite (kretz, 1983)

استارولیت در گروه پلیتی نشان‌دهنده آن است که بخشی از کانسار گل‌گهر طی دگرگونی پیش‌رونده  $M_1$  و هم‌زمان با  $S_1$  تشکیل شده است، این بخش با نوع دوم مگنتیت با رنگ متمایل به آبی تعریف شده در گزارش ارائه شده توسط موکه و گلستانه (Mucke and Golestaneh, 1982) قابل انطباق است. بر اساس مشاهدات انجام شده، تمرکز کانسار در زون‌های استروولیت و گارنت، شرایط تبلور اولیه مگنتیت در محدوده این زون‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۴-۲). این بخش از کانسار دارای ویژگی‌های بافتی از جمله جهت‌یافتگی و وجود ادخال‌های کوارتز در اثر رشد پیش‌رونده هم‌زمان با فرآیند دگرگونی پیش‌رونده بلورهای مگنتیت است. مگنتیت نوع دو اغلب دارای حاشیه تجمعی از بیوتیت و گاهی هماتیت است. مگنتیت‌های نوع یک با بافت جانشینی در درون سنگ‌های کربناته اسکارنی، کالک شیسست‌های مجاور و بخش‌هایی از گروه پلیتی جایگزین

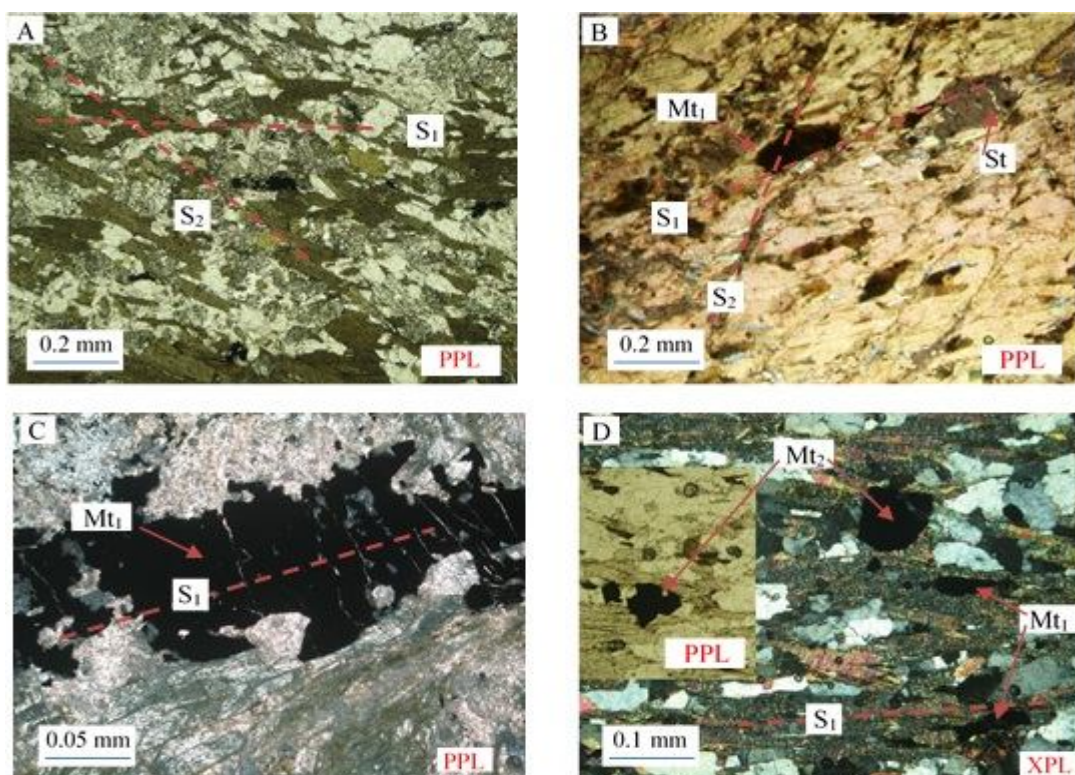
در امتداد و نزدیکی گسل‌های موجود در محدوده کانسار، پهنه برشی شکل گرفته که فابریک‌های ایجاد شده در دو فاز اصلی دگرشکلی را در سنگ‌های دگرگونی و توده نفوذی تحت تأثیر قرار داده است. این پهنه برشی با ایجاد سنگ‌های پروتومیلونیت تا میلونیتی و میلونیت‌گرانیت عملکرد ضعیف تا متوسطی در بخش غنی از کانسار بر جای گذاشته است. فابریک  $S_2$  با روند پهنه برشی تقریباً هم‌راستا بوده و نسل دوم مگنتیت به صورت بلورهای کاملاً خودشکل و بعد از زمین‌ساخت با فاز دگرشکلی نهایی شکل گرفته است (شکل ۴-۲). این بلورها همبستگی نزدیکی با زون اسکارنی دارند (شکل ۵).

#### ارتباط بافتی کانسار با فازهای دگرشکلی

جهت‌یافتگی کانی‌های مگنتیت در راستای برگ‌واریگی  $S_1$  و هم‌رشدی با بیوتیت و گارنت در زون‌های بیوتیت، گارنت و

همبستگی نزدیکی با نفوذ توده گرانیت و تشکیل هاله اسکارنی حاصل از آن، نشان می‌دهد. بر اساس نقشه‌های رسم شده از وضعیت زیرسطحی توده، مشاهده می‌شود که مگنتیت نوع یک شدیداً از روند پهنه گسله در امتداد زون اسکارنی و هاله دگرگونی در اطراف توده گرانیتی پیروی می‌کند (شکل ۵).

شده و فاقد هرگونه حاشیه واکنشی و هاله دگرگونی معجورتی است که خود به دو نوع مگنتیت رگه‌ای و توده‌ای تفکیک شده است. نوع درشت‌بلور رگه‌ای، مگنتیت‌های متوسط بلور توده‌ای را قطع کرده و حاصل تبلور از محلول‌های گرمابی تأخیری است که با مگنتیت‌های نوع یک هم‌زمان تا بعد از عملکرد فاز  $M_2$  و برگ‌وارگی  $S_2$  همخوانی دارد. این بخش از کانسار همچنین



شکل ۴. A: زاویه بین دو برگ‌وارگی  $S_1$  و  $S_2$  در اثر رشد بیوتیت در میکاشیست، B: جهت‌یافتگی استارولیت (St) و مگنتیت نسل اول ( $Mt_1$ ) در راستای برگ‌وارگی دگرشکلی فاز اول، C: بلورهای طولی شده مگنتیت نسل اول که حاوی ادخال‌ها و شکستگی‌های موازی با برگ‌وارگی  $S_2$  است و D: بلورهای مگنتیت نسل دوم ( $Mt_2$ ) به همراه نسل اول ( $Mt_1$ ) در شیست‌های کانه‌دار در معدن شماره ۳ گل‌گهر (XPL). (kretz, 1983).

**Fig. 4.** A:  $S_1$  and  $S_2$  foliation angle based on biotite growth (PPL), B: staurolite (St) and the first magnetite generation ( $Mt_1$ ) in the first deformation phase ( $S_1$ ), C: first generation elongated magnetite crystals with inclusions oriented with  $S_2$  foliation, and D: The second generation magnetite crystals ( $Mt_2$ ) associated with the first generation ( $Mt_1$ ) in the ore bearing schist (XPL) in number 3 Gol-Gohar Mine. (kretz, 1983).

