

Research Article

## Fluid inclusion and O-S stable isotope studies in determining the genesis of gold mineralization in the Hesar mining area, southwest Mianeh, NW Iran

Mohammad Yousefi<sup>1</sup>, Nematollah Rashidnejad Omran<sup>2\*</sup>, Nima Nezafati<sup>3</sup>, Peyman Afzal<sup>4</sup>

1- Head of Geology Laboratory, Faculty of Basic Sciences, Azad University, Science and Research Branch, Tehran

2- Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, P.O. Box 14155–175, Tehran, Iran

3- Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

**Keywords:** Fluid inclusions, Oxygen isotope, Sulfur isotope, Gold, Mianeh

### 1- Introduction

The Hesar gold mining area is located in southwest Mianeh, within the Alborz-Azerbaijan structural zone of northwestern Iran. Based on geological and geodynamic models, the Tethys belt has a high potential for metallic ores, especially epithermal-porphyry gold and copper (Richards, 2015; Richards and Sholeh, 2016). Due to its location in the Tethys orogenic belt, Iran hosts many gold and copper resources, most of which related to magmatism associated with calc-alkaline volcanic arcs. The Alborz-Azerbaijan and Urumieh-Dokhtar zones, as part of the Neotethys belt, comprise many of these deposits. Compositional analysis of brines within minerals deposited from hydrothermal fluids is an effective technique to obtain the physicochemical properties of the mineralizing fluids (Giles and Marshall, 2004). The study of fluid inclusions as residues of paleo-brines provides comprehensive information on density, pressure, temperature, depth, salinity, and type of mineralization, as well as the volume of solutes in the fluid (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985). This study aims to constrain the mineralogical composition of the deposit and the host rocks, to classify fluid inclusion generations in quartz, to specify the temperature and salinity of the hydrothermal solution effective in the formation of the deposit, and to determine its genesis.

Geochemistry of light stable isotopes which are among the main constituents of geological fluids is an efficient way in the study of fluid systems and the effects of rock-fluid interaction (Sharp, 2006). In economic geology, stable isotope studies help to identify the origin and composition of the mineralizing fluids, recognizing the origin of ores, and determining the temperature and other conditions of the ore deposition. Variations in temperature, reduction conditions, pH, and isotopic composition of the primary source of sulfur can cause changes in sulfur isotope values (Ohmoto, 1972; Hoefs, 2004).

### 2- Results and Discussion

According to the field and microscopic studies, it can be clearly said that in the study area, there are both an alkaline rhyolite dome and a subvolcanic granophyre intrusion, both of which can be the origin of siliceous solutions involved in the mineralization. The presence of textures such as open space-filling, vein, disseminated and replacement in the host rock of the mineral zone of the Hesar mining area indicates an

\* Corresponding author: [nematollah@gmail.com](mailto:nematollah@gmail.com)

DOI:10.22055/AAG. 2021.36913.2213

Received 2021-03-13

Accepted 2021-07-22

epigenetic origin for mineralization. Alteration types observed in the area include epidote, biotite, intermediate argillic, advanced argillic, and silicification. Through studying the samples from the area, five types were identified based on the phases at room temperature and the homogenization method in the quartz host mineral: Type A- Mono-phase liquid (L), Type B- Mono-phase gas (V), Type C- Two-phase liquid-rich (L+V), Type D- Two-phase gas-rich (V+L), Type E- Three-phase liquid-rich with solid phase (V+L+S).

Microthermometric study was performed on 108 primary fluid inclusions in quartz with almost no fracture or necking-down as far as possible. The melting temperature of the first ice crystal in the quartz at the Hesar mining area range from -21 to -61°C. The melting temperature range for the last ice crystal was between -9 and -1.1°C and the homogenization temperature ( $T_h$ ) was from 140 to 260°C. The salinity was between 0.18 and 14 wt.% NaCl equivalent, the highest frequency was in the range of 2 to 6. The  $\delta^{34}\text{S}$  values in the pyrite specimens were from -5.77 to -1 ‰. Placing the results of these analyses in the reference diagrams and comparing them with those of other types of mineralization, suggest that gold mineralization in the Hesar area is of epithermal type. The  $\delta^{18}\text{O}$  values in the quartz from this mining area vary between -1.8 and -3.7 ‰ which is mainly in the range of meteoric waters.

### 3- Conclusions

The information obtained from fluid inclusion and stable isotope studies in the Hesar mining area shows that mineralization occurred at low temperature and salinity, which is characteristic of epithermal deposits. The microthermometric data indicate the infiltration of the ore-forming fluids in the spaces provided by fractures in the rhyolitic and rhyodacitic host rocks, resulting from tension in the area.

Due to the variations in density, it is evident that two processes of cooling and boiling have caused the deposition and concentration of ores. Comparing sulfur isotope values obtained from the Hesar area with those of the world's largest deposits suggests that the ore-forming fluids in the area were epithermal consistent with the results obtained from fluid inclusion data. Also, the oxygen isotope ratios from the Hesar area imply that the fluid in equilibrium with the ore-forming quartz vein was in the range for meteoric waters. This finding is completely consistent with the results obtained from the homogenized fluid inclusions.

### References

- Giles, A.D., Marshall, B., 2004. Genetic significance of fluid inclusions in the CSA Cu–Pb–Zn deposit, Cobar, Australia. *Ore Geology Reviews* 24(3), 241–266. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.05.003>.
- Hoefs, J., 2004. *Stable Isotope Geochemistry*, Springer, Switzerland, p. 402. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78527-1>
- Ohmoto, H., 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 67, 551–579. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.5.551>.
- Richards, J. P., 2015. Tectonic, magmatic and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews* 70, 323–345. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>.
- Richards, J.P., Sholeh, A., 2016. The Tethyan tectonic history and Cu-Au metallogeny of Iran. *Economic Geology*, Special Publication 19, 193–212. <https://doi.org/10.1016/i.oregeorev.2014.11.009>
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: Ribbe, P.H., (Ed.). *Reviews in mineralogy*. pp. 12-644. <https://doi.org/10.1515/9781501508271-001>
- Sharp, Z., 2006. *Principles of Stable Isotope Geochemistry*, Pearson prentice Hall, USA, p. 344. <http://dx.doi.org/10.2138/rmg.2017.82.1>.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. *A practical guide to fluid inclusion studies*, Blackie, London, p. 239. <https://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.356.32>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Yousefi, M., Rashidnejad, Omran, N., Nezafati, N, Afzal, P., 2023. Fluid inclusion and O-S stable isotope studies in determining the genesis of gold mineralization in the Hesar mining area, southwest Mianeh, NW Iran. Adv. Appl. Geol. 12(4), 866-887.

DOI:10.22055/AAG. 2021.36913.2213

[https://aag.scu.ac.ir/article\\_17046.html](https://aag.scu.ac.ir/article_17046.html)

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## استفاده از مطالعه میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و گوگرد در تعیین ژنز کانه‌زایی طلا در محدوده حصار، جنوب غرب میانه، شمال غرب ایران

محمد یوسفی

دانشجوی دکتری دانشکده علوم پایه- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

نعمت الله رشیدنژاد عمران\*

دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

نیما نظامتی

دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، تهران

پیمان افضل

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد تهران جنوب

\* Nematollah@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۳۱

### چکیده

محدوده معدنی طلای حصار در زون البرز- آذربایجان واقع شده است. لیتولوژی غالب در محدوده معدنی، سنگ‌های آتشفشانی، نیمه آتشفشانی و رسوبی مربوط به دوران سنوزوئیک هستند که شامل سنگ‌های آتشفشانی و پیروکلاستیکی، واحدهای آندزیت- تراکی آندزیت، بازالت، ایگنمبریت و توف با سن ائوسن و مربوط به فاز کوهزایی لارامید است که تحت تأثیر یک فاز انبساطی از گدازه‌های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی با سن الیگوسن که از گسل‌ها و شکستگی‌ها، بصورت دایک‌های دولریتی و سیل‌ها و استوک‌های عمدتاً داسیتی، ریوداسیتی برونزد دارند و دگرسانی‌های سیلیسی، هیدروکسیدی و کائولنی وابسته به این توده‌ها بوجود آمده‌اند. کانی‌زایی عمده، در محدوده مورد مطالعه، طلا در همراهی با پیریت، آرسنوپیریت، گوتیت و مگنتیت، است که در دو فاز کانی‌زایی و عمدتاً بصورت پراکنده است. کانی‌زایی طلا حاصل تجزیه پیریت و آرسنوپیریت‌های طلادار است که بصورت آزاد در زمینه سنگ دیده شده است، این کانی‌زایی مربوط به فاز دوم برونزدهای آتشفشانی و نیمه آتشفشانی با سن الیگوسن تا میوسن است. نتایج به دست آمده از مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال در کانی‌کوارتز بیانگر آن است که دمای همگن‌شدگی در دامنه ۱۴۰ تا ۲۶۰ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند و همچنین دمای ذوب آخرین بلور یخ ۰/۱- تا ۹- درجه سانتی‌گراد است و درجه شوری بین ۰/۱۸ تا ۱۴ درصد وزنی معادل نمک طعام با محدوده فراوانی ۲ تا ۶ درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه گردیده است. با توجه به مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  (۵,۷۷- در هزار و بیشترین مقدار، ۱- در هزار) در پیریت، بیانگر منشاء ماگمایی گوگرد و در نتیجه کانه‌های پیریت، آرسنو-پیریت و طلا در این محدوده معدنی است. سیال در حال تعادل با کوارتز در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد دارای مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  بین ۱/۸- تا ۳/۷- در هزار بوده به طوری که مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  این سیال عمدتاً در محدوده آب‌های جوی و سنگ‌های گرانیته نیمه آتشفشانی واقع می‌شود. با توجه به اطلاعات به دست آمده از محدوده مطالعاتی حصار، کانی‌زایی در این محدوده از نوع اپی‌ترمال است.

واژگان کلیدی: میانبارهای سیال، ایزوتوپ اکسیژن، ایزوتوپ گوگرد، طلا، میانه

### ۱- مقدمه

شهرستان میانه واقع شده است. این محدوده در زون ساختاری البرز- آذربایجان قرار گرفته است. بر اساس

محدوده معدنی حصار در ۵ کیلومتری جنوب غربی

آن دانسته شده‌اند (Berberian and King, 1981). در پهنه البرز- آذربایجان، فرآیندهای آتشفشانی ائوسن دربردارنده تناوبی از سنگ‌های آذرآوری، رسوبی و گدازه‌های دریایی هستند که بیشترشان سن ائوسن میانی دارند و در چینه شناسی ایران، سازند کرج نام دارند (Stoeklin and Eftekhar Nezhad, 1972).

