

Research Article

Shadan deposit (Lut block): the first gold-rich porphyry deposit in Iran

Mohammad Lotfi¹, Davood Raeisi^{1*}, Soroush Modabberi¹

1-School of Geology, Faculty of Science, University of Tehran

Keywords: *Au-rich porphyry, Overprinting, Boiling, Lut block, Eastern Iran*

1- Introduction

Shadan gold deposit, known as the first hitherto discovered Au-rich porphyry deposit in Iran, locates at ca. 120 km SW of Birjand, the north segment of the Lut block. The Lut block, as one of the main tectonic blocks in the eastern Iran, surrounds by dominantly flysch and ophiolite sequences, which are the remnants of Neotethyan ocean called the Sistan Ocean during Late Cretaceous (Zarrinkoub et al., 2012). The closure of the Sistan Ocean was followed by the collision of the Lut and Afghan blocks occurred during the Middle Oligocene-Middle Miocene. This activity brought forth extensive calc-alkaline magmatism together with forming various mineral crystallization and deposits throughout the Lut block (e.g., Karimpour et al., 2011; Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983). The Eocene time is diagnosed as the peak of the mineralization in the Lut block, e.g., Hired Au epithermal deposit and Maherabad Au porphyry deposit (Karimpour et al., 2012; Richards et al., 2012). Intermediate plutonic and sub-volcanic rocks in composition with a NW-SE trending intermittently intruded into Eocene volcanic tuffs. The main trigger of Au mineralization is hosted by diorite-monzodiorites Shadan region, appear as the porphyry textures, and dominantly consist of mafic mineral phenocrysts, e.g., biotite and hornblende. Building on the work of Richards et al. (2012), the biotites Middle Eocene (37–40 Ma), and can be defined as one of the oldest hitherto known porphyry deposits in Iran (Aghazadeh et al., 2015). This study shed light on investigating the geochemical characteristics of Shadan gold deposit in the course of formation. Our results would be beneficial to further explore of similar Au deposits in the Lut block and beyond.

2- Material and methods

In the current study, we provide analytical procedures to prospects the geochemical characteristics of Shadan gold deposit as; (1) petrographical studies on 15 thin sections of the host rocks, e.g., outcropped bodies and drilling cores, in order to draw a relationship between the main lithologies; (2) petrographical studies on 85 thin and thin-polished sections of outcropped and drilling cores to further examination of the main alterations types in association with mineralization; (3) petrographical studies on 53 thin-polished sections to classify the types of vein-veinlet systems; (4) petrographical studies 6 doubly-polished sections of quartz-sulfide veins-veinlets applied for microthermometric analyses of fluid inclusions. Petrographical and microthermometric studies were performed at the microthermometry laboratory of the Technical University of Klausthal, Germany using a standard petrographic microscope (Zeiss model), a heating-cooling stage model THMSG600 made by Linkham equipped with a nitrogen injection pump model LNP, temperature control device model TMS94 and water injection pump (for high temperatures); (5) SEM analysis to recognize the occurrences of gold and its host minerals using a FEI Quanta 250 device with an analysis point of 1 to 3 micrometers, an acceleration voltage of 15 keV, a beam intensity of 80 A and a distance of 10 mm.

3- Results and discussions

* Corresponding author: d.raeisi@ut.ac.ir

DOI : 10.22055/AAG.2022.39316.2261

Received: 2021-11-29

Accepted: 2022-05-01

Intensive hydrothermal alteration in the prospecting region is concentrically zoned and encompassed wide spectrum of alteration types, in terms of mineral assemblage, e.g., potassic, phyllic, propylitic and argillic. The inner segment of the porphyry system is composed of potassic alteration (i.e., biotite-rich), appears as complex association with phyllic alteration, and surrounds by propylitic alteration. The complex association between potassic and phyllic alterations can be defined as the overprinting of potassic by phyllic products, which show high-grade gold mineralization. In the Shadan Au deposit, the potassic section exposes near the surface, indicating intense erosion.

Mineralization in Shadan Au deposit classifies as supergene and hypogene. The former is characterized by malachite, azurite, chrysocolla, neotocite and iron oxide-hydroxides. The latter are specified by the occurrence of pyrite, chalcopyrite, covellite and magnetite. Our findings of the field observation appear that the supergene zone show no remarkable thickness in Shadan region, In the current study, vein-veinlet, hydrothermal breccias and disseminated mineralization are distinguished as the most common forms of mineralization. Volumetrically, the vein-veinlet mineralization constitutes the largest segment of the ore bodies. The average grade of gold is 0.5 ppm, however, in some cases, the grade of gold yielded from the phyllic zone as well as the associated veins shows higher grade and reaches up to 7 ppm, a typical feature in Au-rich porphyry deposits (Kesler et al., 2002). Au mineralization occurs as native gold, electrum and calaverite (AuTe₂). The Au in sulfide ore sections dominantly forms as native, and hosts by pyrite. The average grade of copper reaches 0.15%. Malachite and chalcopyrite are the common Cu-bearing minerals in the prospecting region. Magnetite, as the most important Fe-bearing mineral, forms from magnetite veinlets to disseminated grains in the plutonic and volcanic rocks.

The Shadan Au porphyry are characterized by diverse vein-veinlet systems including (1) M-type; (2) A-type; (3) B-type; (4) anhydrite-gypsum veins; (5) D-Type, as the frequent and important group with significant impact in mineralization; and (6) late veins include quartz, carbonate, and pyrite veins.

Three major types of fluid inclusion are recognized in B-and D-type quartz veins/veinlets, including vapor-rich fluids or I-type (VL), aqueous fluids or II-type (LV), and hypersaline fluids or III-type (LVH). The temperature of homogenization and salinity in LV fluid inclusions varies from 298–420°C and 6.4–24.3 wt.% NaCl. The Th and salinity of LVH inclusions are ranging from from 238–582°C and 36.2–69 wt.% NaCl, respectively. Microthermometric investigations appear that the homogenization of halite-bearing inclusions (LVH type) occurred in two different manners; 63 vol.% of inclusions, homogenized by halite disappearance, and 37 vol.% are halite-bearing fluid inclusions which were homogenized by L-V homogenization. This finding is in line with with the behaviour of halite-saturated inclusions in hydrothermal-magmatic mineralization systems, and results from fluid supersaturation with NaCl before homogenization or entrapment of primary fluids at high pressure as proposed by (Rusk et al. (2008) or heterogeneous entrapment of a halite-saturated hydrothermal brine (Sun et al., 2017). In addition, the co-genetic presence of high-salinity and vapor-rich inclusions, a common feature in porphyry deposits, imply the boiling or separation processes (Lecumberri Sanchez, 2013). Therefore, based upon petrographical and microthermometric studies of fluid inclusions, were boiling and mixing processes are the plausible explanations for the ore deposition in Shadan Au deposit.

4- Conclusion

Collisional magmatism in the Lut block is the result of the convective removal of lithosphere mantle and upwelling asthenosphere within an extensional tectonic regime. Many Au-rich porphyries are formed in magmatic arcs that have been affected by extensional processes over a period of time, such as the Cerro Corona and Minas Conga deposits in northern Peru, the Marte, Lobo, Refugio, and Cerro Casale deposits in the Maricunga Belt, northern Chile. Many Au-rich porphyries are coeval with volcanic units, the composition of which is often andesitic to dacitic or trachyandesitic to latitic. In the Shadan gold deposit, andesitic units with Eocene age also are widespread in the area. Banded veinlets are one of the hallmarks of gold-rich porphyry deposits, which may be due to the reopening of the vein or the re-entry of silica into certain bands, first identified in Maricunga gold-rich porphyry deposits in Chile.

Another distinctive feature in the vein-veinlet systems of Shadan gold deposit is the presence of type A- and M veins, which are abundant in gold-rich porphyry deposits as compare with molybdenum-rich porphyry copper deposits. In the Shadan Au-rich deposit, the mineralization-related pluton contains

hornblende phenocrysts or biotite, implying hydrous melt of the parent magma. The presence of hydrothermal magnetite in various alterations invokes a highly oxidized melt. Therefore, a hydrous melt with high fO_2 and volatiles context is envisaged for the mineralization-related magma in Shadan region.

Finally, Cu / Au ratio ($> 40,000$ for gold-poor and $<40,000$ for gold-rich deposits) is applied as a geochemical index to classify Shadan as a gold-rich porphyry deposit. Accordingly, the gold and copper are 0.5 g/t and 1500 g/t, respectively, and thus, Cu / Au ratio ~ 3000 of the Shadan deposit can be classified as “gold-only” or “gold-rich” porphyry deposits

5- References

- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z., Zhou, L., 2015. Temporal–spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology. *Ore geology reviews* 70, 385-406. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>.
- Camp, V.E., Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15(3), 221-239. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0167-x>.
- Kesler, S.E., Chryssoulis, S.L., Simon, G., 2002. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews* 21(1-2), 103-124. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(02)00084-7).
- Karimpour, M.H., Stern, C., Farmer, L., Saadat, S., 2011. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Geopersia* 1(1), 19-54. <https://dx.doi.org/10.22059/jgeo.2011.22162>.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Farmer, G.L., Stern, C.R., 2012. Petrogenesis of Granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd Petrogenesis of granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristics, and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology* 4(1), 1-27. <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v4i1.13391>.
- Sanchez, P.L., 2013. Spatial and Temporal Evolution of Fluids in Hydrothermal Ore Deposits. Phd Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A., Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry $Cu\pm Mo\pm Au$ potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic geology* 107(2), 295-332. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.295>.
- Rusk, B.G., Reed, M.H., Dilles, J.H., 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. *Economic Geology* 103(2), 307-334. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.2.307>.
- Sun, W., Wang, J.T., Zhang, L.P., Zhang, C.C., Li, H., Ling, M.X., Ding, X., Li, C.Y., Liang, H.Y., 2017. The formation of porphyry copper deposits. *Acta Geochimica* 36, 9-15. <https://doi.org/10.1007/s11631-016-0132-4>.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 94(1), 134-150. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94%3C134:TSSZOE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94%3C134:TSSZOE%3E2.0.CO;2).
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Lee, H.Y., 2012. Zircon U–Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 154, 392-405. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.007>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Lotfi, M., Raeisi, D., Modabberi, S., 2023. Shadan deposit (Lut block): the first gold-rich porphyry deposit in Iran. *Adv. Appl. Geol.* 13(1), 299-319.

DOI : 10.22055/AAG.2022.39316.2261

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_17730.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

کانسار شادان (بلوک لوت): اولین کانسار پورفیری غنی از طلا در ایران

محمد لطفی

دانشجوی دکتری، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

داود رئیسی*

پژوهشگر پسادکتری، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

سروش مدبری

دانشیار، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

d.raeisi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱

چکیده

کانسار طلای شادان در ۱۲۰ کیلومتری جنوب غرب بیرجند و در شمال بلوک لوت واقع است. ماگماتیسیم ائوسن حاصل فرورانش اقیانوس سیستان در تشکیل کانسار طلای شادان نقش داشته است. کانه‌زایی طلا در کانسار شادان در ارتباط مستقیم با جایگیری توده‌های نفوذی عمیق و نیمه-عمیق با ترکیب دیوریت تا مونزودیوریت است که به درون واحدهای آندزیت-آذرآوری نفوذ کرده‌اند. دگرسانی‌های عمده در منطقه دگرسانی‌های اولیه پتاسیک و پروپیلیتیک هستند که مورد اول در مرکز سامانه گرمایی-ماگمایی قرار دارد و مورد دوم دگرسانی پتاسیک را احاطه کرده است. این دو دگرسانی توسط دگرسانی‌های تاخیری فیلیک و آرژیلیک رونقشی شده‌اند. کانه‌زایی در کانسار شادان به صورت استوک‌ورک، رگه-رگچه‌های موازی، افشان و برش‌های گرمایی رخ داده و مهم‌ترین عامل کانه‌زایی طلا در این کانسار، توده نفوذی شادان بوده است. براساس مطالعات SEM، مهم‌ترین میزبان طلا در بخش درون‌زاد، پیریت است و طلا به صورت آزاد، الکتروم و کالوریت رخ داده است. از شاخص‌ترین رگچه‌های کانسار طلای شادان رگچه‌های نوع A، M، و رگه‌های دارای بافت نواری هستند. توده نفوذی شادان حاوی فنوکریست‌های فراوان هورنبلند و بیوتیت و همچنین مقادیر بالای مگنتیت و انیدریت در دگرسانی‌های مختلف است که می‌تواند بیانگر حضور یک ماگمای به شدت اکسیدی با مقادیر بالای آب باشد که براساس مطالعات میانبارهای سیال، این سیال کانه‌ساز بعد از رسیدن به شرایط مناسب تحت فرایندهای جوشش و آمیختگی، ماده معدنی را نهشته کرده‌اند. براساس همگی شواهد ذکر شده و همچنین نسبت Cu/Au (۳۰۰۰)، کانسار شادان را می‌توان به عنوان اولین کانسار پورفیری غنی از طلا در ایران معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: پورفیری غنی از طلا، رونقشی، جوشش، شادان، بلوک لوت، شرق ایران

۱- مقدمه

ژنتیکی بین توده‌های نیمه‌نفوذی و مجموعه کانه‌زایی و دگرسانی‌های گرمایی دیده می‌شود که در داخل و اطراف توده رخ می‌دهند (Seedorff et al., 2005).

