

Research Article

## Geology, stratigraphic position, and elemental distribution of copper-bearing minerals in the Sorkheh Redbed-type sedimentary copper deposit, N.E. of Tasuj

Shaghayegh Sadat Hashempour<sup>1</sup>, Sajjad Maghfouri<sup>1\*</sup>, Ebrahim Rastad<sup>1</sup>, Kaveh Amini Jadehkenary<sup>1</sup>

1- Department of Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

**Keywords:** *Upper Red Formation, Ore-bearing reduced sandstone, Woody fragment, Elemental distribution map, Sorkheh Cu deposit.*

### 1-Introduction

Sediment-hosted stratabound copper (SSC-type) deposits constitute 23% of the world's copper production (Singer, 1995), which are primarily formed in 20-30 degree latitudes (Kirkham, 1989). These deposits are formed along with continental red clastic sequences (Hitzman et al., 2010; Borg et al., 2012; Zientek et al., 2014a, 2014b, 2015a, 2015b; Hayes et al., 2015; Borg, 2017). These deposits are characterized by fine-grained copper-iron-sulfide minerals that occur as stratabound disseminations in siliciclastic or dolomitic sedimentary rocks (Brown, 1997, 2009; Hitzman et al., 2010; Box et al., 2012; Taylor et al., 2013; Borg et al., 2012; Borg, 2017). Sedimentary copper deposits are an essential source of metals that rank first in global cobalt (Co) production and fourth in silver (Ag) production (Bornhorst and Williams, 2013; Bourque et al., 2015; Fern'andez-Mort et al., 2018; Twite et al., 2019). SSC-type deposits are generally hosted in black, gray, green, or white (reduced) sedimentary rocks within or above a thick section of clastic red (oxidized) beds (Brown, 1997, 2009; Hitzman et al., 2010; Taylor et al., 2013; Box et al., 2012).

Iran is between the Alpine and Himalayan mountain ranges (Agard et al., 2011; Alavi, 1994). This orogenic belt contains a large number of SSC-type deposits in Iran. The age of SSC deposits in Iran is from Cambrian to Pliocene (Maghfouri et al., 2020). The stratigraphic sequence of Iran's sedimentary copper deposits, mainly formed within continental red clastic sequences, evaporates, and limestone, is similar to other areas containing stratigraphic copper deposits worldwide (Maghfouri et al., 2020). The Tabas Block and Central Iran Zone are the most promising metallogenic belts of Iran for the exploration of sediment-hosted stratabound copper deposits, which include the Markesheh deposit in the Tabas Block and significant Cu mineralization in the Miocene red clastic sequence in the Bostanabad-Tabriz-Tasuj and Avaj-Dozkand-Moshamp areas in Iran (Maghfouri et al., 2020). The main period of sedimentary copper mineralization in Iran is the Upper Jurassic (Garedu Red Bed Formation) and Miocene (Upper Red Formation) (Azaraïen et al., 2016; Sadati et al., 2016; Rajabpour et al., 2017; Azizi et al., 2018; Maghfouri et al., 2020). The Cenozoic sedimentary sequence in the northwest of Iran hosts numerous SSC-type mineralizations.

This paper describes the geology, stratigraphic position, mineralogy features, and genetic model for the Sorkheh copper deposit. Studies have been completed using mineral elemental mapping and scanning electron microscopy (SEM-EDX) analysis of Cu mineralization in this deposit.

### 2-Material and methods

In this study, based on field operations perpendicular to the layering and due to studies on the Cenozoic sequence in the northwest of Iran, a geological map of the Sorkheh Cu deposit was drawn, and the stratigraphic features, the relationship between mineralization and the host rock in the Sorkheh Cu deposit have been determined. Ten thin and thin-polished sections were studied in the mineralogy laboratory of

\* Corresponding author: s.maghfouri@modares.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2024.44201.2385

Received: 2023-07-12

Accepted: 2024-01-27

Tarbiat Modares University for lithology, mineralogy, structure, and texture studies. 2 thin-polished sections were selected and examined through the SEM in the Applied Research Center of the Geological Survey of Iran. Microscopic examination in reflected light and scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer (SEM-EDS) analysis showed us the amount and chemical variety of elements in copper-bearing minerals and woody fragments in the Sorkheh deposit.

### 3-Results and discussions

The Sorkheh Cu deposit is located in the 1:100000 scale geological map of Tasuj (Khodabandeh and Aminifazl, 1993). The primary sedimentary sequences in the Sorkheh deposit include red and green sandstone, shale, conglomerate, and evaporate layers. The most important host rock of copper mineralization in the Sorkheh deposit is the sandstone unit of the Miocene age, which has an interlayer of evaporite (gypsum and halite) (Khodabandeh and Aminifazl, 1993). In the Sorkheh Cu deposit, repeating sequences of oxide-red and green-gray reduced layers can be seen; according to Tucker (2001), the alternation of red and green-gray sandstone sediments indicates the change of environmental conditions at the deposition time.

The most important feature of the host sandstones is their fine-grained nature and the presence of woody fragments, which are rich in primary copper minerals. This unit, extending several kilometers, is the longest among the sedimentary sequences in the studied area and has been extended with a thickness varying from a few centimeters to 20 meters (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011). In the Sorkheh Cu deposit, a group of dykes of Upper Miocene age ( $9.95 \pm 0.11$ ) with a width of 1 meter and a length of 300 meters can be seen, which cut into the stratigraphy units such as the Upper Red Formation (Karimzadeh Somarin, 2004; Aghazadeh et al., 2015; Sadati et al., 2016). These dykes were injected during the subduction of the Neotethys oceanic crust and the evolution of the Zagros orogeny in northwest Iran, which characterize the final stage of the closure of the Neotethys (Aghanabati, 2004).

In the mineralization host sequence, ore-bearing layers with Cu mineralogy are accompanied by organic-rich parts, especially woody fragments. In the reduced environment, copper sulfides have replaced woody fragments or primary framboidal pyrites. The main mineralogy in the Sorkheh deposit includes chalcocite, digenite, covellite, and pyrite. Various structures and textures can be observed in this deposit; these textures have generally kept their original shape, and we can mention replacement and disseminated texture.

We used the SEM-EDS method to accurately identify and specify the constituent elements of copper-bearing minerals and woody fragments containing mineralization, showing us the chemical variety of minerals. In the Sorkheh deposit, to accurately determine the chemical composition of mineral phases, SEM studies were performed, and according to the results, sulfur and copper are the main constituents of minerals.

### 4-Conclusion

The Sorkheh Cu deposit was formed in the Bostanabad-Tabriz-Tasuj basin and the sedimentary sequences of the Upper Red Formation of the Miocene age (Maghfouri et al., 2020). Reduced sandstone-siltstone unit is the primary host rock of mineralization in the Sorkheh deposit. Due to tectonic activities, ore-bearing sequences have been disturbed. A series of gabbro dykes of upper Miocene age can be seen in this deposit, which penetrated and cut the Upper Red Formation. One of the characteristic features of the studied deposit is the presence of abundant woody fragments in the reduced green-gray sandstone layers, and copper is often formed of chalcocite mineral. The high-grade part of Cu mineralization is in reduced sandstone with replacement texture woody fragments. The elemental maps that show the distribution of the main elements in copper ores and woody components indicate that copper and sulfur are the main constituents of the minerals in the studied deposit. The characteristics of the Sorkheh deposit are similar to red bed-type sedimentary copper deposits.

## 5-References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148 (5–6), 692–725 <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran Publication, Tehran, Iran, P.586 (in Persian).
- Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., 2011. Sediment Hosted Cu Mineralization Periods in Iran, Twenty-ninth Meeting of Geological Sciences. Geological Survey of Iran. Tehran, February 2011.
- Aghazadeh, M., Prelevicı, D., Badrzdaeh, Z., Braschi, E., Van den Bogaard, P., Conticelli, S., 2015. Geochemistry, Sr-Nd-Pb isotopes and geochronology of amphibole-and mica-bearing lamprophyres in northwestern Iran: Implications for mantle wedge heterogeneity in a paleo-subduction zone. *Lithos* 352-396. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.001>
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountain system in Northern Iran. *J. Journal of Geodynamics*. 21, 1–33. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7)
- Azizi, H., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Siahcheshm, K., 2018. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran. *N. Jb. Miner. Abh. (J.Min.Geochem.)*, 123–143.
- Borg, G., 2017, It's all about timing the origin of the European Kupferschiefer ores: World of Mining Surface and Underground, 9th International Copper Conference Copper 2016 from November 13 to 16 in Kobe, Japan.
- Borg, G., Pięstrzyński, A., Bachmann, G., Püttmann, W., Walther, S., Fiedler, M., 2012. An overview of the European Kupferschiefer Deposits. *Economic Geologists, Inc. Special Publication* 16, 455–486. <https://doi.org/10.5382/SP.16.18>
- Bourque, H., Barbanson, L., Sizaret, S., Branquet, Y., Ramboz, C., Ennaciri, A., El Ghorfi, M., Badra, L., 2015. A contribution to the synsedimentary versus epigenetic origin of the Cu mineralizations hosted by terminal Neoproterozoic to Cambrian formations of the Bou Azzer–El Graara inlier: New insights from the Jbel Laassel deposit (Anti Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences* 107, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.04.005>
- Bornhorst, T.J., Williams, W.C., 2013. The Mesoproterozoic Copperwood sedimentary rock-hosted stratiform copper deposit, Upper Peninsula, Michigan. *Econ. Geol.* 108, 1325–1346.
- Box, S.E., Syusyura, B., Hayes, T.S., Taylor, C.D., Zientek, M.L., Hitzman, M.W., Seltmann, R., Chechetkin, V., Dolgoplova, A., Cossette, P.M., Wallis, J.C., 2012. Sandstone copper assessment of the Chu-Sarysu basin, Central Kazakhstan. *Scientific Investigations Report* 2010–5090–E. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5090/e/>
- Brown, A.C. 2014. Low-Temperature Sediment-Hosted Copper Deposits. *Treatise on Geochemistry: Second Edition*. Volume 13, 251-271 p. doi:10.1016/b978-0-08-095975-7.01110-4
- Brown, A.C., 1971. “Zoning in the White Pine copper deposit, Ontonogan County, Michigan”, *Economic Geology* 66, 543-573. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.543>
- Fernández-Mort, A., Riquelme, R., Alonso-Zarza, A.M., Campos, E., Bissig, T., Mpodozis, C., Carretier, S., Herrera, C., Tapia, M., Pizarro, H., Muñoz, S., 2018. A genetic model based on evapoconcentration for sediment-hosted exotic-Cu mineralization in arid environments: the case of the El Tesoro Central copper deposit, Atacama Desert, Chile. *Mineralium Deposita* 53, 775–795. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0780-2>
- Hayes, T.S., Cox, D.P., Piatak, N.M., Seal, R., 2010, Sediment-hosted stratabound copper deposit model: Chapter m of mineral deposit models for resource assessment.

- Hitzman, M.W., Selley, D., Bull, S., 2010. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through earth history. *Economic Geology* 105(3), 627–639. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.627>
- Karimzadeh Somarin, A., 2004. Marano volcanic rocks and associated Fe mineralisation, East Azarbaijan province. *Iran. Journal of Asian Earth Sciences* 24, 11–23. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00152-4)
- Khodabandeh, A.A., Aminifazl, A., 1993. Geological Map of Tasuj, scale 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Kirkham, R.V., 1989. Distributions, settings, and genesis of sediment-hosted stratiform copper deposits. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Eds.), *Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits: Geological Association of Canada, Special Paper 36*, PP. 3–38.
- Maghfouri, S., Rastad, E., Borg, G., Hosseinzadeh, M.R., Movahednia, M., Mahdavi, A., Mousivand, F., 2020. Metallogeny and temporal–spatial distribution of sediment-hosted stratabound copper (SSC-type) deposits in Iran; implications for future exploration, *Ore Geology Reviews* 127, p103-834. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103834>
- Rajabpour, S., Abedini, A., Alipour, S., Lehmann, B., Jiang, Sh., 2017. Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan redbed-type copper deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 86, 154–171. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.013>
- Sadati, S.N., Yazdi, M., Mao, J., Behzadi, M., Adabi, M.H., Lingang, X., Zhenyu, C., Mokhtari, M.A.A., 2016. Sulfide mineral chemistry investigation of sediment-hosted stratiform copper deposits, Nahand-Ivand area, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 72, 760–776. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.018>
- Singer, D.A., 1995. World-class base and precious metal deposits—a quantitative analysis. *Economic Geology* 90(1), 88–104. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.1.88>
- Taylor, C.D., Douglas Causey, J., Denning, P.D., Hammarstrom, J.M., Hayes, T.S., Horton, J.D., Kirschbaum, M.J., Parks, H.L., Wilson, A.B., Wintzer, N.E., Zientek, L. M., 2013. Descriptive models, grade-tonnage relations, and databases for the assessment of sediment-hosted copper deposits—with emphasis on deposits in the Central African Copperbelt, Democratic Republic of the Congo and Zambia. Scientific Investigations Report 2010–5090–J. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090J>
- Tucker, M.E., 2001. *Sedimentary petrology, an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Second edition. P. 448.
- Twite, F., Broughton, D., Nex, P., Kinnaird, J., Gilchrist, G., Edwards, D., 2019. Lithostratigraphic and structural controls on sulphide mineralisation at the Kamoia copper deposit, Democratic Republic of Congo. *J. Afr. Earth Sc.* 151, 212–224.
- Zientek, M.L., Bliss, J.D., Broughton, D.W., Christie, M., Denning, P.D., Hayes, T.S., Hitzman, M.W., Horton, J.D., Frost-Killian, S., Jack, D.J., Master, S., Parks, H.L., Taylor, C.D., Wilson, A.B., Wintzer, N.E., Woodhead, J., 2014b. Sediment-hosted stratabound copper assessment of the neoproterozoic Roan Group, Central African Copperbelt, Katanga basin, Democratic Republic of the Congo and Zambia. Scientific Investigations Report 2010–5090–T. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Zientek, M.L., Chechetkin, V.S., Parks, H.L., Box, S.E., Briggs, D.A., Cossette, P.M., Dolgoplova, A., Hayes, T.S., Seltmann, R., Syusyura, B., Taylor, C.D., Wint, N.E., 2014a. Assessment of undiscovered sandstone copper deposits of the Kodar-Udokan area, Russia. Scientific Investigations Report 2010–5090–M. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Zientek, M.L., Oszczepalski, S., Parks, H.L., Bliss, J.D., Borg, G., Box, S.F., Denning, P.D., Hayes, T.S., Spieth, V., Taylor, C.D., 2015b. Assessment of undiscovered copper resources associated with the Permian Kupferschiefer, Southern Permian Basin, Europe. Scientific Investigations Report 2010–5090–U. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Zientek, M.L., Wintzer, N.E., Hayes, T.S., Parks, H.L., Briggs, D.A., Causey, J.D., Hatch, S. A., Christopher Jenkins, M., Williams, D.J., 2015a. Qualitative assessment of selected areas of the world

