

# توزیع طلا و عناصر فرعی در پیریت کانسار سنجده، منطقه معدنی موته، بر اساس نتایج آنالیز الکترون مایکروپروب

زهرا نوریان رامشه<sup>۱\*</sup>، محمد یزدی<sup>۲</sup>، ایرج رسا<sup>۲</sup> و فریبرز مسعودی<sup>۲</sup>

۱. دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲. استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۲

## چکیده

منطقه موته در قسمت مرکزی زون سنندج - سیرجان واقع شده و دارای دو معدن طلائی فعال به نام چاه خاتون و سنجده می‌باشد. واحدهای سنگی منطقه تحت تاثیر دگرگونی در حد شیست سبز تا آمفیبولیت زیرین بوده و شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی و آتشفشانی اسیدی دگرگون تا دگرشکل شده می‌باشند. این سنگ‌های دگرگونی میزان کانی‌سازی طلا هستند و پیریت کانی اصلی میزان طلا می‌باشد. به منظور بررسی توزیع طلا و عناصر فرعی در کانی پیریت، پیریت‌های کانسار سنجده با استفاده از مطالعات میکروسکوپی و آنالیز الکترون مایکروپروب مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس این مطالعات دو نسل پیریت شناسایی شد. پیریت‌های نسل اول، پیریت‌های نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل دانه متوسط دگرشکل شده و دارای شکستگی با محتوای طلائی بالا (تا ۸۱۰ppm) و پیریت‌های نسل دوم، پیریت‌های درشت بلور شکل‌دار و دارای محتوای طلائی پایین تا متوسط (از زیر حد تشخیص دستگاه تا ۱۱۰ppm). همچنین نتایج آنالیز نشان می‌دهد که به جز طلا هیچ‌گونه تفاوت سیستماتیکی بین محتوای عناصر فرعی دو نسل پیریت وجود ندارد. بر اساس تصاویر BSE طلا به صورت آزاد در حد میکرون در ریزشکستگی‌های پیریت نسل اول مشاهده شد. همچنین بر اساس نقشه پراکندگی عناصر، Co در شبکه پیریت حضور دارد و زونینگ نشان می‌دهد. سنگ‌های مافیک الترامافیک نسبت به Co غنی‌شدگی نشان می‌دهند، در مقابل سنگ‌های فلسیک فقیر از Co هستند، تمرکز بالای کبالت می‌تواند گواه سهم بالای سنگ‌های مافیک - الترامافیک در منبع سیال در منطقه باشد. بنابراین میزان بالای Co در پیریت احتمالاً مرتبط به سنگ‌های دگرگونی مافیک- الترامافیک است و شواهد بیشتری را برای کوهزایی بودن نهشته طلا فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آنالیز الکترون مایکروپروب، پیریت، طلا، سنجده، موته.

## مقدمه

است. این منطقه به‌عنوان اولین و مهم‌ترین منطقه تولید طلا در ایران است که دارای دو معدن فعال روباز به نام‌های چاه خاتون و سنجده و چندین اندیس کوچک‌تر می‌باشد، که به علت قرارگیری منطقه در محدوده حفاظت شده محیط

محدوده طلائی موته در استان اصفهان، شمال شرق گلیپایگان و بخش مرکزی زون سنندج- سیرجان واقع شده

\* نویسنده مرتبط: ZN5562@yahoo.com

زیست و دارا بودن گونه‌های جانوری، اجازه استخراج برای معادن کوچک‌تر صادر نگردیده است.

علی‌رغم مطالعات متعدد انجام شده در منطقه، ژنز طلا در منطقه موهه همچنان بحث برانگیز است. عده‌ای عقیده دارند که کانه‌زایی طلای منطقه در ارتباط ژنتیکی با توده‌های گرانیتی می‌باشد (برای مثال؛ Thiele et al., 1968؛ Samani, 1988). در حالی که Paidar-Saravi (1989) برای این کانسارها منهای دگرگونی در نظر گرفته و از پیریت‌های اولیه موجود در منطقه به‌عنوان منشا احتمالی طلا نام برده است. حسنی و محجل (۱۳۷۸) تشکیل کانسارهای طلای منطقه را در ارتباط با تکتونیک کششی هم‌زمان با نفوذ توده‌های گرانیتی و در امتداد پهنه‌های برشی شکنا‌ی گسل‌های نرمال در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی عنوان کرده‌اند. رشید نژاد عمران (۱۳۸۱) یک منشا اگزالاتیو به‌صورت پیریت‌های طلا دار مرتبط با توف‌های اسیدی-ریولیتی پالئوزویک برای کانسارهای منطقه در نظر می‌گیرد. کوهستانی (۱۳۸۳) کانسار چاه باغ در جنوب غرب منطقه موت را مطالعه نموده و آن را از نوع کوهزایی دانسته است. (Moritz et al. (2006) کانه‌زایی‌های طلای منطقه را نتیجه بالآمدگی کمپلکس‌های دگرگونی میزبان هم‌زمان یا بعد از مراحل انتهایی کشش شکنا‌ی ائوسن و فعالیت ماگمایی هم‌زمان موجود در پهنه سنندج-سیرجان و کمر بند ارومیه-دختر را مرتبط با این کانه‌زایی‌ها دانسته و یک ناهنجاری حرارتی (احتمالاً مرتبط با توده‌های نفوذی) را برای کانسارهای منطقه پیشنهاد داده‌اند. (Kouhestani et al. (2014) عقیده دارند که این کانسارها در نتیجه چندین مرحله کانه‌زایی تشکیل شده‌اند و دگرگونی ناحیه‌ای مرتبط با بسته شدن نفوختتیس را به‌عنوان اولین و مهم‌ترین فرآیند دانسته و تیپ کوهزایی را برای مجموعه کانساری موت پیشنهاد می‌کنند.

در منطقه موهه کانه‌زایی طلا در ارتباط با رگه‌های کوارتز می‌باشد و پیریت مهم‌ترین کانی میزبان طلا در منطقه و کانسار سنجد است. بنابراین اگر پیریت مستقیماً از سیالات کانه‌ساز ته‌نشین شده باشد ترکیب عناصر فرعی موجود در پیریت ممکن است اطلاعات مهمی درباره سیالات و

فرآیندهای کانه ساز در اختیار قرار دهد. تاکنون هیچ‌گونه اطلاعاتی راجع به پراکندگی عناصر فرعی پیریت‌های کانسار سنجد گزارش نشده است. در این تحقیق گزارشی از نحوه پراکندگی طلا، عناصر اصلی و فرعی پیریت در کانسار سنجد ارائه می‌شود.