کانسارهای پورفیری غنی از طلا (ذخایر طلای پورفیری با نسبت Cu/Au کمتر از ۴۰۰۰۰)، از جمله مهم‌ترین ذخایر بزرگ طلا در پوسته بالایی هستند (Siltoe, 2000, Simon et al., 2000) و گروهی از کانسارها را شامل می‌شوند که برای اولین بار در کمربند ماریکونگا، شیلی (Vila et al., 1991) معرفی شده‌اند. با اینکه پورفیری‌های غنی از مس در ارتباط با فرایندهای فرورانش نوع آند و ماگماتیسیم کالک‌آلکانل شاخص

ارزیابی مطلوب‌ترین مناطق برای اکتشاف مواد معدنی همواره نگرانی عمده زمین‌شناسان اکتشافی بوده است و در این میان کانسارهای اپی‌ترمال-پورفیری با توجه به حجم ذخایر، اهمیت مضاعفی داشته‌اند. ذخایر پورفیری و در کنار آن ذخایر اپی‌ترمال همراه با آن یا مجزا از سامانه پورفیری منبع عمده مس، مولیبدن، طلا و نقره بوده و از این رو یکی از اهداف اصلی اکتشاف معدنی در جهان می‌باشند. بنابراین، دانستن مدل‌های شکل‌گیری و روش‌های نوین اکتشافی آنها و درک روابط بین آنها مهم‌ترین اهمیت را برای کاوشگران معدنی دارد. در کانسارهای پورفیری-اپی‌ترمال معمولاً ارتباط مکانی، زمانی و

انعکاسی و عبوری در آزمایشگاه میکروسکوپی دانشگاه تهران بر روی آنها صورت گرفت.

همچنین از داده‌های آنالیز SEM انجام شده برای مطالعات فرآوری به منظور بررسی کانه‌زایی طلا و نحوه رخداد آن استفاده شد. مطالعات SEM با استفاده از یک دستگاه مدل FEI Quanta 250 با نقطه آنالیز ۱ تا ۳ میکرومتر، ولتاژ شتاب‌دهی ۱۵ keV، شدت پرتو $\mu\text{A}80$ و فاصله ۱۰ میلی‌متر انجام شده است.

به منظور مطالعات میانبرهای سیال تعداد ۱۰ نمونه از رگچه‌های کوارتز-سولفیدی تیپ A و B کانسار شادان برداشت شد که از این تعداد، ۶ مقطع دوبرصیقل حاوی میانبرهای سیال مناسب برای ریزدماسنجی انتخاب گردید. مطالعات پتروگرافی و ریزدماسنجی میانبرهای سیال در آزمایشگاه ریزدماسنجی دانشگاه کلاستال، آلمان صورت گرفت. این مطالعات با استفاده از میکروسکوپ استاندارد پتروگرافی (مدل زایس)، یک استیج گرمایش-سرمایش مدل THMSG600 ساخت شرکت لینکام مجهز به پمپ تزریق نیتروژن مدل LNP، دستگاه کنترل دما مدل TMS94 و پمپ تزریق آب (مخصوص دماهای بالا) انجام شد. محدوده دمای انجام مطالعات ریزدماسنجی ۱۹۶- تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. دستگاه با استفاده از استانداردهای زیر کالیبراسیون شده است:

Heating: ± 0.6 , freezing: ± 0.2 , Heating: Cesium nitrate, melting point: $+414^{\circ}\text{C}$, Freezing: n-Hexane, melting point: -94.3°C .

کالیبراسیون استیج در گرمایش با دقت ± 0.6 درجه بوده که با نیترات سزیم دارای نقطه ذوب ۴۱۴ درجه صورت پذیرفت و در انجماد با دقت ± 0.2 درجه و با ماده استاندارد ان-هگزان با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتیگراد انجام گرفت. شوری و چگالی میانبرهای NaCl-H₂O با استفاده از نرم افزار SOWAT-FLINC version 2007 محاسبه گردید.

۳- زمین‌شناسی

۳-۱ زمین‌شناسی عمومی

بلوک لوت، مهم‌ترین واحد ژئوتکتونیک در شرق ایران است که کانسار پورفیری شادان را در خود جای داده است. این بلوک یکی از خردقاره‌هایی محسوب می‌شود که به نظر محققان طی بازشدن اقیانوس نفوتتیس در پرمین از حاشیه شمالی گندوانا جدا شده و سپس طی تریاس پسین، این نواحی در نهایت بر اثر

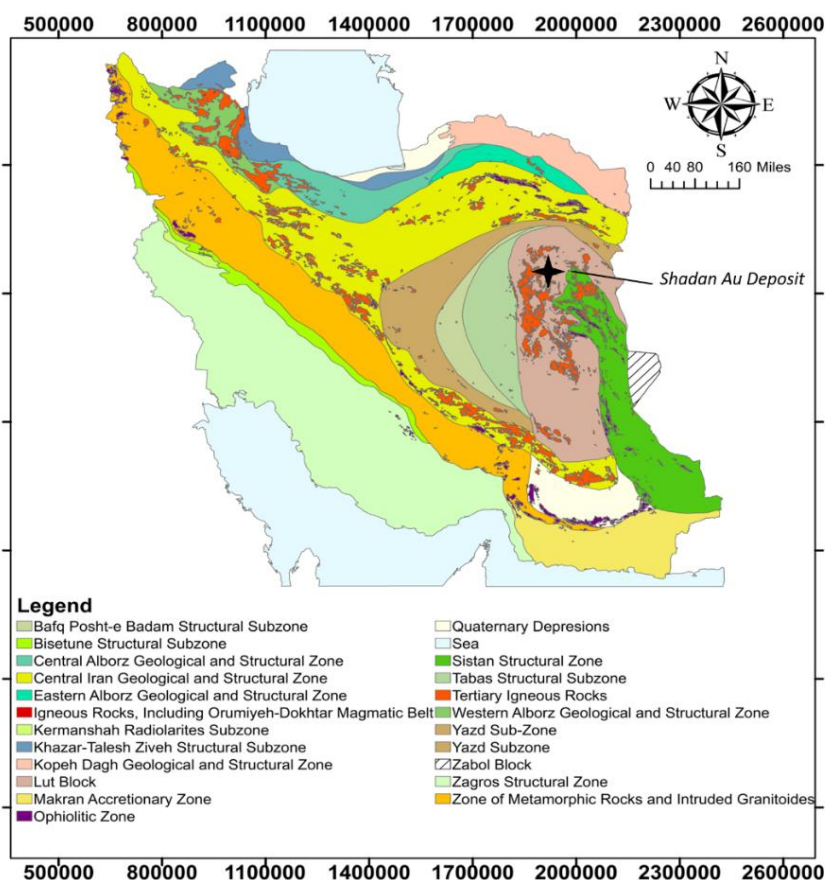
و پسا‌فرورانشی می‌باشند، کانسارهای پورفیری غنی از طلا همراه با ماگماتیسیم آلکالن تا کالک‌آلکالن پتاسیم بالا در محیط‌های کششی و مرتبط با فرورانش هستند که بیانگر عوامل موثر مختلف از جمله عمق تشکیل، شیمی ماگما-سیال و محیط زمین‌ساختی در غنی‌شدگی طلا و مس در هر یک از این کانسارهای پورفیری است (Kesler et al., 1973). کانسارهای پورفیری غنی از طلا دارای اهمیت اقتصادی بالایی در جهان هستند به گونه‌ای که آنها به عنوان یکی از مولدهای پرسود در صنعت معدنکاری محسوب می‌شوند (Jones, 1992). در حال حاضر، تولید عمده طلا در ایران از تعداد محدود معادن مانند معدن طلای زرشوران (کانسار شبه کارلین) (Asadi et al., 2000) آق دره (طلای اپی‌ترمال با سنگ میزبان رسوبی) (Rahim Souri et al., 2013)، موته (طلای تیپ کوهزایی) (Kouhestani et al., 2014)، ساری‌گونای (طلای تیپ اپی‌ترمال) (Richards et al., 2006)، معدن طلای چاه‌زرد (طلا-نقره اپی‌ترمال) (Kouhestani et al., 2015)، معدن طلای توزلار (طلای اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا) (Heidari et al., 2015) صورت می‌گیرد. با در نظر گرفتن اهمیت کانسارهای طلا در کشور و وجود ذخایر متعدد طلا در شرق کشور به ویژه اندیس‌ها و معادن طلای شادان (Richards et al., 2012)، هیرد (Eshraghi et al., 2010)، گودکان (Amraei and Niroomand, 2016)، ماهرآباد (Richards et al., 2012) و خویپک (Shafarudi et al., 2015)، این مطالعه می‌تواند شناخت بیشتری از پتانسیل کانه‌زایی مناطق شرقی کشور ارائه دهد.

۲- روش مطالعه

به منظور تهیه نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰، تعداد ۱۵۳ نمونه از واحدهای زمین‌شناسی منطقه، کانه‌زایی، دگرسانی و مغزه‌های حفاری برداشت و به آزمایشگاه تهیه مقاطع میکروسکوپی دانشگاه تهران ارسال گردید. تعداد ۱۵ مقطع نازک برای تعیین سنگ‌شناسی منطقه، تعداد ۸۵ مقطع نازک-صیقلی نیز به منظور شناسایی انواع دگرسانی و کانه‌زایی در منطقه تهیه گردید. با توجه تنوع بالای رگه-رگچه‌های مشاهده شده، تعداد ۵۳ مقطع نازک و نازک-صیقلی به منظور بررسی کانی‌شناسی، ژئومتری، کانه‌زایی همراه، روابط قطع‌شدگی و تعیین انواع رگه‌ها تهیه گردید و مطالعات سنگ‌نگاری گسترده‌ای با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل

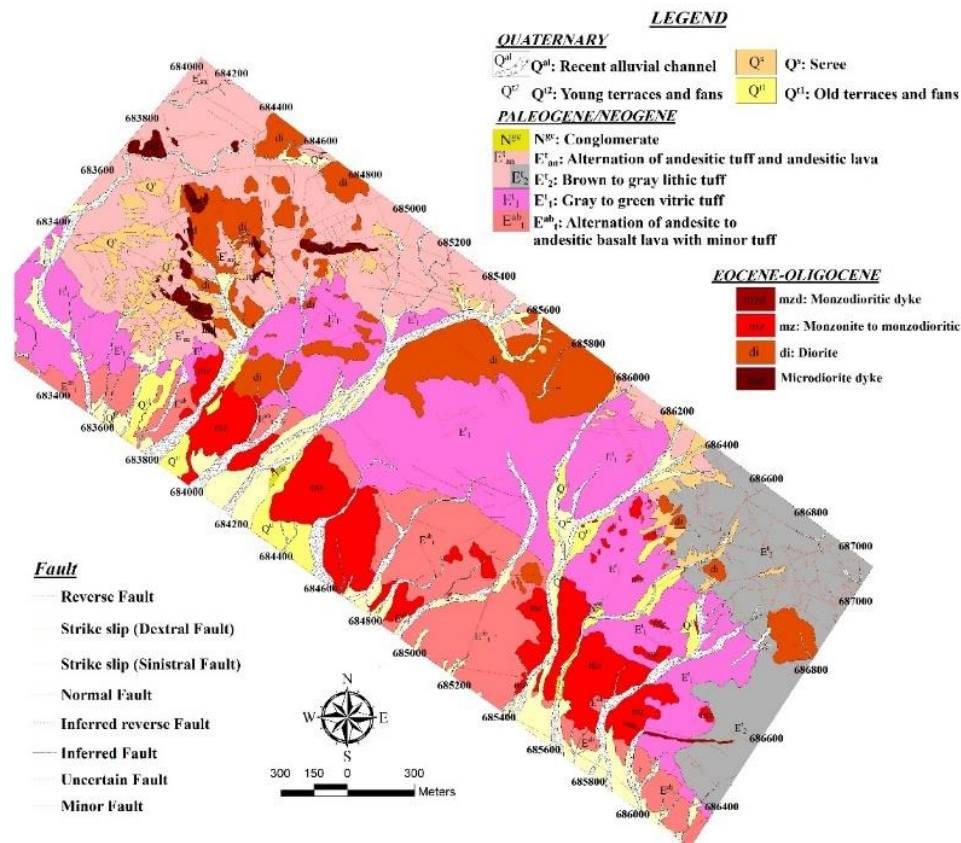
کانسارهای مختلفی در بلوک لوت شده‌اند. ماگماتیسیم ائوسن برخوردار در این کمان ماگمایی اهمیت به‌سزایی در ایجاد کانه‌زایی بلوک لوت داشته که کانسار شادان نیز در ارتباط با واحدهای نفوذی ائوسن می‌باشد (Richards, 2015). برخی محققان معتقدند که ماگماتیسیم در بلوک لوت حاصل حذف همرفتی لیتوسفر و بالا آمدن آستنوسفری طی رژیم تکتونیک کششی است (Pang et al., 2013). کانه‌زایی‌های مختلفی در ایالت فلززایی لوت ثبت شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به کانسارهای مس پورفیری، مس-طلای پورفیری، طلای اپی‌ترمال، مس-سرب-روی رگه‌ای، مس-طلا سولفید توده‌ای، قلع-تنگستن مرتبط با گرانیت‌ها و اسکارن اشاره کرد (Karimpour et al., 2012, Arjmandzadeh et al., 2022). حضور محدوده‌های امیدبخش در اطراف کانسار طلا پورفیری شادان، مانند مس پورفیری ماهرآباد و ده‌سلم و نشانه‌های اپی‌ترمال شیخ‌آباد و هیرد (Karimpour et al., 2012) نیز بیانگر پتانسیل بالای کمتر شناخته شده بلوک لوت است (شکل ۱).

بسته‌شدن پالئوتتیس، به ورقه اوراسیا برخورد کرده‌اند (Stampfli and Borel, Ramezani and Tucker, 2003). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این بلوک توسط واحدهایی با ماهیت کاملاً اقیانوسی حاوی سری‌های فلیشی و افیولیتی احاطه شده که به اقیانوس سیستان (شاخه‌ای از اقیانوس نفوتتیس) در کرتاسه پسین است (Zarrinkoub et al., 2012). مدل‌های مختلفی برای بسته شدن این اقیانوس مانند فرورانش به زیر بلوک افغان (Tirrul et al., 1983)، فرورانش به زیر بلوک لوت (Zarrinkoub et al., 2012)، فرورانش دوطرفه (Arjmandzadeh et al., 2022) و فرورانش درون اقیانوسی با جهت شرق (Saccani et al., 2010) مطرح شده است. طی بسته شدن اقیانوس سیستان بر اثر برخورد بلوک لوت و افغان طی پالئوسن-پسین-ائوسن میانی (Pang et al., 2013)، فعالیت‌های ماگمایی-آتشفشانی گسترده‌ای رخ داده (Tirrul et al., 1983, Camp and Griffis, 1982). (Karimpour et al., 2011) و منجر به تشکیل نشانه‌ها و



شکل ۱- زون‌های تکتونیکی اصلی ایران و موقعیت کانسار شادان در بلوک لوت (Verdel et al., 2007).

Fig. 1. Main tectonic zones of Iran and location of the Shadan deposit (modified after Verdel et al., 2007).



شکل ۲- نقشه زمین شناسی کانسار شادان همراه با انواع دگرسانی ها و ساختارهای موجود در منطقه
 Fig. 2. Geological map of the Shadan deposit showing the alteration zones and structures in the area

ترکیب آنها از دیوریت تا مونزودیوریت متغیر است.

۲-۲- زمین شناسی کانسار طلای شادان

توده های نفوذی دیوریتی تا مونزودیوریتی، موسوم به توده پورفیری شادان، اصلی ترین عامل کانه زایی پورفیری در محدوده هستند و با حضور درشت بلورهای فراوان هورنبلند و بیوتیت شناخته می شود. فنوکریست های این توده های نفوذی عمدتاً کلریتی و اپیدوتی و در بخش هایی نیز سریسیتی شده اند. علاوه بر بافت پورفیری، بافت های میکروگرانولار و گرانولار و نیز حضور دارند. زمینه این سنگ ها را عمدتاً پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی و بسته به نوع دگرسانی، کانی های دگرسانی مانند سریسیت، اپیدوت-کلریت و بیوتیت تشکیل می دهند. ژئوشیمی سنگ های آذرین کانسار طلای شادان مورد بررسی قرار گرفته و شواهدی چون آنومالی های منفی Nb، Ta و Ti و نبود آنومالی Eu گزارش شده است (Richards et al., 2012). نهشته های کواترنری نیز در محدوده رخنمون یافته که شامل پادگانه های آبرفتی قدیمی مرتفع (Qt1)، پادگانه های آبرفتی جدید کم ارتفاع (Qt2)، نهشته های آبرفتی عهد حاضر (Qal) و واریزه ها (Qs) هستند (شکل ۲).

کانسار طلای شادان، در شمال شرق نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سرچاه شور و شمال بلوک لوت واقع شده است. براساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰ که در شکل ۲ نشان داده شده است، کهن ترین واحد سنگ چینه ای در این گستره را مجموعه آتشفشانی-آذرآواری ائوسن (Etab) تشکیل می دهد که دارای ترکیب حدواسط تا بازیگ می باشد. بخش بالایی این واحد به صورت پیوسته و هم شیب به یک واحد آذرآواری شامل توف های شیشه ای (E1t) تبدیل می شود. بر روی واحد مذکور، واحدهای لیتیک توف (E2t) به صورت میان لایه در یک واحد توفی با ترکیب آندزیتی (Eant) قرار گرفته اند. توده های نفوذی عمیق و نیمه عمیق با روند شمال-غرب-جنوب شرق و با ترکیب حدواسط، اغلب در واحد توفی-گدازه ای نفوذ کرده اند (شکل ۲). از دیگر پدیده های قابل توجه در محدوده، ایجاد زون های هورنفلسی در سنگ میزبان آذرآواری است که در اثر جایگیری این توده نفوذی ایجاد شده است. این سنگ ها که به صورت استوک، آپوفیز و دایک در اندازه های گوناگون دیده می شوند و

۴- دگرسانی و کانه‌زایی

۴-۱- دگرسانی

دگرسانی‌های رخنمون یافته در محدوده دارای منطقه‌بندی تقریباً هم‌مرکز و منظم هستند و روندی مشابه کانسارهای پورفیری شاخص را نشان می‌دهند (Seedorff et al., 2005). این دگرسانی‌ها شامل دگرسانی‌های اولیه پتاسیک و پروپیلیتیک هستند که مورد اول در مرکز سامانه گرمابی-ماگمایی قرار دارد و دومی دگرسانی پتاسیک را احاطه و هاله دگرسانی گسترده‌ای را ایجاد کرده است (شکل a۳). این دگرسانی‌ها، توسط دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک ناشی از مراحل پایانی فعالیت سیال گرمابی-ماگمایی، رونقشی شده‌اند. دگرسانی سیلیسی-کربناتی نیز به صورت پچ‌های پراکنده در محدوده قابل مشاهده است که دگرسانی‌های قبلی را رونقشی کرده است. تورمالینی شدن عمدتاً در بخش‌های عمقی توده مشاهده می‌شود و اثرات سطحی آن بسیار محدود بوده است.

دگرسانی پتاسیک: همانطور که در نقشه توزیع دگرسانی‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است، دگرسانی پتاسیک در بخش مرکزی توده نفوذی شادان قرار دارد. برخلاف بیشتر کانسارهای پورفیری معمول که دگرسانی پتاسیک معمولاً در عمق حضور دارد، در کانسار شادان این دگرسانی رخنمون قابل توجهی در سطح نشان می‌دهد و ارتباط آن با توده نفوذی کاملاً مشخص است. دگرسانی پتاسیک در رخنمون‌های سنگی به دلیل حضور بیوتیت‌های ثانویه فراوان، به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شود. براساس مطالعات میکروسکوپی، مهم‌ترین فاز حاوی پتاسیم در دگرسانی پتاسیک کانسار شادان، بیوتیت ثانویه است (شکل b۳). از دیگر شواهد دگرسانی پتاسیک، حضور مگنتیت فراوان، به صورت رگه‌ای (شکل c۴)، افشان در زمینه سنگ و افشان رگچه‌های کوارتز است که به واحد میزبان، خاصیت مغناطیسی شدیدی می‌دهد اما در مواردی که دگرسانی آرژیلیک فعال بوده است، این حالت مشاهده نمی‌شود. بیوتیت گرمابی عمدتاً به دو صورت جانیشینی در کانی‌های مافیک از جمله پیروکسن و آمفیبول و یا به صورت ریزدانه در زمینه سنگ حضور دارد (شکل b۳).

دگرسانی فیلیک: دگرسانی فیلیک در کانسار شادان، ارتباط تنگاتنگی را با دگرسانی پتاسیک نشان می‌دهد. این دگرسانی در داخل توده دیوریت تا مونزودیوریتی شادان و عمدتاً به صورت رونقشی بر روی دگرسانی پتاسیک قابل مشاهده است. بر اثر

دگرسانی فیلیک، کانی‌های اولیه به‌طور بخشی و یا کامل توسط سریسیت و کلریت جایگزین شده‌اند. کوارتز، سریسیت و پیریت به‌عنوان کانی‌های اصلی این دگرسانی دارای فراوانی زیادی هستند (شکل c۳). مهم‌ترین شاخص این دگرسانی، رگچه‌های نوع D هستند. گاهی تاثیر دگرسانی فیلیک شدید است که در این حالت بافت و ساخت سنگ به کلی از بین رفته است. این زون تقریباً با بخش مرکزی کانسار تطابق داشته و به سمت اطراف به دگرسانی آرژیلیک تبدیل می‌شود.

