

## Genesis and nature of ore-forming fluids in the Senjedeh gold mine, Central Iran; using microthermometry study

Seyedeh Narges Sadati<sup>1\*</sup>, Zahra Nourian Ramsheh<sup>2</sup>, Mohammad Yazdi<sup>2</sup>

1-Department of Geology, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2-Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**Keywords:** Orogenic gold, Silicified-sulfide alteration, Fluid inclusions, Senjedeh, Sanandaj-Sirjan Zone

### 1- Introduction

Muteh gold mining district is located 60 km southwest of Delijan in the central part of the Sanandaj-Sirjan Zone (SSZ). Historically, Muteh is the most productive gold deposit in Iran and contains more than 1,200,000 tons of reserves at 4 g/tons Au (BHP, 1992), consists of two main ore deposits, including the Chah Khatoon and Senjedeh open pits, and several smaller occurrences. Rock units exposing in the area underwent greenschist to lower amphibolite metamorphism. They consist of NW-SE trending deformed and metamorphosed volcano-sedimentary and acidic volcanic rocks. These units are characterized by several phases of intense deformation that lead to the generation of different fabrics and structures.

The gold mineralization in the study area occurred as quartz - sulfide veins and veinlets along N40W trending, NE dipping normal faults in metarhyolite host rock. Both macroscopic and microscopic scales that transect all metamorphosed and deformed country rocks. The most important hydrothermal alteration types are sericitization, kaolinitization, silicification and sulfidization, which silicified and sulfide alterations are developed in the inner parts of the fault zones adjacent to the mineralized zones. Mineralogical paragenesis includes magnetite, hematite, ilmenite, pyrite, chalcopyrite, galena, and gold.

In recent years, this area has been studied in detail including petrography, petrology, deformation analysis, geochemistry and genesis of gold mineralization, however the genetic type of the Muteh gold deposit are still controversial various genetic interpretations have been suggested, including a metamorphogenic origin, a relationship to granitic intrusions of assumed Precambrian age (Thiele et al., 1968), an exhalative hot-spring origin related to Paleozoic rhyolitic-acidic tuffs (Rashidnejad Omran, 2002), ductile to brittle shear zone hosted gold mineralization (Kouhestani et al., 2014), intrusion-related gold deposits (Moritz et al., 2006) and an orogenic gold deposit (Rashidnejad Omran, 2002; Abdollahi et al., 2009). Consequently, the characteristics of ore fluids and ore genesis still need to be further constrained. In this study, we have performed a combined petrographic, microthermometric of fluid inclusions to constrain the nature and evolution of the ore fluids and discuss the important processes in precipitation of gold. Finally, we propose a genetic type for the Senjedeh gold deposit.

### 2- Methodology

To determine the nature of the ore-bearing fluids and fluid inclusion studies, nineteen samples were selected for from the quartz veins. Microthermometric measurements were made on 100- $\mu$ m-thick doubly polished wafers.

### 3-Results and discussion

According to the nature of the phase relationships at room temperature and the phase transitions during heating and cooling, five types of fluid inclusions were recognized in the studied quartz samples: aqueous + vapor ( liquid rich, type I), H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> + NaCl (type II), L + V + Ha  $\pm$  S? (Poly phase, type III), monophase aqueous inclusions (type IV)

\* Corresponding author: Sadati\_sn@uma.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2020.28994.1961

Received 2019-03-24

Accepted 2020-11-06

and monophasic gaseous inclusions (type V). Type I inclusions display homogenization temperatures ( $T_h$ ) of 105–200°C, with salinities of 2.5–17.6 wt.% NaCl equivalent, type II inclusions show  $T_h$  of 195–340°C, but salinity values with 5–21 wt.% NaCl equivalent and type III inclusions yield  $T_h$  of 195–337°C and salinities of 31–41 wt.% NaCl equivalent. Type III inclusions related to barren quartz veins.

Petrographic evidence reveals that type I and II fluid inclusions coexist in the gold-bearing quartz veins. They show different homogenization temperature ranges and salinity values.

The behaviors during the heating process demonstrated that inclusions homogenized to the liquid phase and low frequency of type (V) indicate that mixing process has taken place during the main ore stage. Also according to the wide range of homogenization temperatures, perhaps cooling is one of the important factors in gold precipitation from the ore solutions. Fluid-inclusion studies showed that the ore fluids in the Senjedeh gold deposit were  $H_2O-CO_2-NaCl-CH_4$  solutions. These fluid compositions are similar to many orogenic gold deposits.

#### 4- Conclusions

Evidence from fluid inclusion microthermometry studies indicating the  $CO_2$  bearing ore-forming fluids with characterized by the mean homogenization temperature of 280°C, low salinity (average salinity of 11 wt. % NaCl). Furthermore, results from petrography, temperature and fluid inclusion homogenization (homogenization to fluid) indicates that the main factor for complexes instability and finally gold precipitation along with sulfides, is the fluid mixing, one of which a high-temperature fluid of low to moderate salinity and the other a low-temperature and low salinity fluid.

Based on field studies, mineralogical studies, microthermometry and fluid inclusion microanalysis, Senjedeh gold deposit can be classified as orogenic gold mineralization. Therefore, at the Senjedeh and Muteh mining district, gold mineralization occurred during the final stages of Zagros orogeny commenced with the development of extensional tectonics regime, accompanied by the uplift, prograde metamorphism and multistage normal faulting of the study area.

#### References

- Abdollahi, M.J., Karimpour, M.H., Kheradmand, A., Zarasvandi, A.R., 2009. Stable Isotopes (O, H, and S) in the Muteh Gold Deposit, Golpaygan Area, Iran. *Natural Resources Research* 18, 137– 1510.
- BHP Engineering Pty Ltd, 1992. Muteh gold project. Report. No. RE-00581.
- Kouhestani, H., Rashidnejad-Omran, N., Rastad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R.J., Ghaderi, M., 2014. Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 91, 89–106.
- Moritz, R., Ghazban, F., 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.
- Rashidnejad-Omran, N., Emami, M.H., Sabzehei, M., Rastad, E., Bellon, H., Piqué, A., 2002. Lithostratigraphie et histoire paléozoïque à paléocène des complexes métamorphiques de la région de Muteh, zone de Sanandaj-Sirjan (Iran méridional). *Comptes rendus Geoscience* 334, 1185–1191.
- Thiele, O., Alavi, M., Assefi, R., Hushmand-zadeh, A., Seyed-Emami, K., Zahedi, M., 1968. Explanatory text of the Golpaygan quadrangle map 1:250,000, Geological Survey of Iran, Geological Quadrangle E7, p. 24.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Sadati, S.N., Nourian Ramsheh, Z., Yazdi, M., 2022. Source identification and health risk assessment of uranium in Tahlab aquifer, Taftan geothermal area-SE Iran. *Adv. Appl. Geol.* 11(4), 753-769.

DOI: 10.22055/AAG.2020.28994.1961

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_16250.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_16250.html?lang=en)

## تعیین زایش و ماهیت سیال کانه‌دار در معدن طلا سنجد، ایران مرکزی با استفاده از مطالعات ریزدماسنجی

### سیالات درگیر

سیده نرگس ساداتی\*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

زهرا نوریان رامشه

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمد یزدی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۹

\*Sadati\_sn@uma.ac.ir

### چکیده

معدن طلا سنجد در ۶۰ کیلومتری جنوب‌باختری دلیجان و در بخش مرکزی پهنه سنجد - سیرجان واقع شده و یکی از معادن فعال منطقه معدنی موته است. کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه به صورت رگه -رگچه‌ها و عدسی‌های کوارتز - سولفید در کانسنگ میزبان متاریولیتی و در امتداد گسل نرمال با روند N40W و شیب به سمت شمال شرق رخ داده است و غالباً بر گوارگی را قطع می‌کنند. از مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در منطقه می‌توان به دگرسانی‌های سریسیتی، کلریتی، کربناتی، سیلیسی و سولفیدی شدن اشاره کرد. دگرسانی‌های سیلیسی و سولفیدی شدن بیشترین گسترش را در زون‌های گسلی داشته و منطبق بر پهنه‌های کانه‌دار هستند. بر اساس پتروگرافی سیالات درگیر پنج گروه سیال درگیر در کانسار سنجد شناسایی شد که سیال درگیر غالب از نوع سیالات درگیر اولیه نوع دو فاز  $L+V$  (نوع I) با فازهای غالب  $CO_2$  و  $H_2O$  است. شواهد به دست آمده از مطالعات ریزدماسنجی سیالات درگیر نیز نشان می‌دهد که سیالات کانه‌دار از نوع غنی از  $CO_2$  با میانگین دمای همگن‌شدن ۳۰۰ درجه سانتیگراد و شوری میانگین ۱۱ wt % NaCl می‌باشند که نشان‌دهنده نقش غالب سیالات دگرگونی در کانه‌زایی است. نتایج به دست آمده از مطالعات پتروگرافی، دما و نحوه همگن‌شدن سیالات درگیر (همگن‌شدن به مایع)، نشان می‌دهد سیالات آزاد شده طی دگرگونی پیش‌رونده در طی بالآمدگی با سیالات ماگمایی و سیالات جوی گرم شده که از طریق همین گسل‌ها ممکن است تا اعماق چند کیلومتری نفوذ کرده باشند، اختلاط پیدا کرده و سبب دگرسانی و کانه‌زایی در امتداد گسل‌های نرمال شده است. بر اساس شواهد زمین‌شناسی، دگرسانی و ریزدماسنجی و مقایسه آن با کانسارهای شاخص ایران و جهان زایش کانسار طلای سنجد را می‌توان از نوع طلای کوهزایی دانست.

**کلمات کلیدی:** سیالات درگیر، کانه‌زایی طلای کوهزایی، سنجد، منطقه موته، سنجد - سیرجان

### مقدمه

به‌خصوص اسیدی و گرانیتی (استوک و باتولیت) به‌طور مکرر مورد هجوم واقع شده‌اند. این توالی‌ها تحت تاثیر فازهای متعدد و شدید دگرریختی نظم و ترتیب اولیه خود را از دست داده و ساختارها و فابریک‌های متفاوتی را به‌وجود آورده‌اند.

در سال‌های اخیر تعیین زایش و ماهیت سیال کانه‌دار در نهشته‌های طلای موته یکی از مسائل بحث‌برانگیز بین محققین مختلف شده است. Paidar-Saravi (۱۹۸۹) برای این کانسارها منشأ دگرگونی در نظر گرفته و از پیریت‌های اولیه موجود در منطقه به‌عنوان منشأ احتمالی طلا نام برده است. برخی از محققین اعتقاد دارند که تشکیل این کانسارها در ارتباط با توده‌های گرانیتوئیدی موجود در منطقه است (Samani, 1998; Moritz and Ghazban, 1996; Moritz et al., 2006) و برخی اعتقاد دارند که مرتبط با بسته‌شدن نئوتتیس و برخورد صفحه عربی به

منطقه معدنی موته در ۶۰ کیلومتری جنوب باختری دلیجان در استان اصفهان و در بخش مرکزی پهنه سنجد - سیرجان واقع شده است. این منطقه به‌عنوان اولین و مهم‌ترین منطقه تولید طلا در ایران می‌باشد که دارای دو معدن فعال روباز به نام چاه‌خاتون و سنجد و چندین اندیس کوچک‌تر می‌باشد که به‌علت قرارگیری منطقه در محدوده حفاظت‌شده محیط‌زیست و دارا بودن گونه‌های جانوری، اجازه استخراج برای معادن کوچک‌تر صادر نگردیده است.

واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه که در حد رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت زیرین دگرگون شده‌اند، شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی، ولکانیکی و ولکانی‌کلاستیک با امتداد عمومی شمال‌شرق - جنوب‌غرب می‌باشد که توسط توده‌های نفوذی بازیک (سیل و دایک) و

## مواد و روش‌ها

کانه‌زایی کانسار سنجد به صورت رگه - رگچه‌ها و عدسی‌های کوارتز - سولفید در سنگ میزبان متاریولیتی و در امتداد گسل نرمال رخ داده است، این رگچه‌ها معمولاً فابریک‌های دگرگونی را قطع کرده و رگچه‌های مرتبط به کانه‌زایی همگی مربوط به یک نسل می‌باشند و کانی‌شناسی یکسانی دارند. بر این اساس تعداد ۱۹ نمونه از رگچه‌های کوارتز از پله‌های مختلف معدن جهت تهیه مقاطع دوبر صیقل برداشت شد. عموماً سیالات درگیر در کانسارهای طلای واقع در محیط‌های دگرگونی (نظیر منطقه معدنی موته) کوچک‌تر از ۲۰ میکرون می‌باشد و این ریزبودن یکی از مشکلات مطالعه سیالات درگیر در این کانسارها می‌باشد (Wilkinson, 2001)؛ از این رو در این مطالعه سعی شده است، ادخال‌های بزرگتر از ۵ میکرون در مطالعات ریزدامسنجی مورد استفاده قرار گیرند. قابل ذکر است که جهت دستیابی به سیالات درگیر با اندازه درشت‌تر - به منظور جلوگیری از ترکیب سیال درگیر - مقاطع تهیه شده دارای ضخامت ۱۰۰ میکرومتر هستند. مراحل مختلف آماده‌سازی نمونه، مطالعات پتروگرافی و اندازه‌گیری پارامترهای دمایی در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران به کمک استیج Linkam مدل THMS600 نصب شده بر روی میکروسکوپ ZEISS، صورت گرفت. دامنه حرارتی دستگاه ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد است. همچنین این دستگاه مجهز به دو کنترل گر گرمایش (TP94) و سرمایش (LNP)، مخزن ازت (جهت پمپ نیتروژن برای انجام) و مخزن آب (جهت خنک کردن دستگاه در دمای بالا) می‌باشد. کالیبراسیون Stage در گرمایش با دقت 0/6 درجه بوده که با نیترات سزیم (Cesium nitrate) با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتیگراد صورت پذیرفت و در انجام با دقت 0/۲ درجه و با ماده استاندارد ان‌هگزان (n-Hexane) با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتیگراد انجام گرفت. قابل ذکر است که دستگاه با سیالات درگیر مصنوعی CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O کالیبره شده است.

## زمین‌شناسی منطقه

نوار دگرگونی - ماگمایی منطقه موته که در بخش شمال باختری زون سنجد - سیرجان و شمال خاوری گلپایگان واقع شده، شامل ردیفی از سنگ‌های رسوبی (آواری، پلیتی و آرزلیتی، شیمیایی - بیوشیمیایی)، آتشفشانی (بازیک و اسیدی) و آتشفشانی - رسوبی دگرگونه و چین خورده می‌باشد که فازهای متعددی از دگرگونی و دگرریختی را تجربه کرده است. منطقه معدنی موته در بخش مرکزی این زون عمدتاً شامل سنگ‌های دگرگونی با سن پالئوزوئیک تا کرتاسه همراه با توده‌های نفوذی با سن ژوراسیک تا ائوسن می‌باشد (Masoudy, 1997) (شکل ۱). معدن سنجد در ۷ کیلومتری شمال غرب کارخانه استحصال طلای موته در بخش مرکزی زون سنجد - سیرجان واقع شده که خود بخشی از کمربند کوهزایی و متالوژنی آلپ هیمالیا است. این سیستم کوهزایی سبب تشکیل تیپ‌های مختلف کانساری طلا در ارتباط با جداسازی، فرورانش، تصادم و پس از تصادم قاره‌ای شده است. متالوژنی طلا در کوهزاد زاگرس طی ژوراسیک تا

ایران می‌باشد (Abdollah Pour Kouhestani et al., 2005, 2014; Hasani et al., 2016; Mohajjel, 1999) تشکیل کانسارهای طلای منطقه را در ارتباط با تکتونیک کششی هم‌زمان با نفوذ توده‌های گرانیته و در امتداد پهنه‌های برشی شکنای گسل‌های نرمال در سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی عنوان کرده‌اند. Rashidnejad Omran (2001) یک منشا برون‌دمی به صورت پیریت‌های طلا دار مرتبط با توف‌های اسیدی - ریولیتی پالئوزوئیک برای کانسارهای منطقه در نظر می‌گیرد که در خلال حوادث دگرگونی و دگرریختی، همراه با سنگ‌های میزبان، تحولات دگرگونی و دگرریختی را تجربه کرده و ضمن چین خوردگی و پویایی دوباره، تمرکز و آرایش دوباره‌ای یافته و سرانجام به صورت رگه‌های سیلیسی - سولفیدی طلا دار در پهنه‌های برشی و یا گسله‌های نرمال، مدت‌ها پس از اوج دگرگونی، در مرحله بالآمدگی کششی ترشیری، تشکیل و جایگزین شده‌اند. Yousefinia (2005)، با مطالعه کانه‌زایی‌های بخش شکنا در چاه خاتون و سنجد، پدیده اختلاط (Mixing) را در تشکیل پهنه‌های طلا دار و پدیده سردشدن (Cooling) را برای تشکیل پهنه‌های عقیم موثر دانسته و معتقد است که طلا تحت شرایط احیایی به صورت Au(HS)<sub>2</sub> حمل و انتقال یافته و در اثر نهشت سولفیدها، رقیق شدگی سیال در اثر اختلاط با آب‌های جوی، سردشدن ساده و تغییرات pH ته‌نشست یافته است. Mehrabi و همکاران (2012) در مقاله‌ای به بررسی سیالات درگیر جهت شناسایی زایش کانسار موته پرداخته‌اند و کانسار موته را از نوع کانسارهای طلای مرتبط با توده نفوذی معرفی کرده‌اند (Mehrabi et al., 2012).

با وجود مطالعات متعدد صورت گرفته در منطقه موته به نظر می‌رسد که بررسی هر یک از معادن و شناخت ویژگی‌های منحصر به فرد هر کدام از کانسارهای موجود در منطقه ضروری به نظر می‌رسد؛ زیرا مطالعه دقیق و جامع کانسارهای طلای منطقه با تاکید بر یافتن منشا سیالات کانه‌دار به وسیله مطالعات سیالات درگیر می‌تواند به ارائه مدل زایشی آن منجر گردد. نتایج حاصل می‌تواند برخی از پرسش‌های مهم در مورد کانسارهای منطقه را پاسخ داده و راه‌کارهای اکتشافی علمی موثری را برای تعیین استراتژی اکتشاف به منظور یافتن کانسارهای مشابه و کسب اطلاعاتی درباره خصوصیات و شیمی سیال و فرایندهای مسئول ته‌نشست سیال کانه‌دار ارائه کند (Latifi Saei et al., 2016; Uemoto et al., 2002; Fuente et al., 2016). همچنین با مطالعه سیالات درگیر در این مناطق می‌توان ویژگی‌های مهم سیال کانه‌دار (دما، شوری، چگالی)، سیر تکاملی آن‌ها و فرایندهای زمین‌شیمیایی مؤثر در نهشت آن‌ها مانند پدیده‌های جوشش (boiling)، اختلاط (mixing) و جدایش فازی (phase separation) را تا حدودی شناسایی کرد (Hezarkhani Hajizadeh, 2011; Kouhestani et al., 2015).

در این پژوهش به منظور بررسی فرایندهای مهم در ته‌نشست و تعیین زایش کانسار، مطالعه سیالات درگیر به عنوان روشی تحقیقی جهت شناسایی ترکیب سیالات گرمایی مرتبط با کانه‌زایی طلا و بررسی شرایط دما و فشار این سیالات انجام شده است.

داخلی زون کانه‌دار دارند و منطبق بر این زون هستند، دگرسانی کربناتی و سرسیتی در بخش‌های میانی و دگرسانی کلریتی در بخش‌های بیرونی و به‌طور کلی در تمام واحدهای سنگی منطقه رخمون دارد. دگرسانی آرژیلیتی بیشتر در ارتباط با آب‌های جوی بوده و سوپرژن می‌باشد، به‌طوری که گسترش آن بیشتر در بخش‌های فوقانی است. بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی نشان‌دهنده ارتباط مکانی و زمانی دگرسانی گرمایی با دگرشکلی و کانه‌زایی است. به‌طوری‌که از نظر مکانی دگرسانی‌های شدید سولفیدی و سیلیسی در بخش‌هایی که گسل‌های نرمال دیده می‌شوند، حداکثر است و استخراج از کانسار نیز در امتداد گسل اصلی منطقه صورت گرفته که دارای حداکثر عیار کانه‌زایی است. رگه‌های کوارتزی کانه‌دار در بعضی نقاط دارای کوتاه‌شدگی و ضخیم‌شدگی و عموماً قطع‌کننده بر گوارگی و ساختارهای دگرگونی هستند، این مسئله نشان‌دهنده تزریق سیالات گرمایی منطقه و تشکیل رگه‌های کوارتز طلا‌دار همزمان با نکتونیک فعال منطقه می‌باشد که این عامل باعث تشکیل رگه‌های کوارتزی ساخت بودیناژ شده است (شکل ۲c). در کانسار سنجده بر اساس مطالعات بافتی و کانی-شناسی سه نسل کوارتز شناسایی شد که عبارتند از: کوارتزهای پیش از دگرشکلی که فاقد سولفید می‌باشند. براساس مطالعات میکروسکوپی این کوارتزها به صورت بلورهای درشت پورفیروکلاست در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند، در این نوع از کوارتزها پدیده خردشدگی و خاموشی موحی به‌شدت توسعه یافته است. کوارتزهای نسل دوم که مربوط به فاز گرمایی کانه‌دار می‌باشند و شامل رگه‌های کوارتز با اندازه بلورهای متوسط و حاوی سولفید هستند. نسل سوم کوارتز شامل کوارتزهای ریز بلور می‌باشند که این ریزبلور بودن نشان‌دهنده افت دما و فشار محیط می‌باشد.

براساس مطالعات کانه‌نگاری و الکترون میکروپروب، پیریت، کالکوپیریت و گالن کانه‌های سولفیدی کانسار سنجده را تشکیل می‌دهد که پیریت فراوان‌ترین و مهم‌ترین کانه در ارتباط با کانه‌زایی طلا می‌باشد. (شکل ۲d). بنابر مطالعه Nourian ramsheh و همکاران (۲۰۱۶) دو نسل پیریت در این کانسار شناسایی شده است، پیریت‌های دگرشکل شده نسل اول که دارای میزان بالای طلا (۸۱۰ ppm) در شکستگی‌ها می‌باشند و پیریت‌های درشت بلور نسل دوم که دارای میزان طلای پایین تا متوسط (۱۱۰ ppm) می‌باشند.

