



Research Article

Elemental zonation and geochemistry of sulphide ore of the Ab-Bagh sedimentary-exhalative Zn-Pb deposit, southeastern margin of the Malayer-Esfahan metallogenic belt

Mehdi Movahednia¹, Ebrahim Rastad^{1*} , Abdorahman Rajabi², Francisco Javier González Sanz³

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

2-School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

3-Marine Geology Division, Geological Survey of Spain (IGME), Madrid, Spain

Received: 15 Jun 2019 Accepted: 02 Jan 2020

Extended Abstract

Introduction

The Ab-Bagh Zn-Pb deposit is located in the southeastern part of the Malayer-Esfahan metallogenic belt (MEMB). A large number of Zn-Pb deposits in the MEMB (approximately 170 deposits), are hosted by early Cretaceous carbonate rocks, and few of them are hosted by Jurassic detrital and organic matter-rich sedimentary rocks. In this study, we present the results obtained from fieldwork, ore and host rock petrographic studies, main oxides, trace and rare earth elements analysis and chemistry of sulfide minerals.

Materials and Methods

This study focused on the geochemistry of both of the two ore-bearing horizons that constitute the Ab-Bagh deposit (12 samples). Trace and rare earth elements analysis were conducted using an Agilent 7500ce ICP-MS instrument, Zn and Pb were analyzed via ICP-OES and main oxides were determined via XRF in the IGME central laboratory, Barcelona, Spain. To determine chemistry of sulfide minerals, four polished thin sections were studied using EPMA in IGME central laboratory.

Results and Discussion

Ore-bearing horizons of the Ab-Bagh deposit are hosted in the late Jurassic-early Cretaceous clastic-carbonate sequence. The northeast-trending, steeply southeast-dipping rocks have been subdivided into five units. Based on position, there are two zinc- and lead-bearing stratigraphic ore horizons. Ore horizon 1 is hosted by late Jurassic-early Cretaceous black shale and siltstone. The wedge-shaped ore body is located close to a synsedimentary fault. Petrographic studies indicate that mineralization comprises three sulfide ore facies: stockwork, bedded and massive ore facies. Ore horizon 2 occurs in early Cretaceous carbonates and comprises of massive ore facies that are concordant with host rock layering; it is also underlain by stockwork facies. Textures include framboidal, laminated, breccia, replacement, massive and vein-veinlet. Due to alternating pulses of hydrothermal fluid (zone refining process), temperature and redox condition changes, SEDEX deposits are chemically zoned.

Citation: Movahednia, M. et al, 2020. Elemental zonation and geochemistry of sulphide ore of the Ab-Bagh sedimentary-exhalative Zn-Pb deposit ..., *Res. Earth. Sci.* 11(1), (72-88) DOI: 10.52547/esrj.11.1.72

* Corresponding author E-mail address: Rastad@modares.ac.ir





Based on geochemical studies, metal zoning patterns are well developed in the Ab-bagh SEDEX type Zn-Pb deposit. Both vertical and horizontal zonation is present in this deposit. In SEDEX deposits, moving outward from the stockwork facies, ore bearing horizons display decreasing Zn/Ba, Zn/Mn, Zn/Fe, Pb/Zn, Pb/Fe, Pb/Ag, and Cu/Zn/Pb ratios, reflecting the oxidation control on mineralogy and the temperature dependent solubility of the base metals. Vertical and horizontal chemical zonation is well developed in ore horizon 1 of Ab-Bagh deposit, in a way that Pb/Ag increase from base to top and Cu/(Zn+Pb) and Pb/(Zn+Pb) increase from top to base in massive ore facies. Also, horizontally, Zn/Al₂O₃, S/Al₂O₃ and Cu decrease and Ba increases from massive to bedded ore facies. There is a significant positive correlation between Cd/Zn, Co/Zn and Ag/Pb in sulphide ores from ore horizon 1. REE content of massive sulphide ore is very low, however, REE content of bedded ore is more than the massive and stockwork ore facies. Fe and Cd content of sphalerite increases from margins to center, which reflects drop in temperature of ore-forming fluid over time. Also geochemical features of sphalerite and pyrite suggest that they are formed in anoxic environment.

Conclusion

The Ab-Bagh Zn-Pb deposit is hosted by Late Jurassic-Early Cretaceous black shales and Early Cretaceous limestone. The deposit consists of two horizons of Zn-Pb sulfide and oxide lenses situated at the different stratigraphic levels, each with an associated stringer vein zone. Vertical and horizontal chemical zonation is well developed in ore horizon 1 of Ab-Bagh deposit. Lateral zonation away from the center of fluid discharge is controlled mostly by zone refining in the vent complex and is typically accompanied by a decrease in the thickness of the stratiform body.

Keywords: Ore facies, Geochemistry, SEDEX, Zn-Pb deposit, Elemental zonation.



پهنه‌بندی عنصری و ژئوشیمی کانسنگ سولفیدی در کانسار روی و سرب تیپ رسوبی-بروندمی آب‌باغ، جنوب شرقی کمر بند فلز زایی ملایر-اصفهان

مهدی موحدنیا^۱، ابراهیم راستاد^{۱*}، عبدالرحمان رجبی^۲، فرانسیسکو ژاویر گونزالز سانز^۳

۱- گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- بخش زمین‌شناسی دریایی، سازمان زمین‌شناسی اسپانیا، مادرید، اسپانیا

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۳/۲۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۲

چکیده

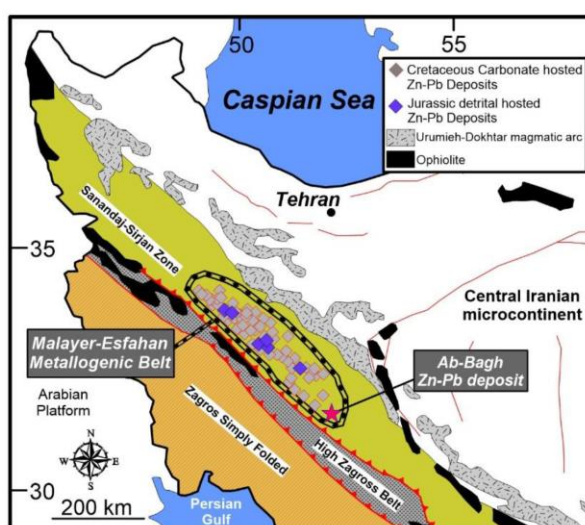
کانسار روی-سرب تیپ رسوبی-بروندمی آب‌باغ در بخش میانی پهنه سندنج-سیرجان و منتهی‌الیه جنوب شرقی کمر بند فلز زایی ملایر-اصفهان واقع شده است. کانه‌زایی روی و سرب در این کانسار در دو افق کانه‌دار در سنگ‌های آواری-کربناتی ژوراسیک بالایی-کرتاسه تحتانی و کربناتی کرتاسه زیرین به صورت چینه‌سان و چینه‌کران تشکیل شده است. پهنه‌بندی شیمیایی افقی و عمودی در کانسنگ سولفیدی افق ۱ کانسار آب‌باغ به خوبی قابل مشاهده است؛ به گونه‌ای که افزایش نسبت Pb/Ag از پایین به بالا و نسبت‌های $Pb/(Zn+Pb)$ و $Cu/(Zn+Pb)$ از بالا به پایین در رخساره کانسنگ توده‌ای و کاهش نسبت‌های Zn/Al_2O_3 و S/Al_2O_3 و عنصر مس و افزایش عنصر باریم از محل غسل همزمان با رسوبگذاری به سمت‌های حاشیه‌ای (به صورت افقی) کانسار مشاهده می‌شود. در کانسنگ سولفیدی افق ۱ کانسار آب‌باغ همبستگی قوی مثبت بین عناصر کادمیوم و کبالت با روی و نقره با سرب مشاهده می‌شود. عناصر نادر خاکی در کانسنگ سولفیدی دارای تمرکز پایینی است اما با این وجود، محتوای عناصر نادر خاکی در رخساره کانسنگ لایه‌ای به نسبت رخساره-های توده‌ای و رگه-رگچه‌ای بیشتر می‌باشد. محتوای آهن و کادمیوم اسفالریت از حاشیه به سمت مرکز افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده کاهش حرارت سیال کانه‌ساز به مرور زمان است. خصوصیات ژئوشیمیایی کانی‌های اسفالریت و پیریت نشان‌دهنده ته‌نشست آن‌ها در محیط بی‌هوازی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رخساره‌های کانسنگی، ژئوشیمی، سدکس، کانسار روی و سرب، منطقه‌بندی عنصری.

