

## Geological, mineralogical, and fluid inclusion studies of the Bandan-Neyganan ore district, South Khorasan Province, Iran

Mehdi Safari<sup>1</sup>, Mahya Manouchehri niya<sup>2\*</sup>, Malihe Nakhaei<sup>3</sup>

1- Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- Department of Geology, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3- Department of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

**Keywords:** Geology, Mineralogy, Fluid inclusions, Antimony, Bandan

### 1-Introduction

Stibnite, the most common antimony-bearing ore, is genetically associated with granitic magmas in shear zones and is formed in low-grade metamorphic rocks (Gumiel and Arrubas, 1987). More than 24 antimony deposits have been known in Iran, most of which are hydrothermal (Babakhani et al., 2001). Lut block has diverse mineral resources (Shahabpour, 2003; Karimpour et al., 2011). Fluid inclusion studies help us to identify the origin of deposits. Fluid inclusion studies can provide comprehensive information on density, pressure, temperature, salinity, gas compositions of fluid, stable isotope values, and soluble materials in the fluid (Shepherd et al., 1985). Several methods calculate the chemical composition and salinity of the liquid phase in fluid inclusions. The temperature and salinity of the ore-forming hydrothermal fluid are determined by heating and freezing experiments on fluid inclusions.

### 2- Material and methods

Sampling was carried out from excavated tunnels and also from different rock lithologies. Ten thin and polished sections were prepared and studied from mineralized rocks. Among them, microthermometric studies on seven sections were performed by the Linkam THMSG600 stage at Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

### 3- Results and discussion

The ore minerals show open-space filling, vein-veinlet, breccia, and disseminated textures, indicating an epigenetic origin. Stibnite, along with galena, pyrite, iron oxide and hydroxide minerals, quartz, barite, and calcite, is found in the void space of crystallized limestone. Fluid inclusions are irregular, elongated, and spherical. According to Shepherd et al. (1985) four types of fluid inclusions in quartz veins were identified: I- three-phase solid-liquid-gas (L+V+S), II- two-phase gas - liquid (gas-rich) V+L, III - single-phase liquid (L), and IV- V-single-phase gas (V).

Fluid inclusions homogenized between 150 °C to 265 °C, the greatest frequency of temperature recorded in the range of 220 - 240 °C. Final ice-melting temperatures were between -0.3 and -7.5 °C, corresponding to salinities of 5–11 wt. % NaCl Eq. The density of fluid inclusions is 0.8 to 1 g/cm<sup>3</sup>. Boiling and interaction with meteoric waters followed by cooling had important roles in the precipitation of ores. The cooling trend reflects the role of meteoric waters and the evolution of the system towards lower temperatures.

### 4- Conclusion

Based on field studies, antimony mineralization in the Bandan - Neyganan ore district occurs as epigenetic. Primary, two-phase inclusions in quartz veins homogenized between 150 and 265 °C. Final ice-melting temperatures were between -0.3 and -7.5 °C, corresponding to salinities of 5–11 wt. % NaCl eq. According to

\*Corresponding author: mahia.manouchehri@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.31652.2058

Received 2019-11-09

Accepted 2020-09-01

field observations, mineralogical studies, and fluid inclusion studies, the Bandan- Neyganan deposit is probably an epithermal deposit.

### References

- Baba Khani, A.L., Rahimi, M., Jafari Rad, A.L., Sadeghi, M., Delara, S. T., 2001. Investigating the Status of Antimony Reserves to Mineralization Types, Abstracts of the 20th Conference of Sciences, Geological Survey of Iran.
- Gumiel, P., Arrubas, A., 1987. Antimony Deposits in the Iberian Peninsula. *Economic Geology* 52, 1453-1463.
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., Farmer, L., Saadat, S., Malekzadeh Shafaroudi, A., 2011. Review of age, Rb–Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Journal of Geopersia* 1 (1), 19–36.
- Shahabpour, J., 2003. *Economic Geology*, Shahid Bahonar University of Kerman Publications, p. 543.
- Shepherd, T., Rankin, A.H., Alderton, D., 1985. *A practical guide to fluid inclusions studies*, Blackie, Glasgow, p. 239.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Safari, M., Manouchehri niya, M., Nakhaei, M., 2021. Geological, mineralogical, and fluid inclusion studies of the Bandan-Neyganan ore district, South Khorasan Province, Iran. *Adv. Appl. Geol.* 11(2), 225-237.

DOI: 10.22055/AAG.2020.31652.2058

[https://aag.scu.ac.ir/article\\_15860.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15860.html?lang=en)

## بررسی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و مطالعات میانبارهای سیال، محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان (خراسان جنوبی)

مهدی صفری

دانشکده علوم زمین، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

محیا منوچهری نیا\*

دانشکده علوم زمین، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

ملیحه نخعی

گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

\*mahia.manouchehri@gmail.com

### چکیده

محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان در زون ایران مرکزی و حد مرزی بلوک لوت و بلوک طیس واقع شده است. لیتولوژی غالب در محدوده معدنی آنتیموان بندان - نیگنان سنگ‌های آهک دگرگونی، اسلیت، ماسه سنگ و بخش اعظم منطقه رسوبات نمکی و آبرفتی است. کانی‌زایی در محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان در حدفاصل مرمرهای حاصل از دگرگونی سنگ آهک و دولومیت رخ داده است. کانی‌زایی استیبنیت همراه با گالن، پیریت، کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن، کوارتز، باریت و کلسیت با بافت‌هایی مانند پرکننده فضای خالی، رگه‌ای، برشی و پراکنده در سنگ میزبان محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان است. نتایج به دست آمده از مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال در کانی کوارتز بیانگر آن است که، دمای همگن‌شدگی در دامنه ۱۵۰ تا ۲۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد تغییر می‌کند و همچنین دمای ذوب آخرین بلور یخ ۰/۳- تا ۷/۵- درجه سانتی‌گراد است و درجه شوری بین ۰/۵ تا ۱۱ درصد وزنی معادل نمک طعام با محدوده‌ی فراوانی ۲ تا ۳ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه گردیده است. با توجه به شواهد صحرایی، میکروسکوپی و دماسنجی، زایش احتمالی محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان در محدوده‌ی کنسارهای اپی‌ترمال قرار می‌گیرد.

**کلمات کلیدی:** زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، میانبار سیال، آنتیموان، نیگنان، خراسان جنوبی

### مقدمه

محدوده معدنی آنتیموان بندان - نیگنان در نزدیکی روستای بندان و شمال روستای نیگنان در شهرستان بشرویه در خراسان جنوبی واقع شده است. این محدوده در زون ایران مرکزی و شمال غربی بلوک لوت قرار گرفته است.

بیش از ۲۴ کنسار و اثر معدنی آنتیموان در ایران شناخته شده است، که بیشتر از نوع گرمایی هستند (Babakhany et al., 2001). آنتیموان بیشتر همراه با طلا، آرسنیک و جیوه یافت می‌شود (Wilson et al., 2004). بیشتر کنسارهای آنتیموان از نوع اپی‌ترمال هستند و معمولاً کنترل ساختاری دارند (Malekzadeh and Karimpour, 2012) زون - های برشی، گسل‌های کششی و چین خوردگی‌ها محیط مناسبی برای تشکیل این نوع کانی‌سازی هستند (Akcay et al., 2006).