در نمونه‌های سنجده به ترتیب فراوانی دارای اشکال نامنظم، کشیده و کروی هستند (شکل ۲a و ۲b). اندازه سیالات درگیر در کانسار سنجده غالباً ریز تا بسیار ریز می‌باشد و عموماً در محدوده ۱۰-۵ میکرون می‌باشند (شکل ۲c و ۲d). سیالات با اندازه ۱۰ میکرون از نظر فراوانی کمتر هستند. در این نمونه‌ها، فراوانی سیالات درگیر (به‌ویژه ثانویه) در نمونه‌ها فراوان بوده و با توجه به اهمیت کمتر سیالات درگیر ثانویه و ریزبودن آن‌ها و همچنین اجتناب از خطا در تشخیص این نوع از سیالات درگیر، از مطالعه آن‌ها صرف‌نظر شد و به مطالعه سیالات درگیر اولیه پرداخته شد. قابل‌ذکر است که در تعدادی از نمونه‌ها، سیالات درگیر مناسبت از نوع اولیه (Primary)

ترشیری رخ داده است (Aliyari, 2011). سنگ میزبان معدن، گنبد ریولیتی و فلسیک شیبست کوه سیاه است که بخش‌های طلا‌دار اقتصادی آن، در سه زون برشی با گسل‌های نرمال و ضخامت ۳ تا ۶ متر واقع شده‌اند (شکل ۱). جنس این سنگ‌ها، متاریولیت خاکستری‌رنگ خردشده و به‌شدت سیلیسی‌شده‌ای است که طلا در آنها متمرکز شده است. زون‌های برشی توسط بخش‌های باطله متاریولیتی خاکستری متمایل به قهوه‌ای کثیف از هم تفکیک شده‌اند. این قسمت‌ها همگی بخشی از کمپلکس شیبست سبز می‌باشند (شکل ۲a).

مطالعات ساختاری انجام‌شده در منطقه موه، نشان‌دهنده شکل‌گیری آن طی چندین مرحله دگرشکلی می‌باشد که سبب چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی منطقه شده است. بارزترین پدیده دگرشکلی در منطقه به‌صورت گسلش نرمال جوان با روند N40W می‌باشد که فابریک‌های دگرگونی را قطع کرده است. تمام زون‌های دگرسانی و کانه‌زایی در امتداد این گسل‌ها دیده می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده نقش ژنتیکی این گسل‌ها در سنجده و بلکه کل منطقه موه می‌باشد. در اصل این گسل‌ها مانند مجرای برای صعود محلول‌های کانه‌دار عمل کرده‌اند؛ در کانسار سنجده نیز دگرسانی و کانه‌سازی اصلی در ارتباط با گسل نرمال با روند N40W می‌باشد (شکل ۲b).

در منطقه مورد مطالعه سنگ میزبان کانه‌زایی تحت تاثیر درجات مختلف دگرسانی قرار گرفته است. دگرسانی گرمایی همراه با رخداد طلا در این ناحیه با سفیدشدگی سنگ دیواره و یا سنگ میزبان همراه است. این دگرسانی به‌صورت متقارن در اطراف رگه‌ها وجود دارد (Moritz and Ghazban, 1996). دگرسانی غالب در سنگ‌های میزبان معدن سنجده، اغلب از نوع سیلیسی است که به‌صورت رگه و بیشتر در محل تراکم درزه‌ها شکل گرفته است (شکل ۲c). علاوه بر این در بعضی نقاط دگرسانی سرسیتی و در بخش‌هایی از معدن نیز دگرسانی آرژیلیک (کائولینیتی‌شدن) غالب است، پیریتی‌شدن، لیمونیتی‌شدن و همچنین آثاری از فلدسپاتی‌شدن (از نوع آلبیت) نیز دیده می‌شود (شکل ۲b).

در بخش‌های کانه‌دار الگوی زون‌بندی دگرسانی مشابه اکثر کمرندهای دگرگونی طلا‌دار مشاهده می‌شود (Goldfarb et al., 2005). به‌نحوی که دگرسانی‌های سولفیدی و سیلیسی بیشترین گسترش را در بخش‌های

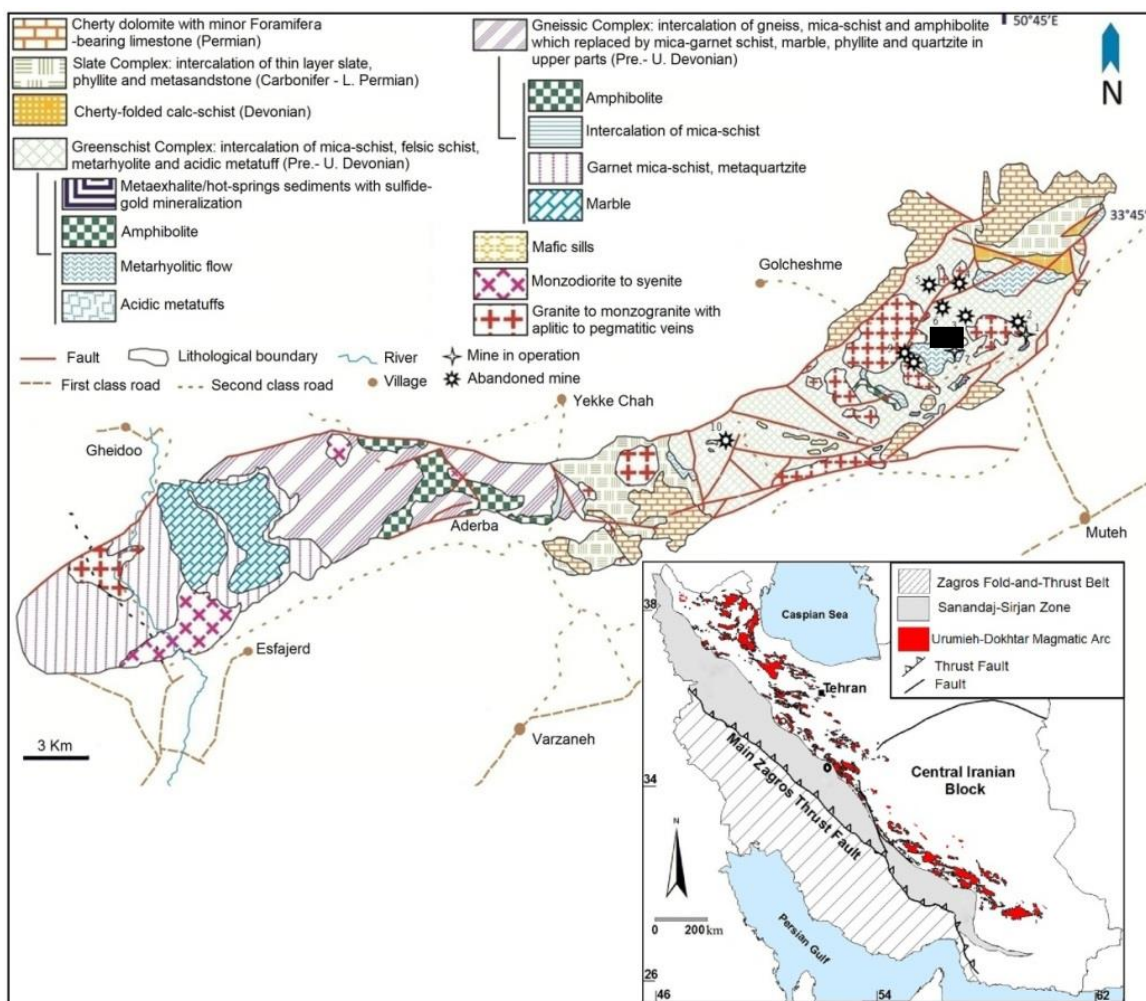
## نتایج

### رده‌بندی سیالات درگیر

به‌منظور طبقه‌بندی سیالات درگیر از نظر منشأ و نوع آن‌ها بر مبنای محتوا یا به‌عبارت‌دیگر ترکیب فازهای مشاهده‌شده در دمای اتاق، از معیارهای Roedder (۱۹۸۴) و Shepherd و همکاران (۱۹۸۵) استفاده شده است. سیالات درگیر از لحاظ شکل متفاوت می‌باشند و این اشکال تا حدودی به‌وسیله ساختمان بلوری کانی میزبان کنترل می‌شود (Wilkinson, 2001). به‌طور کلی از لحاظ شکل ظاهری، سیالات درگیر

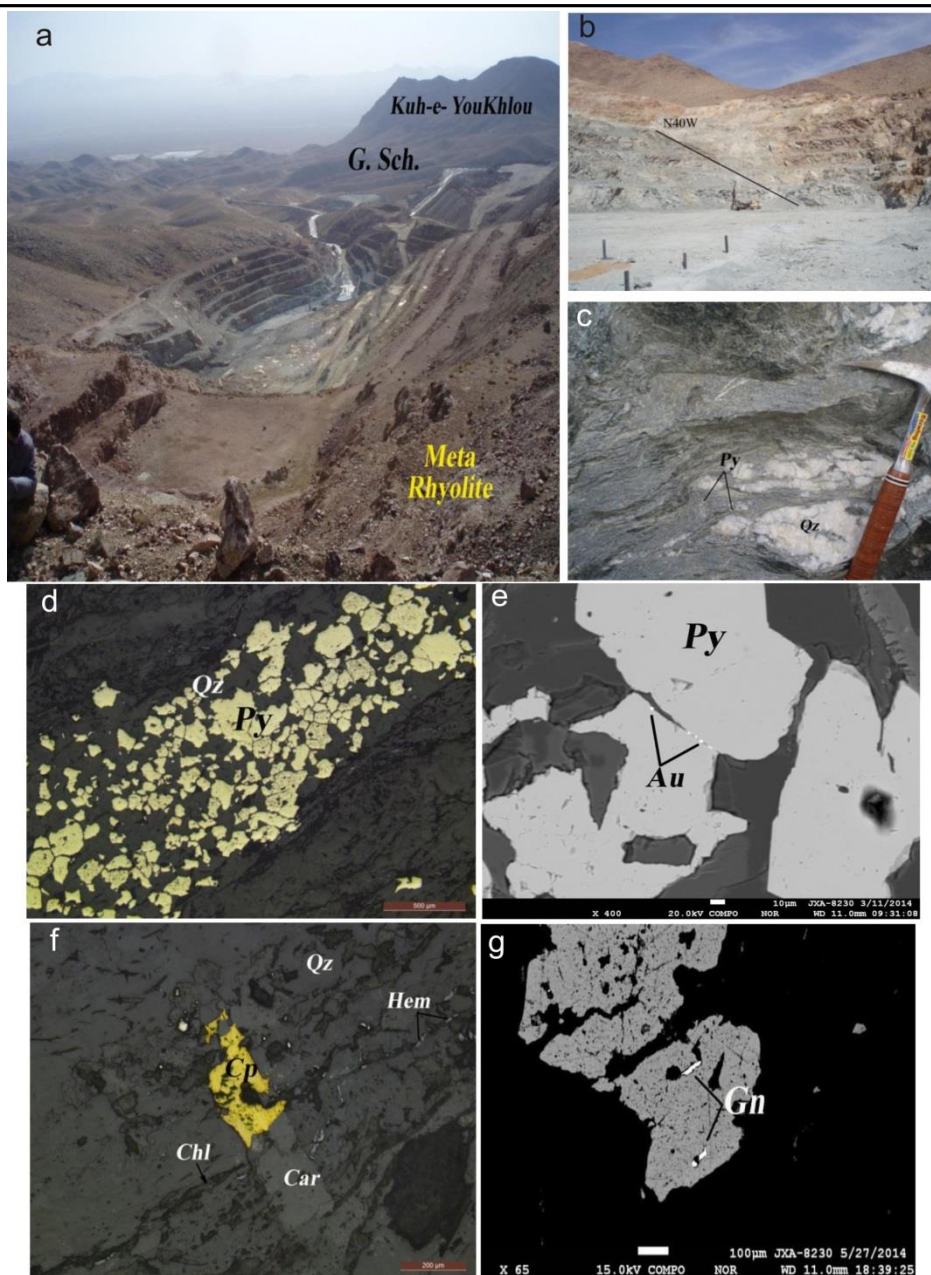
- I: دوفازی مایع-گاز L+V (Liquid rich)  
 II: سیستم  $H_2O-CO_2+NaCl$   
 III: چندفازی L+V+Ha±S?  
 IV: تک فاز مایع L (Liquid)  
 V: تک فاز گاز (Gas)