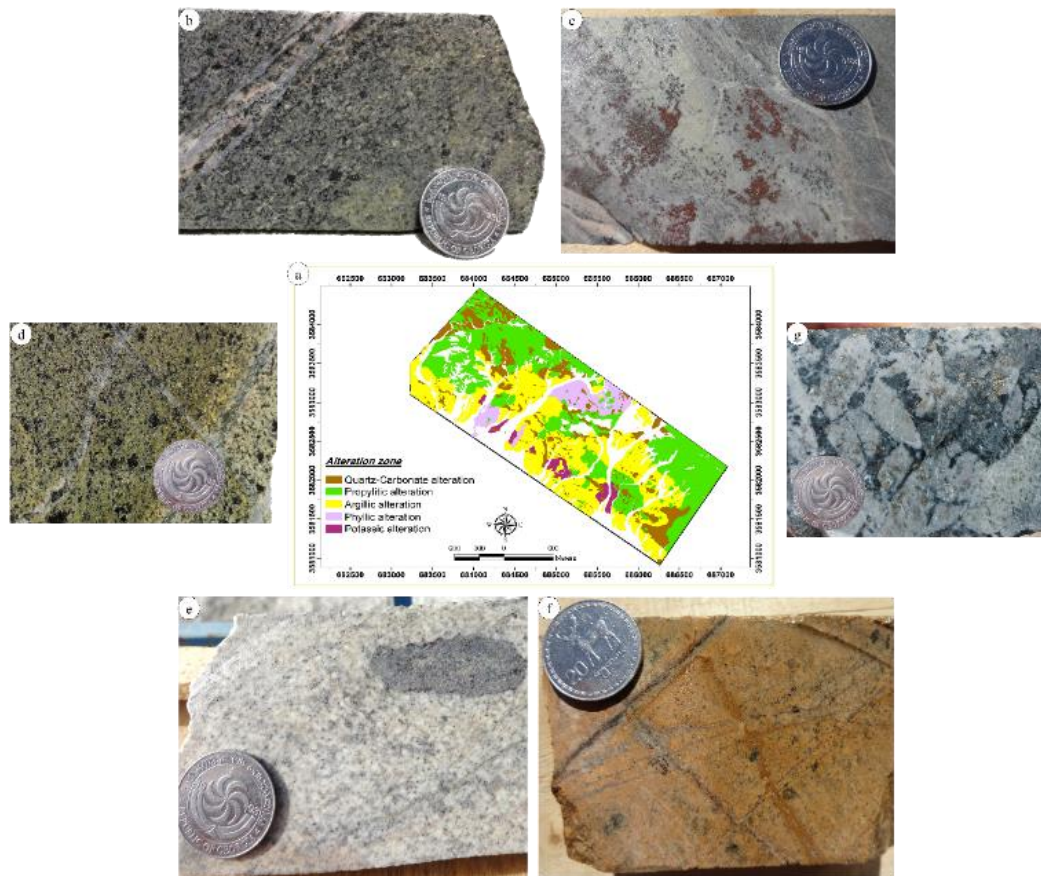
۴-۲- کانه‌زایی

کانه‌زایی در کانسار شادان از دو بخش درونزاد و برونزاد تشکیل شده است. در بخش برونزاد، مهم‌ترین کانه‌ها را مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، هماتیت، نئوتسایت و سایر اکسید-هیدروکسیدهای آهن تشکیل می‌دهند، در حالی که مهم‌ترین کانه‌های بخش درونزاد پیریت، کالکوپیریت، کولیت و مگنتیت هستند. به طور کلی، در کانسار شادان، زون‌های برونزاد ضخامت قابل توجهی ندارند با این حال کانه‌زایی مس به صورت کانه‌های اکسیدی مالاکیت، کریزوکلا و نئوتسایت و همچنین کانه‌زایی طلا در قالب اکسید-هیدروکسیدهای آهن حاصل از اکسیداسیون فازهای سولفیدی، به خصوص پیریت، شناسایی شده‌اند.

مهم‌ترین اشکال کانه‌زایی در کانسار شادان را کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای (شکل e۴ و f) برش‌های گرمابی (شکل g۴) و دانه افشان (شکل h۴) تشکیل می‌دهند. در کانسار طلای شادان حجم زیادی از ماده معدنی را کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای و در اهمیت دوم، کانه‌زایی افشان تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین کانه‌های مس را مالاکیت و کالکوپیریت تشکیل می‌دهند. طی بررسی‌های انجام شده بر روی مغزه‌های حفاری، تا عمق ۲۰-۲۵ متری، مالاکیت و پایین‌تر از این عمق، کالکوپیریت به عنوان کانه‌های اصلی مس حضور دارند. کالکوپیریت معمولاً به صورت افشان و رگچه‌های کوارتز-پیریت-کالکوپیریت مشاهده شده است. مگنتیت یکی از مهم‌ترین کانه‌های آهن در کانسار طلای شادان است که فراوانی بالایی را در اشکال مختلف از جمله رگچه‌های مگنتیت با ضخامت‌های مختلف تا دانه‌های افشان در زمینه سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی نشان می‌دهد. مالاکیت نیز در بیشتر موارد در حاشیه شکستگی‌ها شکل گرفته و به طور محدود به صورت رگچه نیز حضور دارد. میانگین عیار مس ۰/۱۵ درصد می‌باشد. پیریت مهم‌ترین کانی سولفیدی در کانسار

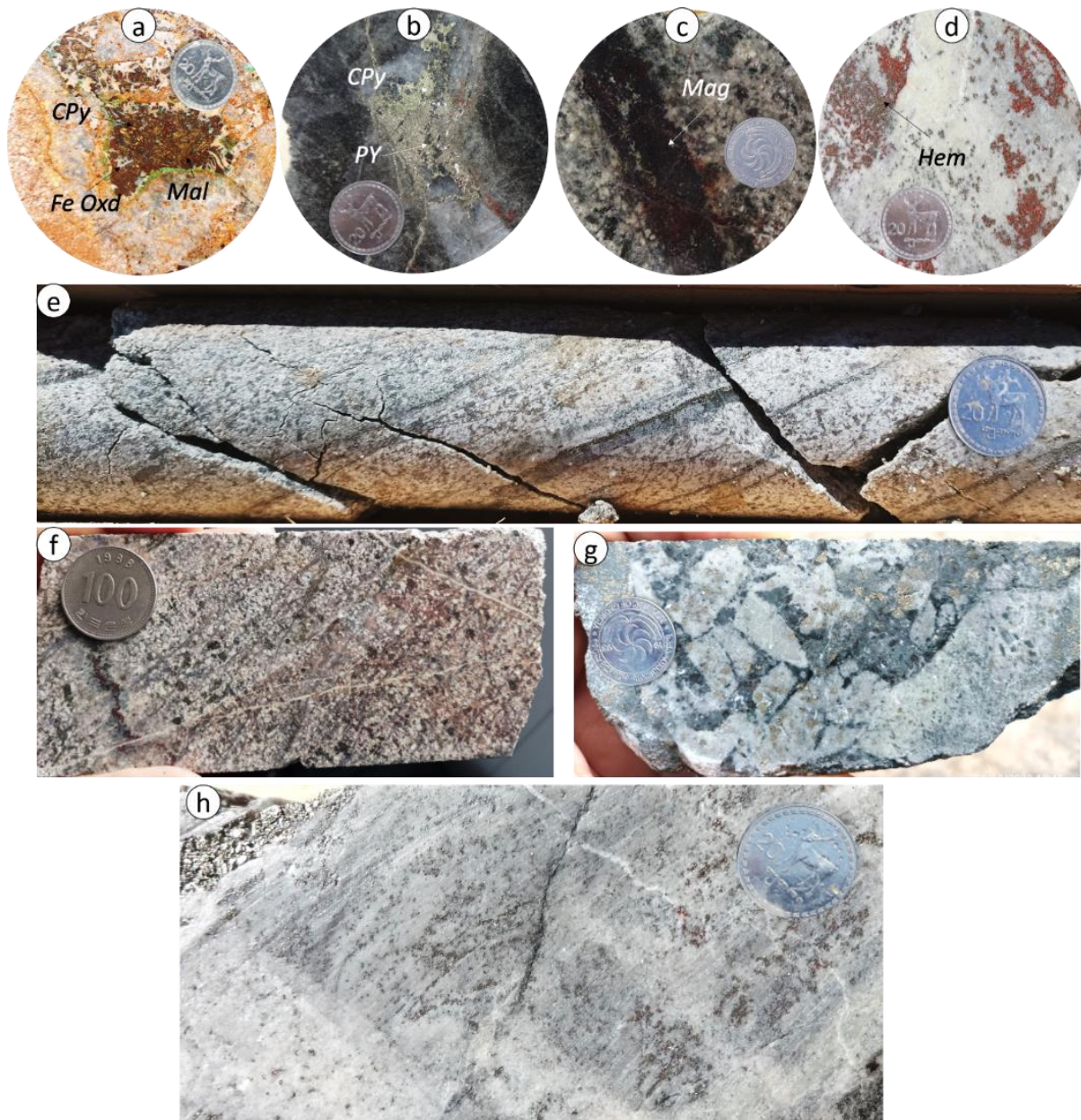
می‌کند. براساس مطالعات SEM، طلا به صورت آزاد، الکتروم و کالاوریت رخ داده است. در بخش درونزاد، مهم‌ترین کانی‌های میزبان طلا را پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت تشکیل می‌دهند. طی این مطالعات مشخص گردید که طلا به صورت به دام افتاده در ساختار کانی‌های سولفیدی، به صورت جذب سطحی بر کانی‌های سولفیدی و درون شکستگی‌ها حضور دارد. در زون برونزاد، مهم‌ترین میزبان طلا، کانی‌های هماتیت و لیمونیت حاصل از اکسیداسیون پیریت، هستند که طلا به صورت آزاد درون آنها حضور دارند (شکل ۵).

طلای شادان را تشکیل می‌دهد. پیریت به صورت افشان در زمینه سنگ، رگچه‌های پیریت و کوارتز-پیریت مشاهده شده است. در بعضی موارد به صورت افشان در برش‌های گرمایی نیز حضور دارد. دگرسانی فیلیک با کانه‌زایی طلای نسبتاً بالایی همراه است که در بیشتر کانسارهای پورفیری غنی از طلا (Kesler et al., 1973) مشاهده شده است. میانگین عیار طلا، ۰/۵ گرم در تن و عیار طلا در نمونه برداشت شده از زون فیلیک و رگچه‌های مرتبط با این دگرسانی گاهی بسیار بالا است و به بیش از ۷ گرم در تن می‌رسد که با عیار توده پورفیری برابری



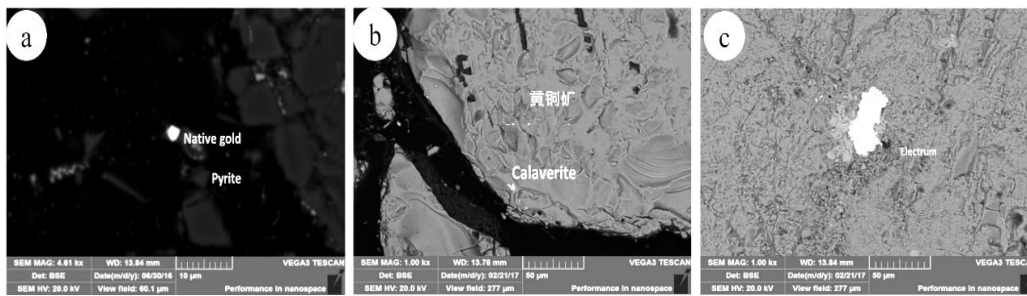
شکل ۳- (a) نقشه دگرسانی همراه با تصاویری از نمونه‌های دستی انواع دگرسانی‌ها در کانسار طلای شادان، (b) دگرسانی پتاسیک در سنگ میزبان مونزودیوریتی که وجود بیوتیت‌های گرمایی رنگ، باعث رنگ تیره آن شده است، (c) حضور کانی‌های پیریت، کوارتز و سریسیت در سنگ میزبان دیوریتی که کانی‌های اصلی دگرسانی فیلیک را تشکیل می‌دهند، (d) دگرسانی پروپلیتیک که با حضور کانی کلریت- اپیدوت و تهرنگ سبز مشخص می‌گردد، (e) جانشینی کانی پلاژیوکلاز و همچنین زمینه سنگ توسط کانی‌های رسی که بیانگر دگرسانی آرژیلیک است، (f) دگرسانی تورمالینی شدن که در این مورد تورمالین سیمان بین قطعات برش را تشکیل می‌دهد و (g) دگرسانی سیلیسی-کربناتی در سنگ میزبان که بخش‌هایی از سنگ را تحت تاثیر قرار داده است.

Fig. 3. (a) Alteration map with hand specimens of alterations in the Shadan gold deposit, (b) the presence of pyrite, quartz and sericite minerals in the diorite host rock, which constitute the major minerals of phyllic alteration, (c) Potassic alteration in a monzodiorite host rock which presence of hydrothermal biotite made a dark color, (d) Propylitic alteration characterized by the presence of chlorite-epidote mineral and green tint (e) replacement of plagioclase phenocrysts and matrix rock by clay minerals indicating Argillic alteration, (f) Tourmaline alteration, in which case tourmaline forms the cement between the brecciated clasts and (g) Silica-carbonate alteration in the host rock that has affected parts of the rock.