- for undiscovered sediment-hosted stratabound copper deposits. Scientific Investigations Report 2010–5090–Y. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Twite, F., Broughton, D., Nex, P., Kinnaird, J., Gilchrist, G., Edwards, D., 2019. Lithostratigraphic and structural controls on sulphide mineralisation at the Kamoia copper deposit, Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences* 151, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.12.016>
- Zientek, M.L., Chechetkin, V.S., Parks, H.L., Box, S.E., Briggs, D.A., Cossette, P.M., et al., 2014a. Assessment of undiscovered sandstone copper deposits of the Kodar-Udokan area, Russia. Scientific Investigations Report 2010–5090–M. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090M>
- Zientek, M.L., Bliss, J.D., Broughton, D.W., Christie, M., Denning, P.D., Hayes, T.S., et al., 2014b. Sediment-hosted stratabound copper assessment of the neoproterozoic Roan Group, Central African Copperbelt, Katanga basin, Democratic Republic of the Congo and Zambia. Scientific Investigations Report 2010–5090–T. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090T>
- Zientek, M.L., Oszczepalski, S., Parks, H.L., Bliss, J.D., Borg, G., Box, S.F., et al., 2015b. Assessment of undiscovered copper resources associated with the Permian Kupferschiefer, Southern Permian Basin, Europe. Scientific Investigations Report 2010–5090–U. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090U>
- Zientek, M.L., Wintzer, N.E., Hayes, T.S., Parks, H.L., Briggs, D.A., Causey, J.D., et al., 2015a. Qualitative assessment of selected areas of the world for undiscovered sediment-hosted stratabound copper deposits. Scientific Investigations Report 2010–5090–Y. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090Y>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Hashempour, S., Maghfouri, S., Rastad, E., Amini Jadehkenary, K., 2024. Geology, stratigraphic position, and elemental distribution of copper-bearing minerals in the Sorkheh Redbed-type sedimentary copper deposit, NE of Tasuj. *Adv. Appl. Geol.* 14(1), 121-145.

DOI: 10.22055/AAG.2024.44201.2385

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_18869.html](https://aag.scu.ac.ir/article_18869.html)

©2024 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

## کانه‌زایی، جایگاه چینه‌ای و توزیع عنصری کانی‌های مس‌دار در کانسار مس رسوبی تیپ توالی قرمز رنگ سرخه، شمال شرق تسوج

شقایق سادات هاشم پور

گروه زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
سجاد مغفوری\*

گروه زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
ابراهیم راستاد

گروه زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
کاوه امینی جاده کناری

گروه زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
\* s.maghfouri@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

### چکیده

کانسار مس سرخه در توالی آواری سازند قرمز بالایی به سن میوسن و در حوضه رسوبی بستان آباد- تبریز- تسوج تشکیل شده است. در کانسار سرخه توالی‌های تکرار شونده از لایه‌های قرمز رنگ اکسیدی و سبز- خاکستری رنگ احیایی دیده می‌شود که افق‌های کانهدار در ماسه‌سنگهایی که غنی از فسیل‌های گیاهی می‌باشند، تشکیل گردیده است. در توالی میزبان کانه‌زایی، بخش‌های غنی از ماده معدنی با کانی‌شناسی مس، با بخش‌های غنی از قطعات چوبی برجای مانده همراه است که کاندهای سولفیدی مس جانشین فسیل‌های گیاهی و یا جانشین پیریت‌های فرامبوئیدال اولیه شده است. در کانسار مورد مطالعه، دایکهای گابرویی به سن میوسن بالایی درون رسوبات سازند قرمز بالایی تزریق شده و آنها را قطع کرده‌اند و هیچ نوع آثار کانه‌زایی در این دایکها مشاهده نگردیده است که همین عامل نشان دهنده تاخیری بودن آنها نسبت به توالی میزبان کانه‌زایی است. ماده معدنی با ساخت و بافت‌های مختلفی مانند جانشینی و دانه پراکنده قابل مشاهده است. کاندهای اصلی ماده معدنی، سولفیدهای مس و آهن است که به طور عمده کالکوسیت، دیژنیت، کوولیت و پیریت می‌باشد. برای تعیین ترکیب شیمیایی و توزیع عنصری فازهای کانیایی مطالعات SEM انجام گرفت که با استفاده از نقشه توزیع و پراکندگی عنصری، سولفیدی بودن کاندهای مس تایید شد چرا که عناصر مس و گوگرد دارای همبستگی مثبت می‌باشند. همبستگی عناصری مانند اکسیژن و آلومینیوم می‌تواند دلالت بر حضور کانی‌های رسی در بخش‌هایی از فسیل گیاهی باشد. وجود اکسیژن هم احتمالاً مربوط به فرآیندهای بعدی همانند هوازدگی و اکسیداسیون است.

**واژه های کلیدی:** سازند قرمز بالایی، ماسه سنگ احیایی کانهدار، بقایای گیاهی، نقشه توزیع عنصری، کانسار مس سرخه

### ۱- مقدمه

قاره‌ای پوشیده شده توسط توالی‌های تبخیری، شکل می‌گیرند که نشان دهنده شرایط آب و هوای خشک در زمان تشکیل آنها می‌باشد (Hitzman et al., 2010; Borg et al., 2012; Zientek et al., 2014a, 2014b, 2015a, 2015b; Hayes et al., 2015; Borg, 2017). انواع کلاس جهانی این تیپ کانسارها در ناحیه کوپرشیف در شمال مرکزی اروپا (Borg et al., 2012) و کمربند مس آفریقای مرکزی (Brown, 1997; Sillitoe et al., 2017) شناسایی شده است. ویژگی شاخص کانسارهای مس رسوبی، وجود کاندهای سولفیدی ریزدانه مس

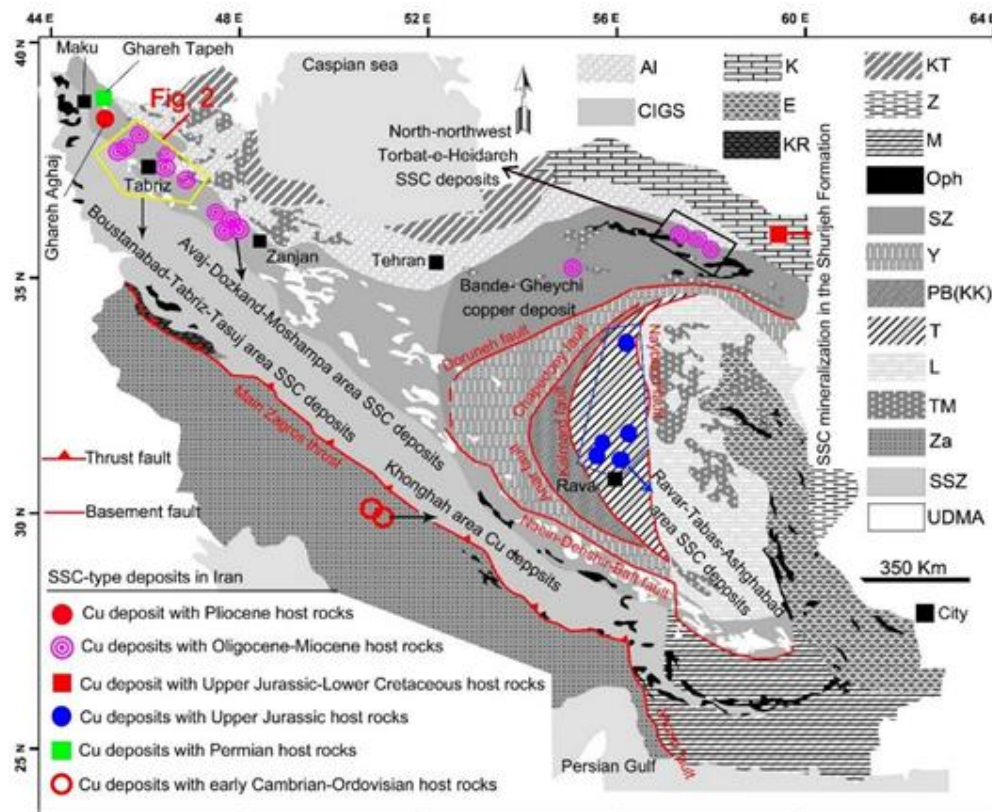
کانسارهای مس رسوبی چینه‌کران (SSC: sediment hosted stratabound copper deposits)، بعد از کانسارهای مس تیپ پورفیری از مهم‌ترین ذخایر مس در دنیا بوده و بیش از ۲۰ درصد تولید جهانی مس را تامین می‌کنند (Hayes et al., 2010) که اغلب در عرض‌های جغرافیایی ۲۰ الی ۳۰ درجه تشکیل شده‌اند (Kirkham, 1989) و معمولاً در حوضه‌های دریایی و یا دریاچه‌ای بزرگ همراه با طبقات آواری قرمز رنگ

Fernández-Mort et al., 2018; Twite et al., 2018; Maghfouri et al., 2020).

بلوک طبس و زون ایران مرکزی اصلی ترین ایالت های فلز زایی ایران برای اکتشاف کانسارهای مس رسوبی هستند که شامل کانسار مارکشه در بلوک طبس و کانه زایی قابل توجه مس در توالی آواری قرمز رنگ میوسن (سازند قرمز بالایی) در ناحیه بستان آباد- تبریز- تسوج و آوج- دوزکند- مشمپا در ایران مرکزی می باشند (Maghfouri et al., 2020). دوره اصلی کانه زایی مس رسوبی در ایران ژوراسیک فوقانی (سازند قرمز رنگ گره دو) و میوسن (سازند قرمز بالایی) است (Azaraien et al., 2016; Sadati et al., 2016; Rajabpour et al., 2017; Azizi et al., 2018; Maghfouri et al., 2020; Amini Jadehkenary et al., 2023a,b) که توالی رسوبی سنوزوئیک در شمال غرب ایران میزبان کانه زایی های متعدد مس می باشد (شکل ۱). این توالی میزبان را می توان از جهت موقعیت چینه ای به دو بخش میوسن و پلیوسن تقسیم نمود (Maghfouri et al., 2015). بخش میوسن به طور عمده از لایه های قرمز ماسه سنگ، مارن، شیل، کنگلومرا، آهک و سیلتستون تشکیل شده است که شامل کانسارهای الوندی، نهند، ایوند، مرناو، چشمه کنان، کوزه کنان، چهرگان، توپچی، زنجیره و سرخه می باشد. بخش پلیوسن هم عمدتاً حاوی کنگلومرا است که میزبان کانسار مس قره آجاج ماکو است (شکل ۱ و شکل a2) (Rajabpour et al., 2017). با توجه به گسترش کانه زایی مس در توالی رسوبی قرمز بالایی منطقه شمال تسوج، مطالعه کانسار مس سرخه می تواند به عنوان الگو در اکتشاف ذخایر مشابه مس رسوبی در این منطقه و سایر مناطق با زمین شناسی مشابه در ایران مورد استفاده قرار گیرد. این مقاله ضمن مطالعه کانه زایی و جایگاه چینه ای کانسار مس سرخه، به نقش فسیل های گیاهی، ساخت و بافت، کانی شناسی و بررسی ترکیب شیمیایی کانی های مس پرداخته است. همچنین به کمک آنالیز عنصری، توزیع و همبستگی عناصر، ترکیب عنصری و شیمیایی بقایای گیاهی که توسط کانی های مس دار جانشین شده اند، مورد بررسی قرار گرفته است.

و آهن است که به صورت دانه پراکنده در سنگهای رسوبی میزبان دیده می شوند (Brown, 1997, 2009; Hitzman et al., 2010; Box et al., 2012; Taylor et al., 2013; Borg et al., 2012; Borg, 2017). کانسارهای مس رسوبی منبع مهمی از سایر فلزات هستند که در بین انواع ذخایر، از مهم ترین منابع تامین کننده نقره و کبالت به شمار می روند (Hitzman et al., 2005; Bourque et al., 2015). همچنین این تیپ ذخایر دارای سرب، روی و اورانیوم و برخی از آنها به مقدار ناچیز دارای طلا و عناصر گروه پلاتین (PGE) می باشند (Hitzman et al., 2005).

