



Study of Geology, Mineralization and Model of Chah Firouzeh Porphyry System in the Kerman Structural and Metallogenic Belt

Shohreh Hassanpour¹ | Maryam Ahankoub^{*1}

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

Keywords

Chah Firouzeh,
Geochemistry,
Geology,
Geophysics,
Kerman,
Oromieh-Dokhtar
Zone

Extended Abstract

Introduction

Porphyry copper deposits are one of the most important sources of this valuable metal element in the world, along with other important elements such as molybdenum, silver, tungsten and gold. Most of these deposits are spread in metallogenic provinces known as porphyry copper belts. These porphyry systems are formed in connection with the injection of sulfur-rich and metal-rich magma under conditions of high oxygen fugacity and water richness (Sillitoe, 2010). The Iranian porphyry copper belt is the middle part of a large global belt called the Alpine-Himalayan metallogenic belt, which stretches for about 2,000 kilometers from the northwest to the southeast of Iran. The structural changes of the Kerman Copper Belt were influenced by the subduction of the Neotethys Ocean beneath the subcontinent of central Iran and are related to the calc-alkaline intrusive masses of the Urmia-Dokhtar zone (Hezarkhani, 2009; Shafiei & Shahabpour, 2008). The formation of large mineralizing states in orogenic belts (Neubauer *et al.*, 2005) is formed by three important factors: 1. The type of subducting crust (Sillitoe, 1997), 2. Change in the subduction angle (Kay & Mpodozis, 2001) and 3. The plate fracture process (Lips, 2002). The Kerman Copper Magmatic Belt, with a length of 450 km and a width of 60 to 80 km, contains large deposits such as Sarcheshmeh, Miduk and promising reserves such as the porphyry copper of Ijo, Serno, Godkolvari, Parkam, Abdar, Keder, Darhezar, Nochun, Ijo and Chah Firuzeh. Chah Firuzeh deposit with an estimated reserve of 450 million tons and an average grade of 0.35% copper is formed in association with granodiorite and quartz monzonite masses (Hezarkhani & Hajizadeh, 2011).

Receive: 2026-04-30

Accepted : 2026-07-24

Published: 2026-08-23

*Corresponding Author: Maryam Ahankoub; E-mail: m.ahankoub@pnu.ac.ir

How to cite this article: Hassanpour, S., Ahankoub, M. (2026). Study of mineralization geology and formation model of Chah Firuzeh deposit in Kerman structural and metallogenic mineralization belt. *Structural Geology and Applied Tectonics*, 1(1): 58-81. DOI: [10.30473/SGAT.2026.77876.1005](https://doi.org/10.30473/SGAT.2026.77876.1005)



Copyright © 2026, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran. This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

According to studies, this deposit is a copper-bearing porphyry system with high economic value that is at the appropriate depth of replacement of the intrusive mass, with a composition of diorite and granodiorite in association with the presence of evidence of fluid activity. This research reviews the general geology of the deposit and reviews the structural geology, geochemical data, alterations, mineralogy, and geophysics of the deposit. (Hezarkhani, 2009), by examining the fluids involved in Chah Firouzeh, believes that the mineralizing fluids are of magmatic origin with temperatures ranging from 310 to 570 degrees (Soori, 2013) have mentioned the presence of chrysocolla in the region. (Heidari *et al*, 2019), by studying the mineral chemistry of biotite in this deposit, believe that this mass was formed in the late stages of collisional subduction and that the Chah Firuzeh porphyry copper mass is one of the ore-bearing and fertile porphyry masses formed in this magmatic arc.

Research Method

During field studies, 25 samples were taken from the Chah Firuzeh area and then after preparing thin and polished sections, they were studied in the geology laboratory of Payam Noor University, Karaj Center. Then, by re-evaluating the whole-rock analysis data, the magma geochemistry of the region was also studied. Geochemical exploration studies using soil sampling and geophysical explorations using electrical sounding (using Schlumberger electrode array) and electrical tomography (using polar-dipole electrical array) in the region were also. Finally, this research, by combining all existing studies including petrology, mineralogy, geochemical and geophysical explorations, provides a general overview of the deposit, its cognitive interpretation and modeling.

Results and Discussion

The Chah Firuzeh granodiorite and monzonite magmatic complex is 16.3 ± 0.1 million years old (Kazemi Mehrnia, 2010). Its magmatic series is calc-alkaline and metaluminous and tectonically formed on the continental-oceanic margin. The magma is adakitic in nature and the trace element behavior indicates that the rocks of the region formed in a subduction origin (Mohammadzadeh, 2019). The stock have been extensively affected by hydrothermally alteration of phyllic, propylitic and potassic alteration that formed finally copper mineralization. Veins and veinlets of gypsum, pyrite, chalcopyrite, magnetite and silica are widely seen in this deposit. Sometimes outcrops of porphyry mass containing primary pyrite-chalcopyrite, malachite, chrysocolla and turquoise are seen in the surface parts of the region. In Chah Firuzeh, the potassic alteration event is relatively extensive and is characterized by the mineral assemblage of biotite $\pm$ alkali feldspar + quartz + pyrite + chalcopyrite $\pm$ molybdenite $\pm$ magnetite $\pm$ anhydrite. Biotite is the most abundant mineral in this alteration zone, which has caused the altered rock to take on a darker color. Potassic alteration in Chah Firuzeh is irregularly overprinted by phyllic alteration. This alteration is especially widespread around silica-sulfide veins, and in places where these veins are highly concentrated, phyllic alteration completely dominates potassic alteration, and only parts of potassic alteration remain. The phyllic or quartz-sericite-pyrite alteration is very widespread in the turquoise well and surrounds the potassic alteration zone in a halo. This alteration can be identified by the mineralogy of sericite + quartz + pyrite $\pm$ chlorite $\pm$ chalcopyrite $\pm$ rutile $\pm$ titanite. Among the abundant veins in this alteration zone identified in thin section studies, we can mention the Qz, Qz-Opq and Chlo-Cal $\pm$ Opq-Qz veins. In Chah Firuzeh, mineralization is mainly formed in potassic alteration zones and in phyllic and potassic overlap zones, as well as in fractures or in direct contact with them. Copper mineralization is often seen in two forms: veinlet, stockwork and dissemination. All three supergene and hypogene and the leached zones are formed. In the leached zone, abundant iron hydroxide minerals such as goethite and jarosite are seen in association with copper oxides such as chrysocolla, malachite and neotocite. The supergene zone of the deposit can be identified by the presence of covellite and chalcocite minerals in thicknesses varying from 20 to 30 meters. The hypogene zone is also seen with the copper-bearing minerals chalcopyrite and bornite in the form of scattered and veinlets. The range of $\delta^{18}\text{O}$ changes between 16.5 to 19.4‰ in the samples studied from the ore deposit. According to the oxygen isotope studies, the origin of the mineralizing fluids has been determined to be magmatic and meteoric. The range of changes in the heavy sulfur isotope that has been studied in this area has shown a range of around zero. The sulfur isotopic changes in different samples vary from -2.5‰ to +0.6‰, which indicates a magmatic origin for sulfur.

In geochemical exploration studies, the area of 1.2 square kilometers was covered by soil in 100 x 100 meter cells. Samples taken from this area were about 129 soil samples that were analyzed by ICP in Iran. In analyzing the results, single-variable, bivariable, and multivariable data processing stages were performed,

and significant correlations were seen between the elements gold, copper, molybdenum, arsenic, bismuth, as well as the elements lead, zinc, antimony, bismuth, and arsenic, indicating the paragenesis of a set of valuable mineralization elements in the porphyry system. The data processing of the samples was carried out in two factors including the complete set of elements (Ti, Sr, Au, As, Cu, Bi, Zn, Pb, Sb, Mn, Ag, Hg, Bi) which has shown consistency with the results of the main mineralization studies of the area. The set of studies shows that copper, molybdenum, and gold are in the center of the region and consistent with granodiorite outcrops. These areas in the geological map and in field studies are also consistent with porphyry copper mineralization in the location of veins and veinlets of type (A, B, D) and alteration (phyllic, potassic, and propylitic). The total copper content of the samples in the area has shown changes between a minimum of 150 and a maximum of 2860 ppm. Geo-electric surveying in the study area has been carried out in two different phases and by two methods: electrical sounding using a Schlumberger electrode array and electrical tomography using a pole-dipole electrical array. In this area, 400 geoelectric soundings and 6000 electrical tomography sampling points were also carried out. Three-dimensional fence and block models of specific resistance have been prepared for different parts of the study area. As the amount of magnetite in Chah Firozeh is not very high compared to some other porphyries, and this has led to the discovery test using magnetometry in the southern part of this deposit not being very successful. Two wells 6 and 10 have the highest copper grades among the holes in the southern part. Also, the dominant alteration in the area between these two holes is potassic alteration. Considering these two phenomena, it was expected that the highest magnetic field intensity would be in this area.

In this study, by comprehensively and completely integrating all studies conducted in the Chah Firouzeh, including of petrology and magma geochemistry, mineralization and the mechanism of action of hydrothermal fluids, geochemical and geophysical explorations, the Chah Firouzeh deposit is finally modeled.

Conclusions

The Chah Firuzeh copper deposit is located in the southern part of the Urmia-Dokhtar magmatic arc and within the Kerman copper metallogenic belt. The petrological features, alteration patterns, mineralization type, and structural evidence indicate that this deposit is similar in many respects to the classic porphyry copper systems in southeastern Iran. The development of potassic, phyllic, and propylitic alteration, along with the presence of sulfide veins and veinlets, indicates the effective role of magmatic fluids in different stages of the evolution of the mineralizing system. The mineralographic results indicate that the primary mineralization mainly consisted of chalcopyrite, pyrite, and magnetite, and this mineral complex has undergone secondary alteration and enrichment due to supergene processes. The presence of secondary minerals resulting from oxidation and replacement indicates the effect of weathering processes and meteoric fluid circulation on the redistribution of metallic elements and the enhancement of the grade of parts of the reservoir. One of the most important findings of this study is the controlling role of geological structures in the concentration of mineralization. The Chah Firuzeh fault and the associated fracture system act as the main transport routes for hydrothermal fluids, and the concentration of alteration and mineralization zones is observed in the vicinity of these structures. The increased density of mineralized veins and veinlets at the intersection of fractures also indicates that these areas, due to their higher permeability, have provided more favorable conditions for the deposition of copper sulfides. Therefore, structural control can be considered one of the most important factors affecting the evolution of the Chah Firuzeh mineralization system. The integration of geochemical and geophysical exploration results also confirms the continuation of mineralization at depth. The results of IP-RS data modeling indicate the existence of areas with high recharge potential in different parts of the area, which are consistent with known alteration and mineralization zones. This indicates that the exploration potential of the area is not limited to surface outcrops and that reserves can be expected to continue at depth. All geological, mineralogy, geochemical, geophysical, and structural analysis evidence indicate that the Chah Firuzeh deposit is a porphyry copper system related to calc-alkaline magmatic activities associated with the Neotethys subduction. Understanding the relationship between geological structures and mineralization concentration, in addition to explaining the genetic model of the reserve, can be used as an effective guide in designing future exploration programs in the Chah Firuzeh area and other parts of the Kerman Copper Belt.



بررسی مطالعات زمین‌شناسی، کانه‌زایی و مدل تشکیل کانسار چاه فیروزه در کمربند ساختمانی و متالوژنی کرمان

شهره حسن پور^۱، مریم آهنگوب^{۱*}

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

کلیدواژه‌ها

چاه فیروزه،
ژئوشیمی،
زمین‌شناسی،
ژئوفیزیک،
کرمان،
پهنه ارومیه-دختر

چکیده

کانسار مس چاه‌فیروزه در بخش جنوبی کمان ماگمایی ارومیه-دختر و در کمربند متالوژنی مس کرمان جای گرفته است. سنگ‌های نفوذی کوارتزمونزونیتی و کوارتزدیوریتی با سن ۳/۱۶ میلیون سال، نقش توده‌های میزبان کانی‌سازی را ایفا می‌کنند و دایک‌های دیوریتی جوان‌تر، در مراحل پسین به درون آن‌ها تزریق شده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی حاشیه‌ای این مجموعه، ترکیب کالک‌آلکانل، متآلومینوس و خصلت آداکیتی داشته و در محیط فرورانش نئوتتیس و در حاشیه همگرای قاره-اقیانوس تشکیل یافته‌اند. ذخیره زمین‌شناسی این کانسار بالغ بر ۴۵۰ میلیون تن با عیار متوسط ۰/۳۵ درصد مس برآورد شده است. فرایندهای دگرسانی گرمایی در این منطقه بسیار گسترده بوده و زون‌های پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک را مطابق با مدل لاول-گیلبرت بر روی توده‌های نفوذی و سنگ‌های دربرگیرنده پدید آورده است. کانه‌زایی به هر دو شکل هیپوژن و سوپرژن دیده می‌شود؛ در کانسنگ هیپوژن، کالکوپریت همراه با پیریت و مگنتیت، به‌ویژه در بخش مرکزی کانسار، تشکیل شده است. بررسی‌های ایزوتوپ‌های پایدار، منشأ سیالات را ترکیبی از آب‌های ماگمایی و جوی نشان می‌دهند و خاستگاه عنصر مس نیز با ویژگی‌های پورفیری‌های مشابه در جهان، بر عمق پوسته‌ای دلالت دارد. داده‌های ژئوشیمیایی، آنومالی‌های مس-مولیبدن را بر روی واحد گرانیتوئیدی مرکزی آشکار ساخته‌اند. همچنین برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش IP-RS، زون‌های کانه‌دار احتمالی را در عمق حدود ۲۰ متر در بخش غربی و ۳۰ متر در بخش شرقی محدوده معرفی می‌کنند. در نهایت، شواهد ساختمانی نشان می‌دهد که گسل چاه‌فیروزه و سیستم شکستگی‌های وابسته به آن، نقش بسیار مؤثری در هدایت سیالات گرمایی و تمرکز کانی‌سازی در این کانسار داشته‌اند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱

*نویسنده مسئول: مریم آهنگوب

رایانامه:

m.ahankoub@pnu.ac.ir

ارجاع به این مقاله: حسن پور، ش؛ آهنگوب، م. (۱۴۰۵). بررسی مطالعات زمین‌شناسی، کانه‌زایی و مدل تشکیل کانسار چاه فیروزه در کمربند ساختمانی و متالوژنی کانه‌زایی کرمان. زمین‌شناسی ساختمانی و زمین‌ساخت کاربردی، ۱(۱): ۵۸-۸۱.