محدوده مورد نظر در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ میانه قرار گرفته است. تقریباً تمامی برونزدهای منطقه را سن‌های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی و رسوبی مربوط به دوران سنوزوئیک تشکیل می‌دهند که به دنبال فاز انبساطی، گدازه‌های آتشفشانی از شکاف‌های متعددی فوران نموده‌اند. این ولکانیک‌ها شامل لاتیت، تراکی آندزیت، آندزیت، بازالت، داسیت و ریولیت همراه با سنگ‌های پیروکلاستیک بوده و از سری آلکالن هستند. بر پایه اطلاعات موجود، ولکانیک‌های ائوسن البرز، ارمنستان، آذربایجان با هم قابل مقایسه بوده و نبود گدازه‌های تیپیک کالک آلکالن چهره شاخص کمر بند ولکانیکی البرز- آذربایجان و قفقاز کوچک می‌باشد که به دو نوع سدیک و پتاسیک قابل تقسیم هستند. به هر حال از نظر ساختاری می‌توان رخنمون‌های این منطقه را به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم نمود. رخنمون‌های عمده و اصلی این منطقه از سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی ترشیری با سن ائوسن تشکیل شده و تنها در بخش کوچکی از بلندی‌های قافلان کوه نهشته‌های پرمین و تریاس دیده می‌شود. این منطقه از دید ساختمانی به کمر بند ولکانیکی البرز- آذربایجان متعلق است که با فعالیت شدید ولکانیسم ترشیاری همراه می‌باشد. روند این چینه‌ها شمال‌شرق- جنوب‌غرب می‌باشد و محور چین‌ها با روند مزبور هم راستا هستند. ولکانیک‌های بخش غربی توسط خروج گدازه‌ها و توده‌های جوانتر ریولیتی- داسیتی به شکل گنبد یا سیل تحت تاثیر قرار گرفته و در برخی از نقاط توسط رسوبات پلیوسن پوشیده شده‌اند. گنبد‌های تفریق یافته و سیالات وابسته، منشأ دگرسانی‌ها در منطقه بوده‌اند. واحدهای این بخش بیشتر از رسوبات تخریبی- تبخیری از نوع مارن و ماسه سنگ‌های گچ‌دار بوجود آمده‌اند، که

مدل‌های زمین‌شناسی و ژئودینامیکی، کمر بند تتیس پتانسیل بالایی برای کانه‌زایی‌های فلزی به ویژه کانسارهای اپی ترمال- پورفیری طلا و مس دارد (Richards and Sholeh, 2016; Richards, 2015). ایران به علت قرارگیری در کمر بند کوهزایی تتیس میزبان ذخایری از طلا و مس است که عمده این ذخایر در ارتباط با ماگماتیسم مرتبط با کمان‌های آتشفشانی کالک آلکالن تشکیل شده‌اند. این نوع سنگ‌ها میزبان اصلی ذخایر فلزهای پایه و گرانبها در بسیاری از نقاط کره زمین است (Sillitoe and Hedenquist, 2003).

پهنه‌های البرز- آذربایجان و ارومیه- دختر، به عنوان بخشی از کمر بند نئوتتیس، تعدادی از کانسارها را در خود جای داده است، که از آن جمله می‌توان به مس پورفیری میدوک، سرچشمه، و سونگون و کانی‌زایی‌های فلزات پایه، پورفیری‌های مس-طلا و طلا و نقره اشاره کرد (Mohammadi and Mehrparto, 2008). در برهه زمانی ترشیری در ناحیه آذربایجان باعث شده است که این ناحیه همواره مورد توجه زمین شناسان قرار گیرد. به دلیل گسترش فعالیت‌های ماگمای ترشیری و همچنین دگرسانی‌های گسترده، پژوهش‌های اکتشافی مقدماتی در این ناحیه به طور جدی از اواخر دهه ۱۳۷۰ در دستور کار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور قرار گرفت که منجر به شناسایی محدوده‌های مختلف شده است (Mohammadi and Mehrparto, 2008; Mokhtari and Yarmohammadi, 2007).

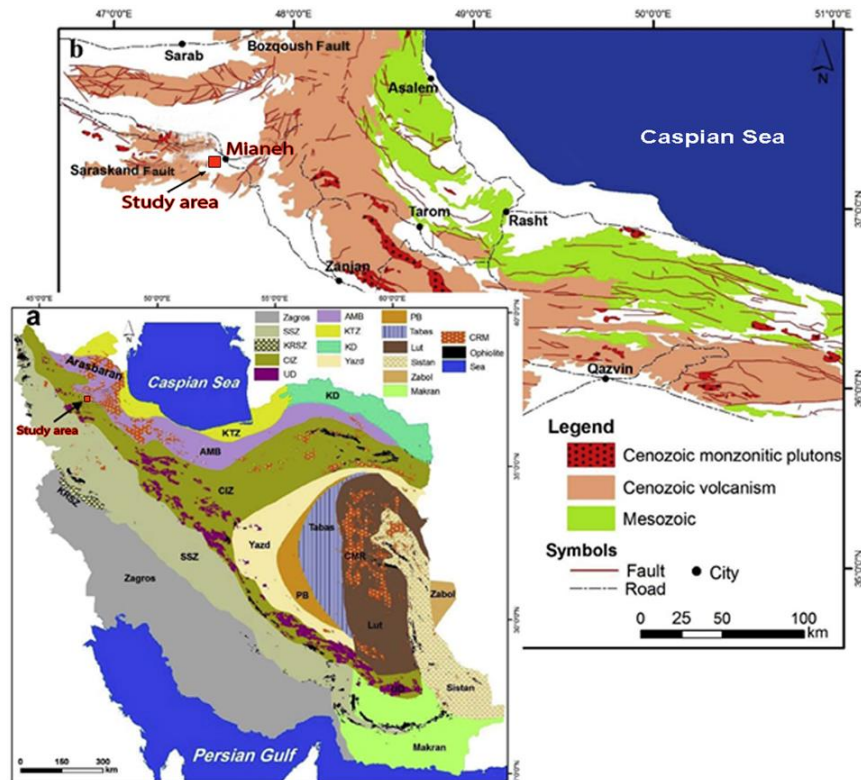
هدف از پژوهش پیش رو، تعیین خاستگاه سیال‌های کانه‌ساز در محدوده معدنی حصار با استفاده از مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد و اکسیژن است.

## ۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در ۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان میانه واقع شده است. از لحاظ تقسیم بندی زمین‌شناسی ایران، در زون البرز- آذربایجان قرار گرفته است (Nabavi, 1976). ایران در کمر بند چین خورده آلپ - هیمالیا و در ناحیه فشارشی ناشی از همگرایی دو صفحه عربی و اوراسیا جای دارد. در کل، بیشتر فرآیندهای آتشفشانی ایران در ارتباط با فرورانش حوضه اقیانوسی نئوتتیس و شاخه‌های

این دگرشیبی‌ها را می‌توان به جنبش‌های کوهزایی آلپی در اواخر میوسن نسبت داد (Alavi et al., 1979). عملکرد گسل‌ها باعث بالآمدگی، جابجا شدن، حذف، تکرار، گاهی خروج گدازه‌های جوانتر داسیتی - ریولیتی شده و موجب دگرسانی گدازه‌های قدیمی‌تر شده است.

نشان‌دهنده یک محیط گرم و کم عمق و احتمالاً دریاچه‌ای بوده است. این نهشته‌ها در اثر فازهای پسین آلپی، چین خورده و تاقدیس‌ها و ناودیس‌های منظمی را در جهت شمال غرب - جنوب شرق بوجود آورده‌اند. این حوضه از همه سو توسط رسوبات کمتر چین خورده پلیوسن به صورت دگرشیب پوشیده شده است. وجود



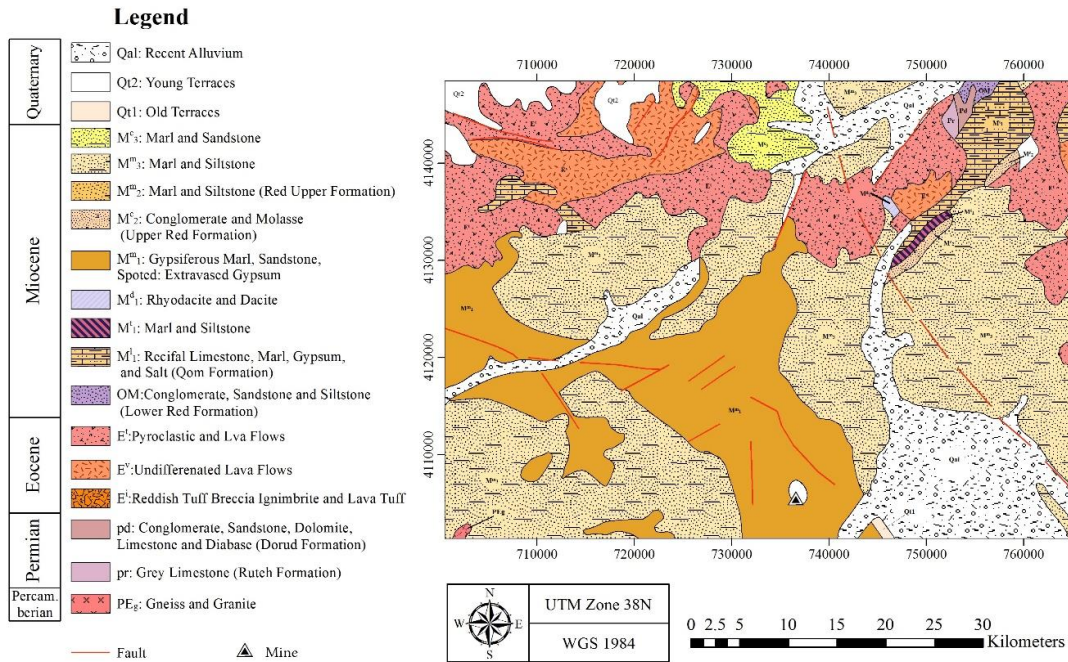
شکل ۱- (a) نقشه ساختاری ساده شده ایران زمین (Berberian and King, 1981). (a) زون ساختاری البرز-آذربایجان غربی و محدوده مورد مطالعه (Richards and Sholeh, 2016)

Fig. 1. (a) Simplified structural map of Iran (Berberian and King, 1981). (b) Location of the study area is the western part of Alborz-Azerbaijan magmatic belt (black rectangle). Richards and Sholeh, 2016.