ویژگی‌های زمین‌شناسی و جایگاه زمین‌ساختی بلوک لوت (تصادم در ژوراسیک و فرورانش بلوک هلمند افغان به زیر بلوک لوت در تشریری) باعث شده است که این بلوک مکان مناسبی برای تشکیل برخی ذخایر معدنی باشد (Karimpour et al., 2011;

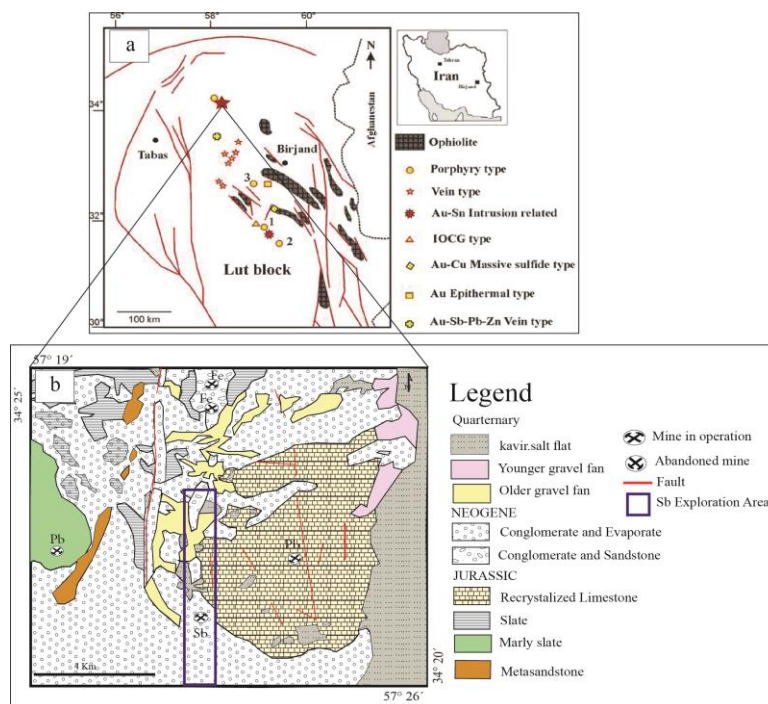
(Shahabpour, 2004). از جمله ذخایر پورفیری و اپی‌ترمال ماهر آباد (Malekzadeh, 2009)، خوپیگ (Malekzadeh, 2009)، خونیگ (Shafaroudi et al., 2015)، چاه شلجی (Arjmandadeh, 2015) (Nakhaei et al., 2015)، کوه شاه (Abdy et al., 2011; Arjmandzadeh, 2011) (Karimpour et al., 2012) and معدن قلعه زری (Karimpour et al., 2005, 2006)، سرخ کوه (Hoseynkhany et al., 2006)، کنسار قلعه شاه کوه (Esmaily et al., 2005).

از آنجاییکه شوراها نقش بسیار مهمی در تشکیل کنسارهای فلزی دارند، مطالعه‌ی میانبارهای سیال کمک زیادی به شناسایی و نحوه تشکیل آنها می‌کند. مطالعه میانبارهای سیال می‌تواند اطلاعات جامع و کاملی در مورد چگالی، فشار، دما، مقدار شوری، ترکیب گازهای سیال، مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار و مقدار مواد حل شده در سیال در اختیار ما بگذارد (Shepherd et al., 1985). رایج‌ترین و معمولترین آزمایش‌هایی که بر روی میانبارهای سیال انجام می‌پذیرد، آزمایش گرمایش - سرمایش است که بر پایه این روش دما و شوری

محدوده معدنی پلی متال بندان در ایران مرکزی و در مرز شمال غربی بلوک لوت و شرق بلوک طبس قرار گرفته است، البته کانسارهای این محدوده جزئی از بلوک طبس می باشند ( Nabavi, Stöcklin and Nabavi, 1969; 1973) (شکل ۱ا). بلوک لوت با روند شمالی - جنوبی در شرق زون ایران مرکزی قرار گرفته است، طول این بلوک تقریباً ۹۰۰ کیلومتر و عرض آن ۲۰۰ کیلومتر گزارش شده است ( Stöcklin and Nabavi, 1973; Karimpour and Stern, 2009).

محلول گرمابی موثر در کانی زایی تعیین می شود. با توجه به مطالعاتی که بر روی محدوده معدنی آنتیموان بندان - نیگن صورت گرفته است، بیشتر پژوهش ها بر پایه ژئوشیمی و کانی شناسی بوده است. با توجه به اینکه مطالعاتی بر روی میانبارهای سیال این محدوده صورت نگرفته است، بر این اساس هدف اصلی این مطالعه بازسازی ویژگی های PTVX تشکیل کانسنگ به منظور دستیابی به روند تکامل سیال است.

### زمین شناسی منطقه



شکل ۱- (a) خرد قاره ایران مرکزی و زیرپهنه های آن (Karimpour et al., 2017) و (b) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (با تغییرات از Routner et al., 1994).

Fig. 1. (a) Central Iran microcontinent and its sub-zones (Karimpour et al., 2007) and (b) Geological map of the study area. Modified after Routner et al. (1994).

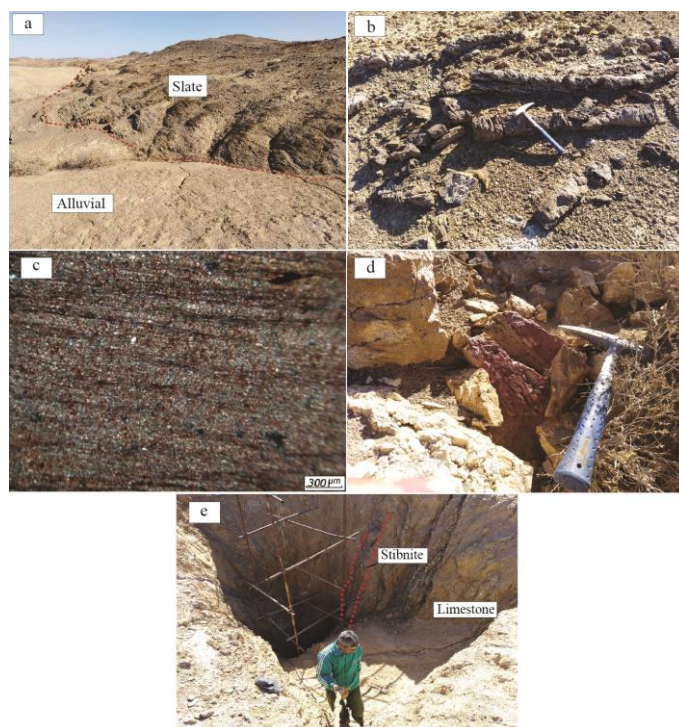
نهبشته های نمکی، طبقات قرمز ماری-گچی و پادگانه های آبرفتی قدیمی و آبرفت های جوان هستند. طبقات ماری - گچی به صورت کنگلومرای سخت شده و یکپارچه با سیمانی ماسه، سیلت، رس و گچ قرار گرفته اند. پادگان های آبرفتی کهن توسعه نسبتاً زیادی در منطقه دارند. آبرفت های کهن در افق های بالایی و بر حسب موقعیت بطور دگرشیب زاویه دار روی سازندهای مختلف جای گرفته اند (شکل ۱ب). اغلب معادن و نشانه های معدنی سرب و روی در این منطقه با واحدهای آهکی و یا دولومیتی شتری، جمال، اسفندیار، سیب زار، سلطانیه و یا واحدهای بغمشاه، قلعه دختر و شمشک در ارتباط هستند، که این کانسارها در بیشتر مواقع با گسل های موجود در سازند آهکی - دولومیتی در ارتباط هستند ( Dor Kav Mining Co, 2016).