ایران میزبان کانسارها و اندیسهای متعدد مس رسوبی چینه کران (SSC) است (Maghfouri et al., 2020). پهنه های ساختاری اصلی ایران که میزبان نهشته های SSC هستند عبارتند از: (۱) زون زاگرس، (۲) بلوک طبس، (۳) زون ایران مرکزی، (۴) زون سبزوآر و (۵) زون کپه داغ (Maghfouri et al., 2020) (شکل ۱). کانسارهای مس رسوبی ایران در دوره های زمانی مختلفی در ایران تشکیل شده اند که قدیمی ترین آنها به سن کامبرین زیرین- اردویسین (کانسارهای ده معدن و خونگه در زون زاگرس) (Ghasemi, 2008; Aghazade and Badrzadeh, 2011; Zarasvandi et al., 2020) بوده و سپس به ترتیب در بازه های زمانی پرمین (کانسار قره تپه در ناحیه ماکو)، ژوراسیک بالایی (کانه زایی مس در سازند قرمز رنگ گره دو ناحیه راور- طبس- عشق آباد و سازند شوربچه (زون کپه داغ)، الیگوسن تا میوسن (کانسار بندقیچی، کانسارهای ناحیه بستان آباد- تبریز- تسوج، منطقه آوج- دوزکند- مشمپا و کانسارهای ناحیه تربت حیدریه) و در نهایت پلیوسن (کانسار قره آجاج در منطقه ماکو) گزارش شده اند (Maghfouri et al., 2020) (شکل ۱). حوضه های کشتی (ریفت درون قاره و کشتی های پس از برخورد) جایگاه زمین شناسی اصلی برای کانسارهای مس رسوبی در ایران هستند (Maghfouri et al., 2020). توالی چینه شناسی ذخایر مس رسوبی ایران که اکثراً در داخل توالی های آواری قرمز رنگ قاره ای، تخییری ها و سنگ آهک تشکیل شده اند، شبیه به سایر مناطق حاوی کانسارهای مس رسوبی چینه کران در سراسر



شکل ۱- نقشه پراکندگی کانسارهای مس رسوبی بر اساس سن سنگ میزبان در پهنه‌های ساختاری ایران (Aghanabati, 1998, 2004; Alavi, 1996; Maghfouri et al., 2020).

Fig. 1. Distribution map of the SSC-type deposits according to the age of host rocks in the main tectonic domains of Iran (Aghanabati, 1998, 2004; Alavi, 1996; Maghfouri et al., 2020).

CIGS, Central Iranian gradual zone; E, East Iran ranges; K, Kopeh-Dagh zone; KR, Kermanshah radiolarites subzone; KT, Khazar-Talesh-Ziveh structural zone; L, Lut Block; M, Makran zone; O, Ophiolite Belts; PB, Posht-e-Badam Block; SSZ, Sanandaj-Sirjan zone; T, Tabas Block; TM, Tertiary magmatic rocks; UD, Urumieh-Dokhtar magmatic arc; Y, Yazd Block; Z, Zabol area; Za, Zagros zone.

## ۲- روش پژوهش

در این پژوهش بر اساس عملیات صحرایی و پیمایشهایی که در جهت عمود بر روند لایه‌بندی صورت گرفته است، ویژگی‌های چینه‌شناسی، ارتباط بین کانه‌زایی با سنگ میزبان و گسترش افق‌های مختلف کانه‌زایی در کانسار مس سرخه مشخص شده است. جهت مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانی‌ها تعداد ۱۰ مقطع نازک و نازک-صیقلی در آزمایشگاه کانی‌شناسی بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه میکروسکوپی در نور منعکس شده و میکروسکوپ - طیف‌سنج الکترون روبشی (SEM-EDS)، با استفاده از ۲ عدد مقطع نازک-صیقلی در

مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مورد بررسی قرار گرفت و طیف ترکیبی عناصر در کانی‌های مس‌دار مشخص گردید.

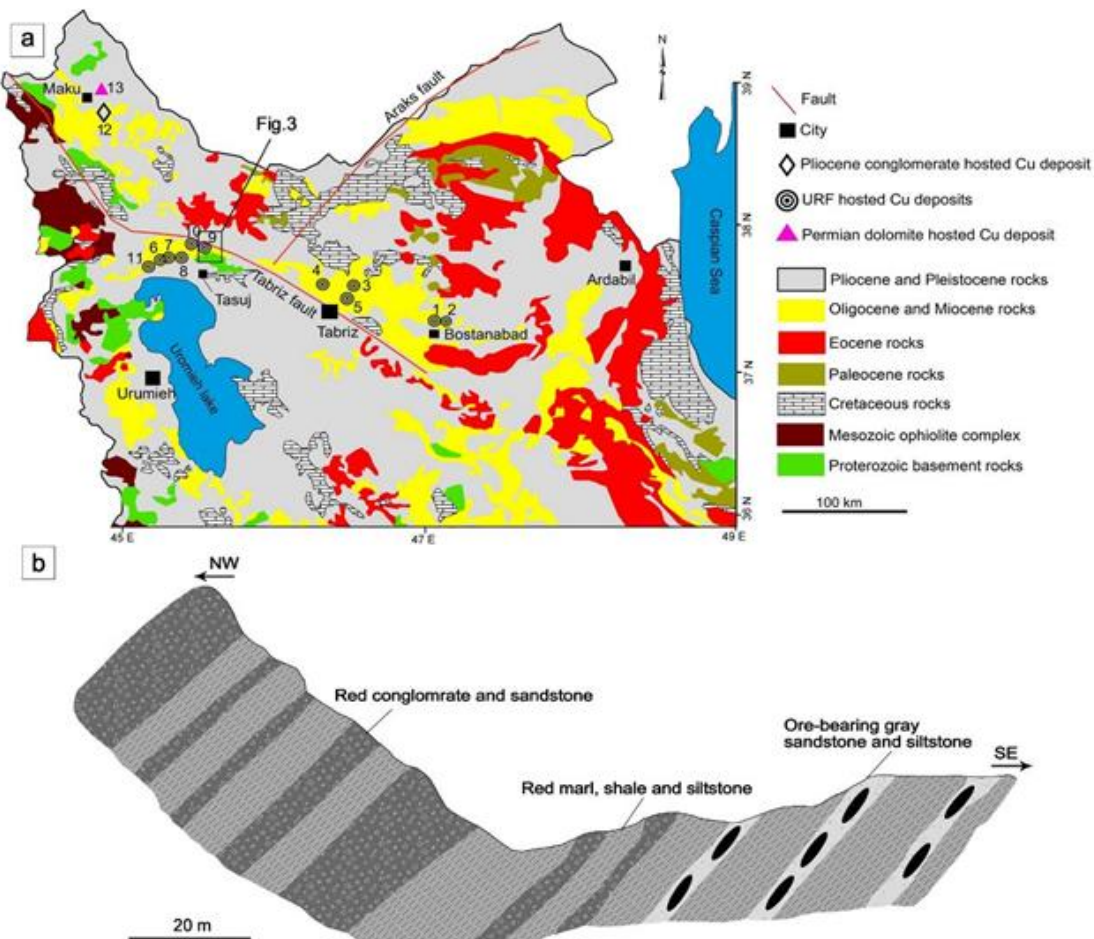
## ۳- زمین‌شناسی

قسمت عمده توالی رسوبی سنوزوئیک شمال‌غرب ایران را واحدهای تخریبی-کربناتی به سن الیگومیوسن تشکیل می‌دهند (شکل ۲). سازندهای قرمز پایینی، قم و سازند قرمز بالایی از مهم‌ترین سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه هستند (شکل ۲a و شکل ۳) که به دلیل تنوع رنگی به راحتی از سایر واحدها تفکیک می‌شوند. حوضه رسوبی سنوزوئیک بستان‌آباد-تبریز-تسوج با گسترش طولی بیش از ۳۵۰ کیلومتر از شهر بستان‌آباد تا روستای ولدیان خوی کشیده



شده است (Khan chuban et al., 2020) که میزبان کانه‌زایی‌های کلو، چهرگان، چشمه‌کنان، آناخاتون، ولدیان، زنجیره و سرخه می‌باشد (شکل a۲) (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011). از ویژگی‌های شاخص این ذخایر وجود فسیل‌های گیاهی و همراهی آنها با کانه‌زایی، تغییرات رخساره جانبی و تکرار واحدها است.

شده است (Khan chuban et al., 2020) که میزبان کانه‌زایی‌های کلو، چهرگان، چشمه‌کنان، آناخاتون، ولدیان، زنجیره و سرخه می‌باشد (شکل a۲) (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011). از ویژگی‌های شاخص این ذخایر وجود فسیل‌های گیاهی و همراهی آنها با کانه‌زایی، تغییرات رخساره جانبی و تکرار واحدها است.



شکل ۲- (a) نقشه زمین‌شناسی ساده شده از شمال غرب ایران که محل کانسارهای مس رسوبی بر روی آن مشخص شده است (با تغییرات از Moritz et al., 2015; Maghfouri et al., 2020). شماره ۹، موقعیت کانسار مس سرخه را نشان می‌دهد که در توالی رسوبی الیگومیوسن تشکیل شده است (۱- کلو، ۲- الوندی، ۳- تازه‌کند، ۴- ایوند، نهند و مرانو، ۵- آناخاتون، ۶- چشمه‌کنان، ۷- چهرگان، ۸- توپچی، ۹- سرخه، ۱۰- زنجیره و ولدیان، ۱۱- کوزه‌کنان، ۱۲- قره‌آغاج، ۱۳- قره‌تپه) و (b) مقطع زمین‌شناسی از توالی‌های رسوبی الیگومیوسن منطقه شمال شهر تسوج، که کانه‌زایی مس در واحدهای ماسه-سنگی-سیلتستونی غنی از مواد آلی رخ داده است (Maghfouri et al., 2015).

Fig. 2. (a) Simplified geological map of NW Iran, showing the location of sediment-hosted copper deposits (Modified after Moritz et al., 2015; Maghfouri et al., 2020). The number 9 shows the location of the Sorkkeh Cu deposit, it was formed in the Oligo-Miocene sequence (1: Kalu; 2: Alvandi; 3: Tazeh Kand; 4: Ivand, Nahand and Marano; 5: Ana Khaton; 6: Cheshmeh-Konan; 7: Chehregan; 8: Topchi; 9: Sorkkeh; 10: Zanjereh and Valadian; 11: Kozeh-Konan; 12: Ghareh Aghaj; and 13: Ghareh Tapeh), and (b) Geological cross section of Oligo-Miocene sedimentary sequences in the north region of the Tasuj city, where Cu mineralization occurred in organic matter- rich sandstone-siltstone units (Maghfouri et al., 2015).

سازند در طی فرونشست حوضه، همزمان و یا پس از کوهزایی و در شرایط مولاسی تشکیل شده است (Aghanabati, 2004). با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مورد سنگ‌شناسی

چینه‌شناسی سازند قرمز بالایی در این ناحیه متشکل از کنگلومرا، ماسه‌سنگ، سیلتستون و مارن ژئوپس‌دار، توالی‌های تبخیری و میان‌لایه‌های آهکی است (شکل b۲ و شکل ۴). این

با دیگر کانسارهای مس رسوبی موجود در شمال غرب ایران، وجود دایک‌های نفوذ کرده به داخل توالی رسوبی میزبان کانه‌زایی می‌باشد که از نوع دایک‌های گابرویی با پهنای عرضی ۱ متر و طول ۳۰۰ متر به سن میوسن بالایی ( $9/95 \pm 0/11$ ) هستند که درون واحدهای جوانتر مانند سازند قرمز بالایی تزریق شده و آنها را قطع کرده‌اند اما نکته مهم و قابل توجه، عدم وجود کانه‌زایی در داخل دایکها است که دال بر تاخیری بودن آنها نسبت به توالی میزبان و کانه‌زایی همراه با آن می‌باشد (شکل ۴، شکل d۵) (Karimzadeh Somarin, 2004; Aghazadeh et al., 2015; Sadati et al., 2016).