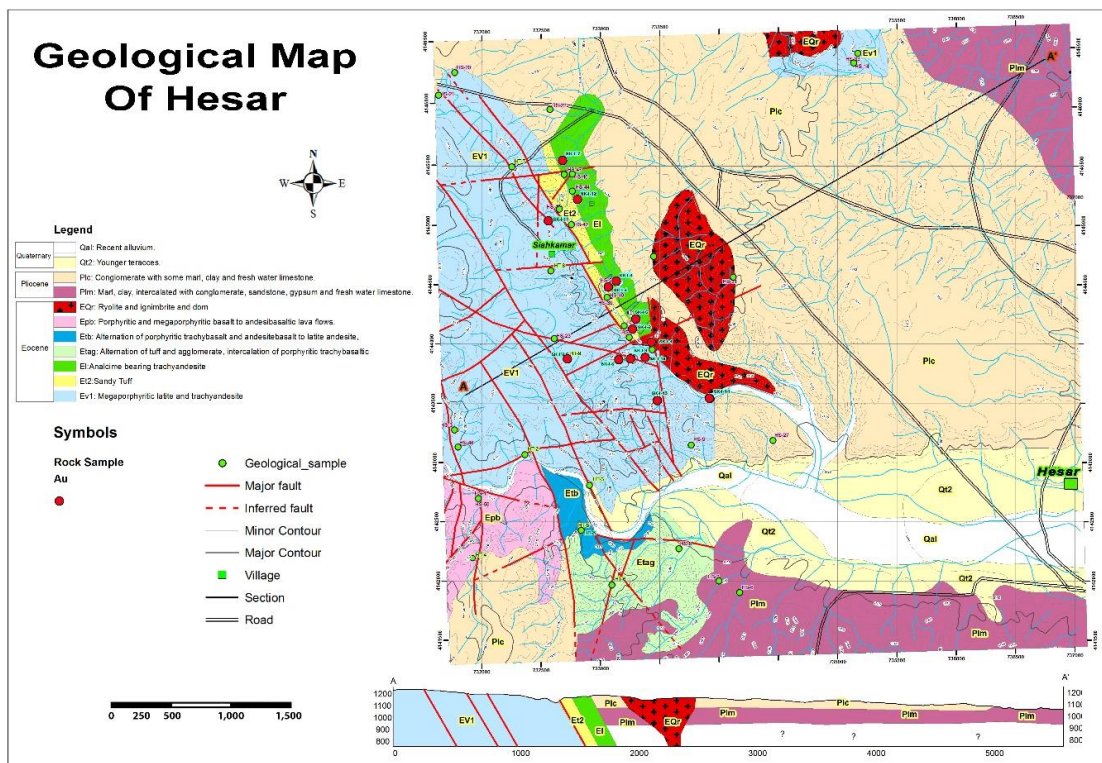
گدازه‌های بازالتی با سن ائوسن را قطع کرده، همراه با سیالات گرمابی وابسته، موجب رخداد دگرسانی‌های سیلیسی - سریسیتی و کانی‌زایی فلزی شده است. همچنین در بعضی قسمت‌ها، واحدهای کنگلومرا، ماسه، رس و لایه‌های آهکی به همراه توف و سنگ‌های پیروکلاستی با سن پلیوسن دیده می‌شوند. بر روی این واحدها، در برخی نقاط، رسوبات و نهشته‌های عهد حاضر، بصورت ناپیوستگی قرار می‌گیرند.

### ۳- زمین‌شناسی محدوده معدنی حصار

مجموعه سنگی آتشفشانی با سن ائوسن، قدیمیترین واحد شناخته شده موجود در محدوده معدنی حصار می‌باشد. جنس این سنگ‌ها از نوع گدازه‌های آندزیتی - تراکی آندزیتی، بازالتی و ایگنیمبریت همراه با توف، در مرکز و شمال محدوده، می‌باشد. واحد داسیت و ریوداسیت، بصورت استوک و دایک با سن اولیگوسن تا میوسن،



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه وسیع تری از محدوده مورد مطالعه برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ میانه (Alavi et al., 1979)  
 Fig.2 Geological map of a wider region of the study area taken from the 1: 250,000 Mianeh (Alavy et al., 1979)



شکل ۳- نقشه زمین شناسی محدوده حصار (مقیاس ۱:۲۰۰۰۰)  
 Fig.3 Geological map of the study area (Scale: 1:20000)

#### ۴- روش

این مطالعه بر پایه مشاهدات صحرایی، برداشت‌های زمین‌شناسی سطحی استوار است. شناسایی واحدهای سنگی، دگرسانی‌ها و کانی‌سازی، با بررسی روابط صحرایی در مقیاس‌های میکروسکوپی و میکروسکوپی انجام شده است. تعداد ۲۰ مقطع نازک و نازک صیقلی به جهت مطالعات دقیق ویژگی‌های کانی‌شناختی و بافتی واحدهای سنگی میزبان، کانسنگ طلا و باطله تهیه گردید. همچنین نمونه‌هایی از کانی کوارتز با ابعاد  $1 \times 1$  سانتی‌متری انتخاب شد و سپس در شرکت پرتو رایان رستاک بوسیله دستگاه (FEI Quanta 200 ESEM) از یک نمونه که با مطالعه میکروسکوپ نوری مشکوک به حضور طلا بوده است، تصاویر SEM تهیه شد و به صورت نیمه‌کمی مورد آنالیز EDX قرار گرفتند. تعداد ۱۰ نمونه شفاف و بدون شکستگی از کانی کوارتز همزاد با طلا انتخاب و مقطع دو بر صیقل تهیه گردید، سپس توسط میکروسکوپ پلاریزان، میانبرهای سیال موجود در نمونه‌های رگه‌های کوارتز محدود، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. آنالیز ریزدماسنجی توسط دستگاه Linkam THMSG 600 در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت. این دستگاه قادر به اندازه‌گیری دما در محدوده  $196^\circ\text{C}$  تا  $600^\circ\text{C}$  می‌باشد. دستگاه با استفاده از سنسور میکروترومتر دیجیتالی در سه دمای  $50^-$ ، صفر و  $100^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد، کالیبراسیون و کنترل شد. همچنین تعداد ۶ نمونه کوارتز جهت آنالیز ایزوتوپی اکسیژن و تعداد ۶ نمونه آنالیز بر روی کانه پیریت جهت اندازه‌گیری مقادیر گوگرد به آزمایشگاه دانشگاه اراک ارسال گردید. نمونه‌های مورد مطالعه ابتدا توسط دستگاه سنگ شکن فکی خرد شد تا از بین آنها مقادیر لازم جهت پودر کردن برداشته شود. در مرحله بعدی توسط میکروسکوپ بیناکولار سعی شد تا از بین نمونه‌های خرد شده نمونه‌هایی که آلودگی کمتری به مواد زاید دارند جدا شوند. بعد از جداسازی، نمونه‌ها را در هاون آگاتی پودر کرده و در حدود یک گرم از آنها جهت آنالیز انتخاب شد، و سپس نمونه‌ها توسط دستگاه آنالیز عنصری در دمای بالا در حضور اکسیژن اضافی مورد احتراق قرار گرفت.

از سنگ‌ها و رگه‌های سیلیسی محدوده معدنی حصار

۱۴ نمونه جهت آنالیز ICP به آزمایشگاه زرآما ارسال شد. پس از بررسی نتایج، با توجه به مقادیر طلا در تعدادی از نمونه‌ها، می‌توان مهمترین و اصلی‌ترین عنصر اقتصادی در این منطقه را طلا در نظر گرفت.

#### ۵- بحث

##### ۵-۱- کانی‌زایی

با توجه به مطالعات صحرایی و میکروسکوپی بطور واضح می‌توان گفت که در منطقه مورد مطالعه، هم گنبد ریولیتی آلکالن و هم توده گرانوفیری نیمه عمیق وجود دارد که هر دو می‌توانند خاستگاه محلول‌های سیلیسی در کانه‌زایی باشند. وجود بافت‌هایی مانند پرکننده فضای خالی، رگه‌ای، پراکنده، جانیشینی و گزینشی در سنگ میزبان محدوده معدنی حصار حاکی از اپی ژنتیک بودن منشا کانی‌زایی است. گاهی همراهی دانه‌های کوارتز با مواد کانه، طی جایگزینی در داخل رگه و رگچه، به نظر می‌رسد که کانی‌زایی مربوط به صورت گزینشی انجام شده است. بدین صورت که کانی‌زایی در داخل توده ریوداسیتی دیده می‌شود. کانی‌زایی در مرحله دوم و بصورت انتخابی انجام شده است. پاراژن کانیایی در دو فاز، شامل:

##### الف- فاز کانی‌زایی قدیمی

این فاز بصورت دانه‌های پراکنده و گاه توده‌ای از مگنتیت است. مگنتیت در بعضی مناطق بر اثر اکسایش به کانی‌هایی مانند مارتیت تبدیل شده است. در این فاز کانه پیریت به ندرت دیده می‌شود (شکل a۴).

##### ب- فاز کانی‌زایی جدید

این فاز از نوع سولفیدی بوده و نماد آن کانی پیریت است و طی واپاشی، فرآورده‌های ثانویه هیدروکسید آهن از جمله گوتیت را تولید کرده است و در سطح مقطع پراکندگی دارد (شکل b۴).

بلورهای آرسنوپیریت به صورت لوزی شکل دیده می‌شوند که کاملاً توسط هیدروکسیدهای آهن جانشین شده‌اند که ردیاب کانه‌زایی طلا به حساب می‌آید. فرآورده‌های هیدروکسیدی آهن، نوع گوتیت از واپاشی کانی‌های پیریت و آرسنوپیریت به وجود آمده است و ربطی به واپاشی مگنتیت ندارند و بطور مشخص مربوط به فاز کانی‌زایی جدید است (شکل c۴).

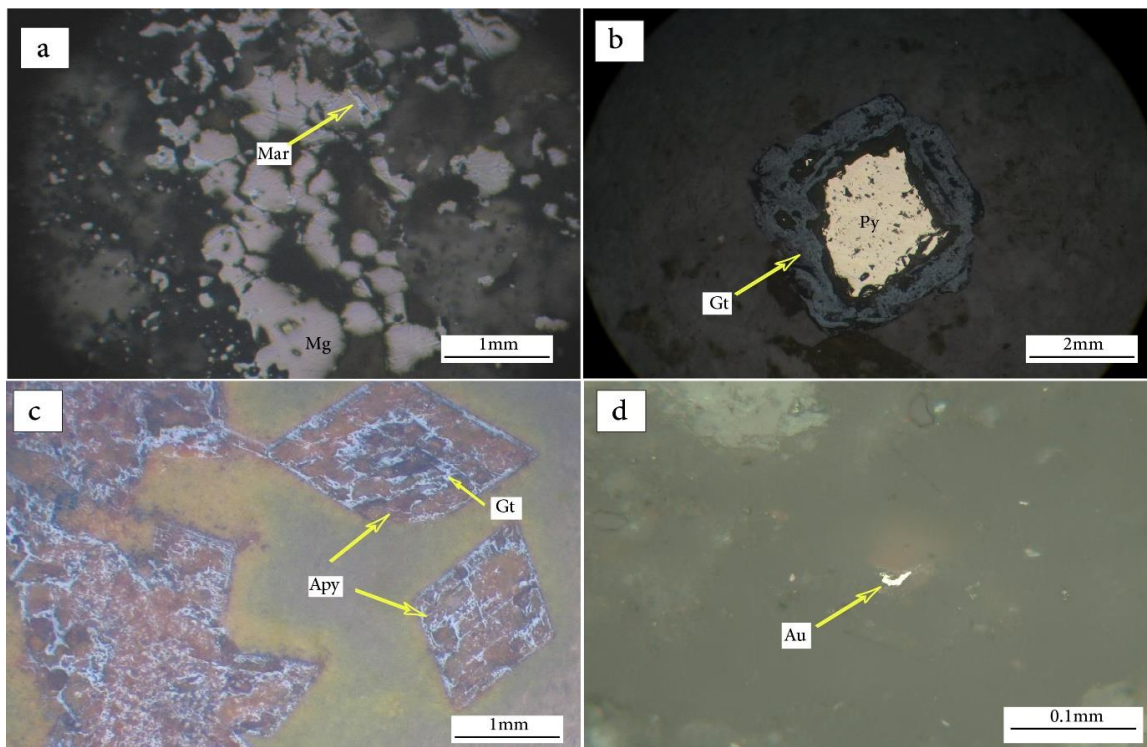


پی پی بی طلا را نشان می‌دهد (جدول ۱). با توجه به موقعیت نمونه‌ها و نتایج آنالیزها، کانی زایی طلا در محل تلاقی گسل‌ها در حاشیه‌ی سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی و ریوداسیتی اتفاق افتاده است. سایر عناصر در این منطقه از اهمیت کمتری برخوردار است.

