

## تحول سیال‌های کانسار ساز و ژنز کانسار آهن نوکه شمال سمنان: بر پایه شواهد میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار (S, C, O)

سمیه اسماعیل‌نژاد<sup>۱</sup>، نادر تقی‌پور<sup>۲</sup> و علی‌اکبر حسن‌نژاد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۸

### چکیده

کانسار آهن نوکه در شمال سمنان و در جنوب پهنه ساختمانی البرز مرکزی قرار گرفته است. سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری با سن ائوسن سنگ میزبان این کانسار هستند. کانی‌زایی آهن به صورت توده‌ای، افشان، رگه‌ای و برشی در کانسار نوکه رخ داده است و مگنتیت، همایت، پیریت، کالکوپیریت، گارنت، اپیدوت، کوارتز و کلسیت از کانی‌های اصلی این کانسار هستند. از میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد، کربن و اکسیژن برای تعیین شرایط تحول سیال‌های گرمایی و ژنز کانسار آهن نوکه، استفاده شده است. بر پایه تعداد فاز، هفت نوع میانبار سیال در کانی‌کوارتز شامل تک‌فازی مایع (L)، دوفازی غنی از مایع (L+V)، دوفازی غنی از گاز (V+L)، تک‌فازی گاز (V)، سه‌فازی مایع-گاز-هالیت (L+V+S)، دوفازی مایع-هالیت (L+S) و سه‌فازی مایع-گاز-کبر (L+V+O) تشخیص داده شد. بیشترین محدوده دمای همگن‌شدگی پایانی و شوری میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع در کانی‌کوارتز به ترتیب ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام است. در حالی که محدوده دمای همگن‌شدگی پایانی و شوری میانبارهای سیال دوفازی غنی از گاز به ترتیب ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و معادل ۱۰ تا ۳۰ درصد وزنی معادل نمک طعام است. همچنین دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع در کلسیت‌های پهنه گارنت (نوع B) و کلسیت‌های پهنه مگنتیت (نوع b) شامل ۷۵ تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد است؛ اما شوری میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (wt. % NaCl ۱۵-۲۵) در کلسیت‌های پهنه گارنت بیشتر از شوری میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (wt. % NaCl ۱۰ تا ۲۰) در کلسیت‌های پهنه مگنتیت است. مقادیر  $\delta^{13}C$  و  $\delta^{18}O$  کانی‌کلسیت (۱۵ نمونه) کانسار آهن نوکه به ترتیب از -۱/۹ تا +۰/۱% (PDB) و از -۱۹/۴ تا -۱۴/۹% (SMOW) در تغییر است. مقدار میانگین  $\delta^{18}O_{water}$  محلول گرمایی در کانسار آهن نوکه ۱۷/۵۸% نسبت به استاندارد SMOW است که با مقادیر آب ماگمایی اولیه متفاوت است. پیریت فاز اصلی سولفیدی موجود در کانسار آهن نوکه است و مقادیر  $\delta^{34}S$  این کانی (۹ نمونه) از ۳/۹ تا +۵/۴% (CDT) تغییر می‌کند که نشان‌دهنده سولفور یا منشأ ماگمایی است. داده‌های میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار کربن، اکسیژن و گوگرد گویای این است که سیال‌های کانسار ساز به وسیله آمیختگی شوره‌های ماگمایی با آب جوی گسترش یافته است و احتمالاً ژنز کانسار آهن نوکه مشابه کانسارهای نوع اسکارن است.

**کلیدواژه‌ها:** میانبارهای سیال، ایزوتوپ پایدار، کانسار آهن نوکه، سمنان.

**نویسنده مسئول:** نادر تقی‌پور

E-mail: taghipour@du.ac.ir

### ۱- پیش‌نویس

گوگرد، کربن و اکسیژن کانی‌های پیریت و کلسیت در کانسار آهن نوکه به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال گرمایی و تعیین ژنز کانسار آهن نوکه است.

### ۲- زمین‌شناسی منطقه

کانسار آهن نوکه از دید ساختمانی در جنوب پهنه ساختمانی البرز مرکزی جای دارد (شکل ۱ الف). از دید چینه‌شناسی، برونزدهای پالئوزوئیک در کوه چندران و نارکان که به ترتیب در حاشیه باختری و خاوری منطقه مورد بررسی، قرار گرفته‌اند شامل سنگ‌های آهکی، دولومیتی و شیلی است. برونزدهای ژوراسیک شامل ماسه‌سنگ و شیل است که روی سازندهای پالئوزوئیک قرار گرفته‌اند. پیکره‌های سنگی اصلی منطقه را سنگ‌های آذرین و رسوبی تشکیل می‌دهند که شامل رسوبات ماسه‌سنگی و کنگلومرای کرتاسه، سنگ‌های آتشفشانی، آتشفشانی رسوبی و نفوذی‌های سنوزوئیک هستند (شکل ۱ ب). برونزدهای کرتاسه بالایی در کوه نوکه، شامل ماسه‌سنگ، کنگلومرای سرخ‌رنگ، مارن و آهک است. ماسه‌سنگ‌های باد شده دانه‌درشت و سرخ‌رنگ هستند که درون آن به‌طور پراکنده فلوهای گرد شده آهک فسیل‌دار و چرت دیده می‌شود. سنگ‌های آهکی این منطقه نیز دارای آثار فسیل‌های دوکفه‌ای و گرکه‌های چرتی هستند. رسوبات ائوسن معادل سازند کرج شامل مارن دارای فسیل نومولیت، توف، کنگلومرا، ماسه‌سنگ، گدازه و سنگ‌های آذرآواری با ترکیب داسیت و آندزیت هستند. برونزدهای ائوسن الیگوسن شامل گچ و لایه‌هایی از مارن است. رسوبات نئوژن شامل مارن، مارن ماسه‌ای و کنگلومرا و رسوبات کوارتز شامل نهشته‌های رودخانه‌ای، نهشته‌های سیلابی با درخت‌ها و خاک و سنگ‌ریزه و لایه‌های رسی است.

کانسار آهن نوکه با ذخیره سه میلیون تن و عیار آهن ۵۵ درصد در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال سمنان و در عرض‌های جغرافیایی ۳۶° ۳۵' تا ۳۵° ۴۳' شمالی و طول‌های جغرافیایی ۲۰° ۵۳' تا ۳۰° ۵۳' خاوری جای دارد. در این منطقه چندین کانسار و اثر معدنی آهن، در محل تماس توده نفوذی گرانیتی با ترکیب حدواسط تا اسیدی در سری سنگ‌های آتشفشانی آذرآواری ائوسن تشکیل شده‌اند (غیاثوند و همکاران، ۱۳۸۸). این کانی‌زایی‌ها بیشتر ترکیب مگنتیتی دارند و از کانی‌های سولفیدی می‌توان به پیریت و کالکوپیریت اشاره کرد. از مطالعات پیشین انجام یافته در این منطقه می‌توان به بررسی سنگ‌شناسی (صمدی، ۱۳۷۷)، مطالعه بافت و ساخت ماده معدنی، مطالعه عناصر جزئی، بررسی انواع دگرسانی و تهیه نقشه زمین‌شناسی معدنی منطقه با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ (غیاثوند و همکاران، ۱۳۸۴)، سنگ‌شناسی و ژئوشیمی توده‌های نفوذی شمال شمال خاور سمنان (شاه‌حسینی و همکاران، ۱۳۸۶) و تجزیه مایکروپروپ کانی‌های سازنده اسکارن‌های کلسیک آهن‌دار شمال سمنان (شهری و همکاران، ۱۳۸۹) اشاره کرد.

وجود میانبارهای سیال پدیده‌ای رایج در بلورهاست (Bodnar, 2003). میانبارهای سیال، ابزار بسیار مناسبی برای شناخت شرایط فیزیکوشیمیایی سیال‌های گرمایی مسئول ایجاد و گسترش دگرسانی و فرایندهای کانی‌زایی هستند و به عبارتی، حجم‌های کوچکی از سیال تشکیل‌دهنده کانسار هستند که ضمن تبلور کانی‌ها با پس از تبلور در شکستگی‌های ریز با در سطوح رخ و فضاهای ناشی از نقص بلوری کانی میزبان، به دام افتاده‌اند (Shepherd et al., 1985) و از سوی دیگر پی بردن به ماهیت و تکامل فاز سیال برای ارائه مدل‌های تشکیل کانسار و اکتشاف آنها بسیار مهم است. هدف از این مطالعه، بررسی میانبارهای سیال و مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار

آن مربوط به مراحل پس از ایجاد گارنت و مگنتیت در کانسار آهن نوکه است (جدول ۱). کانی کوآرتز به صورت بلورهای شکل‌دار هگزاگونال و به صورت پرکننده فضای خالی (شکل ۲ خ) همراه با پهنه مگنتیت و همچنین به صورت رگه‌ای (شکل ۲ د) در این پهنه تشکیل شده است. پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در کانسار آهن نوکه است که همراه با کلسیت در پهنه مگنتیت دیده می‌شود (شکل ۲ ذ). این کانی به صورت افشان (شکل ۳ الف) و رگه‌ای (شکل ۳ ب) کانی مگنتیت را قطع کرده است (جدول ۱). کانی کالکوپیریت به صورت جزئی به همراه مگنتیت و پیریت حضور دارد و پیرامون آن به وسیله فرایندهای هوازدگی توسط کولیت جایگزین شده است (شکل ۳ ب). کانی همانیت به صورت ثانویه و در اثر هوازدگی کانی مگنتیت تشکیل شده است و به صورت جانشینی در پیرامون کانی مگنتیت دیده می‌شود (شکل ۳ ت).

#### ۴- مواد و روش‌ها

بلورهای هگزاگونال کوآرتز به صورت همراه با مگنتیت و کلسیت‌های همراه با گارنت (نوع a) و کلسیت‌های همراه با مگنتیت و پیریت (نوع b) برای مطالعه مینارهای سیال انتخاب شدند. برای مطالعه مینارهای سیال در این کانسار، ۳ نمونه مقطع نازک دو بر صیقل از کوآرتز و ۳ نمونه مقطع نازک دو بر صیقل از کلسیت تهیه و مطالعه شد. مقاطع آماده شده برای بررسی نوع مینارهای سیال از نقطه نظر رابطه زایشی با یکدیگر، شکل و ابعاد توسط میکروسکوپ پلاریزان الیوس به دقت مطالعه شده‌اند. پس از این بررسی‌ها، مطالعات ریزدماسنجی توسط سیستم Linkam مدل THMSG600 در دانشگاه دامغان و از راه آزمایش‌های گرمایش (Heating) و سرمایش (Freezing) روی نمونه‌ها انجام شد. برای استانداردسازی دستگاه از تتراکلرید کربن و آب مغفط برای سرمایش و نترات سدیم، اسید نیتروسیک و کلرید سرب برای گرمایش استفاده شد. بر این اساس دقت اندازه‌گیری‌ها برای دماهای همگن شدگی  $\pm 4$  (Th) درجه سانتی‌گراد و برای دماهای ذوب شدن  $\pm 1/5$  (Tm) درجه سانتی‌گراد است. دامنه دمایی دستگاه ۱۹۶ تا  $+600$  درجه سانتی‌گراد و مجهز به دو کنترل گر گرمایش و سرمایش، مخزن ازل (برای پمپ نیتروژن برای انجماد) و مخزن آب (برای خنک کردن دستگاه در دمای بالا) است. مینارهای سیال تا حدود  $100$  درجه سانتی‌گراد سرد و پس از انجماد کامل، گرم شده‌اند و برای تعیین درجه شوری از دمای ذوب آخرین قطعه یخ (Tm) استفاده شده است. برای تعیین شوری از معادله ۱ استفاده شد (Bodnar and Vityk, 1994). در این معادله  $\theta$  برابر با دمای Tm است.

