



## Research Article

### Ore mineralogy, mineral chemistry and genesis of carbonate-hosted zinc-lead non-sulfide deposit, Mansourabad, central Iran

Shirin Khadivar<sup>1</sup>, Batoul Taghipour<sup>1</sup> \*

1-Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 02 Mar 2025 Accepted: 11 May 2025

## Extended Abstract

### Introduction

Iran possesses vast regions with high potential for carbonate-hosted Zn–Pb deposits, largely due to its favorable geodynamic framework (Rajabi et al, 2012). The majority of the country's sedimentary-hosted lead and zinc deposits are concentrated within four major metallogenic belts, spanning from the Early Cambrian to the Tertiary period and occurring in a diverse range of siliciclastic and carbonate rock formations. These belts include Central Alborz, Tabas-Posht-e-Badam, Malayer-Esfahan, and Yazd-Anarak (Fazli et al, 2019; Rajabi et al, 2012, 2023). Among these, the Yazd-Anarak Metallogenic Belt (YAMB), located within the Yazd Block in western Central Iran, hosts some of the country's largest lead and zinc deposits, including Mehdiabad, Darreh Zanjir, and Mansourabad. This region is recognized as one of Iran's most significant metallogenic provinces. The Mansourabad deposit, situated approximately 75 km southwest of Yazd city, lies within the Yazd-Anarak metallogenic belt and represents a key Pb–Zn mineralization site. Despite the previous geological, mineralogical, geochemical studies the Mansourabad sulfide ore, there are no detailed investigations on the Mansourabad non-sulfide ore. The main objective of this study is to comprehensively investigate the mineralogical, textural, and petrographic characteristics of the Mansourabad non-sulfide ores and to develop a genetic model.

### Materials and Methods

#### Sampling and analytical methods

For geological investigations and the study of non-sulfide ore characteristics (identification of zinc-bearing minerals using Zinc Zap fluid), field visits were conducted, and 30 samples were collected from all sections. To carry out mineralogical studies and examine the structure and texture of the non-sulfide ore, 15 XRD analyses, 12 thin sections, and 15 polished thin sections were prepared at ZarAzma Laboratory and studied at Shiraz University. All thin sections and polished thin sections were examined using an Olympus microscope under both XPL and PPL light at magnifications of 4X and 10X. Additionally, to identify mineral phases and analyze the distribution and concentration of elements, 12 polished thin sections were studied using a scanning electron microscope (SEM) model TESCAN-Vega3, which has a resolution higher than 50 nanometers, at the Central Laboratory of Shiraz University. Before conducting the study of polished thin sections in this device, all sections had to be coated with gold using a sputter coater.

#### Geologic setting and Ore Mineralogy

Mansourabad deposit is hosted by the Lower Cretaceous sedimentary sequence in the south of the Yazd basin. This sequence is based on lithological differences characteristics from bottom to top classified into three parts: Sangestan Formation, Taft Formation, and Abkoh Formation.

**Citation:** Khadivar, Sh. And Taghipour, B., 2025. Ore mineralogy, mineral chemistry and genesis of carbonate-hosted zinc-lead non-sulfide deposit, *Res. Earth. Sci.* 16(2), (1-18) DOI: 10.48308/esrj.2025.238998.1263

\* Corresponding author E-mail address: taghipour@shirazu.ac.ir



Sulfide and non-Sulfide Zn-Pb mineralization is formed in the upper part of the dolomites of the Taft formation. The mineral observed in the sulfide part is generally galena, Sphalerite is rarely occurred due to it leached into non-sulfide zinc minerals. The field observations, petrographic and XRD results, determined that the main minerals of the non-sulfide ore included smithsonite, hydrozincite, hemimorphite and cerussite along with iron oxides.