مقدمه

تشکیل شده است (Goodfellow and Lydon, 2007; Wilkinson, 2014). به‌طور کلی پذیرفته شده است که این گسل‌ها محل اصلی عبور سیالات کانه‌زا در کانسارهای روی و سرب تیپ برون‌دمی-رسوبی می‌باشد؛ لذا از محل گسل هم-زمان با رسوبگذاری به سمت‌های حاشیه‌ای کانسار، منطقه‌بندی بافتی و عنصری به‌خوبی دیده می‌شود (Lydon, 2004; Wilkinson, 2014). عامل اصلی ایجاد این منطقه‌بندی، پالس‌های متناوب خروج سیال و فرآیند پالایش پهنه‌ای است که منجر به ضخیم‌شدگی کانسار و تشکیل رخساره کانسنگ توده‌ای در بالای مجاری تغذیه‌کننده و همچنین منطقه‌بندی قوی عنصری در کانسار می‌گردد (Goodfellow, 2004; Cooke et al, 2000). هدف از این مقاله، مطالعه ژئوشیمی کانسنگ سولفیدی و پهنه‌بندی‌های شیمیایی در کانسار تیپ سدکس آب‌باغ و بررسی اهمیت گسل هم‌زمان با رسوبگذاری در شکل‌گیری این پهنه‌بندی است (شکل ۱).

منطقه مورد مطالعه در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شهرضا و بخش میانی پهنه پرتکاپوی سنندج-سیرجان و در منتهی‌الیه کمربند فلززایی ملایر-اصفهان واقع است (شکل ۱). در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان تاکنون بیش از ۱۷۳ کانسار، معدن و نشانه روی و سرب، آهن و باریت گزارش شده است. در این منطقه، سنگ‌های کربناته کرتاسه زیرین سنگ میزبان تعداد زیادی از کانسارهای روی و سرب می‌باشند اما تعدادی از کانسارها و نشانه‌های معدنی (حدوداً ۲۵ مورد) نیز با سنگ‌های تخریبی ژوراسیک میزبانی می‌شوند. در کانسار تیپ رسوبی-برون‌دمی (سدکس) آب‌باغ، کانه‌زایی روی و سرب در دو افق کانه‌دار و در سنگ‌های آواری-کربناته ژوراسیک‌بالایی و کربناته کرتاسه‌زیرین به‌صورت هم‌روند با لایه‌بندی، رخ داده است. تمامی کانسارهای رسوبی-برون‌دمی (سدکس) دارای ارتباط مستقیم با گسل‌های هم-زمان با رسوبگذاری بوده و کانه‌زایی به‌صورت تیپیک در کمربالای گسل هم‌زمان با رسوبگذاری

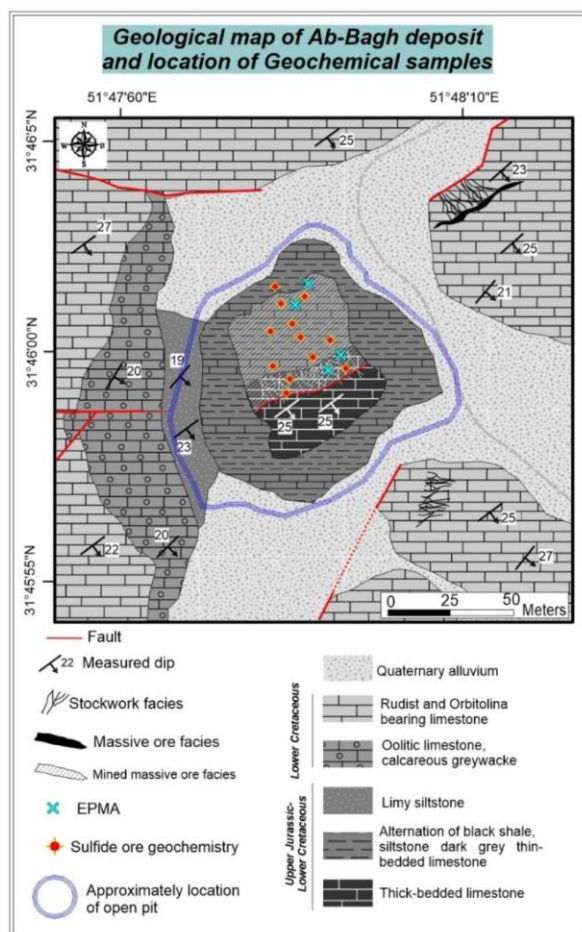


شکل ۱: A) پهنه‌های ساختاری ایران (آقنابتی، ۱۳۸۳؛ Alavi, 1991) و موقعیت کمربند فلززایی ملایر-اصفهان و کانسار آب‌باغ در پهنه سنندج-سیرجان (Momenzadeh, 1976; Rajabi et al, 2012; Movahednia et al, 2014).

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی بخش‌های مختلف کانسار و منطقه بندی در جهات عمودی و افقی، تعداد ۱۲ نمونه در آزمایشگاه مرکزی سازمان زمین‌شناسی اسپانیا (IGME) مورد تجزیه قرار گرفت. اکسیدهای اصلی با استفاده از دستگاه XRF، عناصر روی و سرب

توسط دستگاه ICP-OES و عناصر نادر خاکی و کمیاب با دستگاه ICP-MS، اندازه‌گیری شدند. همچنین به منظور مطالعه شیمی کانی‌های سولفیدی، ۴ مقطع نازک-صیقلی با استفاده از ریزکاو الکترونی در آزمایشگاه مرکزی سازمان زمین‌شناسی اسپانیا بررسی شد.



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ کانسار آب باغ و موقعیت نمونه‌های برداشت شده جهت آنالیزهای شیمیایی

نتایج

موقعیت ژئودینامیکی و چینه‌شناسی منطقه معدنی براساس محجل و فرگوسون (Mohajjel 2014 and Fergusson, 2014)، سنگ‌های پلوتونیک در بخش

شمال غربی سنندج-سیرجان با طولی بیش از ۳۵۰ کیلومتر از جنوب شرق سنندج تا شمال غرب اصفهان، همروند با زون سنندج-سیرجان و سن ژوراسیک میانی- بالایی (۱۷۲-۱۴۹ میلیون سال) و دارای قرابت ژئوشیمیایی با سنگ‌های کمان

کانه‌زایی در افق اول (با سن ژوراسیک بالایی-کرتاسه زیرین) و افق دوم (کرتاسه زیرین) کانسار آب‌باغ، منطبق با دوره‌های کششی در پهنه سنندج-سیرجان (Mohajjel and Fergusson, 2014) می‌باشد و در یک حوضه کششی پشت قوس تشکیل شده‌اند. از طرفی پراکندگی کانسارها و روند کمربند فلززایی ملایر-اصفهان، مطابقت کامل با محیط پشت قوسی ژوراسیک بالایی تا کرتاسه زیرین دارد؛ که بیانگر نقش و اهمیت جایگاه زمین‌ساختی کششی در تشکیل کمربند فلززایی ملایر-اصفهان می‌باشد. واحدهای سنگی ژوراسیک بالایی-کرتاسه زیرین در محدوده مورد مطالعه برحسب جایگاه چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی، به پنج واحد تقسیم می‌گردند (شکل ۲ و ۳الف) که ۳ واحد به سن ژوراسیک‌پسین-کرتاسه‌پیشین و ۲ واحد جوان‌تر، سن کرتاسه-پیشین دارند. قدیمی‌ترین واحد رسوبی ژوراسیک-پسین-کرتاسه‌پیشین در محدوده معدنی آب‌باغ، سنگ آهک میکرایتی ضخیم لایه (واحد ۱) می‌باشد که در بخش بالایی آن، سنگ‌های توفی به شکل عدسی گسترش دارد. توالی آواری سیاه‌رنگ واحد ۲ که سنگ میزبان افق اول کانسار آب‌باغ است (شکل ۳ب)، از شیل و سیلتستون تیره‌رنگ دارای موادآلی همراه با تناوب میان‌لایه‌های کربناتی تشکیل شده که در یک محیط ضعیف از نظر چرخش آب، فقیر از اکسیژن و درجه بالای حفظ موادآلی ته‌نشست یافته‌اند. این واحد چینه‌ای توسط سیلتستون‌های آهکی خاکستری واحد ۳ پوشیده می‌شود (شکل ۳ب). مجموعه واحدهای ژوراسیک‌بالایی-کرتاسه‌زیرین، در زیر واحد سنگ‌آهک آئیدی با میان‌لایه‌های تخریبی به رنگ زرد تا قهوه‌ای قرار می‌گیرند (واحد ۴). جوان‌ترین رسوبات مزوزوئیک، واحد سنگ آهک رودیست و