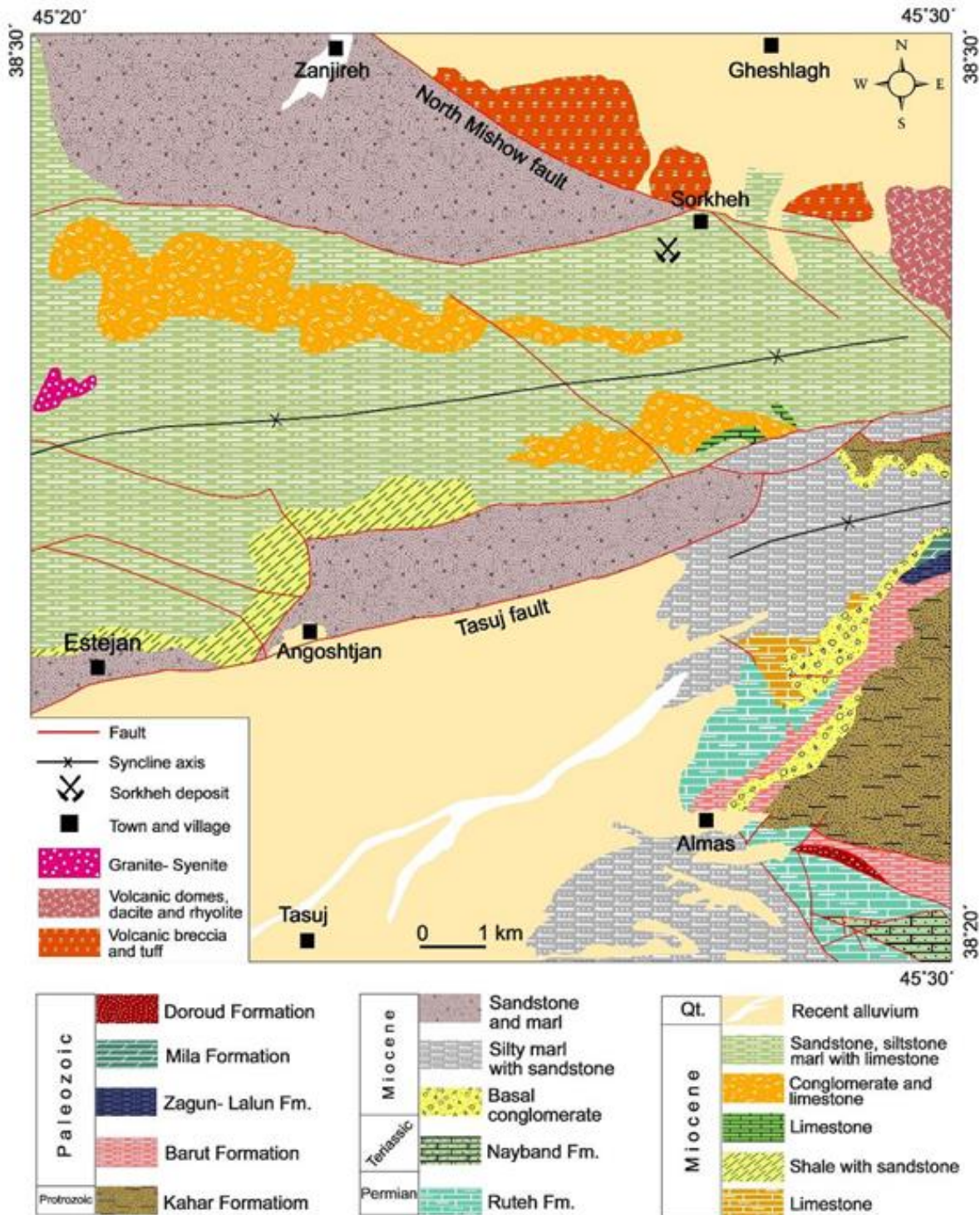
#### ۴- کانه‌زایی

کانسار مس سرخه همانند سایر کانسارهای شمال ناحیه تسوج در داخل توالی تخریبی میوسن تشکیل شده است و حاوی ۵ افق کانه‌دار با میزبان ماسه سنگی می‌باشد (شکل ۴). افق‌های کانه‌دار در ماسه‌سنگ‌هایی که از نظر شیمیایی در شرایط احیایی تشکیل شده‌اند، متمرکز شده است (شکل a۵, b). شکل a۷ (Sadati et al., 2016; Rajabpour et al., 2017). این افق‌ها، دارای گسترش طولی زیاد و گاه در حد چند کیلومتر رخنمون داشته و ضخامت آنها از چند سانتی‌متر تا حدود ۲ متر در تغییر است (شکل a۵, b). به دلیل رخدادهای کوهزایی بعدی، کانه‌زایی در کانسار سرخه به شدت تحت تاثیر فعالیت‌های تکتونیکی قرار گرفته است و به همین علت، افق‌های کانه‌دار فاقد پیوستگی جانبی می‌باشند (شکل a۵). در توالی میزبان کانه‌زایی، بخش‌های غنی از ماده معدنی با کانی‌شناسی مس، همراه با بخش‌های غنی از ماده آلی به خصوص فسیل‌های گیاهی همراهی می‌شود و این فسیل‌های گیاهی در بین لایه‌های ماسه سنگی و سیلتستونی به وفور مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۶، ۷ و ۸). شرایط احیایی، محیط مناسبی را برای تشکیل و جانشینی کانه‌های سولفیدی مس ایجاد می‌کند. وجود چنین محیطی باعث جانشینی سولفیدهای مس به جای فسیل‌های گیاهی (شکل ۸) و یا جانشینی در پیریت‌های فرامبوئیدال اولیه (شکل b۹) شده است. مطالعات نشان می‌دهد که قطعات چوبی به عنوان یک عامل احیا کننده شیمیایی برای به دام انداختن سولفیدها عمل کرده است.

سازند قرمز بالایی، می‌توان محیط تشکیل قاره‌ای (تخریبی)- کولابی تا دریایی را در زمان شکل‌گیری آن متصور شد (Rahimzadeh, 1994) که این نظریه به دلیل حضور شواهدی همچون ساخت‌های ریپل مارک، آثار فسیل جانوری و همچنین میان لایه‌های آهکی تایید می‌شود. از طرفی، مشاهده آثار گیاهی فسیل شده همچون تنه درختان، ترک‌های گلی، اثر قطره‌های باران و حضور رسوبات تخریبی قرمز رنگ مشخص می‌کند که برخی از بخشها هم در محیط خشکی تشکیل شده است.

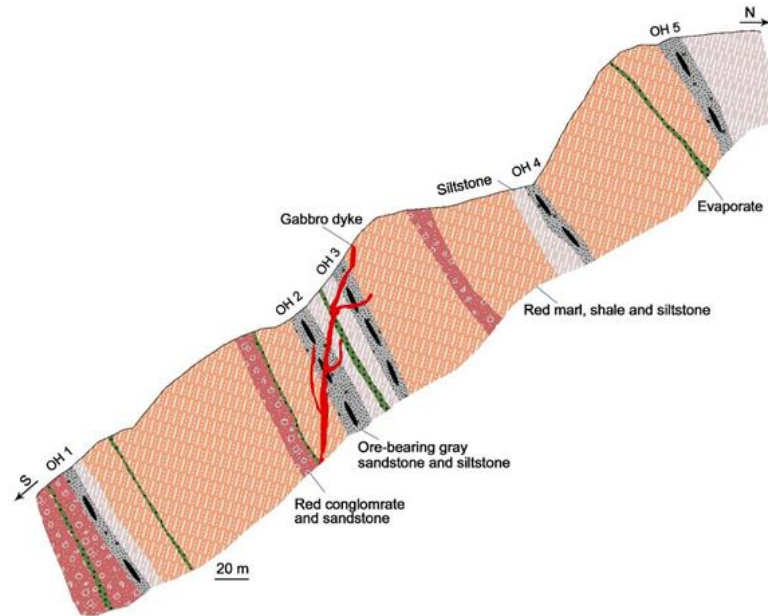
کانسار مس سرخه در برگه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تبریز- پلدشت (Eftekharnajad, 1991) و ۱:۱۰۰۰۰۰ تسوج (Khodabandeh and Aminifazl, 1993) قرار گرفته است که فاصله آن از شهر تبریز ۶۰ کیلومتر و از مرند ۲۵ کیلومتر می‌باشد. اصلی‌ترین واحدهای رسوبی در کانسار مس سرخه شامل ماسه‌سنگ‌های قرمز و سبز رنگ، شیل، مارن گچ- نمک‌دار و کنگلومرا است (شکل ۴، شکل a۵, b). مهم‌ترین میزبان کانه‌زایی مس در کانسار سرخه واحد ماسه سنگ- سیلتستون به سن میوسن است که دارای میان لایه‌های نازکی از تبخیری (ژیپس و هالیت) است (شکل ۴، شکل a۶) (Khodabandeh and Aminifazl, 1993). در کانسار مس سرخه توالی‌های تکرار شونده از لایه‌های قرمز رنگ اکسیدی و سبز- خاکستری رنگ احیایی دیده می‌شود (شکل a۵) که بنا به نظر Toker (۲۰۰۱) تناوب رسوبات ماسه سنگی قرمز و سبز- خاکستری نشان‌دهنده تغییر شرایط محیط در زمان رسوبگذاری می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی ماسه‌سنگ‌های میزبان، ریز دانه بودن و حضور بقایای فسیل گیاهی است که غنی از کانی‌های اولیه مس هستند (شکل ۶ و ۷). این واحد با گسترش چند کیلومتری، طولی‌ترین واحد در بین توالی‌های رسوبی موجود در محدوده مورد مطالعه بوده و با ضخامتی متغیر از چند سانتی‌متر تا ۲۰ متر گسترش یافته است (شکل a۵) (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011).

با توجه به اینکه بخش غربی رشته کوه میشو در شمال توسط گسل‌های شمالی میشو و در جنوب توسط گسل تسوج محدود شده است، تکتونیک شدید سبب به هم ریختگی توالی‌های کانه‌دار به ویژه در بخش شمالی ارتفاعات میشو شده است (شکل a۵) (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011). یکی از ویژگی‌های شاخص و متمایز کننده کانسار مس سرخه



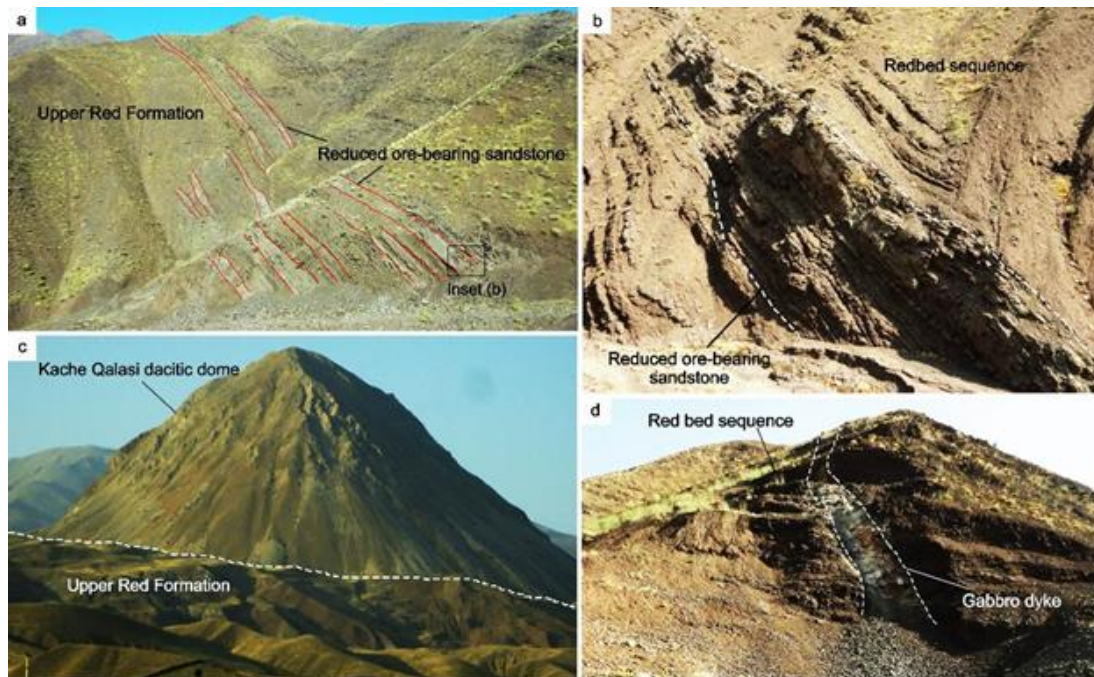
شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی کانسار مس سرخه، کانه‌زایی در واحد ماسه‌سنگ- سیلتستون سازند قرمز بالایی تشکیل شده است (با تغییرات از Khodabandeh and Aminifazl, 1993).

Fig. 3. Geological map of the Sorkheh copper deposit, mineralization is formed in the sandstone-siltstone unit of the Upper Red Formation (modified after Khodabandeh and Aminifazl, 1993).



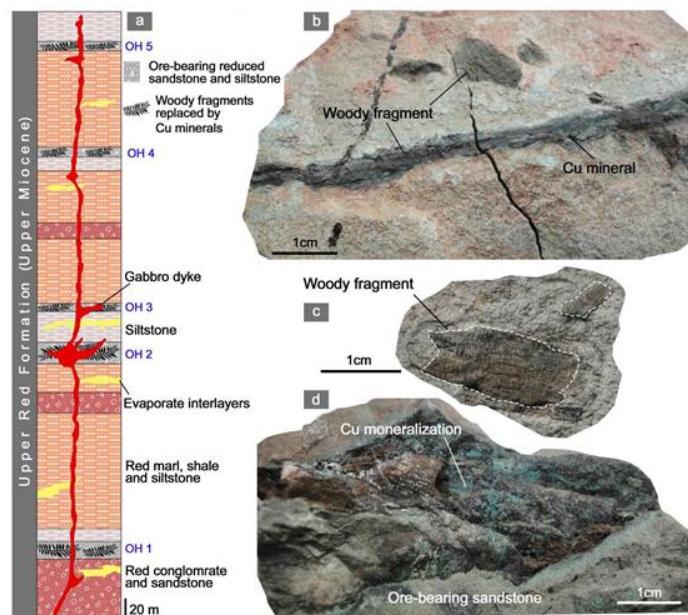
شکل ۴- مقطع زمین‌شناسی از توالی‌های قرمز و سبز ماسه سنگی به سن میوسن، که میزبان کانه‌زایی مس در کانسار سرخه می‌باشند.

Fig. 4. Geological cross-section of Miocene red and green sandstone sequences, which host copper mineralization in the Sorkheh deposit.



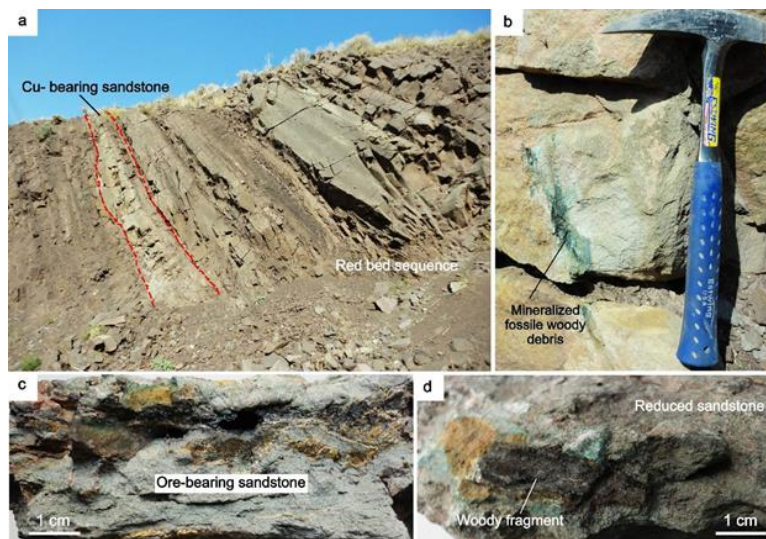
شکل ۵- (a) دورنمایی از سازند قرمز بالایی که بخش‌های سبز- خاکستری رنگ احیایی، میزبان کانه‌زایی مس در کانسار سرخه می‌باشند (دید به سمت شمال غرب)، (b) نمایی نزدیک از ماسه سنگ احیایی میزبان کانه‌زایی مس در سازند قرمز بالایی، (c) گنبد نیمه عمیق داسیتی که داخل توالی‌های رسوبی میوسن فوقانی نفوذ کرده است (دید به سمت جنوب) و (d) دایک گابرویی که به صورت قطع‌کننده داخل واحدهای قرمز رنگ میزبان کانه‌زایی کانسار سرخه نفوذ کرده است (دید به سمت شمال غرب).

Fig. 5. (a) General view of the Upper Red Formation, where the green-gray units host of Cu mineralization in the Sorkheh deposit (view to the NW), (b) General view of the reduced ore-bearing sandstone in the Upper Red Formation, (c) Sub-volcanic dacitic dome intruded the upper Miocene sedimentary sequence (view to the south), and (d) Gabbro dyke intruded the red bed sequence of the Sorkheh deposit (view to the northwest).