مجموعه ی سنگی بغمشاه با ترکیب سنگ شناسی مارن های صورتی تا زرد رنگ، با شیل های خاکستری تیره و ماسه سنگ همراه با میان لایه هایی از آهک های ماسه دار که گاهی در آنها فسیل های با سن ژوراسیک دیده می شوند، قدیمی ترین واحد شناخته شده در منطقه است (Routner et al., 1994) (شکل ۱ب). این سری سنگ ها تحت تاثیر دگرگونی، به تناوبی از شیل های مدادی و سیلتی به رنگ هوازده زرد تا قهوه ای در آمده اند، که به وسیله رگه های سیلیسی، کربناتی و اکسیدهای آهن (لیمونیت و گوتیت) قطع شده اند. بر روی سازند بغمشاه مجموعه ای از لایه های آهک، مارن و شیل متعلق به سازند قلعه دختر پوشانده است، که لایه های مختلف این سازند حاوی کانی سازی از نوع سولفیدی، کربناتی و هماتیتی است. نهبشته های کواترنری در منطقه شامل مقادیر قابل توجهی از

### زمین شناسی محدوده اکتشافی بندان - نیگن

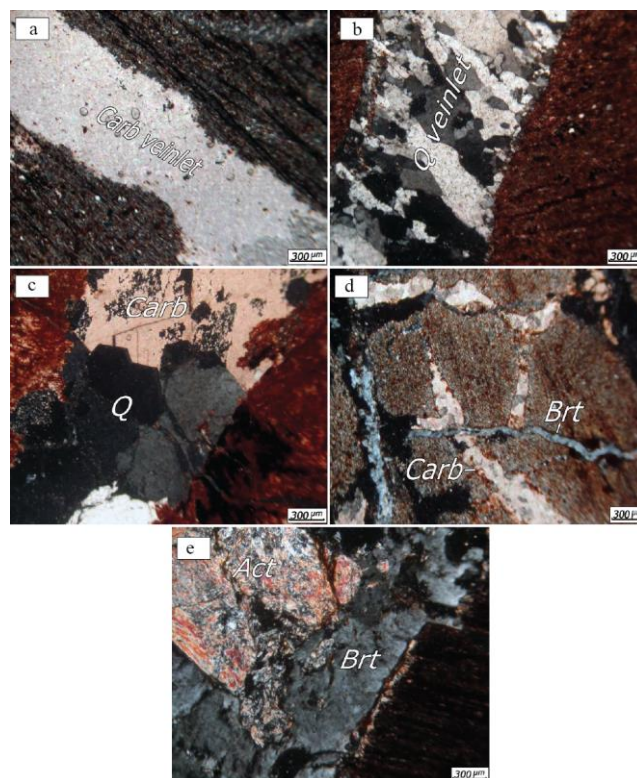
تشکیل دهنده این سنگ اکسیدهای آهن ثانویه و بخش‌های کربناتی (دولومیتی) هستند. بیش از نیمی از حجم سنگ را اکسیدهای آهن ثانویه تشکیل داده است. اکسیدهای آهن گاهی در امتداد رخ موجود در کانی‌های کربناتی نیز جایگزین شده‌اند. رگچه‌های مختلف با نسل‌های متفاوت زمینه سنگ اسلیت (شکل a3 تا c) و همچنین کربنات‌های آهن دار را قطع نموده است. اولین نسل از این رگچه‌ها متعلق به رگچه‌های ضخیم کربناتی است که به فراوانی در زمینه سنگ اسلیت و همچنین سنگ دولومیت آهن دار تشکیل شده است. در دولومیت آهن دار، به همراه رگچه‌های کربناتی و رگچه‌های کوارتز با توجه به مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک مشخص گردید، که این رگچه‌ها همزمان با یکدیگر تشکیل شده‌اند. در تمامی نمونه‌های مطالعه شده، رگچه‌های باریت قابل رویت است. که رگچه‌های کوارتز و کربناتی را قطع کرده و نسبت به آنها جوان تر هستند (شکل d3). همچنین در سنگ اسلیت، رگچه‌هایی از سوزن‌های اکتینولیت نیز دیده می‌شود. سوزن‌های اکتینولیت طی فرآیندهای گرمایی تشکیل شده که از رگچه‌های کوارتز - کربناتی جدیدتر بوده ولی قطع شدگی اکتینولیت توسط باریت نشانه جوان تر بودن رخداد کانی‌سازی باریت است (شکل e3).

قسمت اعظم محدوده‌ی مورد بررسی شامل رسوبات کواترنری است، که رسوبات قدیمیتر را پوشانده است (شکل a2). اسلیت با فراوانی زیاد در منطقه گسترش دارد، این واحد در صحرا به رنگ خاکستری و متورق دیده می‌شود (شکل b2). این واحد میزبان رگه‌های کلسیت ثانویه و کانی‌های کدر است. اجزای تشکیل دهنده اصلی اسلیت؛ کانی‌های رسی، کانی‌های تیره (اپاک) و همچنین هیدروکسیدهای آهن هستند (شکل c2). جهت‌یابی ترجیحی و شیستوزیته حاصل از دگرگونی ناحیه‌ای به طور واضح در این سنگ دیده می‌شود. کوارتز از اجزای فرعی سنگ اسلیت بوده که به صورت بلورهای بی‌وجه و کمی درشت‌تر از زمینه سنگ، درون آن دیده می‌شود. اسلیت دارای بافتی هموزن و بسیار ریزدانه است که توسط رگچه‌های مختلف قطع شده است. قطعات درشت اسلیت (با قطر بیش از ۱ سانتی‌متر) وجود دارد که توسط سیمان کربناتی (دولومیتی) دارای اکسید آهن زیاد به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل d2). میزان اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در زمینه سنگ اسلیت نیز افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. سنگ‌های کربناتی به شدت دارای اکسیدهای آهن نیز در یکی از مقاطع مطالعاتی دیده شد که به نظر می‌رسد اکسیدهای آهن در نتیجه فرآیندهای انحلالی فشاری در دولومیت آزاد شده و در سنگ دولومیت تجمع یافته است. اجزای



شکل ۲- (a) مرز رسوبات آبرفتی با اسلیت (دید عکس به سمت شمال)، (b) اسلیت با رگچه‌های فراوان سیلیس، (c) تصویر میکروسکوپی سنگ اسلیت دارای شیستوزیته مشخص و متشکل از کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن و کانی‌های اپاک، (d) تصویر صحرایی از آهک با اکسید آهن و (e) کانیزایی آنیموان داخل آهک.