جهت مطالعات ریزدماسنجی یافت نشد. مطالعات پتروگرافی سیالات درگیر با بزرگنمایی‌های ۵۰۰، ۶۲۵ و ۸۰۰ انجام گرفته است. سیالات درگیر براساس ترکیب سیال و تعداد فازهای موجود در دمای اتاق تقسیم‌بندی می‌شوند. براین اساس سیالات درگیر موجود در نمونه‌ها شامل انواع زیر می‌باشند و دارای آرایش خطی هستند (شکل ۳a و b):



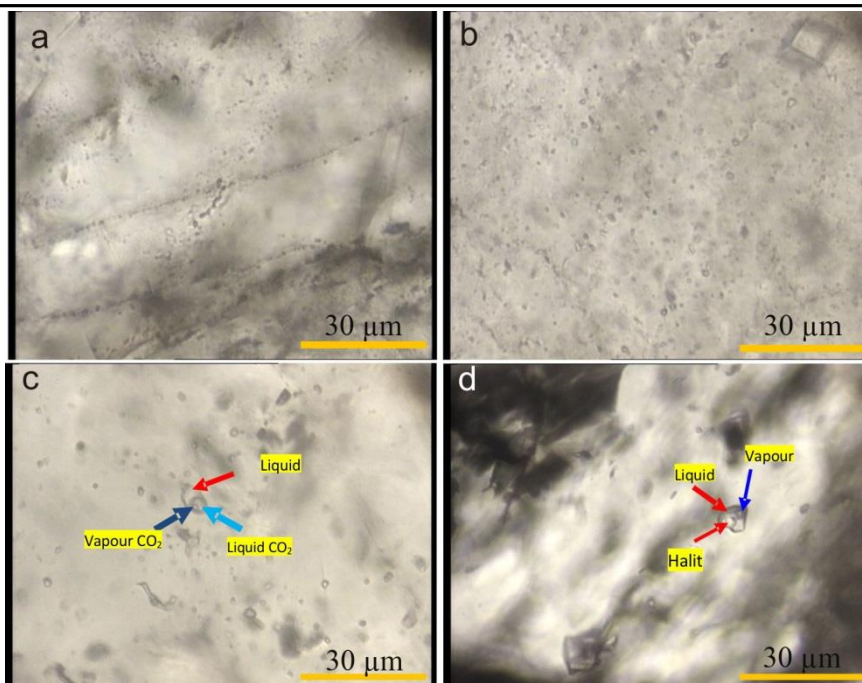
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی موته نشان‌دهنده رخدادهای کانه‌زایی طلا شامل؛ ۱. چاه خاتون، ۲. دره اشکی، ۳. چشمه گوهر، ۴. سه کلوه ۵. تنگه زر، ۶. چاه علومه، ۷. سنجده، ۸. قروم قروم، ۹. چشمه دستار و ۱۰. چاه باغ می‌باشد (Kouhestani et al. 2014). منطقه مورد مطالعه با مستطیل مشکی مشخص شده است.

Fig. 1. Geological map of the Muteh mining district; 1 Chah Khatoun, 2 Darreh Ashki, 3 Cheshmeh Gowhar, 4 Sekolop, 5 Tangeh Zar, 6 ChahAllumeh, 7 Senjedeh, 8 Ghorom Ghorom, 9 Cheshmeh Dastar, 10 Chah Bagh (Kouhestani et al., 2014). The study area is marked with a black rectangle.



شکل ۲- (a) نمایی از معدن سنجده، شیست‌های سبز، واحدهای متاریولیتی و نمایی از کوه یوخلو (دولومیت پرمین)، دید به سمت جنوب، (b) نمایی نزدیک از معدن سنجده و عملکرد گسل اصلی نرمال، آرژیلیتی شدن به وضوح با رنگ سفید در تصویر دیده می‌شود، (c) دگرسانی سیلیسی و رگه‌های کوارتز طلا دار با ساخت بودیناز، (d) تصویر میکروسکوپی از رگه کوارتز و پیریت، (e) تصویر BSE از پیریت و کوارتز، (f) تصویر BSE از پیریت، (g) تصویر میکروسکوپی رگچه کربنات (Car) - کالکوپریت (Cp)، به همراه کوارتز (Qz)، کربیت (Chl)، هماتیت (Hem)، (کانی‌های باطله در نور عبوری مطالعه شده اند) و (g) تصویر BSE کانی پیریت دارای انکلوزیون گالن (Gn).

Fig. 2. (a) Photograph of the Senjedeh gold deposit, green schists, metarhyolitic units and a view of the Yokhlu Mount (Permian dolomite), looking towards the south (showing the various types of rock unit), (b) A close-up view of the mine and the main normal fault function, argillitization clearly seen in white, (c) Silicic alteration and gold-bearing quartz veins with budding formation, (d) Microscopic image of quartz vein and pyrite, (e) BSE image of pyrite and free gold accumulation at the boundary between pyrite grains, (f) Microscopic image of carbonate vein (Car) - chalcopyrite (Cp), with quartz (Qz), chlorite (Chl) and hematite (Hem), (Gangue minerals studied in transmitted light), and (g) BSE image of pyrite with galena inclusions (Gn).



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی از انواع سیالات درگیر مشاهده شده در نمونه‌های کوارتز مربوط به کانسار سنجده؛ (a) نمونه‌ای از سیالات درگیر ثانویه به شکل خطی، (b) صفحه‌ای، (c) سیال درگیر نوع II حاوی مایع آبگین و فاز CO<sub>2</sub> مایع و گاز و (d) سیال درگیر نوع III حاوی فاز جامد نمک (Halit) و مایع آبگین و بخار.

Fig. 3. Photomicrographs of different types of fluid inclusions observed in quartz samples from Senjedeh gold deposit. Secondary fluid inclusion showing (a) liner and (b) planar array, (c) type II fluid inclusion with liquid, vapour CO<sub>2</sub> and liquid CO<sub>2</sub>, and (d) type III fluid inclusion with solid phase (Halite), liquid and vapour.

### سیالات درگیر II: سیستم H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>+NaCl

در تیپ II، سیستم CO<sub>2</sub> دار به وفور مشاهده می‌شود (شکل‌های ۳c و ۴c)، بیشتر این سیالات درگیر به صورت سیستم H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl بوده و تعداد کمتری به صورت H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> هستند. اغلب این سیالات دارای اندازه کمتر از ۱۰ میکرون هستند و به صورت سیالات درگیر منفرد با توزیع تصادفی دیده می‌شوند. به نظر می‌رسد با توجه به نوع رخداد و همراهی آن‌ها با سیالات نوع I (شکل ۴c)، از نوع اولیه هستند.

### سیالات درگیر نوع III: چندفازی L+V+Ha±S

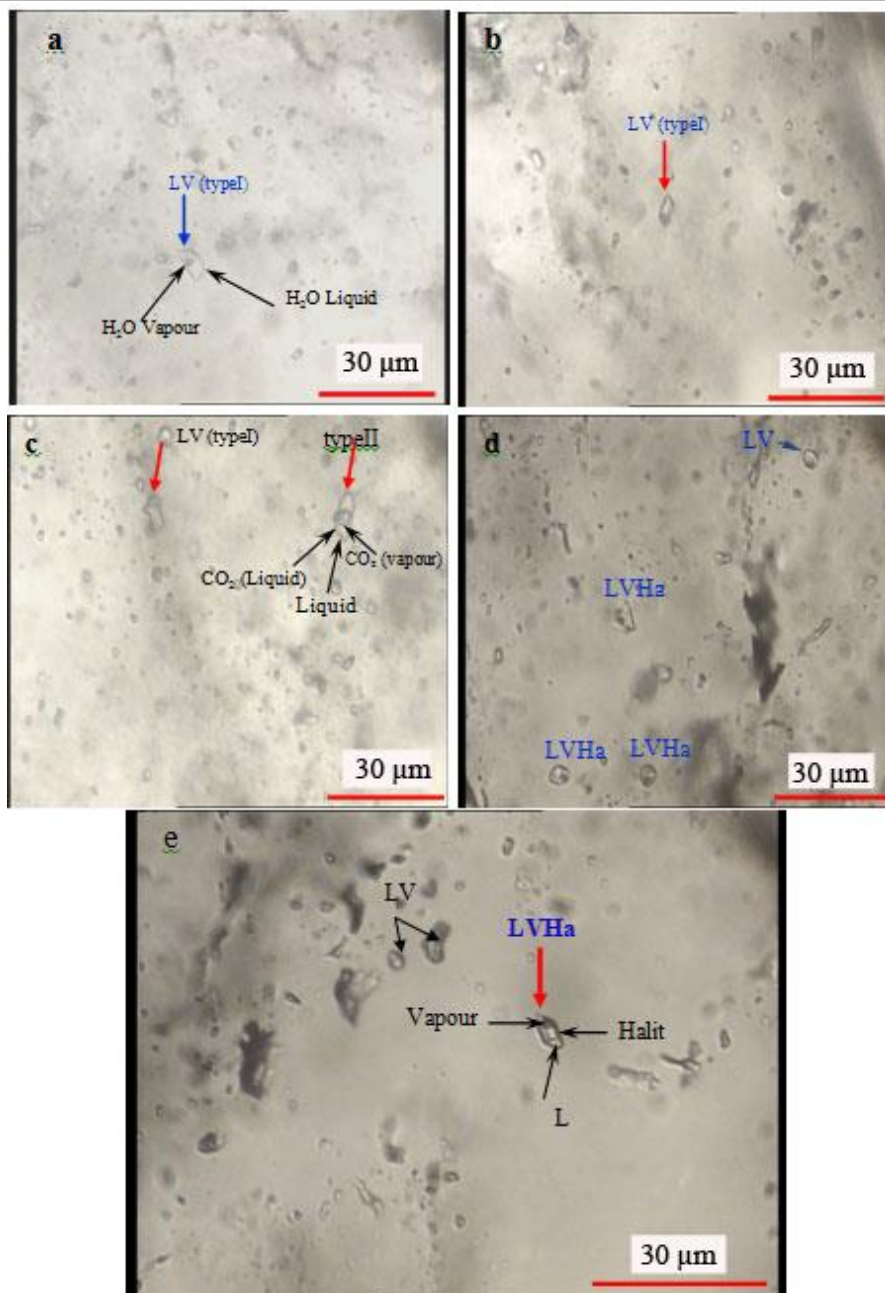
تیپ III در دو نمونه مشاهده گردید که متشکل از مایع آبگین + حباب بخار + هالیت بوده و در یک مورد نیز فاز جامد ناشناخته به همراه هالیت مشاهده گردید (شکل‌های ۳d و ۴e). اغلب این سیالات دارای اندازه کوچکتر از ۱۵ میکرون می‌باشند و به صورت منفرد در کانی میزبان دیده می‌شوند. معمولاً دمای انحلال هالیت بیشتر از دمای همگن شدن حباب بخار است.