شکل ۶- (a) ستون چینه‌شناسی کانسار مس سرخه که در آن افق‌های کانه‌زایی با سنگ میزبان ماسه‌سنگ-سیلتستون احیایی مشخص شده است، (b) نمونه دستی از ماسه‌سنگ میزبان که دارای بقایای گیاهی حاوی کانه‌زایی مس می‌باشد و (c,d) نمونه‌های دستی از قطعات چوبی برجای مانده در ماسه‌سنگ‌های احیایی که بافت اولیه آنها به خوبی حفظ شده و کانی‌های مس جانشین آنها شده است.

Fig. 6. (a) Stratigraphic column of Sorkheh Cu deposit, where the mineralization horizons are marked with reduced sandstone-siltstone host rock, (b) Hand specimen of the host sandstone with woody fragment containing Cu mineralization, and (c, d) Hand specimens of woody fragments in reduced sandstones, whose original texture is well preserved and replaced by Cu minerals.



شکل ۷- (a) رخنمونی از ماسه‌سنگ-سیلتستون احیایی حاوی کانه‌زایی مس در کانسار سرخه (دید به سمت شمال غرب)، (b) نمایی نزدیک از ماسه‌سنگ احیایی میزبان که قطعات چوبی حاوی کانه‌زایی مس را نشان می‌دهد، (c) نمونه دستی از ماسه‌سنگ احیایی میزبان که در آن کانه‌زایی مس همراه با بقایای گیاهی دیده می‌شود و (d) نمونه دستی از بافت اولیه به خوبی حفظ شده قطعه چوبی باقی مانده در ماسه‌سنگ احیایی که کانی‌های مس جانشین آن شده است.

Fig. 7. (a) General view of reduced ore-bearing sandstone-siltstone in the Sorkheh deposit (view of the northwest), (b) Close-up view of the host reduced sandstone showing woody fragments containing copper mineralization, (c) Hand specimen of the host reduced sandstone showing copper mineralization along with woody fragment containing Cu mineralization, and (d) Hand specimen well-preserved original texture of woody fragment remainder in reduced sandstone replaced by Cu minerals.

اولیه خود را حفظ کرده و شرایط محیط کانه‌زایی را منعکس می‌کنند، از جمله این بافت‌ها می‌توان به بافت جانیشینی و بافت دانه‌پراکنده اشاره کرد. در زیر به صورت اختصار به شرح هر یک از این بافت‌ها می‌پردازیم.

#### ۵-۱- بافت جانیشینی

بافت و ساخت اصلی در کانسار مس سرخه بافت جانیشینی است. با توجه به اینکه کانه‌زایی مس در کانسار سرخه محدود به واحدهای تخریبی خاکستری- سبز رنگ غنی از مواد آلی و فسیل‌های گیاهی است به دلیل شرایط احیایی، محیط مناسبی برای تشکیل و جانیشینی کانی‌های سولفیدی فراهم شده است (Subias et al., 2003). در چنین شرایطی است که کانی‌های سولفیدی مس مانند کالکوسیت، در جهت جریان سیال شورابه‌ای جانیشین سلول‌ها و بخش‌های آوندی فسیل‌های گیاهی شده و بافت جانیشینی تشکیل می‌شود (شکل ۹a). بافت جانیشینی در کانسار مورد مطالعه به دو صورت مشاهده می‌شود که اصلی‌ترین شکل آن جانیشینی کانی‌های مس به جای فسیل‌های گیاهی است (شکل ۸ و ۹) و همچنین جانیشینی کانی کالکوسیت و کولیت به جای پیریت‌های فرامبوئیدال قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۹b).

#### ۵-۲- بافت دانه‌پراکنده

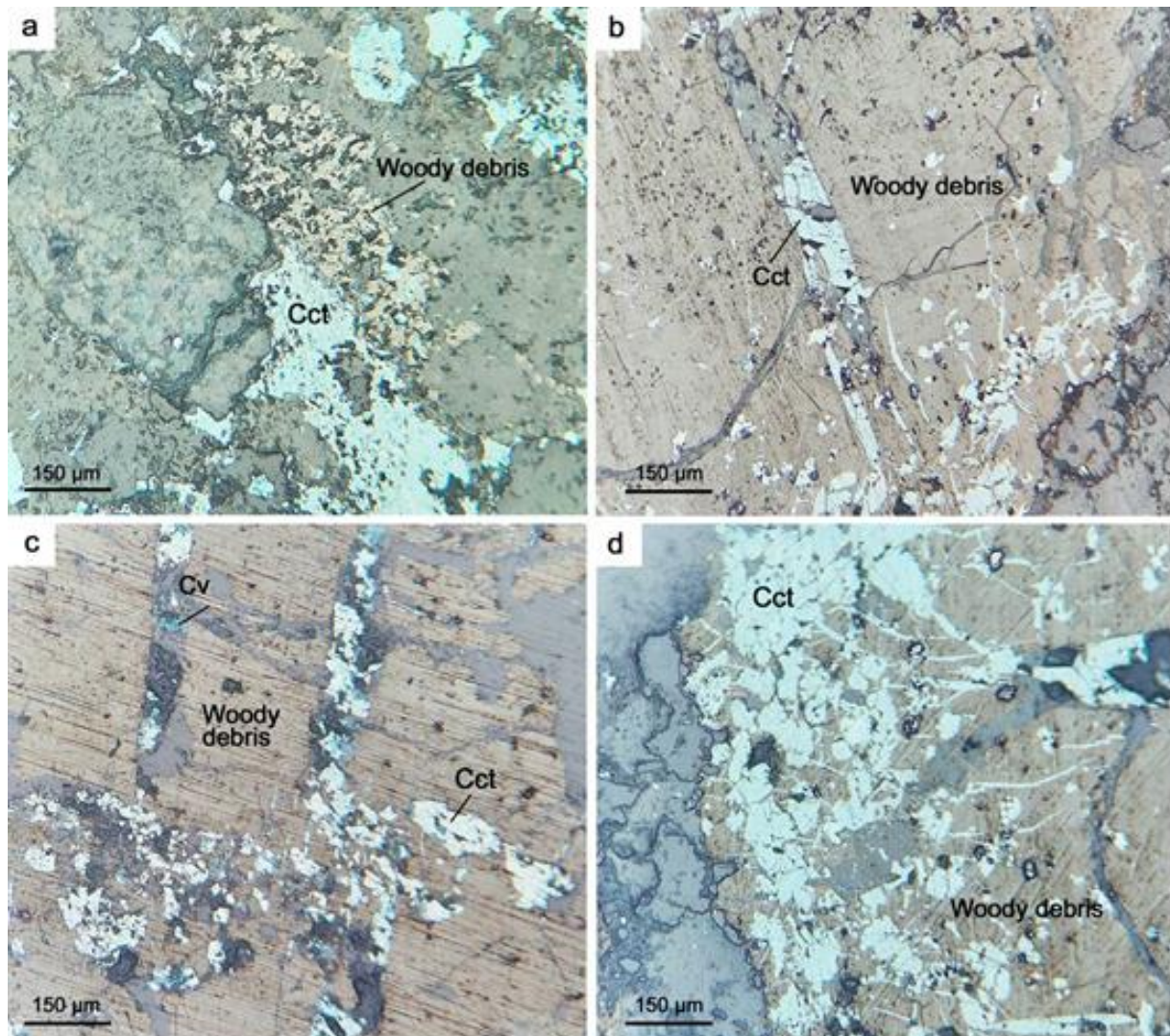
بافت دانه‌پراکنده بیشتر در اطراف پهنه احیایی کانه‌زایی شده غنی از فسیل گیاهی و گاهی در بخش‌های نفوذپذیر دارای مواد آلی دیده می‌شود و متشکل از کانی‌های کالکوسیت و پیریت می‌باشد. بافت دانه‌پراکنده در کانسار سرخه در بخش‌هایی که فراوانی کانه‌های مس کم است، قابل مشاهده می‌باشد. در این بافت، کانه‌های مس در متن سنگ میزبان پخش شده‌اند. این بافت نشان‌دهنده نهشت اولیه ماده معدنی در حین تشکیل سنگ در برگیرنده و همراه با سایر ذرات تشکیل‌دهنده آن است. پیریت‌های فرامبوئیدال اصلی‌ترین کانی هستند که بافت دانه‌پراکنده را به نمایش می‌گذارند (شکل ۹b,c).

ارتباط نزدیکی بین بخش‌های کانه‌دار با مواد آلی در لایه‌های تراوا دیده می‌شود که نشان می‌دهد تخلخل و تراوایی عامل اصلی جریان یافتن سیال و توزیع کانه‌زایی است. در حالت کلی، کانه‌زایی مس در کانسار سرخه محدود به واحدهای تخریبی خاکستری- سبز رنگ غنی از مواد آلی است (شکل ۵a,b, شکل ۷a) که نشان از چینه‌کران بودن این کانسار می‌باشد.

در کانسارهای مس رسوبی با میزبان واحدهای قرمز رنگ، در مرحله همزمان با رسوبگذاری کمی پس از نهشت رسوبات، پیریت تمشک مانند (Framboidal pyrite) از ژل سولفیدی متبلور می‌شود (Love and Brockley, 1973) که در کانسار سرخه نیز پیریت‌های اولیه تمشکی دیده می‌شود و کانی‌های سولفیدی مس جانشین پیریت شده است (شکل ۹b). سپس نخستین فاز کانه‌زایی گرمابی با کانی‌شناسی کالکوسیت و دیژنیت تشکیل شده است (شکل ۸ و ۹). بررسی‌های انجام شده، نشان داده است که در کانسار مس رسوبی سرخه، عیار متوسط مس ۱/۶ درصد و نقره به عنوان محصول جانبی با عیار ۸۰ تا ۱۰۰ گرم در تن گزارش شده است (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011; Rajabpour et al., 2017).

#### ۵- ساخت و بافت و کانی‌شناسی

با مطالعه ویژگی‌های کانه‌زایی سولفیدی مس در کانسار سرخه، از جمله انواع ساخت و بافت مشاهده شده در کانه‌ها و بررسی نحوه ارتباط آنها با سنگ درونگیر ماسه سنگ- سیلتستون احیایی و تلفیق آنها با سایر فاکتورهای زمین‌شناسی از جمله شواهد زمین‌شناسی و تکتونیکی، می‌توان به درک صحیحی از چگونگی تشکیل کانسار پی برد. بدین منظور، نمونه دستی از سنگ میزبان کانه‌زایی و انواع ساخت و بافت آنها در جهت عمود بر روند لایه‌بندی برداشت شده است. کانی‌های مشاهده شده در کانسار مورد مطالعه، کالکوسیت، دیژنیت، کولیت و پیریت است. ماده معدنی در کانسار سرخه، بافت‌های گوناگونی را نشان می‌دهد که این بافت‌ها عموماً شکل



شکل ۸- (a) تصویر میکروسکوپی از کانی کالکوسیت که در مجاورت فسیل گیاهی تشکیل شده است و: (b,c,d) تصاویر میکروسکوپی از کانی کالکوسیت و کوولیت که جانشین فسیل گیاهی شده‌اند. علائم اختصاری؛ Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت (Whitney and Evans, 2010).  
 Fig. 8. (a) Microscopic photograph of chalcocite mineral formed near woody debris, and (b,c,d) Microscopic photograph of chalcocite and covellite minerals that have replaced in woody debris. Abbreviation; Cct: chalcocite, Cv: covellite (Whitney and Evans, 2010).

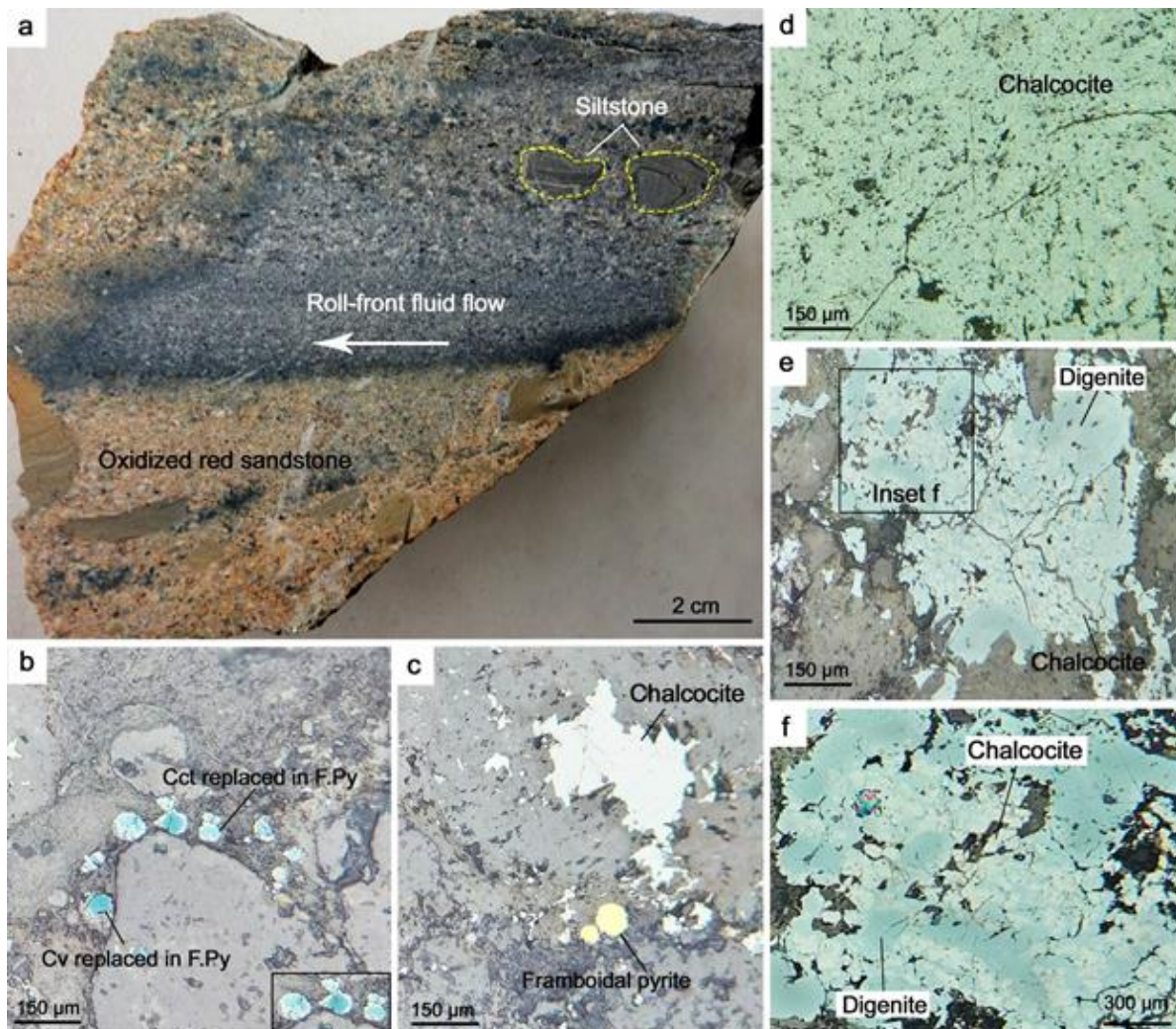
گیاهی حاوی کانه‌زایی از روش SEM-EDS استفاده کردیم که این تکنیک تنوع شیمیایی کانی‌های مورد نظر را به خوبی به ما نشان داد. با توجه به اینکه کانی اصلی در کانسار مس رسوبی سرخه کالکوسیت است و عموماً سولفیدهای مس جانشین قطعات چوبی و آوندهای گیاهی شده‌اند، هم کانی کالکوسیت و هم بقایای گیاهی برای تعیین ترکیب شیمیایی و تعیین نوع عناصر آنها، توسط روش SEM-EDS مورد بررسی قرار گرفته است. دو مورد کانی کالکوسیت انتخاب و آنالیز شدند که نتیجه توزیع عنصری روند مشخصی را نشان می‌دهد و تایید کننده ترکیب سولفیدی کانی است (شکل ۱۱، ۱۰) چرا که عناصر مس