که به ترتیب در جنوب، شرق و غرب محدوده معدنی قرار دارد و دارای بیشترین اندازه و تنوع لیتولوژی است، تعداد ۲۰ نمونه از مغزه‌ها انتخاب شد و با استفاده از روش XRF فیلیپس مدل

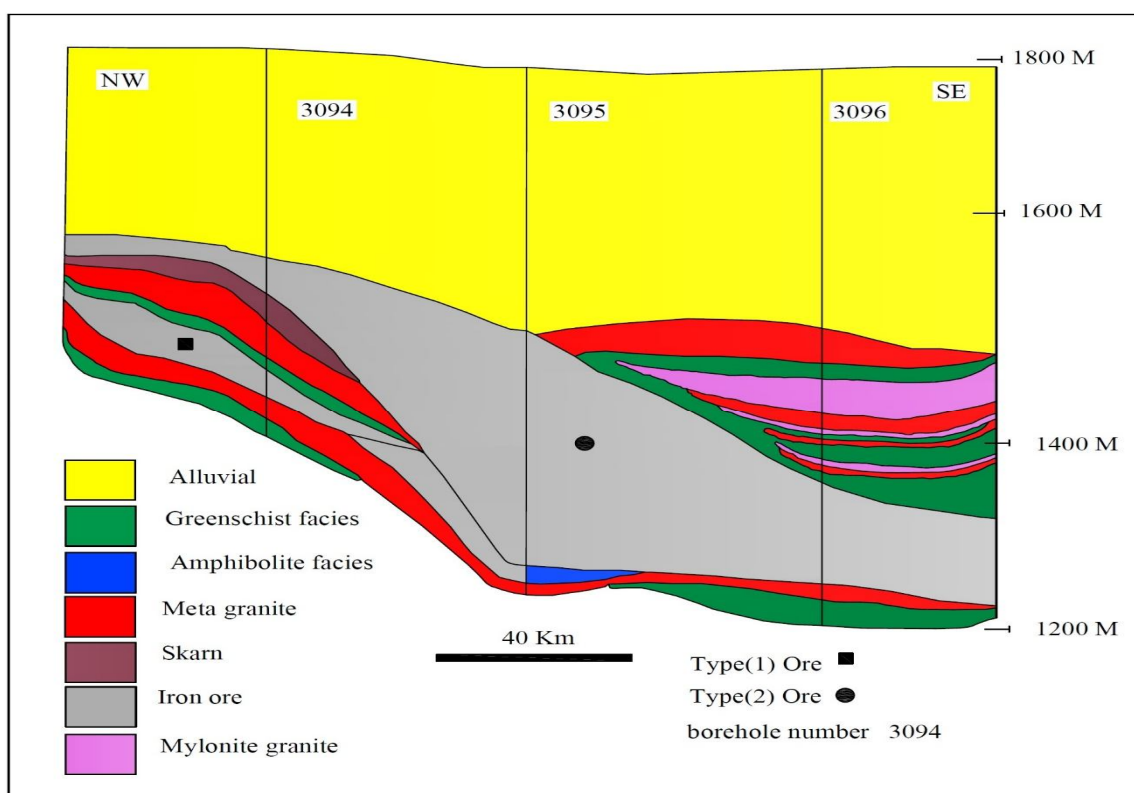
## ژئوشیمی

### نمونه‌برداری و تجزیه ژئوشیمیایی

برای بررسی ژئوشیمیایی از سه چاه شماره ۳۰۲۸، ۳۰۳۲ و ۳۰۴۳

شده کانسار در معدن شماره ۳ گل‌گهر مربوط به مگنتیت زیرین است (نوع یک) تعدادی از نمونه‌های حاوی این دو نسل از کانسار به روش EPMA توسط دستگاه Cameca-SX100 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلو ولت، فشار  $10 \times 7 \times 4$  Torr و جریان ۲۰ نانوآمپر با قطر بیم متوسط  $10 \mu\text{m}$  در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفته است (جدول ۳).

(PW 2404) برای تعیین عناصر اصلی مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت (جدول ۱). همچنین تعداد ۳۱ نمونه از روش ICP-OES به روش آماده‌سازی نمونه مایع محلول با استفاده از مخلوط چهار اسیدی و فرکانس ۲۷ MHz و دمای پلاسمای ۵۵۰۰ درجه برای تعیین عناصر جزئی و کمیاب کانسنگ و سنگ میزبان در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه شده است (جدول ۲). از آن‌جا که بیشترین حجم برآورد



شکل ۵. مدل جایگزینی کانسار با استفاده از داده‌های زیر سطحی که تجمع کانسار را در ارتباط با رخساره‌های دگرگونی نشان می‌دهد. بخش عمیق‌تر کانسار (مگنتیت نوع ۲) در هاله دگرگونی مجاورتی و سنگ‌های آذرین بخش کم عمق‌تر کانسار (مگنتیت نوع ۱) در ارتباط با رخساره آمفیبولیت و در امتداد شیستوزیته دگرگونی در معدن شماره ۳ گل‌گهر قرار دارد.

**Fig. 5.** Implasment model using subsurface data showing accumulation of ores in association with metamorphic facies. The deeper ore zone (type 2 magnetite) deposited in the contact metamorphic aureole and igneous rocks and the shallower ore zone (type 1 magnetite) deposited in association with amphibolite facies elongated to the metamorphic schistosity in the number 3 Gol-Gohar Mine.

تشکیل شده است. در مگنتیت بالایی ترکیب کانی‌شناسی اغلب هماتیت با گوتیت و گوگرد (کمتر از ۲٪) است که عمدتاً

بر اساس نتایج XRD بر روی نوع مگنتیت زیرین به طور متوسط ۱۲٪ هماتیت و گوتیت با عیار گوگرد بیش از ۲٪ درصد



منطقه مورد بررسی از یک دسته پلیتی شامل شیست با میان لایه‌های کالک سیلیکاته و ماسه سنگی است که احتمالاً در یک حوضه رسوبی نزدیک به ساحل تا نیمه عمیق تشکیل شده است. داده‌های جدول ۴ و نمودار A/KF و ACF برای تعیین پروتولیت سنگ‌های دگرگونی منطقه (شکل B-۶) به کار برده شده است.

نتایج تجزیه نقطه‌ای کانسار مگنتیت (جدول ۲) نشان‌دهنده غنی‌شدگی از عناصر با تحرک شیمیایی بالاتر روی داده است. در نمودارهای مربوطه از جمله Ti+V به Ni/(Cr+Mn) (Celine and Beaudoin, 2011) (شکل A-۷)، بر اساس نسبت Ti+V به Ca+Al+Mn (شکل B-۷)، Cu/(Si+Ca) به Al/(Zn+Ca) (شکل C-۷)، Si+Mg به Ni+Cr (شکل D-۷)، V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> به TiO<sub>2</sub> (شکل E-۷) که (Tong et al., 2011) همگی در محدوده کانسارهایی با منشأ اسکارنی قرار می‌گیرند. مقایسه ترکیب شیمیایی نشان می‌دهد، نمونه AG86 دارای مقادیر مشابه Ti, Cu, Si, Mg با نمونه AG84 است (شکل F-۷) ولی در بیشتر نقاط تجزیه شده مشخصاً مقادیر بالاتری از Al و Mg در ساختار خود دارند (شکل F-۷).

مقدار عناصر کمیاب موجود در کانسارهای آهن اصولاً ارتباط نزدیکی با ماهیت فاز سیال دارد (Naslund et al., 2000). عناصر P, Ti, V, Co, Zr, Y, Nb در سیالات آبی غیر متحرکند؛ مگر این که فعالیت بالای F وجود داشته باشد. همچنین مقدار عناصر غیر متحرک با دور شدن از منبع کاهش پیدا می‌کند (El Korh et al., 2013). ذخایر با مقدار پایین Cu, Mn, P, V, Ni بالای Rb, Cr, Co, Ca, K, Cs از نوع نهشته‌های با منشأ ماگمایی هستند و ذخایر با مقدار پایین تر Ta, Nb, Zr, Ni, V, Ti, Th, REE و مقادیر بالای عناصر Cu, Si, Na, Ca, Mg, Zn, Pb, Cs, Mn نسبت به کانسارهای ماگمایی جزو ذخایر با منشأ گرمایی محسوب می‌شوند (Naslund et al., 2000). مقادیر بالای منیزیم و آلومینیوم در نوع دو (شکل F-۷) و جدول ۳ بیانگر منشأ اولیه ماگمایی است.