شکل ۴- اشکال مختلف کانه‌زایی در کانسار طلای شادان. (a) کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای کوارتز- پیریت که تراکم بالایی را نشان می‌دهند، (b) نمونه دیگری از کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای کوارتز-پیریت، (c) دو نوع کانه‌زایی در این عکس مشخص است، کانه‌زایی برشی که از قطعات دارای دگرسانی سریسیتی و کانه‌زایی پیریتی تشکیل شده و توسط سیمانی از تورمالین به یکدیگر متصل شده‌اند و کانه‌زایی افشان در سطح سنگ. در مورد اول پیریت‌ها محدود به قطعات برشی ولی در مورد دوم پیریت به طور کامل در سطح سنگ قرار گرفته‌اند، (d) کانه‌زایی پیریت-کالکوپیریت در رگچه‌های کوارتزی در سنگ میزبان آتشفشانی، (e) کالکوپیریت که در حال تبدیل به اکسیدهای آهن و مالاکیت است، (f) کانه مگنتیت به صورت رگچه قابل مشاهده است، (g) هماتیت به صورت دانه افشان در زمینه سنگ قرار دارد و (h) کانه‌زایی افشان پیریت در سنگ میزبان به شدت سریسیتی شده.

Fig. 4. Mineralization different forms in Shadan gold deposit. (a) Quartz-pyrite vein mineralization, which shows high density, (b) another example of vein-veinlet mineralization, (c) Two types of mineralization can be recognized, brecciated mineralization which consists of sericitized clasts connected by tourmaline cement with disseminated pyrite mineralization, (d) Pyrite-chalcopyrite mineralization in quartz veins hosted by volcanic host rock, (e) chalcopyrite mineralization which is altered to iron oxides and malachite, (f) the magnetite veinlets, (g) disseminated grains of Hematite and (h) Disseminated pyrite in highly sericitized host rock.



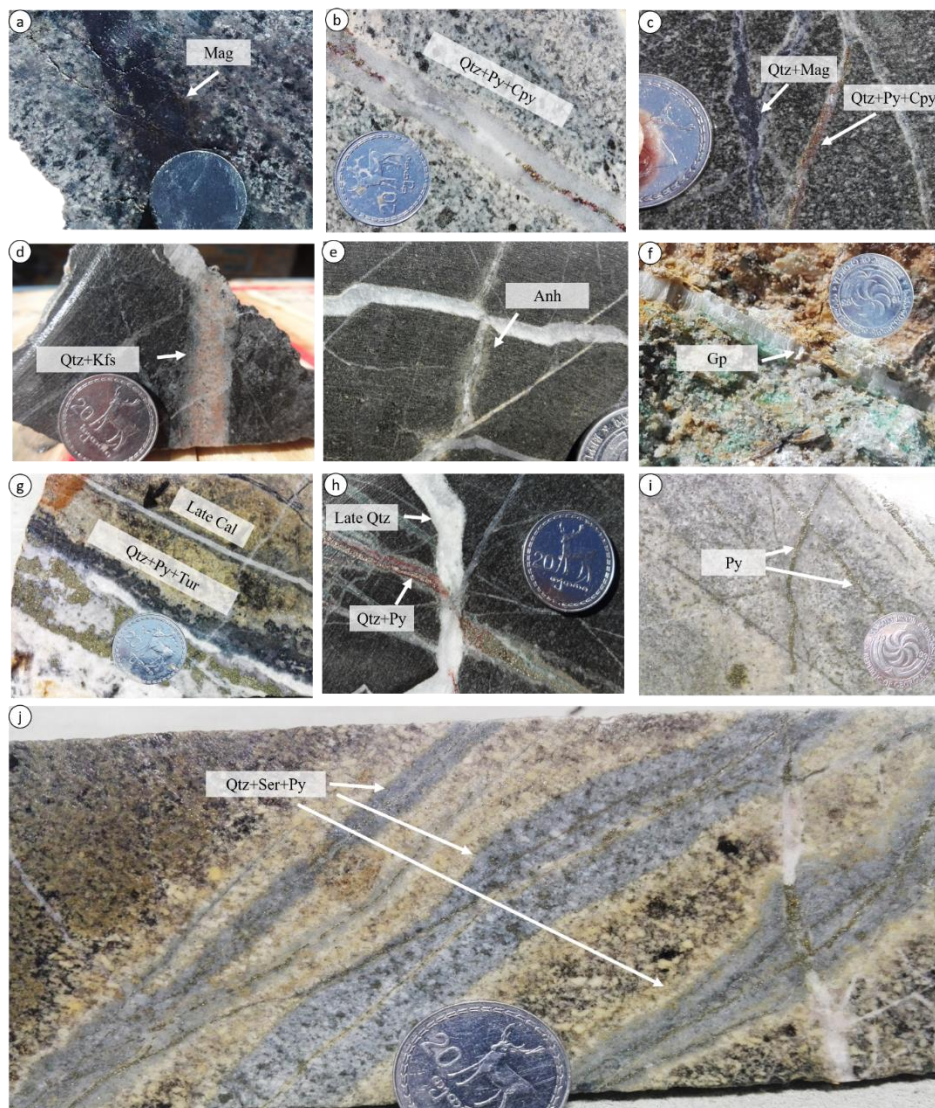
شکل ۵- اشکال مختلف رخداد طلا در کانسنگ سولفیدی کانسار شادان که عبارتند از (a) طلای خالص، (b) کالاوریت و (c) الکتروم. در بین سه مورد، طلای خالص بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده است.

Fig. 5. The various forms of gold occurrence in the sulfide ores of Shadan deposit are electrum, Native gold and calaverite. Native gold is the most abundant form of gold occurrences.

(پیریت-کالکوپیریت) تقسیم می‌شوند (شکل ۵b). این نوع رگچه‌ها از کوارتز-پیریت-کالکوپیریت تشکیل شده‌اند که فازهای سولفیدی به صورت خطوط مرکزی و ذرات افشان یافت می‌شوند. از دیگر خصوصیات آن تقارن مرزهای آن و نبود حاشیه دگرسانی است. در بعضی موارد این نوع رگچه‌ها، بافت نواری شاخصی نشان می‌دهد که به صورت یک نوار روشن در مرکز و یک نوار تیره در حاشیه است که معمولاً نوار روشن حاوی پیریت و یا کالکوپیریت و نوار تیره رنگ نیز به علت حضور میانبرهای غنی از بخار به این صورت مشاهده می‌گردد. این نوع رگچه‌ها در دگرسانی‌های فلیک و حدواسط بین پتاسیک-فلیک متمرکز بوده و توسط رگچه‌های تیپ D و رگچه‌های تاخیری قطع شده‌اند، (۴) رگچه‌های انیدریت-ژیپس، رگچه‌های انیدریت-ژیپس فراوانی بسیار زیادی در کانسار طلای شادان نشان می‌دهند. این رگچه‌ها تقریباً در همگی انواع دگرسانی‌ها مشاهده می‌شوند اما رگچه‌های انیدریتی که به صورت درشت بلور حضور دارند دارای ماهیت تاخیری هستند و سایر رگچه‌های پیش از خود را قطع می‌کنند (Sillitoe, 2000). در عمق زیاد، این رگچه‌ها دارای ترکیب انیدریتی و در مرحله برونزاد به صورت ژپس حضور دارند (اشکال e و f)، (۵) رگچه‌های نوع D که به دو گروه D1 (کوارتز-پیریت ± سیریسیت) و D2 (کوارتز-پیریت ± تورمالین) تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین خصوصیت این رگچه‌ها، وجود حاشیه‌های دگرسانی شاخص است که گاهی عرض آنها به ۳ تا ۴ سانتی‌متر می‌رسد (اشکال g و h). این رگچه‌ها، فراوان‌ترین و مهم‌ترین گروه از رگچه‌ها را تشکیل داده و دارای اهمیت به سزایی در کانه‌زایی هستند، (۶) رگچه‌های تاخیری که شامل رگچه‌های کوارتز ± کربناته و پیریت هستند. این رگچه‌ها معمولاً سایر رگچه‌های قبلی را قطع می‌کنند (اشکال h و i).

رگچه‌های موجود در کانسار شادان، طیف گسترده و متنوعی را نشان می‌دهند که علاوه بر اهمیت آنها در بحث کانه‌زایی، در درک تاریخچه سیستم ماگمایی-گرمایی نیز نقش بسزایی را ایفا می‌کنند. به‌طور کلی، سامانه‌های رگه-رگچه‌ای در کانسارهای پورفیری اهمیت زیادی داشته و محققان متعددی برای این عوارض، طبقه‌بندی ارائه کرده‌اند (Gustafson and Sillitoe, 2010, Hunt, 1975). براساس کانی‌شناسی، روابط قطع‌شدگی و ارتباط آنها با انواع دگرسانی، می‌توان ۶ گروه رگچه را در کانسار شادان تشخیص داد:

(۱) رگچه‌های نوع M (مگنتیت)، این رگه‌ها یکی از قدیمی‌ترین فازهای رگچه‌ای در کانسار طلای شادان محسوب می‌شوند. رگچه‌های نوع M در بخش‌های عمیق واحدهای نفوذی منطقه حضور داشته و فقط از مگنتیت تشکیل شده‌اند. حاشیه آنها برخلاف رگچه‌های دیگر نامتقارن است که بیانگر دما-فشار بالا می‌باشد و فاقد حاشیه دگرسانی هستند. فراوانی این نوع رگچه‌ها محدود بوده و معمولاً همراه با دگرسانی پتاسیک مشاهده می‌شوند (شکل ۵a)، (۲) رگچه‌های نوع A، این نوع رگچه‌ها به دو زیر گروه A1 (کوارتز-مگنتیت ± کالکوپیریت) و رگچه‌های A2 (فلدسپار پتاسیم-کوارتز ± مگنتیت) تقسیم می‌شوند، که مورد اول به‌علت حضور فلدسپار قلیایی، رنگ صورتی را نشان می‌دهد (شکل ۵c). در زیرگروه A2، مگنتیت به دو شکل افشان و نواری حضور دارد. در این گروه معمولاً حاشیه دگرسانی مشاهده نمی‌شود ولی در بعضی موارد حاشیه دگرسانی ضعیفی از فلدسپار قلیایی قابل مشاهده است. این گروه رگچه‌ها نیز عمدتاً با دگرسانی پتاسیک همراه بوده و فراوانی نسبتاً بالایی نسبت به گروه قبل نشان می‌دهند (شکل ۵d)، (۳) رگچه‌های نوع B، به دو گروه B1 (رگچه‌های کوارتز-کالکوپیریت-پیریت ± مولیبدنیت) و رگچه‌های نوع B2



شکل ۶- تنوع انواع رگه- رگچه‌ها در کانسار طلای شادان. (a) رگچه مگنتیتی تیپ M در توده نیمه عمیق شادان، (b) رگچه تیپ B که از کانی‌های کوارتز + پیریت + کالکوپیریت تشکیل شده است، (c) رگچه‌های تیپ B (کوارتز + پیریت + کالکوپیریت) و تیپ A (مگنتیت + کوارتز) درون سنگ پورفیری با دگرسانی پتاسیک، (d) رگچه فلدسپار قلیایی و کوارتز که رنگ صورتی آن حاصل حضور فلدسپار قلیایی است، (e) رگچه انیدریتی که توسط یک رگچه جوان تر کوارتز- پیریت قطع شده است، (f) رگچه ژیپس که در حاشیه آن کانه‌زایی مالاکیت قابل مشاهده است، (g) رگچه تیپ D که متشکل از کانی‌های کوارتز + پیریت و تورمالین است، (h) رگچه کوارتز + پیریت (نوع D) که توسط رگچه کوارتز تاخیری قطع شده است، (i) حضور رگچه‌های پیریتی که یکدیگر را قطع می‌کنند، (j) مجموعه‌ای از رگچه‌های تیپ D که به صورت موازی با یکدیگر قرار دارند و حاشیه دگرسانی شاخصی را نشان می‌دهند.