شناسه دیجیتال مقاله: 10.30473/SGAT.2026.77876.1005



مقدمه

ذخایر مس تیپ پورفیری از مهم‌ترین منابع تامین این عنصر فلزی با ارزش به همراه عناصر مهم دیگری مانند مولیبدن، نقره، تنگستن و طلا در جهان هستند. اغلب این ذخایر در ایالت‌های متالوژنیک که با عنوان کمربندهای مس پورفیری شناخته می‌شوند، گسترده شده‌اند. این نوع ذخایر در نتیجه سرد شدن سیستم گرمایی در ارتباط با توده‌های نفوذی کم عمق تشکیل شده و از نظر تکتونیکی در زون‌های فروورانشی پوسته اقیانوسی در نواحی فروورانشی مرتبط با قاره و جزایر کمائی و موقعیت‌های پس از برخورد تشکیل می‌شوند. این سیستم‌های پورفیری در ارتباط با تزریق ماگمای غنی از گوگرد و فلزات در شرایط با فوگاسیته بالای اکسیژن و غنی از آب به وجود می‌آیند (Sillitoe, 2010).

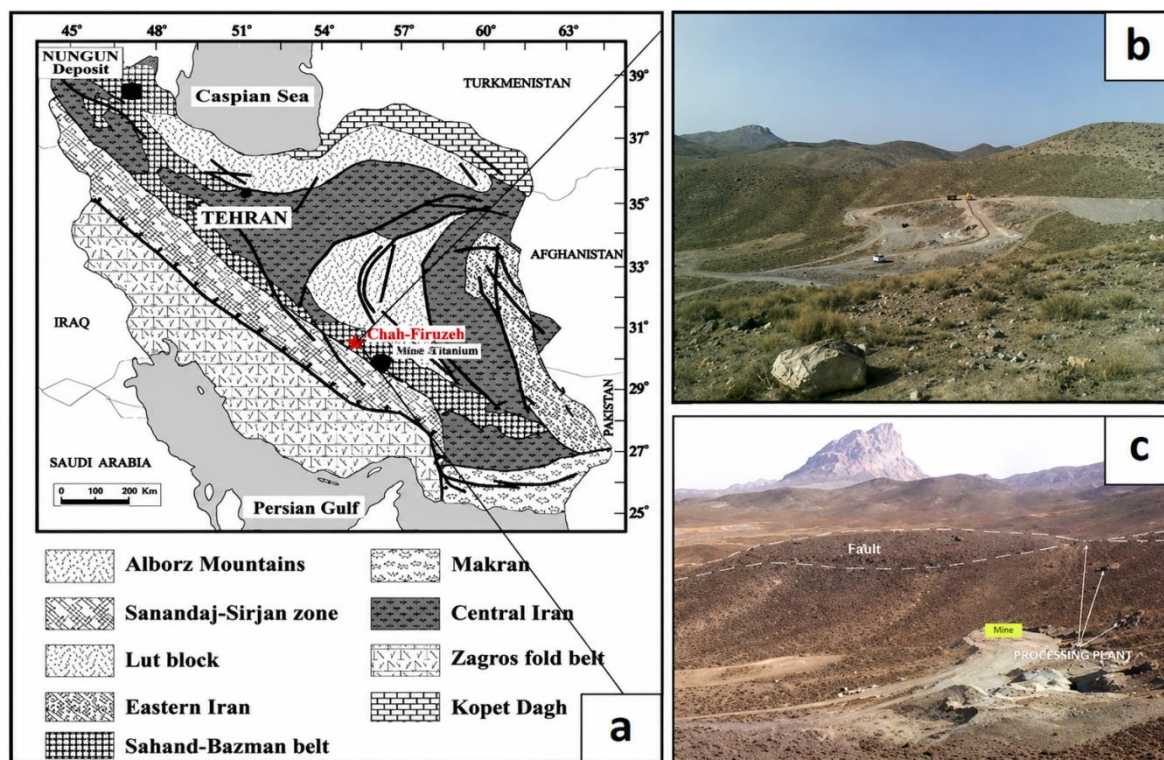
کمربند مس پورفیری ایران، بخش میانی کمربند بزرگ جهانی با نام کمربند متالوژنی آلپ-همالیاست که با طولی در حدود ۲۰۰۰ کیلومتر از شمال غرب تا جنوب شرق ایران کشیده شده است. تحولات ساختاری کمربند مس کرمان متأثر از فروورانش اقیانوس نئوتتیس به زیر خرده قاره ایران مرکزی بوده و در ارتباط با توده‌های نفوذی کالک‌آلکالن زون ارومیه - دختر می‌باشد (Hezarkhani, 2009; Shafiei & Shahabpour, 2008).

تشکیل ایالت‌های بزرگ کانه‌زایی در کمربندهای کوهزایی (Neubauer et al., 2005) توسط سه فاکتور مهم تشکیل می‌شوند: ۱. نوع پوسته در حال فروورانش (Sillitoe, 1997)، ۲. تغییر در زاویه فروورانش (Kay & Mpodozis, 2001) و ۳. فرایند شکست صفحه (Lips, 2002).

کمربند ماگمایی مس کرمان با ۴۵۰ کیلومتر طول و ۶۰ تا ۸۰ کیلومتر عرض، حاوی کانسارهای بزرگی چون سرچشمه، میدوک و ذخایر امیدبخشی مانند مس پورفیری ایجو، سرنو، گودکلوری، پرکام، آبدر، کدر، دره‌زار، نوچون، ایجو و چاه فیروزه می‌باشد. کانسار چاه فیروزه با ذخیره تقریبی ۴۵۰ میلیون تن و میانگین عیار ۰/۳۵ درصد مس در ارتباط با توده‌های با ترکیب گرانودیوریتی و کوارتز مونزونیتی تشکیل شده است (Hezarkhani & Hajizadeh, 2011). کانسار چاه فیروزه در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال غرب شهر بابک و ۱۲ کیلومتری غرب - شمال غرب کانسار میدوک و در محدوده عرض جغرافیایی $30^{\circ} 24' 30''$ - $30^{\circ} 23'$ و طول جغرافیایی $55^{\circ} 02' 30''$ - $55^{\circ} 00' 30''$ در استان کرمان واقع شده است. طبق مطالعات صورت گرفته، این کانسار یک سیستم پورفیری مس‌دار با ارزش اقتصادی بالاست که در عمق مناسب جایگزینی توده نفوذی، با ترکیب دیوریتی و گرانودیوریتی در همراهی با حضور شواهدی از فعالیت سیالات ماگمایی و مولد کانه‌زایی به وجود آمده است. شواهدی از برونزد قابل توجه کانی‌های مس مانند مالاکیت و کریزوکولا در بخش جنوبی محدوده، نشان می‌دهد که در گذشته‌ای نه چندان دور بهره‌برداری محدودی از آن به روش لیچینگ صورت گرفته است. در این مقاله به بررسی کلیات زمین‌شناسی کانسار و بررسی زمین‌شناسی ساختاری، داده‌های ژئوشیمیایی، آلتراسیون‌ها، مینرالوگرافی و ژئوفیزیک کانسار پرداخته شده است.

در شکل ۱، موقعیت کانسار چاه فیروزه در نقشه زون‌های سنگی - زمین‌ساختی ایران در زون ساختاری - ماگمایی ارومیه - دختر و در کمربند مس پورفیری ایران، نشان داده شده است.

با بررسی سیالات درگیر در چاه فیروزه معتقد است که سیالات مولد کانه‌زایی با منشأ ماگمایی با درجه حرارت ۳۱۰ تا ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است (Hezarkhani, 2009). به حضور کانی کریزوکولا در منطقه اشاره کرده‌اند (Soori et al, 2013). با بررسی مینرال شیمی بیوتیت در این کانسار، معتقدند که این توده در مراحل انتهایی فروورانش برخورد تشکیل شده و توده مس پورفیری چاه فیروزه از جمله توده‌های پورفیری کانه‌زا و بارور تشکیل شده در این کمان ماگمایی می‌باشد (Heidari et al., 2019).



شکل (۱): (a) نقشه پایه - موقعیت کانسار چاه فیروزه در نقشه زون‌های سنگ - زمین‌ساختی ایران (Stöcklin, 1974). (b) بخش شمالی چاه فیروزه. (c) بخش جنوبی چاه فیروزه، در هر دو قسمت شمالی و جنوبی آن آثار استخراج و بهره‌برداری در منطقه مشهود است.

Fig (1): (a) Base map – location of Chah-e Firouzeh well on the lithotectonic zone map of Iran (Stöcklin, 1974). (b) Northern part of Chah-e Firouzeh. (c) Southern part of Chah-e Firouzeh. In both the northern and southern sections, evidences of extraction and exploitation activities is visible in the area.

روش تحقیق

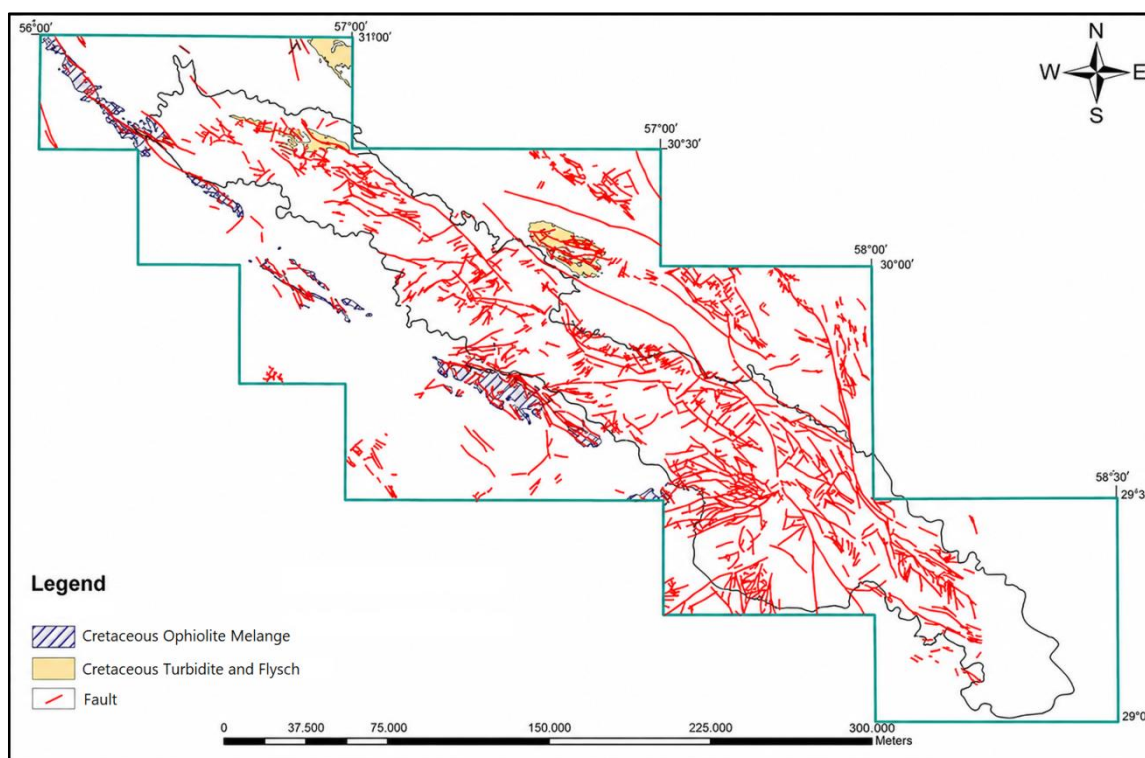
در مطالعات صحرایی از منطقه چاه فیروزه، تعداد ۲۵ نمونه برداشت گردید و پس از تهیه مقاطع نازک و صیقلی در آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور مرکز کرج مورد مطالعه قرار گرفت. سپس با ارزیابی مجدد داده‌های آنالیز سنگ کل، ژئوشیمی منطقه هم بررسی شد.

مطالعات اکتشافات ژئوشیمیایی به روش نمونه‌برداری از خاک و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش سونداژزنی الکتریکی (با استفاده از آرایش الکترودی شلامبرگر) و توموگرافی الکتریکی (با استفاده از آرایش الکتریکی قطبی - دوقطبی) در منطقه نیز انجام گرفته است. در نهایت در این تحقیق با تلفیق کلیه مطالعات موجود اعم از سنگ‌شناسی، مینرالوژی، اکتشافات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی به مرور کلی کانسار و تعبیر و تفسیر کانسار شناختی و مدل‌سازی آن پرداخته شده است.

زمین‌شناسی ساختاری منطقه

کمربند ماگمایی ارومیه-دختر در ایران یکی از مناطق اصلی مس‌دار جهان است (شکل ۲). این کمربند بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا است که از غرب اروپا تا ترکیه و از طریق ایران تا غرب پاکستان امتداد دارد. پیوندهای پتروژنتیکی بین کانی‌سازی مس پورفیری و ماگماتیسیم کمانی در کمان‌های قاره‌ای مانند آند، کوردیلرای آمریکای شمالی، پاپوآ گینه نو و چین به خوبی مطالعه شده است (Sillitoe, 1972; Beane & Titley, 1981; Zhang *et al.*, 2006; Richards *et al.*, 2001; Hollings *et al.*, 2005; Kay & Mpodozis, 2001; Wang *et al.*, 2007).

اما در ایران، جایی که کانی‌سازی مس پورفیری عمدتاً در محیط‌های برخوردی رخ داده است. بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و برخورد بین صفحه آفریقا و اوراسیا در دوران ترشیری منجر به تجمع و بروز چندین بخش قوس آتشفشانی و زیرقوس‌ها به صفحه اوراسیا در جنوب شرق ایران گردید. این مجموعه برخوردی، یک محیط فلززایی بسیار حاصلخیز با ذخایر فراوان مس پورفیری در کمربند تتیس ایجاد کرده که در بخش‌های قوسی باریک، معمولاً با عرض چند ده کیلومتر، آشکار شده‌اند. در منطقه کرمان در ایران مرکزی، کانی‌سازی مس در چندین کانسار مس پورفیری اصلی و چشم‌اندازهای معدنی در مجموعه ماگمایی سنوزوئیک کرمان متمرکز شده است (KCMA)، (شکل ۳) (Shafiei et al., 2009). بر مبنای داده‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپ‌های Sr-Nd-Pb یافته‌های جدیدی را از توده‌های نفوذی عقیم و میزبان کانسنگ در زمینه کانی‌شناسی متغیر منبع مذاب پس از ضخیم شدن پوسته برخوردی در زون متالورژی کرمان ارائه کرده است.