Fig. 2. (a) Border of alluvial sediments with slate (looking north), (b) Slate with lots of silica veins, (c) Photographs of slate rock with distinct schistosity consisting of clay minerals, iron oxides and opac minerals (d) Crystalline limestone with iron oxide, and (e) Stibnite mineralization within limestone.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی؛ (a) رگچه ضخیم کربناتی که اسلیت را قطع کرده است، (b) رگچه سیلیسی متشکل از کوارتز که سنگ اسلیت دارای اکسیدهای آهن فراوان را قطع کرده است، (c) هم‌رشدی رگچه‌های کربناتی و کوارتز که احتمالاً هم‌زمان با یکدیگر تشکیل شده‌اند، (d) قطع‌شدگی رگچه‌های کربناتی توسط رگچه‌های باریت که نشانه جوان‌تر بودن رخداد تشکیل رگچه‌های باریت است و (e) قطع‌شدگی سوزن‌های اکتینولیت توسط باریت که نشانه جوان‌تر بودن رخداد کانی‌سازی باریت است. اختصارات: Carb: کربنات، Q کوارتز، Brt باریت، Act اکتینولیت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 3. Photographs; (a) Thick vein of carbonate that cuts the slate, (b) Silicification vein composed of quartz that cuts slate stone with high amounts of iron oxides, (c) Intergrowth of carbonate and quartz veins probably formed simultaneously, (d) Carbonate veins intersected by barite veins which indicates that they are younger and (e) Actinolite needle intersected by barite which is a sign of earlier occurrence of barite mineralization. Abbreviations: Carb: Carbonate, Qtz: Quartz, Brt: Barite, Act: Actinolite (Whitney and Evans, 2010).

بدون دم بریدگی در کانی کوارتز محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان- نیگنان توسط دستگاه Linkam THMSG 600 در آزمایشگاه ریزدماسنجی دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت. این دستگاه قادر به اندازه‌گیری محدوده دمایی  $196^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}+$  است. پارامترهای قابل اندازه‌گیری در مرحله سرمایش شامل: نقطه یوتکتیک (ظاهر شدن اولین مایع بعد از یخ زدن کامل) (Mosera, Hayanes, at al., 1991)، نقطه ذوب نهایی یخ و هیدروهالیت (Hayanes, 1985) هستند، و در مرحله گرمایش دمای همگن‌شدگی (ناپدید شدن حباب گاز) اندازه‌گیری شد.

### بحث

#### کانی‌شناسی و کانه‌زایی

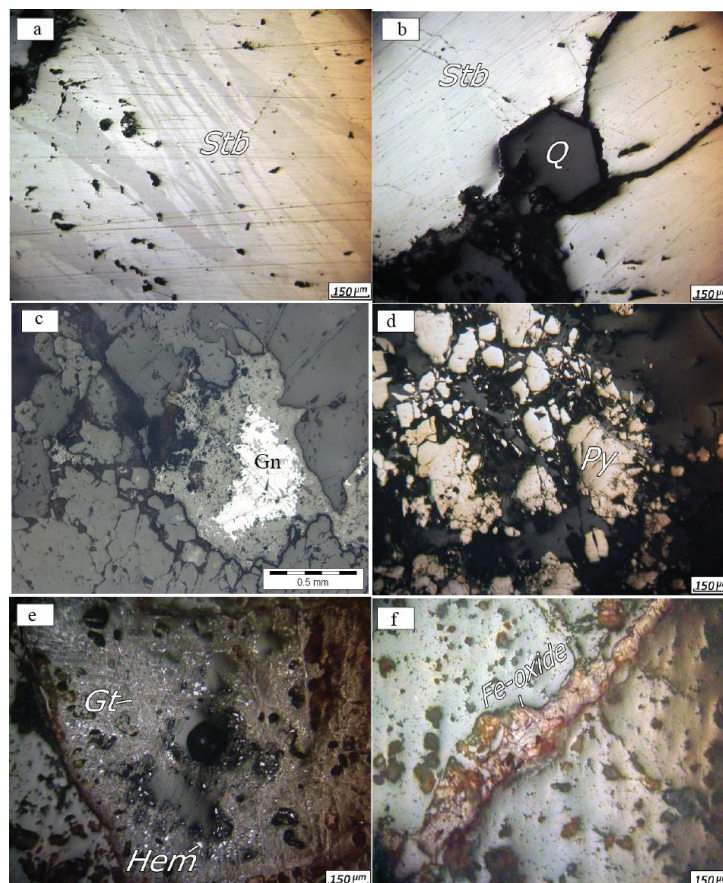
مطالعات صحرایی و میکروسکوپی نشان‌دهنده وجود بافت‌هایی مانند پرکننده فضای خالی، رگه‌ای، برشی و پراکنده در سنگ

#### مواد و روش‌ها

پس از بررسی‌های صحرایی، نمونه برداری از تونل‌های حفر شده و واحدهای سنگی مختلف در محدوده‌ی بندان- نیگنان انجام گرفت. همچنین به منظور مطالعه میانبارهای سیال از کوارتز نیز نمونه برداری گردید، نمونه‌ها حتی‌الامکان شفاف و از کوارتزهای پاراژنز با کانی‌سازی اصلی، برداشت شدند. برای بررسی کانی‌شناسی و دگرسانی محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان- نیگنان از تعداد ۱۸ نمونه از سنگ‌های دربرگیرنده کانی‌سازی مقاطع نازک و صیقلی تهیه شد و بوسیله‌ی میکروسکوپ نوری پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ۹ نمونه جهت تهیه مقاطع دوبر صیقل انتخاب گردید و به کارگاه مقطع‌گیری گرونا انتقال داده شد. سپس مقاطع دوبر صیقل تهیه شده، توسط میکروسکوپ پلاریزان مورد بررسی قرار گرفت. ریزدماسنجی بر روی ۴۰ میانبار سیال اولیه و حتی‌الامکان

شناسایی است (شکل ۴c). پیریت به همراه رگچه‌های سیلیسی به صورت بلورهای وجه‌دار تا بی‌وجه پراکنده دانه، رگچه‌ای و همچنین گاهی درون بلورهای کوارتز جایگزین شده است. کانی پیریت گاهی بافت کاتاکلاستیک را نیز نشان می‌دهد (شکل ۴d). رگچه‌های سیلیسی در بخش‌هایی از مقطع فاقد کانی‌سازی فلزی هستند. در بخش‌های سطحی و مناطق اکسیداسیون، آثار کانی‌سازی پیریت و استینیت در مقطع مشاهده نشد و کانی‌سازی متشکل از اکسیدهای آهن و به مقدار جزئی هماتیت و پیریت است. آغشتگی‌هایی از گوتیت به همراه این رگچه‌ها دیده می‌شود. هماتیت نیز به شکل بلورهای بی‌وجه و ریز درون قالب پیریت اکسیده شده و به همراه گوتیت دیده شد (شکل ۴e). اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن اغلب به شکل رگچه‌ای درون شکستگی‌ها حضور دارند (شکل ۴f).