$$\text{Salinity (Wt. \% NaCl)} = 0.00 + 1.78 \theta - 0.0442 \theta^2 + 0.000557 \theta^3 \quad (1)$$

به منظور بررسی ترکیب ایزوتوپی کربن و اکسیژن در کانسار آهن شمال سمنان، ۱۵ نمونه کلسیت و ۹ نمونه کانی پیریت از کانسار نوکه انتخاب شد. سپس به منظور آماده‌سازی، نمونه‌ها خرد و پس از جداسازی از سنگ‌های همراه با استفاده از روش جدایش دستی (hand picking) و میکروسکوپ دوچشمی، از هر نمونه در حد ۲ گرم با خلوص بالا تهیه و پس از جداسازی توسط هاون آگاتی بودر و برای تجزیه ایزوتوپی به آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه آریزونای آمریکا فرستاده شد. مقادیر  $\delta^{13}\text{C}$  و  $\delta^{18}\text{O}$  کانی کلسیت نسبت به استاندارد PDB و مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  این نمونه‌ها نسبت به استاندارد تروپلیت کانیون دیابلو (CDT) اندازه‌گیری شده است و خطای تجزیه در حد  $0.06\%$  برای  $\delta^{13}\text{C}$  و  $0.1\%$  برای  $\delta^{18}\text{O}$  و  $0.06\%$  برای  $\delta^{34}\text{S}$  است.

#### ۵- سنگ‌نگاری مینارهای سیال

یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعه مینارهای سیال، مطالعه سنگ‌نگاری است. مینارهای سیال در بلورهای کوآرتز در اندازه‌های چند میکرونی تا چند صد میکرونی (مینارهای ثانویه) دیده می‌شوند. از دید شکل ظاهری، مینارهای سیال در نمونه‌های کوآرتز به اشکال نامنظم، گرد، نیمه‌گرد، کشیده، شکل منفی بلور (Negative crystal) دیده می‌شوند (شکل ۴ الف). در برخی از مینارهای سیال

سنگ‌های آتشفشانی بخشی از کمر بند آتشفشانی اتوسن البرز است که به صورت گدازه و آذرآواری گسترش یافته‌اند این سنگ‌ها بیشتر دارای ترکیب بازالتی، آندزیتی و تراکی آندزیتی هستند و با سنگ‌های آذرآواری با ترکیب بازیک، حدواسط و اسیدی به صورت متناوب دیده می‌شوند (شاه‌حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). قطعاتی از این سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با ابعاد و اندازه‌های متفاوت به صورت بیگانه‌سنگ در توده گرانودیوریتی شمال نوکه یافت می‌شوند (شاه‌حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). توده‌های نفوذی اسیدی نیز با ترکیب آلکالی‌فلدسپار گرانیت، مونزوگرنایت و گرانودیوریت به صورت استوکه در پیرامون روستای نوکه در شمال خاور سمنان دیده می‌شوند (شاه‌حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). گرانودیوریت‌ها گسترش بیشتری نسبت به انواع دیگر دارند و حجم اصلی توده نفوذی را به خود اختصاص می‌دهند (شاه‌حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). در منطقه نوکه ترکیب توده‌های نفوذی بیشتر گرانودیوریتی تا آلکالی‌فلدسپار گرانیتی است (شاه‌حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). در شمال‌خاوری سمنان (کوه نوکه)، توده گرانیتی در سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی اتوسن (سنگ میزبان کانسار) نفوذ کرده و سبب دگرگونی آنها شده است؛ به گونه‌ای که در محل تماس توده با سنگ‌های آتشفشانی آذرآواری نوعی دگرگونی مجاورتی همراه با تبادل سیال و عناصر کانه‌ساز و سازنده سیلیکات‌های کلسیم‌دار صورت گرفته است (شاه‌حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). سنگ‌های آتشفشانی از نوع سدبک تا پتاسیک و متآلوئین تا پرآلوئین هستند. سنگ‌های نفوذی نیز آلکالی پتاسیک تا سدبک و متآلوئین هستند. به طور کلی سنگ‌های نفوذی ویژگی‌های گرانیت‌های نوع I را نشان می‌دهند (غیاثوند و همکاران، ۱۳۸۸). گسل‌های سمنان، درجزین، عطاری و دیکناش در منطقه تأثیر داشته‌اند که از این میان نقش گسل‌های سمنان و درجزین بسیار بیشتر است. گسل‌های فرعی که بیشتر در ارتباط با گسل سمنان هستند، اهمیت زیادی در کنترل کانه‌زایی در منطقه دارند. به احتمال زیاد این گسل‌ها نقش بنیادین در تشکیل و جایگزینی سنگ‌های آذرین و همچنین کانسارسازی آهن در منطقه داشته‌اند (غیاثوند و همکاران، ۱۳۸۴).

#### ۳- کانی‌زایی در کانسار آهن نوکه

کانی‌شناسی اهمیت به سزایی در شناخت ارتباط ماده معدنی با سنگ دربرگیرنده آن دارد. کانی‌های حاصل از فرایند متاسوماتیسم در کانسار آهن نوکه را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: (۱) کانی‌های غیر فلزی شامل گارنت، اپیدوت، کلریت، کلسیت و کوآرتز؛ (۲) کانی‌های فلزی شامل مگنتیت، همانیت، پیریت و کالکوپیریت. کانی‌های فرعی در این کانسار شامل بیوتیت، آمفیبول، اسفن و آپاتیت است. مگنتیت کانه اصلی کانسار آهن نوکه است و با سه بافت رگه‌ای، توده‌ای، پراکنده و برشی در منطقه دیده شد (شکل ۲ الف، ب، پ و ت). کانه‌زایی مگنتیت در مرز تماس توده نفوذی گرانودیوریتی با سنگ میزبان آندزیت پورفیری صورت گرفته است (شکل ۲ ب). مگنتیت به همراه همانیت، پیریت، کوآرتز و کلسیت یافت می‌شود. ماده معدنی در منطقه به صورت توده‌ای، پراکنده و رگه‌ای دیده می‌شود که حالت رگه‌ای در شکل ۲ ب نشان داده شده است. در برخی بخش‌ها، کلسیت و کوآرتز به صورت پرکننده درز و شکاف‌ها و فضاها خالی دیده می‌شوند که همراهی این دو کانی نسبت به سنگ در برگیرنده در رگه‌های کوآرتز کرنات مربوط به یک فاز تأخیری است. گارنت نوع آندزادیت (شهری و همکاران، ۱۳۸۹) از فراوان‌ترین کانی‌های موجود در این کانسار است که در نمونه دستی به رنگ سرخ فله‌های تا خرمایی دیده می‌شوند (شکل ۲ ث) و دارای بافت متراکم هستند. اپیدوت در نمونه دستی و به همراه گارنت‌ها به رنگ سبز روشن دیده می‌شود (شکل ۲ ج). وجود اپیدوت نشان‌دهنده تأثیر محلول‌های آهن‌دار است (Shimazaki, 1980). کانی کلسیت به صورت بلورهای درشت و به نسبت شفاف همراه با پهنه گارنت (شکل ۲ چ) و پهنه مگنتیت (شکل ۲ ح) در کانسار آهن نوکه تشکیل شده‌اند. حضور این کانی در پهنه گارنت و مگنتیت به صورت قطع کننده بوده و تشکیل

#### ۶-۲. میانبرهای سیال دوفازی غنی از گاز کانی کوارتز

۳۰ میانبر سیال دوفازی غنی از گاز در اندازه‌های متفاوت مطالعه شد. داده‌های مربوط به دمای همگن‌شدگی پایانی و شوری میانبرهای سیال دوفازی غنی از گاز در شکل ۷ نشان داده شده است. میانبرهای سیال این گروه، در بازه ۳۵۰ تا ۵۰۰ دارای بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی پایانی هستند (شکل ۷ الف). این میانبرهای سیال نسبت به میانبرهای دوفازی غنی از مایع، در دمای بیشتری نیز همگن می‌شوند. کمترین و بیشترین دمای همگن‌شدگی میانبرهای سیال این گروه، محدوده دمایی را نشان می‌دهد که در آن جوشش رخ می‌دهد. در هنگام جوشش، در اثر کاهش ناگهانی دما و فشار سیال‌های گرمایی، پایداری کپلیکس‌های حامل فلزات کمتر می‌شود و ته‌نشست ناگهانی کانه‌ها در بک مقیاس کوچک رخ می‌دهد (Bodnar and Beane, 1980). بیشترین فراوانی شوری در میان میانبرهای سیال غنی از گاز متعلق به گستره معادل ۱۰ تا ۳۰ wt. % NaCl است (شکل ۷ ب). این میانبرهای سیال به حالت گاز همگن می‌شوند.

مقایسه دمای همگن‌شدگی و شوری میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع و دوفازی غنی از گاز کوارتز (شکل‌های ۶ و ۷) نشان‌دهنده روند افزایش شوری در میانبرهای سیال غنی از گاز نسبت به غنی از مایع است. دمای همگن‌شدگی می‌تواند برآوردی از دمای سیال در هنگام به دام افتادن در کانی میزبان باشد و دامنه دمایی مربوط به فعالیت فازهای گرمایی و دمای تشکیل کانسار را نشان دهد (Cunningham, 1978). دمای همگن‌شدگی از میانبرهای غنی از مایع به سوی میانبرهای غنی از گاز روند افزایشی نشان می‌دهد. معمولاً همبستگی زمانی و مکانی میانبرهای سیال دوفازی غنی از گاز، دوفازی غنی از سیال و انواع حالت‌دار در کنار هم نشان‌دهنده فرایند جوشش ثانویه است.

#### ۶-۳. میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع کانی کلسیت

۱۰۷ میانبر سیال دوفازی غنی از مایع در اندازه‌های متفاوت در کلسیت‌های بهینه گارنت (نوع a) و کلسیت‌های بهینه مگنتیت (نوع b) مطالعه شد. دمای همگن‌شدگی میانبرهای سیال این دو نوع کلسیت تفاوت زیادی با هم ندارند و در بازه ۷۵ تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند (شکل ۸ الف)، اما میزان شوری میانبرهای سیال در این دو نوع کلسیت با هم متفاوت است. به گونه‌ای که شوری میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع در کلسیت‌های نوع a ۱۵ تا ۲۵ درصد وزنی معادل نمک طعام هستند؛ در حالی که شوری این میانبرهای سیال در کلسیت‌های نوع b کمتر بوده و از ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است (شکل ۸ ب). مقایسه شوری میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع در کلسیت‌های نوع a با کلسیت‌های نوع b و شکل ۸ ب گویای روند کاهش شوری در میانبرهای سیال کلسیت‌های نوع a نسبت به میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع در کلسیت‌های نوع b است؛ که نشان می‌دهد محلول‌های گرمایی با آب جوی آمیختگی داشته‌اند که سبب افت شوری بدون کاهش چشمگیر دما شده است (Wilkinson, 2001).