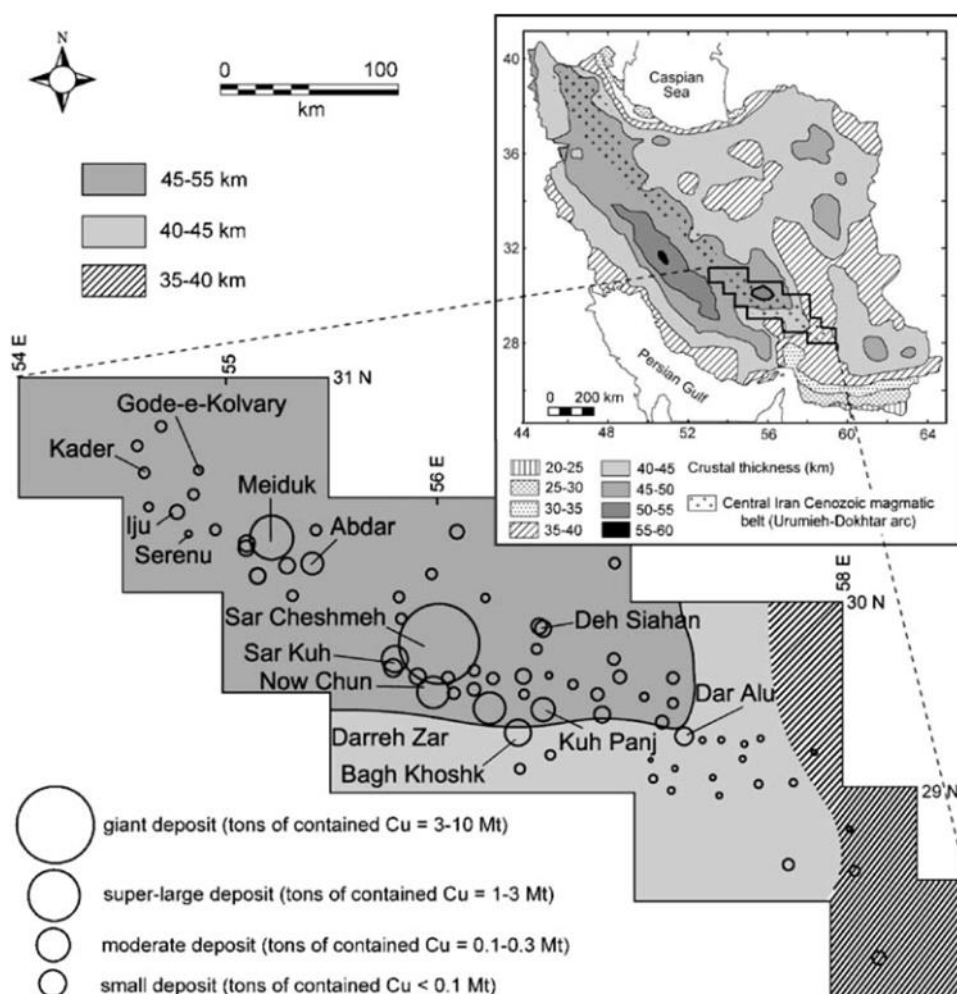


شکل (۲): توزیع گسل‌ها در کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان که نشان‌دهنده یک پهنه به شدت تکتونیزه می‌باشد.

Fig (2): Distribution of faults in the Cenozoic magmatic arc of Kerman, indicating a highly tectonized zone.

ساختار زمین‌شناسی کرمان و فعالیت‌های نفوذی و کانی‌سازی مس پورفیری در اواخر ترشیری در بخش کمان ماگمایی این کمربند در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. از آنجایی که اندازه ذخایر مس پورفیری در KCMA از جنوب شرقی به شمال غربی افزایش می‌یابد و اکثریت ذخایر مس پورفیری (مانند سرچشمه، میدوک، دره‌زار، سرکوه، نوچون) در پوسته قوسی کوهزایی و در ۴۵-۵۵ کیلومتری پوسته (شکل ۳)؛ تشکیل شده‌اند (McInnes et al., 2005; Shahabpour & Kramers, 1987). لذا به نظر می‌رسد که ضخیم شدن پوسته نئوژن و ماگماتیسم قوسی فرآیندهای مرتبط با هم هستند که بر فلززایی مس پورفیری در این ناحیه تأثیر گذاشته‌اند (Shafiei et al., 2009). این مکانیسم بازخورد به ویژه برای مناطق شمال غربی که این ذخایر در تقاطع گسل‌ها متمرکز شده‌اند، بسیار مهم است (Nedimovic, 1973). به استثنای تعداد کمی از ذخایر (سرچشمه، میدوک، دره‌زار، درآلو)، اکثر ذخایر و رخداد‌های مس این منطقه دارای عیار مس پایین (کمتر از ۰/۴٪) و محتوای پیریت بالا هستند. در کل ذخایر پورفیری کرمان را می‌توان به عنوان ذخایر مس (میدوک)، مس-مولیبدن

(سرچشمه، دره زار) و مس-طلا-مولیبدن (سرکوه، آبدر) طبقه بندی کرد، درحالی که پورفیری های غنی از طلا در این زون هنوز گزارش نشده است (Shafiei & Shahabpour, 2008).

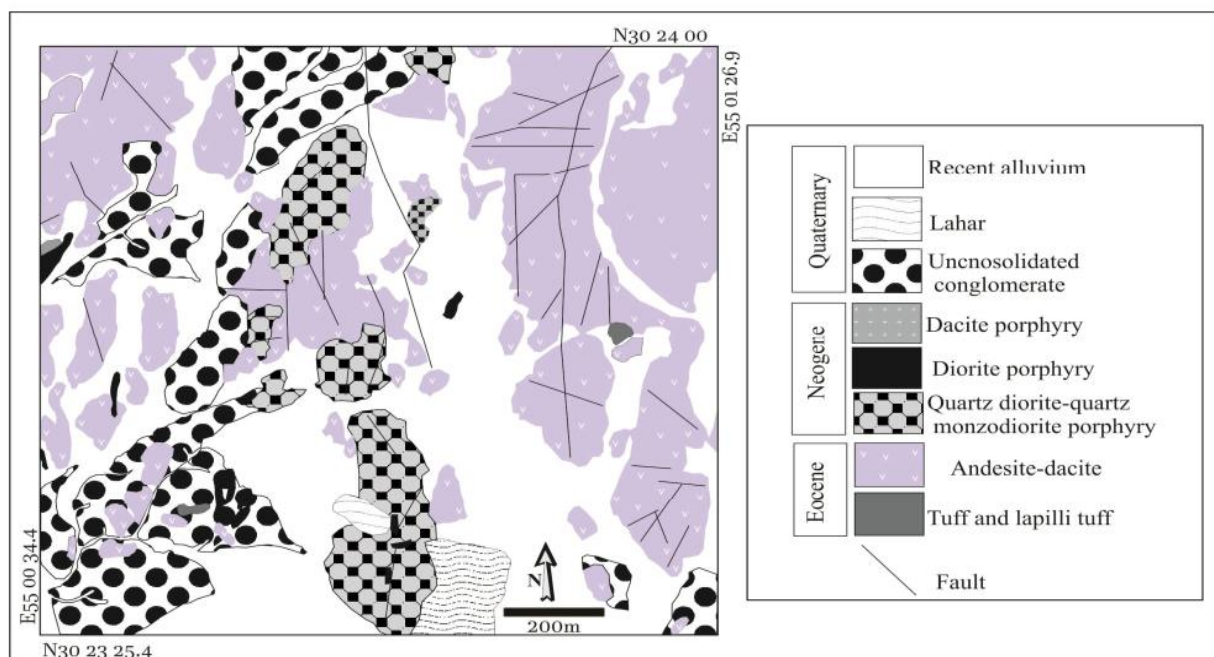


شکل (۳): عمق موهو (خاکستری سایه دار) در بخش های کمان کرمان به همراه توزیع و اندازه کانسارها و چشم اندازهای مس پورفیری تصویر داخل کادر: نقشه کانتور ضخامت پوسته زمین در ایران امروزی (ساده شده از Dehghani and Makris, 1983).

Fig (3): Moho depth (shaded gray) across the Kerman arc sectors, along with the distribution and size of porphyry copper deposits and prospects. Inset: Crustal thickness contour map of present-day Iran (simplified from Dehghani and Makris, 1983).

زمین شناسی عمومی کانسار چاه فیروزه

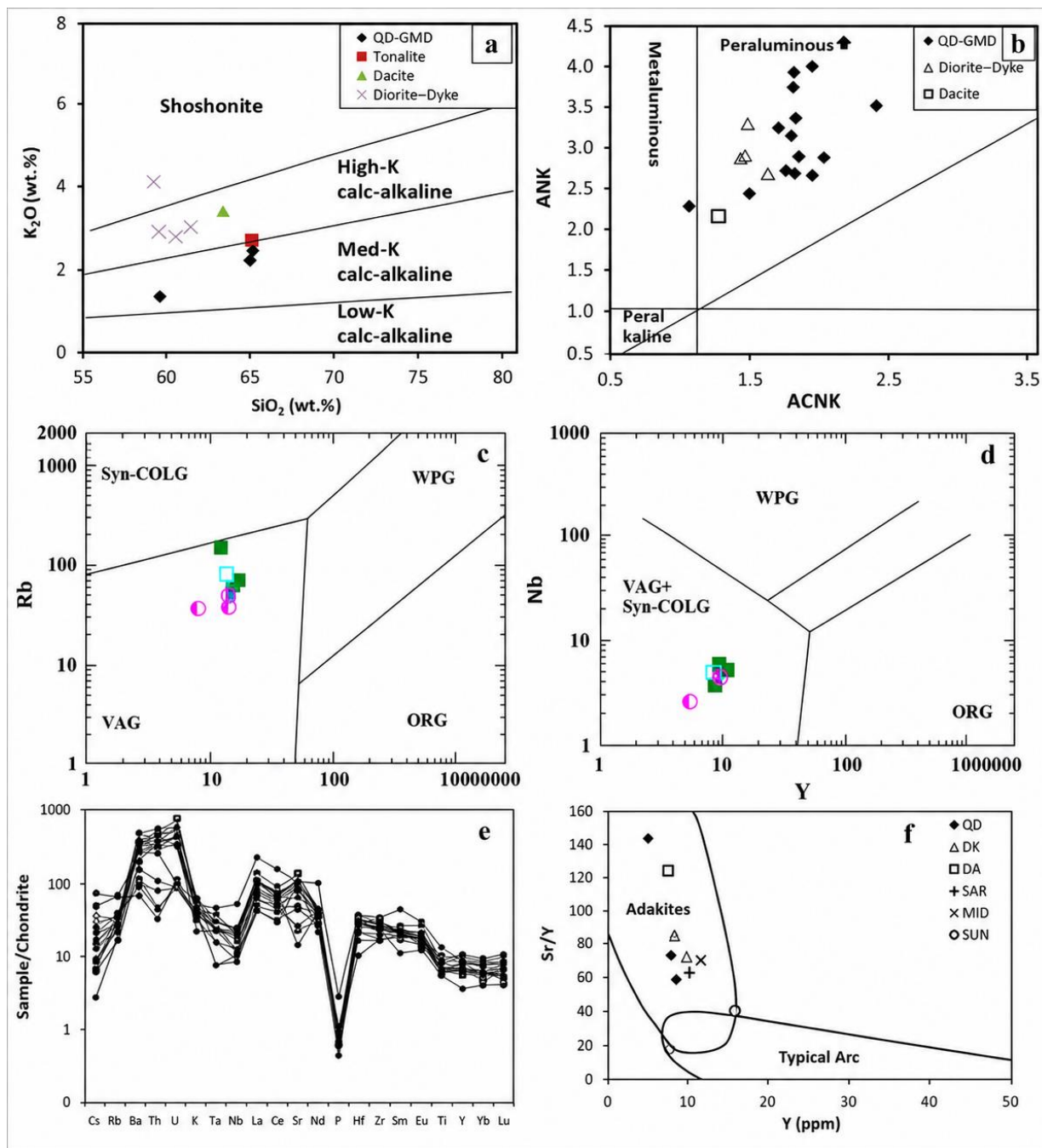
لیتولوژی منطقه را سنگ های ولکانیک بازیک تا حدواسط و سنگ های نیمه عمیق حدواسط تا اسیدی تشکیل می دهد. توده های نفوذی نیمه عمیق کشیده و ناپیوسته کوارتز دیوریت تا مونزودیوریت میوسن با راستای شمالی - جنوبی به وسیله مجموعه آتشفشانی و آذرآواری جوان پوشیده شده اند و خود به درون آندزیت ها و داسیت ها و توف های آندزیتی - داسیتی آئوسن تزریق شده اند. دایک های دیوریتی به درون توده کوارتز مونزونیتی و کوارتز دیوریتی تزریق شده اند. میزان این مجموعه داسیت های جوان هستند که در نهایت توسط لاهارها پوشیده شده اند (شکل ۴). سنگ های آتشفشانی عموماً در حاشیه کانسار تمرکز داشته و در اطراف کمپلکس ولکانوپلوتونیک چاه فیروزه دیده می شوند.



شکل (۴): نقشه زمین‌شناسی منطقه چاه فیروزه، (نقشه پایه از (NICICO, 2008) با تغییرات از (Mohammadzadeh, 2019).
 Fig (4): Geological map of the Chah Firouzeh area (base map after NICICO, 2008; modified from Mohammadzadeh, 2019).