## زمین‌شناسی

منطقه معدنی موهه، بخشی از درون‌هسته گلپایگان-موته با روند عمومی شمال خاوری-جنوب باختری است که در بخش مرکزی زون سنندج-سیرجان قرار گرفته است (شکل ۱). این زون با ۱۵۰ کیلومتر عرض و ۲۰۰۰ کیلومتر طول، هنگام فرورانش اقیانوس نئوتتیس در طول حاشیه غربی ایران تشکیل شده است؛ (Alavi, 1994؛ Mohajjel et al., 2003؛ Omrani et al., 2008) و عمدتاً شامل سنگ‌های دگرگونی با سن پالئوزویک تا کرتاسه همراه با توده‌های نفوذی با سن ژوراسیک تا ائوسن می‌باشد (Masoudy, 1997).

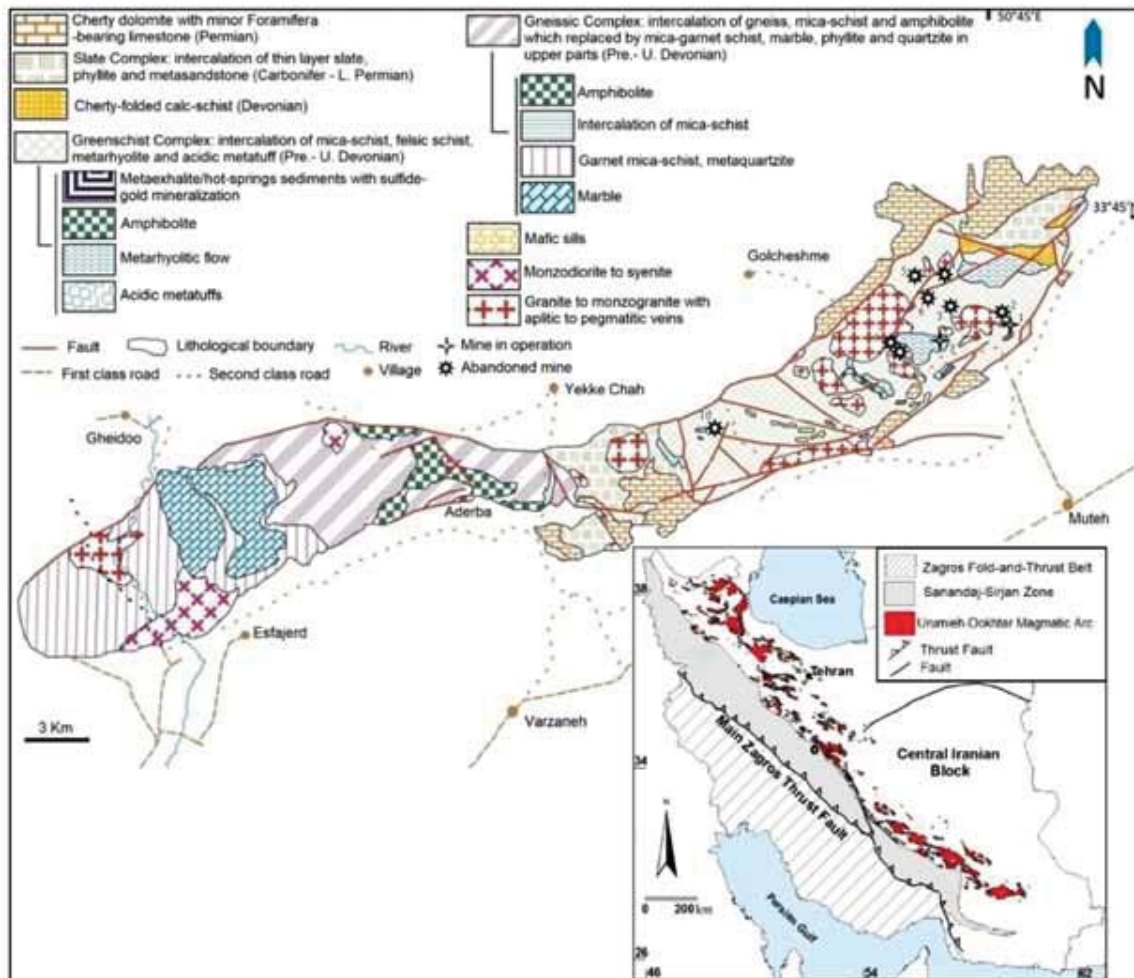
واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه معدنی موهه، شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی، ولکانیکی و ولکانی کلاستیک دگرگون شده در حد رخساره شیست سبز تا مرز شیست سبز به آمفیبولیت با امتداد عمومی شمال خاوری-جنوب باختری می‌باشند که توسط توده‌های نفوذی بازیک (سیل و دایک) و به‌خصوص اسیدی و گرانیتی (استوک و با تولیت) به‌طور مکرر مورد هجوم واقع شده‌اند (رشید نژاد عمران، ۱۳۸۱). این کمپلکس‌های دگرگونه از پایین به بالا شامل کمپلکس گنایسی (شامل تناوبی از گنایس، میکاشیست و آمفیبولیت با تبدیل تدریجی به میکا-گارنت شیست، مرمر، فیلیت و کوارتزیت در بخش‌های زیرین)، کمپلکس شیست سبز (شامل تناوبی از میکاشیست، کلریت-اکتینولیت شیست، فلسیک شیست، کالک شیست، سنگ‌های آذرین اسیدی میلونیتی (متاریولیت) و متاولکانی کلاستیک) و کمپلکس اسلیتی (تناوبی از لایه‌های نازک اسلیت، فیلیت و ماسه‌سنگ دگرگونه) می‌باشد که با تماس تدریجی یا ناپیوستگی هم‌شیب و گاه با همبری گسلی در زیر واحد کربناتی پرمین قرار گرفته‌اند.

این توالی‌ها تحت تاثیر فازهای متعدد و شدید دگرریختی

میزبان فلسیک شیستی و متاریولیتی (توفها و گدازه‌های ریولیتی دگرگون شده) کمپلکس شپست سبز رخ داده است. از مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در پهنه‌های برشی می‌توان به دگرسانی‌های سریسیتی، کلریتی، اپیدوتی، کربناتی، سیلیسی و سولفیدی اشاره کرد که از این بین دگرسانی‌های سیلیسی و سولفیدی بیشترین انطباق را با بخش‌های کانهدار نشان می‌دهند. کانه‌زایی اصلی منطقه به صورت رگه‌های سیلیسی سولفیددار (طلادار) درون پهنه‌های برشی شکنا، در امتداد گسل‌های نرمال با روند N40W و شیب به سمت شمال خاوری رخ داده است. این پهنه‌های کانهدار، مربوط به جوان‌ترین مرحله دگرشکلی منطقه ( $D_3$ ) می‌باشد.

نظم و ترتیب اولیه خود را از دست داده و واحدهای لیتولوژی مختلف با ساختارها و فابریک‌های متفاوت به وجود آورده‌اند. مطالعات ساختاری انجام گرفته، وقوع سه مرحله دگرشکلی ( $D_1$ - $D_3$ ) را در منطقه مشخص ساخته است (صدیق، ۱۳۷۸). عملکرد دگرشکلی‌های چندمرحله‌ای ایجاد یک مجموعه دگرشکل شده همراه با برگواره، خطواره، چین‌خوردگی‌ها و گسل‌خوردگی‌های مختلف می‌باشد. دگرشکلی و ساختار اصلی منطقه تحت تاثیر دگرشکلی مرحله دوم ( $D_2$ )، رخ داده است. یکی از مهم‌ترین آثار این دگرشکلی، میلونیته شدن سنگ‌های منطقه می‌باشد.