#### ۷- تحول محلول گرمایی تشکیل‌دهنده کانسار نوک

جوشش و آمیختگی سیال‌های گرمایی، دو عامل مهمی هستند که معمولاً شرایط لازم برای ته‌نشست کانسارها را فراهم می‌آورند و سبب فوق اشباع شدن سریع سیال گرمایی در محدوده سنگ‌ها و ته‌نشست کانسار می‌شوند (Wilkinson, 2001). با توجه به شکل ۹ الف، روندهای فیزیکی اصلی برای نهشت کانسار آهن نوک، نشانه جوشش و آمیختگی سیال‌های داغ و شور با سیال‌های سردتر و کم‌شورتر و همچنین آمیخته شدن ایزوترمال سیال با سیالی است که شوری متفاوتی دارد. به نظر می‌رسد که سیالی با شوری پایین‌تر به‌طور متناوب و در طی دوره‌های کوتاه‌مدت به درون سامانه تزریق و با سیال با شوری بالا مخلوط شده است. به باور Hedenquist and Henley (1985) همراهی میانبرهای سیال با چگالی کم (Low density) و زیاد (High density)، (با دمای همگن‌شدگی تقریباً یکسان)، نشانه پدیده جوشش در سیستم‌های گرمایی هستند که این امر به روشنی در کلسیت‌های

پدیده باریک‌شدگی دیده می‌شود. از دید ژئوتیک در این بلورها، میانبرهای اولیه (P)، ثانویه (S) و شبه ثانویه (PS) تشخیص داده شدند (شکل ۴ ب). پراکندگی این میانبرها در سطح بلورهای کوارتز از نظم خاصی پیروی نمی‌کند، دارای امتداد خاصی نیستند و در جهت‌های مختلف در کانی کوارتز پراکنده هستند. این میانبرها در همه نمونه‌ها با اندازه‌های ۴۰ تا چند صد میکرونی دارای دوفاز ترکیبی مایع و گاز هستند و فازهای جامد در این میانبرها به تعداد خیلی کمی دیده شد. میانبرهای ثانویه که بیشتر در ترک‌ها و شکستگی‌های کوچک درون بلوری گسترش یافته‌اند، به‌صورت تک‌دریفی و چنددریفی در کنار هم مشخص هستند. میانبرهای شبه ثانویه نیز به‌صورت ردیف‌هایی در راستای بلوری و با فاصله‌ای معین از ترک‌ها مشخص می‌شوند. میانبرهای سیال سه‌فازی نیز در مقاطع کوارتز دیده شد؛ ولی به علت وجود شمار خیلی کمی از این میانبرهای سه‌فازی، مطالعات ریزدماسنجی روی این میانبرها انجام نپذیرفت.

بر پایه تعداد فاز، ۷ نوع میانبر سیال در کانی کوارتز تشخیص داده شد (شکل ۴). میانبرهای تک‌فازی مایع (L)، میانبرهای دوفازی غنی از مایع (L+V)، میانبرهای دوفازی غنی از گاز (V+L)، میانبرهای تک‌فازی گاز (V)، میانبرهای سه‌فازی مایع گاز (L+V+S)، میانبرهای دوفازی مایع حالت (L+S) و میانبرهای سه‌فازی مایع گاز کبدر (L+V+O).

شناسایی میانبرهای سیال اولیه در کلسیت در بیشتر موارد مشکل است؛ به‌طوری که Larson et al. (1973) اظهار داشتند ممکن است در اثر گرما میانبرهای سیال موجود در کانی‌های رخ‌پذیر مانند کلسیت منبسط شوند و از این رو نتایج نادرست به دست دهند. بازه اندازه میانبرهای اولیه در کانی کلسیت از چند میکرون تا ۱۰ تا ۲۰ میکرون دیده شده، اما بازه اندازه میانبرهای ثانویه گسترده است که حتی میانبرهای در اندازه‌های ۴۰ تا ۵۰ میکرون نیز دیده می‌شود. در شمار کمی از میانبرهای سیال کانی کلسیت، بلور نمک یا فاز جامد دیده شد. انواع اشکالی که در این میانبرها دیده شد شامل اشکال نیمه‌گرد، میله‌ای، مربعی و بی‌شکل بودند که فاز چیره در این میانبرها، دوفازی غنی از مایع است و حباب گاز کوچکی دارند (شکل ۵ الف). بر پایه تعداد فاز، پنج نوع میانبر سیال در کانی کلسیت تشخیص داده شد (شکل ۵) که شامل میانبرهای تک‌فازی مایع (شکل ۵ ب)، میانبرهای دوفازی غنی از مایع (شکل ۵ پ)، میانبرهای تک‌فازی گاز (شکل ۵ ت)، میانبرهای سه‌فازی مایع گاز حالت (شکل ۵ ث) و میانبرهای دوفازی غنی از گاز (شکل ۵ ج) هستند.

#### ۶-۳-۱. ریزدماسنجی میانبرهای سیال

روش ریزدماسنجی میانبرهای سیال بر پایه مشاهده دقیق و تشخیص تغییرات فازی درون میانبرهای سیال هنگام گرمایش و سرمایش است. با اندازه‌گیری دقیق دمایی که این تغییرات در آن رخ می‌دهد، می‌توان به وضعیت سیال‌ها در زمان به دام افتادن پی برد (Shepherd et al., 1985). دماسنجی روی میانبرهای سیال دو کانی کلسیت و کوارتز انجام شده است. انجام روش سرمایش، بهترین و متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری شوری میانبرهای سیال است، چون کاهش نقطه انجماد آب خالص به‌طور مستقیم متناسب با مقدار نمک موجود در محلول است (Shepherd et al., 1985).

#### ۶-۱-۱. میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع کانی کوارتز

۶۰ میانبر سیال دوفازی غنی از مایع در اندازه‌های مختلف از کانی کوارتز مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌های مربوط به دمای همگن‌شدگی پایانی و شوری میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع در شکل ۶ نشان داده شده است. در نمودار پراکندگی کمترین دمای تشکیل (شکل ۶ الف)، برای جداسازی نسل‌های سیال‌ها از دید دمای همگن‌شدگی (Th) در دو محدوده a و b قرار می‌گیرد. برای جمعیت‌های با دمای کمتر (a) بیشترین دامنه مربوط به بازه ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است و برای جمعیت‌های با دمای بیشتر (b) دامنه ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین فراوانی را دارد. بیشترین فراوانی شوری مربوط به دامنه ۱۰ تا ۲۰ wt. % NaCl است (شکل ۶ ب).

نیاز این کانسار از کربن با منشأ ماگمایی منشأ گرفته است (شکل ۱۰ ت).  
 با توجه به اینکه میانگین دمای تشکیل کلسیت‌ها در کانسار نوکه توسط مطالعه مینارهای سیال تعیین شده است (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) برای به دست آوردن  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$  محلول گرمایی از فرمول تفکیک ایزوتوپی  $10^3 \text{LnCalcite-Water} = 2.78(10^6/T) - 2.89$  ارائه شده توسط Friedman and O'Neil (1977) استفاده شده است (جدول ۲). مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$  موجود در محلول گرمایی مؤثر در تشکیل کانسار آهن نوکه از  $2/40\%$  تا  $7/03\%$  نسبت به استاندارد SMOW در تغییر هستند که این مقادیر با مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ارائه شده برای آب‌های ماگمایی اولیه (Taylor, 1974)  $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O} = +5.5\%$  to  $+9.0\%$  متفاوت و پایین‌تر از مقادیر معمول آب‌های ماگمایی است. از آنجا که آب ماگمایی احتمالاً به‌صورت سالم و دست نخورده در پوسته زمین موجود نیست، می‌توان گفت که ترکیب ایزوتوپی آن نه تنها در اثر تبادل با سنگ‌های پوسته‌ای در یک طیف دمایی گسترده تغییر می‌کند، بلکه ممکن است با آب‌هایی با منشأهای مختلف نیز مخلوط شود (Faure and Mensing, 2005). بدین ترتیب می‌توان مقادیر بالای  $\delta^{18}\text{O}$  کلسیت در این کانسار را به مخلوط شدن سیال‌های گرمایی تأخیری منشأ گرفته از توده‌های نفوذی در حال سرد شدن منطقه نوکه با سیال‌های در حال چرخش در توالی‌های سنگی فقیر از  $^{18}\text{O}$  و برقراری تبادل ایزوتوپی با آنها از  $^{18}\text{O}$  نسبت داد.

#### ۸-۲. ایزوتوپ گوگرد

مهم‌ترین منابع گوگرد در کانسارها شامل منابع ژرفایی، سنگ‌های قاره‌ای محلی، آب دریا یا تخریبی‌های دریایی هستند (Sharp, 2006). همچنین ۳ منبع مجزا از دید ایزوتوپی برای گوگرد وجود دارد که عبارتند از: (۱) گوگرد مشتق شده از گوشته با مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  حدود صفر در هزاره (۲) گوگرد آب دریا با مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$   $20\%$  (۳) گوگرد رسوبی خیلی احیا شده با مقادیر گسترده خیلی منفی از  $\delta^{34}\text{S}$  (Hoefs, 2009). تغییر در ترکیب ایزوتوپی گوگرد ناشی از دو فرایند است: (۱) کاهش‌دهی یون‌های سولفات به سولفید هیدروژن توسط باکتری‌های بی‌هوازی که این امر موجب غنی شدن سولفید هیدروژن از  $^{34}\text{S}$  می‌شود (کاهش‌دهی باکتریایی سولفات)؛ (۲) واکنش‌های تبادل ایزوتوپی مختلف میان یون‌ها، مولکول‌ها و جامدات گوگرددار که توسط آنها  $^{34}\text{S}$  در ترکیبات دارای بالاترین حالت اکسایش گوگرد یا بیشترین نیروی پیوندی متمرکز می‌شود (کاهش‌دهی ترموشیمیایی سولفات) (Hoefs, 2009). دو عامل مهم که باید در بررسی تغییرات دامنه مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  در نظر گرفته شوند؛ یکی تأثیر مقادیر ایزوتوپی گوگرد منبع و دیگری تأثیر فرایندهای ایجادکننده تفکیک ایزوتوپی هستند.

نتایج تجزیه مقادیر ایزوتوپ گوگرد روی ۹ نمونه از پیریت‌های کانسار آهن نوکه در جدول ۳ ارائه شده است. مطالعات انجام شده روی پیریت در این کانسار نشان می‌دهد که دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد در این کانسار محدود بوده و کمترین میزان  $\delta^{34}\text{S}$  برای این نمونه‌ها،  $3/9\%$  و بیشترین مقدار،  $5/4\%$  با مقدار میانگین  $4/7\%$  بر حسب استاندارد CDT است (جدول ۳). مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  سولفیدهای مشتق شده از گوشته به ترتیب از  $7\%$  تا  $7\%$  (Ohmoto, 1986) و  $3\%$  تا  $3\%$  (Hoefs, 2009) متغیر است.

مقدار  $\delta^{34}\text{S}$  کانی پیریت در کانسار آهن نوکه با محدوده مقادیر ایزوتوپ گوگرد ذکر شده برای سولفیدهای مشتق شده از گوشته توسط Ohmoto (1986) همخوانی دارد و نزدیک به مقادیر ذکر شده توسط Hoefs (2009) است. بنابراین می‌توان منشأ گوگرد کانسار آهن نوکه را به خاستگاه ماگمایی نسبت داد (شکل ۱۱).