میزبان محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان هستند. این بافت‌ها حاکی از منشاء اپی ژنتیک کانه‌زایی است. کانه‌زایی آنتیموان همراه با گالن، پیریت، کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن، کوارتز، باریت و کلسیت در بین فضای بازشدگی در آهک کریستالیزه وجود دارد. کانه‌زایی به صورت پرشدگی فضاهای خالی در آهک‌های تبلور مجدد یافته رخ داده است. کانی استینیت به شکل توده‌ای (شکل ۴a) گاهی توسط رگچه‌های غیرفلزی (سیلیسی) قطع شده است. همچنین بلورهای هگزاگونال کانی کوارتز نیز گاهی در بخش‌های مرکزی کانی استینیت دیده می‌شوند و توسط آن در بر گرفته شده‌اند که گویای تشکیل همزمان این کانی‌ها هستند (شکل ۴b). گالن در بخش‌هایی همراه کانی سروزیت به رنگ سفید رگه‌های کوارتزی را همراهی می‌کند. گالن به صورت شکافه پر کن در مقاطع میکروسکوپی قابل



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی؛ (a) بلورهای تیغه‌ای استینیت، (b) دربرگرفتنی بلور وجه‌دار کوارتز توسط کانی استینیت، (c) گالن، (d) بخشی از رگچه پیریت برشی شده، (e) بخشی از قالب بلور پیریت که درون آن ذرات ریز هماتیت و همچنین رگچه‌های ریز گوتیت به صورت پراکنده تشکیل شده است و (f) رگچه اکسید آهن که به همراه مقادیر جزئی گوتیت درون شکستگی‌ها را پر کرده است. اختصارات: Stb: استینیت، Q: کوارتز، Gn: گالن، Py: پیریت، Gt: گوتیت، Hem: هماتیت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 4. Photographs; (a) Stibnite blade crystals, (b) Inclusion of quartz-rich crystals by stibnite mineralization, (c) Galene, (d) Part of the brecciated pyrite vein, (e) Part of the pyrite crystal mold in which the fine-grained hematite particles as well as the small goethite veins are dispersed and (f) Iron oxide vein that fills the fractures with small amounts of goethite. Abbreviations: Stb: Stibnite, Qtz: Quartz, Gn: Galene, Py: Pyrite, Gt: Goethite, Hem: Hematite (Whitney and Evans, 2010).

Stage Minerals	Preminalization	Hypogene	Oxidized zone
Stibnite		—————	
Clacite	—————		
Pyrite		—————	
Galena		—————	
Quartz	—————	—————	
Barite		—————	
Dolomite		—————	
Hematite			—————
Geotite			—————

شکل ۵- توالی همیافتی کانسار بندان - نیگنان.

Fig. 5. Paragenetic sequence of the Bandan-Neyganan deposit.

میانبارهای مطالعه شده بر اساس فازهای مشاهده شده به چهار

گروه تقسیم می‌شوند:

گروه اول (V): گروهی از میانبارها می‌باشند که تنها از گاز تشکیل شده‌اند (شکل ۵a). گروه دوم (L): این نوع میانبار سیال تماماً از مایع پر شده است و ساده‌ترین نوع میانبار و با فراوانی کم می‌باشد و به اشکال مختلفی دیده شده است (اکثرآ کروی) که احتمالاً حاصل یک باریک شدگی می‌باشند (تک فازی مایع) (شکل ۵b). گروه سوم (L+V): میانبارهای دوفازی غنی از مایع با فراوانی نسبتاً زیاد می‌باشند (شکل ۵c). گروه چهارم سه فازی جامد - مایع - گاز (L+V+S) (شکل ۵d) هستند، که فاز جامد (شفاف) در این نوع میانبارها، توسط حجمی از مایع احاطه شده است (شکل ۵e). میانبارهای گروه اول و دوم فراوانی کمی دارند و به علت تک فازی بودن برای مطالعه ریزدماسنجی استفاده نشده است. میانبارهای نوع سوم به وفور در کانی کوارتز کانسار بندان - نیگنان یافت می‌شود. حضور میانبارهای سیال نوع یک همراه میانبارهای سیال نوع سوم نشان‌دهندی این است که جوشش هنگام تبلور در منطقه رخ داده است (Simmons et al., 2000). به لحاظ ژنتیکی هر سه گروه میانبار سیال اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب در نمونه‌ها مشاهده می‌گردد.

### ریزدماسنجی

هدف اصلی از مطالعات میکروسکوپی و ریز دماسنجی میانبارهای سیال، بازسازی ویژگی‌های PTVX تشکیل بلور و کانه‌زایی است. آزمایش سرمایش - گرمایش بر روی ۴۰ میانبارسیال اولیه انجام شد. برای انجام مطالعات، میانبارهای سیال تا حدود ۹۰- درجه سانتی گراد سرد شده و پس از انجماد کامل، گرم شده‌اند دمای ذوب اولین (Tu) و آخرین بلور یخ (Tm) و دمای همگن شدن (Th) و جهت تعیین شوری از معادله ۱ استفاده شد (Bodnar and Vityk, 1994). در این معادله  $\theta$  برابر با دمای Tm است.

$$\theta - 0.0442 \theta^2 + 0.000557 \theta^3 \text{ Salinity} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$(\text{wt\% NaCl}) 1.78 + 0.00 = 1$$

### پetroگرافی میانبارهای سیال

مطالعات پتروگرافی میانبارهای سیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. میانبارهای سیال و کانی میزبان روابط بسیار پیچیده‌ای دارند که با انجام پتروگرافی به طور دقیق، به راحتی به روابط بین آنها پی‌خواهیم برد (Goldstein and Reynolds, 1994; Van den Kerkhof and Hein, 2001) به دلیل این مهم مطالعات پتروگرافی به صورت دقیق توسط میکروسکوپ پلاریزان در دانشگاه تربیت مدرس انجام گردید.

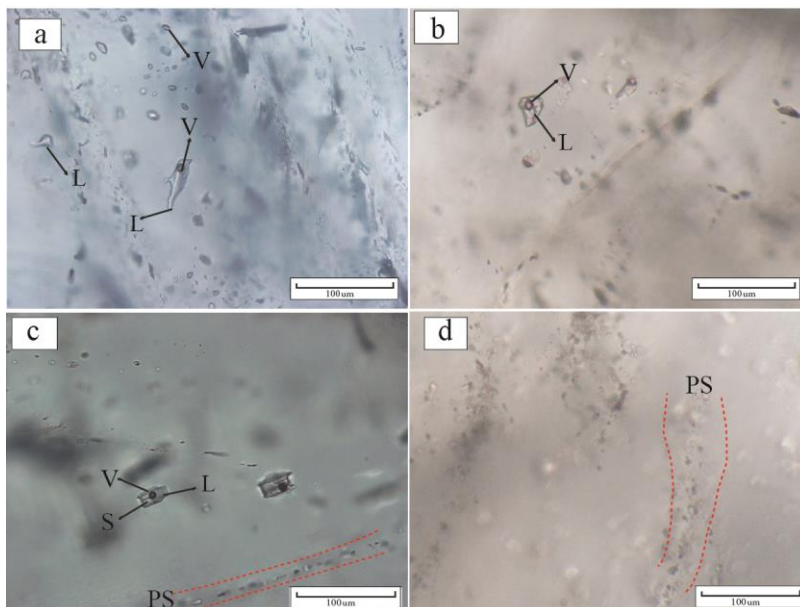
میانبارهای سیال مطالعه شده به طور عمده از نوع اولیه و مقدار کمتر، ثانویه دروغین، مطابق معیارهای (Rodder, 1984) است. تقسیم بندی میانبارهای سیال اولیه موجود در کانی کوارتز طبق تقسیم‌بندی ژنزی و بافت (Roedder ۱۹۸۴) انجام گرفت که اخیراً به وسیله (Van den Kerkhof and Hein 2001) مورد تجدید نظر قرار گرفته شده است.