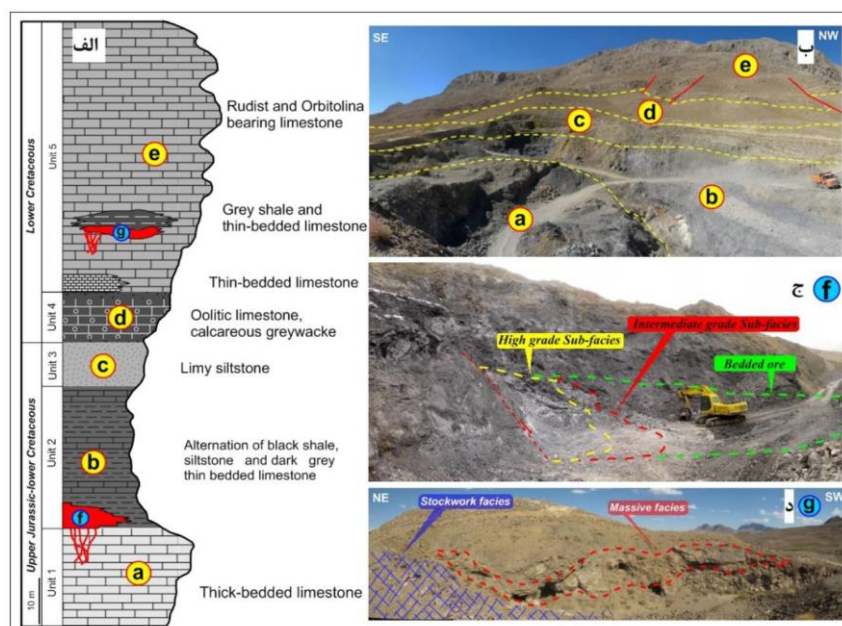
ماگمایی مرتبط با فرورانش گسترش دارند (Ahmadi-Khalaji et al, 2007; Mahmoudi et al, 2011; Esna-Ashari et al, 2012). علاوه بر سنگ‌های پلوتونیکی ژوراسیک، در طول لبه شمال‌شرقی پهنه زاگرس و جنوب‌غربی پهنه سنندج-سیرجان، سنگ‌های ولکانیکی حد واسط ژوراسیک بالایی به‌صورت میان‌لایه‌هایی همراه با آهک‌های کم‌عمق دریایی گسترش دارند (Mohajjel and Fergusson, 2014). مجموعه‌های ولکانیکی جنوب شهرضا و محدوده معدن آب‌باغ را می‌توان ادامه سنگ‌های نفوذی و ولکانیکی کمان ماگمایی ژوراسیک که تا شمال غرب اصفهان ادامه دارند، در نظر گرفت. از نظر موقعیت ژئودینامیکی، کانسار آب‌باغ در منتهی‌الیه محیط پشت قوسی زمان ژوراسیک پایانی قرار گرفته است. در این بخش از پهنه سنندج-سیرجان، شرایط کششی ژوراسیک بالایی، در زمان کرتاسه زیرین نیز ادامه داشته است. شاخص اصلی شرایط تکتونیکی در زمان کرتاسه در بخش شمال غربی پهنه سنندج-سیرجان، توالی دریایی حاوی سنگ‌های بازالتی و بازالت آندزیتی با ویژگی‌های ژئوشیمیایی کالک‌آلکان و منطبق بر کمان ماگمایی قاره‌ای است (Azizi and Jahangiri, 2008; Azizi and Moeinvaziri, 2009). این سنگ‌های ولکانیکی در منطقه سنندج تا دریاچه ارومیه گسترش داشته و در بخش‌های جنوب‌شرقی پهنه سنندج-سیرجان، گسترش این سنگ‌های بسیار کم بوده و توالی کرتاسه شامل سنگ‌های آهک‌های آپتین-آلبین می‌باشد که در بخش‌هایی در زیر این سنگ آهک‌ها، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و به میزان کمتر سنگ‌های ولکانیکی حد واسط قرار می‌گیرند (Mohajjel et al, 2003).

معدنی، می‌توان دو افق کانهدار را از یکدیگر جدا کرد (شکل ۳ الف). کانهایابی در افق ۱ در درون شیل و سیلتستون‌های سیاه به سن ژوراسیک بالایی-کرتاسه‌زیرین و کانهایابی در افق ۲ در واحدهای کربناتی کرتاسه زیرین، به‌صورت لایه‌ای و رگه-رگچه‌ای شکل گرفته‌اند.

اوربیتولین‌دار (واحد ۵) می‌باشد که میزبان افق دوم کانهایابی در منطقه معدنی است (شکل ۳ د). تمامی واحدهای چینه‌ای در محدوده معدنی آب-باغ، عموماً با شیب ۲۵ درجه به سمت جنوب‌شرق قرار گرفته‌اند.

کانهایابی و افق‌های کانهدار

در کانسار روی و سرب آب‌باغ، براساس جایگاه چینه‌شناسی، سن و نوع سنگ میزبان ماده



شکل ۳: الف) ستون چینه‌شناسی کانسار آب‌باغ و موقعیت افق‌های معدنی در آن؛ ب) دورنمایی از محدوده معدنی آب-باغ و رخنمون واحدهای سنگی مختلف در آن (دید به سمت جنوب غرب)؛ ج) نمایی از رخنمون افق کانهایابی ۱ و موقعیت رخنساره‌های کانسنگی مختلف در آن (دید به سمت غرب)؛ د) رخنمون افق کانهایابی ۲ و موقعیت رخنساره‌های کانسنگی رگه-رگچه‌ای و توده‌ای در آن (دید به سمت شمال شرق).

سمت شمال شرق و دور شدن از گسل هم‌زمان با رسوبگذاری، با کاهش ضخامت، کانهایابی به شکل چینه‌سان و هم‌روند با لایه‌بندی سنگ میزبان تبدیل می‌گردد. کانهایابی سرب و روی در افق ۲ کانسار آب‌باغ در سنگ میزبان آهکی و میان لایه-های شیل کربناته خاکستری رنگ واحد (۵) به سن کرتاسه زیرین (شکل ۳ الف) به‌صورت هم‌روند با سنگ میزبان و در بخش زیرین به‌صورت رگه-

کانهایابی سولفیدی در افق ۱ کانسار آب‌باغ (شکل ۳ ج)، در بخش زیرین، به‌صورت رگه-رگچه‌ای در کربنات‌های ضخیم‌لایه واحد (۱) و در بخش بالایی، با ژئومتری عدسی و گوه‌ای در شیل‌های سیاه رنگ واحد (۲) تشکیل شده است. کانهایابی عدسی شکل در مجاورت گسل هم‌زمان با رسوبگذاری به‌صورت توده‌ای و ضخیم با ماهیتی ناهمگون و چینه‌کران رخ داده که با حرکت به

اکسیداسیون-احیاء در کانی‌شناسی و تأثیر دما در حلالیت فلزات پایه در سیالات هیدروترمالی است (Wilkinson, 2014). همچنین پهنه‌بندی عمودی نیز در کانسارهای تیپ رسوبی-بروندمی مشاهده می‌شود؛ بدین صورت که از پایین به بالا نسبت Zn/Ba کاهش و نسبت‌های Zn/Fe و Pb/Ag افزایش می‌یابند (Lydon, 2004; Wilkinson, 2014). براساس آنالیزهای شیمیایی صورت گرفته بر روی نمونه‌های افق ۱ کانسار آب‌باغ، پهنه‌بندی عنصری عمودی و افقی به خوبی مشاهده می‌شود. در ادامه به بررسی پهنه‌بندی‌های موجود پرداخته شده است.

رگچه‌ای، رخ داده است (شکل ۳د). برخلاف افق ۱، کانه‌زایی در این بخش، به دلیل فرآیندهای هوازدگی، عمدتاً به صورت کانی‌های غیرسولفیدی دیده می‌شود.

پهنه‌بندی عنصری

در کانسارهای تیپ رسوبی-بروندمی، پهنه‌بندی عنصری به خوبی توسعه یافته است (Wilkinson, 2014)؛ در این تیپ از کانسارها، با افزایش فاصله افقی از رخساره رگه-رگچه‌ای و گسل هم‌زمان با رسوبگذاری، کاهش نسبت‌های عنصری Zn/Ba, Zn/Fe, Zn/Mn, Pb/Zn, Pb/Fe, Pb/Ag و Cu/(Zn+Pb) مشاهده می‌گردد (Lydon, 2004). که این پهنه‌بندی منعکس‌کننده تأثیر شرایط

جدول ۱: نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانسنگ سولفیدی افق ۱ کانسار آب‌باغ