### سیالات درگیر نوع I: سیال درگیر دو فازی مایع-گاز

#### (Liquid rich)L+V

سیالات درگیر نوع I به صورت دو فازی بوده یا به عبارت دیگر متشکل از مایع آبگین و حباب بخار هستند (شکل ۴a و b). حباب بخار حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد حجم سیالات درگیر را اشغال کرده است، در واقع درجه پرشدگی این نوع از سیالات درگیر در حدود ۷۰ الی ۸۰ درصد است. این سیالات درگیر در نمونه‌ها فراوان بوده و بیشتر به اشکال کشیده، بی‌شکل و بعضاً چندوجهی‌های منظم مشاهده می‌شوند. اندازه این سیالات درگیر عموماً ۶-۱۲ میکرون می‌باشد. توزیع تصادفی و پراکنده این نوع از سیالات به احتمال زیاد نشان دهنده منشا اولیه آن‌هاست. در سیالات درگیر مورد مطالعه، همگن شدن فاز بخار به فاز مایع رخ داده است (V+L-L) و هیچ‌گونه همگن شدن به فاز بخار در نمونه‌ها مشاهده نگردیده است.





شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی سیالات درگیر (a-b) نوع I شامل دو فاز مایع و گاز، (c) در بعضی از مقاطع این سیالات درگیر همراه با سیالات درگیر نوع II (دارای فاز CO<sub>2</sub> متشکل از Liquid CO<sub>2</sub> و Vapour CO<sub>2</sub>) و نوع III (d) و نوع III هستند. (e) سیالات درگیر نوع III سه فازی (LVHa) متشکل از فاز گاز (V) و مایع آبگین (L) و هالیت (Ha).

Fig. 4. Microscopic images of fluid inclusions (a-b) type I consist of liquid and vapour, (c) in some samples fluid inclusion coexistence with type II (Fluid inclusion with liquid, vapour CO<sub>2</sub> and liquid CO<sub>2</sub>) and (d) type III. (e) Type III fluid inclusions (LVHa) consist of three phases (liquid, solid and vapour).

داده‌ها در نرم افزار Mac FlinCor (Brown and Hagemann, 1995) محاسبه شده است.

### خصوصیات ریزدماسنجی سیالات درگیر نوع I

اولین نقطه ذوب یخ یا T<sub>e</sub> در این گروه در محدوده بین ۴۱- تا ۲۱- با فراوانی بین ۳۰- تا ۲۱- درجه سانتی‌گراد به دست آمد. برای دماهای ذوب

### ریزدماسنجی سیالات درگیر

در بین سیالات درگیر، سیالات نوع I، II و III به دلیل اندازه مناسب و فراوانی بیشتر جهت مطالعات انتخاب شدند. در جدول ۱ نتایج مطالعات ارائه شده است. ترکیب شیمیایی و چگالی سیالات با استفاده از پردازش

سیالات ۱۰۵ تا ۲۹۰ با فراوانی ۱۰۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل a و b).

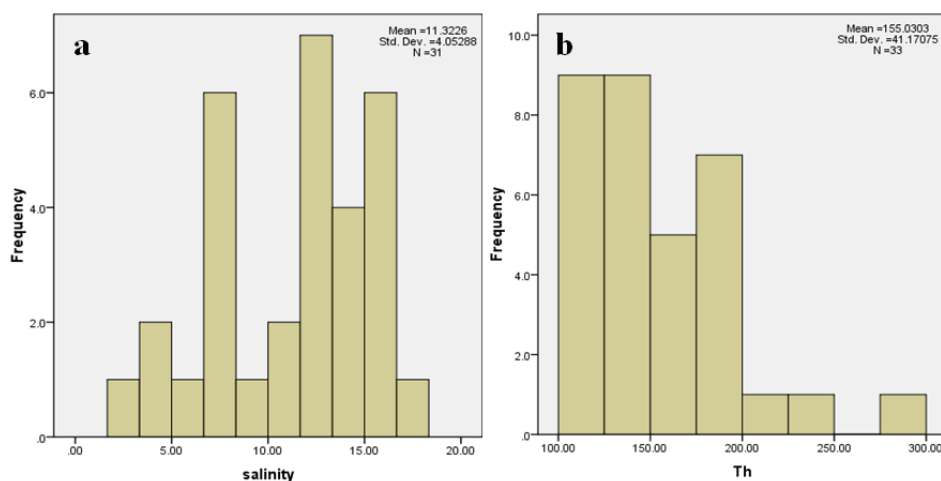
یخ پایین تر از ۲۱- درجه سانتی‌گراد احتمال حضور نمک‌های دیگر از جمله  $\text{CaCl}_2$ ،  $\text{KCl}$  و  $\text{MgCl}_2$  علاوه بر  $\text{NaCl}$  در سیالات درگیر وجود دارد (Shepherd et al., 1985; Latifi Saei et al., 2016). میزان شوری بین ۲/۵ تا ۱۷/۶ درصد وزنی نمک طعام و دمای همگن شدن در این

جدول ۱- خلاصه نتایج مطالعات ریزدماسنجی سیالات درگیر کانسار سنجد.

Table 1. Summary results of the microthermometric data of fluid inclusions in the Senjedeh deposit.

Sample No/	no	Size (μm)	Type	Origin	V/L ratio	Te (°C)	T <sub>mClath</sub> (°C)	T <sub>mCO2</sub> (°C)	T <sub>mice</sub> (°C)	T <sub>h Ha</sub> (°C)	T <sub>h</sub> (°C)	wt% NaCl	CO <sub>2</sub> Density	Bulk Density
SN-21/2	19	7-12	LV	P	L>V	-21to -30	-10to 3/5	-58/1to -58/5	-4 to -12/6		105-336	6/62- 21/44	0/6-0/89	0/93- 1/04
SN-20	16	8-12					-2to 7/1	-57/2to -58/6			240-338	5/51- 17/48	0/52-0/8	0/7-1
SN-23	15	10	LV Ha	P							170-470	35/44-40		-0/190 >0/500
SN-30/2	4	10	LV			-30		-57/6to -58/1	- 10/5 to - 12/5		170-370	14/49- 21/44	0/67-0/88	0/77- 1/03
SN-18	15	8-14		P			-1/7to 7/3	-57to - 58/8	-5/4 to - 13/9		127-350	5/15-17/6	0/75-0/9	0/85- 1/05
SN-19	4	7-10					-10 to 6/6	-57/5to -58/9			195-279	۳۷/۶/۳۷- 21/44	0/62-0/86	0/89- 0/97
SN-19/2	1	8					-10to 4/2	-58/6			296	21/44	0/81	0/91
SN-08/2	6	6-12	LV	P		nv		-58/2	-7/5 to - 10/5		165-335	10/18- 14/49	0/56	0/71
SN-18-2	15	7-14	LV+ LVHa	P		-41	-9/5	-59/1	-3to -12	183- 337	89-335	2/5-40/26	0/92	1/08

No = number; Th = homogenization temperature, T<sub>mClath</sub> = Clatrite melting temperature, T<sub>mCO2</sub> = CO<sub>2</sub> melting temperature, T<sub>mice</sub> = ice melting temperature L = liquid; V = Vapor; Ha=Halite, P=Primary



شکل ۵- خصوصیات ریزدماسنجی سیالات درگیر نوع I: (a) هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدن سیالات درگیر نوع I و (b) هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدن سیالات درگیر نوع I

Fig. 5. Microthermometric data of type I fluid inclusion; (a) histograms of salinity and (b) histograms of homogenization temperature.

## خصوصیات ریزدماسنجی سیالات درگیر نوع II

در این گروه، مطالعه بر روی ۴۲ سیال درگیر حاوی CO<sub>2</sub> انجام شد. در شکل e-a6 خصوصیات این گروه نشان داده شده است. دمای ذوب CO<sub>2</sub>، ۵۹/۱- تا ۵۷- درجه سانتیگراد می باشد. در سیالات حاوی CO<sub>2</sub>، سرد شدن در دمای پایین تر از دمای اتاق سبب می شود که سیال حاوی CO<sub>2</sub> به صورت دو حباب ثانوی درآید که حباب درونی بخار و حباب بیرونی، مایع است (Goldstein, 2003). این مایع در صورتی که متشکل از CO<sub>2</sub> خالص باشد در دمای ۵۶/۶- درجه سانتیگراد منجمد می شود و دماهای پایین تر از این دما حضور گازهای دیگر چون CH<sub>4</sub> را نشان می دهد. در این گروه از سیالات نیز با توجه به دمای ذوب CO<sub>2</sub> احتمالاً CH<sub>4</sub> نیز در سیال درگیر حضور دارد (Diamond, 2003). مطالعات طیفسنجی رامان انجام شده بر روی سیالات درگیر کانسار چاه خاتون توسط Moritz و همکاران (۲۰۰۶) حضور مقدار اندک گاز N<sub>2</sub> و مقدار ناچیزی CH<sub>4</sub> را نشان می دهد. دمای نهایی ذوب یخ (کلاتریت) ۱۰- تا ۷+ با فراوانی بین ۳°C تا ۷+ می باشد. براساس دمای ذوب کلاتریت شوری این سیالات ۵/۵۱ تا ۲۱/۴۴ با فراوانی ۵ تا ۱۰ درصد وزنی نمک طعام می باشد. فاز CO<sub>2</sub> از طریق ناپدیدشدن فاز بخار و تبدیل به فاز مایع در دمای بین ۰/۵- تا ۳۰/۹°C همگن می شود.