میانبارهای سیال، به فراوانی و با توزیع متفاوت در کانی کوارتز کانسار بندان-نیگنان وجود دارند. میانبارهای مطالعه شده در این پژوهش مطابق معیارهای رودر (Rodder, 1984) از نوع اولیه و بطور محدود از نوع ثانویه دروغین می‌باشد. ابعاد میانبارهای سیال از چند میکرون تا ۳۰ میکرون متغیر است، اما بیشتر آنها دارای اندازه-ای کوچکتر از ۱۵ میکرون هستند. میانبارهای سیال اولیه به صورت مجزا در زمینه کانی کوارتز پراکنده هستند. میانبارهای سیال ثانویه بصورت خطی در محل شکستگی‌ها قرار گرفته‌اند. میانبارهای سیال ثانویه کاذب به شکل بسیار ریز و بصورت خطی دیده می‌شوند. اشکال مشاهده شده میانبارهای سیال در کانی کوارتز، به ترتیب فراوانی به صورت نامنظم، کشیده، پهن و کروی دیده می‌شوند. تقسیم‌بندی میانبارهای سیال اولیه موجود در کانی آپاتیت چغارت، طبق تقسیم بندی ژنزی و بافت (Roedder ۱۹۸۴) انجام گرفت که اخیراً به وسیله (Van den Kerkhof and Hein 2001) مورد تجدید نظر قرار گرفته شده است.



درجه‌ی سانتی‌گراد است. دمای ذوب آخرین بلور یخ  $0/3$  تا  $7/5$ - با بیشترین فراوانی بین ۱- تا ۲- درجه سانتی‌گراد تعیین گردید، شوری با استفاده از رابطه ۱ بین  $0/5$  تا ۱۱ درصد وزنی معادل نمک طعام با محدوده‌ی فراوانی ۲ تا ۳ وزنی معادل نمک طعام محاسبه شده است.

نتایج حاصل از آنالیز ریز دماسنجی میانبارهای سیال، موجود در کانی کوارتز محدوده‌ی معدنی بندان - نیگنان در شکل ۷ (a تا d) ترسیم شده است. بر اساس بررسی‌های ریزدماسنجی‌های انجام شده، دامنه تغییرات دمای همگن‌شدگی بین ۱۵۰ تا ۲۶۵ درجه‌ی سانتی-گراد بوده، که بیشترین فراوانی در محدوده‌ی دمایی ۲۲۰-۲۴۰



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی میانبارهای سیال در کانی کوارتز آنتیموان بندان - نیگنان؛ (a) تک فاز گاز، تک فاز مایع به همراه دو فاز - های غنی از مایع، (b) دو فازهای غنی از مایع، (c) سه فاز جامد - مایع - گاز و (d) میانبار سیال ثانویه کاذب.

Fig. 6. Photomicrographs of fluid inclusions in quartz mineral at Bandan - Neyganan Stibnite deposit; (a) Monophase gaseous and liquid inclusions along with Two-phase liquid-rich inclusions, (b) Two-phase liquid-rich inclusions, (c) Three-phase solid-liquid-gaseous inclusions, and (d) Pseudo secondary fluid inclusion.

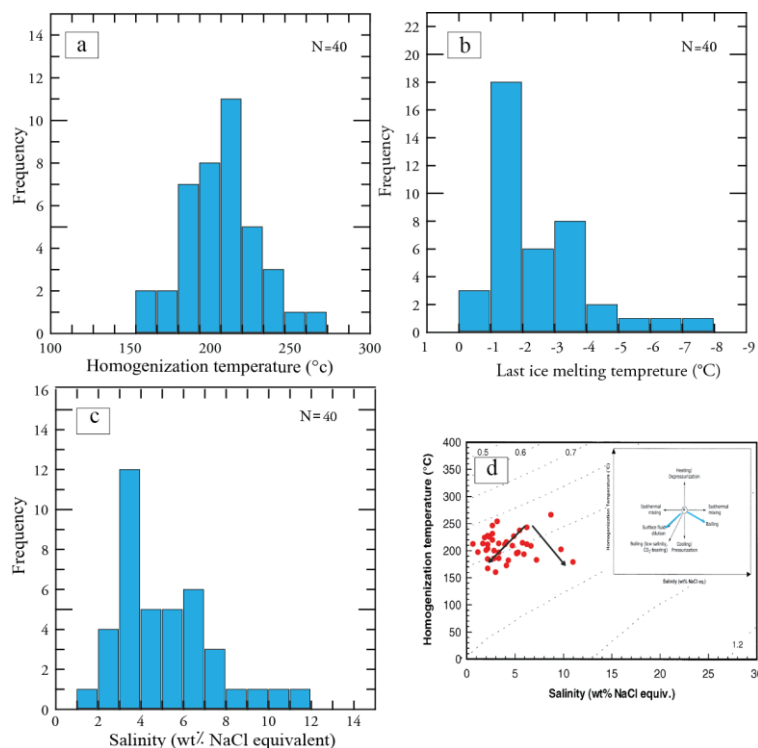
(Hass, 1971) (شکل ۸b). این نمودار نشان می‌دهد که، این فرآیند احتمالاً در عمقی حدود ۱۸۰ متر زیر سطح زمین رخ داده باشد.

### ژنز محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان

با توجه به میزان شوری و دمای همگن‌شدگی محاسبه شده از آزمایش ریزدماسنجی صورت گرفته از کوارتز محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان و بر اساس نمودار پایه Wilkinson (۲۰۰۱) تعیین ژنز محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس داده‌های حاصل از شوری را در مقابل دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال ترسیم گردید و با نمودار پایه ویلکینسون مقایسه شد و همانطور که در شکل ۹ مشخص می‌باشد داده‌های محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان در محدوده - ی کانسار اپی‌ترمال قرار می‌گیرد.

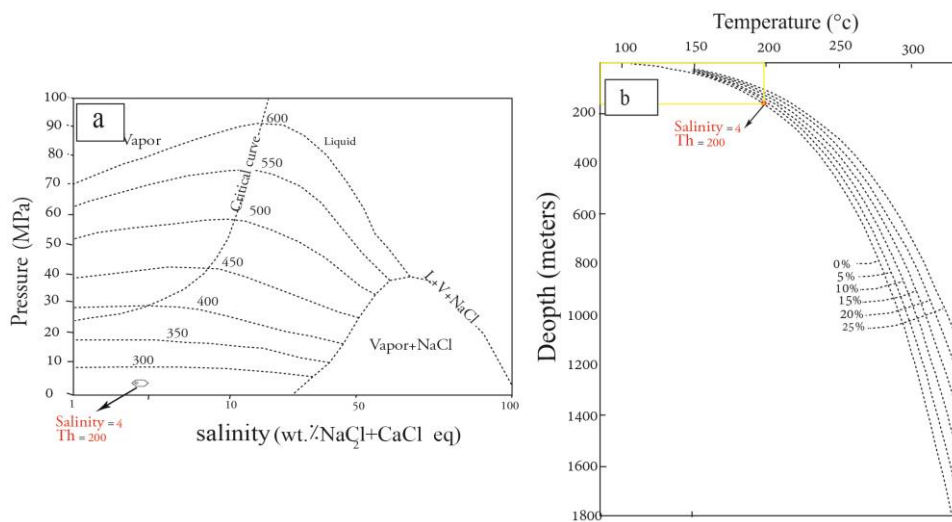
با استفاده از شوری میانبارهای سیال و دمای همگن‌شدن (Zang and Frantz, 1987) می‌توان چگالی سیال را با تقریب نسبتاً خوبی محاسبه نمود (شکل ۷d). چگالی میانبارهای سیال اولیه بر اساس شکل ۷d بین ۰.۸ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغییر است. در روند تکامل سیال گرمایی پدیده جوشش ثانویه و تاثیر آب جوی باعث سردشدگی و کاهش دمای محلول گرمایی، سبب افزایش چگالی، کاهش سرعت سیال کانسنگ ساز و در نهایت نهشت مواد معدنی شده است. شکل ۸a به دام افتادن میانبارهای سیال با دما و شوری پایین را نشان می‌دهد. فشار محاسبه شده محلول گرمایی معادل ۵۰ بار است. بر اساس این نمودار تنوع شوری در میانبارهای سیال به جهت اختلاف سیالات ماگمایی و جوی ایجاد می‌شود (Wilkinson, 2001).