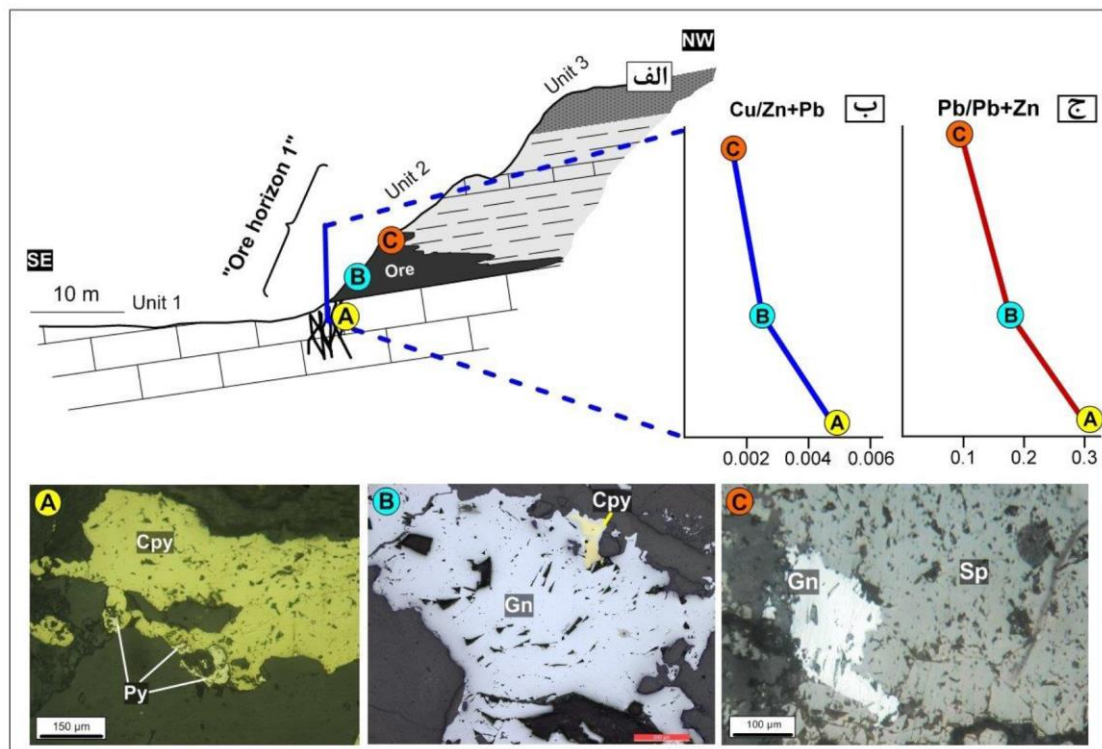
Sample	Ore Facies	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%S	Ba (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Zn/Al ₂ O ₃	S/Al ₂ O ₃	Cu/(Zn+Pb)	Pb/(Zn+Pb)
5265-01	Bedded	51.46	7.44	1.19	152	24	615	55.1	0.008266	0.159946	0.086228	0.037559
5265-02	Massive	34.7	2.11	15.59	50.6	69982	86740	332	4.1109	7.388626	0.002118	0.446536
5265-03	Massive	37.9	1.74	26.45	46.5	3986	94560	386	5.434483	15.20115	0.003917	0.040448
5265-04	Massive	35.7	1.89	5.6	43.5	2345	67578	269	3.575556	2.962963	0.003847	0.033537
5265-05	Massive	13.4	0.5	23.32	4.96	20993	190453	376	38.0906	46.64	0.001778	0.099283
5265-12	Massive	14.58	0.5	24.88	2.48	47711	203420	365	40.684	49.76	0.001453	0.189985
5265-08	stackwork to Massive	42.14	1.02	11.8	24.7	23435	131955	501	12.93676	11.56863	0.003224	0.150814
5265-09	stackwork to Massive	50.5	1.34	18.7	2.71	38764	167342	432	12.48821	13.95522	0.002096	0.188078
5265-06	Stackwork	76.23	1	1.6	34.5	32543	145320	456	14.532	1.6	0.002564	0.182967
5265-07	Stackwork	53.6	1.3	16.06	15.7	28756	156645	543	12.04962	12.35385	0.002929	0.155102
5265-10	Stackwork	59.93	0.5	5.06	18.6	29864	63788	480	12.7576	10.12	0.005125	0.318883
5265-11	Stackwork	61.9	0.97	10.9	14.8	32654	108980	614	11.23505	11.23711	0.004335	0.230552

به‌گونه‌ای که در بخش‌های زیرین کانسنگ توده‌ای به دلیل دمای بالاتر، محتوای نقره گالن بیشتر از بخش بالایی رخساره کانسنگ توده‌ای می‌باشد. همچنین میزان مس و نسبت Cu/(Zn+Pb) از پایین به بالای رخساره کانسنگ توده‌ای، با کاهش میزان دما و کالکوپیریت، کاهش می‌یابد (شکل ۴ب). نسبت Pb/(Zn+Pb) به سمت بالای کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش کانه‌زایی اسفالریت در مقابل گالن است.

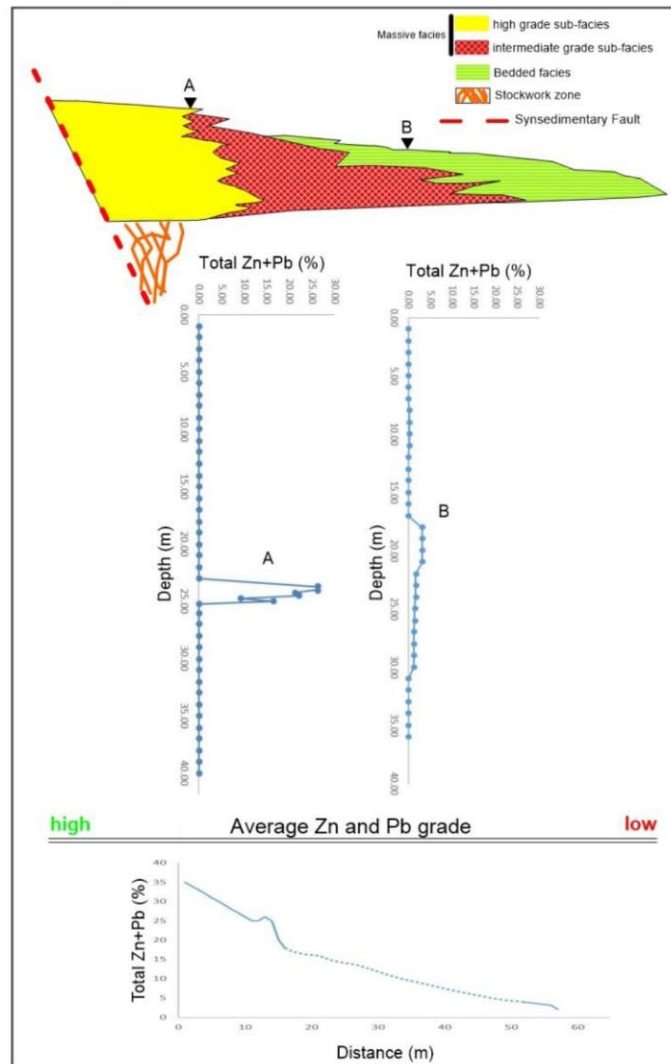
پهنه‌بندی عنصری عمودی: پهنه‌بندی عمودی عمدتاً در بخش‌های ضخیم و کانسنگ توده‌ای کانسارهای تیپ رسوبی-بروندمی مشاهده می‌گردد. در رخساره کانسنگ توده‌ای افق ۱ کانسار آب‌باغ زون‌بندی عمودی وجود دارد. میزان Pb/Ag از پایین به بالای رخساره کانسنگ توده‌ای افزایش نشان می‌دهد (موحدنیا و همکاران، ۱۳۹۳) که این پدیده ناشی از ارتباط مستقیم بین محتوای نقره کانی گالن و دمای تشکیل می‌باشد؛

رسوبگذاری و محل تغذیه کننده (رخساره رگه-رگچه‌ای) کاهش می‌یابد (شکل ۵). براساس نتایج تعداد ۹۶۰ آنالیز جذب اتمی به منظور اندازه‌گیری روی و سرب در نمونه‌های افق ۱ کانسار آب‌باغ (فرپارس قشم، ۱۳۸۹)، بالاترین عیار روی و سرب مربوط به نمونه‌های رخساره کانسنگ توده-ای بوده است. با افزایش فاصله از محل غسل هم-زمان با رسوبگذاری و در رخساره لایه‌ای، عیار کانه‌زایی به حداقل میزان خود می‌رسد که در حال حاضر این بخش از کانسار معدنکاری نمی‌شود (شکل ۵).