در مقیاس ناحیه‌ای، کانه‌زایی طلا در منطقه معدنی موته در ارتباط با پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و شکنا در سنگ‌های



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی موته. (۱) چاه خاتون (۲) دره اشکی (۳) چشمه گوهر (۴) سه کلپ (۵) تنگه زر (۶) چاه علومه (۷) سنجد (۸) قروم قروم (۹) چشمه دستار (۱۰) چاه باغ. ضمیمه: زیرزون‌های کوهزاد زاگرس که در آن موقعیت موته و چند نهشته در زون سنندج-سیرجان نشان داده شده است، (۱) موته (۲) کرویان (۳) قلقله (۴) قیغلوچه (۵) زرتشت (Kouhestani, et al., 2014)

## خصوصیات معدن سنجده

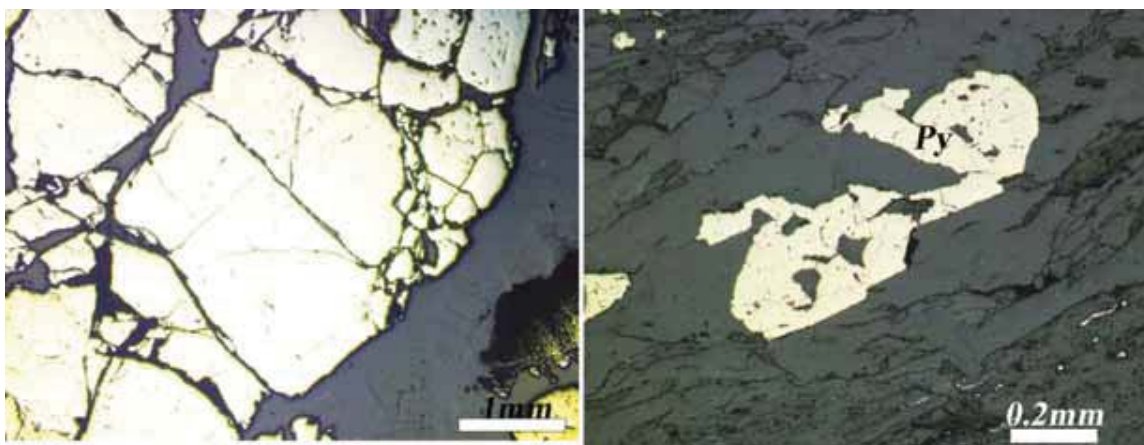
نیز دگرسانی آرژلیک (کائولینیتی شدن) غالب است که به رنگ سفید دیده می‌شود. پیریتی شدن و لیمونیتی شدن، همچنین آثاری از فلدسپاتی شدن (از نوع آلبیت) نیز دیده می‌شود.

رگه‌های کوارتز به‌طور عمده میزبان کانه‌زایی طلا می‌باشند. بر اساس مطالعات کانه‌نگاری، پیریت، کالکوپیریت و گالن کانه‌های سولفیدی کانسار سنجده را تشکیل می‌دهد که پیریت فراوان‌ترین و مهم‌ترین کانه در ارتباط با کانه‌زایی طلا می‌باشد. بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعات میکروسکوپی دو نسل پیریت در منطقه شناسایی شده است. پیریت‌های نسل اول، پیریت‌های عموماً بی‌شکل، دگرشکل و دارای شکستگی و پیریت‌های نسل دوم، پیریت‌های درشت دانه شکل‌دار و عموماً دارای سطح صاف می‌باشند (شکل ۳).



شکل ۲. گسل اصلی کانسار سنجده که قسمت اعظم کانه‌زایی در راستای آن رخ داده است (دید به سمت شمال)

همان‌گونه که گفته شد، منطقه معدنی موته شامل دو معدن فعال چاه خاتون و سنجده و مهم‌ترین منطقه معدنی فعال طلا در ایران می‌باشد. گزارش داخلی معادن یک توناژ کل ۱/۷۹ میلیون تن با عیار ۲/۵۷ ppm در چاه خاتون و ۱/۷۶ میلیون تن با عیار ۲/۵۸ ppm در سنجده گزارش کرده است (Moritz et al., 2006). معدن سنجده در پنج کیلومتری شمال غرب کارخانه استحصال واقع شده است. سنگ میزبان معدن سنجده، گنبد ریولیتی و فلسیک شیبست کوه سیاه است که بخش‌های طلادار اقتصادی آن، در سه زون برشی با گسل‌های نرمال و ضخامت سه تا شش متر واقع شده‌اند (شکل ۲). جنس این سنگ‌ها، متاریولیت خاکستری رنگ خرد شده و به‌شدت سیلیسی شده‌ای است که طلا در آنها متمرکز شده است. این قسمت‌ها همگی بخشی از کمپلکس شیبست سبز می‌باشند. در بعضی از زون‌ها، رگه‌های سیلیسی پیریت‌دار با ضخامتی نزدیک به یک متر وجود دارند. روند عمومی زون‌های کشتی طلا دار W40 N و شیب آنها حدود ۳۰ درجه شمال شرقی است (شکل ۲). دگرسانی در سنگ‌های میزبان و فراگیر معدن سنجده، اغلب از نوع سیلیسی است که به‌صورت رگه‌ای و بیشتر در محل تراکم درزه‌ها شکل گرفته‌اند. علاوه بر این در بعضی نقاط دگرسانی سربسیستی و در بخش‌هایی از معدن



شکل ۳. نمونه‌ای از پیریت‌های نسل اول (سمت راست) و نسل دوم (سمت چپ)

## روش آنالیز

جهت بررسی چگونگی حضور طلا و عناصر فرعی در کانی پیریت، تعداد ۲۷ نمونه از بخش‌های کانه‌دار معدن سنجد برداشت شد. پس از تهیه مقاطع نازک صیقلی، مقاطع ابتدا به وسیله میکروسکوپ انعکاسی مدل Zeiss و سپس توسط دستگاه الکترون مایکروپروب (EPMA) مدل Jeol JXA-8230 در آکادمی علوم زمین چین (پکن) مورد آنالیز قرار گرفت. به این منظور ابتدا جهت رسانا کردن نمونه‌ها، مقاطع به وسیله پوششی از کربن پوشش داده شد. ولتاژ به کار گرفته شده برای کانی پیریت ۲۰ kV و اندازه بیم جریان ۲۰ nA و قطر آن ۵ μm می‌باشد. جهت بررسی چگونگی توزیع طلا در شبکه پیریت، تعداد ۱۵۰ نقطه جهت آنالیز توسط دستگاه الکترون مایکروپروب انتخاب شد. در انتخاب این نقاط سعی شد ضمن انتخاب بلورهای مختلف، در یک بلور چندین نقطه مورد آنالیز قرار گیرد به عنوان مثال نقاطی از حواشی و مرکز یک بلور جهت آنالیز انتخاب گردیدند.