#### ۶- ترکیب عنصری کانی‌ها به روش SEM-EDS

روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از لحاظ کارکرد شباهت زیادی به روش میکروپروب الکترونی (EMPA) دارد، اما در حالت کلی برای تصویربرداری مناسب‌تر است (Reed, 2005). در سال‌های اخیر از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای توزیع عناصر کانیایی استفاده شده است (San Shen and Yang, 2004; Chouinard et al., 2005; Velásquez et al., 2014) برای شناسایی دقیق و مشخص نمودن عناصر تشکیل‌دهنده کانی‌های مس‌دار و فسیل‌های

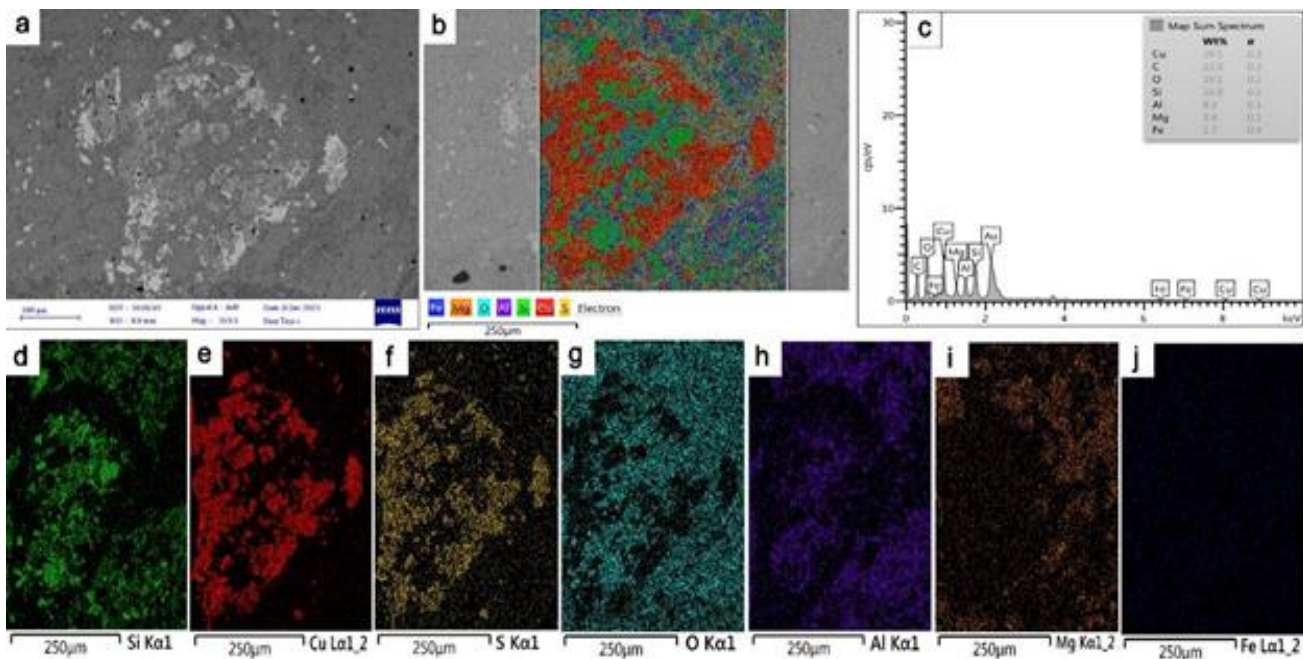
سیلیکاته تشکیل شده است، مشارکت داشته‌اند. عنصر آهن هم هیچ روند خاصی نشان نداده و به صورت یکنواخت در کل متن سنگ پراکنده شده است (شکل ۱۰j). دلیل وجود پیک برای عنصر طلا در نمودار شکل‌های ۱۰c و ۱۱c استفاده از پوشش طلا بر روی مقطع میکروسکوپی قبل از انجام آنالیز عنصری می‌باشد.

و گوگرد همبستگی کاملاً مثبتی نشان می‌دهند (شکل ۱۰e, f, شکل ۱۱d, e) و در مقابل دارای همبستگی منفی با اکسیژن هستند (شکل ۱۰g, شکل ۱۱) و اکسیژن صرفاً در تشکیل زمینه کانی سولفیدی مس (احتمالاً کانی‌های رسی هستند)، نقش داشته است. عناصری همچون سیلیسیم (شکل ۱۰d, 11g)، آلومینیوم (شکل ۱۰h, 11h) و منیزیم (شکل ۱۰i, 11i) در تشکیل سنگ آواری دربرگیرنده کانی سولفیدی که از کانی‌های



شکل ۹- (a) نمونه دستی از ماسه‌سنگ قرمز رنگ که بخش احیایی و کانه‌دار در جهت جریان سیال به شکل رول فرونت تشکیل شده است، (b) تصویر میکروسکوپی از پیریت‌های فرامبوئیدال که کانی‌های کالکوسیت و کوولیت جانشین آن شده است، (c) تصویر میکروسکوپی از پیریت فرامبوئیدال در همراهی با کالکوسیت، (d) تصویر میکروسکوپی از کانی کالکوسیت با بافت توده‌ای، و (e, f) تصاویر میکروسکوپی از کانی دیژنیت که جانشین کانی کالکوسیت شده است. علائم اختصاری: Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت، F.py: پیریت فرامبوئیدال (Whitney and Evans, 2010).  
 Fig. 9. (a) Hand specimen of red sandstone, that reduced and mineralized roll front part is marked with gray color, (b) Microscopic photograph of framboidal pyrites replaced by chalcocite and covellite minerals, (c) Microscopic photograph of framboidal pyrite accompanied by chalcocite, (d) Microscopic photograph of massive texture of chalcocite mineral, and (e, f) Microscopic photograph of chalcocite mineral replaced by digenite mineral. Abbreviation; Cct: Chalcocite, Cv: Covellite, Dg: Digenite, F.py: Frambooidal pyrite (Whitney and Evans, 2010).



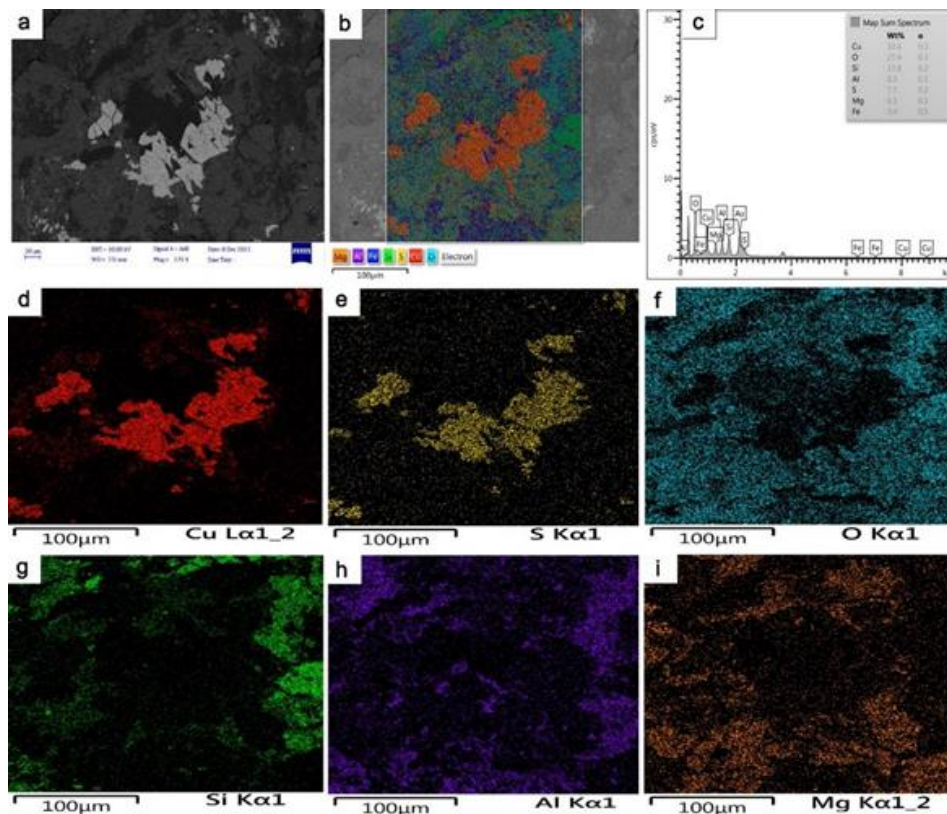


شکل ۱۰- توزیع و همبستگی عنصری در نقشه پراکندگی عنصری (Elemental mapping) کانی کالکوسیت. (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDX) از کانی کالکوسیت کانسار سرخه، (b) نقشه توزیع عنصری که برآیند و پراکندگی عناصر S, Cu, Si, Al, O, Mg و Fe در آن مشخص شده است، (c) نمودار نشان داده شده تجزیه و تحلیل طیف سنجی پراکندگی انرژی و ترکیب کانی شناسی را نشان می‌دهد و (d-j) نقشه‌های توزیع عنصری (TEM/BSE) که پراکندگی عناصر S, Cu, Si, O, Al, Mg و Fe را در کانی کالکوسیت نشان می‌دهد.

Fig. 10. Elemental distribution and correlation in the elemental mapping of chalcocite mineral. (a) A SEM/BSE image showing chalcocite in the Sorkheh deposit, (b) An elemental map showing the distribution of S, Cu, Si, Al, O, Mg and Fe, (c) The graph shown on the right represent energy-dispersive spectroscopy analysis presenting the mineral composition, and (d-j) A TEM/BSE elemental maps showing the distribution of Si (d), Cu (e), S (f), O (g), Al (h) Mg (i) and Fe (j) in the chalcocite mineral

اکسیژن در بخش‌های حاشیه‌ای و قالب قطعه چوبی و همچنین زمینه سنگ میزبان هم احتمالاً مربوط به فرآیندهای بعدی همانند هوازدگی و اکسیداسیون است که بر روی ترکیب شیمیایی فسیل گیاهی اثر گذاشته و مقدار اکسیژن افزایش یافته است (شکل ۱۲، f, h). احتمال دارد که در بخش داخلی آوند گیاهی، همراه با کانی‌های مس‌دار، کانی‌های رسی حاوی عنصر آلومینیوم تشکیل شده باشد که شاید حاصل از دگرسانی رسی شدن است (شکل ۱۲، h). عناصری همچون سیلیسیم و منیزیم هم روند خاصی نداشته و در کل متن پراکنده می‌باشند (شکل ۱۲، g, i).

نمونه بعدی که توسط روش SEM-EDS بررسی شد، فسیل گیاهی است که بخش عمده‌ای از آن توسط کانه مس جانشین شده است (شکل ۱۲). با توجه به نتایج حاصل شده، مشخص می‌شود که مس و گوگرد هر دو همراه با هم و با همبستگی مثبت عناصر اصلی متشکله کانی سولفیدی مس می‌باشند که بخش زیادی از آوندهای قطعه چوبی به دام افتاده در ماسه سنگ میزبان را پر کرده‌اند (شکل ۱۲، d, e). بر اساس تصویر چنین به نظر می‌رسد همبستگی و وجود عناصری مانند اکسیژن و آلومینیوم می‌تواند دلالت بر حضور کانی‌های رسی در بخش‌هایی از فسیل گیاهی باشد. وجود



شکل ۱۱- توزیع و همبستگی عنصری در نقشه پراکندگی عنصری (Elemental mapping) کانی کالکوسیت. (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDX) از کانی کالکوسیت کانسار سرخه، (b) نقشه توزیع عنصری که برآیند و پراکندگی همگن عناصر O, Cu, S, Si, Fe, Al و Mg در آن مشخص شده است، (c) نمودار نشان داده شده تجزیه و تحلیل طیف سنجی پراکندگی انرژی و ترکیب کانی شناسی را نشان می‌دهد و (d-i) نقشه‌های توزیع عنصری (TEM/BSE) که پراکندگی عناصر Cu, S, O, Si, Al و Mg را در کانی کالکوسیت نشان می‌دهد.