پهنه‌بندی عنصری افقی: مهم‌ترین بروز پهنه‌بندی عنصری افقی در افق ۱ کانسار آب‌باغ، تغییرات نسبت‌های Zn/Al_2O_3 , S/Al_2O_3 و عناصر باریم، مس، منگنز، روی، سرب و سیلیس می‌باشد. با توجه به اینکه اجزای اصلی ماده معدنی در کانسار آب‌باغ، روی و سرب و به مقدار کمتر نقره، کادمیوم، باریم و مس می‌باشد، ابتدا به نحوه پراکنش این عناصر و منطقه‌بندی آن‌ها در رخساره‌های کانسنگی افق ۱ پرداخته می‌شود. تغییرات جانبی عیار ماده معدنی در کانسار آب‌باغ، به خوبی قابل مشاهده است؛ در افق ۱ کانسار، عیار کانسنگ با فاصله از غسل هم‌زمان با



شکل ۴: الف) مقطع عرضی زمین‌شناسی افق ۱ کانه‌دار کانسار آب‌باغ؛ ب) تغییرات نسبت $Cu/Zn+Pb$ در مقطع عمودی بخش پرعیار کانسار؛ ج) تغییرات نسبت $Pb/Pb+Zn$ در مقطع عمودی بخش پرعیار کانسار؛ د) تشکیل کالکوپیریت به مقدار قابل توجه در بخش رگه-رگچه‌ای که موجب بالا بودن نسبت $Cu/(Zn+Pb)$ در بخش‌های زیرین گردیده است؛ ب) حضور کالکوپیریت همراه با گالن در بخش‌های مرکزی رخساره کانسنگ توده‌ای؛ ج) اسفالریت و گالن در بخش‌های فوقانی رخساره کانسنگ توده و عدم وجود کالکوپیریت که موجب پایین بودن نسبت $Cu/(Zn+Pb)$ شده است (کالکوپیریت: Cpy، پیریت: Py، گالن: Gn و اسفالریت: Sp).



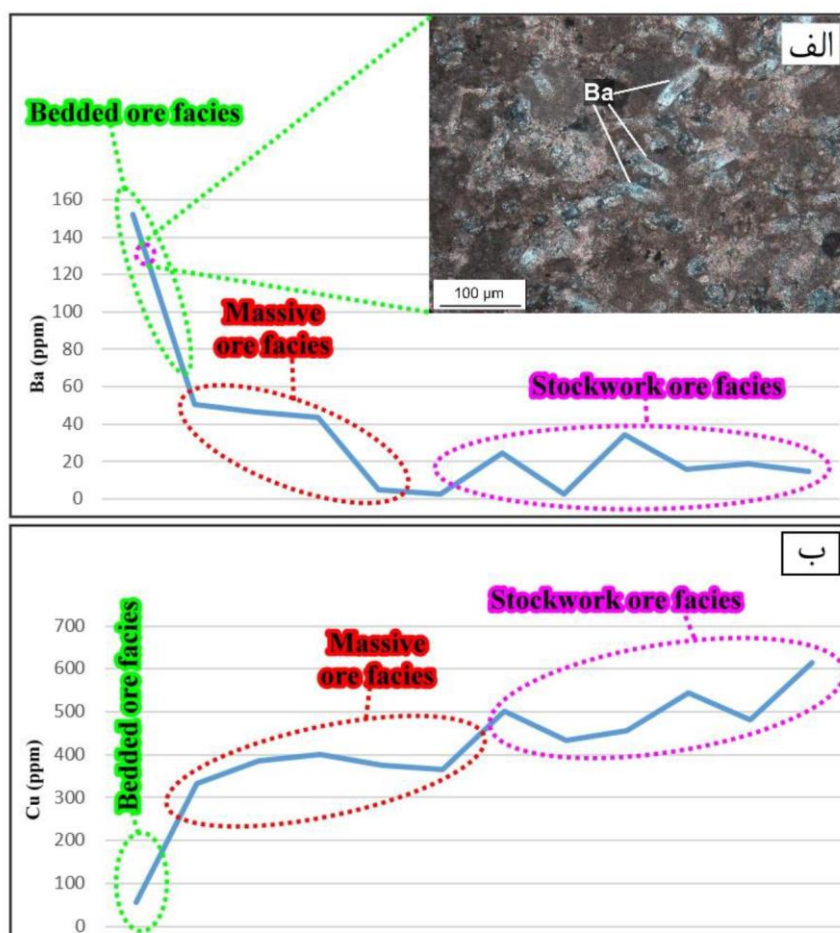
شکل ۵: تغییرات میزان سرب و روی در دو گمانه در بخش‌های مختلف و نمودار تغییرات عیار در مقابل فاصله از گسل هم‌زمان با رسوبگذاری در افق ۱ کانسار آب‌باغ.

سیالات با ترکیبات هیدروترمالی قبلی، نظیر باریت واکنش داده و می‌تواند موجب حذف باریت از رخساره کانسنگ توده‌ای گردد. در بخش‌های دورتر از محل تغذیه‌کننده کانه‌زایی (رخساره لایه-ای) که شرایط احیایی کمتری در محیط حاکم است، کانی باریت ته‌نشست می‌یابد (شکل ۶ب). این نحوه پراکندگی عنصر باریم در افق ۱ کانسار آب‌باغ، مشابه پراکندگی کانسارهای بروندمی-رسوبی (سدکس) می‌باشد. در رخساره رگه-رگچه‌ای و زیر رخساره کانسنگ توده‌ای پرعیار، به

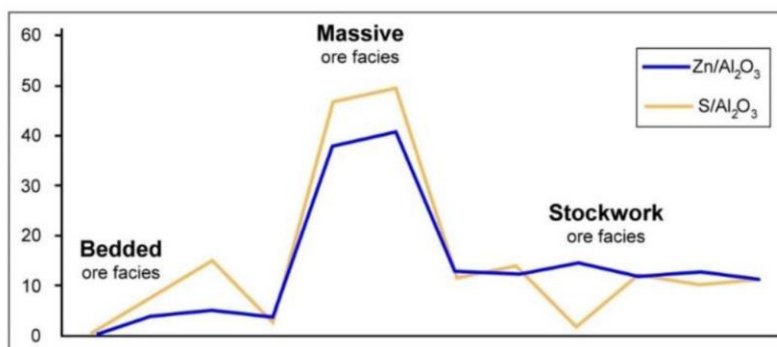
میزان باریم در رخساره لایه‌ای افق ۱ کانسار بالا می‌باشد. این میزان باریم به‌صورت کانی باریت خود را در این بخش از کانسار نشان می‌دهد که به‌صورت دانه پراکنده در متن سنگ میزبان حضور دارد. براساس (Goodfellow and Lydon, 2007)، باریت در محل رخساره لایه‌ای کانسارهای رسوبی-بروندمی می‌تواند وجود داشته باشد. بنا بر نظر لیدن (Lydon, 1996)، باریت می‌تواند در مراحل اول کانه‌زایی در محل خروج سیال تشکیل گردد؛ اما با ادامه فعالیت سیال کانه‌زا احیایی، این

رخساره نیز این نسبت‌ها در مقایسه با رخساره کانسنگ توده‌ای پایین می‌باشد (شکل ۷ب). تغییرات جانبی سیلیس (SiO_2) در افق ۱ کانسار، دارای نظم نبوده و در رخساره رگه-رگچه‌ای به دلیل حضور رگه-رگچه‌های غنی از کوارتز و دگرسانی سیلیسی، به نسبت بقیه بخش‌های کانسار بالا می‌باشد. اما در رخساره کانسنگ توده-ای به دلیل حجم گسترده کانی‌های سولفیدی، میزان (SiO_2) کمترین میزان را دارد. به دلیل حجم بالای ترکیبات رسوبی در رخساره لایه‌ای به نسبت رخساره کانسنگ توده‌ای، میزان سیلیس دوباره افزایش نشان می‌دهد (شکل ۸).

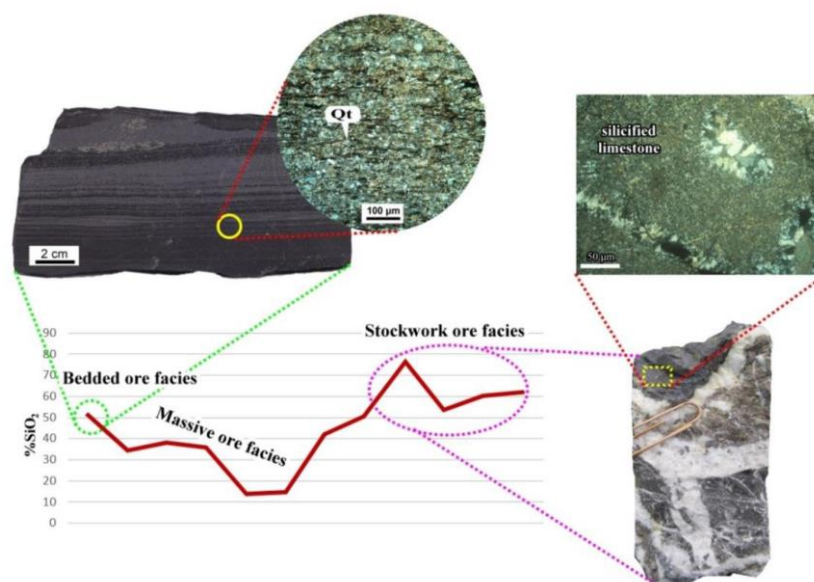
دلیل دمای بالاتر محیط، کالکوپیریت تشکیل شده و در بخش‌های دورتر از محل گسل هم‌زمان با رسوبگذاری، میزان کالکوپیریت بسیار ناچیز می‌گردد. این مسئله باعث به وجود آمدن زون‌بندی عنصر مس در کانسار آب‌باغ گردیده است (شکل ۷الف). با توجه به افزایش میزان ترکیبات رسوبی در رخساره کانسنگ لایه‌ای افق ۱، نسبت به رخساره کانسنگ توده‌ای، نسبت $\text{Zn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ و $\text{S}/\text{Al}_2\text{O}_3$ با دور شدن از کانسنگ توده‌ای، کاهش می‌یابد. همچنین در رخساره رگه-رگچه‌ای، به دلیل بالا بودن میزان رسوبات به نسبت کانی‌های سولفیدی (محصولات هیدروترمال)، در این



شکل ۶: الف) تغییرات میزان باریم در رخساره‌های کانسنگی افق ۱ کانسار آب‌باغ؛ ب) تغییرات میزان مس در رخساره‌های کانسنگی افق ۱ کانسار آب‌باغ.