## نتایج آنالیز

نتایج مربوط به آنالیز پیریت‌های نسل اول و دوم کانسار سنجد در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. در بین عناصر آنالیز شده میزان آهن پیریت ۴۵/۴۱۲ تا ۴۶/۹۴۶ درصد و گوگرد ۵۲/۱۱۵ تا ۵۳/۶۳۳ درصد متغیر می‌باشد. همچنین میزان طلا از زیر حد تشخیص دستگاه (bdl<sup>۲</sup>) تا ۸۱۰ ppm بوده و کبالت تقریباً در تمام نمونه‌ها (در هر دو نسل پیریت) حضور دارد و میزان آن از ۱۳۰ تا ۶۰۳۰ ppm متغیر است. قابل ذکر است که میزان As در هر دو نسل پیریت پایین می‌باشد و فقط در یک نمونه به ۲۱۴۰ ppm می‌رسد و در اکثر نمونه‌ها میزان آن در حد زیر حد تشخیص دستگاه تا حداکثر چند صد ppm می‌باشد. به طور کلی به جز طلا هیچ‌گونه تفاوت سیستماتیکی بین محتوای عناصر فرعی دو نسل پیریت وجود ندارد. ضریب هم‌بستگی بین Au و عناصر دیگر در جدول ۳ آورده شده است، همان‌گونه که دیده می‌شود Au با Ag و Bi هم‌بستگی مثبت نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج آنالیز EPMA مربوط به پیریت‌های نسل اول (براساس wt%).

No.	Se	As	S	Pb	Bi	Sb	Fe	Co	Ag	Te	Zn	Cu	Ni	Au	Total
1	0.024	0.009	52.701	0	0	0	46.499	0.083	0	0.02	0	0.014	0.003	0.038	99.391
2	0	0	52.576	0.04	0	0	46.522	0.077	0.008	0.025	0	0.02	0.002	0.021	99.291
3	0.008	0	53.037	0.022	0.017	0	46.612	0.099	0	0.013	0	0.013	0	0.056	99.877
4	0	0.028	53.35	0	0	0.001	46.28	0.053	0.001	0.04	0.004	0.01	0.005	0.029	99.801
5	0.008	0.009	52.958	0.065	0.049	0	46.887	0.077	0	0	0.025	0.027	0	0.015	100.12
6	0.006	0	52.54	0	0	0.009	45.896	0.013	0	0	0.004	0	0	0.051	98.519
7	0	0	53.148	0.049	0	0	46.742	0.035	0.004	0	0	0	0.001	0.016	99.995
8	0.001	0.038	52.892	0.015	0	0.015	46.269	0.071	0	0	0.002	0.004	0.004	0.011	99.322
9	0.006	0.042	52.731	0	0	0.019	46.471	0.108	0	0	0	0	0	0.018	99.395
10	0.017	0.031	52.569	0	0.034	0.011	45.771	0.145	0.019	0.027	0.025	0.022	0.014	0.056	98.741
12	0	0	53.541	0.068	0.02	0.005	46.407	0.128	0	0.002	0	0	0.019	0.023	100.213
13	0.006	0.015	52.981	0.148	0	0.032	45.924	0.101	0.029	0	0	0.026	0.034	0.015	99.311
14	0	0	53.014	0.043	0	0	46.479	0.058	0.002	0	0.02	0	0.003	0.062	99.681
15	0	0.034	52.905	0	0	0.009	46.14	0.017	0	0	0.007	0.029	0.013	0.028	99.182
16	0.006	0.024	52.638	0.022	0.023	0.002	46.393	0.05	0	0	0.006	0.027	0.006	0.039	99.236
17	0.037	0	53.104	0.046	0	0	46.146	0.073	0	0.034	0.015	0	0	0.015	99.47
18	0.005	0	52.836	0	0	0	46.392	0.067	0	0.022	0.003	0	0.002	0.054	99.381
19	0	0.037	52.797	0.006	0	0	46.158	0.07	0	0	0.002	0	0.002	0.039	99.111
20	0	0	52.972	0.012	0.031	0	45.857	0.072	0	0.053	0.013	0.01	0.005	0.058	99.083

1. Electron prob micro analysis
2. Below detection limit

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز EPMA مربوط به پیریت‌های نسل اول (براساس wt%)

No.	Se	As	S	Pb	Bi	Sb	Fe	Co	Ag	Te	Zn	Cu	Ni	Au	Total
21	0.01	0.079	52.845	0.04	0.034	0.003	46.106	0.056	0	0.006	0.027	0.027	0	0.023	99.256
22	0	0.005	52.974	0	0.003	0	45.574	0.468	0	0.043	0.007	0.025	0.013	0.029	99.141
23	0.008	0.043	52.579	0	0	0	46.267	0.072	0.035	0.027	0.006	0.004	0.015	0.042	99.098
24	0.007	0.003	53.098	0.034	0.045	0	46.1	0.066	0	0.011	0.053	0	0	0.039	99.456
25	0.027	0.008	53.325	0.04	0	0.006	46.541	0.066	0.009	0.048	0	0	0	0.021	100.091
26	0.017	0.038	53.022	0.089	0.043	0.029	45.922	0.06	0.021	0.012	0	0	0	0.021	99.274
27	0	0.001	53.544	0.034		0.004	46.149	0.603	0	0	0	0	0.035	0.024	100.394
28	0	0.012	53.196	0		0.021	45.986	0.116	0	0	0.001	0	0.017	0.034	99.383
29	0	0	53.191	0		0.022	46.118	0.112	0	0.006	0	0	0.045	0.033	99.527
30	0.007	0	53.246	0		0.007	46.198	0.12	0.003	0.006	0.03	0.026	0	0.081	99.724

جدول ۲. نتایج آنالیز EPMA مربوط به پیریت‌های نسل دوم (براساس wt%)