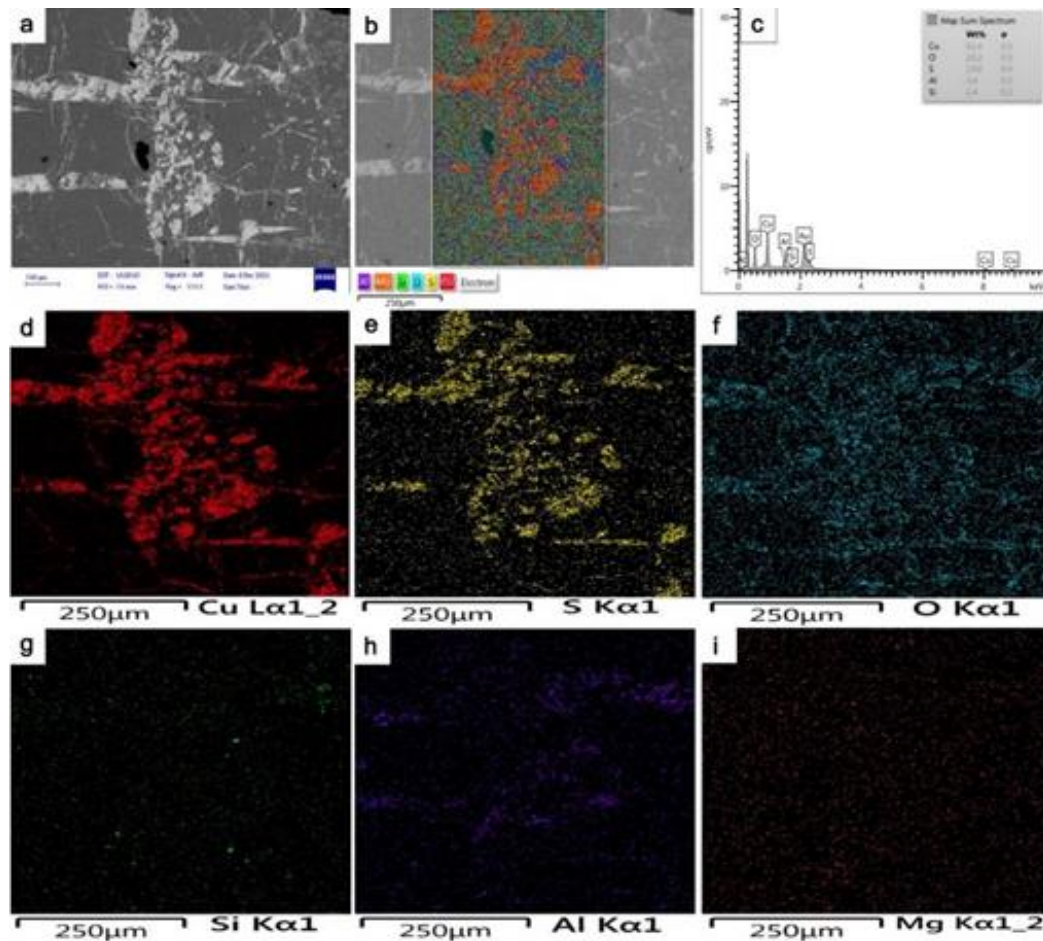
Fig. 11. Elemental distribution and correlation in the elemental mapping of chalcocite mineral. (a) A SEM/BSE image showing chalcocite in the Sorkheh deposit, (b) An elemental map showing the homogenous distribution of O, Cu, S, Si, Fe, Al and Mg, (c) The graph shown on the right represent energy-dispersive spectroscopy analysis presenting the mineral composition, and (d-i) A TEM/BSE elemental maps showing the distribution of Cu (d), S (e), O (f), Si (g), Al (h) and Mg (i) in the chalcocite mineral.

آنها را حفظ می‌کنند (Rose, 1976, 1989; Brown, 2005, 2010; Hitzman et al., 2005, 2010).

بر اساس مطالعات قبلی انجام شده بر روی کانسارهای مس رسوبی میوسن شمال غرب ایران، مشخص شده است که آنها در طی دیاژنز اولیه تا تدفینی از سیالات شورابه‌ای تشکیل شده‌اند (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011; Maghfouri et al., 2015, 2020). بنابراین عواملی همچون نفوذپذیری سنگ میزبان، وجود لایه‌های نمکی و گچی به صورت میان‌لایه برای تامین گوگرد شورابه‌های کانه‌دار، وجود مواد آلی به خصوص بقایای گیاهی به عنوان عامل احیا کننده و همچنین لایه‌های قرمز رنگ اکسیدان کم‌پایین از مهمترین عوامل کنترل‌کننده این تیپ کانسارها می‌باشد (Brown, 2009; Hitzman et al., 2005, 2010). دیاژنز تدفینی باعث تخریب مواد آلی و

## ۷- نحوه تشکیل و نتیجه‌گیری

مهم‌ترین مدل تشکیل برای کانسارهای مس رسوبی چینه‌کران منشا سین ژنتیک- دیاژنتیک است (Brown, 2005, 2009; Hitzman et al., 2005, 2010). در این مدل، سیالات اکسیدان، مس را از طبقات قرمز رنگ کم‌پایین و یا واحدهای آتشفشانی با ماهیت بایمودال شسته (Kirkham, 1989; Hitzman et al., 2010; Borg et al., 2012; Selley et al., 2005) و در توالی‌های رسوبی در مرز بین شرایط اکسیدان- احیا و در داخل واحدهای سبز- خاکستری رنگ، به صورت کانه‌زایی سولفیدی برجای می‌گذارند. از عوامل احیا کننده فلز مس، می‌توان به مواد آلی و پیریت‌های اولیه تمشکی شکل (Framboidal pyrite) اشاره کرد که سولفیدهای مس با بافت دانه‌پراکنده، جانشین پیریت‌های فرامبوئیدال شده و بافت اصلی



شکل ۱۲- توزیع و همبستگی عنصری در نقشه پراکندگی عنصری (Elemental mapping) فسیل گیاهی حاوی کانه‌زایی مس. (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDX) از فسیل گیاهی در کانسار سرخه، (b) نقشه توزیع عنصری که برآیند و پراکندگی همگن عناصر Cu، S، O، Si، Mg و Al در آن مشخص شده است، (c) نمودار نشان داده شده تجزیه و تحلیل طیف سنجی پراکندگی انرژی و ترکیب کانی‌شناسی را نشان می‌دهد و (d-i) نقشه‌های توزیع عنصری (TEM/BSE) که پراکندگی عناصر Cu، S، O، Si، Al و Mg را در فسیل گیاهی حاوی کانه‌زایی مس نشان می‌دهد.

Fig. 12. Elemental distribution and correlation in the elemental mapping of woody fragment containing Cu mineralization. (a) A SEM/BSE image showing woody fragment in the Sorkheh deposit, (b) An elemental map showing the homogenous distribution of Cu, S, O, Si, Mg and Al, (c) The graph shown on the right represent energy-dispersive spectroscopy analysis presenting the mineral composition, and (d-i) A TEM/BSE elemental maps showing the distribution of Cu (d), S (e), O (f), Si (g), Al (h) and Mg (i) in the plant fossils containing Cu mineralization.

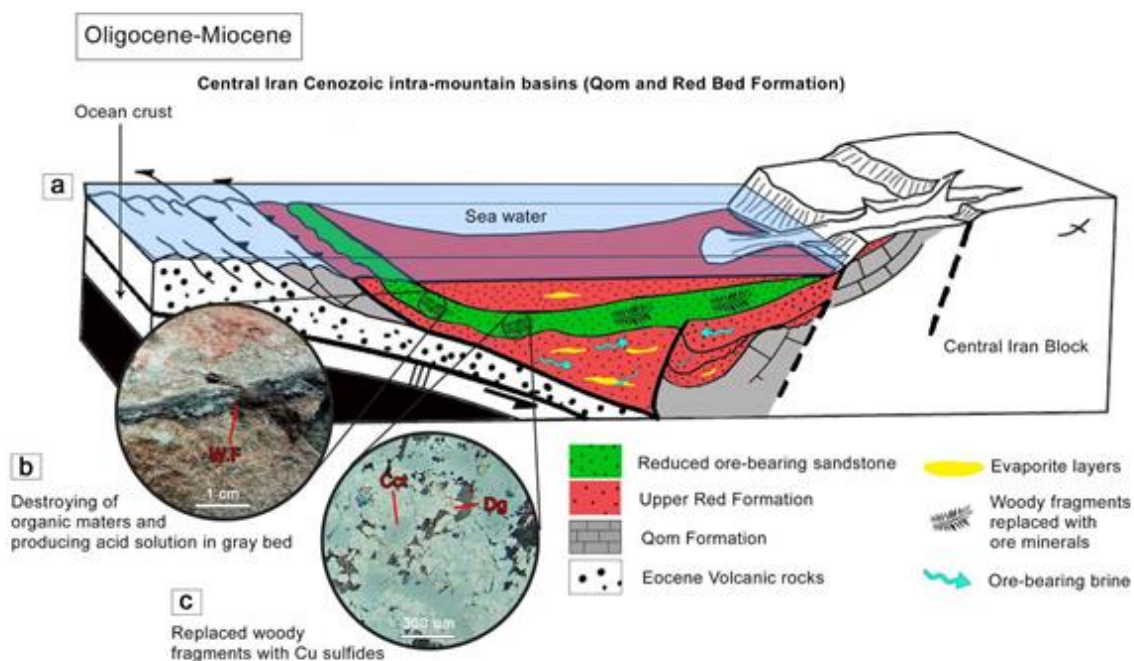
توسط محلول‌های اکسایشی به درون محیط رسوبی منتقل می‌شود. این شوره‌های کانه‌دار در طی برخورد با لایه‌های احیایی ماسه‌سنگی غنی از مواد آلی، مس را بصورت سولفیدی جانشین فسیل‌های گیاهی و پیریت‌های فرامبوئیدال کرده و موجب تشکیل کانه‌زایی جانشینی چینه‌کران مس در کانسار سرخه شده است.

وجود نهشته‌های گچ و لایه‌های نمکی در توالی میزبان کانه‌زایی، در ایجاد شوره‌های غنی از گوگرد نقش اساسی ایفا

موجب تشکیل اسید آلی هومیک می‌شود که یک اسید مخرب می‌باشد و این اسید در اثر برخورد با کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های تخریبی کم‌پایین موجب شستشو (bleaching) و تخریب کانیایی می‌شود (شکل ۱۳). دگرسانی یا شستشو کانی‌های مافیک متشکله سنگ‌های تخریبی کم‌پایین در طی دیاژنز تدفینی در اثر تاثیر اسید هومیک، موجب آزاد شدن مس موجود در شبکه کانی‌های مختلفی مانند بیوتیت، پیروکسن و آمفیبول شده و به صورت مجموعه‌های فلزی-آلی قابل حمل

دیاژنزی کم دما تشکیل شده است و می توان خاستگاه رسوبی- دیاژنتیک را برای این کانسار معرفی کرد (شکل ۱۳). با توجه به مطالعات و بررسی های انجام شده، ویژگی های شاخص کانسار مس رسوبی سرخه با کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed مقایسه شده است (جدول ۱). بر این اساس می توان استدلال کرد که کانسار سرخه شباهت بالایی با این تیپ کانسارها داشته و به عنوان کانسار مس رسوبی تیپ Redbed معرفی می شود.

کرده است (شکل ۱۳). نقشه های عنصری که توزیع عناصر اصلی در کانه های مس و بقایای گیاهی را نشان می دهند، مشخص می کند که مس و گوگرد از اصلی ترین مواد تشکیل دهنده کانی ها در کانسار مورد مطالعه می باشند. مشاهده بافت های جانشینی و دانه پراکنده، حضور پیریت با بافت تمشکی، فراوانی کانی کالکوسیت و حفظ شدگی بافت اولیه مواد آلی، نشان می دهد که کانسار مس سرخه توسط محلول های گرمایی



شکل ۱۳- (a) مدل شماتیک از محیط رسوبی تشکیل کانسار مس سرخه، که کانه زایی درون واحد احيایی ماسه سنگ سبز-خاکستری رنگ همراه با بقایای فسیل های گیاهی رخ داده است. با جریان یافتن سیال از بین لایه های تبخیری، سیال شور حاوی عناصری همچون مس در حین برخورد با واحد ماسه سنگ احيایی به دلیل شرایط ردوکس محیط، باعث ته نشین شدن ماده معدنی و تشکیل کانسار می شود، (b) در اثر دیاژنز تدفینی، بقایای گیاهی به دام افتاده در ماسه سنگ، تخریب شده و باعث احيایی شدن محیط می شود و (c) تصویر میکروسکوپی از کانه زایی مس با کانی شناسی کالکوسیت و دیژنیت که جانشین فسیل های گیاهی موجود در ماسه سنگ احيایی میزبان شده اند. علائم اختصاری: Cct: کالکوسیت، Dg: دیژنیت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 13. (a) Schematic model showing the sedimentary depositional environment of the Sorkheh Cu deposit that occurred in the reduced layers of green-gray sandstone with the remains of woody fragments. As the fluid flows through the evaporate layers, the ore-bearing brine fluid containing elements such as copper, when it collides with the reduced sandstone unit due to the redox conditions of the environment, causes the sedimentation of the mineral and the formation of the deposit, (b) As a result of burial diagenesis, woody fragment trapped in sandstone are destroyed and reduced the environment, and (c) Microscopic photograph of copper mineralization with chalcocite and digenite mineralogy, which have replaced the woody debris in the reduced sandstone host rock. Abbreviation; Cct: Chalcocite, Dg: Digenite, W.F: Woody fragment (Whitney and Evans, 2010)

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های کانسار سرخه با کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed.