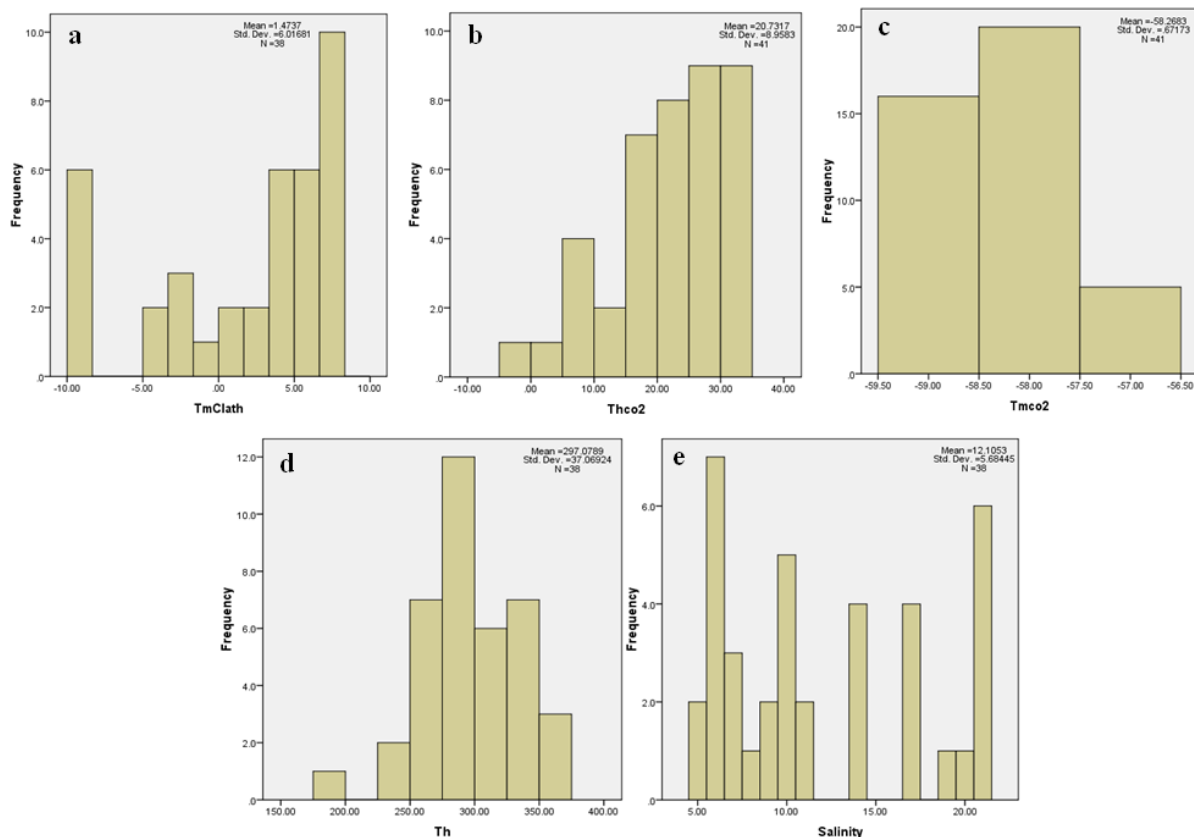
در سیالات حاوی CO<sub>2</sub>، هنگامی که این مقدار بیش از ۴۰٪ باشد، طی فرآیند گرمایش و قبل از همگن شدن نهایی حباب گاز، سیال درگیر می ترکد که در این حالت (Td) (Temperature of decrepitation) که برابر با حداقل دمای همگن شدن است، برای آن ثبت خواهد شد. Td برای این سیالات که دچار ترکیبگی یا همگن شدن شده اند، در محدوده ۱۹۵ تا ۳۴۰ درجه سانتیگراد اندازه گیری شده است. دمای همگن شدن این سیالات بالاتر از سیالات گروه I می باشد. همچنین شوری این سیالات ۵ تا ۲۱wt% با فراوانی ۵ تا ۱۱wt% محاسبه شده است. گرچه سیالات دارای چنین شوری های بالایی در سنگ های دگرگونی رخساره شیست سبز تا گرانولیت غیرمعمول می باشد (Yardley and Graham, 2002).

Moritz و همکاران (۲۰۰۶) معتقدند که این شوری ممکن است دلایل متفاوتی داشته باشد که از جمله آن حضور تبخیری های دگرگون شده در منطقه و یا همزیستی این سیالات با سیالات ماگمایی ناشی از نفوذ توده های ماگمایی جایگزین شده در مراحل مختلف تکامل سنندج - سیرجان باشد. Niroomand و همکاران (۲۰۱۱) نیز در مطالعه سیالات درگیر کانسار خراپه در شمال غرب زون سنندج - سیرجان که از نوع کوهزادی و دارای مشابهت زایشی با کانسار سنجد است، شوری میانگین ۱۴-۱۲ wt% برای سیالات CO<sub>2</sub> دار به دست آورد. به نظر ایشان این شوری بالا ممکن است به علت همراهی توالی های رسوبی دارای محتوای شورابه ای بالا، به عنوان بخشی از سنگ های دگرشکل و دگرگون شده باشد. مقایسه نمودار همگن شدن و شوری سیالات درگیر نوع I و II نشان می دهد که سیالات نوع I دارای دما و شوری پایین تری از سیالات نوع II می باشند که نشان دهنده نقش بیشتر آب های جوی در تشکیل این نوع از سیالات است.

## خصوصیات ریزدماسنجی سیالات درگیر نوع III

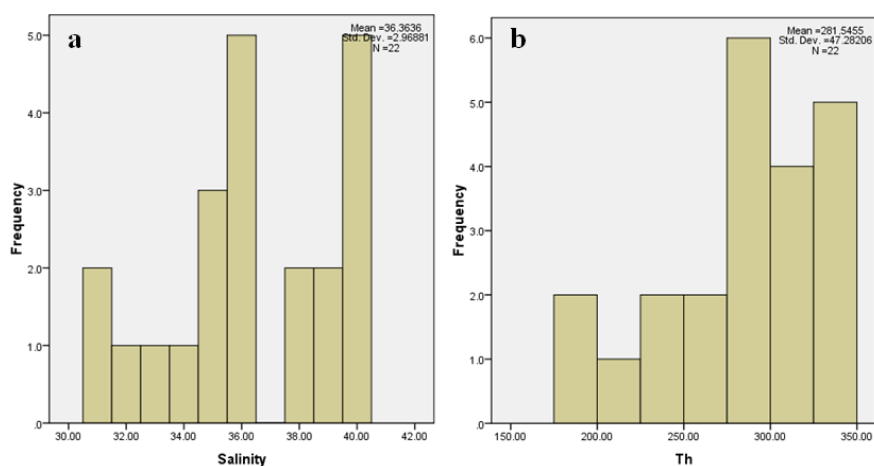
سیالات درگیر این گروه، مربوط به رگه های کوارتز بدون کانه زایی می باشد، البته در تعدادی نمونه ها مانند نمونه (SN-18) این نوع سیالات همراه با سیالات نوع I و II مشاهده شدند. این نوع از سیالات دارای شوری بالا هستند (شکل ۷a) و به همین علت فاز جامد نمک در آن ها مشاهده شد. دمای همگن شدن این گروه از سیالات ۱۹۵ تا ۳۳۷ درجه سانتیگراد می باشد (شکل ۷b).

از آنجا که در نمونه های مطالعه شده مربوط به انواع سیالات درگیر در این تحقیق، شواهد جوشش - وجود میانبرهای سیال غنی از بخار و مایع و نیز حضور کلسیت تیغه ای و کوارتز پرزودومورف (Latifi Saei et al., 2016) مشاهده نشد، لذا بایستی برای دماهای به دست آمده تصحیح فشار انجام گیرد. براساس Roedder (۱۹۷۱) تصحیح فشار زمانی لازم است که فشار در زمان به دام افتادن سیال بزرگ تر از فشار بخار آب باشد یا به عبارتی پدیده جوشش رخ نداده باشد.



شکل ۶- خصوصیات ریزدماسنجی سیالات درگیر نوع II: (a) هیستوگرام فراوانی دمای ذوب کلایتریت، (b) هیستوگرام فراوانی درجه حرارت ذوب  $CO_2$ ، (c) هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدن  $CO_2$ ، (d) هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدن و (e) هیستوگرام فراوانی شوری سیالات درگیر نوع II.

Fig. 6. Microthermometric data of type II fluid inclusion; (a) Histograms of  $CO_2$  clathrate melting temperatures ( $T_{mclath}$ ), (b)  $CO_2$  melting temperatures, (c)  $CO_2$  homogenization temperatures, (d) homogenization temperatures and (e) salinity.



شکل ۷- خصوصیات ریزدماسنجی سیالات درگیر نوع III: (a) هیستوگرام فراوانی شوری سیالات درگیر نوع III، (b) هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدن سیالات درگیر نوع III.

Fig. 7. Microthermometric data of type III fluid inclusion; (a) Histogram of salinity and (b) Histogram of homogenization temperature.

### فشار و چگالی سیالات درگیر

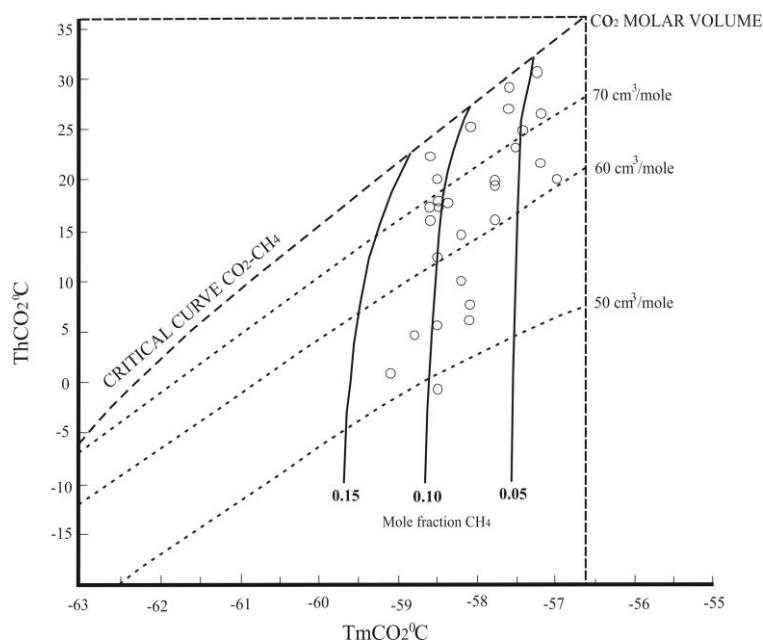
اندازه فشار به دام افتادن سیالات کانه ساز در کانسار سنجده با استفاده از نرم افزار Flin Core (Brown, 2003) و به شیوه پیشنهادی از Touret و Dietvorst (۱۹۸۳) انجام شد. در این روش از دمای همگن شدن سیالات درگیر نوع I و II استفاده شد. براین اساس حداقل فشار همگن شدن سیالات در محدوده دمایی ۳۰۰ درجه سانتیگراد، حدود ۰/۵ تا ۲ کیلوبار به دست آمده است. عمق تقریبی کانه سازی براساس معادله  $P=Dgh$  محاسبه شده است. با توجه به اینکه در کانسارهای طلای تپ پهنه های برشی، فشار روباره برابر با وزن سنگ های فوقانی است که بر روی سیال قرار دارد (Aliyari, 2006)، بنابراین مقدار عددی  $D$  برابر ۲/۷ در نظر گرفته می شود. به این ترتیب با توجه به موارد بالا، عمق ۱/۸۵ تا ۷ کیلومتر برای کانه سازی پیشنهاد می شود.

چگالی آب براساس معادله Zhang و Frantz (۱۹۸۷) و چگالی  $CO_2$  براساس Hallowey (۱۹۸۱) و Shepherd و همکاران (۱۹۸۵) محاسبه شده است. براین اساس چگالی  $CO_2$  بین ۰/۵۲ تا ۰/۹۲ و میانگین ۰/۸۰۳ می باشد.

سیالات درگیر منطقه مورد مطالعه از نظر ترکیب شیمیایی در محدوده  $L+V$  سیستم  $CO_2-H_2O$  قرار می گیرند. سیالات مورد مطالعه از نظر

ترکیب شیمیایی عموماً از نوع II (سیالات غنی از  $CO_2$ ) می باشند که نشان دهنده نقش غالب سیالات دگرگونی در کانه زایی می باشد (Robb, 2005).