No.	Se	As	S	Pb	Bi	Sb	Fe	Co	Ag	Te	Zn	Cu	Ni	Au	Total
1	0	0.032	53.222	0	0	0	46.25	0.051	0	0.043	0.026	0	0.004	0.01	99.638
2	0	0.025	52.294	0.105	0	0.011	46.333	0.072	0	0	0	0	0.006	0	98.846
3	0	0.018	53.513	0.018	0	0	46.034	0.058	0	0	0.01	0	0.004	0	99.655
4	0	0	53.204	0	0	0.01	45.904	0.051	0	0	0	0.01	0.002	0	99.181
5	0.015	0	52.737	0	0	0.037	46.689	0.068	0.011	0.029	0.017	0	0.014	0	99.617
6	0.004	0	52.937	0.031	0	0.01	46.254	0.02	0	0	0.012	0	0	0	99.268
7	0	0.006	52.553	0	0.006	0	45.949	0.126	0.004	0.028	0	0	0.001	0	98.673
8	0.004	0.036	52.71	0.031	0.017	0	45.898	0.056	0.027	0	0	0.014	0.02	0	98.813
9	0	0	52.858	0.08	0	0.02	46.507	0.099	0	0.022	0	0	0.015	0.01	99.611
10	0	0.034	52.894	0.034	0	0.022	46.597	0.078	0.039	0	0	0	0.006	0	99.704
11	0	0.011	53.135	0.025	0	0	45.978	0.226	0.053	0	0	0	0.013	0	99.441
12	0	0	52.497	0.037	0.003	0.006	46.729	0.044	0.014	0	0	0	0.007	0	99.337
13	0.002	0	52.949	0	0	0.032	46.458	0.14	0	0	0.025	0.003	0.013	0	99.622
14	0	0.017	52.696	0	0.009	0.001	45.902	0.097	0	0	0.016	0	0.012	0	98.75
15	0.007	0	52.798	0.065	0	0	46.273	0.081	0.012	0	0	0	0	0.011	99.247
16	0.005	0.014	52.604	0	0	0	46.433	0.044	0	0.019	0	0	0	0	99.119
17	0.014	0	53.033	0.022	0.014	0	46.369	0.063	0	0	0	0.006	0	0.011	99.532
18	0	0	53.157	0.006	0.017	0.01	45.852	0.072	0.031	0.015	0	0	0.01	0	99.17
19	0	0.01	53.261	0.077	0.017	0	46.935	0.163	0.005	0	0.004	0.001	0.001	0	100.474
20	0.02	0.06	52.995	0.037	0.026	0.005	45.604	0.572	0.017	0	0.034	0	0	0.01	99.38
21	0.007	0	52.569	0.009	0.014	0.017	46.666	0.072	0.009	0	0.03	0.048	0	0	99.441
22	0.002	0	52.826	0.052	0.048	0	46.161	0.086	0.021	0.017	0.002	0.014	0	0	99.229
23	0.006	0.017	52.836	0.068	0.08	0.021	46.357	0.052	0	0	0	0	0	0	99.437
24	0	0	52.601	0.003	0.051	0	46.366	0.097	0.007	0	0	0	0.007	0.008	99.14
25	0	0	52.818	0	0	0	45.996	0.057	0.012	0.012	0.012	0.005	0.009	0.002	98.923
26	0	0.04	52.897	0	0.037	0.008	45.839	0.055	0.027	0.005	0	0.024	0.001	0	98.933
27	0.026	0	52.958	0.043	0	0	45.86	0.148	0	0	0.011	0	0	0	99.046
28	0	0	52.656	0.006	0.014	0.037	46.206	0.069	0	0	0.007	0.008	0.012	0.003	99.018
29	0.003	0	52.546	0	0.006	0.022	46.203	0.073	0	0.037	0.004	0	0	0.008	98.902
30	0	0	52.687	0.015	0.014	0	46.4	0.07	0.015	0.002	0	0	0.001	0	99.204
31	0.02	0.018	52.945	0.015	0.011	0	45.667	0.059	0	0.02	0	0	0	0.006	98.761
32	0.01	0.012	53.222	0	0	0.022	45.89	0.077	0.01	0.01	0	0	0	0	99.253
33	0	0.021	53.079	0.077		0.016	46.362	0.163	0	0.001	0	0.021	0.01	0	99.75
34	0	0	52.686	0		0	46.112	0.142	0	0.005	0	0.016	0.016	0.003	98.98
35	0	0	53.409	0.015		0	46.637	0.099	0	0	0.003	0	0.009	0	100.172

جدول ۳. هم بستگی عناصر مختلف در مقابل طلا

	Se	As	S	Pb	Bi	Sb	Fe	Co	Ag	Te	Zn	Cu	Ni	Au
Se	1													
As	-0.025	1												
S	-0.109	0.058	1											
Pb	-0.047	0.027	0.039	1										
Bi	-0.054	0.074	-.598**	-0.006	1									
Sb	-0.057	-0.022	0.059	0.108	0.034	1								
Fe	-0.103	0.058	.997**	0.034	-.585**	0.062	1							
Co	-0.006	0.002	.192*	0.028	-0.054	-0.017	.174*	1						
Ag	-0.028	0.023	-.619**	-0.059	.920**	0.037	-.605**	-0.067	1					
Te	0.102	-0.03	0.065	-0.099	-0.009	-0.017	0.061	0.07	-0.019	1				
Zn	0.131	-0.058	-.385**	-0.106	0.112	-0.135	-.388**	-0.056	0.054	0.001	1			
Cu	.158*	-0.099	-.770**	0.001	0.01	-0.099	-.780**	-.181*	-0.023	-0.073	.444**	1		
Ni	-0.064	-0.049	0.037	-0.003	0.082	.160*	0.034	.289**	0.093	-0.038	-.184*	-0.117	1	
Au	-0.031	0.024	-.620**	-0.058	.920**	0.031	-.606**	-0.068	.969**	-0.017	0.056	-0.022	0.092	1

## بحث و بررسی

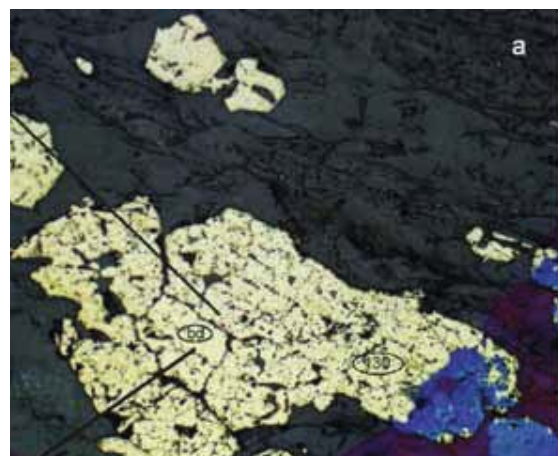
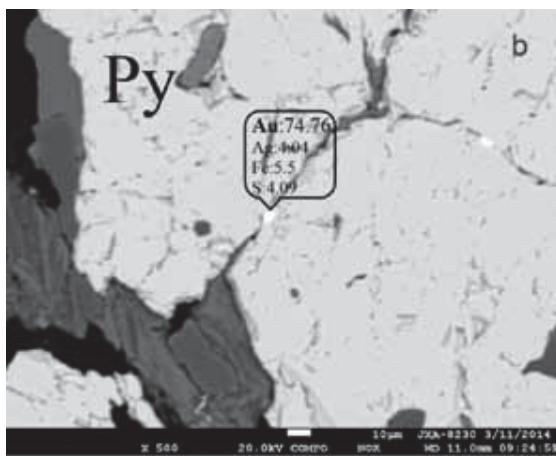
### توزیع طلا و عناصر فرعی در پیریت