توسط دسته پلیتی و سنگ‌های دگرگونی احاطه و با لایه نسبتاً نفوذ ناپذیر مسکویت شیست جدا شده است و در زیر لایه مگنتیتی اصلی قرار دارد (Atai, 1998). این بخش از کانسار دارای ساخت متراکم و فشرده و ساختمان درونی پیچیده و درهم‌رفتگی دانه‌هاست. به نظر می‌رسد این ساختار مانع از ورود محلول‌های هیدروترمالی و اکسیدکننده به این واحد (لایه) شده است. به‌طور کلی بخش زیرین کانسار و یا نوع یک مگنتیت در ارتباط با سنگ‌های دگرگونی به‌خصوص دسته پلیتی قرار دارد و مگنتیت بالایی و یا نوع دوم در ارتباط با هاله اسکارنی است و بیشتر به‌صورت برون اسکارن‌هایی هستند که در هاله دگرگونی مجاورتی و در ارتباط با سنگ‌های پلوتونیک که در مجموعه دگرگونی نفوذ کرده است، قرار دارد. بررسی‌های پتروگرافی که بر اساس نمونه‌های برداشت شده از مغزه‌های حفاری چاه‌های اکتشافی موجود در معدن شماره سه گل گهر انجام شده، نشان می‌دهد کانسار نوع دوم درون و یا در مجاورت نزدیک سنگ‌های اسکارنی قرار داد.

بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی موجود در گزارش‌های اکتشافی معدن و همچنین نتایج حاصل از تجزیه‌های شیمیایی انجام شده در این پژوهش، سنگ‌های پلوتونیک منطقه در قلمرو گرانیته، گرانودیوریت، گابرو دیوریت، گابرو قرار می‌گیرند. رخنمون‌های موجود روندی شمال غربی - جنوب شرقی مطابق با روند عمومی زون سندج سیرجان نشان می‌دهد. روابط چینه‌ای بیانگر سن احتمالی ژوراسیک بالای تا میانی این توده‌هاست (Eshraghi et al., 1999) اگرچه داده‌های سن‌سنجی رادیومتری قابل استناد در این زمینه وجود ندارد؛ داده‌های شیمیایی سنگ کل نشان می‌دهد این سنگ‌ها (شکل ۱) غالباً در دسته کالک‌آلکان و در ارتباط با زون فرورانش قرار دارند (شکل A-۶). بر اساس نمودارهای رسم شده برای تعیین سنگ مادر دگرگونی در گروه‌های مختلف سنگی به نظر می‌رسد گروه سنگ‌های بازیک نزدیک چندان با سنگ‌های آذرین ندارد (شکل B-۶). با توجه نتایج حاصل از بررسی سنگ مادر دگرگونی می‌توان گفت مجموعه دگرگونی

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل (Wt%) سنگ‌های آذرین و دگرگونی میزبان کانسار آهن گل- گهر. گرانیت میزبان (gr)، میکاشیست (Msh)، آمفیبولیت میزبان (Am)، کانسار (Ma)، سرپانتینیت (Sp) (کمتر از حد تشخیص <DL=)

**Table 1.** Whole rock major elements (wt.%) composition of the igneous and metamorphic host rocks of Gol-Gohr Iron ore. gr (Ore host granite), Msh (Mica schist), Am (Ore host Amphibolite), Ma (Ore) and Sp (Serpentinite). (<DL= Bellow detection limit)

Sample	AG11	AG41	AG49	AG59	AG61	AG74	AG80	AG84	AG85	AG86	GN18	GN32
Rock	gr	Msh	Msh	Am	Msh	Msh	Msh	Ma	Ma	Ma	gr	Ma
SiO <sub>2</sub>	38.83	25.27	27.98	53.29	28.06	21.49	18.33	1.81	4.16	1.21	29.83	1.96
TiO <sub>2</sub>	0.65	1.87	4.13	0.19	3.86	<DL	2.88	<DL	0.08	<DL	3.14	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.59	5.58	10.25	0.89	8.61	3.01	7.93	0.39	0.92	0.60	9.05	1.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.36	16.01	27.69	7.02	25.48	43.68	20.08	80.85	75.32	86.16	28.00	78.57
MnO <sub>2</sub>	0.27	0.87	0.23	0.59	0.35	<DL	0.59	<DL	<DL	<DL	0.37	<DL
MgO	3.07	8.08	10.76	5.12	10.52	1.31	11.4	9.30	12.55	6.52	9.56	8.65
CaO	15.83	34.75	2.33	29.43	9.71	2.88	24.6	1.71	3.96	1.83	10.92	5.91
Na <sub>2</sub> O	<DL	<DL	1.39	<DL	2.04	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	7.53	<DL
K <sub>2</sub> O	12.66	7.23	12.65	0.99	7.88	<DL	11.36	<DL	0.27	<DL	1.33	<DL
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<DL	0.21	0.41	0.07	<DL	1.04	<DL	0.50	0.07	0.45	<DL	2.26
LOI	1.74	0.13	2.18	2.41	3.49	26.59	2.83	5.44	2.67	3.23	0.27	1.3
Total	98.26	99.87	97.82	97.59	96.51	73.41	97.17	94.56	97.33	96.77	99.73	98.7

Sample	GN34	GN36	GZ2	GZ24	GZ26	GZ32	GZ36	GZ39	GZ41	GZ42	GZ43
Rock	Ma	Ma	gr	Sp	Msh	gr	gr	Ma	Ma	gr	Ma
SiO <sub>2</sub>	0.91	1.29	60.77	55.41	22.36	34.36	61.65	6.66	1.53	13.92	0.75
TiO <sub>2</sub>	<DL	<DL	1.28	<DL	2.17	3.04	0.55	0.22	<DL	2.45	<DL
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.69	0.43	11.69	9.80	5.46	10.15	8.74	2.27	0.42	3.86	0.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	89.36	85.02	7.94	10.50	20.23	21.59	6.39	69.52	86.32	20.15	89.99
MnO <sub>2</sub>	<DL	<DL	<DL	<DL	0.77	0.23	<DL	<DL	<DL	0.69	<DL
MgO	3.80	6.20	<DL	4.79	8.58	10.31	2.85	14.71	8.53	8.16	7.31
CaO	2.12	4.75	1.50	4.41	30.15	9.19	4.16	4.54	0.47	41.63	0.15
Na <sub>2</sub> O	<DL	<DL	8.03	1.14	<DL	7.06	<DL	<DL	<DL	0.57	<DL
K <sub>2</sub> O	<DL	<DL	7.26	12.21	7.99	<DL	13.26	0.66	<DL	6.24	<DL
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.82	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	0.43	<DL	0.26	<DL
L.O.I	2.3	2.31	1.53	1.74	2.29	4.07	2.4	0.99	2.73	2.07	1.21
Total	97.7	97.69	98.47	98.26	97.71	95.93	97.6	99.01	97.27	97.93	98.79

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب و نادر نمونه‌های سنگ میزبان آذرین و دگرگونی و کانسنگ مگنتیت (ppm) کانسار گل-گهر

**Table 2.** Whole rock minor and rare elements composition of the igneous and metamorphic host rocks and magnetite ore (ppm) in Gol-Gohr Iron deposit