شکل ۷: تغییرات نسبت Zn/Al_2O_3 و S/Al_2O_3 در رخساره‌های کانسنگی افق ۱ کانسار آب‌باغ



شکل ۸: تغییرات میزان سیلیس در رخساره‌های کانسنگی افق ۱ کانسار آب‌باغ

کانسارهای روی و سرب، هبستگی بالای عناصر کادمیوم و کبالت با روی، ناشی از حضور محلول-های جامد CdS و CoS در کانی اسفالریت است. کادمیوم به صورت ذخیره مستقل در دنیا گزارش نشده است. کادمیوم منحصرأ به عنوان محصول جانبی از معدنکاری، ذوب و پالایش کانسنگ سولفیدی روی و در درجات بعدی سرب و مس، تولید می‌شود (Tolcin, 2008). تقریباً تمام ذخایر روی، دارای مقادیر مختلف کادمیوم هستند. تتراهدرون Cd^{2+} دارای شعاع یونی و کووالانسی و همچنین خصوصیات شیمی بلوری شبیه به Zn^{2+} می‌باشد، بنابراین این دو عنصر می‌توانند رفتارهای

ژئوشیمی کانسنگ سولفیدی

ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر کمیاب کانسار سولفیدی و رابطه آن‌ها با ژنز کانسارهای سرب و روی چینه‌سان و چینه‌کران در بسیاری از تحقیقات (Hawley and Nichol, 1961; Price, 1972; Liu et al, 1984; Tu et al, 1984; Zhang, 1987; Brill, 1989; Palero-Fernandez and Martin-Izard, 2005; Ye et al, 2011; Danyushevskiy, 2001) مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. براساس موحدنیا و همکاران (۱۳۹۳) و موحدنیا (۱۳۹۴) عناصری مانند کادمیوم و کبالت با روی و عنصر نقره با سرب دارای همبستگی مثبت می‌باشد. در اغلب

براساس مطالعات موحدنیا و همکاران (۱۳۹۳) در افق ۱، در رخساره توده‌ای گالن حاوی ۴۰۱/۸ پی‌پی‌ام نقره می‌باشد که با دور شدن از رخساره توده‌ای پرعیار و در بخش توده‌ای کم عیار، این میزان کمتر شده و به ۲۰۰/۹ و سپس به ۱۶۸ پی‌پی‌ام می‌رسد و به‌طور میانگین تمرکز این عنصر در افق ۱، ۲۵۶/۹ پی‌پی‌ام است. میزان میانگین عنصر آنتیمون در افق ۱، ۱۶۱۸/۹۶ پی‌پی‌ام می‌باشد. پراکندگی عناصر نادر خاکی در رخساره‌های کانسنگی افق ۱ کانسار آب‌باغ در شکل نشان داده شده است. محتوای REE در نمونه‌های کانسنگ سولفیدی پایین بوده و این مسئله ناشی از توانایی اندک کانی‌های سولفیدی در میزبانی عناصر نادر خاکی می‌باشد (Cullers and Graf, 1984). به همین علت، نمونه‌های رخساره‌های رگه-رگچه‌ای و کانسنگ توده‌ای، میزان REE کمتری به نسبت نمونه‌های رخساره لایه‌ای دارند.

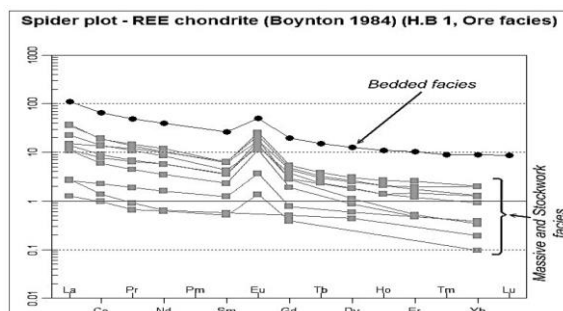
ژئوشیمیایی مشترکی را نشان دهند، اسفالریت اقتصادی‌ترین کانی حاوی کادمیوم است. میزان تمرکز کادمیوم در اسفالریت به‌طور عمده بین ۰/۱ تا ۰/۶ درصد وزنی است (Schwartz, 2000). براساس مطالعات موحدنیا و همکاران (۱۳۹۳)، میزان تمرکز کادمیوم در اسفالریت‌های افق ۱ کانسار به‌طور میانگین 918.3ppm می‌باشد. همبستگی مثبت بین عنصر سرب و نقره، به دلیل حضور نقره در ساختمان کانی گالن قابل توجیه است؛ میزان عناصر کمیاب در کانی گالن به‌وسیله منشأ سیالات کانه‌ساز، دما، فشار و ... کنترل می‌شود. انواع تیپ‌های کانساری سرب و روی دارای تمرکزهای متفاوتی از عناصر کمیاب در کانی گالن هستند (Zhang, 1987). دما، به‌عنوان یک فاکتور مهم، در میزان تمرکز عنصر نقره در گالن اهمیت بالایی دارد و توسط ژنگ (Zhang, 1987) بررسی شده است. با افزایش دمای سیالات کانه‌ساز، میزان نقره در گالن افزایش پیدا می‌کند و یک رابطه خطی بین این دو پارامتر وجود دارد.

جدول ۲: نتایج تجزیه‌شیمیایی (به روش ICP-MS) عناصر نادر خاکی نمونه‌های کانسنگ سولفیدی افق ۱ کانسار آب‌باغ

Sample	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Dy (ppm)	Ho (ppm)	Er (ppm)	Tm (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)
5265-01	34.1	52.5	6	23.99	5.15	3.66	5.15	0.71	4.13	0.79	2.15	0.29	1.87	0.28
5265-02	10.9	15.6	1.62	6.25	1.19	1.28	1.16	0.14	0.79	0.15	0.41	<LD	0.41	<LD
5265-03	0.85	1.11	0.11	0.38	0.11	<LD	0.13	<LD	0.14	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD
5265-04	11.5	15	1.77	7.08	1.24	1.89	1.41	0.18	0.98	0.19	0.54	<LD	0.42	<LD
5265-05	0.39	0.79	0.08	0.37	0.1	0.1	0.1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	<LD
5265-06	3.54	6.27	0.78	3.41	0.71	1.04	0.75	<LD	0.58	0.1	0.31	<LD	0.26	<LD
5265-07	3.38	4.77	0.54	2.09	0.45	0.83	0.49	<LD	0.28	<LD	0.1	<LD	0.08	<LD
5265-08	6.98	11.3	1.32	5.1	0.84	0.94	0.95	0.11	0.59	0.1	0.25	<LD	0.19	<LD
5265-09	4.66	10.9	1.47	5.96	1.25	1.61	1.26	0.15	0.83	0.15	0.36	<LD	0.27	<LD
5265-10	4.33	7.3	0.84	3.47	0.68	1.27	0.72	<LD	0.36	<LD	0.11	<LD	0.07	<LD
5265-11	20.4	31.8	3.4	13.3	2.38	5.98	2.48	0.24	1.16	0.18	0.42	<LD	0.34	<LD
5265-12	0.82	1.82	0.23	0.96	0.24	0.27	0.2	<LD	0.19	<LD	<LD	<LD	0.08	<LD

کانسار روی-سرب پرادس با سنگ میزبان شیلی واقع در اسپانیا مورد بررسی قرار گرفته است. این پدیده در کانسار آب‌باغ نیز صادق می‌باشد، به گونه‌ای که رخساره‌های کانسنگ توده‌ای و رگه-رگچه‌ای از میزان REE پایین و رخساره کانسنگ لایه‌ای از میزان بالای آن‌ها برخوردار باشد (شکل ۹).