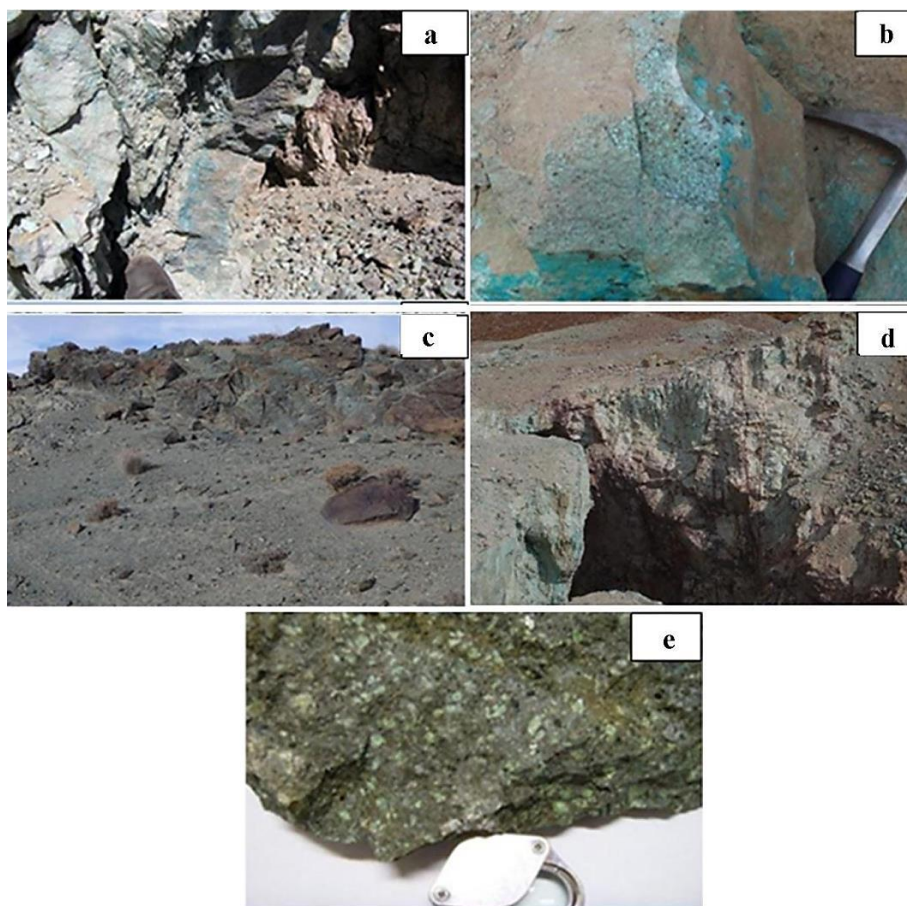
مجموعه ماگمایی گرانودیوریت و مونزونیت چاه فیروزه با سن معادل $16/3 \pm 0/1$ میلیون سال (Kazemi Mehrnia, 2010) تشکیل شده است. سری ماگمایی آن کالک‌آلکان و متالومینوس تعیین‌شده و از لحاظ تکتونیکی در حاشیه قاره‌ای-اقیانوسی تشکیل شده است. ماگمای آن خصلت آداکیتی دارد و نمودار رفتار عناصر کمیاب در منطقه حاکی از شکل‌گیری سنگ‌های منطقه در یک خاستگاه فرورانشی است (Mohammadzadeh, 2008، شکل ۵a-f).

توده‌های منطقه تحت تاثیر گسترده دگرسانی گرمابی قرار گرفته‌اند و منطقه‌بندی دگرسانی فیلیک، پروپلیتیک و پتاسیک شکل گرفته و نهایتاً کانه‌زایی مس در آن رخ داده است. رگه و رگچه‌های ژپس، پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت و سیلیس به طور وسیع در این کانسار دیده می‌شود. گاهی رخنمون‌هایی از توده پورفیری حاوی پیریت - کالکوپیریت اولیه، مالاکیت، کریزوکولا و فیروزه در بخش‌های سطحی منطقه دیده می‌شود (شکل ۶a). مجموعه اکسید و هیدروکسیدهای آهن، مالاکیت و کریزوکولا نیز در محل کانسار قابل مشاهده است (شکل ۶b). در این منطقه، معمولاً آندزیت‌ها با رخنمون‌های برجسته دیده می‌شوند (شکل ۶c). واحد آندزیتی اغلب با رخداد دگرسانی پروپلیتیک دچار دگرسانی شده است (شکل ۶d). همچنین مالاکیت و کریزوکولا در سطح توده پورفیری تشکیل شده و نیز دایک‌های دیوریتی با دگرسانی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در آن به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۶e). جوانترین رخداد ماگمایی منطقه تشکیل داسیت‌های جوان است که ماهیت کالک‌آلکان دارند. در برخی قسمت‌ها کانی‌های هماتیت، گوتیت و جاروسیت در سطح زمین قابل مشاهده بوده و در برخی قسمت‌ها کانیهای کربناته مس مالاکیت و آزوریت دیده می‌شود.



شکل (۵): مشخصات ژنتیکی ماگمای چاه فیروزه پورفیری (Mohammadzadeh, 2008)، (a) سری ماگمایی چاه فیروزه در نمودار، (b) میزان اشباع ماگمای منطقه در نمودار، (c و d) جایگاه تکتونیکی منطقه در نمودارهای (Pearce et al., 1984) توزیع عناصر کمیاب در توده‌های نفوذی منطقه که نسبت به کندریت نرمالیزه شده اند. (f) خلصت آداکیتی توده‌های نفوذی منطقه در نمودار (Kepezhinskas et al., 1997).

Fig (5): Genetic characteristics of the Chah Firouzeh porphyry magmas (Mohammadzadeh, 2008): (a) magmatic series of Chah Firouzeh on the diagram of Peccerillo & Taylor (1976); (b) magma saturation level of the region; (c and d) tectonic setting of the region on the diagrams of Pearce et al. (1984); (e) chondrite-normalized trace element distribution patterns for the intrusive bodies of the region; (f) adakitic affinity of the intrusive bodies on the diagram of Kepezhinskas et al. (1997).



شکل (۶): (a) برونزدی از توده پورفیری حاوی پیریت - کالکوپیریت اولیه و ملاکیت و کریزوکولا، (b) اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و ملاکیت و کریزوکولا در چاه فیروزه پورفیری، (c) نمایی از اندزیت‌های منطقه در دهانه یک کنده کاری قدیمی در محل کانسار، (d) نمایی از اندزیت‌های ائوسن با دگرسانی پروپلیتیکی، (e) جانشینی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز توسط ملاکیت و کریزوکولا در توده چاه فیروزه پورفیری.

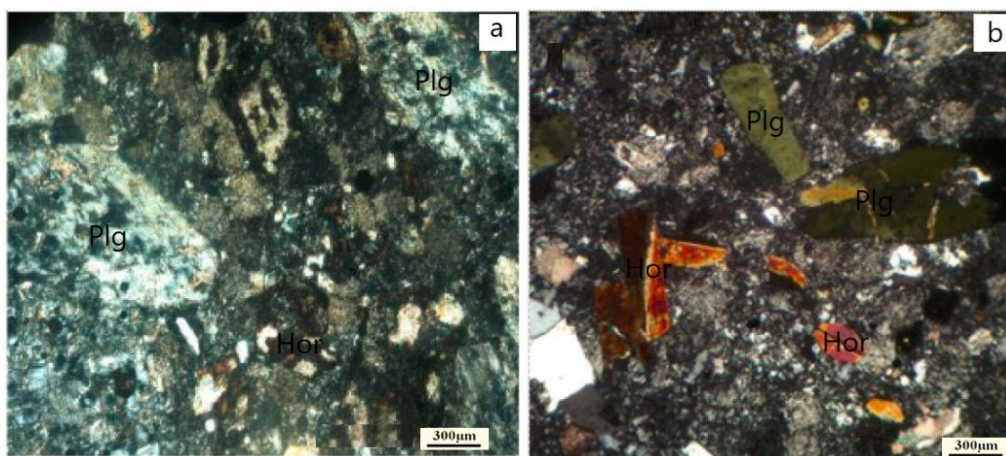
Fig (6): (a) Outcrop view of the porphyry body containing primary pyrite-chalcopyrite along with malachite and chrysocolla; (b) iron oxides and hydroxides, malachite, and chrysocolla in the Chah Firouzeh porphyry; (c) View of the andesites in the area at the entrance of an old excavation pit at the deposit site; (d) View of Eocene andesites with propylitic alteration; (e) Replacement of plagioclase phenocrysts by malachite and chrysocolla in the Chah Firouzeh porphyry body.

سنگ‌نگاری

پتروگرافی استوک چاه فیروزه پورفیری

توده پورفیری چاه فیروزه از نظر کانی‌شناسی و بافت نسبتاً یکنواخت است اما متحمل دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک با شدت‌های متفاوتی شده است به‌گونه‌ای که از نظر کانی‌شناسی و رنگ ظاهری، در گمانه‌های مختلف و حتی در یک گمانه در بخش‌های مختلف، تغییرات زیادی را می‌توان مشاهده کرد. نمونه‌های دیوریتی و دایک‌های وابسته به آن در منطقه دارای بلورهای هورنبلند و پلاژیوکلاز هستند و هیچ اثر دگرسانی را نشان نمی‌دهند. حضور فنوکریست‌های بیوتیت، هورنبلند و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای ریزدانه، بافت پورفیریتیکی را تشکیل می‌دهد و گاهی بیوتیت توسط اپیدوت و کلسیت در نمونه‌ها جانشین شده است. جایگزینی هورنبلند نیز به وسیله کلریت و کلسیت، و پلاژیوکلاز توسط کلسیت در مقاطع قابل مشاهده است (شکل ۷a). در بخش‌های حاشیه‌ای، توده پورفیری دانه‌ریزتر بوده و به‌طور محلی حاوی آنکلاوهای از اندزیت است.

فنوکرست‌های موجود در گرانودیوریت شامل پلاژیوکلاز، بیوتیت و به مقدار کمتر هورنبلند، کوارتز و آلکالی فلدسپار است. اندازه فنوکرست‌ها ۸-۱ میلی‌متر و زمینه ریز بلور سنگ از ۱-۰/۱ میلی‌متر متغیر است (شکل ۷b).



شکل (۷): تصاویر میکروسکوپی از (a) فنوکرست‌های آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از کوارتز-فلدسپار، در این تصویر فلدسپارها تا حدی سریسیتی شده و برخی فنوکرست‌ها به وسیله کلسیت جانشین شده‌اند، (b) توده دیوریتی غیردگرسان با بلورهای هورنبلند و پلاژیوکلاز که اثر دگرسانی در آن مشاهده نمی‌شود.

Fig (7): Photomicrographs of (a) alkali feldspar and plagioclase phenocrysts in a quartz-feldspar groundmass. Feldspars are partially sericitized, and some phenocrysts have been replaced by calcite; (b) Unaltered dioritic body containing hornblende and plagioclase crystals, showing no evidence of alteration. Plg: plagioclase; Hor: hornblende.

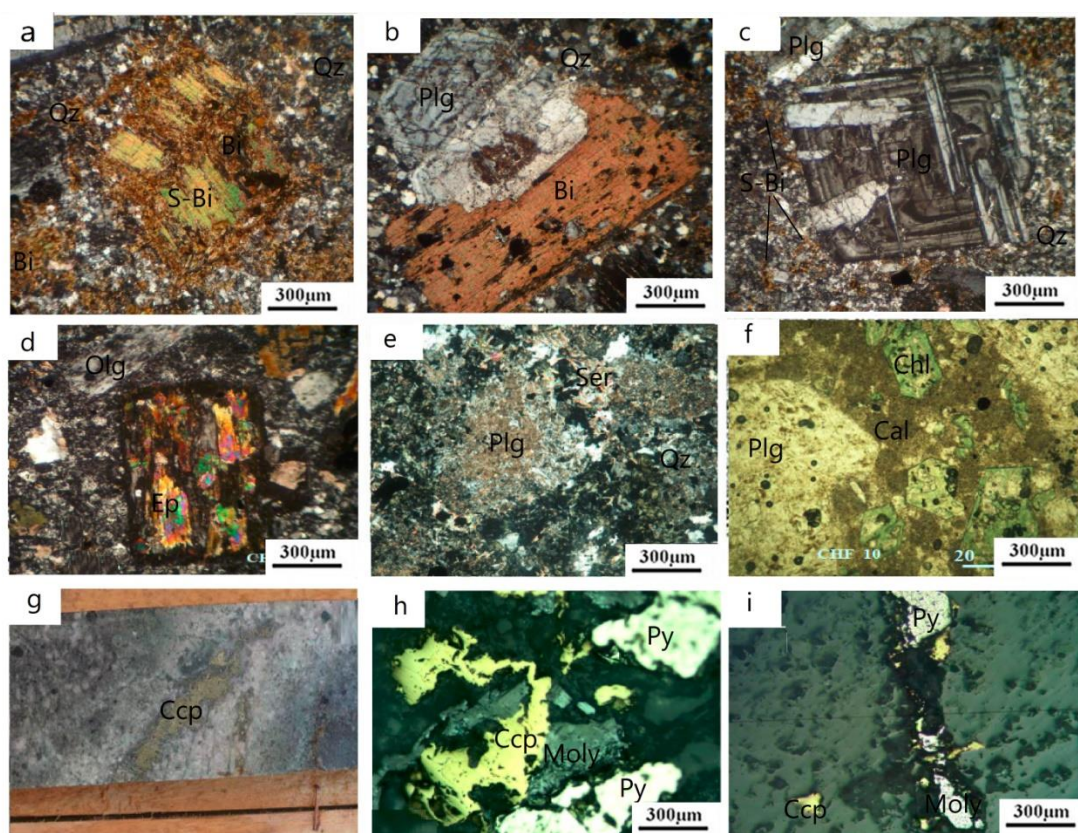
دگرسانی و آلتراسیون در چاه فیروزه پورفیری

در چاه فیروزه رخداد دگرسانی پتاسیک دارای وسعت نسبتاً زیادی است و با مجموعه کانی‌های بیوتیت $\pm$ آلکالی فلدسپار + کوارتز + پیریت + کالکوپیریت $\pm$ مولیبدنیت $\pm$ مگنتیت $\pm$ انیدریت مشخص می‌گردد. بیوتیت، فراوان‌ترین کانی در این زون دگرسانی بوده و این امر سبب شده است تا سنگ دگرسان شده رنگ تیره‌تری به خود بگیرد. دگرسانی پتاسیک در چاه فیروزه، به‌طور نامنظم توسط دگرسانی فلیک اورپرینت شده است (شکل‌های a و b و c). این دگرسانی به ویژه در اطراف رگچه‌های سیلیس - سولفید گسترش یافته و در جاهایی که این رگچه‌ها تراکم زیادی دارند، دگرسانی فلیک به‌طور کامل بر دگرسانی پتاسیک غلبه دارد و فقط قسمت‌هایی از دگرسانی پتاسیک باقی مانده است. دگرسانی پتاسیک دارای گسترش وسیعی در منطقه مورد مطالعه بوده و با کانی‌های فراوان بیوتیت و فلدسپات پتاسیک و مگنتیت و رگچه‌های انیدریت و ژپس قابل تشخیص است. دگرسانی فلیک یا کوارتز-سریسیت-پیریت گسترش بسیار زیادی در چاه فیروزه دارد و به صورت هاله‌ای، زون دگرسانی پتاسیک را احاطه کرده است (شکل ۸e). این دگرسانی با مجموعه کانی‌شناسی منطقه به‌صورت سریسیت + کوارتز + پیریت $\pm$ کلریت $\pm$ کالکوپیریت $\pm$ روتیل $\pm$ تیتانیت قابل شناسایی است. از رگچه‌های فراوان موجود در این منطقه دگرسانی که در مطالعات مقاطع نازک شناسایی شده‌اند، می‌توان به رگچه‌های Qz-Opq، Qz-Opq، Chlo-Cal $\pm$ Opq اشاره نمود (شکل‌های g و h و i).