نمودار دمای همگن شدن  $CO_2$  ( $Th_{CO_2}$ ) در مقابل درجه حرارت ذوب  $CO_2$  ( $T_{mCO_2}$ ) برای سیالات درگیر نوع II در سیستم های  $H_2O-CO_2$  و  $H_2O-CO_2\pm CH_4$  نشان می دهد که حجم مولی سیالات درگیر مطالعه شده در محدوده بین حجم مول بین ۵۰ تا  $75 \text{ cm}^3/\text{mole}$  پلات می شود. نکته مهم در ارتباط با این نمودار، حضور مقادیری  $CH_4$  می باشد، به گونه ای که بیشتر سیالات درگیر دارای نسبت مولی  $CH_4$  بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۲ می باشند. همانگونه که در شکل ۸ دیده می شود، برخی از سیالات درگیر به منحنی بحرانی  $CO_2-CH_4$  نزدیک می شوند. بنابراین بیشتر سیالات منطقه سنجده دارای  $CO_2$  فراوان و مقداری  $CH_4$  هستند. به عقیده Diamond (۱۹۹۰) این مسئله نشان دهنده آن است که سیالات کانه دار در مراحل اولیه تنها دارای  $CO_2$  بوده و سپس  $CH_4$  به آن ها اضافه شده است. در نمونه های مطالعه شده همزیستی سیالات درگیر نوع I، II و III (شکل ۴c و d) نشان دهنده اختلاط دو سیال با شوری بالا و پایین درحین کانه زایی بوده (نمونه SN-18) (شکل ۹a) و بنابراین دمای همگن شدن به دست آمده، می تواند دمای واقعی تشکیل کوارتز و با کمی اغماض دمای کانه زایی باشد.



شکل ۸- نمودار دمای همگن شدن  $CO_2$  در مقابل درجه حرارت ذوب  $CO_2$  ( $T_{mCO_2}$ ) سیالات درگیر نوع II، که در محدوده حجم مول بین ۵۰ تا  $75 \text{ cm}^3/\text{mole}$  و ۷۵ و نسبت مولی کمتر از ۰/۰۵ تا ۰/۱۵  $CH_4$  قرار می گیرد.

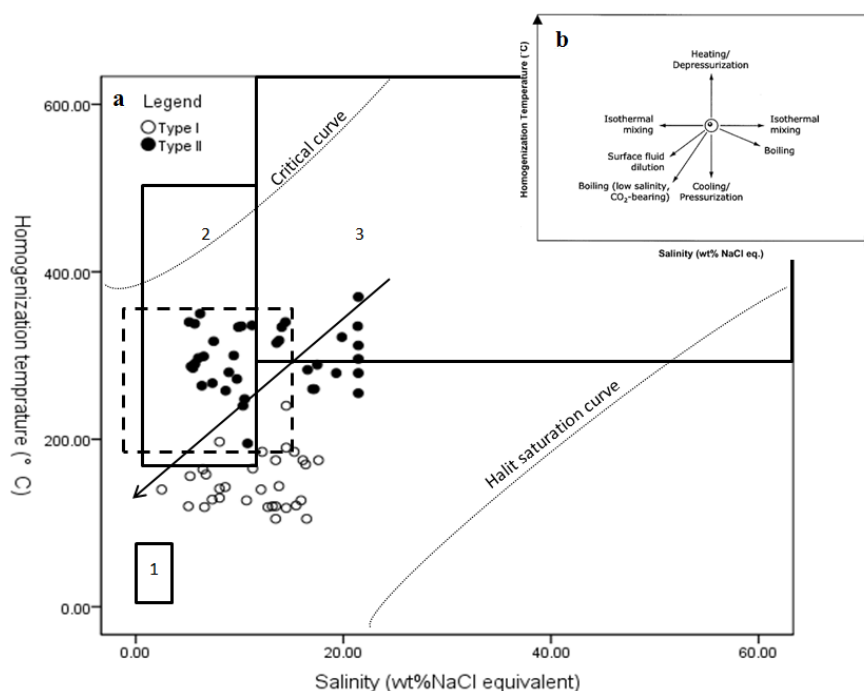
Fig. 8. Homogenization temperature vs  $CO_2$  melting temperature diagram ( $T_{mCO_2}$ ) in type II fluid inclusions which located in the molar volume ranges from 50 to  $75 \text{ cm}^3/\text{mole}$  and a mole ratio of less than 0.05 to 0.15  $CH_4$ .

و در عوض، ورود سیالات ماگمایی متصاعد شده از توده‌های نفوذی همراه با جریان سیالات جوی گرم شده، که از طریق گسل‌های نرمال تا اعماق زیاد نفوذ کرده اند، افزایش می‌یابد. این سیالات در مسیر خود طلا را از واحدهای آتشفشانی - رسوبی شسته و به صورت کمپلکس بی‌سولفیدی حمل کرده است (Kouhestani, 2005). وجود دو محدوده دمای همگن شدن سیالات درگیر (با میانگین ۱۵۵ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب مربوط به سیال نوع I و II) با مقادیر شوری متفاوت نشان‌دهنده حضور حداقل دو نوع سیال با دما و شوری متفاوت در حین کانه‌زایی است. این سیالات در سطوح بالاتر به صورت عامل دگرسانی عمل کرده و سبب ته نشینی طلا می‌شوند. در مجموع با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی چون توالی آتشفشانی - رسوبی میزبان کانه‌زایی، ژئومتری رگه - رگچه‌ای در امتداد گسل‌های نرمال، حضور کانی‌های سولفیدی چون پیریت و کالکوپیریت، کانی‌های باطله کوارتز، کلریت، کربنات می‌توان کانسار سنجد را در گروه کانسارهای طلای کوهزایی قرار داد. با توجه به نمودار شوری- دمای همگن شدن در شکل ۹ نیز کانسار سنجد در محدوده کانسارهای طلای load gold قرار می‌گیرد. بر اساس Mernagh و همکاران (۲۰۰۷) تمام کانسارهای طلای کوهزایی دارای خصوصیات کلی مشترکی مانند جایگاه زمین‌شناسی، محیط تکنیکی، فراوانی سیالات درگیر دو فاز  $L+V$ ، شوری پایین سیال و حضور فاز غالب  $CO_2$  در سیال هستند. سنگ‌های میزبان این کانسارها بسیار متفاوت است، اما معمولاً این سنگ‌های میزبان تحت دگرگونی ناحیه ای در حد رخساره شیبست سبز تا گرانولیت قرار گرفته‌اند، ولی اغلب کانه زایی به واحدهای با درجه دگرگونی شیبست سبز محدود می‌شود (Groves et al., 1998). اغلب این کانسارها دارای دگرسانی گرمایی قابل ملاحظه‌ای می‌باشند، که دارای زون بندی کانی‌شناسی قائم اندک و ضعیف، اما زون بندی جانبی گسترده و وسیع هستند که شامل دگرسانی‌های کلریتی، آلبیتی، کربناتی، بیوتیتی، سرسیتی، سیلیسی و سولفیدی از حاشیه به مرکز می‌باشد (Phillips and Powel, 2009). در ایران نیز با توجه به جایگاه تکنیکی - ژئودینامیکی پهنه سنج - سیرجان می‌توان انتظار داشت که کانه‌زایی طلای تیپ کوهزایی نسبت به تیپ‌های دیگر طلا غالب باشد. کانسارهای طلای کوهزایی در پهنه سنج - سیرجان همگی در زیرپهنه با دگرشکلی پیچیده (Mohajjel et al., 2003) و در توالی سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی با سن پالئوزوئیک فوقانی و مزوزوئیک فوقانی قرار دارد. کانسار سنجد و به‌طور کلی نهشته‌های ماته تحت تاثیر دگرگونی در حد رخساره شیبست سبز تا آمفیبولیت زیرین قرار گرفته‌اند که کانه‌زایی بیشتر در ارتباط با رخساره شیبست سبز رخ داده است. مطالعات سیالات درگیر نشان دهنده حضور غالب سیالات دو فاز  $L+V$  با فازهای غالب  $H_2O$  و  $CO_2$  است. از طرف دیگر با توجه به تشابه کانی‌شناسی و الگوی دگرسانی و میانگین دمای همگن شدن و شوری، می‌توان تیپ کانه‌زایی در منطقه را از نوع نهشته- های کم عمق کوهزایی دانست.

## فرآیندهای فیزیکی موثر در تغییر رفتار سیالات درگیر

در بسیاری از کانسارها، فرآیندهای فیزیکی به‌ویژه جدایش فاز و اختلاط سیالات مهم‌ترین مکانیسم‌هایی هستند که سبب ته‌نشست تمرکزهای اقتصادی ذخایر معدنی می‌شوند (Skinner 1979; Gregory, 2016; Diamond و Ridley, 2017). جدایش فاز و اختلاط سیالات به‌عنوان فرایندهای غالب در نهشت کانه در سیستم‌های طلای کوهزایی نام می‌برند. دو ویژگی دمای همگن شدن و شوری، پارامترهایی هستند که در تعبیر و تفسیر فرآیندهای boiling و mixing مفید است (Abdollah Pour et al., 2016) (شکل ۹). در اکثر سیستم‌های گرمایی کم‌عمق جدایش فاز در اثر پدیده boiling است، اما برای سیستم‌های حاوی مواد فرار اضافی مانند  $CO_2$  حالت بسیار پیچیده‌ای وجود دارد و برای جدایش فاز در این سیستم‌ها واژه effervescence مناسب‌تر است. در شکل ۹a نمودار همگن شدن - شوری برای سیالات درگیر کانسار سنجد جهت تعبیر و تفسیر فرایندهای موثر در کانه‌زایی ترسیم شده است. با توجه به این شکل و مقایسه آن با شکل ۹b و همچنین با توجه به فراوانی قابل‌ملاحظه سیالات دوفازی غنی از مایع و فراوانی کم سیالات درگیر گازی و اینکه تمامی سیالات به فاز مایع همگن شدند، می‌توان نتیجه گرفت که در سیالات پدیده mixing صورت گرفته است و جدایش فازی رخ نداده است. علاوه بر این دامنه نسبتاً وسیع همگن شدن سیالات درگیر نشان می‌دهد که احتمالاً فرآیند سرد شدن ساده (کاهش درجه حرارت) یکی دیگر از عوامل موثر در ته‌نشست سیال است (شکل ۹a و ۹b). به عقیده Aliyari (۲۰۱۱) شوری پایین تا متوسط در کانسار زرتشت دلیلی بر حضور سیالات ماگمایی است، در کانسار سنجد و منطقه موه نیز شوری پایین تا متوسط سیالات احتمالاً به دلیل حضور طبقات رسوبی (تبخیری) دگرگون شده در توالی‌های سنگی دگرگون شده منطقه و یا سیالات ماگمایی می‌باشد. البته تغییرات میزان شوری نسبت به افزایش دما چندان زیاد نمی‌باشد که این امر می‌تواند نشانگر اختلاط سیال مؤثر در کانی‌زایی با آب جوی باشد (Manouchehri Nia et al., 2016).

بر اساس مطالعات سیالات درگیر، در طی مراحل اولیه دگرگونی ناحیه‌ای (دگرگونی پیش‌رونده)، یک سیال دگرگونی در نتیجه آب‌زدایی توالی‌های آتشفشانی - رسوبی تشکیل شده است. این سیال دارای شوری متوسط، غنی از  $H_2O$ ،  $CO_2$  و S می‌باشد. این سیال در مسیر گرادیان فشاری موجود در ستون دگرگونی و همزمان از طریق پهنه‌های برشی، که عامل مهمی در ایجاد و افزایش نفوذپذیری هستند، به سمت بالا حرکت می‌کند. در آخرین مراحل بالآمدگی منطقه و عملکرد شدید دگرشکلی شکنا، به دلیل تبدیل تکنیکی فشاری - کششی به کششی غالب، انواع شکستگی‌ها و گسل‌های نرمال و تزریق توده‌های نفوذی اتفاق می‌افتد. همچنین به دلیل کاهش عمق مؤثر در نتیجه بالآمدگی، جریان سیالات دگرگونی کاهش یافته



شکل ۹- (a) نمودار همگن شدن - شوری برای سیالات درگیر کانسار سنجده و قرارگیری کانسار طلا سنجده در محدوده طلای کوهزایی که با مستطیل خط چین نمایش داده شده است (Wilkinson, 2001). منشأ سیالات کانسنگ ساز در اینجا با استفاده از نمودار (Kesler, 2005) به صورت محدوده ۱ (آب های جوی)، ۲ (آب دگرگونی) و ۳ (آب ماگمایی) مشخص شده است و (b) نمودار شماتیک جهت های اصلی دمای همگن شدن - شوری در طی فرآیندهای مختلف تکامل سیالات درگیر (Wilkinson, 2001).