در رگه سیلیسی، در شمال روستای سیه کمر، در مقطع نازک- صیقلی نقطه‌ای مشکوک به طلای آزاد دیده شد (شکل ۴c)، که جهت تصویربرداری و آنالیز با دستگاه میکروسکوپ الکترونی ارسال شد. با استفاده از تصاویر SEM از نمونه کوارتز با بزرگنمایی بالا طلا کاملاً مشخص شد (شکل ۵a). همچنین همزمان، از همان نقطه، آنالیز عنصری (EDX) نیز انجام شد، که در شکل ۵b، بصورت تجمع نقاط متراکم بدست آمده از آشکارساز طلا نشان داده شده است.

در فاز اول کانی‌زایی، بطور کلی کانی غالب، مگنتیت است که توسط فاز دوم کانی‌زایی سولفیدی از نوع کانی پیریت و فرآورده‌های هیدروکسیدی وابسته (گوتیت) در فرآیندهای بعدی زمانی قطع شده است. کانی‌زایی عمده در محدوده معدنی حصار، مربوط به فاز دوم و از نوع پیریت طلادار است. که در بیشتر موارد کانی پیریت طی واپاشی، فرآورده‌های ثانویه هیدروکسید آهن از جمله گوتیت را تولید کرده است در بعضی موارد تمام بلورهای پیریت توسط هیدروکسیدهای آهن جانشین شده‌اند و در سطح مقطع پراکندگی دارند.

ذرات طلای آزاد، به صورت پراکنده و به مقدار بسیار کم که حاصل واپاشی کانی پیریت و آرسنوپیریت طلادار است، در رگه‌های سیلیسی قابل مشاهده است (شکل ۴d). همچنین در نمونه‌های سنگی موجود در منطقه نتایج حاصل از آنالیز ICP مقادیری از چند پی پی بی تا ۲۷۰۹



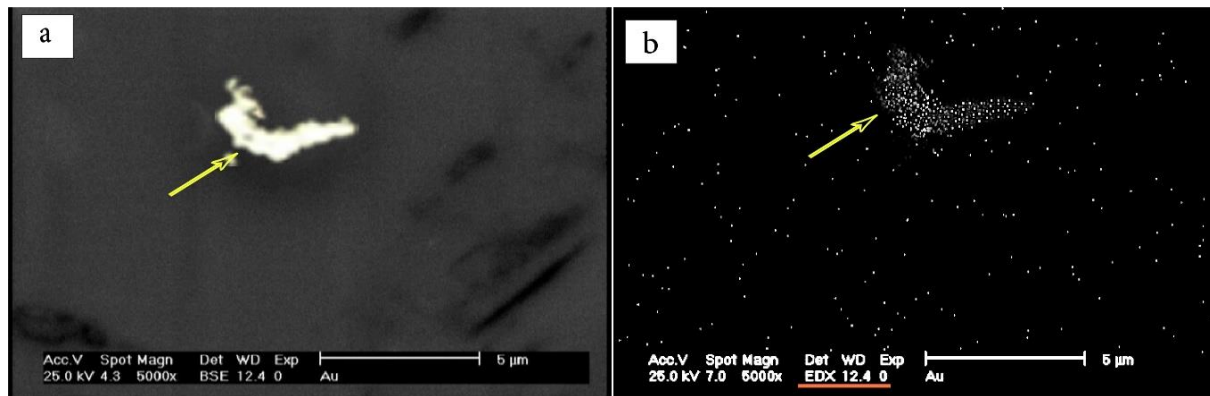
شکل ۴- (a) تصویر میکروسکوپی پیریت که از حاشیه به گوتیت تبدیل شده. (b) تصویر میکروسکوپی مگنتیت که مارتیتی شده. (c) تصویر میکروسکوپی طلا. (d) تصویر میکروسکوپی آرسنوپیریت که به گوتیتی تبدیل شده. اختصارات: Gt: گوتیت. Py: پیریت. Mar: مارتیت. Mg: مگنتیت. Au: طلا. Apy: آرسنوپیریت.

Fig. 4: (a) Pyrite microscopic image, altered to goethite. (b) magnetite microscopic image, convert to martite. (c) The gold microscopic image. (d) arsenopyrite microscopic image that convert to goethite. Abbreviations: Gt: Goethite. Py: Pyrite. Mar: Martite. Mt: Magnetite. Au: Gold. Apy: Arsenopyrite

جدول ۱- نتایج آنالیز ICP نمونه ها برای عنصر طلا و برخی عناصر سنگین

Table 1- The results of ICP analysis for gold elements and some heavy elements

Row	Sample	X	Y	Au	Ag	As	Cu	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn	Zr
				ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	SK-I-1	733491	4143974	2097	2.5	19	133	184	14	44	-	31	1
2	SK-I-2	733300	4144200	34	-	5	14	108	16	12	-	9	-
3	SK-I-3	733134	4144527	181	-	14	17	69	23	17	-	7	-
4	SK-I-4	733273	4144127	219	-	8	28	62	17	13	-	8	-
5	SK-I-5	732837	4142423	35	-	15	-	-	-	-	-	-	-
6	SK-I-6	732718	4143870	4	-	14	-	-	-	-	-	-	-
7	SK-I-7	733102	4143525	68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	SK-I-8	733158	4143873	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	SK-I-9	733255	4143878	1300	-	36	230	207	33	19	-	40	-
10	SK-I-10	733375	4143888	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	SK-I-11	732560	4145021	14	-	23	37	-	7	-	-	50	-
12	SK-I-12	733398	4143091	263	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	SK-I-13	733376	4143020	319	-	-	75	78	-	14	1.5	28	-
14	SK-I-14	733343	4142952	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-



شکل ۵- (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) طلا در کانی کوارتز. (b) تصاویر نمودار طیف‌های EDX طلا موجود در کانی کوارتز.

Fig. 5. (a) Scanning electron microscopy (SEM) image of gold in quartz mineral. (b) Diagram images of EDX gold spectra found in quartz minerals.

است. (شکل ۶ a).

دگرسانی اپیدوتی: از مرکز- شرق محدوده و از جنوب تا شمال کوه ساری‌داغ در دو طرف رودخانه آی‌دوقموش رخ داده است. اپیدوت در همراهی با کلریت، کلسیت و کوارتز، کانی‌های تشکیل‌دهنده این دگرسانی می‌باشند.

## ۵-۲- دگرسانی

دگرسانی بیوتیتی: به نظر می‌رسد این دگرسانی در مجاورت گسل‌های عمیق تحت تأثیر قرار گرفته و سیلیسی شدن و سریسیتی شدن قابل ملاحظه است. حجم بالایی از پیریت نیز بصورت رگچه‌ای و پراکنده در سنگ توسعه پیدا کرده

سنگ‌های میزبان این دگرسانی سنگ‌های ولکانیکی تراکی‌بازالت و بازالت پورفیری تا مگاپورفیری می‌باشند. (شکل ۶ ب).

دگرسانی آرژیلیک: رخنمون‌های کوچک و پراکنده‌ای در مرکز- غرب و شرق محدوده را شامل می‌باشد. در مرکز- غرب محدوده این دگرسانی به همراه رگه‌های سیلیسی و زون‌های سیلیسی مشاهده شده است. میزبان این دگرسانی واحد توف و آگلومرا می‌باشد. روند این دگرسانی‌ها شمالی- جنوبی و شمال شرق- جنوب غرب می‌باشد. کانی‌های مونتموریلونیت، کائولینیت، کوارتز و سریسیت از کانی‌های تشکیل دهنده این دگرسانی می‌باشد. در محل این دگرسانی‌ها، گسل‌های متعددی دیده می‌شوند که در تشدید دگرسانی نقش اساسی داشته‌اند (شکل ۶ ج).

دگرسانی آرژیلیک متوسط در مرکز محدوده با وسعتی نسبتاً کم و روند غالب شمال غرب- جنوب شرق گسترش دارد. سنگ میزبان این دگرسانی‌ها رخنمون‌های برشی شده واحدهای داسیت تا ریوداسیت و تراکی‌اندزیت می‌باشند. گسل‌های اصلی و گاه فرعی این زون‌ها را قطع کرده‌اند و دگرسانی در امتداد این گسل‌ها شدیدتر می‌باشد. کانی‌های کائولینیت، مونتموریلونیت، سریسیت و کوارتز کانی‌های تشکیل دهنده این دگرسانی‌ها می‌باشند (شکل ۶ د).

پدیده سیلیسی شدن در مرکز و مرکز- غرب محدوده با روندهای متفاوت تشکیل شده‌اند. در بعضی قسمت‌ها این دگرسانی‌ها بر دگرسانی آرژیلیک انطباق دارند. بیشتر کوارتز و مقادیری کائولینیت، سریسیت و پیریت، کانی‌های تشکیل دهنده این دگرسانی می‌باشند. این نوع دگرسانی بیشتر در هم‌جواری گسل‌ها و در میان سنگ‌های آتشفشانی و توفی و داسیتی دیده می‌شوند. این پدیده را می‌توان به مراحل انتهایی فرآیندهای آتشفشانی در منطقه و نفوذ محلول‌های داغ سیلیس‌دار در سنگ‌های پیرامون کانسار نسبت داد و کانی سازی طلا ارتباط مستقیم با این دگرسانی دارد (شکل ۶ ه).

### ۵-۳- مطالعات میانبارهای سیال

#### ۵-۳-۱- پتروگرافی میانبارهای سیال

مطالعات پتروگرافی میانبارهای سیال می‌تواند به شناسایی روابط پیچیده میان میانبارهای سیال و کانی‌های میزبان کمک نماید (Van den Kerkhof and Hein, 2001).

میانبارهای سیال می‌توانند از نظر ویژگی ظاهری مانند

اندازه، شکل، رنگ، ضریب شکست و مخصوصاً به وسیله فازهای موجود در آنها در دمای اتاق شرح داده شوند (van den kerkhof, 2001). میانبارهای سیال، اشکال متفاوتی دارند، اما تا حدودی از سامانه تبلور کانی تبعیت می‌کنند (به عنوان مثال حالت هگزگونال در کانی کوارتز) (Shepherd et al., 1985). از این جهت، در این مطالعه، به بررسی دقیق میانبارهای سیال موجود در کانی کوارتز، در محدوده معدنی حصار پرداخته شده است.

میانبارهای سیال، با فراوانی کم و با توزیع متفاوت در کانی کوارتز محدود وجود دارند. میانبارهای مطالعه شده در این پژوهش مطابق معیارهای رودر (Rodder 1984)، از نوع اولیه می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد؛ میانبارهای سیال موجود در مقاطع دوبر صیقل نمونه‌های منطقه مورد مطالعه، دارای اندازه‌های در محدوده ۵ تا ۳۰ میکرون است، اما بیشتر آنها دارای اندازه‌های کوچکتر از ۲۰ میکرون می‌باشند. میانبارهای سیال اولیه به صورت مجزا و درشت در زمینه 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. شکل‌های مشاهده شده در میانبارهای سیال موجود در کانی‌های کوارتز، به ترتیب فراوانی به صورت اشکالی چون نامنظم، بیضوی، کشیده، منفی بلور و پهن می‌باشند.