#### ۹- نتیجه‌گیری

کانی‌زایی در کانسار آهن نوکه در اثر تزریق توده‌های نفوذی بیشتر گرانودیوریتی درون سنگ‌های آتشفشانی آذرآواری با سن ائوسن و به‌صورت توده‌ای، رگه‌ای، برشی و افشان تشکیل شده است. کانی‌شناسی چیره این کانسار شامل مگنتیت، کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت، گارنت، اپیدوت، کلسیت و کوارتز است.

نوع a و کلسیت‌های نوع b دیده می‌شود (شکل ۹ ب). حضور مینارهای سیال تکه‌فازی گاز و همچنین مینارهای سیال با شوری‌های متفاوت، از شواهد رخداد جوشش در سیال‌های گرمایی است (Drummond and Ohmoto, 1985). چگالی مینارهای سیال غنی از گاز در کانی کوارتز دامنه محدودی را در بر می‌گیرد که از  $0/6$  تا  $0/9$  گرم بر سانتی‌متر مکعب را پوشش می‌دهد. در حالی که چگالی مینارهای سیال دوفازی غنی از مایع در کانی کوارتز افزایش پیدا کرده و از  $0/6$  تا  $1/1$  گرم بر سانتی‌متر مکعب در تغییر است (شکل ۹ ت). چگالی مینارهای غنی از مایع در کلسیت‌های نوع a افزایش پیدا کرده است و بیشتر از  $1/1$  گرم بر سانتی‌متر مکعب را نشان می‌دهد؛ در حالی که چگالی محلول گرمایی در مینارهای سیال دوفازی غنی از مایع در کلسیت‌های نوع b در محدوده  $0/9$  تا  $1/1$  گرم بر سانتی‌متر مکعب جای دارد (شکل ۹ پ) که به دلیل کم بودن شوری این مینارهای سیال نسبت به مینارهای سیال موجود در کلسیت‌های نوع a است.

#### ۸-۱. ایزوتوپ‌های پایدار

##### ۸-۱-۱. ایزوتوپ کربن و اکسیژن

نتایج تجزیه ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن کلسیت‌های پهنه گارنت و پهنه مگنتیت در کانسار آهن نوکه در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر  $\delta^{13}\text{C}$  کانی کلسیت در کانسار آهن نوکه از  $1/9\%$  تا  $0/1\%$  نسبت به استاندارد PDB متغیر و میانگین داده‌های به دست آمده از این تجزیه  $1/033\%$  است. همچنین از این نمونه‌ها مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  نسبت به استاندارد PDB ارزیابی شده است که این مقادیر هم از  $19/4\%$  تا  $14/9\%$  متغیر و میانگین به دست آمده،  $17/8\%$  است (جدول ۱). البته برای استفاده از داده‌های  $\delta^{18}\text{O}$  نسبت به استاندارد SMOW، داده‌ها با استفاده از معادله  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} - 1.03091 \delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} + 30.01$  ارائه شده توسط Rollinson (1993) به این استاندارد تبدیل شدند که این اعداد دامنه مثنی را نشان می‌دهند و از  $10/91\%$  تا  $15/54\%$  و با میانگین  $12/54\%$  در تغییر هستند (جدول ۲).

شکل ۱۰ الف نشان‌دهنده محدوده مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن کربنات‌های با منشأ ماگمایی و همچنین فرایندهای تأثیرگذار بر  $\text{CO}_2$  و یون‌های کربنات در کانسار آهن نوکه است. مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{13}\text{C}$  و  $\delta^{18}\text{O}$  در کلسیت‌های کانسار آهن نوکه گویای تأثیرپذیری از شرایطی مانند آلودگی به وسیله رسوبات و یا دگرسانی دما بالا هستند که با توجه به دمای پایین تشکیل کلسیت‌ها در این کانسار (۷۵ تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد)، احتمالاً عامل اصلی مؤثر بر مقادیر ایزوتوپی این کلسیت‌ها آلودگی به وسیله رسوبات باشد. بر پایه مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن کلسیت‌های کانسار آهن نوکه می‌توان نتیجه گرفت که این کلسیت‌ها در نتیجه واکنش محلول‌های گرمایی با سنگ میزبان مناسب تشکیل شده‌اند (شکل ۱۰ ب).

در شکل ۱۰ پ، مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن کلسیت‌های کانسار آهن نوکه با مقادیر ایزوتوپی کلسیت‌ها و دولومیت‌های رسوبی و همچنین مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن کلسیت‌های موجود در کانسارهای اسکارن مقایسه شده است که نشان می‌دهد که مقادیر ایزوتوپی کانسار آهن نوکه تقریباً نزدیک به مقادیر این ایزوتوپ‌ها در کانسارهای اسکارن است.

مقادیر  $\delta^{13}\text{C}$  در کربنات‌ها با منشأ ماگمایی و گرمایی در محدوده  $3\%$  و  $8\%$  نسبت به استاندارد PDB هستند (Ohmoto, 1972). مقدار میانگین  $\delta^{13}\text{C}$  ترکیبات کربن‌دار در فرایندهای زیستی نیز حدود  $25\%$  است (Hoefs, 2009) و مقدار  $\delta^{13}\text{C}$  در آب دریاها و عهد حاضر صفر در هزار در نظر گرفته شده است (Ohmoto, 1972). مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{13}\text{C}$  کانسار آهن نوکه با مقادیر ایزوتوپ کربن کربنات‌های حاصل از فرایندهای زیستی هیچگونه همخوانی ندارد و از محدوده کربنات‌های دریایی نیز فاصله دارد (شکل ۱۰ پ). مقایسه مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن کانی کلسیت کانسار آهن نوکه با نمودار تغییرات  $\delta^{13}\text{C}$  نسبت به  $\delta^{18}\text{O}$  (Niiranen et al., 2005) گویای این است که بخش قابل توجهی از کربن مورد

مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$  در محلول گرمایی مؤثر در تشکیل کانسار آهن نوکه % ۲/۴۰ تا % ۷/۰۳ نسبت به استاندارد SMOW در تغییر هستند که این مقادیر با مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ارائه شده برای آب‌های ماگمایی اولیه متفاوت است و پایین‌تر از مقادیر معمول آب‌های ماگمایی است که احتمالاً به خاطر مخلوط شدن سیال‌های گرمایی تأخیری منشأ گرفته از توده‌های نفوذی در حال سرد شدن منطقه نوکه با سیال‌های در حال چرخش در توالی‌های سنگی ففیر از  $^{18}\text{O}$  و برقراری تبادل ایزوتوپی با آنهاست.

دامنه تغییرات  $\delta^{34}\text{S}$  پیریت محدود است و در محدوده % ۳/۹ تا % ۵/۴ نسبت به استاندارد CDT واقع شده و با محدوده مقادیر ایزوتوپ گوگرد ذکر شده برای سولفیدهای مشتق شده از گوشته همخوانی دارد که می‌توان منشأ گوگرد کانسار آهن نوکه را به خاستگاه ماگمایی نسبت داد.

داده‌های میانبرهای سیال و نتایج ایزوتوپ‌های پایدار کربن، اکسیژن و گوگرد گویای این است که سیال‌های کانسار ساز به وسیله آمیختگی شوراب‌های ماگمایی با آب جوی گسترش یافته‌اند و احتمالاً ژنز کانسار آهن نوکه مشابه کانسارهای نوع اسکاران است.

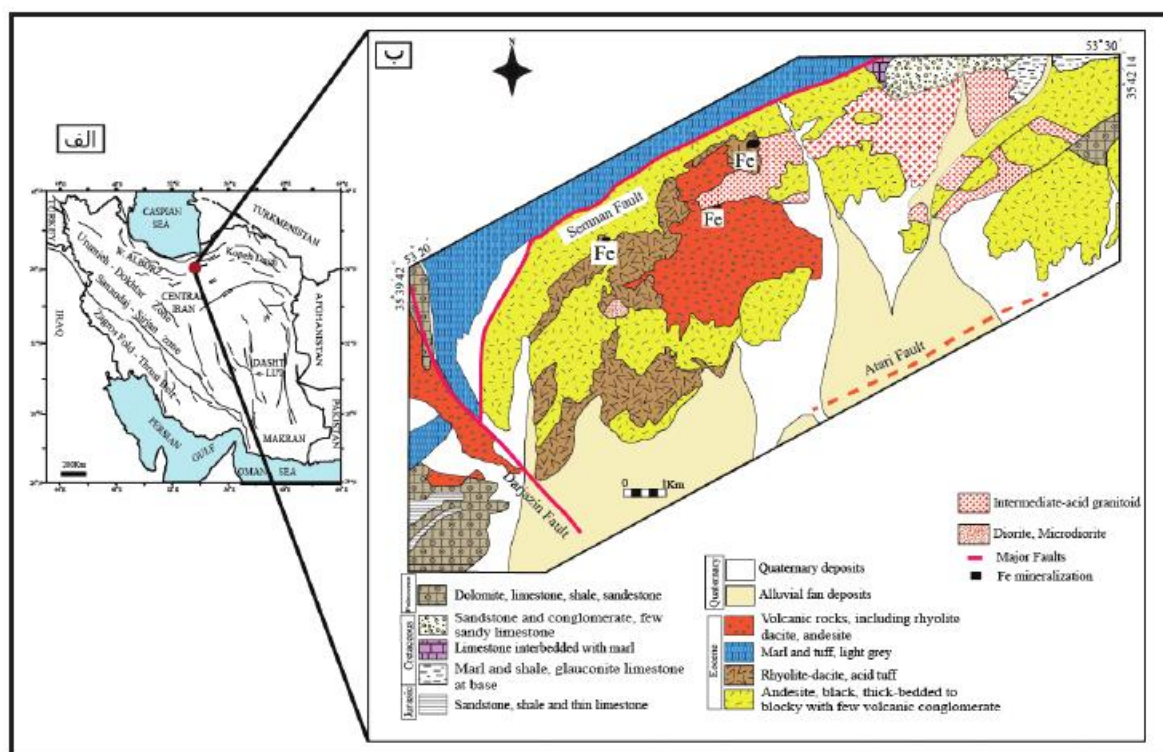
### سیاسگزاری

از کارشناسان معدن نوکه به‌ویژه آقای مهندس حسن پور به خاطر کمک‌هایشان در مراحل نمونه‌برداری و همچنین از داوران محترم فصلنامه علوم زمین که با پیشنهادات سازنده سبب غنای بیشتر این مقاله شدند، سپاسگزاری می‌شود.