همچنین دگرسانی پروپلیتیکی در اطراف زون فلیک گسترش دارد و با مجموعه کانی‌های اپیدوت، کلریت، کربنات‌های کلسیم و منیزیم مشخص می‌شود که جانشین فنوکرست‌های فلدسپارها، هورنبلند و بیوتیت شده‌اند. این دگرسانی مانند هاله‌ای در پیرامون منطقه دگرسانی فلیک و کانی‌سازی همراه با آن توسعه یافته و در حاشیه سیستم پورفیری در سطح زمین با رنگ سبز تیره تا سبز مایل به خاکستری دیده می‌شود که ناشی از فراوانی کلریت و اپیدوت است. دگرسانی پروپلیتیکی نیز، در سنگ‌های آندزیتی میزبان و همین‌طور در توده دیوریتی و دایک‌های وابسته به آن اتفاق افتاده است. اما این دگرسانی در توده پورفیری چاه فیروزه مشاهده نمی‌شود که می‌تواند دلالت بر نفوذ بعد از کانی‌سازی در منطقه دارد.

مجموعه کانی‌شناسی مربوط به این دگرسانی پروپلیتیک را اپیدوت + کلریت + کلسیت $\pm$ آلبیت $\pm$ سریسیت $\pm$ پیریت $\pm$ کوارتز تشکیل می‌دهد. کانی‌های فرومنیزین مانند آمفیبول و بیوتیت نیز توسط مجموعه کلریت $\pm$ اپیدوت $\pm$ کلسیت $\pm$ سریسیت جانشین شده‌اند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز کمابیش به وسیله اپیدوت $\pm$ کلسیت $\pm$ آلبیت جانشین شده است (شکل ۸f). پیریت هم در این زون دگرسانی به صورت انبوه و در اشکال افشان و رگچه‌ای دیده می‌شود.

پس از اتمام دگرسانی و کانی‌سازی در زون هیپوژن، در نهایت رخداد بالآمدگی توده کانسار، باعث فرسایش مجموعه سنگ‌ها شده است. به‌طوری که تمامی محدوده و مناطق پیرامون آن در معرض دگرسانی سوپرژن وسیع قرار گرفته است. در این شرایط، آب‌های جوی موجب اکسید شدن کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت و کالکوپیریت در بخش‌های سطحی شده و باعث تولید اسید سولفوریک شده‌اند. این نوع دگرسانی در منطقه با حضور کانی‌های رسی، سیلیسی، کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدهای آهن مانند جاروسیت، گوتیت و هماتیت قابل شناسایی است.



شکل ۸: (a) دگرسانی بیوتیتی و جانشینی فنوکریست‌های هورنبلند توسط بیوتیت ثانویه در آندزیت پورفیری چاه فیروزه، (b) بیوتیت اولیه و فنوکریست پلاژیوکلاز در دیوریت پورفیری چاه فیروزه، (c و d) بیوتیتی شدن کانی‌های اولیه سنگ به‌همراه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و اپیدوت، (e) اورپرینت زون فلیک بر روی زون دگرسانی پتاسیک و سریسیتیزاسیون در چاه فیروزه پورفیری، (f) دگرسانی پروپلیتیک در چاه فیروزه که فنوکریست‌های درشت به طور کامل بوسیله کلریت جانشین شده‌اند، (g) رگچه‌های کوارتز نوع، (D) در چاه فیروزه پورفیری که حامل کانی‌سازی کالکوپیریت و پیریت هستند، (h) کانه‌های کالکوپیریت، پیریت در چاه فیروزه پورفیری، (i) کالکوپیریت، پیریت‌های خوش وجه و مولیبدنیت در کانسار چاه فیروزه.

Fig(8): (a) Biotitic alteration and replacement of hornblende phenocrysts by secondary biotite in Chah Firouzeh andesite porphyry; (b) Primary biotite and plagioclase phenocrysts in Chah Firouzeh diorite porphyry; (c and d) Biotitization of primary rock-forming minerals along with plagioclase phenocrysts and epidote; (e) Phyllic overprint on the potassic alteration zone and sericitization in Chah Firouzeh porphyry; (f) Propylitic alteration in Chah Firouzeh, where coarse phenocrysts have been completely replaced by chlorite; (g) D-type quartz veins containing chalcopyrite and pyrite mineralization in Chah Firouzeh porphyry; (h) Chalcopyrite and pyrite ores in Chah Firouzeh porphyry; (i) Chalcopyrite, euhedral pyrite, and molybdenite

in the Chah Firouzeh deposit. Plg: plagioclase; Bi: biotite; S-Bi: secondary biotite; Ep: epidote; Ser: sericite; Chl: chlorite; Cal: calcite; Ccp: chalcopyrite; Moly: molybdenite; Py: pyrite.

کانه‌زایی در چاه فیروزه

در چاه فیروزه، کانی‌سازی عمدتاً در زون‌های دگرسانی پتاسیک و در زون‌های همپوشانی فلیک و پتاسیک و همچنین در شکستگی‌ها و یا در ارتباط مستقیم با آنها تشکیل شده است. مس به صورت نایتیو هم که احتمالاً در اثر فرایند احیاء ایجاد شده در بخش‌های گسله و در شکستگی‌ها مشاهده شده است. کانه‌زایی مس اغلب به دو صورت رگچه‌ای استوک ورک و افشان دیده می‌شود (شکل ۸ g, h, i).

در این کانسار هر سه زون سوپرژن و هیپوژن و زون لیچ یا شسته شده، تشکیل شده است. در زون شسته شده کانسار چاه فیروزه، کانی‌های هیدروکسید آهن فراوان همانند گوتیت و جاروسیت در همراهی با اکسیدهای مس مانند کریزوکولا و مالاکیت و نئوتویت دیده می‌شود. در زون اکسید، مجموعه کانی‌های اکسیدی مس شامل مالاکیت و آزوریت در ضخامت‌های متغیر تشکیل شده است. زون سوپرژن کانسار، با حضور کانی‌های کوولین و کالکوسیت در ضخامت‌های متغیر ۲۰ تا ۳۰ متر قابل شناسایی است. زون هیپوژن هم با مجموعه کانی‌های مس‌دار کالکوپیریت و بورنیت به صورت افشان و رگچه‌ای دیده می‌شود (شکل ۹ a و b).

در مطالعات مینرالوگرافی شواهدی از مقادیر زیاد کانه‌سازی مس در جنوب منطقه مورد مطالعه، نسبت به منطقه شمالی آن وجود دارد. کانه‌سازی عمده در سطح شامل مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا (مس اکسید) است که گاهی اوقات با کالکوپیریت و پیریت زیاد همراهاند (شکل ۹ c و d). کانه‌های هماتیت، گوتیت، لیمونیت و گاهی سیلیس جزو باطله‌های این کانسار محسوب می‌گردند. برآوردهای کانه‌سازی در این منطقه در حدود چند ده متر ضخامت داشته و به سمت شمال به وسیله نهشته‌های لاهاری پوشیده شده‌اند. در اطراف گسل چاه فیروزه، کانه‌زایی دارای تمرکز نسبتاً بالایی است ولی در سطح و دیواره این گسل می‌توان کانه‌هایی مثل مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، پیریت و به میزان محدودی کالکوپیریت با مقدار اندکی سیلیس و کربنات را مشاهده نمود. در این منطقه در سطح کانسار، کانی‌های مس‌دار عمدتاً از نوع اکسیدی بوده و به ندرت کالکوپیریت (گاه بشکل آلتره شده به کوولیت و دیژنیت) در همراهی با اکسیدهای آهن، سیلیس و پیریت مشاهده می‌گردد.

مطالعات گوناگون سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و مینرالوگرافی در این منطقه گویای حضور یک سیستم قوی با شبکه‌ای از رگه و رگچه‌های استوک ورک با مرکزیت دگرسانی پتاسیک است که در حاشیه به وسیله دگرسانی پروپلیتیک احاطه شده است. رگه‌ها اغلب حاوی کوارتز + انیدریت + مولیبدنیت + آلکالی فلدسپار + سریسیت در همراهی با کانه‌های پیریت + کالکوپیریت + بورنیت + مگنتیت و پیروتیت است (شکل ۹ a و b و c). در زون دگرسانی پتاسیک جایگزینی به وسیله کانی‌های ثانویه بیوتیت و آلکالی فلدسپار دیده می‌شود. در رگه‌های کوارتزی موجود در این قسمت کوارتز + کالکوپیریت + کالکوسیت + سریسیت + پیریت + مولیبدنیت + بورنیت + گالن + پیروتیت + مگنتیت + هماتیت مشاهده می‌گردد. در زون دگرسانی فلیک اغلب فلدسپات‌ها به وسیله سریسیت و کوارتز و همین‌طور پیریت ثانویه جایگزین شده و زون تیپیک کوارتز-سریسیت-پیریت را به وجود آورده‌اند (شکل ۹ e و f). در زون پروپلیتیکی رگه‌های کوارتز شیری و کلسیت و ژپیس + پیریت + مالاکیت + آزوریت + کریزوکولا + گوتیت + هماتیت دیده می‌شود. بر اساس مطالعات مینرالوگرافی صورت گرفته، توالی پارائز کانه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

بر اساس مطالعات زمین‌ساختاری، گسل چاه فیروزه و سیستم شکستگی‌های مرتبط با آن، نقش مهمی در کنترل فضایی کانه‌زایی و توسعه زون‌های دگرسانی داشته‌اند. امتداد غالب شکستگی‌ها عمدتاً شمالی-جنوبی تا شمال‌غربی-جنوب‌شرقی بوده و با روندهای ساختاری غالب منطقه ارومیه-دختر همخوانی دارند. این ساختارها به‌عنوان مسیرهای

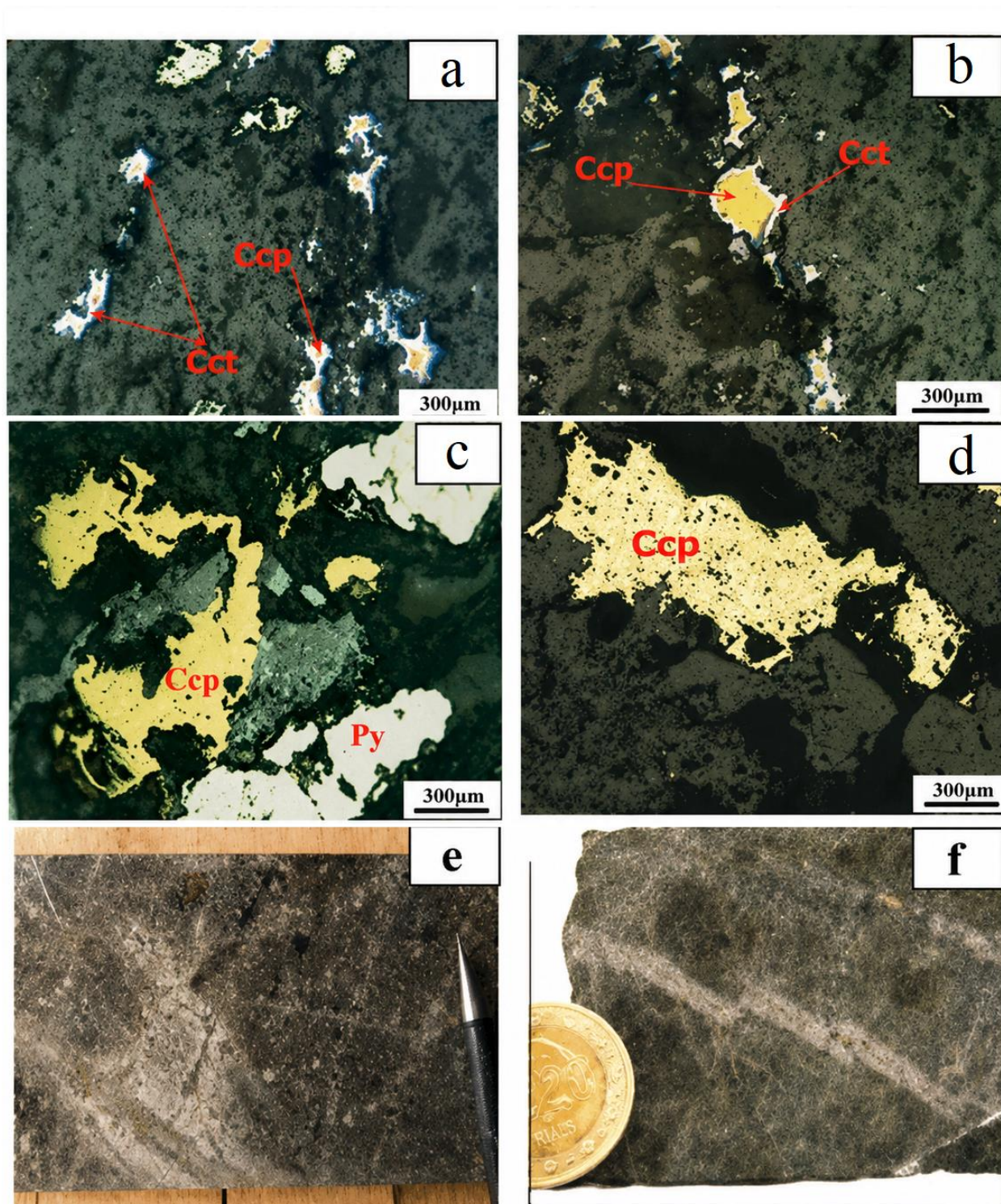
ترجیحی صعود سیالات گرمایی عمل کرده و زمینه تمرکز کانه‌زایی را فراهم نموده‌اند. همچنین تمرکز زون‌های دگرسانی فلیک و پتاسیک در مجاورت این ساختارها، بیانگر ارتباط نزدیک میان فعالیت‌های تکتونیکی و فرآیندهای گرمایی بوده است. علاوه بر این، افزایش تراکم رگه‌ها و رگچه‌های کانه‌دار (شکل f و ۹e) در محل تقاطع شکستگی‌ها نشان می‌دهد که این نواحی به‌عنوان پهنه‌های با نفوذپذیری بیشتر، شرایط مناسبی برای رسوب‌گذاری سولفیدهای مس را ایجاد کرده‌اند.