S.N	AG11	AG41	AG49	AG59	AG61	AG74	AG80	AG84	AG85	AG86	GN18	GN32	GN34	GN36	GZ2
Rocks	gr	Msh	Msh	Am	Msh	Msh	Msh	Ma	Ma	Ma	gr	Ma	Ma	Ma	gr
Ag	<1	<1	<1	<1	2	<1	<1	2	2	2	<1	2	2	2	<1
As	10	<10	<10	<10	<10	22	<10	<10	<10	15	<10	<10	<10	<10	<10
Be	1.4	1.2	1.8	<1	<1	1.6	1.9	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Bi	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Cd	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ce	59	24	28	25	26	939	73	21	10	11	31	20	17	10	100
Co	19	17	55	8	50	410	33	149	41	213	55	20	28	176	12
Cr	43	210	151	241	129	193	342	28	18	8	119	6	7	9	112
Cu	7	<5	<5	<5	13	39	<5	477	153	71	86	10	<5	39	26
La	40	24	13	22	17	471	47	12	7	<5	20	15	9	8	50
Li	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Mn	677	1948	755	1117	961	398	1363	691	898	680	1220	697	788	760	106
Mo	1.3	<1	<1	<1	<1	12	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ni	17	40	63	<5	48	72	139	257	159	248	50	175	182	282	<5
Pb	<10	<10	<10	<10	<10	30	<10	73	66	67	<10	74	73	73	<10
Sb	12	<10	12	<10	22	11	21	<10	<10	12	<10	22	<10	<10	<10
Sc	14	19	31	8	29	6	19	<5	<5	<5	31	<5	<5	<5	14
Sr	54	128	<10	46	166	21	54	<10	198	27	14	14	29	20	102
V	38	121	309	20	294	22	166	48	278	171	306	682	368	622	50
Y	20	37	29	69	28	149	26	<5	<5	<5	33	6	6	<5	32
Zn	21	33	81	<10	71	30	24	99	105	81	64	105	108	92	11

ادامه جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب و نادر نمونه‌های سنگ میزبان آذرین و دگرگونی و کانسنگ مگنتیت (ppm) کانسار گل- گهر  
**Table 2 (Continued).** Whole rock minor and rare elements composition of the igneous and metamorphic host rocks and magnetite ore (ppm) in Gol-Gohr Iron deposit

S.N	GZ24	GZ26	GZ32	GZ36	GZ39	GZ41	GZ42	GZ43	AG83	292 A	GM22D	GM22A	GK19	GZ7
Rocks	Sp	Msh	gr	gr	Ma	Ma	gr	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma	Msh
Ag	2	2	<1	<1	3	2	<1	<1	2	2	<1	<1	3	<1
As	<10	<10	<10	<10	11	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Be	1.1	<1	1.2	2.6	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.1	<1	<1	3
Bi	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Cd	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ce	39	13	55	76	15	10	247	10	9	10	32	20	13	272
Co	8	20	36	6	67	43	56	70	26	28	42	45	16	9
Cr	25	270	91	71	23	23	172	11	10	10	307	216	12	32
Cu	<5	<5	<5	<5	7	163	<5	10	23	161	43	15	<5	<5
La	20	17	32	39	10	<5	150	<5	9	<5	22	16	11	131
Li	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Mn	157	1694	631	252	638	710	1567	735	873	790	888	621	440	595
Mo	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.1	11	<1	<1
Ni	<5	138	25	<5	144	223	72	203	183	176	192	72	59	174
Pb	<10	<10	<10	<10	50	69	<10	76	62	65	77	12	<10	80
Sb	<10	<10	15	<10	<10	<10	<10	<10	<10	11	<10	21	<10	<10
Sc	17	16	30	16	<5	<5	24	<5	<5	<5	<5	22	31	<5
Sr	65	21	18	<10	151	<10	37	<10	37	<10	16	152	159	59
V	17	121	209	16	163	93	170	366	34	394	415	229	234	49
Y	43	34	24	30	<5	<5	40	<5	<5	<5	<5	22	20	<5
Zn	<10	38	37	<10	64	84	35	85	75	276	597	37	42	84

جدول ۳. نتایج تجزیه نقطه‌ای کانی مگنتیت در نمونه AG84 (۵ نقطه) از نوع دو مگنتیت و نمونه AG86 (۱۰ نقطه) از نوع یک مگنتیت که محاسبات کاتیونی فرمول ساختاری مگنتیت به روش اندرسون و لندسی (Andersen and Lindsley, 1985) انجام شده است. <DL، کمتر از حد تشخیص دستگاه

**Table 3.** EPMA analysis of magnetite in sample AG84 (5 points) and samples AG86 (10 points). Magnetite cationic structural formula calculations by (Andersen and Lindsley, 1985) method. (<DL= Bellow detection limit)

AG84					
Formula	1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	<DL	<DL	<DL	0.06	<DL
TiO <sub>2</sub>	0.06	<DL	0.06	<DL	<DL
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	<DL	<DL	0.02	<DL
FeO	93.66	92.76	93.65	93.86	91.82
MgO	0.24	0.31	0.39	0.27	0.33
NiO	<DL	<DL	<DL	0.01	<DL
K <sub>2</sub> O	<DL	0.01	0.01	<DL	<DL
CuO	<DL	0.09	<DL	<DL	<DL
ZnO	0.10	<DL	<DL	0.19	<DL
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<DL	<DL	0.01	<DL	0.01
L.O.I	5.84	6.81	5.86	5.56	7.8
Total	94.16	93.19	94.14	94.44	92.2
Si	<DL	<DL	<DL	0.1	<DL
Ti	0.04	<DL	0.04	<DL	<DL
Al	0.04	<DL	<DL	0.01	<DL
Fe	70.15	69.05	71.18	71.25	67.04
Mg	0.15	0.28	0.32	0.17	0.22
Ni	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
K	<DL	0.025	0.021	<DL	<DL
Cu	<DL	0.05	<DL	<DL	<DL
Zn	0.07	<DL	<DL	0.2	<DL
V	<DL	<DL	0.01	<DL	0.01
Total	70.47	69.4	71.57	71.75	67.3
Si <sup>+4</sup>	<DL	<DL	<DL	0.0023	<DL
Ti <sup>+2</sup>	0.0017	<DL	0.0017	<DL	<DL
Al <sup>+3</sup>	0.0031	<DL	<DL	0.0009	<DL
Fe <sup>+3</sup>	1.9934	1.9999	1.9961	1.9944	1.9997
Fe <sup>+2</sup>	0.9843	0.9815	0.9789	0.9806	0.9796
Mg <sup>+2</sup>	0.0136	0.0178	0.0221	0.0153	0.0191
K <sup>+1</sup>	<DL	0.0005	0.0005	<DL	<DL
Zn <sup>+2</sup>	0.0028	<DL	<DL	0.0053	<DL
V <sup>+3</sup>	<DL	<DL	0.0003	<DL	0.0003
Ni <sup>+2</sup>	<DL	<DL	<DL	0.0003	<DL
	3.0001	3.0003	3.0003	3.0001	3.0000

ادامه جدول ۳. نتایج تجزیه نقطه‌ای کانی مگنتیت در نمونه AG84 (۵ نقطه) از نوع دو مگنتیت و نمونه AG86 (۱۰ نقطه) از نوع یک مگنتیت که محاسبات کاتیونی فرمول ساختاری مگنتیت به روش اندرسون و لندسی (Andersen and Lindsley, 1985) انجام شده است. <DL، کمتر از حد تشخیص دستگاه