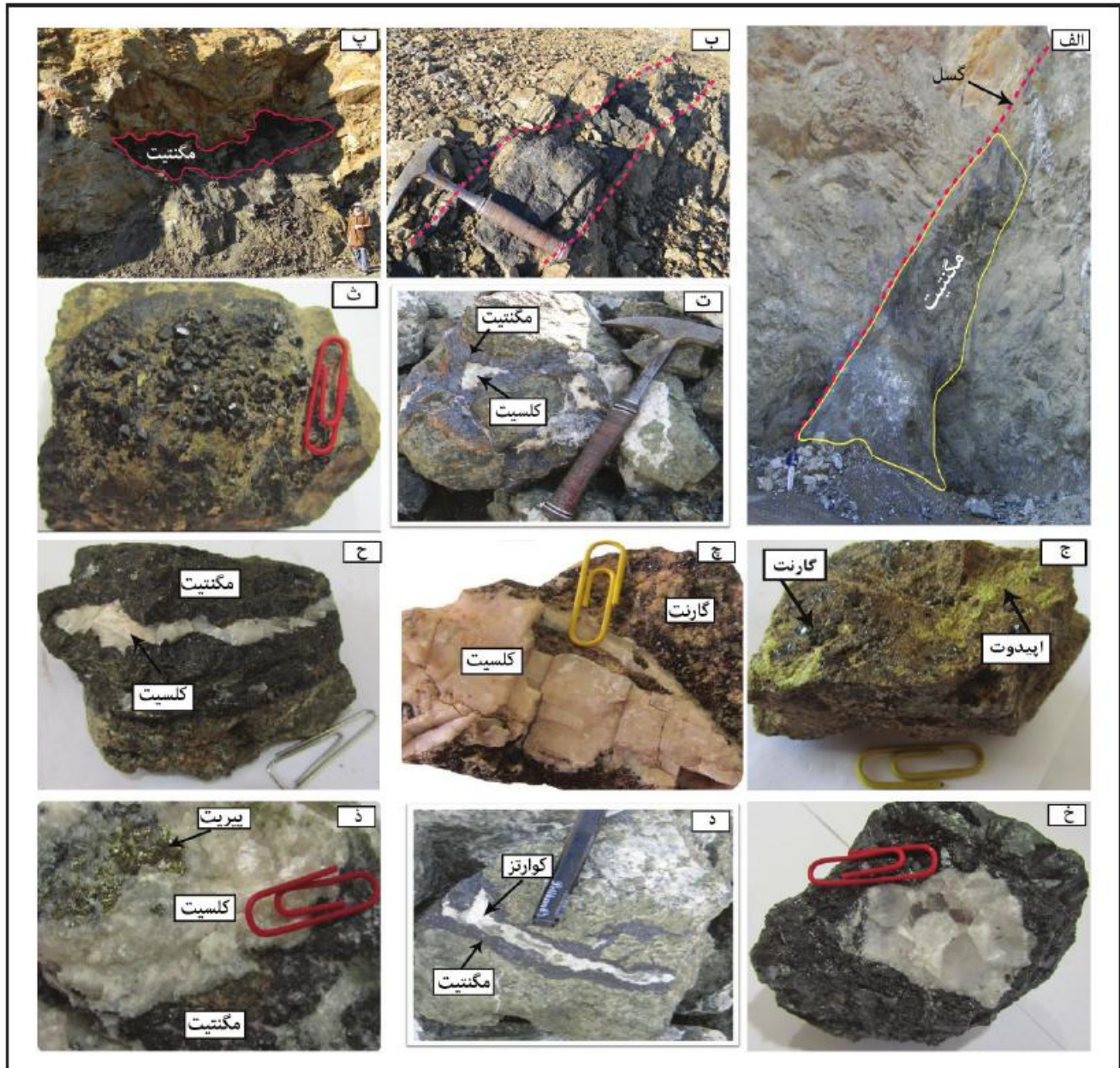
سنگ‌نگاری میانبرهای سیال در کانی کوارتز به دلیل حضور میانبرهای سیال تک‌فازی گازی به همراه میانبرهای سیال چندفازی، متفاوت بودن نسبت فاز گاز به فاز مایع در میانبرهای سیال و حضور میانبرهای سیال غنی از فاز گاز همگی شواهدی از رخداد پدیده جوشش ثانویه در کانسار آهن نوکه هستند.

میانبرهای سیال دوفازی غنی از گاز در کانی کوارتز (دمای همگن‌شدگی پایانی ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری معادل ۱۰ تا ۳۰ Wt. % NaCl) نسبت به میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع در این کانی (محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری معادل ۱۰ تا ۲۰ Wt. % NaCl) در دمای بیشتری همگن می‌شوند که به علت به دام افتادن نامتجانس مایع و گاز در طی فرایند جوشش ثانویه است. دمای همگن‌شدگی میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع در کلسیت‌های پهنه گارنت (نوع a) و کلسیت‌های پهنه مگنتیت (نوع b) شامل ۷۵ تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد و شوری میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع (۱۵ تا ۲۵ Wt. % NaCl) در کلسیت‌های پهنه گارنت بیشتر از شوری میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع (۱۰ تا ۲۰ Wt. % NaCl) در کلسیت‌های پهنه مگنتیت است که نشان می‌دهد که سیال‌های داغ و شور با سیال‌های سردتر و کم‌شورتر است و همچنین ایزوترمال سیال با سیالی که شوری متفاوتی دارد، آمیخته شده است.

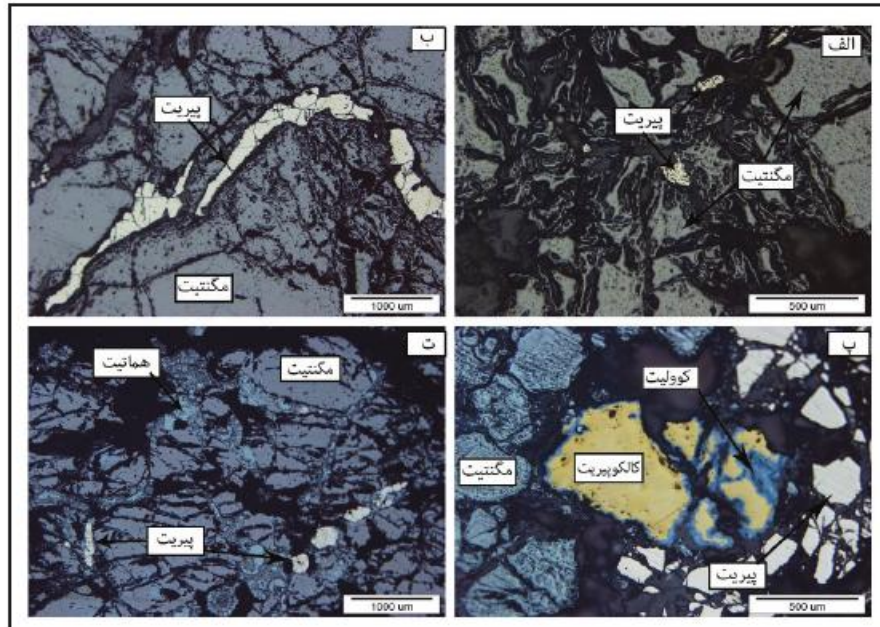
مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^{13}\text{C}$  در کلسیت‌های کانسار آهن نوکه گویای تأثیرپذیری از شرایطی مانند آلودگی به وسیله رسوبات هستند. مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن کانی کلسیت کانسار آهن نوکه با مقادیر ایزوتوپی کانسارهای اسکاران همخوانی دارد و به مقادیر  $\delta^{13}\text{C}$  در کربنات‌ها با منشأ ماگمایی و گرمایی نزدیک هستند.



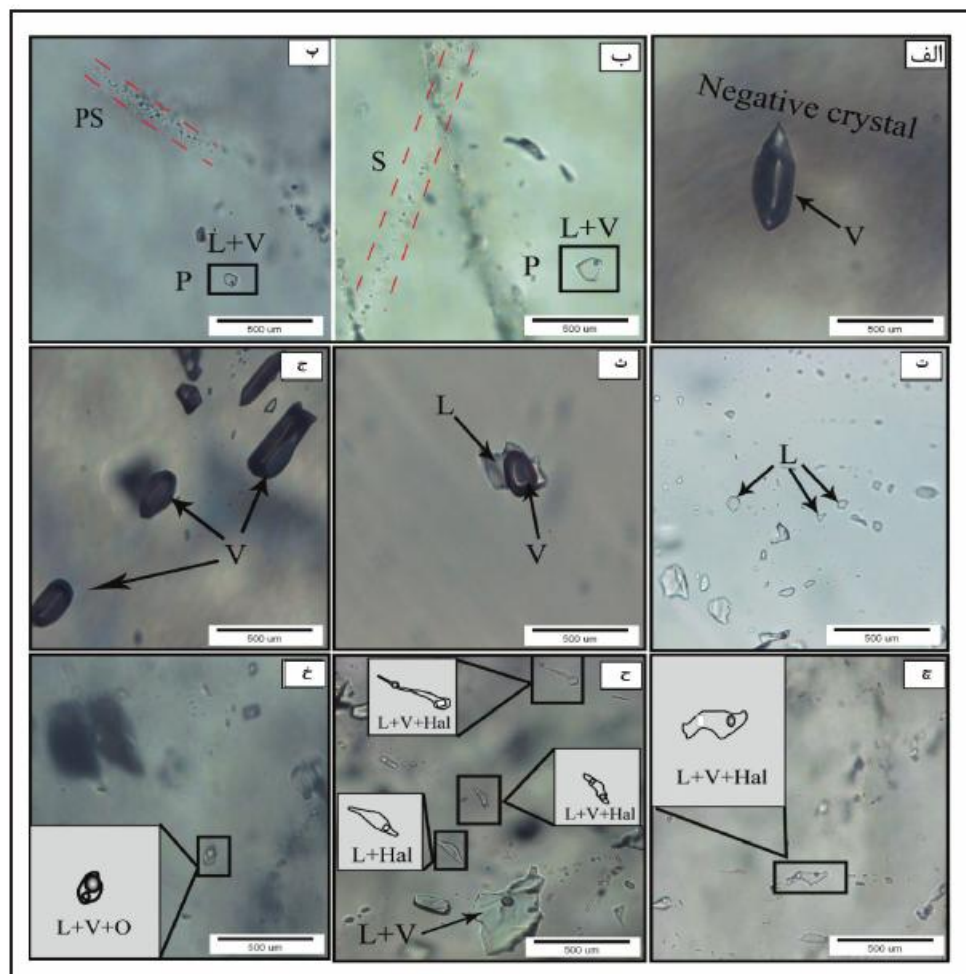
شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه در بخش جنوبی زون البرز مرکزی؛ ب) نقشه زمین‌شناسی کانسار آهن نوکه (با تغییرات از غیاثوند و همکاران، ۱۳۸۴).