با مطالعه بر روی نمونه‌های محدود، پنج تیپ بر اساس فازهای موجود در دمای اتاق و روش همگن شدن، در کانی میزبان کوارتز شناسایی شده‌اند (شکل ۸). تقسیم‌بندی میانبارهای سیال اولیه موجود در کانی کوارتز، طبق تقسیم بندی ژنری و بافت توسط رودر (Rodder, 1984) انجام شد که در سال ۲۰۰۱ به وسیله خرکوف (Van den Kerkhof and Hein 2001) مورد تجدید نظر قرار گرفت.

تیپ A- تک فازی -مایع (Liquid) L

تیپ B- تک فازی-گاز (Gas) V

تیپ C- دو فازی غنی از مایع (Liquid rich) L+V

تیپ D- دو فازی غنی از گاز (Gas rich) V+L

تیپ E- سه فازی غنی از مایع همراه با فاز جامد مجهول

(Solid - bearing Liquid-rich inclusion) V+L+S

نوع A؛ تماماً از مایع پر شده است. فراوانی میانبارهای

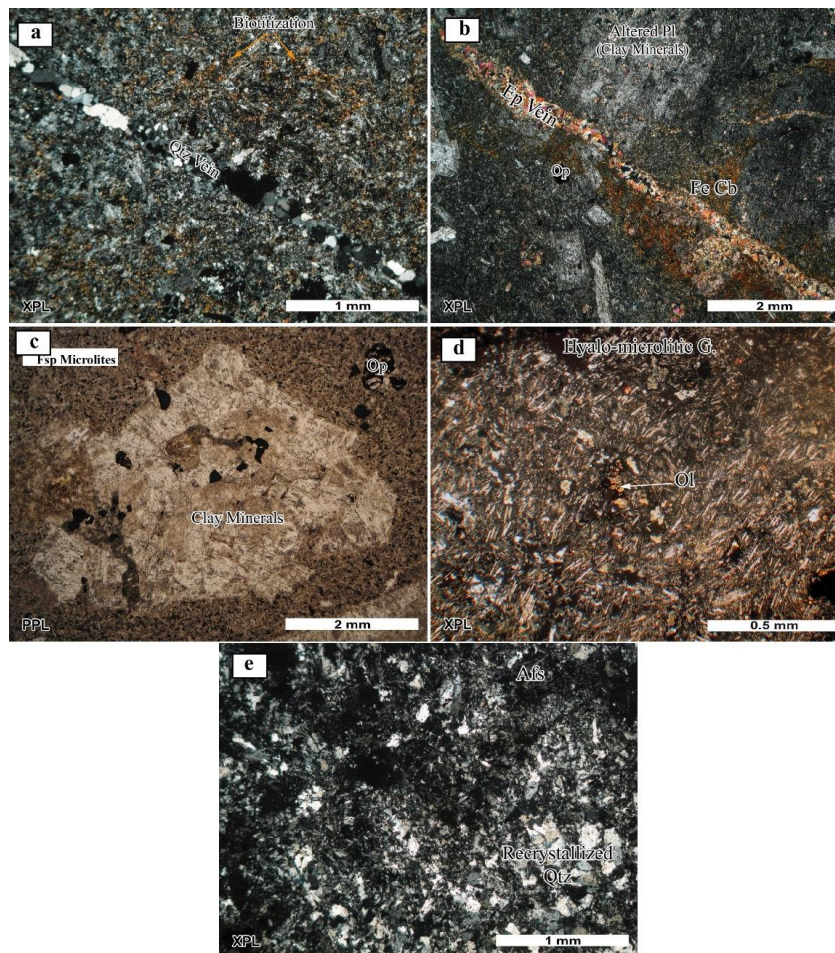
سیال تک فازی مایع بسیار کم و با اشکال مختلفی (اکثراً

گاز اتفاق می افتد. میانبارهای تیپ D در محدوده معدنی حصار نسبت به انواع دو فاز غنی از مایع، فراوانی کمتری را به خود اختصاص می دهند و بیشتر به اشکال نامنظم قابل تشخیص هستند.

نوع E؛ فاز جامد در این نوع میانبارها، در حجمی از مایع احاطه شده است. فاز جامد محصور شده شفاف (کانی مجهول) می باشد. فاز جامد موجود در طی عملیات گرمایش بدون هیچ تغییر باقی ماند و به عنوان فاز جامد شناسایی شده است و فاز دختر نمی باشد. این نوع میانبارها فراوانی بسیار کمی دارند.

نامنظم) قابل تشخیص می باشد. نوع B؛ گروهی از میانبارها هستند که تنها از فاز گازی تشکیل شده اند، حضور میانبارهای نوع B نشان دهنده جوشش می باشد ( Simmons et al., 2000). نوع C؛ در این نوع میانبارها، بیشترین حجم را فاز مایع در برمی گیرد و فاز گاز تنها ۱۰ تا ۳۵ درصد حجم سیال را شامل می شود. این نوع میانبار فراوانی بیشتری نسبت به سایر انواع میانبارهای سیال در کانی کوارتز محدود حصار دارند و همچنین دارای اندازه بزرگتری می باشند.

نوع D؛ در این میانبارها، حباب گاز بیش از ۷۰ درصد حجم سیال را دربر گرفته است. در میانبارهایی که درجه پرشدگی آنها کمتر از ۴۵ درصد است، همگن شدن به فاز



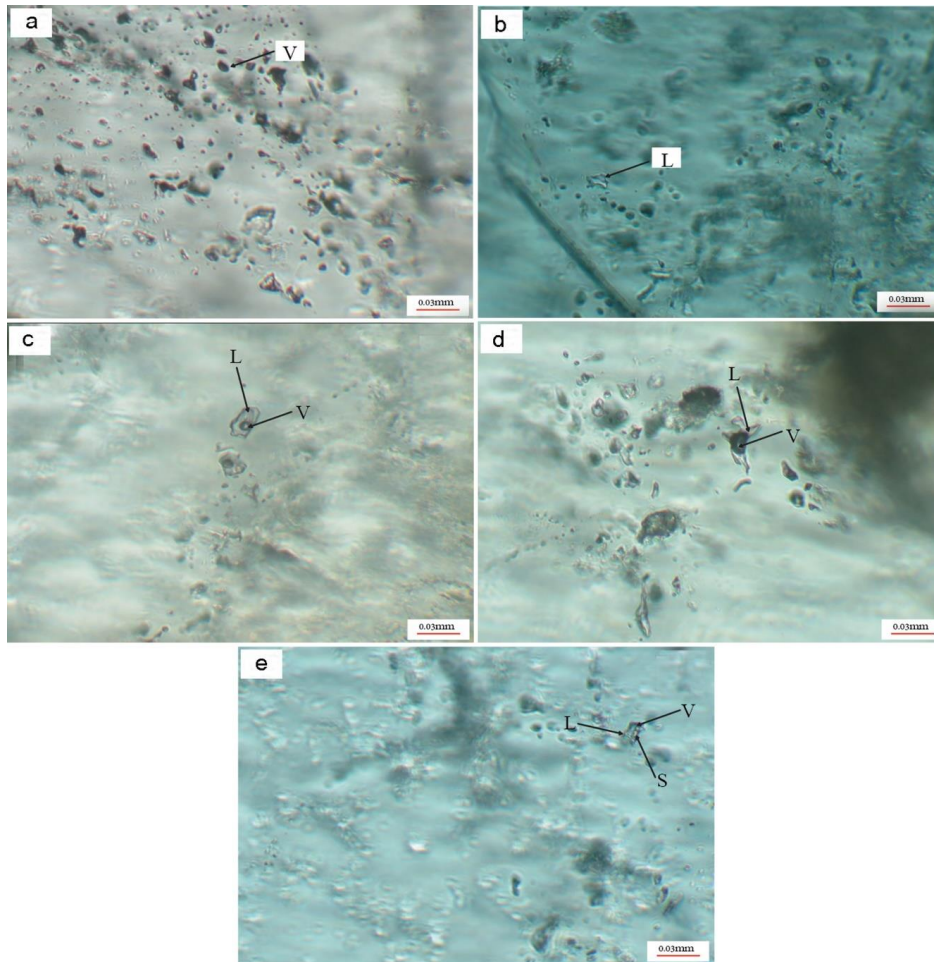
شکل ۶- (a) دگرسانی بیوتیتی (b) دگرسانی اپیدوتی، (c and d) دگرسانی آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته (e) دگرسانی سیلیسی. اختصارات: Qtz: کوارتز. Ep: اپیدوت. Ol: الیون. Op: اپک.

Fig. 6. (a) Biotite alteration. (b) Epidural alteration. (c and d) argillic alteration and Advanced argillic. (e) Siliceous alteration Abbreviations: Qtz: Quartz. Ep: Epidote. Ol: Olivine. OP: Opac.

Stages Minerals		Hydrothermal Alteration		Past Mineralization
		Pre Mineralization	Mineralization	
Ore	Pyrite		████████████████████	
	Arseno pyrite		████████████████████	
	Gold		████████████████████	
	Magnetite		████████████████████	
	Martitization			████████
	Goethite			████████
Gangue	Quartz	████████████████████		
	Sericite	████████████████████		
	Clay minerals	████████████████████		
	Kaolinite	████████████████████		
	Chlorite	████████████████████		
	Epidote	████████████████████		
	Montmorillonite	████████████████████		

شکل ۷- توالی پاراژنزی در محدوده معدنی حصار

Fig. 7- Paragenesis of mineral association in the Hesar area



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپی میانبره‌های سیال در کانی کوارتز محدوده حصار. (a) تجمعی از تک فاز گاز. (b) تک فاز مایع به همراه دو فاز غنی از مایع. (c) دو فازهای غنی از مایع. (d) دو فازهای غنی از گاز. (e) سه فاز جامد-مایع-گاز. اختصارات: L: مایع، V: بخار، S: جامد.

Fig. 8. Photomicrographs of fluid inclusions in Quartz mineralization Hesar deposit. (a) Only Liquid phase. (b) Only Vapor phase by Liquid-rich fluid inclusion. (c) Liquid-rich fluid inclusion. (d) Vapor -rich fluid inclusion. (e) Solid-bearing fluid inclusion. Abbreviations: L: Liquid. V: vapor. S: Solid

### ۵-۳-۲- ریزدماسنجی

پس از اتمام عملیات پتروگرافی میانبارها و ثبت اطلاعات بدست آمده، مهمترین مرحله، حرارت سنجی می‌باشد، که به منظور دستیابی به شرایط فیزیکوشیمیایی محلول‌های کانه‌زا (هنگام نهشت کانه‌ها) انجام می‌شود. در واقع این روش، مهم‌ترین و گسترده‌ترین روش تجزیه غیرمخرب در میانبارهای سیال است (Shepherd et al., 1985).