حضور کانی‌های باطله کوارتز و کلسیت در رخساره‌های رگه-رگچه‌ای و کانسنگ توده‌ای، باعث شده محتوای REE این رخساره‌ها، به نسبت کانی‌های سولفیدی خاص، بالاتر باشد. براساس مطالعات کانت و همکاران (Canet et al, 2004) عناصر نادر خاکی در کانسارهای سرب و روی با میزبان تخریبی، تمایل به تمرکز در بخش‌های دورتر از محل خروج سیالات دارند. این پدیده در



شکل ۹: الگوی عناصر نادر خاکی نمونه‌های رخساره‌های کانسنگی افق ۱ کانسار آب‌باغ

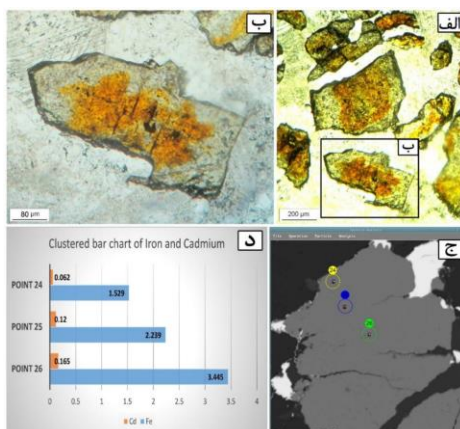
روشن‌سازی عملی مشخص می‌شود. تغییرات عنصری در این اسفالریت‌ها، با استفاده از ریزکاو الکترونی (EPMA) مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۰ ج و د) که بر این اساس، بخش‌های مرکزی کانی (نقطه ۲۶)، دارای تمرکز بالایی از Fe و Cd بوده و به سمت حاشیه مقادیر این دو عنصر کمتر می‌شود و در نقطه ۲۴ که در حاشیه کانی اسفالریت قرار می‌گیرد، به کمترین مقدار خود می‌رسد. میزان آهن کانی اسفالریت با دمای تشکیل آن دارای ارتباط مستقیم است (Vaughan and Craig, 1997) بنابراین بخش‌های دما بالا به دلیل داشتن محتوای آهن زیاد، به رنگ تیره دیده می‌شوند. درجه اکسیداسیون، میزان گوگرد و pH سیال در مقادیر عناصر کمیاب اسفالریت مؤثر می‌باشد؛ برای مثال شرایط اکسایش-کاهش سیالات هیدروترمال و محیط ته‌نشست به صورت کیفی از طریق مقدار Mn کانی اسفالریت قابل

مطالعات ریزکاو الکترونی (EPMA)

حین تبلور کانی‌های مختلف از یک سیال کانه‌دار، از میزان عنصری که وارد شبکه کانی می‌شود در سیال باقیمانده کاسته شده و سایر عناصر در سیال افزایش پیدا می‌کند؛ در مرحله بعدی، این سیال اشباع از عناصر باقی‌مانده، با سطح خارجی بلور متبلور شده واکنش داده و میزان آن عناصر در سطح در حال واکنش، افزایش یافته و موجب ایجاد زونینگ ترکیبی می‌شود. عناصر آهن و کادمیوم دو عنصر مهم در ایجاد زون‌بندی ترکیبی و رنگی در کانی اسفالریت هستند (Benedetto et al, 2005). مطالعه اسفالریت‌های رخساره کانسنگ رگه-رگچه‌ای و توده‌ای افق ۱ کانسار آب‌باغ با استفاده از میکروسکوپ پلاریزه و نور عبوری، نشان‌دهنده وجود پهنه‌بندی رنگی در این کانی است (شکل ۱۰ الف و ب) به گونه‌ای که بخش‌های مرکزی با رنگ قهوه‌ای تیره و حواشی کانی با رنگ

(Rouxel et al, 2005; Swanner et al, 2014). برای این منظور پیریت موجود در رسوبات باید به صورت هم‌زمان با سنگ میزبان و تشکیل شده و در طی فرآیندهای بعدی دچار دگرسانی نگردد (Rasmussen and Buick, 1999). براساس موحدنیا و همکاران (۱۳۹۴)، در افق ۱ کانسار آب‌باغ، پیریت‌های کلوفرم و فرامبوئیدال در رخساره کانسنگ لایه‌ای، در مرحله هم‌زمان با رسوبگذاری و دیانز آغازین شکل گرفته و عمدتاً دگرسانی در سنگ‌های دربرگیرنده آن‌ها مشاهده نمی‌شود. بررسی شیمی این پیریت‌ها، حاکی از تمرکز بالای کبالت در آن‌ها بوده که شاهدی بر تهنشست در محیط احیایی است (Huerta-Diaz and Morse, 1992). همچنین مقادیر بالای کبالت در پیریت‌های افق ۱ کانسار آب‌باغ را می‌توان به فعالیت‌های هیدروترمالی هم‌زمان با رسوبگذاری مربوط دانست؛ براساس برامساک (Brumsack, 2006)، کبالت می‌تواند در اثر فرآیندهای هیدروترمالی، به محیط رسوبی فقیر از اکسیژن افزوده شده و موجب تمرکز بالای این عنصر در کانی پیریت گردد (شکل ۱۰).

تخمین است. در شرایط احیایی منگنز به صورت محلول بوده و تهنشست اکسیدهای منگنز امکان پذیر نمی‌باشد. منگنز به آسانی در شبکه اسفالریت به صورت MnS گنجانیده می‌شود (Vaughan and Craig, 1997). محتوای منگنز کانی اسفالریت در نمونه‌های افق ۱ کانسار آب‌باغ ۱۱۸/۳۳ پی‌پی‌ام است که حاکی از شرایط احیایی محیط تهنشست کانسار می‌باشد. بر اساس موحدنیا و همکاران (۱۳۹۳)، محتوای آنتیموان اسفالریت‌های رخساره رگه-رگچه‌ای افق ۱ کانسار آب‌باغ بالا بوده و به صورت میانگین ۱۳۴۰ ppm است. مطالعات پیفاف و همکاران (Pfaff et al, 2011) نشان می‌دهد در کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان رسوبی که ماده معدنی سولفیدی با باطله سیلیسی زیاد همراهی شود، محتوای آنتیموان کانی اسفالریت بالا خواهد بود؛ بر این اساس، بالا بودن محتوای آنتیموان در اسفالریت‌های رخساره رگه-رگچه‌ای که دارای مقادیر قابل توجهی باطله سیلیسی است را می‌توان توجیه نمود. محتوای عنصر کبالت در پیریت به‌عنوان یک ابزار در بررسی شرایط اکسیداسیون-احیاء توسط محققین مختلف به کار رفته است (Rasmussen and Buick, 1999;)



شکل ۱۰: الف و ب) قطعات اسفالریت رخساره رگه-رگچه‌ای که منطقه‌بندی رنگی در آن به خوبی قابل مشاهده است (نور عبوری)؛ ج) تصویر BSE نمونه اسفالریت زونه و موقعیت نقاط آنالیز شده با ریزکاوشر الکترونی؛ د) نمودار خوشه‌ای عناصر کادمیوم و آهن برای نقاط تجزیه‌شده در اسفالریت (تصویر ج) از حاشیه به سمت مرکز.

نتیجه‌گیری

منطقه‌بندی جانبی موجود در افق ۱ کانسار آب‌باغ از سمت جنوب‌شرق (رخساره کانسنگ توده‌ای) به سمت شمال غرب می‌باشد. این منطقه‌بندی رابطه مستقیمی با افزایش فاصله از گسل هم‌زمان با رسوبگذاری دارد. وجود منطقه‌بندی جانبی عناصر مختلف در کانسارهای رسوبی-بروندمی را به دو عامل نسبت داده می‌شود (Lydon, 1996): الف) کاهش نسبی تولیدات هیدروترمالی نسبت به ذرات رسوبی عادی سنگ میزبان، با افزایش فاصله از رخساره رگه-رگچه‌ای و کانسنگ توده‌ای، که تابعی از فاصله نسبت به محل فعالیت سیالات کانه‌زا است.

ب) تغییرات منظم در نسبت تولیدات مختلف هیدروترمالی با فاصله جانبی از محل خروج سیالات که به رفتار شیمیایی متفاوت عناصر مختلف و تغییرات دما و pH محیط بستگی دارد. به‌طور کلی در کانسارهای رسوبی-بروندمی کاهش نسبی تولیدات هیدروترمالی نسبت به رسوبات طبیعی با افزایش فاصله از رخساره کانسنگ توده-ای، ارتباط دارد. پراکندگی محصولات هیدروترمالی به‌عنوان تابعی از فاصله نسبت به محل خروج سیالات و رفتار متفاوت ژئوشیمیایی

منابع

-آقائاتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور، ۵۸۶ص.