### Results and Discussion

Dolomitization is the major hydrothermal alteration styles in the Mansourabad deposit. According to the textural and petrographical studies, three types of dolomites were identified in Mansourabad Zn-Pb deposit. Among these, type III dolomite (hydrothermal dolomite) hosts sulfide and non-sulfide mineralization in this deposit. Seawater is the source of fluids in this deposit, which, by circulating in the detrital sedimentary rocks of the underlying unit (Sangestan Formation), leach metals such as lead, zinc, silver, and copper (metal-bearing brine), moves upward through the syn-sedimentary normal fault. Mixing of acidic metal-bearing brine with cold, reduce, sulfur-containing seawater causes the formation of hydrothermal dolomite and the deposition of sulfide mineralization sub-seafloor in the limestone unit (hydrothermal dolomite) of the Taft Formation. Like all non-sulfide deposits in the world, the Mansourabad non-sulfide ore was formed under conditions of uplift, dry climate, and fault development. In the Late Cretaceous, the closing of the Neotethys ocean and the dominance of pressure conditions in central Iran led to the creation of orogenic activities (the formation of the Laramide orogeny) and a structure that, together with the climatic conditions (hot and dry) of Central Iran, caused the weathering and oxidation of the sulfide part and its transformation and change into the non-sulfide part. Faults in the Mansourabad deposit have led to the penetration of oxidizing meteoric waters into the host rock (carbonate rocks) and their dissolution. This interaction between oxide fluids and sulfide ore has caused the formation of the non-sulfide part in the Mansourabad deposit in the form of host rock replacement (white ore), sulfide mineral replacement (red ore). In dry climates, dissolved oxygen in meteoric waters reaches its highest level compared to other climates.


### Conclusion

The Mansourabad non-sulfide ore deposit is hosted within the dolomitized limestones of the Taft Formation, dating back to the Early Cretaceous. This deposit contains both sulfide and non-sulfide mineralization. In the non-sulfide zone, minerals such as smithsonite, hydrozincite, hemimorphite, and cerussite, along with iron oxides, are observed. The most significant type of alteration in this area is dolomitization, followed by calcitization. The formation of the non-sulfide ore in this region has been influenced by various factors, including the composition of primary minerals (which determines the type of secondary minerals), the nature of the host rocks, faults and fractures (which facilitate water infiltration and accelerate oxidation), and climatic conditions. In the Late Cretaceous, with the closure of the Neotethys Ocean and the Laramide orogeny, tectonic pressures, along with the warm and arid conditions of Central Iran, intensified the weathering and oxidation of sulfides. The rapid uplift of the crust brought sulfide minerals closer to the surface, accelerating their oxidation. Additionally, faults provided pathways for oxidizing meteoric waters, facilitating the dissolution of the host rock and the replacement of sulfide minerals. These conditions led to the extensive oxidation of sulfides and the formation of the non-sulfide ore deposit in the region.

**Keywords:** Supergene, Zn- Pb non-sulfide ore, Hydrothermal dolomite, Mansourabad.



## کانه‌نگاری، شیمی کانی و الگوی زایش کانسار ناسولفید روی - سرب با میزبان کربنات، کانسار منصورآباد، ایران مرکزی

شیرین خدیور<sup>۱</sup>، بتول تقی پور<sup>۱\*</sup> 

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

### چکیده گسترده

#### مقدمه

ایران دارای مناطق وسیعی با پتانسیل بالا برای کانسارهای سرب و روی در سنگ‌های کربناته است که عمدتاً به دلیل چارچوب زمین‌ساختی مطلوب آن می‌باشد (Rajabi et al, 2012). بیشتر کانسارهای سرب و روی با منشأ رسوبی در ایران در چهار کمربند اصلی متالوژنی متمرکز شده‌اند که از کامبرین اولیه تا ترشیاری امتداد داشته و در طیف گسترده‌ای از سنگ‌های سیلیس‌آواری و کربناته یافت می‌شوند این کمربندها شامل البرز مرکزی، طیس-پشت‌بادام، ملایر-اصفهان و یزد-انارک هستند (Fazli et al, 2019; Rajabi et al, 2012, 2023). در میان این کمربندها، کمربند متالوژنی یزد-انارک (YAMB) که در بلوک یزد در غرب ایران مرکزی واقع شده است، میزبان برخی از بزرگ‌ترین کانسارهای سرب و روی کشور از جمله معدن مهدی‌آباد، دره زنجیر و منصورآباد است. این منطقه به عنوان یکی از مهم‌ترین استان‌های متالوژنی ایران شناخته می‌شود. کانسار منصورآباد که در حدود ۷۵ کیلومتری جنوب غربی شهر یزد قرار دارد، بخشی از کمربند متالوژنی یزد-انارک محسوب می‌شود و به عنوان یک منطقه کلیدی در کانی‌سازی سرب و روی شناخته شده است. علیرغم مطالعات قبلی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی کانسنگ سولفیدی کانسار منصورآباد، تحقیقات دقیقی در مورد کانسنگ ناسولفیدی آن انجام نشده است (Maghfouri, 2017). هدف اصلی این پژوهش بر بررسی جامع ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و پتروگرافی کانسنگ‌های غیرسولفیدی منصورآباد و توسعه یک مدل ژنتیکی متمرکز شده است.

#### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی‌های زمین‌شناسی و مطالعه ویژگی‌های کانسنگ ناسولفیدی (شناسایی کانی‌های حاوی روی با استفاد از سیال زینک‌زپ (Zinc Zap) بازدیدهای صحرایی انجام گرفت و تعداد ۳۰ نمونه از تمامی بخش‌ها برداشت شد. برای مطالعات کانی‌شناسی و بررسی ساخت و بافت کانسنگ ناسولفیدی، تعداد ۱۵ آنالیز XRD، ۱۲ مقطع نازک و ۱۵ مقطع نازک‌صیقلی در آزمایشگاه زرآزما تهیه و در دانشگاه شیراز مطالعه گردید. تمامی مقطع نازک و مقطع نازک‌صیقلی با استفاده از میکروسکوپ المپیوس در دو نور XPL و PPL و با بزرگنمایی 4X و 10X مطالعه شد. همچنین برای شناسایی فازهای کانیایی و پراکندگی و غلظت عناصر، ۱۲ نمونه نازک‌صیقلی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با مدل TESCAN-Vega3 که دارای رزولوشن بالاتر از ۵۰ نانومتر است در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز مطالعه شد. برای انجام مطالعه مقاطع نازک‌صیقلی در این دستگاه در ابتدا باید تمامی مقاطع با طلا توسط دستگاه sputter coater پوشش داده شوند.

استناد: خدیور، ش. و تقی پور، ب.، ۱۴۰۴. کانه‌نگاری، شیمی کانی و الگوی زایش کانسار ناسولفید روی - سرب با میزبان کربنات،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۲)، (۱-۱۸)، DOI: 10.48308/esrj.2025.238998.1263

E-mail: [taghipour@shirazu.ac.ir](mailto:taghipour@shirazu.ac.ir)

\* نویسنده مسئول:



### زمین‌شناسی و کانه‌زایی

کانسار منصورآباد در توالی رسوبی کرتاسه زیرین در حوضه جنوب یزد قرار دارد. این توالی بر اساس ویژگی‌های متفاوت سنگ‌شناسی از پایین به بالا به سه بخش سازند سنگستان، سازند تفت و سازند آبکوه طبقه‌بندی می‌شود. کانی‌سازی سولفیدی و غیر سولفیدی روی-سرب در قسمت بالایی دولومیت‌های سازند تفت تشکیل شده است. کانی مشاهده شده در قسمت سولفیدی به طور کلی گالن است. اسفالریت به دلیل تبدیل شدن به کانی‌های غیر سولفیدی روی به ندرت دیده می‌شود. مشاهدات میدانی، نتایج پتروگرافی و پراش پرتوی ایکس (XRD) نشان داد که کانی‌های اصلی کانسنگ غیر سولفیدی شامل اسمیتسونیت، هیدروزینسیت، همی‌مورفیت و سروسیت به همراه اکسیدهای آهن است.