تلفیق کلیه داده‌ها نشان می‌دهند که گسل چاه فیروزه تنها به عنوان یک ساختار پس‌کانه‌زایی عمل نکرده، بلکه در مراحل مختلف تکامل سیستم پورفیری، کنترل‌کننده اصلی انتقال سیالات و تمرکز کانه‌زایی بوده است. بنابراین، شناسایی و ردیابی ادامه این ساختارها در عمق و در امتداد جانبی، می‌تواند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای اکتشافی در توسعه ذخیره کانسار مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱. توالی پاراژنتیکی کانی‌ها در کانسار چاه فیروزه (Bumeri et al., 2019)

Table 1. Paragenetic sequence of minerals in the Chah Firouzeh deposit (Bumeri et al., 2019).

Minerals	Early	Hypogene stage		Late	Supergene stage
	Potassic	Phyllic	Propylitic	Argillic	
Quartz	_____				
Pyrite	_____				
Chalcopyrite	_____				
Molybdenite	_____				
Bornite		_____			
Magnetite	_____				
Biotite	_____				
Sericite	_____				
Chlorite			_____		
Clay Minerals				_____	
Hematite					_____
Malachite					_____
Azorite					_____
Iron hydroxide					_____



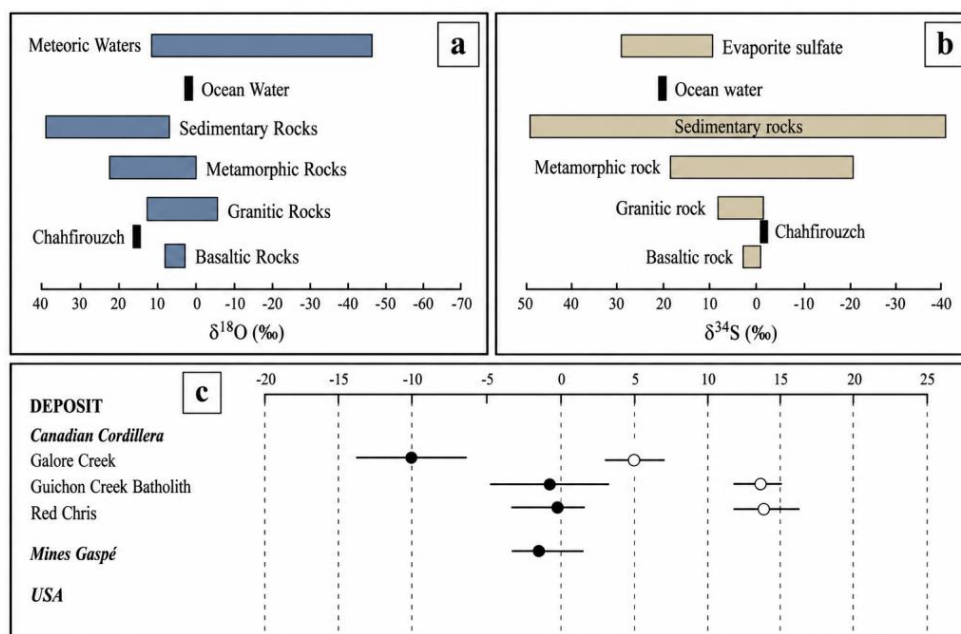
شکل (۹): (a و b) کالکوپیریت و پیریت در مقطع کانه‌دار چاه فیروزه، (c) در این تصویر کالکوسیت جانشین کالکوپیریت شده است، (d) در این تصویر کالکوپیریت به وسیله کالکوسیت جانشین شده ولی مقادیر کمی از کالکوپیریت به صورت بلورهای اولیه ریز در مقطع باقی مانده است، (e و f) رگچه‌های استوک ورک کوارتز-سولفید در کانسار مس پورفیری چاه فیروزه.

Fig (9): (a, b) Chalcopyrite and pyrite in polished sections from the Chah Firouzeh ore zone; (c) Chalcocite replacing chalcopyrite; (d) Partial replacement of chalcopyrite by chalcocite, with minor remnants of primary

fine-grained chalcopyrite; (e, f) Quartz-sulfide stockwork veins in the Chah Firouzeh porphyry copper deposit. Ccp: chalcopyrite; Py: pyrite; Cct: Chalcocite.

منشا سیالات در کانسار چاه فیروزه

دامنه تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ در نمونه‌های برداشت شده از چاه فیروزه در بازه تغییرات ۱۶،۵‰ تا ۱۹،۴‰ قرار می‌گیرد. نمونه‌ها از رگچه‌های کوارتز و کلسیت مربوط به نمونه‌هایی که تحت تأثیر دگرسانی پتاسیک با اورپرینت فلیک بوده‌اند، برداشت شده است. در این رگچه‌ها کلسیت گاه توسط کانی‌هایی مانند سریسیت، پیریت، کلریت و کوارتز همراهی شده است. بر طبق مطالعات ایزوتوپی اکسیژن، منشأ سیالات موجد کانی‌سازی در چاه فیروزه از نوع ماگمایی و جوی تعیین شده است. در نمودار a میزان ایزوتوپ سنگین اکسیژن در بازه تغییرات آبهای با منشأ سیالات ماگمایی و جوی واقع شده است. بر طبق شکل ۱۰b محدوده تغییرات ایزوتوپ سنگین گوگرد که در این محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است بازه نزدیک به صفر را نشان داده است. تغییرات ایزوتوپی گوگرد در نمونه‌های مختلف از ۲،۵‰- تا ۰،۶‰+ تغییر می‌کند. دامنه نسبت ایزوتوپی گوگرد نمونه‌ها نشان‌دهنده منشأ ماگمایی برای گوگرد می‌باشد. دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های سولفیدی مربوط به ذخیره مس چاه فیروزه از دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد در ذخایر مس پورفیری دیگر که عموماً از ۳‰- تا ۱‰+ در تغییر است، تبعیت می‌کند. دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد در چاه فیروزه مشابه دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد در ذخایر مس پورفیری ایران از جمله سونگون و میوه رود در آذربایجان شرقی و برخی از ذخایر شناخته شده جهان مانند El Teniente, Rio Belanco در آمریکای جنوبی است. در شکل ۱۰c کانسار چاه فیروزه با کانسارهای شناخته شده از جمله کانسارهای واقع در کوردیلرای کانادا و همین‌طور یکی از کانسارهای آمریکا نیز مقایسه شده است (Mohamadzadeh, 2019).

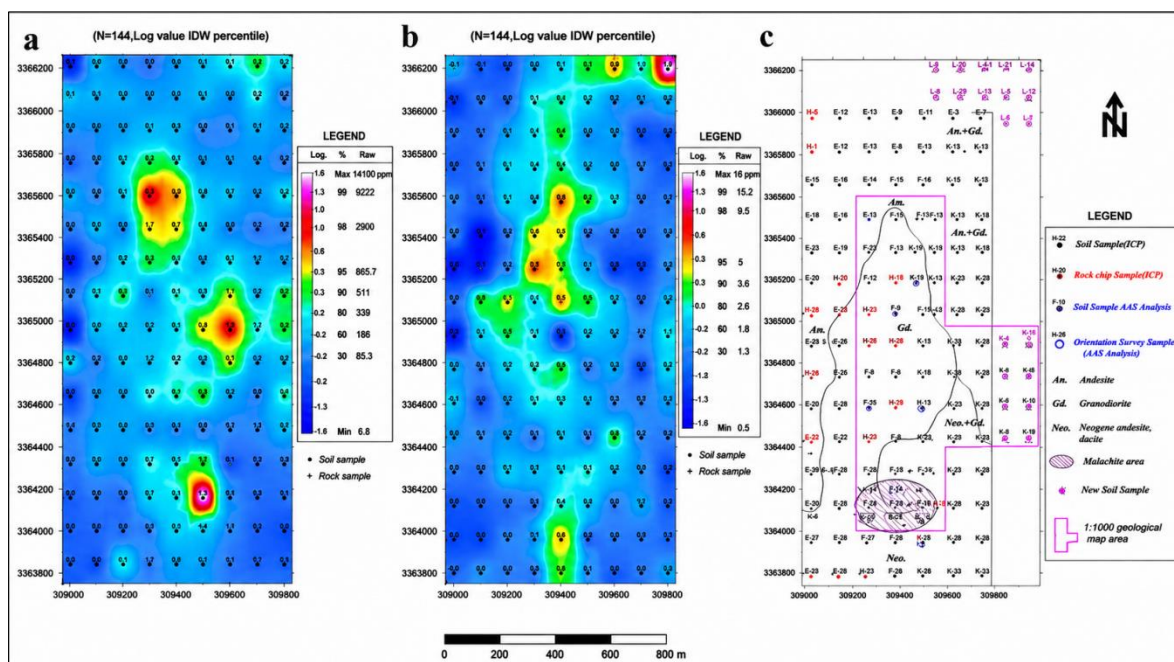


شکل (۱۰): نتایج مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن-هیدروژن و گوگرد در کانسار چاه فیروزه، (a) محدوده تغییرات ایزوتوپی گوگرد در نمونه‌های سولفیدی کانسار چاه فیروزه، در نمودار تغییرات (b) دامنه ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ در کلسیت رگچه‌ای کانسار مس چاه فیروزه در نمودار تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ ، (c) مقایسه نتایج ایزوتوپی گوگرد کانسار چاه فیروزه نسبت به دیگر معادن مس پورفیری در کلاس جهانی (Mohamadzadeh, 1995).

Figure (10). Results of oxygen-hydrogen and sulfur stable isotope studies in the Chah Firouzeh deposit: (a) Sulfur isotope composition range for sulfide samples from the Chah Firouzeh deposit, shown on the diagram of Hoefs (2009); (b) $\delta^{18}\text{O}$ isotope range for vein calcites in the Chah Firouzeh copper deposit; (c) Comparison of sulfur isotope data from the Chah Firouzeh deposit with those of other world-class porphyry copper deposits (Mohamadzadeh, 1995).

اکتشافات ژئوشیمیایی

در ادامه مطالعات اکتشافی در کانسار چاه فیروزه، در سال ۱۳۸۴ مطالعات ژئوشیمیایی توسط امور اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران در وسعتی به اندازه ۲/۱ کیلومتر مربع با روش خاک در سلول‌های ۱۰۰×۱۰۰ متری تحت پوشش قرار گرفته است. نمونه‌های برداشت شده از این محدوده حدود ۱۲۹ نمونه خاک بوده که با روش ICP، در ایران آنالیز شده‌اند. در تجزیه و تحلیل نتایج آنالیز نمونه‌ها، مراحل داده‌پردازی تک‌متغیره، دومتغیره و چندمتغیره انجام شده و همبستگی‌های معناداری در بین عناصر طلا، مس، مولیبدن، آرسنیک، بیسموت و همچنین عناصر سرب، روی، آنتیموان، بیسموت، و آرسنیک دیده می‌شود که نشان‌دهنده پارائز یک مجموعه از عناصر ارزشمند کانی‌سازی در یک سیستم پورفیری است. داده‌پردازی نمونه‌ها در دو فاکتور شامل مجموعه کامل عناصر (Zn, Pb, Sb, Mn, Ag, Hg, Bi و Bi, Cu, As, Au و Sr و Ti) صورت گرفت که با نتایج مطالعات کانی‌سازی اصلی چاه فیروزه انطباق نشان داده است. مجموعه بررسی‌ها نشان می‌دهد که عناصر مس، مولیبدن، و طلا در مرکز منطقه و منطبق بر رخنمون‌های گرانودیوریتی است، این مناطق در نقشه زمین‌شناسی و در مطالعات صحرایی نیز منطبق بر کانی‌سازی مس پورفیری در محل رگه‌ها و رگچه‌های نوع (A, B, D) و آلتراسیون‌های (فیلیک، پتاسیک و پروپلیتیک) می‌باشد. در کل مقدار مس نمونه‌های منطقه بین حداقل ۱۵۰ تا حداکثر ۳۲۴۰ ppm تغییرات نشان داده است. نتایج کلی و نهایی اکتشافات ژئوشیمیایی فوق در این منطقه در شکل ۱۱ برای عنصر مس و مولیبدن آورده شده است. در شکل ۱۱c هم ضمن نشان دادن مناطق آنومال، مناطق پیشنهادی جهت تکمیل عملیات اکتشافی نیز آورده شده است.