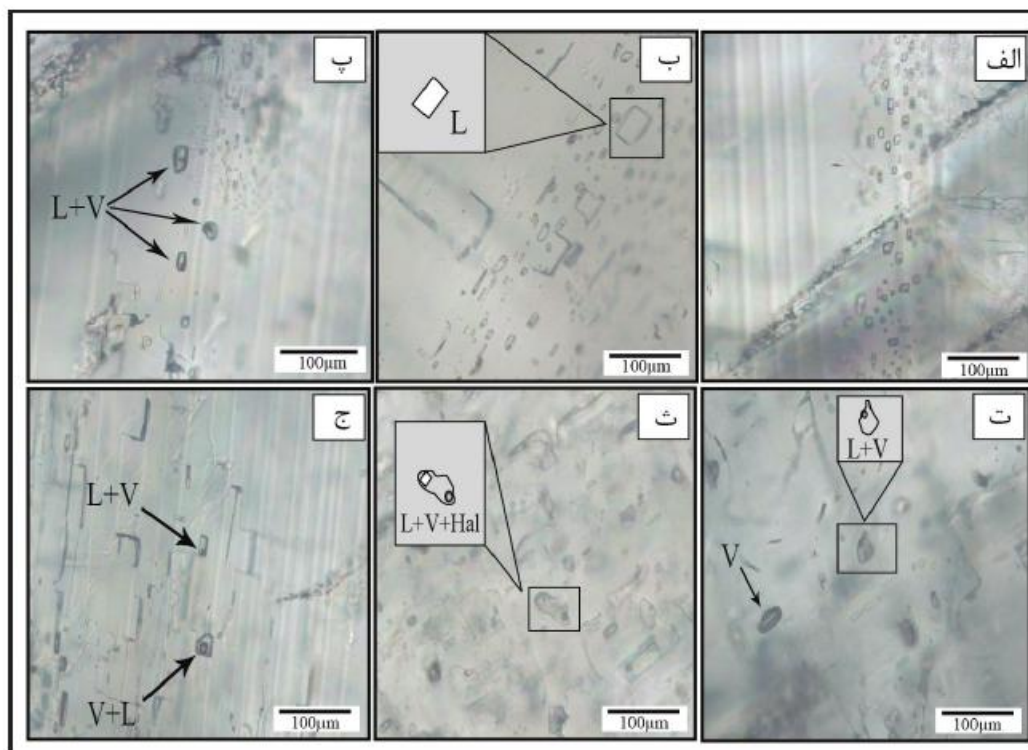
شکل ۲- الف) کانی‌زایی مگنتیت در راستای گسل در کانسار آهن نوکه؛ ب) کانی‌زایی مگنتیت به صورت رگه‌ای در سنگ میزبان آتشفشانی؛ پ) کانی‌زایی مگنتیت به صورت عدسی شکل در مرز تماس توده نفوذی با سنگ میزبان آتشفشانی؛ ت) کانی‌زایی مگنتیت به همراه کلسیت به صورت برشی؛ ث) بلورهای شکل‌دار گارنت در نمونه دستی؛ ج) همراهی گارنت با کانی اپیدوت در پهنه اسکارنی کانسار آهن نوکه؛ چ) قطع شدگی پهنه گارنت توسط بلورهای کلسیت (کلسیت‌های پهنه گارنت)؛ ح) قطع شدگی کانی‌زایی مگنتیت توسط کلسیت‌های گرمایی (کلسیت‌های پهنه مگنتیت)؛ خ) تشکیل بلورهای شکل‌دار کوارتز در زمینه مگنتیتی؛ د) تشکیل مگنتیت و کوارتز در یک فضای حالی که نشان‌دهنده تشکیل کوارتز پس از نهشت مگنتیت است؛ ذ) همراهی پیریت با کلسیت در پهنه مگنتیتی.



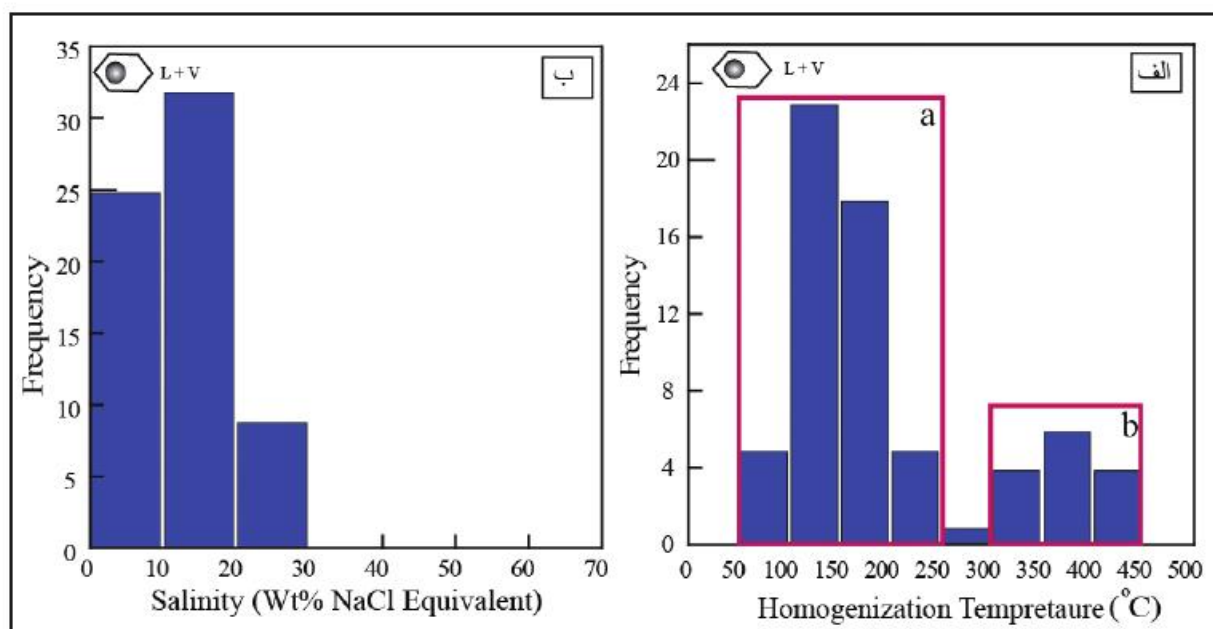
شکل ۳- الف) حضور کانی پیریت به صورت افشان در زمینه مگنتیتی در کانسار آهن نوحه؛ ب) تشکیل پیریت به صورت رگچه ای که کانی مگنتیت را قطع کرده است؛ پ) همراهی مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت و همچنین تشکیل کوولیت ثانویه در پیرامون کالکوپیریت؛ ت) تشکیل هماتیت ثانویه به صورت جانشینی در پیرامون مگنتیت.



شکل ۴- انواع میانبارهای سیال دیده شده در کانی کوارتز در کانسار آهن نوحه؛ الف) میانبار سیال تک‌فازی گاز یا شکل منفی بلور؛ ب) میانبارهای سیال اولیه (P)، ثانویه (S) و شبه ثانویه (PS)؛ پ) میانبارهای سیال شبه ثانویه؛ ت) میانبار سیال تک‌فازی مایع؛ ث) میانبار سیال دو فازی غنی از گاز؛ ج) میانبار سیال تک‌فازی گاز؛ چ) میانبار سیال دارای هماتیت؛ ح) میانبار سیال دو فازی شور غنی از مایع (L+Hal)؛ خ) میانبار سیال غنی از مایع دارای کانی کیدر. اختصارات: L: فاز مایع، V: حباب گاز، Hal: بلور هماتیت، O: کانی کیدر.

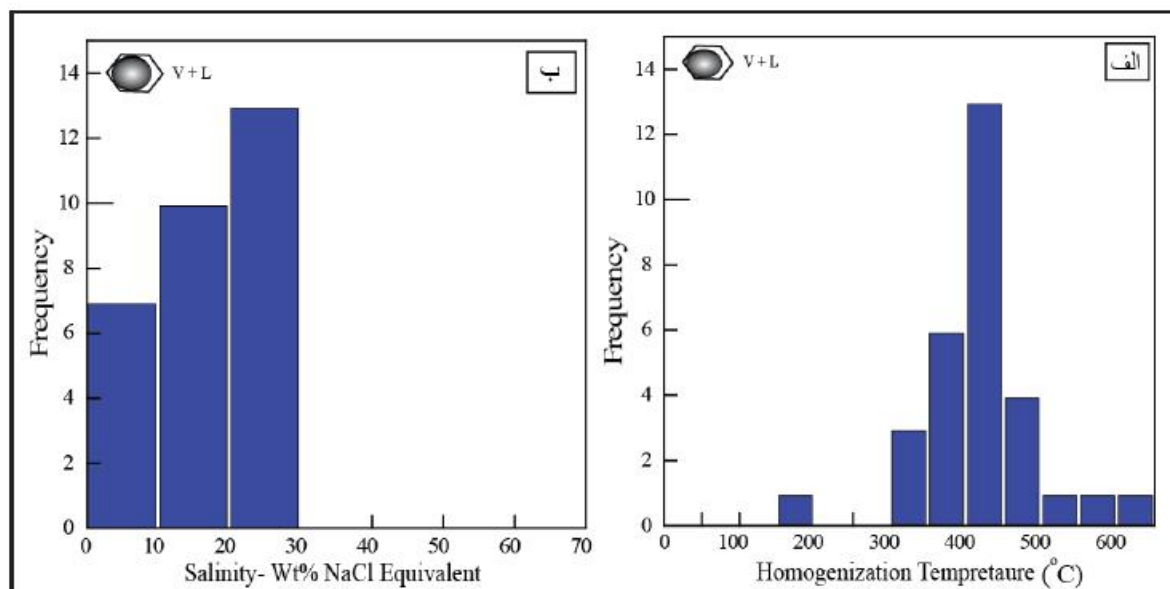


شکل ۵- انواع میانبرهای سیال دیده شده در کانی کلیت در کانسار آهن نوکته. الف) میانبرهای سیال دیده شده در کانی کلیت با اندازه‌های متفاوت؛ ب) میانبر سیال تک‌فازی مایع؛ پ) میانبر سیال دوفازی غنی از مایع؛ ت) میانبر سیال تک‌فازی گاز؛ ث) میانبر سیال دارای حالت؛ ج) میانبر سیال دوفازی غنی از گاز.

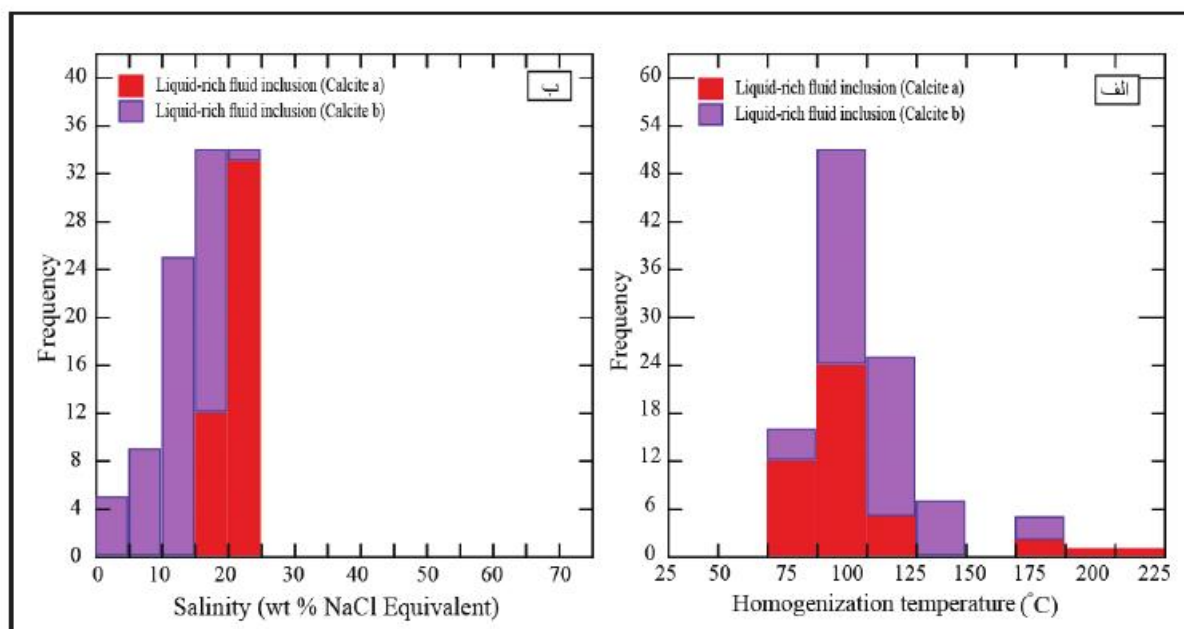


شکل ۶- الف) دمای همگن‌شدگی؛ ب) شوری میانبرهای سیال غنی از مایع در کوارتز در کانسار آهن نوکته.