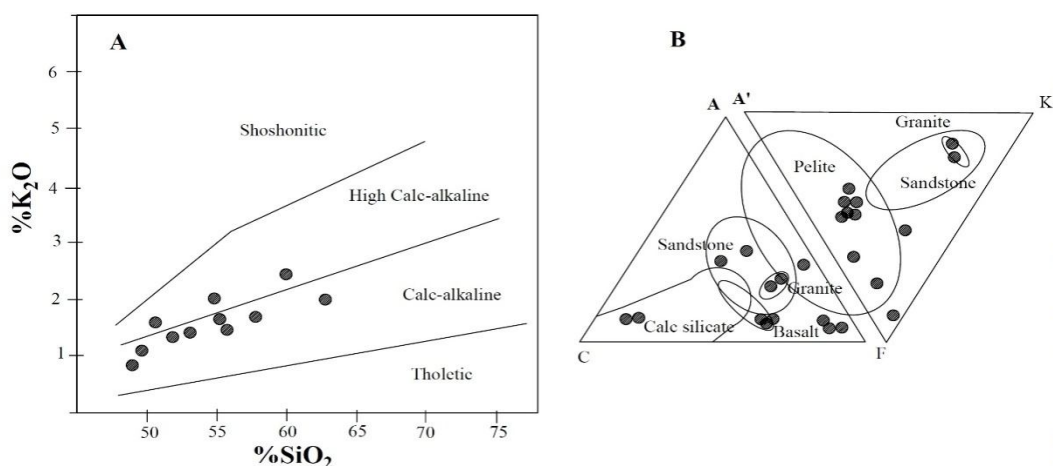
**Table 3 (Continued).** EPMA analysis of magnetite in sample AG84 (5 points) and samples AG86 (10 points). Magnetite cationic structural formula calculations by (Andersen and Lindsley, 1985) method. (<DL= Bellow detection limit)

Formula	AG86									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	0.12	<DL	<DL	0.02	0.06	<DL	<DL	<DL	0.06	<DL
TiO <sub>2</sub>	<DL	<DL	0.03	0.02	<DL	0.06	<DL	0.06	<DL	<DL
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.11	0.19	0.18	0.2	0.07	<DL	<DL	0.02	<DL
FeO	92.42	93.11	92.45	92.06	91.42	94.66	93.76	94.65	94.86	91.82
MnO	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04
MgO	1.18	1.26	1.31	1.63	2.33	0.24	0.31	0.39	0.27	0.33
CaO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	<DL	<DL	<DL	0.01	<DL
NiO	<DL	0.05	0.01	0.02	0.04	<DL	0.02	<DL	0.01	<DL
K <sub>2</sub> O	>DL	>DL	0.01	0.01	<DL	<DL	0.01	0.01	<DL	<DL
CuO	<DL	0.07	0.04	0.04	<DL	<DL	0.09	<DL	<DL	<DL
ZnO	0.34	0.22	0.22	<DL	<DL	0.1	<DL	<DL	0.19	<DL
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	<DL	<DL	0.01	<DL	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<DL	<DL	0.01	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
L.O.I	5.74	5.12	5.67	5.97	5.88	4.84	5.79	4.86	4.56	7.8
Total	94.26	94.88	94.33	94.03	94.12	95.16	94.21	95.14	95.44	92.2
Si	0.06	<DL	<DL	0.01	0.03	<DL	<DL	<DL	0.03	<DL
Ti	<DL	<DL	0.01	0.01	<DL	0.04	<DL	0.03	<DL	<DL
Al	0.08	0.06	0.11	0.1	0.11	0.04	<DL	<DL	0.01	<DL
Fe	69.23	70	69.65	69.97	69.56	72.24	71.25	71.27	69.97	66.83
Mn	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
Ni	>DL	0.04	0.01	0.01	0.03	<DL	0.01	<DL	0.01	<DL
K	<DL	<DL	0.01	0.01	<DL	<DL	0.01	0.01	<DL	<DL
Cu	>DL	0.05	0.03	0.03	<DL	<DL	0.07	<DL	>DL	<DL
Zn	0.26	0.17	0.17	<DL	<DL	0.07	<DL	<DL	0.15	<DL
V	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	<DL	<DL	0.01	<DL	<DL
Cr	0.01	<DL	<DL	0.01	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
Total	70.44	71.18	70.88	71.24	71.27	72.56	71.56	71.59	70.35	67.08

ادامه جدول ۳. نتایج تجزیه نقطه‌ای کانی مگنتیت در نمونه AG84 (۵ نقطه) از نوع دو مگنتیت و نمونه AG86 (۱۰ نقطه) از نوع یک مگنتیت که محاسبات کاتیونی فرمول ساختاری مگنتیت به روش اندرسون و لندسی (Andersen and Lindsley, 1985) انجام شده است. <DL، کمتر از حد تشخیص دستگاه

**Table 3 (Continued).** EPMA analysis of magnetite in sample AG84 (5 points) and samples AG86 (10 points). Magnetite cationic structural formula calculations by (Andersen and Lindsley, 1985) method. (<DL= Bellow detection limit)

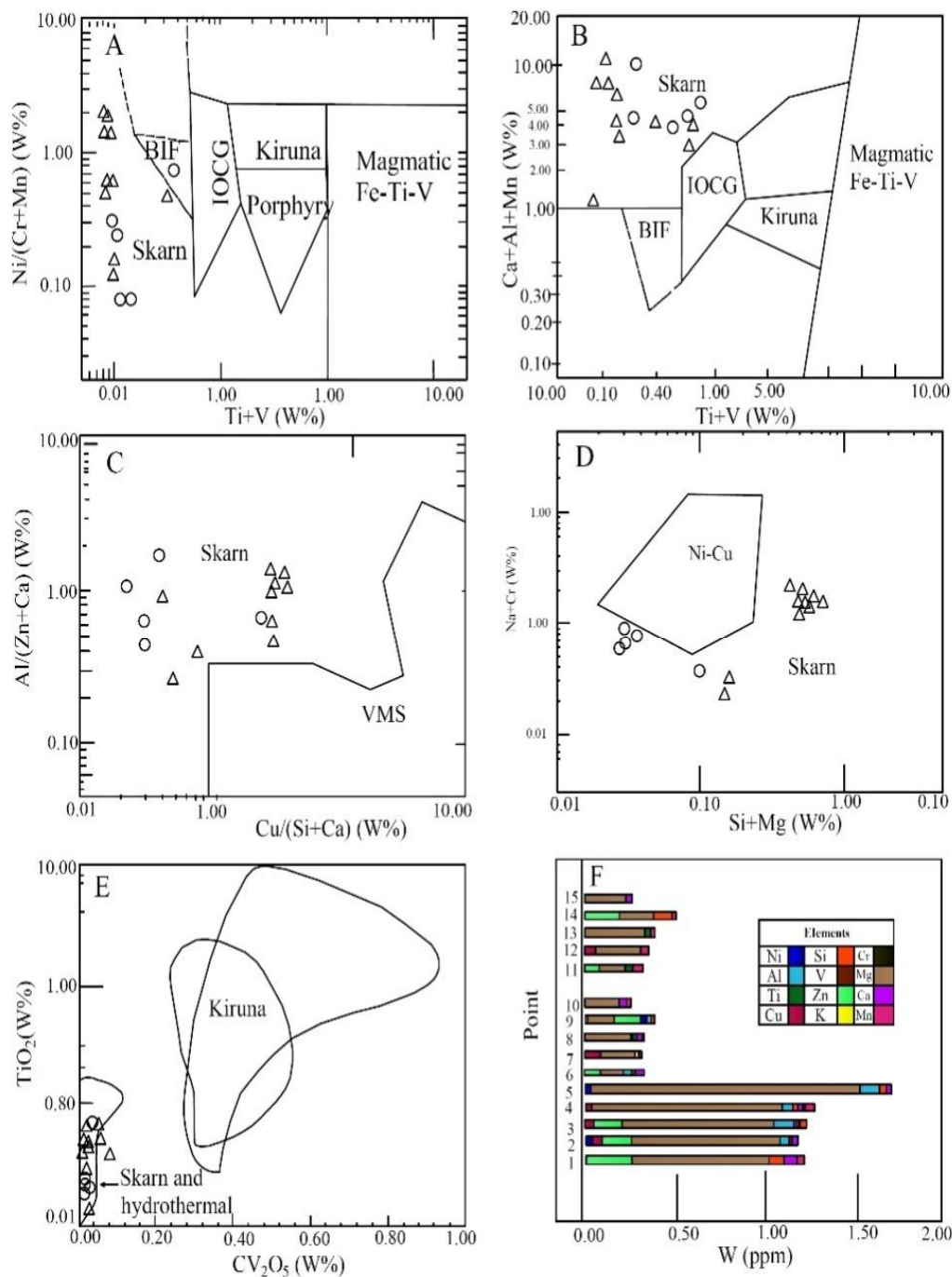
Formula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Si <sup>+4</sup>	0.0045	<DL	<DL	0.0008	0.0022	<DL	<DL	<DL	0.0023	<DL
Ti <sup>+2</sup>	<DL	<DL	0.0008	0.0006	<DL	0.0017	<DL	0.0017	<DL	<DL
Al <sup>+3</sup>	0.0062	0.0049	0.0084	0.0080	0.0088	0.0031	<DL	<DL	0.0009	<DL
Fe <sup>+3</sup>	1.9841	1.9941	1.9890	1.9884	1.9852	1.9935	1.9996	1.9962	1.9945	1.9997
Fe <sup>+2</sup>	0.9274	0.9215	0.9195	0.9086	0.8708	0.9845	0.9816	0.9791	0.9808	0.9796
Mn <sup>+2</sup>	0.0010	0.0013	0.0013	0.0006	0.0006	0.0010	0.0006	0.0006	0.0006	0.0013
Mg <sup>+2</sup>	0.0663	0.0703	0.0735	0.0914	0.1298	0.0135	0.0176	0.0219	0.0151	0.0191
Ca <sup>+2</sup>	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0008	<DL	<DL	<DL	0.0004	<DL
K <sup>+2</sup>	<DL	<DL	0.0005	0.0005	<DL	<DL	0.0005	0.0005	<DL	<DL
Cr <sup>+2</sup>	0.0003	<DL	<DL	0.0003	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
Zn <sup>+2</sup>	0.0095	0.0061	0.0061	<DL	<DL	0.0028	<DL	<DL	0.0053	<DL
V <sup>+3</sup>	0.0003	0.0003	0.0006	0.0003	0.0009	<DL	<DL	0.0003	<DL	0.0003
Ni <sup>+2</sup>	<DL	0.0015	0.0003	0.0006	0.0012	<DL	0.0006	<DL	0.0003	<DL
	3.0000	3.0004	3.0004	3.0005	3.0003	3.0000	3.0005	3.0003	3.0001	3.0000