Fig. 6. Diversity of various types of vein-veinlets in Shadan Au deposit. (a) Magnetite veinlet, known as M-type veinlets, in Shadan porphyry pluton, (b) a veinlet with mineralogy of Quartz + Pyrite + Chalcopyrite which classified as B-type veinlets, (c) A-type (Qtz + Mag) and B-type veinlets (Qtz + Cpy + Py) in Potassic altered porphyry rock, (d) A veinlet with a pinkish-white color consisting of quartz and alkali feldspar, the pink color is the result of the presence of alkali feldspar, (e) Anhydrite veinlet cut by a younger quartz-pyrite vein, (f) Gypsum veinlet with malachite mineralization, (g) D-type veinlet that comprised of Quartz and Pyrite and dark-colored Tourmaline. There is a parallel Calcite veinlet, (h) Quartz + pyrite veinlet (D-type) cut by the Late Quartz veinlets, (i) presence of Pyrite veinlets which cut each other, (j) a set of parallel D-type veinlets in porphyry rock which show characteristic alteration selvages.

۵- مطالعات میانبارهای سیال

یکی از مهم‌ترین روش‌های به‌دست آوردن اطلاعات در مورد شیمی سیال کانه‌ساز و تحول گرمایی آن، انجام مطالعات میانبارهای سیال است. با توجه به فراوانی کانی کوارتز، شفاف بودن و حضور میانبارهای سیال مناسب، مطالعات میانبارهای سیال بر روی کانی کوارتز مربوط به رگه‌های کوارتز-سولفیدی نوع B و D صورت گرفت که بیشترین فراوانی را در کانسار دارند و در دگرسانی‌های پتاسیک و فیلیک متمرکز هستند. از سایر رگچه‌ها به دلیل عدم وجود میانبار سیال مناسب قابل مطالعه، نمونه‌ای انتخاب نشده است.

۵-۱- پتروگرافی میانبارهای سیال

به طور کلی از نظر ظاهری میانبارهای مشاهده شده در رگچه‌های کوارتز از اشکال نامنظم، چندضلعی، کروی تا منفی بلور متغیر است. ابعاد میانبارهای سیال متغیر و از ۱ تا ۲۱ میکرون می‌باشد. براساس مطالعات انجام شده و معیارهای متداول طبقه‌بندی میانبارهای سیال (Kouzmanov et al., 2001, Van Den Kerkhof and Hein, 2012)، میانبارهای سیال موجود در رگچه‌های کوارتز نوع D و B کانسار شادان در سه گروه طبقه‌بندی شدند: (۱) میانبارهای غنی از بخار یا VL (نوع I)، (۲) میانبارهای آبگین یا LV (نوع II)، (۳) میانبارهای با شوری بالا یا LVH (نوع III). میانبارهای غنی از بخار یا نوع I شامل میانبارهایی هستند که بیشترین حجم میانبار را فاز بخار به خود اختصاص داده و فاز مایع به صورت یک حاشیه در آن مشاهده می‌شود. ابعاد این میانبارها از کمتر از ۵ میکرون تا ۲۴ میکرون متغیر است و اشکال متفاوتی از بی‌نظم تا منفی بلور را نشان می‌دهند. این میانبارها به صورت منفرد یا مجموعه در کانی میزبان حضور دارند (شکل a۷). میانبارهای آبگین یا نوع II، میانبارهای دوفازی را در بر می‌گیرند که از یک فاز مایع و یک حباب بخار کوچک تشکیل شده‌اند. درجه پرشدگی این میانبارها بالا است و حباب بخار ۲۰ تا ۴۰ درصد از حجم میانبار را تشکیل می‌دهد (شکل c۷). شکل میانبارهای غنی از مایع از بی‌نظم و کشیده تا منفی بلور متغیر است. این میانبارها به صورت منفرد و گاهی خوشه‌ای مشاهده می‌شوند. ابعاد این میانبارها از ۷ تا ۱۲ میکرون متغیر است. میانبارهای دارای شوری بالا یا نوع III، از فراوانی بالایی در بین انواع میانبارها برخوردار هستند. این میانبارها، چند فازی و شامل مایع + بخار + حالت ± مواد جامد دیگر هستند. بلورهای خودشکل‌هالیت

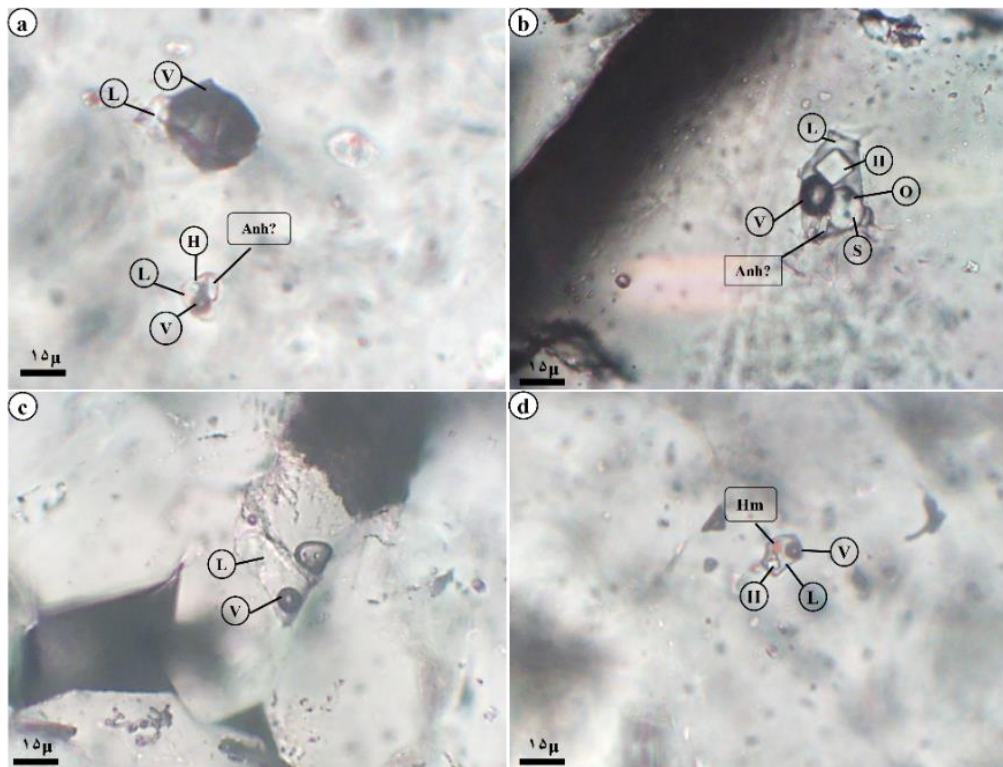
مهم‌ترین فاز همراه این میانبارها است. گاهی ممکن است فازهای جامد دیگر در این میانبارها حضور داشته باشند. سیلویت در موارد بسیار محدود در میانبارهای نوع III مشاهده شده است. سیلویت از هالیت براساس حاشیه‌های کروی و برجستگی پایین‌تر (Hezarkhani et al., 1999) تشخیص داده شد. هالیت فراوانی بیشتری نسبت به سیلویت دارد. علاوه بر کانی‌های دختر شفاف، یکسری فازهای جامد کدر با اشکال متفاوت (احتمالاً سولفیدی) و هماتیت (قرمز رنگ، شکل هگزاگونال، شاخص شکست بسیار بالا و بیرفرنژانس بالا) در این میانبارها حضور دارند (d۷). تقریباً در همگی میانبارهای نوع III، هالیت حضور دارد (شکل b۷ و d۷) این میانبارها هم به صورت مجزا و هم به صورت خوشه‌ای مشاهده شده‌اند.

۵-۲- مطالعات ریزدماسنجی

در این گروه، مطالعات بر روی تعداد ۶۸ مورد از میانبارهای سیال LV و LVH انجام شد. خلاصه داده‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال در جدول ۱ آورده شده است. به علت عدم تشخیص تغییرات فازی و رخداد شکستگی (Decrepitation) در حین مطالعات ریزدماسنجی، میانبارهای غنی از بخار (VL) مطالعه نشده‌اند. دمای ذوب یخ (Tm-ice) در میانبارهای سیال نوع LV از ۴- تا ۲۳- متغیر می‌باشد که شوری این میانبارها از ۶/۴ تا ۲۴/۳ درصد وزنی نمک طعام محاسبه شده است. دمای همگن شدن در میانبارهای سیال نوع LV از ۲۴۵ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی آنها از ۰/۷۶ تا ۰/۹۲ متغیر است (جدول ۱). در مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای حاوی هالیت (نوع LVH)، همگن شدن به دو صورت رخ داده است، در تعدادی از میانبارها (زیر رده اول)، طی گرمایش ابتدا فاز بخار و سپس فاز هالیت ناپدید شده و به فاز مایع همگن می‌شوند. این میانبارها ۶۳ درصد از میانبارهای نوع LVH را تشکیل می‌دهند (شکل ۸ تصویر بالا). در سایر میانبارها (۳۷ درصد، زیر رده دوم)، طی گرمایش، ابتدا هالیت و سپس فاز بخار ناپدید شده و در نهایت به فاز مایع همگن می‌شوند (شکل ۸ تصویر پایین). این حالت، مطابق رفتار میانبارهای اشباع از هالیت در سامانه‌های کانه‌زایی گرمایی- ماگمایی است (Rusk et al., 2008) و ناشی از فوق اشباع شدن سیال از NaCl قبل از به دام افتادن و یا به دام افتادن همگن سیالات اولیه در فشار بالا (Rusk et al., 2008) یا به دام افتادن ناهمگن یک شورابه گرمایی اشباع از هالیت در (Sun et al., 2017) است. محدوده دمای ذوب هالیت در

(جدول ۱) و شوری آنها از ۳۵ تا ۴۱٫۲ درصد وزنی نمک طعام متغیر محاسبه شده است (جدول ۱).

میانبارهای سیال زیر رده اول، ۳۶۲ تا ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱). دمای محدوده دمای ذوب هالیت در میانبارهای سیال زیر رده دوم، ۲۷۶ تا ۳۴۳ درجه سانتی‌گراد



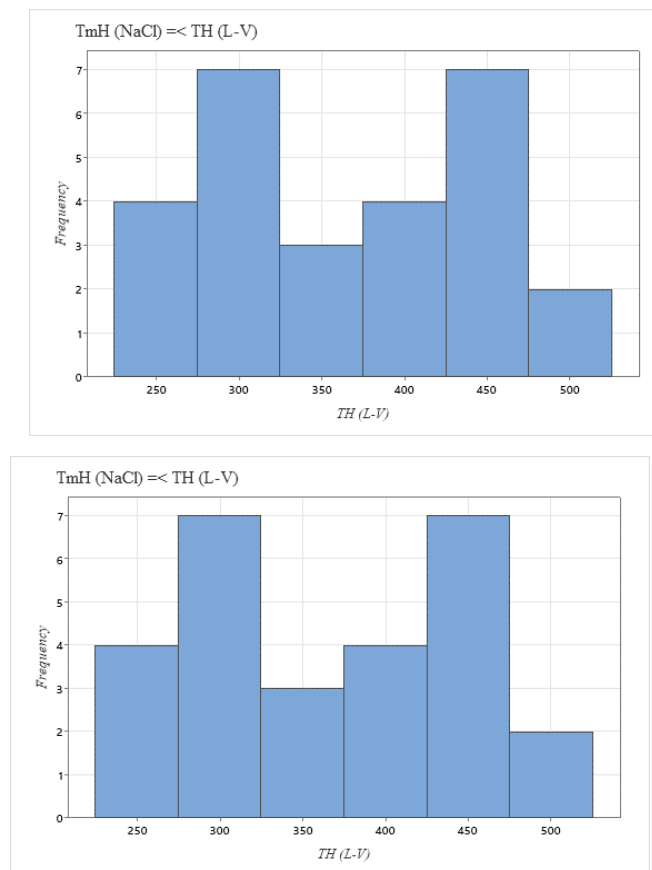
شکل ۷- انواع میانبارهای سیال مشاهده شده در کانسار طلای شادان (a) حضور همزمان میانبارهای دوفازی غنی از بخار (VL) و میانبار دارای شوری بالا حاوی هالیت (LVH)، (b) میانبار با شوری بالا (LVH) که فازهای جامد آن را کانه کدر و هالیت تشکیل می‌دهند (c) میانبارهای دوفازی غنی آبگین (LV) و (d) میانبار چندفازی (LVH) حاوی هالیت و هماتیت که با رنگ قرمز قابل تشخیص است.