برای تعیین عمق احتمالی کانسار بندان - نیگنان، از نمودار دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال در مقابل شوری استفاده شده است



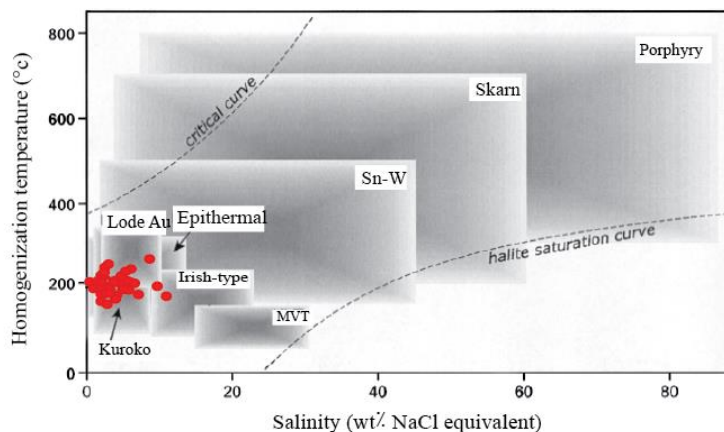
شکل ۷- (a) هیستوگرام دمای همگن شدگی ( $T_h$ )، (b) دمای ذوب آخرین بلور یخ ( $T_m$ )، (c) شوری در میانبرهای سیال اندازه‌گیری شده و (d) نمودار چگالی میانبار سیال.

Fig. 7. (a) Histograms of homogenization temperature ( $T_h$  °C), (b) Last ice melting temperature ( $T_m$  °C), (c) Measured salinity (wt. % NaCl equivalent) of fluid inclusions, and (d) Histograms of densities ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) of fluid inclusions.



شکل ۸- (a) تخمین فشار برای میانبرهای سیال کانسار آنتیموان بندان - نیگنان، تغییر یافته از Bouzari و Clark (۲۰۰۶) و (b) تخمین عمق به دام افتادن سیال درگیر محدوده‌ی آنتیموان بندان-نیگنان (Hass, 1971).

Fig. 8. (a) Pressure estimates for fluid inclusions in stibnite Bandan-Neyganan. Modified after Bouzari and Clark (2006) and (b) Estimation of the depth of fluid entrapment involved in the Bandan-Neyganan deposit (Hass, 1971).

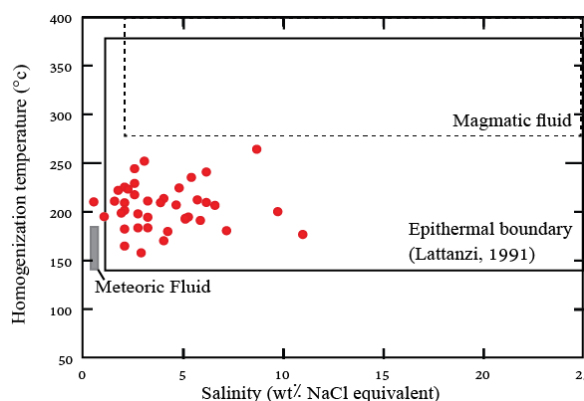


شکل ۹- ترسیم داده‌های میانبارهای سیال کانسار آنتیموان بندان- نیگنان بر روی نمودار پایه Wilkinson (۲۰۰۱).

Fig. 9. Drawing data of fluid inclusions of the Antimony bandan-neyganan deposit on a baseline diagram Wilkinson (2001).

احتمالاً تحول پس روندهی این سیستم‌ها را در فاز دمایی بالا منعکس نموده و توسط سرد شدن تدریجی و اختلاط آب‌های سطحی سرد در داخل سیستم دنبال شده که رقیق‌شدگی و افت دما را در بر داشته است.

همچنین با ترسیم کردن داده‌های دما و شوری میانبارهای سیال موجود در کانی کوارتز محدوده معدنی آنتیموان بندان - نیگنان مشخص گردید، منشاء سیال موثر از نوع اپی ترمال می باشد. با توجه به نمودار شکل ۱۰، روند سرد شدن در کانسار مشاهده می‌شود که



شکل ۱۰- دیاگرام پراکندگی شوری و دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال در کانی کوارتز آنتیموان بندان - نیگنان. نمودار برگرفته از Lattanzi (۱۹۹۱)، Hedenquist و Arribas (۱۹۹۸) و Naden و همکاران (۲۰۰۵).

Fig. 10. Th-salinity diagram for fluid inclusion data at the stibnite Bandan-Neyganan. Base diagram after Lattanzi (1991), Hedenquist and Arribas (1998), Naden et al. (2005).

مبنای تعداد فاز، چهار نوع میانبار سیال تشخیص داده شده است. طبق مطالعات ریزدماسنجی انجام شده بر روی میانبارهای سیال اولیه و دوفازی، دامنه‌ی دمای همگن‌شدگی در کانی کوارتز ۱۵۰ تا ۲۶۵ درجه سانتی‌گراد، محدوده‌ی دمای ذوب یخ بین ۰/۳- تا ۷/۵- درجه‌ی سانتی‌گراد در تغییر است. میزان شوری ۰/۵ تا ۱۱ درصد وزنی معادن نمک طعام محاسبه گردیده است. با توجه به مشاهدات صحرایی، ترکیب کانی‌شناسی داده‌های میانبار سیال (دما و شوری) احتمالاً، کانه‌زایی در این منطقه در شرایط اپی ترمال رخ داده است.