شکل ۶. A: طبقه‌بندی دسته ماگمایی سنگ‌های نفوذی معدن گل-گهر (Peccerillo and Taylor, 1976) براساس نمونه‌های تجزیه‌شده در این پژوهش و B: نمودار ACF و A/KF برای تعیین پروتولیت سنگ‌های دگرگونی منطقه معدنی گل-گهر در نمودار A/KF (Winkler, 1976)

بر اساس نمونه‌های تجزیه‌شده در این پژوهش و داده‌های منتشر نشده از معدن شماره ۳

**Fig. 6.** A: Magmatic series classification of Gol-e-Gohar mine plutonic rocks (Peccerillo and Taylor, 1976), and B: ACF and A/KF diagram showing the metamorphic protolith of Gol Gohr metamorphic rocks (Winkler, 1976). (A based on current research data and B based on current research and mine unpublished data)



شکل ۷. نمودارهای مربوط به تعیین منشأ دو نسل کانی‌سازی مگنتیت با استفاده از ترکیب عناصر اصلی و فرعی. A: نمودار Ni / Cr + Mn به  $Ti+V$ ، B: نمودار Ca + Al + Mn به  $Ti+V$ ، C: نمودار Al/(Zn+Ca) به  $Cu/(Si+Ca)$ ، D: نمودار Ni+Cr به Si+Mg (Celine and Beaudoin, 2011)، E:  $V_2O_5$  نسبت به  $TiO_2$  (Celine and Beaudoin, 2011)، F: فراوانی عناصر اصلی در کانی مگنتیت در نمونه AG86 (نقاط ۱-۱۰) و نمونه AG84 (نقاط ۱۲-۱۵) مثلث نمونه، AG86 و دایره مربوط به نمونه AG84 است.

**Fig. 7.** Diagrams of determining the origin of magnetite ore using chemical analyses of major and minor elements. A: Ni/Cr+Mn vs. Ti+V, B: Ca+Al+Mn vs. Ti+V, C: Al/(Zn+Ca) vs. Cu/(Si+Ca), D: Ni+Cr vs. Si+Mg (Celine and Beaudoin, 2011), E:  $V_2O_5$  vs.  $TiO_2$ , (Celine and Beaudoin, 2011), and F: The frequency of major elements in the magnetite in Sample AG86 (1-10 points) and Sample AG84 (Triangle sample AG86, and circle sample, AG84)



**نتیجه‌گیری**

کانسارهای فلزی در ارتباط با مجموعه‌های دگرگونی ساختارهای جهت‌یافته از خود نشان می‌دهند و اغلب دارای روندهای عمومی موازی مجموعه دگرگونی هستند (Groves et al., 2003). نتایج حاصل از بررسی‌های پتروگرافی و فابریکی نشان می‌دهد، سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با توجه به مجموعه کانی‌شناسی در شرایط رخساره شیست سبز تا حد رخساره آمفیبولیت طی حداقل دو حادثه زمین‌شناسی دگرگون شده‌اند. شواهد موجود نشان می‌دهد قدیمی‌ترین فاز دگرگونی قابل تشخیص در منطقه مورد بررسی ( $M_1$ ) برگ‌وارگی اولیه  $S_1$  را در مجموعه دگرگونی در راستای تقریبی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی ایجاد کرده است. فاز دوم دگرگونی ( $M_2$ ) و برگ‌وارگی  $S_2$  حاصل از دگرشکلی ایجادشده در نمونه‌های مورد بررسی، زاویه ۳۰ تا ۴۵ درجه را با  $S_1$  می‌سازد که راستای تقریباً شمالی جنوبی دارد. دگرگونی فاز اول، احتمالاً سن قبل از ژوراسیک بالایی تا کرتاسه آغازی را دارد (2004).

(Baharifar et al) مرحله دوم دگرگونی با پلوتونیزم اصلی پهنه سندج- سیرجان و افزایش گرادیان زمین‌گرمایی منطقه همراه است و از نوع دگرگونی‌های دما بالا، فشار پایین است و در محدوده کم فشار رخساره آمفیبولیت قرار دارد. داده‌های سن‌سنجی (Bayatirad et al., 2010) نشان می‌دهد که فاز دگرگونی ناحیه‌ای اولیه ( $M_1$ ) در مناطق مشابه مجموعه دگرگونی گل‌گهر طی پالئوزوئیک تا تریاس رخ داده است و فاز دگرگونی بعدی ( $M_2$ ) هم‌زمان یا کمی قبل از تزریق توده‌های گرانیتی در این مجموعه دگرگونی ایجاد شده است. در طی دگرگونی و پلوتونیزم نیروهای فشاری مورب، باعث حرکات امتداد لغز در راستای گسل‌های قدیمی موجود در منطقه شده است تا جایی که در سنگ‌های دگرگونی برگ‌وارگی لغزشی به وجود آورده و نیز توده‌های گرانیتی را تکتونیزه تا میلیونیت کرده است. برگ‌وارگی  $S_2$  در کل منطقه عمومیت دارد؛ ولی به دلیل پایین بودن فشار فاز دوم دگرگونی برگ‌وارگی  $S_2$  به قوت برگ‌وارگی  $S_1$  نیست. در این بررسی بخشی از کانسار که زیر