Fig. 9. Schematic diagram showing (a) Homogenization temperature – salinity diagram illustrating ranges for fluid inclusion from Senjedeh gold deposit located in orogenic gold deposit (dashed rectangle) (Wilkinson, 2001), the origin of ore-forming fluids in this study was made using diagram of Kesler (2005), range 1 (Meteoritic water), 2 (metamorphic water) and 3 (magmatic water) and (b) Typical trends in  $T_h$  – salinity space due to various diagram fluid evolution processes (Wilkinson, 2001).

- وجود دو محدوده دمای همگن شدن سیالات درگیر (با میانگین ۱۵۵ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب مربوط به سیال نوع I و II) با مقادیر شوری متفاوت نشان دهنده حضور حداقل دو نوع سیال با دما و شوری متفاوت در حین کانه زایی است، بنابراین سیالات گرمایی تشکیل دهنده رگه - رگچه های کوارتزی هم منشأ دگرگونی و هم ماگمایی دارند و همچنین با توجه به عمق کم کانسار می توان گفت یکی از علل ته نشین شدن طلا سرد شدن سیال در نتیجه واکنش با آب های جوی است.

- به طور کلی با توجه به ویژگی هایی چون توالی آتشفشانی - رسوبی میزبان کانه زایی، ژئومتری رگه - رگچه ای در امتداد گسل های نرمال، حضور کانی های سولفیدی چون پیریت و کالکوپیریت، کانی های باطله کوارتز، کلریت، کربنات، چگالی ۰.۸۰۳ و فشار ۲-۰.۵ کیلو بار، دمای ۱۵۵-۳۰۰ درجه سانتی گراد، شوری پایین تا متوسط، به گونه ای که عامل اصلی کمپلکس های طلا دار واکنش های سیال / سنگ و سرد شدن نتیجه اختلاط دو سیال با شرایط دمایی متفاوت می باشد، می توان تیپ کانه زایی در منطقه را از نوع نهشته های کم عمق کوهزایی دانست.

### نتیجه گیری

- کانه زایی طلا در کانسار سنجده در توالی های آتشفشانی - رسوبی به صورت رگه - رگچه و عدسی های کوارتز - سولفید درون سنگ میزبان متاریبولیتی و در امتداد گسل نرمال رخ داده است و عموماً برگوارگی را قطع کرده است. دگرسانی غالب در این محدوده سیلیسی، سربستی و آرژیلیتی شدن است که کانه زایی طلا در رگه های کوارتز همراه با دگرسانی سیلیسی دیده می شود.

- مطالعات سیالات درگیر نشان دهنده حضور غالب سیالات دو فازی L+V (نوع I) و سیستم H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>+NaCl (نوع II) است که مسئول کانه زایی در کانسار سنجده می باشند. محدوده دمای همگن شدن سیالات درگیر نوع I بین ۱۰۵ تا ۲۹۰ و دمای همگن شدن سیالات نوع II، ۱۹۵ تا ۳۴۰ درجه سانتی گراد است.

- میزان شوری سیالات ۲/۵ تا ۲۱ wt% NaCl محاسبه شده است که اکثراً دارای شوری کمتر از ۱۲ wt% می باشند.

- حداقل فشار همگن شدن سیالات در محدوده دمایی ۳۰۰ درجه سانتیگراد، حدود ۰/۵ تا ۲ کیلو بار به دست آمده است. عمق تقریبی کانه سازی برابر ۲/۷ در نظر گرفته می شود و بر این اساس عمق ۱/۸۵ تا ۷ کیلومتر برای کانه سازی پیشنهاد می شود.

## منابع

- Abdollah Pour, M., Niroumand, S., Tajeddin, H.A., 2016. Geology, mineralization and study of fluid inclusions in Shoy orogenic gold deposit (northwest of Baneh), northwest of Sanandaj Sirjan Zone. *Journal of Advanced Applied Geology* 26, 66-78.
- Aliyari, F., 2006. Mineralogy, Geochemistry and Fabrics of Gold Mineralization in Qolqoleh Ductile and Brittle Shear Zones, Southwest Saghez, M.Sc thesis. Tarbiat Modares University, Iran (in Persian).
- Aliyari, F., 2011. Ore controls, age, genesis and type of gold mineralization in the Zartorosht deposit, southern Sanandaj- Sirjan Zone, southwest Jiroft. Ph.D Thesis, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modarres University, Iran (in Persian).
- Brown, P.E., Hagemann, S.G., 1995. MacFlincon and its application to fluids in Archaean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 3943– 3952.
- Collins, P.L.F., 1979. Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for the estimation of salinity. *Economic Geology* 74, 1435– 1444.
- Diamond, L.W., 1990. Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in late Alpine gold-quartz veins at Busson, Vald' Ayas, northwest Italian Alps. *American Journal of Science* 290, 912-958.
- Diamond, L.W., 2003. Introduction to gas bearing, aqueous fluid inclusions. *Mineralogical Association of Canada* 32, 101–158.
- Fuertes-Fuente, M., Cepedal, A., Lima, A., Dória, A., Anjos Ribeiro, M.D., Guedes, A., 2016. The Au-bearing vein system of the Limarinho deposit (northern Portugal): Genetic constraints from Bi-chalcogenides and Bi-Pb-Ag sulfosalts, fluid inclusions and stable isotopes. *Ore geology reviews* 72, 213–231.
- Goldfarb, R., Baker, T., Dube B, Groves, D., Hart, C., Gosselin, P., 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic Geology* 100<sup>th</sup> Anniversary, 407– 450.
- Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. *Mineralogical Association of Canada* 32, 91– 53.
- Gregory, M.J., 2017. A fluid inclusion and stable isotope study of the Pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Alaska *Ore Geology Reviews* 80, 1279-1303.
- Gregory, Melissa, J., 2016. A fluid inclusion and stable isotope study of the Pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Alaska. *Ore Geology Reviews* 80, 1279-1303.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews* 13, 7- 27.
- Hasani, H., Mohajjel, M., 1998. Structural analysis and tectonic model of Muteh gold mine and associated mineralization. In: 18<sup>th</sup> Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran (in Persian).
- Hezarkhani, A., Hajizadeh, F., 2011. Geochemical study of ore-bearing fluids in Chah Firouzeh porphyry copper deposits of North Babak City (Kerman Province), and its economic evaluation. *Journal of Advanced Applied Geology* 2(1), 43 -53.
- Kouhestani, H., 2005. Geology, mineralogy, geochemistry and fabric of gold mineralization in Chah-Bagh shear zones at Muteh mining area (southwest of Delidjan, Esfahan province). M.Sc Thesis. Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modarres University, Iran (in Persian).
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Chang, Zh, Zaw, K., 2015. Constraints on the ore fluids in the Chah Zard breccia-hosted epithermal Au-Ag deposit, Iran: Fluid inclusions and stable isotope studies. *Ore Geology Reviews* 65(2), 512-521.
- Kouhestani, H., Rashidnejad-Omran, N., Rastad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R.J., Ghaderi, M., 2014. Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 91, 89–106.
- Latifi Saei, F., Mirnejad, H., Alipour Asl, M., Nirmand, Sh., 2016. Investigation of gold mineralization in Dare Zar vein system in Pariz region (Kerman province) with emphasis on studies of fluid inclusions and sulfur isotopes. *Journal of Advanced Applied Geology* 26, 65-75.
- Manouchehri Nia, M., Azimzadeh, A., Taghipour, N., Marangi, H., 2016. Applied and combined laser raman spectroscopy and microthermometric studies in the calculation of salinity of fluid inclusions: A Case Study of the Solan fluorite deposit, Zanjan, (Northwest Iran). *Journal of Advanced Applied Geology* 26, 40-50.



- Masoudy, F., 1997. Contact metamorphism and pegmatite development in the region SW of Arak, Iran. Ph.D Thesis, University of Leeds, UK.
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E., Shahabifar, M., 2012. Ore mineralogy and fluid inclusions constraints on genesis of the Muteh gold deposit (western Iran). *Geopersia* 2, 67- 90.
- Mernagh, T.P., Bastrakov, E.N., Zaw, K., Wygralak, A.S., Wyborn, L.A.I., 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic and intrusion-related gold systems. *Acta Petrologica Sinica* 23, 21-32.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, 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., 1996. Geological and fluid inclusion studies in the Muteh gold district, Sanandaj-Sirjan zone, Esfahan Province, Iran. *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology* 76, 85- 89.
- Moritz, R., Ghazban, F., 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.
- Niroomand, Sh., Goldfarb, R.J., Moore, F., Mohajjel, M., and Marsh, E.E., 2011. The Kharapeh orogenic gold deposit: geological, structural, and geochemical controls on epizonal ore formation in West Azerbaijan Province, Northwestern Iran. *Mineralium Deposita* 46, 409– 428.
- Nourian ramsheh, Z., Yazdi, M., Rasa, I., Masoudi, F., 2016. Gold and trace elements distribution in pyrite from the Senjedeh gold deposit Muteh mining district, according to EPMA analysis. *Quarter of Geology of Iran* 10(40), 59-70.
- Paidar-Sarvi, H., 1989. Petrographisch-lagerstättenkundliche Untersuchungen a golführenden Gesteinen im Muteh Gebiet im Western vom Zentral Iran. Ruprecht-Karts Heidelberg University, pp. 174.
- Phillips, G.N., Powell, R., 2009. Formation of gold deposits: Review and evaluation of the continuum model. *Earth-Science Reviews* 94, 1– 21.
- Rashidnejad Omran, N., 2001. Petrology and geochemistry of metavolcano-sedimentary and plutonic rocks of Muteh area (South Delidjan) with special view to genesis of gold mineralization. Ph.D Thesis, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modarres University, Iran (in Persian).
- Robb, L., 2005. Introduction to ore forming processes, Blacwell, p. 386.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy* 12, p. 646.
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research* 39, 85– 106.
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research* 39, 85– 106.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies, Glasgow, Blackie and Son, p. 239.
- Skinner, B.J., 1979. The many origins of hydrothermal mineral deposits. In: Barnes, H.L. (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley and Sons Inc., New York, pp.1- 21.
- Touret, J., Dietvorst, P., 1983. Fluid inclusions in high-grade anatectic metamorphites. *Journal of the Geological Society* 140, 635– 649.
- Uemoto, T., Ridley, J., Mikucki, E., Groves, D. I., Kusakabe, M., 2002. Fluid chemical evolution as a factor in controlling the distribution of gold at the Archean Golden Crown lode gold deposit, Murchison province, Western Australia. *Economic Geology* 97, 1227- 1248.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55, 229– 272.
- Yardley, B.W.D., Graham, J.T., 2002. The origins of salinity in metamorphic fluids. *Geofluids* 2, 249– 256.
- Yousefinia, N., 2005. Fluids inclusion study in Mouteh gold deposit and the possibility of using it as exploratory criteria for separating gold-bearing and barren zones, M.Sc thesis. Tarbiat Moallem University, Iran (in Persian).
- Zhang, Y., 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.