در منطقه موته، پیریت کانی اصلی میزبان طلا می باشد. در طی مطالعات میکروسکوپی، طلای آزاد در نمونه‌ها مشاهده نشد، بنابراین طلا در پیریت‌های کانسار سنجد به صورت غیرقابل رویت می باشد. بر اساس مطالعات Cook and Chryssoulis (1990) طلای غیرقابل رویت شامل طلای درگیر در شبکه پیریت و ذرات و انکلوزیون‌های در اندازه نانومتر می باشد. هدف این پژوهش، آنالیز طلای غیرقابل رویت در پیریت و بررسی چگونگی حضور طلا در این کانی می باشد. همان گونه که گفته شد دو نسل پیریت در کانسار سنجد شناسایی شد. تفاوت‌هایی بین محتوای طلا و عناصر فرعی در این دو نسل پیریت وجود دارد به طوری که پیریت‌های کوبیک نسل دوم دارای میزان طلای پایین تری (bdl تا ۱۱۰ppm) می باشند و به نظر می رسد که پیریت‌های نسل دوم از تحرک دوباره پیریت‌های نسل اول به وجود آمده اند و ضمن این تحرک طلای آنها آزاد شده است. طلای موجود در پیریت، به ویژه پیریت نسل اول، بیشتر به صورت انکلوزیون‌های ریز بوده که بخشی از آنها ضمن فرآیندهای دگرشکلی آزاد شده است (شکل ۴). بر اساس نتایج آنالیز مایکروپروب، تمرکز و میزان طلا در پیریت نسل اول بیشتر

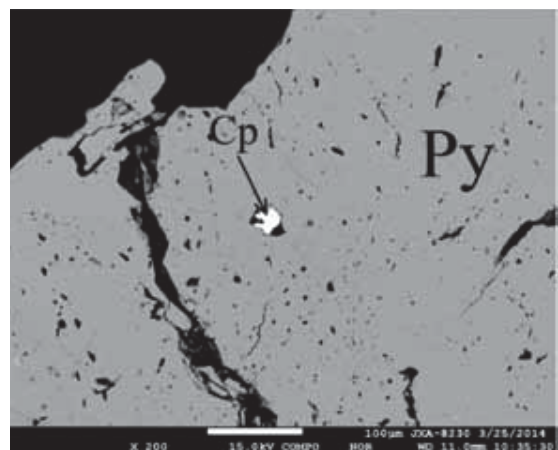
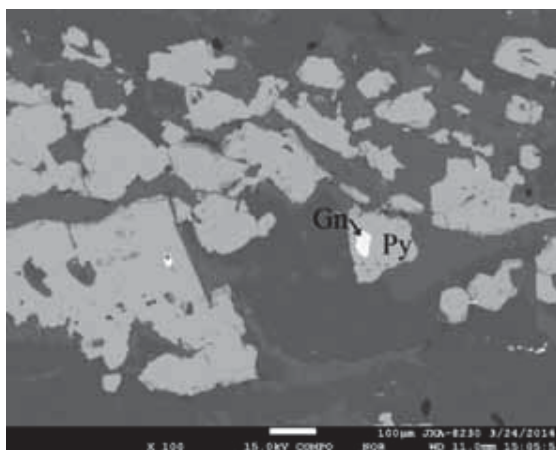
از پیریت نسل دوم می باشد (جدول‌های ۱ و ۲)، به طوری که میزان طلا در پیریت‌های نسل اول تا ۸۱۰ppm می رسد اما در پیریت‌های نسل دوم در حد زیر تشخیص دستگاه تا حداکثر ۱۱۰ppm می رسد. به طور کلی پیریت‌های دارای شکستگی، دارای محتوای بیشتری از طلا می باشند، همچنین در یک بلور نقاط دارای شکستگی دارای محتوای طلای بیشتری هستند. برای مثال، در یک بلور یک نقطه در محدوده بدون شکستگی و نقطه‌ای دیگر در مجاورت شکستگی‌های موجود انتخاب شد. محدوده دارای شکستگی و سطح ناصاف، دارای طلای بیشتری (۱۳۰ppm) نسبت به نقطه دیگر (زیر حد تشخیص دستگاه) می باشد (شکل ۴a). این پدیده در کانسارهای طلای کوهزایی معمول است و به وسیله Cook et al. (2009) و Large et al. (2009) گزارش شده است. با توجه به این که پیریت‌های دارای شکستگی حاوی محتوای بالاتر طلا نسبت به پیریت‌های دارای سطح صاف و بدون شکستگی می باشند (Nourian Ramsheh et al., 2014)، به نظر می رسد که تمرکز بالاتر طلا در این پیریت‌ها (پیریت‌های نسل اول)، به علت تجمع ذرات بسیار ریز طلا بوده که در ریزشکستگی‌های پیریت جمع شده اند. با توجه به اینکه تصاویر مربوط به نقشه پراکندگی طلا در سطح پیریت هیچ گونه

et al., 2009). بر اساس نتایج آنالیز EPMA، طلا با Ag و Bi همبستگی مثبت و قوی نشان می‌دهد (جدول ۳). همراهی طلا با کالکوژنیدهای Bi و Pb در کانسارهای طلا معمول است (Ciobanu et al., 2005). همبستگی قوی طلا با نقره ( $r=0.96$ ) نیز نشان‌دهنده حضور نقره در کانه‌های طلا دار می‌باشد. همچنین به عقیده (Cook et al., 2013)، این همبستگی نشان‌دهنده تحرک این عناصر همراه طلا می‌باشد.

زون‌بندی را نشان نداده (شکل ۶) و تنها تصاویر BSE ذرات بسیار ریزی (در حد میکرومتر) از طلا را در بین پیریت نشان داده است (شکل ۶b) احتمالاً عمده طلای موجود در پیریت به صورت انکلوژیون‌های بسیار ریز و نه به صورت درگیر در شبکه پیریت می‌باشند. باین‌حال نمی‌توان امکان حضور طلای درگیر در شبکه پیریت را نادیده گرفت چرا که حضور عناصری چون As, Te, Sb باعث کج شدگی شبکه پیریت شده و به طلا اجازه ورود به شبکه پیریت را می‌دهد (Cook



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی (a) و (b) از یک بلور پیریت دگرشکل شده نسل اول. (a) نقاط مختلف جهت آنالیز EPMA انتخاب شد. همان‌گونه که دیده می‌شود نقاطی که در بخش‌های بدون شکستگی هستند میزان طلای آن‌ها زیر حد تشخیص دستگاه (bdl) می‌باشد (مقادیر بر اساس ppm می‌باشد). (b) ذرات ریز طلا (نقاط روشن) در شکستگی‌های پیریت دیده می‌شود. یکی از ذرات طلا به وسیله EPMA آنالیز شد که نتیجه در تصویر دیده می‌شود (مقادیر بر اساس درصد می‌باشد)



شکل ۵. تصاویر BSE از انکلوژیون‌های کالکوپیریت (سمت راست) و گالن (سمت چپ) در پیریت