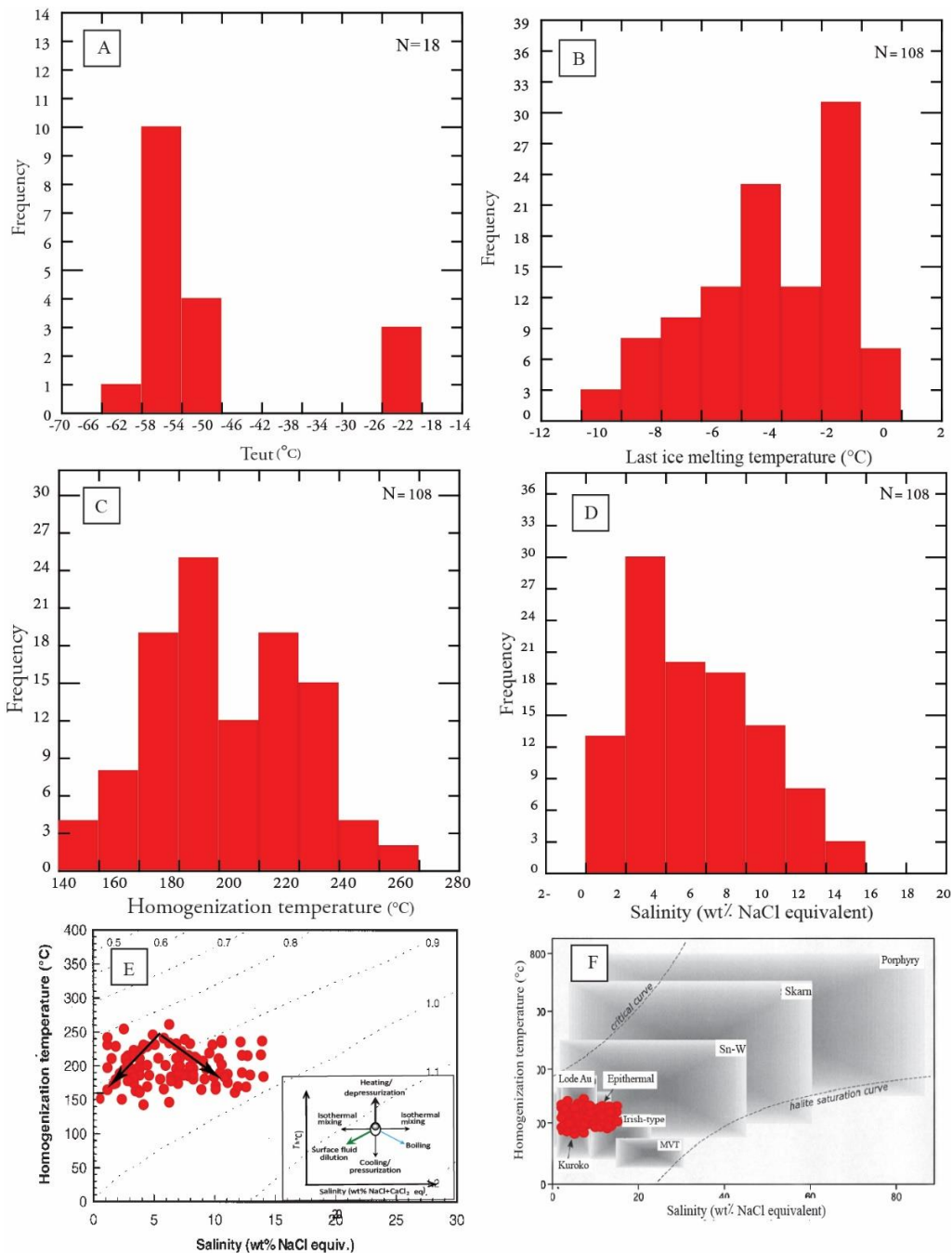
در این پژوهش ریزدماسنجی بر روی ۱۰۸ میانبار سیال اولیه، سالم و بدون دم بریدیگی در کانی کوارتز محدوده مورد مطالعه، توسط دستگاه Linkam THMSG 600 در آزمایشگاه ریزدماسنجی آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه تربیت مدرس با قابلیت اندازه‌گیری در محدوده دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد انجام گرفت.

در میانبارهای دو فاز غنی از مایع و غنی از گاز، مطالعات ریزدماسنجی شامل؛ ابتدا عملیات سرمایش (Freezing) و سپس گرمایش (Heating) است. انجماد نهایی میانبارها در محدوده دمایی ۱۰۰- تا ۱۰۵- درجه سانتی‌گراد صورت گرفت، تا عمل انجماد کلیه فازها صورت گیرد. سپس دما را افزایش داده تا اولین نقطه ذوب یخ ( $T_e$  or  $T_{mf}$ ) آشکار شود، این دما نشان دهنده املاح موجود در نمونه است. با ادامه افزایش دما، یخ‌های موجود در میانبار ذوب شده تا جایی که آخرین بلور یخ ذوب شود که به این نقطه، آخرین نقطه ذوب یخ ( $T_{mice}$ ) گفته می‌شود که نشان‌دهنده مقدار شوری (برحسب معادل درصد وزنی NaCl) است. سپس با رسیدن به دمای اتاق، عملیات گرمایش را شروع کرده و تا جایی این افزایش دما ادامه پیدا می‌کند که حباب بخار موجود در نمونه همگن شود که به آن دمای همگن شدن ( $T_h$ ) می‌گویند که این دما نشان‌دهنده حداقل دمای تشکیل کانه و کانی‌سازی است.

دمای ذوب اولین بلور یخ در کانی کوارتز محدوده حصار، در بازه دمایی ۲۱- تا ۶۱- درجه سانتی‌گراد است و بیشترین فراوانی را در محدوده ۵۳- تا ۵۵- درجه سانتی‌گراد از خود نشان می‌دهد، بازه دمایی ۵۵٫۷- تا ۵۸٫۵- نشان‌دهنده غنی بودن سیال از  $CO_2$  و با مقدار ناچیزی  $CH_4$  یا  $N_2$  می‌باشد (Touret, 1981). که نشان‌دهنده بسته شدن سیال در سیستم سه تایی  $H_2O-NaCl-CO_2$  می‌باشد (Touret, 1981). (شکل a۹). محدوده دمای

ذوب آخرین بلور یخ بین ۹- تا ۰٫۱- درجه سانتی‌گراد با فراوانی در محدوده ۴- تا ۱٫۵- درجه سانتی‌گراد تعیین گردید (شکل b۹). دمای همگن شدگی ( $T_h$ ) ۱۴۰ تا ۲۶۰ درجه سانتیگراد تشخیص داده شد که بیشترین فراوانی در محدوده دمایی ۱۶۰- تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل c۸). بر مبنای آخرین دمای ذوب یخ ( $T_m$ )، میزان شوری از معادله (Bodnar and Vityk, 1994) محاسبه شده است. میزان شوری بین ۰٫۱۸ تا ۱۴ درصد وزنی نمک طعام می‌باشد که در محدوده ۲ تا ۶ بیشترین فراوانی را دارد (شکل d۹). اختلاف در چگالی سیال، اهمیت ویژه‌ای دارد، چرا که فرآیند جریان سیال، متأثر از چگالی آن می‌باشد (Wilkinson, 2001)، از این رو با استفاده از نمودار شوری میانبارهای سیال در مقابل دمای همگن‌شدگی، چگالی سیال، با تقریب نسبتاً خوبی قابل محاسبه است (Zang and Frantz., 1987) (شکل e۹). در این حالت با استفاده از خطوط هم چگال که در دیاگرام شوری- دمای همگن‌شدگی، قرار دارند، می‌توان چگالی سیال را به دست آورد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میانبارهای مطالعه شده در محدوده حصار، چگالی سیال را از ۰٫۸ تا ۱ گرم بر سانتی‌گراد نشان می‌دهد. تغییرات چگالی دو فرآیند سردشدگی و جوشش را در روند تحول سیال گرمایی کانه‌ساز نشان می‌دهد. فرآیند سرد شدگی، کاهش دمای یکنواختی، سبب افزایش چگالی و کاهش سرعت سیال کانه‌دار و نهایتاً سبب ته نشینی و تمرکز مواد معدنی می‌شود، در حالیکه میانبارهای تشکیل شده از پدیده جوشش در نتیجه کاهش دما یا کاهش فشار به سمت تشکیل یک سیال چگال‌تر با شوری بیشتر نسبت به میانبارهای اولیه پیش می‌روند.

بنابراین، در خصوص شرایط تشکیل محدوده معدنی حصار، کانی‌زایی و شباهت‌های آن با سایر گونه‌های کانسارهای معروف مطالعه شده در دنیا می‌توان گفت؛ با توجه به نمودار شوری در برابر دمای همگن شدگی (Wikinson, 2001) میانبارهای نمونه‌های مورد مطالعه، بیشتر در محدوده دما و شوری پائین قرار می‌گیرند که این رفتار مختص کانسارهای اپی‌ترمال است (شکل f۹).



شکل ۹. (a) دمای ذوب اولین بلور یخ ( $T_e$ ). (b) دمای ذوب آخرین بلور یخ ( $T_m$ ). (c) نمودار دمای همگن شدگی ( $T_h$ ). (d) شوری در میانبراهای سیال اندازه‌گیری شده در کانی کوارتز. (e) نمودار دمای همگن شدگی در برابر شوری نشانگر تکامل سیال در کانسار. خطوط نقطه چین چگالی سیال ( $g/cm^3$ ) را نشان می‌دهند (Zang and Frantz., 1987). (f) ترسیم داده‌های میانبراهای سیال محدوده‌های مورد نظر بر روی نمودار (Wilkinson, 2001)

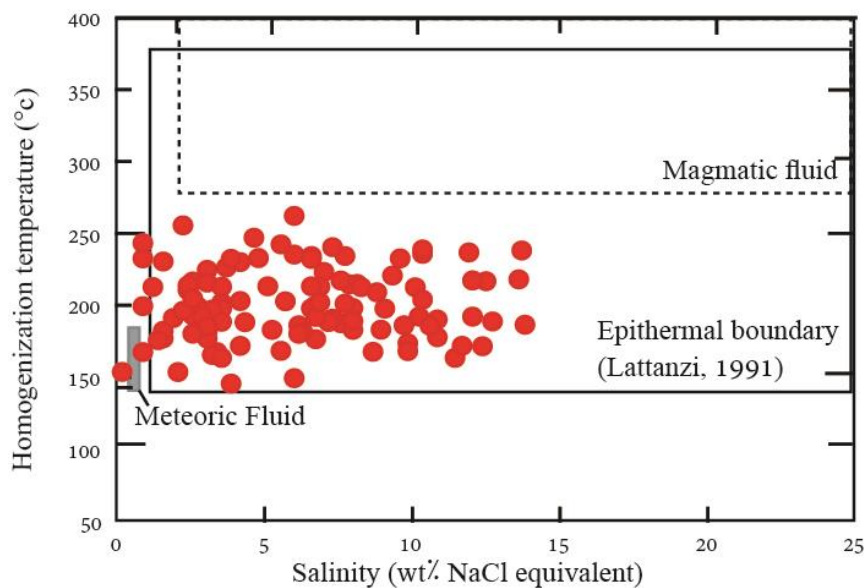
Fig. 8. (a) Histogram of initial ice melting temperature. (b) Histogram of last ice melting temperature. (c) Homogenization Temperature. (d) Salinity in fluid inclusions measured in Quartzes. (e) Fluid inclusions density diagram In Quartzes Hesar Iron deposit (Zang and Frantz., 1987). (f) Summary homogenization temperature–salinity diagram.