## نتایج

بررسی‌های صحرایی حاکی از آن است که کانی‌سازی آنتیموان در منطقه مورد مطالعه به صورت دیرزاد نسبت به سنگ میزبان انجام شده است. کانی‌سازی عمدتاً به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و توده‌ای و تحت کنترل فضاهای باز شکستگی، درز و شکاف‌ها و فضاهای انحلالی در سنگ میزبان آهکی و دولومیتی انجام شده است. با انجام مطالعات پتروگرافی میانبارهای سیال در محدوده‌ی معدنی آنتیموان بندان - نیگنان بر روی کانی کوارتز، از نگاه ریخت‌شناسی میانبارها عمدتاً از نوع نامنظم، تیغه‌ای، صفحه‌ای و کروی هستند. همچنین بر

## منابع

- Abdi, M., Karimpour, M.H., 2012. Geology, Alteration, Kanizai, Petrogenesis, Senometry, Geochemistry and Geophysics of Exploratory Airborne Kuh-e-Shah, Southwest Birjand. *Journal of Economic Geology* 1(4), 77-107.
- Akcay, M., Ozkan, H.M., Moon, C.J., Spiro, B., 2006. Geology, mineralogy and geochemistry of the gold-bearing stibnite and cinnabar deposits in the Emirli and Halikoy areas (Odemis, Izmir, West Turkey). *Ore Geology Reviews* 29, 19-51.
- Arjmandzadeh, R., 2011. Mineralization, geochemistry, senescence studies and determination of tectono magmatic position of intrusive masses in Deh Salm and Shaljami well mineral index, Lut block, East of Iran, PhD thesis in Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, p. 369.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M., Homam, S. M., 2011. Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 41, 283–296.
- Baba Khani, A.L., Rahimi, M., Jafari Rad, A.L., Sadeghi, M., Del Ara, S.T., 2001. Investigation of the status of antimony reserves to mineralization types, Earth Sciences Conference, Geological Survey of Iran.
- Bodnary, R.H., Vityk, M.O., 1994. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusion, in De Vivo, B., Frezotti, M.L., Eds., *Fluid inclusion in minerals: Methods and applications: International mineralogical association, Short course of the working group, Inclusions in minerals*, 117-130.
- Bouzari, F., Clark, A.H., 2006. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: the Cerro Colorado Hypogene Protore, I Region, Northern Chile. *Economic Geology* 101, 95–134.
- Dor Kav Mining Company, 2016. Report on the Completion of Neganan Metal Element Exploration Operations, p. 46.
- Esmaeily, D., Nedelec, A., Valizadeh, M.V., Moore, F., Cotton, J., 2005. Petrology of the Jurassic Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences* 25, 961-980.
- Flugel, E., 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks*. Springer-Verlag, Germany, 976.
- Goldstein, R.H., Reynolds, T., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals: SEPM Short Course 31, *Society for Sedimentary Geology* 199, 1-43.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology* 66, 940–946.
- Haynes, F.M., 1985. Determination of fluid inclusion compositions by sequential freezing. *Economic Geology* 80, 1436–1439.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits. Philippines. *Economic Geology* 93, 373–404.
- Hoseynkhany, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroodi, A., 2016. Sarkhkooh Copper Veins Copper, Lut Block, East Iran: Mineralization Studies, Fluid Intermediates and Stable Oxygen Isotopes. *Journal of Earth Sciences* 102, 165-176
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S., Malekzadeh Shafaroudi, A., 2011. Review of age, Rb–Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Journal of Geopersia* 1(1), 19–36.
- Karimpour, M.H., 2005. Comparison of Qaleh Zari Cu–Au–Ag deposit with other iron oxides Cu–Au (IOCG-Type) deposits and new classification, Iran. *Journal of Crystallography* 13, 165–184.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroodi, A., Farmer, T., Stern, C.H., 2012. Petrogenesis of Granitoids, U-Pb Zircon Aging, Sr-Nd Geochemistry and Important Occurrence of Tertiary Mineralization in Lut Block, East of Iran. *Journal of Economic Geology* 1, 1-27.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroodi, A., Mazaheri, S.A., Heydarian, M.R., 2007. Magmatism and all kinds of mineralization of copper, gold, tin and tungsten in Lut block, 15th Conference on Crystal and Mineralogy, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., 2009. Advance spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) mineral mapping to discriminate high sulfidation, reduced intrusion related, and iron oxide gold deposits, eastern Iran. *Journal of Applied Science* 9, 815-825.

- Karimpour, M.H., Zaw, K., Huston, D.L., 2005. S-C-O isotopes, fluid inclusion microthermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-oxide Cu-Au-Ag mine, Iran. *Journal of Sciences Islamic Republic of Iran* 16(2), 153-169.
- Lattanzi, P., 1991. Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits. *European Journal of Mineral* 3, 689-697.
- Malekzadeh Shafaroodi, A., 2009. *Geology, Mineralization, Alteration, Geochemistry, Microthermometry, Isotopic Studies and Determining the Origin of Mineralization of Mahrabad and Khopik Exploration Areas, South Khorasan Province*, PhD Thesis in Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad.
- Malekzadeh Shafaroodi, A., Karimpour, M.H., 2012. Mineralogical and thermometric studies of fluids involved in the antimony Sirzar search area northwest of Torbat-e Ham, Khorasan Razavi Province. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 3, 565-582.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H., Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews* 65 (2), 522-544.
- Mosera, M.R., Rankin, H.A., Milledge, J., 1991. Hydrocarbon-bearing fluid inclusions in fluorite associated with the Windy Knoll bitumen deposit, UK. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56, 155-168.
- Naden, J., Killias, S.P., Darbyshire, D.P.F., 2005. Active geothermal system with entrained seawater as modern analogs for transitional volcanic-hosted massive sulfide and continental magmato-hydrothermal mineralization: the example of Milos Island, Greece. *Geology* 33, 541-544.
- Nakhaei, M., Mazaheri, S.A., Karimpour, M.H., Stern, C.R., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Heydarian Shahri, M.R., 2015. Geochronologic, geochemical, and isotopic constraints on petrogenesis of the dioritic rocks associated with Fe skarn in the Bisheh area, Eastern Iran. *Arabian Journal of Geoscience* 1-15.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy* 12, 644.
- Routner, A., Nabavi, M.H., Alavi Naieni, M., 1994. Geological map of Eshgh-Abad, Scale 1:100000, Geological Survey of Iran.
- Samiee, S., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M.R., Klöetzli, U., Santos, J.F., 2016. Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south of Birjand, Iran: Geochemical, Sr-Nd isotopic and U-Pb zircon constraints. *Journal of Asian Earth Sciences* 115, 170-182.
- Shahabpour, J., 2003. *Economic Geology*, Bahonar University of Kerman Publications, 543.
- Shepherd T., Rankin A.H., Alderton D., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusions Studies*, Blackie, Glasgow, 239.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*, Blackie Press, Chapman and Hall, New York, p. 239.
- Simmons, S.F., Simpson, M.P., Mauk, J., 2000. The mineral products of boiling in the golden cross epithermal deposit. *New Zealand Minerals and Mining Conference Proceedings*, 209-216.
- Stöcklin, J., Nabavi, M.H., 1969. Geological map of Boshrouyeh, Scale 1:250000, Geological Survey of Iran.
- Stöcklin, J., Nabavi, M.H., 1973. Tectonic map of Iran, Geological Survey of Iran.
- Van den Kerkhof, A.M., Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos* 55, 27-4.
- Whitney, D.L., Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming mineral. *American Mineralogist* 95, 185-187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit. *Lithos* 55, 229-72.
- Wilson, N.J., Craw, D., Hunter, K., 2004. Contributions of discharges from a historic antimony mine to metalloid content of river waters, Marlborough, New Zealand. *Journal of Geochemical Exploration* 84, 127-139.
- Zhang, Y.G., Frantz, J.D., 1987. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology* 64, 335-350.