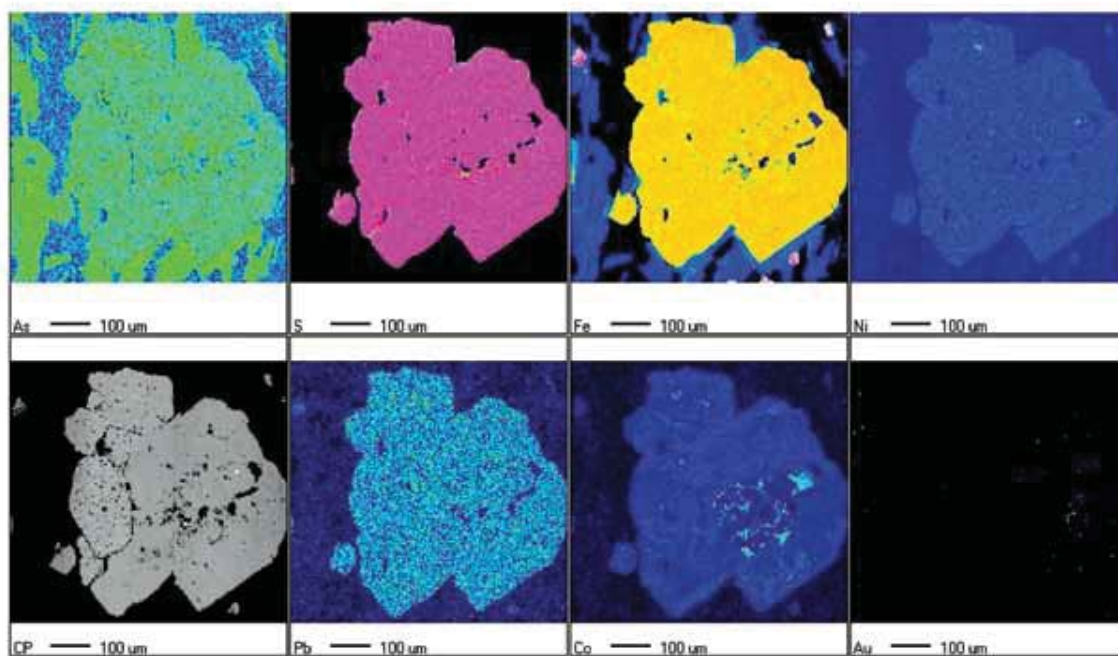
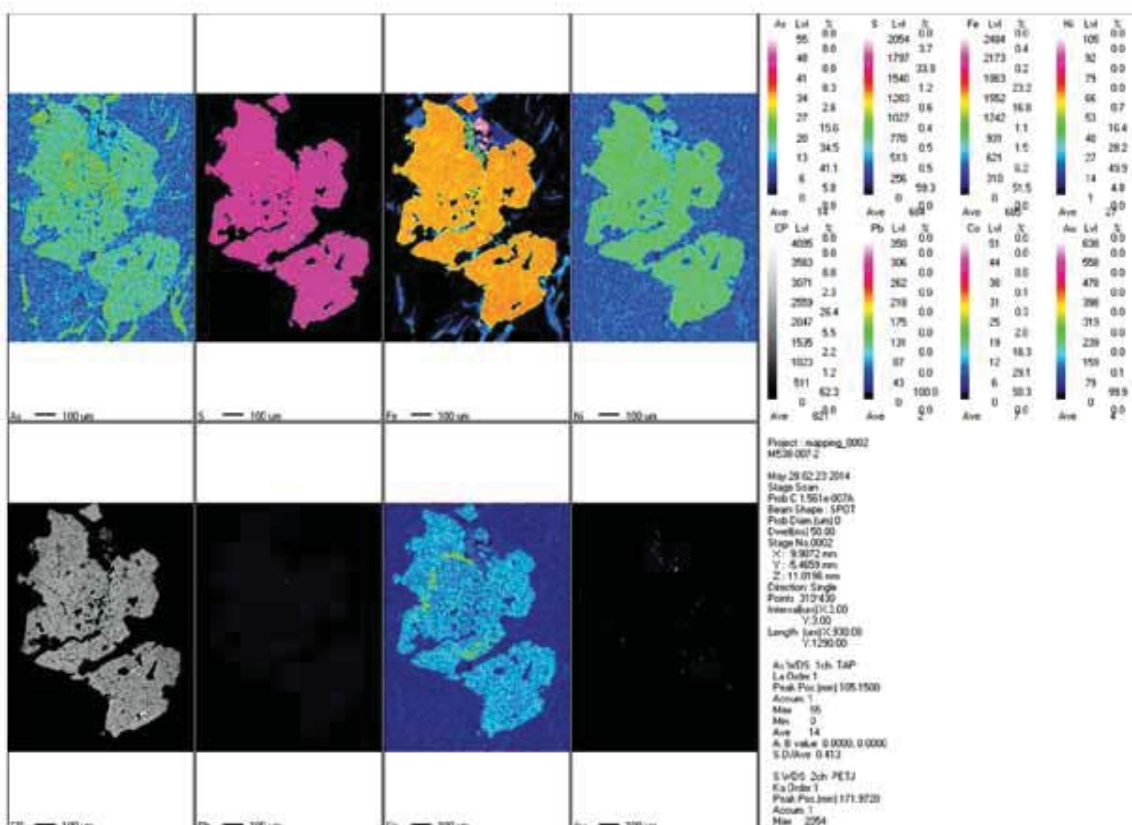
Co باشد. بنابراین میزان بالای Co در پیریت‌های منطقه نشانه خوبی از حضور سنگ‌های مافیک-الترامافیک نسبت به فلسیک‌ها به‌عنوان منبع سیال در محدوده مورد مطالعه می‌باشد و می‌توان گفت میزان بالای Co در پیریت نشان‌دهنده وجود یک منبع مافیک-الترامافیک در تشکیل سیالات کانه‌دار می‌باشد. بنابراین محتوای Co در پیریت نشان‌دهنده منشا مافیک-الترامافیک پیریت و سیال کانه ساز بوده و برخلاف مدل مرتبط با توده‌های گرانیتوئیدی سیال کانه‌دار که به‌وسیله برخی از محققین ارائه شد، گواهی بر منشا طلای کوهزایی است.

### نتیجه‌گیری

براساس مطالعات میکروسکوپی و نتایج EPMA، دو نسل پیریت در منطقه سنجده شناسایی شد. به‌طور کلی هر دو نسل پیریت فقیر از As هستند ولی تفاوت‌هایی در مقادیر طلا و عناصر فرعی دو گروه وجود دارد. پیریت‌های کوبیک نسل دوم دارای میران پایین‌تر طلا می‌باشند و به نظر می‌رسد که حاصل تحرک دوباره پیریت‌های نسل اول هستند که ضمن تحرک آنها، طلا نیز آزاد شده است. طلا در کانسار سنجده به‌صورت غیرقابل رویت در کانی پیریت می‌باشد که بیشتر به‌صورت انکلوزیون‌های ریز دیده شده و ضمن فرآیندهایی چون دگرشکلی در ریزشکستگی‌های پیریت تجمع پیدا کرده است. براساس نقشه پراکندگی عناصر، پیریت دارای تمرکز بالایی از Co است و شاهد مهمی برای ژنز طلا در سنجده می‌باشد به‌طوری‌که نشان‌دهنده سیالات طلا‌دار با منشا مافیک-الترامافیک بوده و دلیلی برای رد کردن نظریه ژنز مرتبط با توده‌های گرانیتی و تقویت نظریه طلای کوهزایی در ارتباط با کانسارهای این منطقه است.