زمان و تغییرات شرایط فیزیکوشیمیائی محیط (دما، pH و فوگاسیته اکسیژن) دستخوش تغییر می‌گردد. نتایج ایزوتوپ گوگرد به صورت مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  نسبت به استاندارد تروئیلیت کانیون دیابلو (CDT) گزارش شده است. کمترین میزان  $\delta^{34}\text{S}$  برای نمونه‌های پیریت  $-5.77$  در هزار و بیشترین مقدار،  $-1$  در هزار می‌باشد (جدول ۲). محدوده باریک تغییرات نسبت ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  می‌تواند نشانگر وضعیت تعادلی ایزوتوپی گوگرد در کنسارهای این ناحیه باشد. هم‌رشدی کانی‌های سولفیدی در مراحل کانی‌زایی و نزدیک بودن مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  آنها نشان می‌دهد که این کانی‌ها احتمالاً تحت شرایط تعادل تشکیل شده و تفکیک ایزوتوپی عامل اختلاف در مقادیر ایزوتوپی گوگرد آنها بوده است (شکل ۱۱). با قرار دادن نتایج آنالیز در نمودار مرجع و مقایسه آن با سایر گونه‌های کانی‌سازی، بیان‌کننده این است که کانی‌سازی طلا در محدوده حصار از نوع اپی‌ترمال است.

داده‌های دما و شوری میانبارهای سیالات موجود در محدوده حصار بیان‌کننده این است که منشاء سیال مؤثر، از نوع اپی‌ترمال می‌باشد. با توجه به نمودار شکل ۱۰، روند سرد شدن در کنسار مشاهده می‌شود که احتمالاً تحول پس‌رونده این سیستم‌ها را در فاز دمایی بالا منعکس نموده و توسط سرد شدن تدریجی و نفوذ آب‌های سطحی سرد در داخل سیستم دنبال شده که رقیق‌شدگی و کاهش دمای پس‌رونده را نتیجه می‌دهد.

#### ۵-۴- ایزوتوپ پایدار گوگرد

مطالعه ایزوتوپ پایدار گوگرد به منظور تعیین منشاء و شرایط تشکیل کنسارهای سولفیدی از اهمیت خاصی برخوردار است و به کمک آن می‌توان تأثیر فعالیت‌های ماگمائی و یا غیر ماگمائی را در ژنز کنسارها مورد بررسی قرار داد (Hoefs, 2009). مقادیر ایزوتوپ گوگرد تابع ترکیب ایزوتوپی سیال منشاء می‌باشد که در نتیجه گذر



شکل ۱۰: دیاگرام پراکندگی شوری و دمای همگن‌شدگی (Lattanzi (1991); Hedenquist and Arribas (1998); Naden et al. (2005)

میانبارهای سیال در کانی‌کوارتز محدوده حصار.

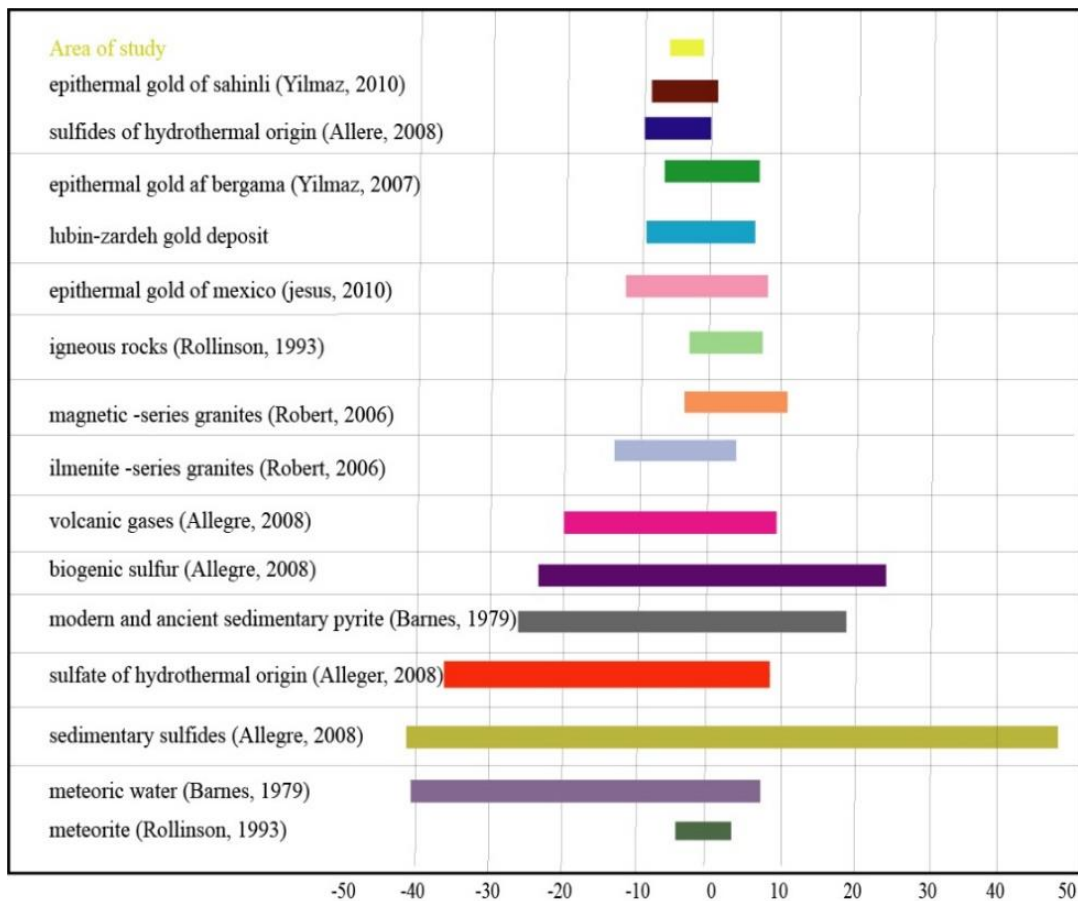
Fig. 10. Diagram of salinity dispersion and homogeneity temperature of fluid inclusions in Hesar gold quartz (Lattanzi (1991); Hedenquist and Arribas (1998); Naden et al. (2005)



جدول ۲- داده‌های ایزوتوپی گوگرد ( $\delta^{34}\text{S}$ ) مربوط به محدوده ی معدنی طلای حصار

Table 3- Sulfur( $\delta^{34}\text{S}$ ) isotope data of Hesar area are located

Sample no.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$ CDT (‰)	T(°C)	$1000\ln \alpha$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{SH}_2\text{Sfluid}}$ (‰)
MH1	Pyrite	-1	200	1.8	-2.8
MH2	Pyrite	-1.1	200	1.8	-2.9
MH3	Pyrite	-2.4	200	1.8	-4.2
MH4	Pyrite	-5.77	200	1.8	-7.57
MH5	Pyrite	-4.7	200	1.8	-6.5
MH6	Pyrite	-5.3	200	1.8	-7.1



شکل ۱۱- داده‌های ایزوتوپ گوگرد ( $\delta^{34}\text{S}$ ) منطقه حصار که در محدوده اپی‌ترمال قرار گرفته است (Zamanian et al., 2019).

Fig. 11. Sulfur( $\delta^{34}\text{S}$ ) isotope data of Hesar area are located in the epithermal range (Zamanian et al., 2019)

## ۵-۵- تعیین منشأ محلول کانه‌دار، با استفاده از

### ایزوتوپ اکسیژن در محدوده معدنی حصار

منشأ محلول کانه‌دار در زون‌های مختلف دگرسانی از روی شواهد میانبارهای سیال و نیز ایزوتوپ‌های پایدار، توسط محققین مختلف بر روی کانسارهای متفاوت بررسی شده است. در این پژوهش سعی شده است، با استفاده از معادلات تفکیک ایزوتوپی میان آب و کانی (کوارتز) که توسط Clayton and Keiffer, 1991 در یک طیف دمایی خاص بین  $127^{\circ}\text{C}$  به بالا ارائه شده است. مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  سیالی را که با کوارتز به تعادل ایزوتوپی رسیده است، قابل محاسبه است. از آنجا که دما، کنترل کننده جدایی ایزوتوپی ایزوتوپ‌های پایدار بین کانی و سیالات گرمایی است و همانطور که پیش‌تر نشان داده شد، دمای میانگین شکل‌گیری کوارتز از روش مطالعه میانبارهای سیال،  $200^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به دست آمد، از این‌رو می‌توان حدود  $\delta^{18}\text{O}$  سیال در حال تعادل با کوارتز را محاسبه نمود (Clayton and Keiffer, 1991). تمام داده‌ها بر اساس قسمت در هزار و نسبت به استاندارد آب اقیانوسی گزارش شده‌اند.

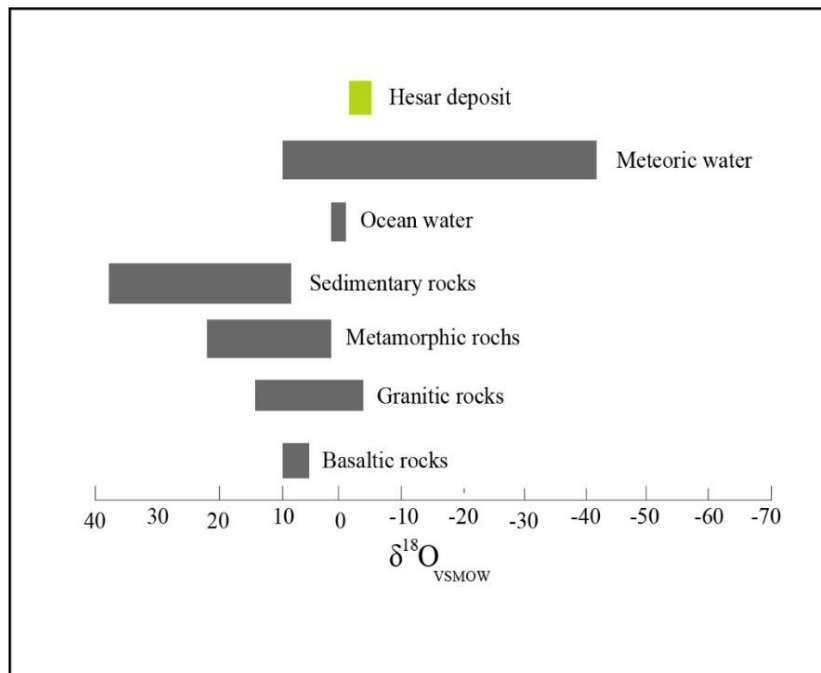
مقادیر بدست آمده از آنالیز ایزوتوپ پایدار اکسیژن کانی کوارتز مربوط به محدوده حصار در جدول ۳ آورده شده است. با قرار دادن دمای بدست آمده از دماسنجی

میانبارهای سیال، مقادیر مربوط به  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  نمونه‌های کوارتز محاسبه شده است. مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  کانی کوارتز بین  $-1.8$  تا  $-3.7$  در هزار در تغییر است (جدول ۳). مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  در طبیعت تا حدود  $100\%$  تغییر می‌کند که حدود نیمی از این گستره در آبهای جوی قرار می‌گیرد. شخانه‌های کندریتی گستره بسیار محدودی از مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  دارند، مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  در گوشته  $5/7\%$  تا  $3/3\pm$  است و به نظر می‌رسد که در طول زمان برای زمین و ماه ثابت بوده است (Taylor, 1980). محدوده  $\delta^{18}\text{O}$  آبهای جوی بین  $5/7$  تا  $40\%$  قرار می‌گیرد. در صورتیکه  $\delta^{18}\text{O}$  محدوده آبهای ماگمایی بین  $5/7$  تا  $10\%$  قرار می‌گیرد. بطور کلی، پوسته قاره‌ای نسبت به گوشته زمین از  $^{18}\text{O}$  غنی شده است که این نکته بیشتر در نتیجه برهم کنش دراز مدت پوسته قاره‌ای و آبکره و توزیع  $^{18}\text{O}$  به درون کانی‌های پوسته در هنگام فرآیندهای زمین‌شناختی دما پایین است (Rollinson, 2005). همانطور که در جدول ۳ و شکل ۱۲ دیده می‌شود، سیال در حال تعادل با کوارتز در این طیف‌های دمایی دارای مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  بین  $-1.8$  تا  $-3.7$  در هزار است، به طوری که مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  این سیال عمدتاً در محدوده آب‌های جوی واقع می‌شود.