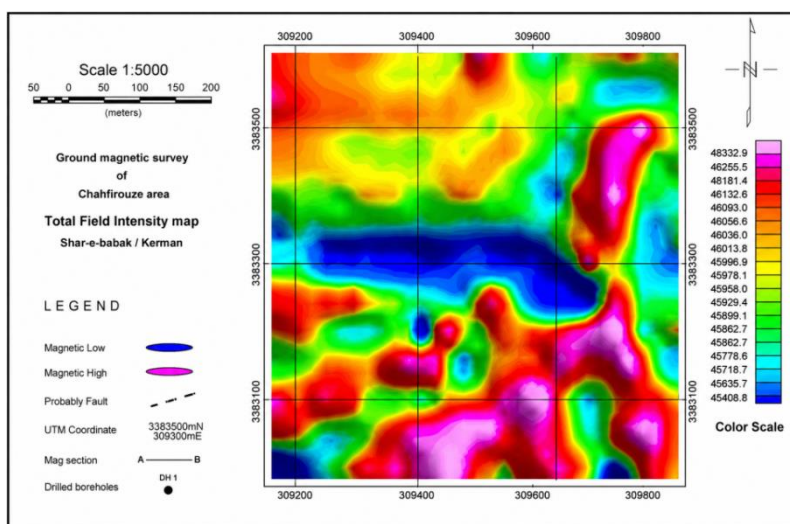
شکل (۱۱): (a) نقشه پراکندگی ژئوشیمیایی مس و استخراج آنومالی‌های آن با استفاده از داده‌های نرمال‌سازی شده، (b) نقشه پراکندگی ژئوشیمیایی عنصر همراه مولیبدن و استخراج آنومالی‌های آن با استفاده از داده‌های نرمال‌سازی شده، (c) محدوده پیشنهادی جهت انجام مطالعات بیشتر براساس نتایج اکتشاف ژئوشیمیایی عناصر در کانسار چاه فیروزه.

Figure (11). (a) Geochemical distribution map of copper and extraction of its anomalies using normalized data; (b) Geochemical distribution map of molybdenum and extraction of its anomalies using normalized data; (c) Proposed area for further studies based on geochemical exploration results in the Chah Firouzeh deposit.

مطالعات ژئوفیزیک منطقه چاه فیروزه

برداشت ژئوالکتریک در محدوده مطالعاتی در دو فاز مختلف و به دو روش سونداژزنی الکتریکی با استفاده از آرایش الکترودی شلامبرژه و توموگرافی الکتریکی با استفاده از آرایش الکتریکی قطبی-دوقطبی انجام شده است. در این محدوده تعداد ۴۰۰ سونداژ ژئوالکتریک و ۶۰۰۰ نقطه برداشت توموگرافی الکتریکی هم انجام گردید. معمولاً فاصله سونداژها، نقاط و پروفیل‌ها بسته به موقعیت قرارگیری، زمین‌شناسی و تکتونیک محدوده تعیین می‌شود. فاصله نقاط و پروفیل‌ها به نحوی تعیین می‌شود که دقت مطالعات جهت تعیین دقیق‌تر بی‌هنجاری‌ها افزایش یابد. پردازش و مدل‌سازی وارون دو بعدی داده‌ها نیز، به وسیله نرم‌افزار dinv^2Res انجام شده است. این نرم‌افزار، داده‌های میدانی برداشت شده را به فرمت مناسب دریافت کرده و با استفاده از روش‌های معکوس‌سازی، مدل‌سازی انجام می‌دهد. و سپس مدل‌های سه‌بعدی فنی و بلوکی مقاومت ویژه برای قسمت‌های مختلف منطقه مطالعاتی تهیه می‌گردد.

مگنتیت به صورت افشان و همین‌طور رگچه‌ای، همراه با کانی‌های سولفیدی یا مستقل از آن‌ها وجود دارد. مقدار مگنتیت در چاه فیروزه، در مقایسه با برخی از پورفیری‌های دیگر چندان زیاد نیست و این امر باعث شده است که آزمون اکتشاف با روش مگنتومتري در بخش جنوبی این ذخیره، چندان موفقیت‌آمیز نباشد. دو گمانه ۶ و ۱۰ بیشترین عیار مس را در بین چاه‌های بخش جنوبی داشته‌اند. همچنین دگرسانی غالب در محدوده بین این دو گمانه، دگرسانی پتاسیک است. با توجه به این دو پدیده انتظار می‌رفت که بیشترین شدت میدان مغناطیسی در این محدوده قرار گیرد. اما همان‌طور که شکل ۱۲ نشان داده شده، شدت میدان مغناطیسی در این محدوده چندان بالا نیست و برعکس، بیشترین شدت میدان مغناطیسی در سنگ‌های آندزیتی در حاشیه توده پورفیری دیده می‌شود.



شکل (۱۲): نقشه شدت مغناطیسی کل در بخش جنوبی محدوده اکتشافی چاه فیروزه، (NICICO, 2008)

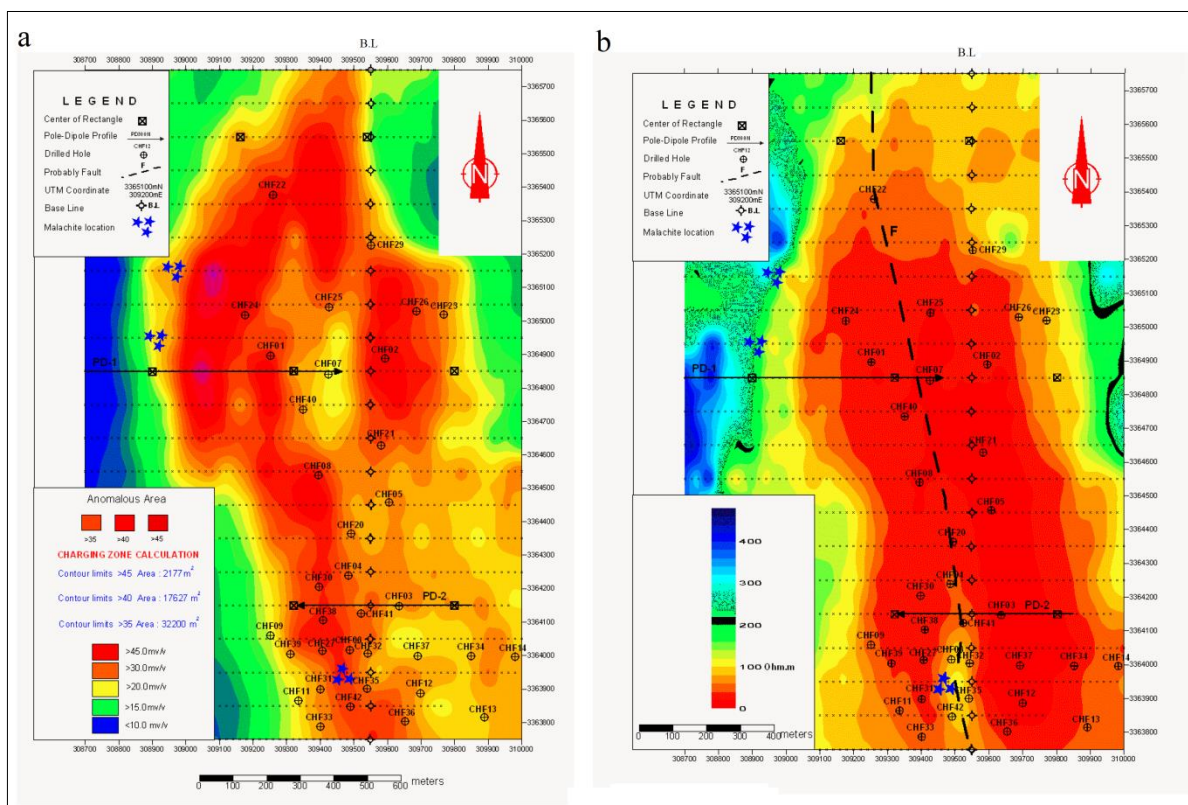
Fig (12): Total magnetic intensity map of the southern part of the Chah Firouzeh exploration area (NICICO, 2008).

در مطالعه ژئوالکتریک از آرایش‌های مستطیلی و قطبی - دو قطبی در وسعتی بالغ بر ۲/۶ کیلومتر مربع استفاده شده است. عملیات معکوس‌سازی نیز به روش هموار جهت پردازش داده‌های IP/RS استفاده شده است. علاوه بر این جهت ردیابی

زون پتاسیک هم مطالعات مغناطیس‌سنجی انجام گرفته است. نقشه خطوط منحنی هم میزان بارپذیری، گویای حداکثر شدت بارپذیری به mv/v ۵۳/۰ و حداقل آن mv/v ۳/۰ می‌باشد (شکل ۱۳a). بارپذیری با شدت بالا منطبق با کانه‌زایی در سنگ‌های آتشفشانی بوده و به‌عنوان ناهنجاری IP در نظر گرفته می‌شود. شدت اندازه‌گیری شده به صورت بی‌هنجاری ژئوفیزیکی می‌تواند ناشی از تراکم مواد سولفور و یا ضخامت آن و یا نزدیکی آن به سطح زمین و حتی پراکندگی بیشتر دانه‌های کانی‌سازی به صورت افشان باشد. در این مطالعات بی‌هنجاری‌های با شدت بیشتر از mv/v ۴۵/۰ در منطقه مرتبط به کانی پیریت و شدت‌های بین ۳۰/۰ - mv/v ۴۰/۰ در رابطه با کانی‌سازی مس بوده است.

نقشه مقاومت ظاهری منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۳b نشان داده شده است. نتایج داده‌های نقشه مقاومت ظاهری می‌تواند اجزای زمین‌شناسی مختلف از جمله مرز تشکیلات زمین‌شناسی، وجود گسل‌های احتمالی و روند آن‌ها، وضع طبقات زیرین، ضخامت آبرفت و محل تجمع مواد رسانا را تعیین نماید. با توجه به جنس سنگ‌های منطقه که عموماً آندزیتی - داسیتی است تغییرات مقاومت ظاهری درون آن‌ها یکسان بوده و مقاومت ظاهری تا ۵۰ اهم متر را نشان می‌دهد. نقشه مقاومت ظاهری، محدوده مورد مطالعه را به دو قسمت Resistive (پیرامون کانسار) و Conductive (بخش مرکزی) تقسیم می‌کند. مقاومت ظاهری در بخش مقاوم با شدت بیش از ۲۰۰ اهم‌متر، و در سنگ‌های دگرسان شده به حداقل خود یعنی ۵۰ اهم متر می‌رسد. انطباق نسبتاً خوبی که میان مقادیر بارپذیری بالا در (شکل ۱۳a) و مقاومت ظاهری کم در (شکل ۱۳b) در محل گسل اصلی (براساس روند منحنی‌ها و تغییرات مقاومت ظاهری) دیده می‌شود (مثل گسل و یا کنتاکت F₁). مقاومت ظاهری سنگ‌های دگرسان در این منطقه در مقدار حداقل یعنی ۵۰ اهم متر اندازه‌گیری شده است. محل گسل‌های اصلی در این ناحیه با مقادیر بارپذیری بالا و مقاومت ظاهری کم تطابق دارد.

جهت بررسی عمقی بی‌هنجاری‌ها در نقشه‌های بارپذیری و مقاومت ظاهری، و چگونگی قرار گرفتن و ابعاد آن‌ها، از اندازه‌گیری دو شبه مقطع بارپذیری و مقاومت ظاهری PD-1 و PD-2 استفاده گردیده که تا حدود ۳۰۰ متری از سطح زمین قرار داشته‌اند.



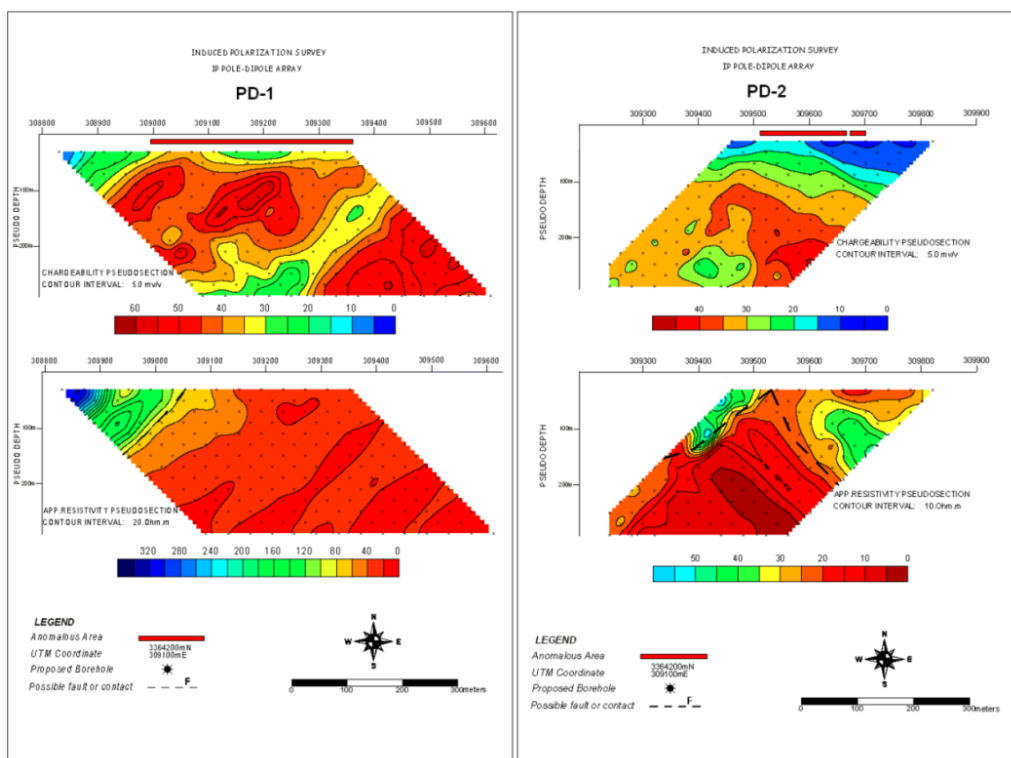
شکل (۱۳): (a) نقشه مقاومت ظاهری، (b) نقشه بارپذیری در چاه فیروزه، (NICICO, 2008)

Fig (13): (a) Apparent resistivity map; (b) Chargeability map of the Chah Firouzeh area (NICICO, 2008).