-موحدنیا، م.، ۱۳۹۴. رخساره‌های کانسنگی، ژئوشیمی و تیپ کانه‌زایی روی-سرب (باریم) در کانسار آب‌باغ (کهرویه)، جنوب شهرضا، پهنه

عناصر، در نظر گرفته می‌شود (Lydon, 1996). منطقه‌بندی عناصر، تغییرات بافتی و کانی‌شناسی در کانسار آب‌باغ، شباهت بسیار نزدیکی به کانسارهای بروندمی-رسوبی داشته و در افق اول کانسار آب‌باغ نسبت‌های Zn/Ba, Zn/Mn, Zn/Fe, Pb/Zn, Pb/Ag, Cu/Zn+Pb از رخساره رگه-رگچه‌ای به سمت رخساره لایه‌ای کاهش می‌یابد. کاهش میزان عناصر مس و نقره با دور شدن از محل گسل هم‌زمان با رسوبگذاری، عمدتاً ناشی از تغییرات دمایی در رخساره‌های مختلف بوده و می‌تواند شاهدی بر فرآیند پالایش پهنه‌ای در تشکیل کانسنگ توده‌ای باشد (Goodfellow, 2004).

سپاس‌گزاری

نویسندگان مراتب سپاس خود را از حوزه معاونت محترم پژوهشی و فناوری این دانشگاه ابراز می‌دارند. از جناب آقایان مهندس بهزاد حمامی‌پور بارنجی، رسول استادان‌فرد (مدیرعامل محترم شرکت فراپارس قشم) که در انجام بازدیدهای صحرائی و نمونه‌گیری از مغزه‌ها، یاری رسانمان بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

سندج-سیرجان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

-موحدنیا، م.، راستاد، الف. و رجبی، ع.، ۱۳۹۳. بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر فرعی و کمیاب کانی‌های اسفالریت و گالن در کانسار روی و سرب آب‌باغ، جنوب شهرضا، پهنه سندج-سیرجان، هجدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران.

- Ahmadi Khalaji, A., Esmaeily, D., Valizadeh, M.V. and Rahimpour, H., 2007. Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 29, p. 859-877.
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East: Tehran. Geological Survey of Iran, scale 1:5,000,000.
- Azizi, H. and Jahangiri, A., 2008. Cretaceous subduction-related volcanism in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran, *J. Geodyn.* v. 45, p. 178-190.
- Azizi, H. and Moinevaziri, H., 2009. Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran, *J. Geodyn.* v. 47, p. 167-179.
- Benedetto, F.D., Bernardini, G.P., Costagliola, P., Plant, D. and Vaughan, D.J., 2005. Compositional zoning in sphalerite crystals, *American mineralogist*, v. 90, p. 1384-1392.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies, In: *Rare earth element geochemistry*, Henderson, P. (Editors), Elsevier Science Publishing Corporation, Amsterdam, p. 63-114.
- Brill, B.A., 1989. Trace elements content and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit, Australia, and implications for ore genesis, *Canadian mineralogist*, v. 27(2), p. 263-274.
- Brumsack, H.J., 2006. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation, *Palaeogeogr, Palaeo-climatol, Palaeoecol*, v. 232, p. 344-361.
- Canet, C., Alfonso, P., Melgarejo, J.C. and Belyatsky, B.V., 2004. Geochemical evidences of sedimentary-exhalative origin of the shale-hosted PGE-Ag-Au-Zn-Cu occurrences of the Prades Mountains (Catalonia, Spain): trace-element abundances and Sm-Nd isotopes, *Journal of Geochemical exploration*, v. 82, p. 17-33.
- Cooke, D.R., Bull, S.W., Large, R.R. and McGoldrick, P.J., 2000. The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits. *Economic Geology*, v. 95, p. 1-18.
- Cullers, R.L. and Graf, J., 1984. Rare Earth Element in Igneous Rocks of the Continental Crust: Intermediate and Silicic Rocks, *Ore Petrogenesis*. In: Henderson, P., Ed., *Rare Earth Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, p. 275-316.
- Danyushevskiy, L., 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study, *Ore Geology Reviews*, v. 39, p. 188-217
- Esna-Ashari, A., Tiepolo, M., Valizadeh, M.V., Hassanzadeh, J. and Sepahi, A.A., 2012. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Aligoodarz granitoid complex, Sanandaj- Sirjan Zone, Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 43, p. 11-22.
- Goodfellow, W.D. and Lydon, J.W., 2007. Sedimentary-exhalative (Sedex) deposits, In: Goodfellow, W.D., (eds.), *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, v. 5, p. 163-183
- Goodfellow, W.D., 2004. Geology, genesis and exploration of SEDEX deposits, with emphasis on the Selwyn basin, Canada, in Deb, M., Goodfellow,

- W.D., (eds.), Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits: Attributes and models of some major deposits of India, Australia and Canada. Delhi, India, Narosa Publishing House, p. 24-99.
- Hawley, J.E. and Nichol, I., 1961. Trace elements in pyrite, prrhosite and chalcopyrite of different ores, *Economic geology*, v. 56(3), p. 467-487.
- Huerta-Diaz, M.A. and Morse, J.W., 1992. Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments, *Geochimica and Cosmochimica Acta*, v. 56, p. 2681-2702.
- Liu, Y., Cao, L. and Li, Z., 1984. *Elements geochemistry*, Science Press, Beijing, 452 p.
- Lydon, J.W., 1996. Sedimentary exhalative sulphides (SEDEX), in Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., (eds.), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*, Geology of Canada, No. 8, Geological Survey of Canada (also Geological Society of America, *The Geology of North America P-1*), p. 130-152.
- Lydon, W.J., 2004. Genetic models for Sullivan and other SEDEX deposits, in Deb, M. Goodfellow, W.D., (eds.), *Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits: Attributes and models of some major deposits of India, Australia and Canada*, Narosa publishing house, Delhi, India, p. 149-190.
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B. and Mohajjel, M., 2011. U-Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 41, p. 238-249.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonic of the Zagros orogeny in northwestern Iran, *J. international geology review*, v. 56, p. 263-287.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran, *J. Asian Earth Science*. v. 21, p. 397-412.
- Momenzadeh, M., 1976. Stratabound lead-zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malayer-Esfahan district (west Central Iran): lithology, metal content, zonation and genesis [Unpublished Ph.D. thesis], Heidelberg, University of Heidelberg, 300 p.
- Movahednia, M., Rastad, E., Rajabi, A. and Choulet, F., 2014. The Ab-Bagh Stratiform and Stratabound Zn-Pb Deposit, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran, 13th SGA Biennial Meeting 2015, *Proceedings*, v. 5.
- Palero-Fernández, F.J. and Martín-Izard, A., 2005. Trace element contents in galena and sphalerite from ore deposits of the Alcudia Valley mineral field (Eastern Sierra Morena, Spain), *Journal of Geochemical Exploration*, v. 86, p. 1-25.
- Pfaff, K., Koenig, A., Wenzel, T., Ridley, I., Hildebrandt, L.H., Leach, D.L. and Markl, G., 2011. Trace and minor element variations and sulfur isotopes in crystalline and colloform ZnS: Incorporation mechanisms and implications for their genesis, *Chemical Geology*, v. 286, p. 118-134.
- Price, B.J., 1972. Minor elements in pyrites from the Smithers map area, British Columbia and exploration applications of minor element studies (Doctoral dissertation), Vancouver: Columbia University.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral

- exploration, *International Geology Review*, v. 54, p. 1649-1672.
- Rasmussen, B. and Buick, R., 1999. Redox state of the Archean atmosphere: Evidence from detrital heavy minerals in ca.3250–2750 Ma sandstones from the Pilbara Craton, Australia. *Geology*, v. 27, p. 115-118.
- Rouxel, O.J., Bekker, A. and Edwards, K.J., 2005. Iron isotope constraints on the Archean and Paleoproterozoic ocean redox state, *Science*, v. 307, p. 1088-1091.
- Schwartz, M., 2000. Cadmium in zinc deposits: economic geology of a polluting element, *International Geology Reviews*. v. 42, p. 445-469
- Swanner, E.D., Planavsky, N.J., Lalonde, S.V., Robbins, L.J., Bekker, A., Rouxel, O.J., Saito, M.A., Kappler, A., Mojzsis, S.J. and Konhauser, K.O., 2014. Cobalt and marine redox evolution, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 390, p. 253-263.
- Tolcin, A.C., 2008. Cadmium, In: *Metals and minerals, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2007 I*, p. 15.1-15.9.
- Tu, G., 1984. The geochemistry of stratabound deposit, China, Beijing: Geology Press, p. 13-54.
- Vaughan, D.J. and Craig, J.R., 1997. Sulfide mineral stabilities, morphologies, and intergrowth textures, in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits—third edition: New York, John Wiley*, p. 367-434.
- Wilkinson, J.J., 2014. Sediment-hosted zinc-lead mineralization: processes and perspectives, In: *Treatise on Geochemistry (2nd ed.)*, Elsevier (2014), p. 219-248
- Ye, Lin., Cook, N., Cristiana, L.C., Yulong, Y., Zhang, Q., Tiegeng, L., Wei, G., Yulong, Y. and Danyushevskiy, L., 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study, *Ore Geology Reviews*, v. 39, p. 188-217
- Zhang, Q., 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb–Zn ore deposits, *Chinese Journal of Geochemistry*, v. 6, p. 177-190.