عنوان نوع اول و یا کانسار زیرین معرفی شده است با برگ‌وارگی  $S_1$  همخوانی دارد و به نظر می‌رسد تحت تأثیر این فاز تشکیل شده است. بخش بالایی کانسار یا نوع دوم هم‌زمان و یا در فاصله زمانی کمی بعد از فاز دوم تشکیل شده است. شواهد ژئوشیمیایی بر ارتباط نزدیک کانی‌زایی و جایگزینی توده تأکید دارد؛ ولی اختلاف موجود در عناصر Al و Mg بین نمونه‌های برداشته‌شده از بخش قدیمی تر کانسار نشان می‌دهد که بلورهای مگنتیت زیرین در زمینه غنی از این عناصر رشد کرده‌اند و شواهد فابریکی نیز ارتباط این بخش را با دسته پلیتی که به‌طور ذاتی غنی از آلومینیوم و منیزیم هستند، تأیید می‌کند.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، می‌توان گفت سنگ مادر شیلی همراه با میان لایه‌های ماسه‌ای و کربناته که غنی از آهن بوده، قبل از تریاس در حوضه رسوبی انباشته‌شده‌اند و تحت تأثیر فرآیند دگرگونی فاز اول مگنتیت دسته زیرین غنی از آلومینیوم و منیزیم تشکیل شده است. نفوذ توده‌های آذرین و افزایش گرادیان زمین‌گرمایی طی فاز دوم دگرگونی طی ۱۵۰ میلیون سال بعد از جایگزینی اولیه هم‌زمان با نفوذ سیالات گرمایی در مناطق مستعد گسله باعث تحرک مجدد شده و هاله اسکارنی غنی از بلورهای مگنتیت زیرین را بر جای گذاشته است.

بررسی‌های انجام‌شده، نشان می‌دهد پراکندگی ژئوشیمیایی عناصر در کانسار شماره سه گل‌گهر شبیه به اسکارن‌های شمال سوئد است که توسط فریتش (Frietsch, 1978) تشریح شده است. او منشأ این ذخایر آهن اسکارنی را در ارتباط با آتشفشان‌های بازیک زیر دریایی دانسته و معتقد است، این ذخایر عموماً دارای ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه با کانسارهای آتشفشانی-رسوبی است و پس از تشکیل اولیه کانسار و در مرحله بعد شواهد رسوبی این کانسارها طی فازهای دگرگونی ناحیه‌ای از بین رفته است. بررسی‌های انجام‌شده در کانسار شماره سه گل‌گهر، بیانگر شباهت‌های فراوان با ذخایر شمال سوئد است. ترکیب کانی‌شناسی، ژئوشیمی نسبت‌های دوتایی عناصر و نمودارهای ترسیمی که در شکل‌های (A-7)، B، C، D، E و F نشان‌داده شده است، خاستگاه احتمالی اسکارن

دریایی، آهن را با عیار پایین در بین توالی‌های رسوبی تمرکز داده‌اند. پس از آن و در طی رخداد‌های بعدی دگرگونی بخش قدیمی تر کانسار (نوع ۱) تشکیل شده و شواهد دگرریختی و دگرگونی حفظ شده است. سپس هم‌زمان تا بعد از فازهای دگرگونی، فعالیت ماگماتیسم بعدی به‌خصوص نفوذ توده‌های گرانیتی، علاوه بر ایجاد دگرگونی حرارتی، سیالات مورد نیاز را برای تحرک دوباره آهن در بخش‌هایی از کانسار که در مجاورت توده گرانیتی قرار داشته، فراهم کرده و توالی‌های آهن‌دار کمپلکس گل‌گهر و ته‌نشست مگنتیت با حجم و ذخیره بالا تحت عنوان نوع دو کانسار را تشکیل داده است.

(پالئواسکارن) را برای کانسار آهن شماره ۳ گل‌گهر قابل قبول می‌کند. بنابراین، بر اساس نتایج ژئوشیمیایی به‌دست آمده از این پژوهش، برای تشکیل کانسار گل‌گهر یک مدل آتشفشانی-رسوبی که در مراحل بعدی تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای و سپس اسکارنی شدن و متاسوماتیسم حاصل از نفوذ توده‌های آذرین قرار گرفته است، قابل قبول به‌نظر می‌رسد. این نتایج با بررسی‌های انجام‌شده اخیر (Yagoby, 1999; Babaki, 2004) نیز نتایج مشابهی را به‌دست داده است. به عقیده فریتش (Frietsch, 1978) در تشکیل این کانسارها فرآیندهای گرمایی زیر دریایی مانند چشمه‌های نزدیک به آتشفشانی زیر

## References

- Aghanabaty, A., 2004. Geology of Iran. Geological survey of Iran, Tehran, 709 pp. (in Persian).
- Andersen, D.J. and Lindsley, D.H., 1985. New (and final) models for the Ti-magnetite/Ilmenite geothermometer and oxygen barometer (abs). EOS, Transactions of the American Geophysical Union, 3(66): 416-434
- Archanjo, C. and Bouchez, J., 1997. Magnetic fabrics and microstructures of the post-collisional aegirine-augite syenite Triunfo pluton, northeast Brazil. *Journal of Structural Geology*, 19(6): 849-860.
- Atai, M., 1998. Divisions Anomaly grades modelling in the number 3 Gol-Gohar mines. National Iranian Steel Company, Tehran, Internal report, 200 pp. (in Persian)
- Babaki, A., 2004. Genesis of Gol-Gohar iron ore deposit. M.Sc. Thesis, University of Bahonar Kerman. Kerman, Iran, 144 pp.
- Baharifar, A., 2003. Petrology of the Hamedan Metamorphic rocks. Ph.D. Thesis, Tarbiat moallem university, Tehran, Iran, 234 pp. (in Persian with English abstract)
- Baharifar, A., Moeinvaziri H., Bellon, H. and Piqué, A., 2004. The crystalline complexes of Hamadan (Sanandaj-Sirjan zone, western Iran): metasedimentary Mesozoic sequences affected by Late Cretaceous tectono-metamorphic and plutonic events. *Comptes Rendus Geoscience*, 336: 1443-1452.
- Bayatirad, Y., Mernajat, H. and Ghalamghash, J., 2010. Assessment of the origin of magnetite iron ore and sulfide Gol-Gohar (Sirjan) using oxygen and sulfur isotope data. *Journal of Earth Science*, 87(3): 139-146. (in Persian)
- Bell, T.H. and Rubenach, M.J., 1983. Sequential porphyroblast growth and crenulation's cleavage development during progressive deformation. *Tectonophysics*, 92(1): 171-194.
- Celine, D. and Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types, *Mineralium Deposita*, 46(4): 319-335.
- El Korh, A., Schmidt, S.T., Vennemann, T. and Balleve, M., 2013. Trace element and isotopic fingerprints in HP-LT metamorphic rocks as a result of fluid-rock interactions. *Gondwana Research*, 23(3): 880-900.
- Eshraghi, S.A., Roshan Ravan, J. and Sabzehei, M., 1999. Geological map of Neyriz. Scale 1:100,000. Geological survey of Iran.
- Frietsch, R., 1978. On the magmatic origin of the iron ores of the Kiruna type. *Economic Geology*, 73(4): 478-485.
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics*, 381(3): 235-273.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F. and Hart, C.J.R., 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current

- understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology*, 98(1): 1–29.
- Hallaj, A. and Jacobpor, A.M., 1991. Investigation of sulfide phases in iron ore Golgohar Sirjan. 3th Symposium of Iranian miners, Tehran University, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Jacobite, A.S., 1999. Geochemical study of Number 2 Golg-Gohar deposit. M.Sc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 183 pp. (in Persian with English abstract)
- Jamshidi Badr., M., Masoudi, F., Collins, A.S. and Sorbi, A., 2012. Mineralogical evidence for regional metamorphism overprinted by contact metamorphism. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 86(1): 48–68.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68(1): 277–279.
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B. and Mohajjel, M., 2011. U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 238–249.
- Mendes, M. and Lagoeiro, L., 2012. Microstructures, crystallographic fabric development and deformation mechanisms in natural hematite aggregates deformed under varied metamorphic conditions. *Journal of Structural Geology*, 40(3): 29–43.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. and Land Sahand, M.R., 2003. Cretaceous-tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-sirjan zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(4): 397–412.
- Mucke, A. and Golestaneh, F., 1982. The Genesis of the Gol Gohar Iron ore Deposit (Iran). Ph.D. Thesis, Institut für Mineralogie und Kristallographie der Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany, 212 pp.
- Naslund, H.R., Aguirre, R., Dobbs, F.M., Henriquez, F. and Nystrom, J.O., 2000. The origin, emplacement, and eruption of ore magmas. IX Congreso Geológico Chileno. Geological Society of Chile, Santiago, Chile.
- Passchier, C.W. and Troaw, R.A.J., 2005. *Micro tectonics*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 366 pp.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Porkhak, F., 2003. Paragenesis, petrogenesis, petrochemical of Gol–Gohar Iron ore deposit (Anomaly 3). M.Sc. Thesis, University of Bahonar Kerman. Kerman, Iran, 173pp. (in Persian with English abstract)
- Ramdohr, P., 1980. *The ore minerals and their intergrowth*. Pergamon Press, Oxford, London, 1207pp.
- Saurabh, S. and Raj Kumar, D., 2011. Novel hybrid nanostructured materials of magnetite nanoparticles and pectin. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323(7): 980–987.
- Tong, H., Zhaochong, Z. and Timothy, K., 2011. Gushan magnetite–apatite deposit in the Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, SE China: Hydrothermal or Kiruna-type. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 333–346.
- Torabian, S., 2007. Minerals and ore genesis anomaly 3 Gol-Gohar. M.Sc. Thesis, Tarbiat moallem University, Tehran, Iran, 128 pp. (in Persian with English abstract)
- Winkler, J.D.H., 1976. *Petrogenesis of Metamorphic rocks*. Springer, New York, 334 pp.
- Yagoby, A., 1999. Geochemical study Of Golgohar deposit. M.Sc. Thesis, University of Shiraz, Shiraz, Iran, 196 pp.



## Microstructure and geochemical evidences for genesis of the Gol-Gohar iron deposit

Shahryar Mahmoudi\*, Azra Mahmoudi and Behzad Mehrabi

Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Submitted: Mar.. 15, 2015

Accepted: July 19, 2016

**KeyWords:** *Sanandaj-Sirjan metamorphism, the Gol-Gohar iron ore deposit, Microstructure, Skarn-type iron ore deposit*

### Introduction

The Gol-Gohar iron ore deposit located in 55 km South West of the city of Sirjan, in the Sanandaj-Sirjan structural zone. Sanandaj-Sirjan zone (SSZ) is part of the Alpien-Hymalian orogenic belt and it is located in the west of the central Iran microplate. SSZ represented the metamorphic belt of the Zagros orogeny, that extends for 1500 km from Sirjan in the southeast to Sanandaj in the northwest of Iran (Mohajjel et al, 2003). The Gol-Gohar iron ore deposit is surrounded by a complex of igneous and metamorphic rocks mainly consisting of pelitic schists, basic schists, gneiss, amphibolite, marble, granodiorit, granite and mylonitic granite.

In the early studies on the genesis of Gol-Gohar iron deposits, it was considered that sedimentary and tectonic processes were more effective in iron ore deposition. Later studies mainly confirmed a magmatic genesis for Gol-Gohar iron ore (Mucke and Golestaneh, 1982). Although some researchers argued that skarnisation process was the main cause of mineralisation (Hallaj and Jacobpor, 1991; Torabian, 2007), still some discussions on Gol-Gohar genesis are underway.

### Materials and methods –

Gol-Gohar mine is divided into three blocks and several exploratory boreholes have been drilled down to 200 to 1400m depths in the third block. The representative samples were taken from exploration drill holes and outcrops around the

mine. Microscopic observation (Zeiss Aksioscope) in thin and polish sections show that the main ore mineral in the Gol-Gohar deposit is magnetite formed into two types with distinctive optical properties; the milky-gray magnetite (type1) named also “upper ore” and blue to brown magnetite (type2) named also “lower ore” (Mucke and Golestaneh, 1982). Mineralogy and microtectonic study were carried out on 100 thin and 30 polished sections using Zeiss research microscope. For geochemical analyses 20 samples were selected from 3 major exploration drill holes. After whole rock chemical analyses (XRF), four sample from two ore types and metamorphic host rock were examined by EPMA. The analytical examination were carried out in the Iranian Mineral Processing Research Center (IMPRC) using PW2404 Philips XRF and Cameca X-100 EPMA.

### Discussion

Based on microstructural observations of the metamorphic host rocks of the Gol-Gohar deposit, two main deformation phases were recognized which caused two distinctive foliations,  $S_1$  and  $S_2$ .  $S_1$  is a continuous foliation with N18W to N24W general trend and average of 45 to 60 degrees slope toward the East.  $S_2$  is with 15-30 ° deviation from  $S_1$  and N9E to N17E general trend overprinted on the  $S_1$ . Granite emplacement has caused deformation phases and magnetite crystals (Which Type) just oriented within the first deformation phase ( $S_1$ ). The second deformation

phase ( $S_2$ ) is recognized by fish shapes and pressure shadows around the minerals. The preferred orientation of magnetite in  $S_1$  and growth with biotite and garnet in the biotite, garnet and staurolite zones suggests that the early stage of mineralization in Gol-Gohar is contemporaneous with progressive metamorphism. Type 1 magnetite does not show any margin thermal reactions.

EPMA analysis of type 2 magnetite indicates a distinctive enrichment of high mobile elements. The distribution and frequency diagram (Celine and Beaudoin, 2011; Tong et al., 2011) shows that skarnisation is the main process in the genesis of the Gol-Gohar iron ore. Also, a comparison of the chemical composition of type 1 and 2 magnetite shows similar values of Ti, Cu, Si and Mg while metamorphic magnetite (type 2) specifically show higher concentrations of Al and Mg.

The metamorphism-related deformation history of the study area based on magnetite fabrics, mineralogy and metamorphic evolution implies a new model for the Gol-Gohar mineralization. Penetrative NS- to NW/SE dipping fabric is represented by  $S_1$  foliation hosted type 1 magnetite, which was formed in the prevailing NW–SE shortening event during the first stage of regional metamorphism during the late Carboniferous– early Permian time. This shortening event is interpreted to be associated with the collisional event between the Sanandaj-Sirjan and central Iran blocks. The  $S_2$  fabric probably is related to the intrusion of Jurassic or

younger granite in the area. Type 2 magnetite has been formed during the Skarnification process.

## References

- Celine, D. and Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types, *Mineralium Deposita*, 46(4): 319–335.
- Hallaj, A. and Jacobpor, A.M., 1991. Investigation of sulfide phases in iron ore Golgohar Sirjan. 3th Symposium of Iranian miners, Tehran University, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Mohajjel, M., Fergusson, C. and Land Sahand, M.R., 2003. Cretaceous-tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-sirjan zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(4): 397–412.
- Mucke, A. and Golestaneh, F., 1982. The Genesis of the Gol Gohar Iron ore Deposit (Iran). Ph.D. Thesis, Institut für Mineralogie und Kristallographie der Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany, 212 pp.
- Tong, H., Zhaochong, Z. and Timothy, K., 2011. Gushan magnetite–apatite deposit in the Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, SE China: Hydrothermal or Kiruna-type. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 333–346.
- Torabian, S., 2007. Minerals and ore genesis anomaly 3 Gol-Gohar. M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran, 128 pp. (in Persian with English abstract)