Table 1. Comparison of the characteristics of Sorkheh deposit with Redbed-type sedimentary copper deposits

Age of sequence	Upper Miocene	Neoproterozoic-Late Mesozoic-Early Cenozoic
Tectonic setting	Rift	Continental basin/Rift
Depositional environment	Delta environment	Continental lacustrine and delta environment
Deposit form	Stratabound	Stratabound
Host/associated rock types	Sandstone	Red sandstone, siltstone, micro conglomerate
Ore mineralogy	Chalcocite, covellite, digenite, malachite	chalcocite, covellite, bornite, natural copper and silver (sphalerite and galena)
Texture	Replacement, disseminations and laminae	Replacement, disseminations and laminae
Alteration	Bleaching	Bleaching
Reduced factor	Fossil planet and pyrite	Fossil planet and pyrite
References	This study	Cox et al. (1991); Woodward et al. (1974); Avila-Salimas (1990); Thorson (2004); Flint (1989); Brown et al. 2005; Hitzman et al. 2010; Zientek et al. 2010; Borg, 2017

## مراجع

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148 (5–6), 692–725 <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran Publication, Tehran, Iran, P.586 (in Persian).
- Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., 2011. Sediment Hosted Cu Mineralization Periods in Iran, Twenty-ninth Meeting of Geological Sciences. Geological Survey of Iran. Tehran, February 2011.
- Aghazadeh, M., Prelevici, D., Badrzadeh, Z., Braschi, E., Van den Bogaard, P., Conticelli, S., 2015. Geochemistry, Sr-Nd-Pb isotopes and geochronology of amphibole-and mica-bearing lamprophyres in northwestern Iran: Implications for mantle wedge heterogeneity in a paleo-subduction zone. *Lithos* 352–396. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.001>
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountain system in Northern Iran. *J. Journal of Geodynamics*. 21, 1–33. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7)
- Amini, J.K., Maghfouri, S., Rastad, E., 2023. Mineralized horizons of the Khormo sedimentary copper deposit with sandstone host rock in the Garedu Formation and its mineralogical features, structure and texture, in the northeast of Raver. 15th Symposium of Iranian Society of Economic Geology. At: University of Dameghan.
- Amini, J.K., Maghfouri, S., Rastad, E., 2023. Ore horizons, mineralogy, structures and textures in the Gazak Redbed-type Cu deposit, southeast of Ravar. 31st Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran. At: University of Tabriz.
- Amiri, H., Amel, N., Moayyed, M., 2018. "Mineralogy, petrology and petrogenesis of Sorkhe-Zanjire volcanic band, west of Marand, NW Iran", 20th Symposium of Iranian Geological Society, Tehran University.

- Azaraien, H., Shahabpour, J., Aminzadeh, B., 2017. Metallogenesis of the sediment-hosted stratiform Cu deposits of the Ravar Copper Belt (RCB), Central Iran. *Ore Geology Reviews* 81, 369–395. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.035>
- Azizi, H., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Siahcheshm, K., 2018. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie - Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry* 195(2), 123–143. <https://doi.org/10.1127/njma/2018/0101>
- Bazargani, A., 2014. Petrographic and petrology investigation on Tabakh dagh, Southwest of Marand, NW Iran", MSc thesis of Petrology, University of Tabriz, 1-225.
- Borg, G., 2017, It's all about timing the origin of the European Kupferschiefer ores: World of Mining Surface and Underground, 9th International Copper Conference Copper 2016 from November 13 to 16 in Kobe, Japan.
- Borg, G., Piastryński, A., Bachmann, G., Püttmann, W., Walther, S., Fiedler, M., 2012. An overview of the European Kupferschiefer Deposits. *Economic Geologists, Inc. Special Publication* 16, 455–486. <https://doi.org/10.5382/SP.16.18>
- Bourque, H., Barbanson, L., Sizaret, S., Branquet, Y., Ramboz, C., Ennaciri, A., El Ghorfi, M., Badra, L., 2015. A contribution to the synsedimentary versus epigenetic origin of the Cu mineralizations hosted by terminal Neoproterozoic to Cambrian formations of the Bou Azzer–El Graara inlier: New insights from the Jbel Laassel deposit (Anti Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences* 107, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.04.005>
- Box, S.E., Syusyura, B., Hayes, T.S., Taylor, C.D., Zientek, M.L., Hitzman, M.W., Seltmann, R., Chechetkin, V., Dolgoplova, A., Cossette, P.M., Wallis, J.C., 2012. Sandstone copper assessment of the Chu-Sarysu basin, Central Kazakhstan. *Scientific Investigations Report 2010–5090–E*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5090/e/>
- Brown, A.C. 2014. Low-Temperature Sediment-Hosted Copper Deposits. *Treatise on Geochemistry: Second Edition. Volume 13*, 251-271 p. doi:10.1016/b978-0-08-095975-7.01110-4
- Brown, A.C., 1971. "Zoning in the White Pine copper deposit, Ontonogan County, Michigan", *Economic Geology* 66, 543-573. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.543>
- Brown, A.C., 1997. World-class sediment-hosted stratiform copper deposits: characteristics, genetic concepts and metalotects. *Australian Journal of Earth Sciences* 44, 317–328. <https://doi.org/10.1080/08120099708728315>
- Brown, A.C., 2005. Refinements for footwall red bed diagenesis in the sediment-hosted stratiform copper deposits model. *Economic Geology* 100, 765-771. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.4.765>
- Brown, A.C., 2009. A process-based approach to estimating the copper derived from red beds in the sediment-hosted stratiform copper deposit model. *Economic Geology* 104, 857–868. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.6.857>
- Chouinard, A., Williams-Jones, A.E., Leonardson, R.W., Hodgson, C.J., 2005. Geology and genesis of the multistage high sulfidation epithermal Pascua Au-Ag-Cu deposit, Chile and Argentina. *Economic Geology* 100, 463–490. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.3.463>
- Eftekharnajad, J., Ghorashi, M., Mehrparto, M., Arshadi, S., Zohrehbakhsh, A., Bolourchi, A., Saidi, A., 1989. "Geological map of Tabriz-Poldasht, scale 1:250000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Fernández-Mort, A., Riquelme, R., Alonso-Zarza, A.M., Campos, E., Bissig, T., Mpodozis, C., Carretier, S., Herrera, C., Tapia, M., Pizarro, H., Muñoz, S., 2018. A genetic model based on evapoconcentration for sediment-hosted exotic-Cu mineralization in arid environments: the case of the El Tesoro Central copper deposit, Atacama Desert, Chile. *Mineralium Deposita* 53, 775–795. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0780-2>
- Ghasemi, M., 2008. Exploration of Cu-Zn-Co mineralization in the Chahar Mahal-e- Bakhtyari province. *Scientific Investigations Report*. Geological Survey of Iran.
- Hayes, T.S., Cox, D.P., Piatak, N.M., Seal, R., 2010, Sediment-hosted stratabound copper deposit model: Chapter m of mineral deposit models for resource assessment.

- Hayes, T.S., Cox, D.P., Piatak, N.M., Seal, R.R., 2015. Sediment-hosted stratabound copper deposit model. Scientific Investigations Report 2010-5070-M. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105070M>
- Hitzman, M., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J., Selly, D., 2005. The sediment hosted stratiform copper ore system. In: Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J, Richards, J.P. (Eds.), 100th Anniversary volume. Society of Economic Geologists, PP. 609-642. <https://doi.org/10.5382/AV100.19>
- Hitzman, M.W., Selley, D., Bull, S., 2010. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through earth history. *Economic Geology* 105(3), 627-639. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.627>
- Karimzadeh Somarin, A., 2004. Marano volcanic rocks and associated Fe mineralisation, East Azarbaijan province. *Iran. Journal of Asian Earth Sciences* 24, 11-23. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00152-4)
- Khan Chuban, I., Abedini, A., Aliyari, F., Kalagary, A.A., Faridazad, M., 2020. Geology, mineralization and geochemistry of Sorkheh sediment-hosted copper occurrence, NW Marand, NW Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 28th year, 3rd issue, p. 659-674. <https://doi.org/10.29252/ijcm.28.3.659>
- Khodabandeh, A.A., Aminifazl, A., 1993. Geological Map of Tasuj, scale 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Kirkham, R.V., 1989. Distributions, settings, and genesis of sediment-hosted stratiform copper deposits. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Eds.), *Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits: Geological Association of Canada, Special Paper 36*, PP. 3-38.
- Love, L.G. and Brockley, H., 1973. Peripheral radial texture in framboids of polyframboidal pyrite. *Fortschritte der Mineralogie* 50(3), 264-269.
- Maghfouri, S., Movahednia, M., Hosseinzadeh, M.R., 2015. Stratigraphic Position and Deployment of Clastic-hosted Copper Mineralization in the Cenozoic Sedimentary Sequence, NW Iran, West Azarbijan and East Azarbijan provinces. 34th Symposiums on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian with English abstract).
- Maghfouri, S., Rastad, E., Borg, G., Hosseinzadeh, M.R., Movahednia, M., Mahdavi, A., Mousivand, F., 2020. Metallogeny and temporal-spatial distribution of sediment-hosted stratabound copper (SSC-type) deposits in Iran; implications for future exploration, *Ore Geology Reviews* 127, p103-834. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103834>
- Moritz, R., Rezeau, H., Ovtcharova, M., Tayan, R., Melkonyan, R., Hovakimyan, S., Ramazanov, V., Selby, D., Ulianov, A., Chiaradia, M., Putlitz, B., 2016. Long-lived, stationary magmatism and pulsed porphyry systems during Tethyan subduction to post-collision evolution in the southernmost Lesser Caucasus, Armenia and Nakhitchevan. *Gondwana Research* (in press). <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.009>
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the geology of Iran, Geological Survey of Iran, P. 109.
- Rahimzadeh, F., 1994. Treatise on the geology of Iran, Oligocene, Miocene, Pliocene. Geological Survey of Iran Publication, 12, P. 311 (in Persian).
- Rajabpour, S., Abedini, A., Alipour, S., Lehmann, B., Jiang, Sh., 2017. Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan redbed-type copper deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 86, 154-171. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.013>
- Saccani, E., Azimzadeh, Z., Dilek, Y., Jahangiri, A., 2013. Geochronology and petrology of the early carboniferous Misho mafic complex (NW Iran), and implications for the melt evolution of Paleo- Tethyan rifting in Western Cimmeria. *Lithos* 264-278. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.008>
- Sadati, S.N., Yazdi, M., Mao, J., Behzadi, M., Adabi, M.H., Lingang, X., Zhenyu, C., Mokhtari, M.A.A., 2016. Sulfide mineral chemistry investigation of sediment-hosted stratiform copper deposits, Nahand-Ivand area, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 72, 760-776. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.018>
- San Shen, J.J., Yang, H.J., 2004. Sources and genesis of the Chinkuashih Au-Cu deposits in northern Taiwan: constraints from Os and Sr isotopic compositions of sulfides. *Earth and Planetary Science Letters* 222, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.02.029>
- Sillitoe, H.R., Perelló, J., Creaser, R.A., Wilton, J., Wilson, A.J., Dawborn, T., 2017. Age of the Zambian Copperbelt. *Mineralium Deposita* 52, 1245-1268. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0726-8>

- Singer, D.A., 1995. World-class base and precious metal deposits—a quantitative analysis. *Economic Geology* 90(1), 88–104. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.1.88>
- Taylor, C.D., Douglas Causey, J., Denning, P.D., Hammarstrom, J.M., Hayes, T.S., Horton, J.D., Kirschbaum, M.J., Parks, H.L., Wilson, A.B., Wintzer, N.E., Zientek, L. M., 2013. Descriptive models, grade-tonnage relations, and databases for the assessment of sediment-hosted copper deposits—with emphasis on deposits in the Central African Copperbelt, Democratic Republic of the Congo and Zambia. *Scientific Investigations Report 2010–5090–J*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090J>
- Tucker, M.E., 2001. *Sedimentary petrology, an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Second edition. P. 448.
- Twite, F., Broughton, D., Nex, P., Kinnaird, J., Gilchrist, G., Edwards, D., 2019. Lithostratigraphic and structural controls on sulphide mineralisation at the Kamoia copper deposit, Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences* 151, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.12.016>
- Velásquez, G., Béziat, D., Salvi, S., Siebenaller, L., Borisova, A.Y., Pokrovski, G.S., Parseval, P.D., 2014. Formation and deformation of pyrite and implications for gold mineralization in the El Callao District, Venezuela. *Economic Geology* 109, 457–486. <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.2.457>
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zarasvandi, A., Pourkaseb, H., Fatemi, A.K., Fereydouni, Z., Ghasemi, M., 2020. Geology and geochemistry of Cu mineralization in the Dehmadan and Darreh-Yas indices, Charmahal va Bakhtiari Province. *J. Advanced Applied Geology* 10(1), 60–77. <https://doi.org/10.22055/AAG.2020.30592.2029>
- Zientek, M.L., Chechetkin, V.S., Parks, H.L., Box, S.E., Briggs, D.A., Cossette, P.M., et al., 2014a. Assessment of undiscovered sandstone copper deposits of the Kodar-Udokan area, Russia. *Scientific Investigations Report 2010–5090–M*. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090M>
- Zientek, M.L., Bliss, J.D., Broughton, D.W., Christie, M., Denning, P.D., Hayes, T.S., et al., 2014b. Sediment-hosted stratabound copper assessment of the neoproterozoic Roan Group, Central African Copperbelt, Katanga basin, Democratic Republic of the Congo and Zambia. *Scientific Investigations Report 2010–5090–T*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090T>
- Zientek, M.L., Oszczepalski, S., Parks, H.L., Bliss, J.D., Borg, G., Box, S.F., et al., 2015b. Assessment of undiscovered copper resources associated with the Permian Kupferschiefer, Southern Permian Basin, Europe. *Scientific Investigations Report 2010–5090–U*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090U>
- Zientek, M.L., Wintzer, N.E., Hayes, T.S., Parks, H.L., Briggs, D.A., Causey, J.D., et al., 2015a. Qualitative assessment of selected areas of the world for undiscovered sediment-hosted stratabound copper deposits. *Scientific Investigations Report 2010–5090–Y*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20105090Y>