در این منطقه نقشه شبه مقطع بارپذیری و مقاومت ظاهری PD-1 به طول بیش از ۱۰۰۰ متر با فواصل الکترودی ۴۰ متر و تا عمق نفوذ ۳۰۰ متر با آرایش قطبی - دو قطبی طراحی و مطالعه گردیده است (شکل ۱۴a). تصاویر نمایانگر محدوده‌های بی‌هنجاری IP در نقشه بارپذیری در این شبه‌مقطع نیز صدق می‌کند و گسترش آن‌ها در اعماق نیز بیشتر تایید می‌شود. حداکثر و حداقل شدت بارپذیری در این شبه‌مقطع برابر $65/0$ mv/v جزو بی‌هنجاری بوده، و دو زون بی‌هنجاری نیز مشاهده می‌گردد که شیب آن‌ها به طرف غرب بوده و در عمق گسترش زیادی را نشان می‌دهند. از بررسی شبه مقطع مقاومت ظاهری نتیجه می‌شود که شدت مقاومت ظاهری بر روی زون آلتراسیون همانند نقشه مقاومت ظاهری مقدار حداقلی یعنی ۲۰ اهم متر را نشان می‌دهد. حداقل و حداکثر مقاومت ظاهری اندازه‌گیری شده در این شبه‌مقطع به ۵ و ۳۴۰ اهم متر رسیده است.

نواحی با بارپذیری بالا، مقاومت پایین را نشان داده و یکدیگر را تایید می‌کنند. داده‌های به‌دست آمده از روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی معکوس حاکی از وجود عمق احتمالی کانه‌زایی در بخش غربی کانسار چاه فیروزه در حدود ۲۰ متر و در بخش شرقی در حدود ۳۰ متری از سطح زمین است.

نقشه شبه‌مقطع بارپذیری و مقاومت ظاهری PD-2 به طول تقریبی ۷۰۰ متر و با فواصل الکترودی ۴۰ متر با آرایش قطبی - دو قطبی در شکل ۱۴b نشان داده شده است. حداکثر شدت بارپذیری اندازه‌گیری شده به $50/0$ mv/v و حداقل آن به $10/0$ mv/v رسیده است. در این شبه مقطع امتداد زون بی‌هنجاری IP کنترل شده و از شدت آن کاسته شده است که احتمالاً حضور کانی‌سازی پیریت و کالکوپیریت دلیل کاهش شدت IP بوده است. در مدل‌سازی معکوس حداکثر مقاومت ظاهری بیش از ۳۰۰ اهم متر و حداقل آن به ۵ اهم متر میرسد که با شبه مقطع بارپذیری تطابق کامل داشته و یکدیگر را تایید می‌نمایند.

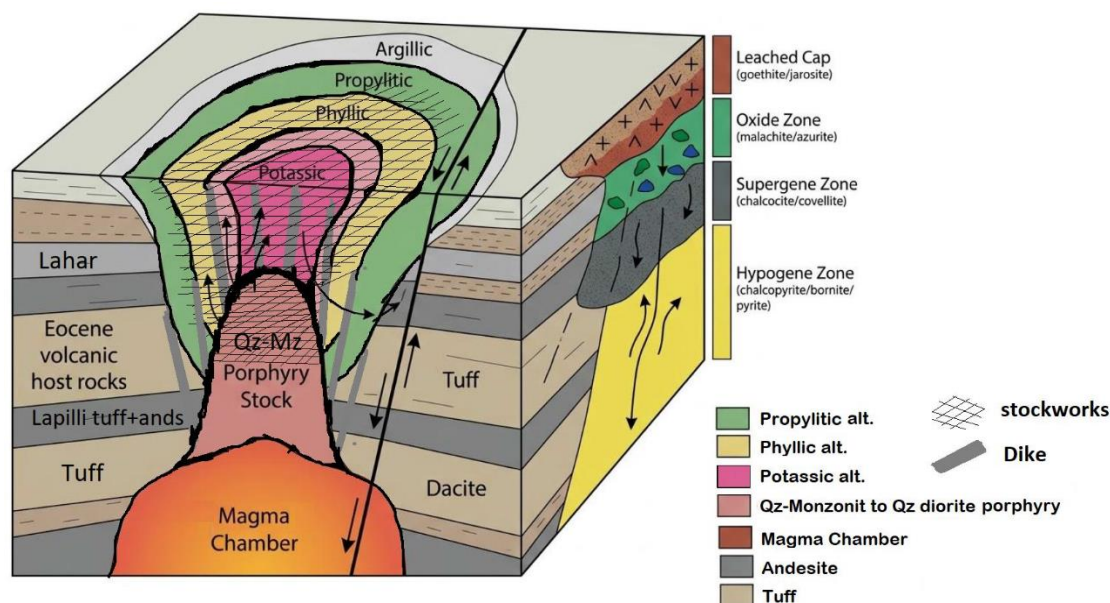


شکل (۱۴): (a) شبه‌مقطع بارپذیری و مقاومت ظاهری در مقطع PD-1، (b) شبه‌مقطع بارپذیری و مقاومت ظاهری در مقطع PD-2

2 در منطقه چاه فیروزه (NICICO, 2008)

Fig (14): (a) Chargeability and apparent resistivity pseudosections along section PD-1; (b) Chargeability and apparent resistivity pseudosections along section PD-2 in the Chah Firouzeh area (NICICO, 2008).

مدل‌های تهیه شده از داده‌های خام نشان می‌دهد که عمق احتمالی توده معدنی از سطح زمین در بخش غربی حدود ۴۰ متر است. بررسی وضعیت بی‌هنجاری بارپذیری از قبیل عمق، شیب و گسترش مواد معدنی و تعیین نقاط حفاری، گویای عمق ۲۰ متر در بخش غربی و حدود ۳۰ متری در بخش شرقی، از سطح زمین است. در این بررسی، با تلفیق جامع و کامل کلیه مطالعات صورت گرفته در چاه فیروزه شامل مطالعات سنگ‌شناسی و ژئوشیمی ماگما، کانی‌زایی و مکانیسم اثر سیالات هیدروترمال، اکتشافات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی، در نهایت مدل کانساری چاه فیروزه ترسیم گردید که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.



شکل (۱۵): مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی عمقی کانسارچاه فیروزه بر اساس ترکیب واحدهای سنگی و دگرسانی‌ها.
 Fig (15): Three-dimensional geological model of the Chah Firouzeh deposit, based on the integration of lithological units and alteration zones.

نتیجه‌گیری

کانسار مس چاه فیروزه در بخش جنوبی کمان ماگمایی ارومیه-دختر و در محدوده کمربند متالوژنی مس کرمان قرار گرفته است. ویژگی‌های سنگ‌شناسی، الگوهای دگرسانی، نوع کانه‌زایی و شواهد ساختاری نشان می‌دهد که این کانسار از بسیاری جهات با سیستم‌های مس پورفیری کلاسیک در جنوب شرق ایران شباهت دارد. توسعه دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک و پروپلیتیک در کنار حضور رگه‌ها و رگچه‌های سولفیدی، بیانگر نقش مؤثر سیالات ماگمایی در مراحل مختلف تکامل سیستم کانه‌ساز است.

نتایج کانه‌نگاری نشان می‌دهد که کانه‌زایی اولیه عمدتاً شامل کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت بوده و این مجموعه کنایی در اثر فرآیندهای برون‌زاد و سوپرژن دچار دگرسانی و غنی‌شدگی ثانویه شده است. حضور کانی‌های ثانویه حاصل از اکسیداسیون و جانشینی، بیانگر تأثیر فرآیندهای هوازدگی و گردش سیالات سطحی در بازتوزیع عناصر فلزی و ارتقای عیار بخش‌هایی از ذخیره است.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این بررسی، نقش کنترل‌کننده ساختارهای زمین‌شناسی در تمرکز کانه‌زایی است. گسل چاه فیروزه و سیستم شکستگی‌های مرتبط، به‌عنوان مسیرهای اصلی انتقال سیالات گرمایی عمل کرده و تمرکز زون‌های دگرسانی و کانه‌زایی در مجاورت این ساختارها مشاهده می‌شود. افزایش تراکم رگه‌ها و رگچه‌های کانه‌دار در محل تقاطع شکستگی‌ها نیز نشان می‌دهد که این نواحی به دلیل نفوذپذیری بالاتر، شرایط مساعدتری برای رسوب‌گذاری سولفیدهای مس فراهم کرده‌اند. از این‌رو، کنترل ساختاری را می‌توان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تکامل سیستم کانه‌ساز چاه فیروزه دانست.

تلفیق نتایج اکتشافات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی نیز مؤید تداوم کانه‌زایی در عمق است. نتایج مدل‌سازی داده‌های IP-RS، وجود نواحی با قابلیت شارژپذیری بالا را در بخش‌های مختلف محدوده نشان می‌دهد که با زون‌های شناخته‌شده دگرسانی و کانه‌زایی همخوانی دارند. این موضوع بیانگر آن است که پتانسیل اکتشافی محدوده صرفاً به رخنمون‌های سطحی محدود نبوده و ادامه ذخیره در عمق قابل انتظار است.

تمامی شواهد زمین‌شناسی، کانه‌نگاری، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و تحلیل‌های ساختاری نشان می‌دهد که کانسار چاه فیروزه یک سیستم مس پورفیری وابسته به فعالیت‌های ماگمایی کالک‌آلکالن مرتبط با فرورانش نئوتتیس است. شناخت ارتباط میان ساختارهای زمین‌شناسی و تمرکز کانه‌زایی، علاوه بر تبیین مدل ژنتیکی ذخیره، می‌تواند به‌عنوان راهنمای مؤثری در طراحی برنامه‌های اکتشافی آینده در محدوده چاه فیروزه و سایر بخش‌های کمربند مس کرمان مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Beane, R., & Titley, S. (1981). Part II. Hydrothermal Alteration and Mineralization.
- Bumeri, M., Biyabangard, H., & Zeinodin, Z. (2019). Petrology, mineralogy, and alteration of the northern part of the Chah-Chah porphyry copper deposit. *Journal of Economic Geology*, 11(1), 1–15. In Persion. <https://doi.org/10.22067/ECONG.V11I1.63353>
- Dehghani, G. and Makris, J. (1983) The gravity field and crustal structure of Iran. *Geological Survey of Iran*, 51, 51-68.
- Heidari, M., Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J., & Saki, A. (2019). Physicochemical attributes of parental magma in collisional porphyry copper systems; using biotite chemistry, case study: Chahfiruzeh porphyry copper deposit. *Journal of Economic Geology*, 10(2), 561-586. <https://doi.org/10.22067/ECONG.V10I2.65652>
- Hezarkhani, A. (2009). Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah-Firuzeh porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3), 254-264. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.09.002>.
- Hezarkhani, A., & Hajizadeh, F. (2011). Geochemical Investigations of mineralizing fluid, and economic evaluation based on Fluid Inclusion Studies in the Chah-Firuzeh Porphyry Copper Deposit, North of Shahre Babak, Kerman Province. *Advanced Applied Geology*, 1(2), 43-53. (In persian)
- Hoefs, J. (2009). Stable isotope geochemistry: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05406-2>
- Hollings, P., Cooke, D., & Clark, A. (2005). Regional geochemistry of Tertiary igneous rocks in central Chile: Implications for the geodynamic environment of giant porphyry copper and epithermal gold mineralization. *Economic Geology*, 100(5), 887-904. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.100.5.887>
- Kay, S. M., & Mpodozis, C. (2001). Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *Gsa Today*, 11(-), 4-9. [https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2001\)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2001)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2)
- Kazemi Mehrnia, A. (2010). Studies of Porphyry Copper Deposits in the Kerman Zone (Ph.D. thesis). Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persion).
- Kepezhinskas, P., McDermott, F., Defant, M. J., Hochstaedter, A., Drummond, M. S., Hawkesworth, C. J., . . . Bellon, H. (1997). Trace element and Sr Nd Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis. *Geochimica et cosmochimica acta*, 61(3), 577-600. <https://doi.org/10.1029/2019JB019237>.
- Lips, A. L. (2002). Correlating magmatic-hydrothermal ore deposit formation over time with geodynamic processes in SE Europe. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.204.01.05>
- McInnes, B. I., Evans, N. J., Fu, F. Q., & Garwin, S. (2005). Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy and geochemistry*, 58(1), 467-498. https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-94-007-6326-5_228-1
- Mohammadzadeh, Z. (2019). Geology, alteration and copper mineralization in the Chah Firouzeh area, Babak district, Kerman Province (M.Sc. thesis). *Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*. [10.22067/ECONG.V10I2.65652](https://doi.org/10.22067/ECONG.V10I2.65652)
- National Iranian Copper Industries Company (NICICO). (2008). Final report of exploration operations of the Chah Firouzeh porphyry copper deposit. Internal exploration report.
- Nedimovic, R. (1973). Exploration for ore deposits in Kerman region. *Geological Survey of Iran Report*, 53, 247. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1883994>
- Neubauer, F., Lips, A., Kouzmanov, K., Lexa, J., & Ivaşcanu, P. (2005). 1: Subduction, slab detachment and mineralization: The Neogene in the Apuseni Mountains and Carpathians. *Ore Geology Reviews*, 27(1-4), 13-44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.002>

- Peccerillo, A., & Taylor, S. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1), 63-81. <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00384745#page-1>.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. (1984) Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Richards, J. P., Boyce, A. J., & Pringle, M. S. (2001). Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, 96(2), 271-305. <https://eprints.gla.ac.uk/806/>
- Shafiei, B., Haschke, M., & Shahabpour, J. (2009). Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44(3), 265-283. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Shafiei, B., & Shahabpour, J. (2008). Gold distribution in porphyry copper deposits of Kerman region, Southeastern Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 19(3): 247-260. <http://jsciencs.ut.ac.ir>
- Shahabpour, J., & Kramers, J. (1987). Lead isotope data from the Sar-Cheshmeh porphyry copper deposit, Iran. *Mineralium Deposita*, 22(4), 278-281. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00204520>
- Sillitoe, R. (1997). Characteristics and controls of the largest porphyry copper- gold and epithermal gold deposits in the circum- Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3), 373-388. <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=2049748>
- Sillitoe, R. H. (1972). A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67(2), 184-197. <https://www.geokniga.org/books/41653>
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Soori, M., Etemadi, B., & Ahmadnejad, F. (2013). Turquoise mineral occurrence in the Chah Firouzeh porphyry copper deposit. 22nd Iranian Conference on Crystallography and Mineralogy.
- Stöcklin, J. (1974). Possible ancient continental margins in Iran. In *The geology of continental margins* (pp. 873-887): Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6_64
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J.-F., Zhao, Z.-H., Jian, P., & Zi, F. (2007). Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. *The Journal of Geology*, 115(2), 149-161. <https://doi.org/10.1086/510643>
- Zhang, L., Xiao, W., Qin, K., & Zhang, Q. (2006). The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 41(2), 188-200. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0058-6>.