Fig. 7. Types of fluid inclusions observed in Shadan gold deposit. (a) co-presence of vapor-rich fluid inclusion (VL) and halite-bearing hypersaline inclusion (LVH), (b) Hypersaline (LVH) fluid inclusions containing the solid phases of opaque minerals and halite phase, (c) a two-phase aqueous (LV) fluid inclusion and (d) Multiphase inclusion (LVH) containing halite and hematite, of which hematite is recognized with red color.

جدول ۱- خلاصه داده‌های ریزدماسنجی انجام شده بر روی انواع میانبارهای سیال موجود در کوارتز مربوط به رگه‌های نوع B و D در کانسار طلای شادان.

Table 1- Summary of microthermometric data of the different fluid inclusion types in quartz from B and D-type veins at the Shadan gold deposit.

Type	Phases	Size (μ)	T _e (C°)	T _{mice} (C°)	T _{MH} (C°)	T _{MS} (C°)	TH (L-V) (C°)	Thf	Salinity (wt.%)	Density (g/cm ³)
LV	L-V	7-18	-26 to -63	-4 to -23	-	-	245-420	245-420	6.4-24.3	0.78-0.92
LVH (Halite disappearance)	L-V-S1-S2	6-25	-	-	362-590	225-240	238-430	362-590	43.6- 69.1	1.1-1.3
LVH (Vapor disappearance)	L-V-S1-S2	10-23	-	-	276-343	-	337-520	337-520	35.00- 41.2	0.8-0.95



شکل ۸- تغییرات دمای همگن شدن در میانبرهای سیال چندفازی (LVH) (تصویر بالا) تغییرات دمای همگن شدن در میانبرهای چندفازی حالت‌دار که به فاز بخار همگن می‌شوند. حالت‌دار که به حالت همگن می‌شوند، (تصویر پایین) تغییرات دمای همگن شدن در میانبرهای چندفازی حالت‌دار که به فاز بخار همگن می‌شوند.
 Fig. 8. homogenization Temperature variations in multiphase fluid inclusions. (upper) Homogenization temperatures of fluid inclusions homogenized by Halite disappearances, (bottom) homogenization temperatures of fluid inclusions homogenized by vapor disappearances.

آستنوسفری طی رژیم تکتونیک کششی تشکیل شده است (Pang et al., 2013). بسیاری از پورفیری‌های غنی از طلا، نیز در کمان‌های ماگمایی ایجاد شده‌اند که در یک بازه زمانی تحت تاثیر فرایندهای کششی قرار گرفته باشند مانند کانسارهای سرو کرونا و میناس کونگا در شمال پرو، کانسارهای مارته، لوبو، رفیوجیو و سرو کاساله در کمربند ماریکونگا، شمال شیلی (Sillitoe, 2000).

نوع و توزیع دگرسانی‌ها در کانسار طلای شادان از مدل‌های دگرسانی ارائه شده برای سامانه‌های پورفیری پیروی می‌کنند با این تفاوت که برخلاف مدل معمول در سامانه‌های کانه‌زایی پورفیری (Seedorff et al., 2005)، دگرسانی پتاسیک (غنی از بیوتیت) در این کانسار در بخش‌های سطحی رخمون یافته که با توجه به سن بالای کانسار طلای شادان $۳۷ \pm ۰/۲۶$ تا ۴۰

۶- بحث و بررسی

بلوک ساختاری لوت دارای تاریخچه تکاملی پیچیده‌ای می‌باشد و رخدادهای ماگماتیسم، دگرگونی، ولکانیسم و کانه‌زایی متعددی را تجربه کرده و به عنوان یکی از زون‌های ساختاری امیدبخش برای انواع کانسارهای مختلف مطرح است. با در نظر گرفتن زمان بازشدن اقیانوس شرق ایران (کرتاسه میانی) و زمان برخورد در ائوسن میانی، سن کانسار طلای شادان $(۰/۲۶ \pm ۳۷/۲۶)$ تا ۴۰ میلیون سال) و همچنین خصوصیات ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین در محدوده مورد مطالعه، کانسار طلای شادان یک کانسار مرتبط با ماگماتیسم مرتبط با فروانش بین صفحه ایران و بلوک افغان است (Richards et al., 2012). این ماگماتیسم برخوردی در بلوک لوت، بر اثر حذف همرفتی لیتوسفر و بالاآمدگی

کانسارهای پورفیری امری معمول محسوب می‌شود اما بعضی از انواع رگچه‌ها فقط در بعضی از انواع کانسارهای پورفیری یافت می‌شوند (Sillitoe, 2000). برای مثال، رگچه‌های دارای بافت نواری یکی از خصوصیات شاخص کانسارهای پورفیری غنی از طلا هستند که ممکن است بر اثر باز شدن مجدد رگچه یا ورود مجدد سیلیس به یکی از نوارها تشکیل شوند و برای اولین بار در کانسارهای پورفیری غنی از طلای ماریکونگا در شیلی شناسایی شدند (Vila et al., 1991). این نوع بافت در رگچه‌های نوع B در کانسار شادان مشاهده شده است. همچنین، رگچه‌های نوع A و M معمولاً در کانسارهای پورفیری غنی از طلا یافت می‌شوند و فراوانی بسیار بیشتری نسبت به کانسارهای مس پورفیری غنی از مولیبدن دارند که در کانسار شادان نیز همینگونه است.

داده‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال بر روی رگچه‌های نوع B و D طیف وسیعی از دماهای همگن شدن و شوری را نشان می‌دهند که دما و شوری معمول ارائه شده برای دگرسانی فیلیک و پتاسیک را در بر می‌گیرند که احتمالاً حاصل رونقشی دگرسانی پتاسیک توسط دگرسانی فیلیک است (Bodnar et al., 2014). البته ممکن است این تنوع دما و شوری، حاصل رخداد چندین فرایند کانه‌زایی در زمان‌های مختلف نیز باشد (Rusk et al., 2008). یکی از عوارض قابل توجه که طی مطالعات پتروگرافی و ریزدماسنجی میانبارهای سیال مشاهده شد، حضور همزمان میانبارهای با شوری بالا و میانبارهای غنی از بخار است. این حالت یکی از خصوصیات شاخص فرایند جوشش یا جدایش فازی در کانسارهای پورفیری محسوب می‌شود (Lecumberri Sanchez, 2013). علاوه بر این مورد، همپوشانی دمای همگن شدن نهایی برای میانبارهای سیال حاوی هالیت (LVH) نیز می‌تواند بیانگر فرایند جدایش فازی یا جوشش تحت شرایط ماگمایی یا گرمایی باشد (Moncada et al., 2017, Roedder, 1971, Kouzmanov et al., 2012, Hedenquist et al., 1998). نتایج مطالعات ریزدماسنجی نیز حضور دو گروه متفاوت از میانبارهای سیال به لحاظ شوری، چگالی و دما را تایید می‌کنند (شکل ۹).

همانگونه که از اسم کانه‌زایی نوع پورفیری مشخص است، یکی از خصوصیات بارز توده‌های نفوذی در این نوع کانسارها بافت پورفیری آن است که در توده نفوذی عامل کانه‌زایی کانسار طلای شادان نیز درشت‌بلورهای فراوان هورنبلند و پلاژیوکلاز حضور دارند و یکی از شواهد بارور بودن سامانه‌های پورفیری و

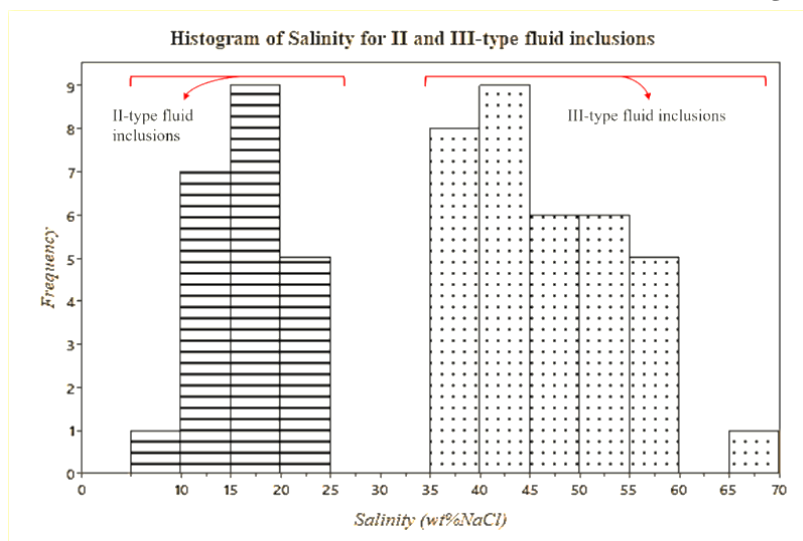
می‌تواند بیانگر تاثیر فرسایش گسترده در منطقه باشد. یکی از خصوصیات مشاهده شده در دگرسانی‌های کانسار شادان، رونقشی گسترده دگرسانی پتاسیک توسط دگرسانی‌های فیلیک و کربناتی است که همراه با کانه‌زایی طلا-مس هستند. به نظر می‌رسد این رخدادهای ثانویه باعث تحرک مجدد طلا-مس بر اثر تجزیه بورنیت و کالکوپیریت و تشکیل یک مجموعه جدید کالکوپیریت-پیریت-طلادار شده است (Kesler et al., 2002). پس می‌توان گفت تشکیل کانه‌زایی طلا توسط فرایندهای ثانویه کنترل شده است. این حالت در بعضی از کانسارهای پورفیری غنی از طلا مانند کانسارهای پورفیری گرانیزل و بل کوپر در بریتیش کلمبیا و مجموعه‌های کربناتی طلادار در کانسارهای فیش لیک، مونت گیلیگان و دینکیدی مشاهده شده است (Kesler et al., 2002).

رگه-رگچه‌های شناسایی شده در کانسار شادان، همانند سایر کانسارهای پورفیری تنوع و فراوانی بالایی دارند که از عوارض رخداد فازهای متعدد فعالیت‌های گرمایی می‌باشد. سامانه‌های رگه-رگچه در کانسار طلای شادان نقش به‌سزایی را در اقتصاد آن ایفا می‌کنند و انطباق بسیاری قوی بین تراکم رگچه‌های کوارتز و مقدار ماده معدنی مشاهده شده است که در بسیاری از کانسارهای پورفیری، به‌خصوص در کانسارهای غنی از طلا، متداول است (Sillitoe, 2010). با بررسی توزیع مکانی، ارتباط زمانی و کانی‌شناسی بین رگه‌های موجود در مغزه‌های حفاری برداشت شده، مراحل زیر در تکامل سامانه رگه-رگچه تشخیص داده شدند:

۱- رگچه‌های نوع A و M در بخش مرکزی سامانه کانه‌زایی و منطبق بر دگرسانی پتاسیک و پروپلیتیک تشکیل شده‌اند که بیانگر مراحل اولیه تکامل گرمایی سامانه هستند. رگچه‌های انیدریتی نیز در این منطقه تشکیل شده‌اند و رگچه‌های نوع A و M را قطع کرده‌اند. ۲- با گذشت زمان و تحولات بیشتر در سامانه گرمایی، ماهیت ماگمایی سیالات نیز تغییر یافته و دگرسانی فیلیک ایجاد شده که معمولاً بر اثر اختلاط آب‌های ماگمایی و آب‌های جوی رخ می‌دهد (Sillitoe, 2010). مهمترین عارضه این دگرسانی را رگچه‌های نوع D تشکیل می‌دهند که فراوانی بالایی دارند. ۳- با افزایش ماهیت اسیدی سیال، دگرسانی آرژیلیک ایجاد شده که خصوصیت شاخص آن رگچه‌های تاخیری کوارتز-کربنات است که سایر مراحل قبلی را قطع کرده‌اند. این تنوع رگه-رگچه‌ها در