جدول ۳- داده‌های ایزوتوپ اکسیژن مربوط به محدوده معدنی حصار

Table: 4 Oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) isotope data of Hesar area are located

Sample name	Mineral	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)VSMOW	T( $^{\circ}\text{C}$ )	$\delta^{18}\text{O}$ H <sub>2</sub> O (‰)
ske062c	Quartz	6.5	200	-2.3
ske063c	Quartz	5.9	200	-2.9
ske064c	Quartz	7.1	200	-1.8
ske065c	Quartz	5.1	200	-3.7
ske066c	Quartz	6.5	200	-2.3



شکل ۱۲- میزان  $\delta^{18}\text{O}$  ذخایر زمین شناسی مهم و جایگاه محدوده معدنی حصار (Hoefs, 2009).

Fig. 11.  $\delta^{18}\text{O}$  level of important geological reserves and Hesar deposit location (Hoefs, 2009)

کانی‌زایی در محدوده دما و شوری پایین که مختص کانسارهای اپی ترمال است، شکل گرفته است. نتایج داده‌های ریزدماسنجی بیانگر نفوذ سیال کانه‌دار در فضای ایجاد شده توسط شکستگی‌های بوجود آمده در سنگ میزبان ریولیت و ریوداسیت، حاصل از یک فرآیند کشتی در منطقه است.

با توجه به تغییرات چگالی، دو فرآیند سردشدگی و جوشش موجب ته‌نشست و تمرکز مواد معدنی شده است. با مقایسه مقادیر ایزوتوپ گوگرد بدست آمده در محدوده حصار با مقادیر مربوط به کانسارهای بزرگ دنیا، اپی ترمال بودن سیالات کانه‌ساز در محدوده، به اثبات می‌رسد که این موضوع، با نتایج به دست آمده از داده‌های میانبارهای سیال، کاملاً انطباق دارد.

همچنین، نسبت ایزوتوپ‌های اکسیژن در محدوده حصار نشان می‌دهد سیال در حال تعادل با رگه کوارتز کانه‌ساز، در محدوده آب‌های جوی قرار دارد. این نتیجه با نتایج حاصل از داده‌های به دست آمده از مطالعات میانبارهای سیال که از همگن‌شدگی میانبارها حاصل شده است مطابقت کامل دارد.

به منظور بررسی نوع کانی‌زایی محدوده معدنی طلای حصار، ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌زایی این محدوده با انواع کانسارهای اپی ترمال مقایسه شده است. بر اساس ویژگی‌های اصلی زمین‌شناسی و کانی‌سازی از جمله جایگاه تکتونیکی، ماهیت و نقش کنترل‌کننده‌های ساختاری، سنگ‌شناسی، نوع دگرسانی، ساخت، بافت و پاراژنز کانی-شناسی، ویژگی‌های دما و شوری میانبارهای سیال و مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار، می‌توان نتیجه گرفت که محدوده معدنی طلای حصار بیشترین شباهت را با کانسارهای طلای نوع اپی ترمال سولفیداسیون پایین تا متوسط را نشان می‌دهد. مقایسه ویژگی‌های محدوده معدنی حصار با ذخایر اپی ترمال سایر مناطق جهان از جمله رومانی (Rosia Montana)، اندونزی (Kelian) و آمریکا (Goldfield) و کانسار سه‌بندون نشان‌دهنده شباهت آن با کانسارهای سولفیداسیون پایین تا حد واسط است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

اطلاعات به دست آمده از مطالعه میانبارهای سیال و ایزوتوپ پایدار در محدوده معدنی حصار، نشان می‌دهد:

جدول ۴- مقایسه محدوده معدنی حصار با موارد مشابه در ایران و جهان

Table 5 Comparison of Hesar area with similar types in Iran and the World

America(Goldfield)	Indonesia(Kelian)	Romania(Rosia Montana)	Se-bandoon	Hesar	The name of the deposit
Calc Alkaline	Calc Alkaline	Calc Alkaline	Calc Alkaline	Calc Alkaline	Type of magmatism
Andesite	Andesite, Rhyolite	Dacite	Trachyte-trachy andesite	Rhyolite, rhyodacite	Host rock
Quartz, Albite, Barite	Quartz, Adularia, Carbonate, Sericite, Elite	Quartz, Adularia, Carbonate, Chlorite, Sericite, Kaolinite	Quartz, Adularia, Kaolinite	Quartz, Adularia, Carbonate, Sericite, Kaolinite	Alteration minerals
Pyrite, Marcasite, Tennantite, Bismuthite, Goldfieldite, Telluride, Gold	Pyrite, Sphalerite, Galena, Chalcopyrite, Tetrahedrite, Tennantite, Gold	Pyrite, Sphalerite, Galena, Chalcopyrite, Tennantite, Gold	Pyrite, Sphalerite, Chalcopyrite, Bornite, Arsenopyrite, Galena, Gold	Pyrite, Arsenopyrite, Magnetite, Gold	Paragenesis
Cavity quartz, Bulk quartz	Stock work, Breccia, Veins	Stock work, Breccia, Veins	Stock work, Breccia	Outspread Breccia, Veins	Texture
High sulfidation	Intermediate sulphidation	Low to Intermediate sulfidation	Low to Intermediate sulfidation	Low to Intermediate sulfidation	Mineralization type
Ashley (1979); Vikre (1989)	Van Leeuwen et al. (1990)	Lexa (1999); Wallier et al. (2006)	Homamipoor et al. 2019	Current study	Reference

## Reference

- Alavi, N., Lotfi, M., Bordet, P., 1979. 1:250,000 geological map Miyaneh, Organization of Geology and Mineral Exploration of the country.
- Ashley, R.P., 1979. Relation between volcanism and ore deposition at Goldfield, Nevada, in International Association for the Genesis of Ore Deposits (IAGOD), 5th Quadrenmal Symposium Proceedmgs, Vol II Nevada Bureau of Mines and Geology Report 33, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.023>
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences 18, 1764-1766. <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- Bodnar, R.J., Vityk, M.O., 1994. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusion in minerals: Methods and applications. In: Mahdavi, P. (Eds.). International mineralogical association, short course of the working group, Inclusions in minerals. pp. 117-130. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(89\)90060-5](https://doi.org/10.1016/0098-3004(89)90060-5)
- Eftekharnjad, J., Stoecklin, J., 1972. 1:100,000 geological map of Sarchah-Shur, Organization of Geology and Mineral Exploration of the country.

- Hedenquist, J., 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. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>
- Hoefs, J., 2009. *Stable isotope geochemistry*. Springer Verlag, Berlin, 6th edition. pp. 244. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.4.072>
- Lattanzi, P., 1991. Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits. *European Journal of Mineralogy* 3 (4), 689–702. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(91\)90068-6](https://doi.org/10.1016/0375-6742(91)90068-6).
- Lexa, J., 1999. Outline of the Alpine geology and metallogeny of the Carpatho-Pannonian region: *Society of Economic Geologists Guidebook Series* 31, 65–108. <https://doi.org/10.5382/GB.31>.
- Mohamamdi, B., Mehrparto, M., 2008. Investigation and introduction of porphyry gold and copper indices in Arsbaran area Organization of Geology and Mineral Exploration of the country. <https://doi.org/10.3470-4368/10>
- Mokhtari, M.A., Yarmohamadi, A., 2007. Polymetal reserve report Anig-Qharehchiler area (Northeast of kharvana) Organization of Geology and Mineral Exploration of the country.
- Nabavi, M. H., 1976. An introduction to the geology of Iran, Organization of Geology and Mineral Exploration of the country. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-5625-0>.
- 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(7), 541–544. <https://doi.org/10.1130/G21307.1>
- Richards, J.P., Sholeh, A., 2016. The Tethyan tectonic history and Cu-Au metallogeny of Iran. *Economic Geology Special Publication* 19, 193–212. <https://doi.org/10.1016/i.oregeorev.2014.11.009>
- Richards, J.P., 2015. Tectonic, magmatic and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision, *Ore Geology Reviews*, 70, 323–345. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: Ribbe, P.H., (Ed.). *Reviews in mineralogy*. pp.12-644. <https://doi.org/10.1515/9781501508271-001>.
- Rollinson, H.R., 1995. Using geochemical data: evaluation, presentation and interpretation, Longman Group., UK, 344p. <https://doi.org/10.1180/minmag.1994.058.392.25>.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies, Blackie, London, P. 239. <https://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.356.32>.
- Sillitoe, H.R., Hedenquist, J.W., 2003. Linkage between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits, *Society of Economic Geologist, Special Publication* 10, 315–343. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>.
- Simmons, D.T.A., Symons, T.B., Sangster, D.F., 2000. Paleomagnetism of the socieyu Cliffs dolostone and the age of the Nanisivk zinc deposits, Baffin Island, Canada: *Mineralum Deposita* 35, 672–682. <https://doi.org/10.1007/s001260050270>
- Taylor, H.P.J.R., 1980. *The effects of assimilation of country rocks by magmas on  $^{18}O/^{16}O$  and  $^{87}Sr/^{86}Sr$  systematics in igneous rocks*. *Earth and Planetary Science Letters* 47 (2). 243–254. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90040-0).
- Touret, J., 1981. Fluid inclusion in high grade metamorphic rocks. In: Hollister, L.S. and Crawford, M.L., (Eds.). *Applications to Petrology*, Mineralogical Association of Canada. pp. 182–208. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.03.005>.
- Van den Kerkhof., A.M., Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos* 55, 27–4. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2).
- Van Leeuwen, T.M., Leach, T.M., Hawke, A.A., Hawke, M.M., 1990. The Kelian disseminated gold deposit, East Kalimantan, Indonesia: *Journal of Geochemical Exploration* 35, 1–61. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90035-9).
- Vikre, P.G., 1989. Ledge Formation at the Sandstorm and Kendall Gold Mines, Goldfield, Nevada, *Economic Geology* 84, 2115–2138. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.8.2115>.

- Wallier, S., Rey, R., Kouzmanov, K., Pettke, T., Heinrich, C. A., Leary, S., O'Connor, G., Tamas, C. G., Vennemann, T. Ullrich, T., 2006. Magmatic fluids in the brecciahosted epithermal Au-Ag deposit of Rosia Montana, Romania. *Economic Geology* 101, 923-954. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo101.5-923>
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit. *Lithos* 55, 229-72. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- 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 inclusion. *Journal chemical geology* [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90012-X)