بر اساس تصاویر BSE، طلا به‌صورت ذرات بسیار ریزی در ریزشکستگی‌های پیریت‌های نسل اول مشاهده شد (شکل ۴b)، که نشان‌دهنده تاثیر دگرشکلی در کانه زایی در منطقه می‌باشد. دگرشکلی باعث آزاد شدن طلا از شبکه پیریت و تجمع آن در ریزشکستگی‌ها شده‌است. همچنین در برخی از بلورهای پیریت انکلوزیون‌هایی از کانی‌های گالن و کالکوپیریت مشاهده گردیده است (شکل ۵). Pb به علت اندازه یونی نزدیک به Fe، می‌تواند به شبکه پیریت وارد شود، اما به علت سرعت ته‌نشینی سریع‌تر از یک سیال آبگین به‌عنوان سولفید فلزی در مقایسه با آهن، گالن سریع‌تر از پیریت تشکیل شده و بنابراین انکلوزیون‌های گالن در پیریت معمول هستند (Morse and Luther, 1999; Koglin et al., 2010). مشابه آن، تمرکزهای بالای مس می‌باشد که باعث تشکیل کالکوپیریت به‌صورت انکلوزیون در پیریت می‌شود.

نقشه پراکندگی عناصر (تهیه شده به‌وسیله الکترون مایکروپروب)، به‌جز Co، در مورد بقیه عناصر فرعی زون‌بندی خاصی را نشان نمی‌دهد (شکل ۶). این زون‌بندی نشانگر حضور عنصر Co در شبکه کریستالی پیریت می‌باشد (البته به علت تحمل فرآیند دگرشکلی، این زون‌بندی نظم اولیه خود را از دست داده‌است). بنابراین الگوی پراکندگی Co در پیریت ممکن است اطلاعاتی در مورد سیال ته‌نشست دهنده پیریت و شیمی سیال در اختیار قرار دهد (Zhao et al., 2011). سنگ‌های الترامافیک و به میزان کمتر سنگ‌های مافیک، به‌طور معمول غنی از کبالت هستند و در مقابل، سنگ‌های فلسیک معمولاً حاوی میزان پایین Co هستند. سنگ‌های شدیداً تفریق یافته ماگمایی مانند گرانیت‌ها از فلزات ناسازگار غنی هستند، بنابراین انتظار می‌رود پیریت نهشته‌های طلای مرتبط با گرانیت، دارای میزان ناچیزی



شکل ۶. نقشه پراکندگی عناصر در دو نمونه از پیریت‌های کانسار سنجده

- Koglin, N., Frimmel, H.E., Minter, W.E.L. and Brätz, H., 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoproterozoic to Palaeoproterozoic placer deposits. *Mineralium Deposita*, 45, 259-280.

- Kouhestani, H., Rashidnejad-Omran, N., Rastad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R.J., and Ghaderi, M., 2014. Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91, 89-106.

- Large, R.R., Danyushevsky, L., Hollit, C., Maslennikov, V., Meffre, S., Gilbert, S., Bull, S., Scott, R., Emsbo, P., Thomas, H., Singh, B. and Foster, J., 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in Orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*, 104, 635-668.

- Masoudy, F., 1997. Contact Metamorphism and Pegmatite Development in the Region SW of Arak, Iran, Ph.D. thesis, University of Leeds, UK.

- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahanadi, M. R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 397-412.

- Moritz, R., Ghazban, F. and Singer, B.S., 2006. Eocene gold ore formation at Muteh, Sanandaj-Sirjan tectonic zone, Western Iran: a result of late-stage extension and exhumation of metamorphic basement rocks within the Zagros Orogen. *Economic Geology*, 101, 1497-1524.

- Morse, J.W. and Luther, G.W., 1999. Chemical influences on trace metal-sulphide interactions in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 3373-3378.

- Nourian Ramsheh, Z., Mao, J., Yazdi,

## منابع

- حسینی، ح.، مجمل، م.، ۱۳۷۸. تحلیل ساختاری و مدل تکتونیکی معدن طلای موته و ارتباط کانی سازی با آن. هجدهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی

- رشید نژاد عمران، ن.، ۱۳۸۱. پترولوژی و ژئوشیمی سنگ های متاولکانو-سدیمنتی و پلوتونیک منطقه موته (جنوب دلیجان) با نگرشی بر خاستگاه و کانی سازی طلا. رساله دکتری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، ۴۰۴.

- صدیق، م.، ۱۳۷۸. تحلیل ساختاری سنگ های دگرگونه در ناحیه موته، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، ۹۳.

- کوهستانی، ح.، ۱۳۸۳. زمین شناسی، کانی شناسی و فابریک کانه زایی طلا در پهنه های برشی ناحیه چاه باغ در منطقه موته (جنوب غرب دلیجان، استان اصفهان). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۲۸.

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, 229, 211-238.

- Ciobanu, C.L., Cook, N.J., and Pring, A., 2005. Bismuth tellurides as gold scavengers. *Mineralium Deposita*, 13, 1383-1386.

- Cook, N.J., and Chryssoulis, S.L., 1990. Concentrations of "invisible gold" in the common sulphides. *Canadian Mineralogist*, 28, 1-16.

- Cook, N.J., Ciobanu, C.L. and Mao, J.W., 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton, (Hebei Province, China). *Chemical Geology*, 264, 101-121.

- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Meria, D., Silcock, D. and Wade, B., 2013. Arsenopyrite-pyrite association in an orogenic gold ore: Tracing mineralization history from textures and trace elements. *Economic Geology*, 108, 1273-1283.

- M., Xiang, J., Rasa I. and Masoudi, F. 2014. Gold distribution in pyrite of the Senjedeh Gold Deposit, Muteh Mining District, NW of Iran. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88, 829-830.
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran. A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106, 380-398.
  - Paidar-Saravi, H., 1989. Petrographisch-lagerstättenkundliche Untersuchungen an goldführenden Gesteinen im Muteh Gebiet im Westen vom Zentral Iran. Ruprecht-Karts Heidelberg University, 174.
  - Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Resource*, 39, 85- 106.
  - Thiele, O., Alavi, M., Assefi, R., Hushmandzadeh, A., Seyed Emami, K., and Zahedi, M. 1968. Exploration text of the Golpaygan quadrangle map scale 1:250,000. Geological Survey of Iran. E7, 24.
  - Zhao, H.X., Frimmel, H.E., Jiang, S.Y., and Dai, B.Z., 2011. LA -ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Xiaoqinling gold district, China: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 43, 142-153.