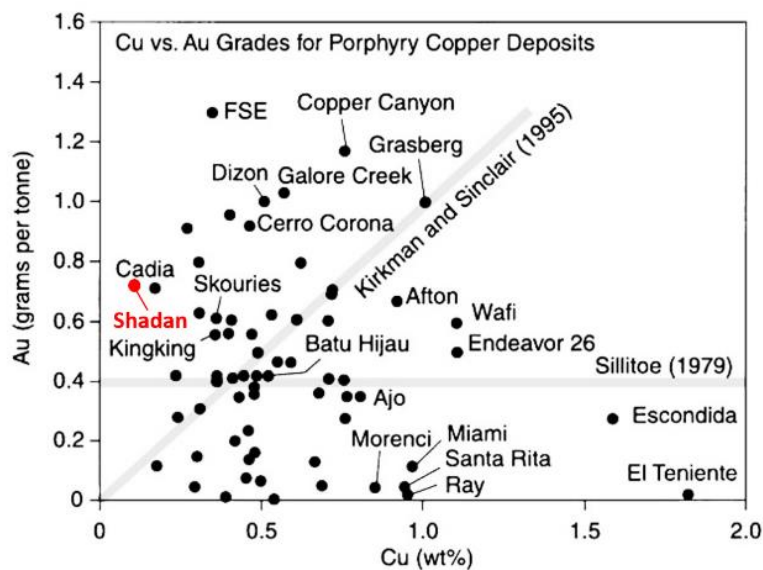
در نهایت، یکی از معیارهای طبقه‌بندی یک کانسار پورفیری به عنوان یک کانسار پورفیری غنی از طلا، نسبت Cu/Au (بالاتر از ۴۰۰۰۰ در کانسارهای پورفیری فقیر از طلا و کمتر از ۴۰۰۰۰ در پورفیری غنی از طلا) است که با توجه به عیار طلا (۰/۵ گرم در تن) و مس (۰/۱۵ درصد) در کانسار طلای شادان، مقدار این نسبت $Cu/Au = 3000$ محاسبه شده است که در نمودار زیر در محدوده کانسارهای پورفیری غنی از طلا قرار می‌گیرد (شکل ۱۰).

بالا بودن مقادیر بالای آب ماگمایی محسوب می‌شود (حدود ۴ درصد وزنی آب) (Richards et al., 2012). این مقادیر بالای آب، تشکیل کانه‌زایی و زون‌های دگرسانی گسترده را کاملاً توجیه می‌سازد که در ارتباط با مراحل مختلف سردشدن توده پورفیری شادان و خروج سیالات گرمایی و همچنین نفوذ توده‌های با ترکیب مختلف است. همچنین مقادیر بالای مگنتیت گرمایی در دگرسانی‌های مختلف وجود دارد که می‌تواند بیانگر یک ماگمای به شدت اکسیدی باشد.



شکل ۹- هیستوگرام شوری میانبرهای مورد مطالعه. همانگونه که قابل مشاهده است، میانبرها به دو گروه با شوری بالا و شوری پایین مجزا شده‌اند.

Fig. 9. The salinity histogram of the studied Fluid inclusion types. As can be seen, the fluid inclusions are divided into two groups with high salinity and low salinity.



شکل ۱۰- ترسیم عیار طلا در برابر عیار مس در کانسارهای پورفیری (Kesler et al., 2002).

Fig. 10. Cu vs Au grades of porphyry copper deposits (Kesler et al., 2002)

۷- نتیجه گیری

بلوک لوت یکی از زون‌های زمین‌شناسی-ساختاری با پتانسیل زیاد معدنی در ایران است که هنوز ناشناخته‌های زیادی در مورد سازوکار تشکیل و کانسارهای نهفته آن وجود دارد که ظهور کانسارهای طلا شادان، گودکان، هیرد، ماهرآباد، خونیک و ...، مشخصه این مهم بوده است. کانسار شادان از جمله کانسارهای کشف شده در این بلوک محسوب می‌شود که با ذخیره ۵۴ میلیون تن ماده معدنی طلا-مس از کانسارهای پورفیری بزرگ شرق کشور و با در نظر گرفتن نسبت Cu/Au (۳۰۰۰) در محدوده کانسارهای پورفیری غنی از طلا قرار می‌گیرد. براساس مطالعات انجام شده، یک سامانه ماگمایی-گرمایی قابل توجه در این منطقه فعال بوده است که می‌تواند بیانگر حضور یک آشیانه ماگمایی بسیار بزرگ در عمق باشد. طی مراحل متعدد از فعالیت این آشیانه ماگمایی، فازهای مختلفی از آپوفیزهای با ترکیب مختلف به درون واحدهای آتشفشانی و آذرآواری منطقه نفوذ کرده‌اند. در بین فازهای نفوذی، توده شادان با ترکیب دیوریت تا مونزودیوریتی مهمترین عامل کانه‌زایی، نسل‌های مختلف رگه-رگچه و گسترش پهنه‌های دگرسانی وسیع در محدوده مطالعاتی بوده است. پس می‌توان گفت که در تشکیل

کانسار طلای شادان، یک ماگمای اکسیدی با مقادیر بالای آب و مواد فرار دخیل بوده است که طی مراحل مختلف سرد شدن توده پورفیری شادان و همچنین نفوذ توده‌های با ترکیب مختلف، سیالات کانه‌ساز از آن خارج شده و بر اساس مطالعات پتروگرافی و ریزدماسنجی، این سیال تحت تاثیر فرایندهای جوشش و اختلاط ماده معدنی را نهشته کرده است. با بررسی خصوصیات مختلف کانسار طلای شادان از جمله زمین‌شناسی، حضور توده نفوذی پورفیری عامل کانه‌زایی، نسل‌های مختلف رگه-رگچه، انواع دگرسانی، کانه‌زایی، توزیع و مقدار طلا، و نسبت Cu/Au ، مشخص گردید که کانسار شادان، علاوه می‌توان به‌عنوان اولین کانسار پورفیری غنی از طلا در ایران معرفی کرد.

۸- سپاسگزاری

نویسندگان کمال تشکر را از شرکت محترم معادن و صنایع معدنی کارند صدرجهان بهره بردار مجتمع معدنی-صنعتی طلا-مس شادان بابت حمایت فنی-مالی این پژوهش ابراز می‌دارند. همچنین از آقای مهندس حمید غلامی، مهندس امین طرهانی و دکتر سعید حاج صادقی بابت همکاری در بخش مطالعات سامانه‌های رگه-رگچه‌ها و مطالعات ساختاری قدردانی بعمل می‌آید.

مراجع

- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. Zhou, L., 2015. Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore geology reviews* 70, 385-406. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>.
- Arjmandzadeh, R., Alirezaei, S. Almasi, A., 2022. Tectonomagmatic reconstruction of the Upper Mesozoic-Cenozoic Neotethyan arcs in the Lut block, East Iran: a review and synthesis. *Turkish Journal of Earth Sciences* 31(6), 20-54. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1818>.
- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A. Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita* 35, 656-671. <https://doi.org/10.1007/s001260050269>.
- Amraei, S. Niroomand, S., 2016. Mineralogy, Alterations, Lithochemical Investigations and Fluid Inclusions Studies in Kudkan Cu-Au Mineralization Area, Southern Khorasan, Iran. *Advanced Applied Geology* 6(1), 34-47. <https://doi.org/10.1007/s001260050269>.
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. Steele-MacInnis, M., 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Treatise On Geochemistry* 13, 119-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0>.
- Camp, V.E. Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15(3), 221-239. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(82\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0024-4937(82)90014-7).
- Eshraghi, H., Rastad, E. Motevali, K., 2010. Auriferous sulfides from Hired gold mineralization, south Birjand, Lut block, Iran. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 105(4), 167-174. <https://doi.org/10.2465/jmps.070414b>.
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics* 381(1-4), 235-273. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2002.06.004>.

- Gustafson, L.B. Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology* 70(5), 857-912. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.5.857>.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system, Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology* 93(4), 373-404. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>.
- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A.E. Gammons, C.H., 1999. Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Sungun porphyry copper deposit, Iran. *Mineralium Deposita* 34, 770-78. <https://doi.org/10.1007/s001260050237>.
- Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L. and Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (-Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 65, 460-486. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.013>.
- Jones, B.K., 1992. Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems. *Journal of Geochemical Exploration* 43(2), 127-155. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90003-Q](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90003-Q).
- Karimpour, M.H., Stern, C., Farmer, L. Saadat, S., 2011. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Geopersia* 1(1), 19-54.. <https://dx.doi.org/10.22059/jgeope.2011.22162>.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Farmer, G.L. Stern, C.R., 2012. Petrogenesis of Granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd Petrogenesis of granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristics, and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology* 4(1), 1-27. <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v4i1.13391>.
- Kesler, S.E., 1973. Copper, molybdenum and gold abundances in porphyry copper deposits. *Economic Geology* 68(1), 106-112. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.68.1.106>.
- Kesler, S.E., Chryssoulis, S.L. Simon, G., 2002. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews* 21(1-2), 103-124. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(02)00084-7).
- Kouzmanov, K., Pokrovski, G. S., Hedenquist, J. W., Harris, M., Camus, F., 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems. *Society of Economic Geology Special Publication* 16, 573-618. <https://doi.org/10.1144/SP402.4>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.027>.
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Chang, Z., & 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, 512-521. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.027>.
- Lecumberri Sanchez, P., 2013. Spatial and temporal evolution of fluids in hydrothermal ore deposits. Phd Thesis, Virginia Techology University.
- Moncada, D., Baker, D. Bodnar, R.J., 2017. Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, México. *Ore Geology Reviews* 89, 143-170. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Chu, C.H., Lee, H.Y., Lo, C.H., 2013. Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos* 180, 234-251. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.05.009>.
- Rahim Souri, Y., Yaghoubpour, A., Modabberi, S., 2013. Geology studies and Carlin-type mineralization of Ag Darreh deposit, Takab, West Azerbaijan. *Earth Sciences Quarterly*, special issue 88(3), 42-53.
- Ramezani, J. Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science* 303(7), 622-665. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>.
- Richards, J.P., Wilkinson, D. Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran. *Economic Geology* 101(8), 1455-1496. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455>.

- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology* 107(2), 295-332. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.295>.
- 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., 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado. *Economic Geology* 66(1), 98-118. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.1.98>.
- Rusk, B.G., Reed, M.H., Dilles, J.H., 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. *Economic Geology* 103(2), 307-334. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.2.307>.
- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L., Amini, S., 2010. Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean. *Lithos* 117(1-4), 209-228. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.02.016>.
- Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J., Johnson, D.A., Barton, M.D., 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists. pp. 251-298. <https://doi.org/10.5382/AV100.10>.
- Shafaroudi, A.M., Karimpour, M.H., Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews* 65, 522-544. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.04.015>.
- Sillitoe, R.H., 2000. Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. In: Hagemann, S.G., Brown, P.E., (Eds.), *Gold in 2000*, SEG Reviews, 13. pp. 315-345. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.09>.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology* 105(1), 3-41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>.
- Simon, G., Kesler, S.E., Essene, E.J., Chryssoulis, S.L., 2000. Gold in porphyry copper deposits: Experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400 to 700 C. *Economic Geology* 95(2), 259-270. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.2.259>.
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters* 196(1-2), 17-33. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00588-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X).
- Sun, W., Wang, J.T., Zhang, L.P., Zhang, C.C., Li, H., Ling, M.X., Ding, X., Li, C.Y., Liang, H.Y., 2017. The formation of porphyry copper deposits. *Acta Geochimica* 36, 9-15. <https://doi.org/10.1007/s11631-016-0132-4>.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1), 134-150. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94%3C134:TSSZOE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94%3C134:TSSZOE%3E2.0.CO;2).
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Ramezani, J., Hassanzadeh, J., Renne, P.R., Spell, T.L., 2007. Geology and thermochronology of Tertiary Cordilleran-style metamorphic core complexes in the Saghand region of central Iran. *Geological Society of America Bulletin* 119(7-8), 961-977. <https://doi.org/10.1130/B26102.1>.
- Van den Kerkhof, A.M., Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos* 55(1-4), 27-47. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2).
- Vila, T., Sillitoe, R.H., 1991. Gold-rich porphyry systems in the Maricunga belt, northern Chile. *Economic Geology* 86(6), 1238-1260. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.6.1238>.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Lee, H.Y., 2012. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 154, 392-405. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.007>.