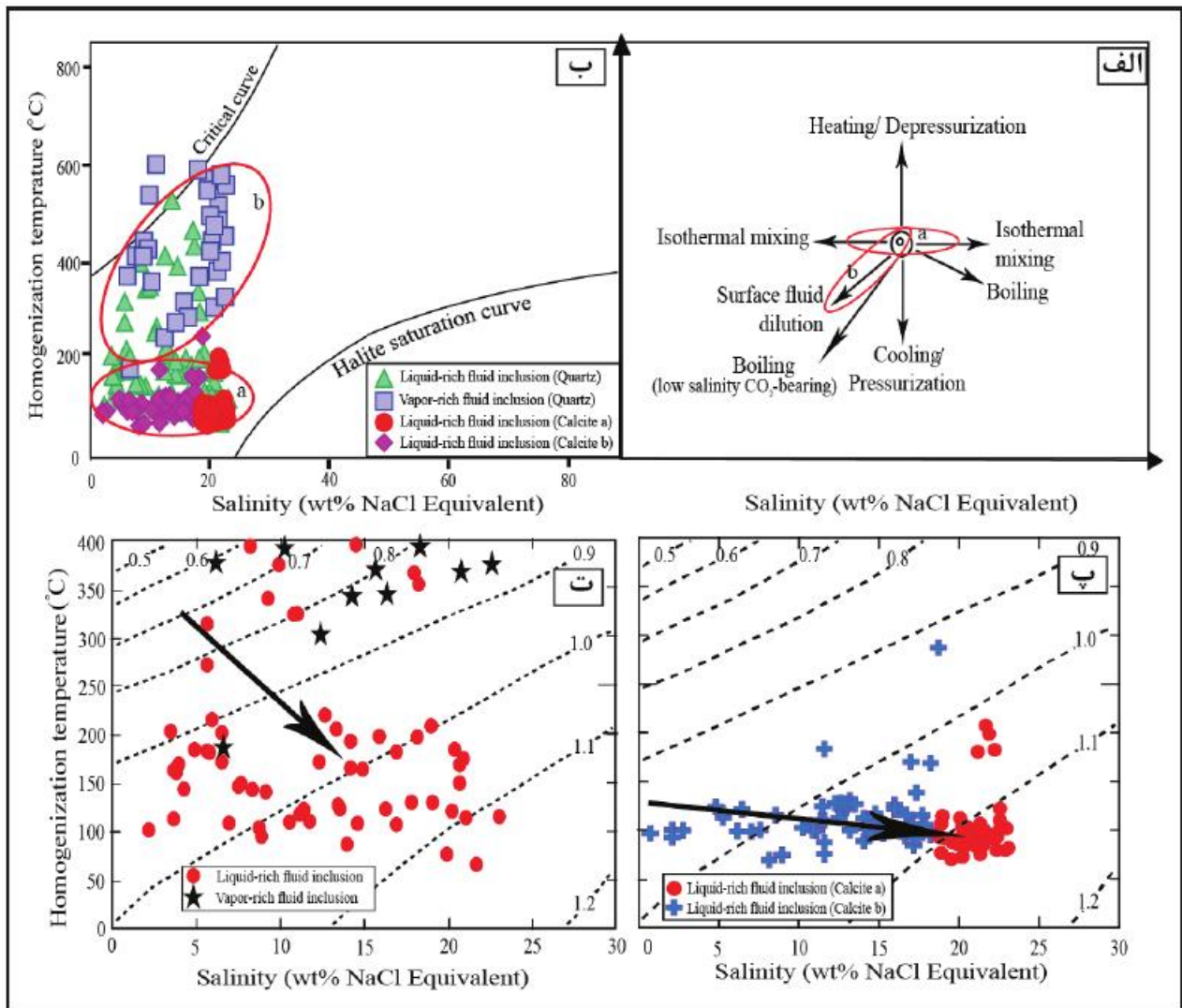




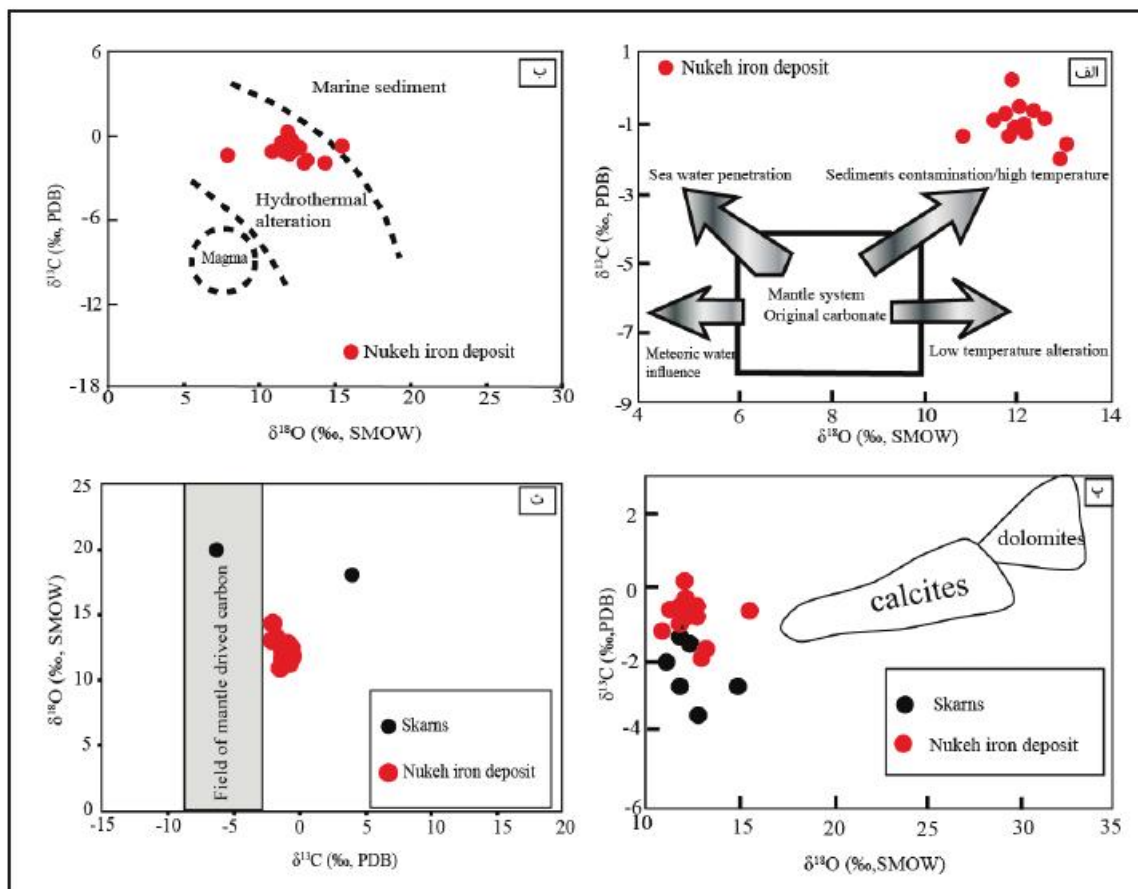
شکل ۷- الف) نمودار دمای همگن شدگی؛ ب) شوری میانبرهای سیال غنی از گاز در کوارتز در کانسار آهن نوکه.



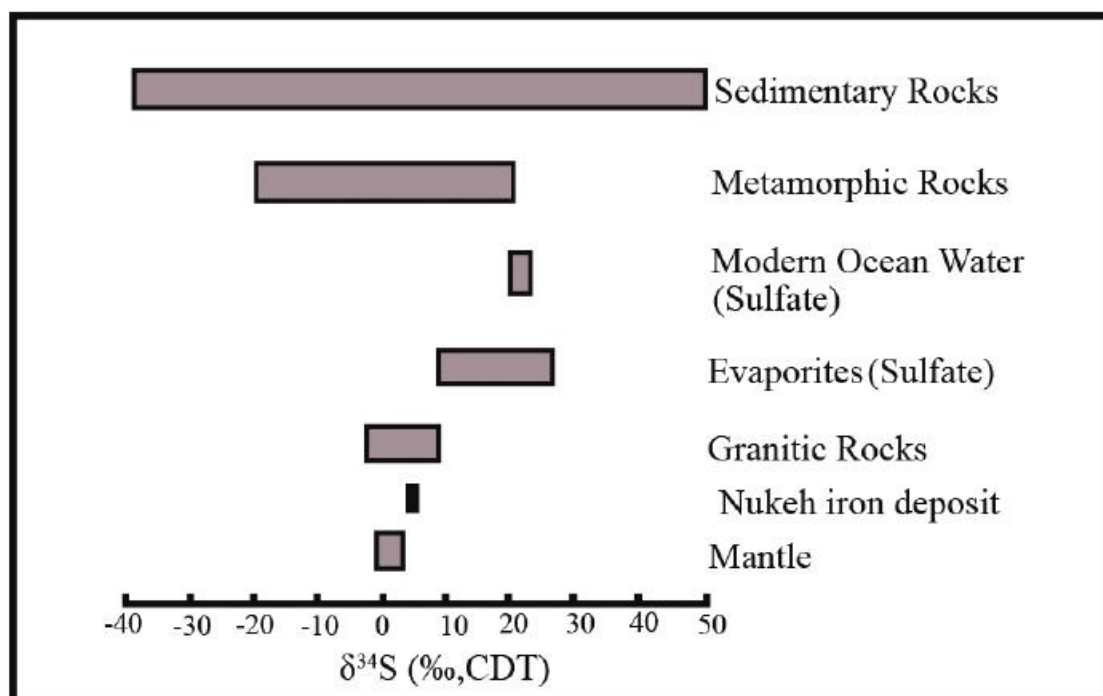
شکل ۸- الف) دمای همگن شدگی؛ ب) شوری میانبرهای سیال غنی از مایع در کلسیت های نوع a و کلسیت های نوع b در کانسار آهن نوکه.



شکل ۹- الف) روندهای فیزیکی مربوط به تشکیل کانسار آهن نوكه (Wilkinson, 2001)؛ ب) نمودار شوری در برابر دمای همگن شدگی میانبارهای سیال موجود در کانی کوارتز کانسار نوكه؛ پ و ت) روند تغییرات چگالی، شوری و دمای همگن شدگی سیال‌های گرمایی با فرایندهای مرتبط با کانسار آهن نوكه (Wilkinson, 2001).



شکل ۱۰- الف) نمودار  $\delta^{13}\text{C}$  در برابر  $\delta^{18}\text{O}$  کانی کلسیت در کانسار آهن نوکه (نمودار از Sun et al., 2001)؛ ب) موقعیت مقادیر  $\delta^{13}\text{C}$  در برابر  $\delta^{18}\text{O}$  کانی کلسیت کانسار نوکه در نمودار (Zang et al., 2004)؛ پ) موقعیت مقادیر ایزوتوپ های کربن و اکسیژن کانی کلسیت کانسار آهن نوکه در نمودار Gilg et al. (2001) که محدوده کانسارهای اسکارن نیز مشخص شده است؛ ت) دامنه تغییرات مقادیر ایزوتوپی کربن مشتق شده از گوشه و محدوده  $\delta^{13}\text{C}$  کانی کلسیت کانسار نوکه، در نمودار  $\delta^{13}\text{C}$  نسبت به  $\delta^{18}\text{O}$  و پراکندگی کانسارهای اسکارن (نمودار از Niiranen et al., 2005).



شکل ۱۱- دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد در کانسار آهن نوکه و مقایسه آن با دیگر معازن گوگرددار زمین شناسی (داده ها غیر از کانسار نوکه از Hurlgen et al., 2004).

جدول ۱- توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسار آهن نوکه.

Mineral	Contact Metamorphism	Metasomatism		Weathering
		Prograde skarn	Retrograde skarn	
Magnetite		_____	_____	
Hematite				_____
Pyrite		_____	_____	
Chalcopyrites		_____	_____	
Garnet	_____	_____		
Biotite		_____		
Chlorite			_____	
Muscovite			_____	
Epidote			_____	
Quartz		_____		
Calcite			_____	
Mn- Oxides				_____
Goethite				_____
Limonite				_____

جدول ۲- نتایج داده‌های ایزوتوپی کربن و اکسیژن کانی کلسیت کانسار آهن نوکه (مقادیر بر حسب %).

Sample No.	Mineral	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ SMOW)	T °C	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$ (‰ SMOW)
NC01	Calcite a	+۰/۱	-۱۸/۴	+۱۱/۰۵	۱۰۰	-۶/۰۴
NC02	Calcite b	-۱/۹	-۱۷/۳	+۱۲/۱۸	۱۰۰	-۴/۹۱
NC03	Calcite a	-۰/۹	-۱۷/۷	+۱۱/۷۲	۱۰۰	-۵/۳۷
NC04	Calcite a	-۱/۱	-۱۸/۱	+۱۱/۳۰	۱۰۰	-۵/۷۹
NC05	Calcite a	-۰/۸	-۱۸/۷	+۱۰/۷۶	۱۰۰	-۶/۳۴
NC06	Calcite a	-۱/۳	-۱۹/۴	+۱۰/۰۶	۱۰۰	-۷/۰۳
NC07	Calcite a	-۰/۸	-۱۸/۵	+۱۱/۱۷	۱۰۰	-۶/۱۳
NC08	Calcite a	-۱/۱	-۱۸/۳	+۱۳/۳۹	۱۰۰	-۵/۹۲
NC09	Calcite b	-۱/۸	-۱۷/۲	+۱۴/۶۹	۱۰۰	-۴/۷۸
NC10	Calcite b	-۱/۹	-۱۶/۱	+۱۳/۳۹	۱۰۰	-۳/۷۰
NC11	Calcite b	-۰/۷	-۱۴/۹	+۱۴/۶۹	۱۰۰	-۲/۴۰
NC12	Calcite a	-۰/۹	-۱۸/۱	+۱۱/۳۲	۱۰۰	-۵/۷۷
NC13	Calcite b	-۱/۲	-۱۸/۴	+۱۰/۹۹	۱۰۰	-۶/۱۰
NC14	Calcite a	-۰/۶	-۱۷/۹	+۱۱/۵۳	۱۰۰	-۵/۵۶
NC15	Calcite a	-۰/۶	-۱۸/۲	+۱۱/۲۲	۱۰۰	-۵/۸۷

برای به دست آوردن مقدار  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$  از فرمول تفکیک ایزوتوپی ارائه شده برای Calcite-water ارائه شده توسط Friedman and O'Neil (1977) استفاده شده است.

جدول ۳- نتایج داده‌های ایزوتوپی گوگرد کانی پیریت در کانسار آهن نوکه (مقادیر بر حسب %).

Sample No.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT)
NP1	Pyrite	+۴/۲
NP2	Pyrite	+۵/۴
NP3	Pyrite	+۵/۳
NP4	Pyrite	+۴/۷
NP5	Pyrite	+۴/۳
NP6	Pyrite	+۴/۴
NP7	Pyrite	+۲/۹
NP8	Pyrite	+۵/۲
NP9	Pyrite	+۵/۱

## کتابنکاری

- شاه‌حسینی، ا.، قاسمی، ح. و فردوست، ف.، ۱۳۸۶ تشکیل اسکارن در حاشیه توده گرانیتیویدی نوکه، شمال خاور سمنان. یازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی، مشهد.
- شهری، م.، صادقیان، م. و لنتز، د.، ۱۳۸۹ نتایج آنالیز مایکروبروپ کانی‌های سازنده اسکارن‌های کلسیک آهن‌دار شمال سمنان. بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- صمدی، م.، ۱۳۷۷ پتروگرافی، پتروژنز و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین شمال تا شمال خاور سمنان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم، ایران، ۱۶۲ ص.
- غیاثوند، ع.، قادری، م. و رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۸۴ سنگ‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و منشأ ذخایر آهن شمال سمنان. دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- غیاثوند، ع.، قادری، م. و رشید نژاد عمران، ن.، ۱۳۸۸ کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانسارهای آهن شمال سمنان، مجله علوم زمین ۷۲ (۱۸): صص. ۳۳ تا ۴۴.

## References

- Bodnar, R. J. and Beane, R. E., 1980- Temporal and spatial variations in hydrothermal fluid characteristics during vein filling in preore cover overlying deeply buried porphyry copper type mineralization at Red Mountain, Arizona. *Economic Geology* 75: 876–893.
- Bodnar, R. J., 2003- Introduction to aqueous fluid inclusions. In: Samson, I., Anderson, A., and Marshall, D. (Eds.): *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32: 81-99.
- Bodnar, R. J. and Vityk, M. O., 1994- Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. In *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*, B. De Vivo and M.L. Frezzotti, eds., pub. By Virginia Tech, Blacksburg, VA: 117-130.
- Cunningham, C., 1978- Pressure gradients and boiling as mechanisms for localizing ore in porphyry system. *Journal of Research U.S. Geology Survey* 6: 745-754.
- Drummond, S. E. and Ohmoto, H., 1985- Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology* 80: 126–147.
- Faure, G. and Mensing, A., 2005- *Principles of isotope geology*, 2th edition, John Wiley and Sons, New York, chapter 25, 460P.
- Friedman, I. and O'Neil, J. R., 1977- Stable isotopic fractionation factors of geochemical interest. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*:440KK.
- Gilg, H. A., Lima, A., Somma, R., Belkin, H. E., Devivo, B. and Ayuso, R. A., 2001- Isotope geochemistry and fluid inclusion study of skarn from Vesuvius. *Mineralogy and Petrology* 73: 145-176.
- Hedenquist, J. W. and Henley, R. W., 1985- Effect of CO<sub>2</sub> on freezing point depression measurement of fluid inclusions: Evidence from active systems and application to epithermal studies. *Economic Geology* 80: 1379-1406.
- Hoefs, J., 2009- *Stable isotope geochemistry*, 6th edition, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 293P.
- Hurtgen, M. T., Arthur, M. A. and Prave, A. R., 2004- The sulfur isotope composition of carbonate associated sulfate in Mesoproterozoic to Neoproterozoic carbonates from Death Valley, California. In: *GSA Special Papers* 379: 177-194.
- Larson, L. T., Miller, J. D., Nadeau, J. E. and Roedder, E., 1973- Two sources of error in low temperature inclusion homogenization determination and corrections on publish temperatures for the East Tennessee and Laisvall deposits. *Economic Geology* 68: 113-116.
- Niiranen, T., Manttari, I., Poutiainen, M., Nicholas H. S., Jodie, O. and Miller, A., 2005- Genesis of Palaeoproterozoic iron skarns in the Misi region, northern Finland. *Mineralium Deposita* 40: 192-217.
- Ohmoto, H., 1972- Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 67: 551–578.
- Ohmoto, H., 1986- Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Rev Miner* 16: 491–559.
- Rollinson, H. R., 1993- *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman, U.K., 352P.
- Sharp, Z., 2006- *Principles of stable isotope geochemistry*, chapter 10:409P.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M., 1985- *A practical guide to fluid inclusion studies*. Blackie, Glasgow 239 P.
- Shimazaki, H., 1980- Characteristics of skarn deposits and related acid magmatism in Japan. *Economic Geology* 75: 173-183.
- Sun, J. G., Hu, S. X., Shen, K. and Yao, F. L., 2001- Research on C and O isotopic geochemistry of intermediate-basic and intermediate-acid dykes in goldfields of Jiaodong peninsula. *Acta Petrologica et Mineralogica* 20, 47-56 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, Jr., H. P., 1974- The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Economic Geology* 69: 843–883.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55: 229–272.
- Zang, W. S., Wu, G. G., Zhang, D. and Liu, A. H., 2004- Xinqiao iron-deposit field in Tongling, Anhui: geologic and geochemical characteristics and genesis. *Geotectonica et Metallogenia* 28: 187-193 (in Chinese with English abstract).

# The evolution of ore-forming fluids and genesis of Nukeh iron deposit, North Semnan based on evidence from fluid inclusions and S, C, O: stable isotopes

S. Esmailnezhad<sup>1</sup>, N. Taghipour<sup>1\*</sup> and A. A. Hassannezhad<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Msc., School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran

Received: 2016 April 17

Accepted: 2016 September 18

## Abstract

The Nukeh iron deposit is situated at the north of Semnan and at south of Central Alborz structural zone. Volcano-pyroclastic rocks with Eocene age are the host of this deposit. Iron mineralization occurs as massive, disseminated, vein and breccia types in the Nukeh deposit and magnetite, hematite, pyrite, chalcopyrite, garnet, epidote, quartz and calcite are the main minerals in this deposit. Fluid inclusions and stable isotopes (O, C, S) have been used to reveal the physico-chemical characteristics of hydrothermal fluids and genesis of the Nukeh Fe deposit. Seven types of fluid inclusions are identified in quartz, according to the phase numbers, which include, liquid inclusions (L), liquid-rich inclusions (L+V), vapor-rich inclusions (V+L), vapor inclusions (V), simple brine inclusions (L+V+S), halite-bearing liquid inclusions (L+S) and opaque-bearing liquid-rich inclusions (L+V+O). The ranges of homogenization temperature and salinity of liquid-rich fluid inclusions in quartz are 100-200°C and 10-20 wt. % NaCl equivalent, respectively, whereas the ranges of homogenization temperature and salinity of vapor-rich fluid inclusions are 350-500°C and 10-30 wt. % NaCl equivalent, respectively. Also homogenization temperature and salinities of liquid-rich fluid inclusions in calcite in garnet (type a) and magnetite (type b) zones is 75-125 °C but the salinity of fluid inclusions in calcite in garnet zone (15-25 wt. % NaCl) is more than salinity of these inclusions in magnetite zone (10-20 wt. % NaCl).  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{16}\text{O}$  values of calcite (n=15) vary between -1.9 to +0.1 ‰<sub>(VPSM)</sub> and -19.4 to -14.9‰<sub>(SMOW)</sub>, respectively. The average value of  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$  is of +17.85‰<sub>(SMOW)</sub> in the Nukeh Fe deposit is different from the values for the primary magmatic fluid. Pyrite is the main sulfide mineral in the Nukeh Fe deposit and  $\delta^{34}\text{S}$  values of pyrite (n=9) is within the range of +3.9 to +5.4 ‰ CDT. The source of sulfur is considered to be magmatic on this basis. Fluid inclusions and stable isotopic (O, C, S) data suggest that the ore-forming fluids evolved by the various mixtures of magmatic brines and meteoric water and probably the genesis of the Nukeh Fe deposit is similar to skarn deposits.

**Keywords:** Fluid inclusions, Stable isotope, Nukeh iron deposit, Semnan.

For Persian Version see pages 309 to 322

\*Corresponding author: N. Taghipour; E-mail: taghipour@du.ac.ir