### نتایج و بحث

دولومیتی شدن عمده‌ترین نوع دگرسانی گرمایی در کانسار منصورآباد است. با توجه به مطالعات بافتی و پتروگرافی، سه نوع دولومیت در کانسار روی سرب منصورآباد شناسایی شد. که از این میان دولومیت نوع سوم (دولومیت هیدروترمال) میزبان کانه زایی سولفید و ناسولفید در این کانسار است. آب دریا منبع سیالات این کانسار است که با گردش در سنگ‌های رسوبی آواری واحد زیرین (سازند سنگستان)، فلزاتی مانند سرب، روی، نقره و مس را از طریق گسل نرمال همزمان با رسوبگذاری به سمت بالا حرکت می‌دهد. اختلاط شورابه حاوی فلز اسیدی با آب دریای سرد، احیایی و گوگردار باعث تشکیل دولومیت گرمایی و رسوب کانی‌سازی سولفیدی در زیر کف دریا در واحد سنگ آهک (دولومیت گرمایی) سازند تفت می‌شود. سنگ معدن غیر سولفیدی منصورآباد مانند تمام ذخایر غیر سولفیدی جهان در شرایط بالا آمدگی، اقلیم خشک و توسعه گسلی تشکیل می‌شود. در کرتاسه پسین، بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و ایجاد شرایط فشارشی در ایران مرکزی منجر به ایجاد فعالیت‌های کوه‌زایی (تشکیل کوه‌زایی لارامید) و ساختاری شد که همراه با شرایط اقلیمی (گرم و خشک) ایران مرکزی، باعث هوازدگی و اکسید شدن بخش کانسنگ سولفیدی و تبدیل آن به کانسنگ ناسولفیدی شد. گسل‌های کانسار منصورآباد منجر به نفوذ آب‌های جوی اکسیدکننده به سنگ میزبان (سنگ‌های کربناته) و انحلال آن‌ها شده است. این برهمکنش سیالات اکسیدی و کانسنگ سولفیدی باعث تشکیل بخش غیر سولفیدی در کانسار منصورآباد به صورت جایگزینی سنگ میزبان (سنگ سفید)، جایگزینی کانی سولفیدی (کانسنگ قرمز) شده است.

### نتیجه‌گیری

کانسنگ ناسولفیدی منصورآباد درون آهک‌های دولومیتی‌شده سازند تفت با سن کرتاسه زیرین قرار دارد. این کانسار شامل دو نوع کانه‌زایی سولفیدی و ناسولفیدی است. در بخش ناسولفیدی، کانی‌هایی مانند اسمیت‌زونیت، هیدروزینسیت، همی‌مورفیت و سروزیت به همراه اکسیدهای آهن دیده می‌شوند. مهم‌ترین نوع دگرسانی در این منطقه دولومیتی شدن و پس از آن کلسیتی شدن است. تشکیل کانسنگ ناسولفیدی در این منطقه تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب کانی‌های اولیه (که نوع کانی‌های ثانویه را تعیین می‌کند)، جنس سنگ‌های میزبان، گسل‌ها و شکستگی‌ها (که به نفوذ آب و تسریع اکسیداسیون کمک می‌کنند) و شرایط آب‌وهوایی قرار دارد. در اواخر کرتاسه، با بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و وقوع کوه‌زایی لارامید، فشارهای زمین‌ساختی به همراه شرایط گرم و خشک ایران مرکزی، فرایند هوازدگی و اکسایش سولفیدها را تشدید کردند. بالا آمدگی سریع پوسته باعث شد کانی‌های سولفیدی به سطح نزدیک‌تر شده و سریع‌تر اکسید شوند. همچنین، گسل‌ها با ایجاد مسیرهایی برای نفوذ آب‌های جوی اکسیدکننده، انحلال سنگ میزبان و جانشینی کانی‌های سولفیدی را تسهیل کردند. این شرایط باعث اکسیداسیون گسترده سولفیدها و تشکیل کانسنگ ناسولفیدی در منطقه شده‌اند.

**واژگان کلیدی:** سوپرژن، ناسولفید، کانی‌سازی روی-سرب، دولومیت هیدروترمال، منصورآباد.

## مقدمه

کانسنگ ناسولفیدی روی که به عنوان "کالامین" شناخته می‌شود، به معنی مواد معدنی اکسید شده روی حاصل از هوازدگی عمیق سنگ‌های سولفیدی اولیه با سنگ میزبان کربناتی یا آواری اطلاق می‌شود (Mondillo et al, 2018). این ذخایر در ارتباط با کانسارهای SEDEX, MVT, Irish ایجاد می‌شوند. کانی‌های یافت شده در کانسنگ ناسولفیدی شامل کربنات‌های روی (اسمیت‌زونیت و هیدروزنیت)، سیلیکات روی (ویلیمیت و همی‌مورفیت)، اکسید روی (فرانکلینیت) و رس‌های غنی از روی (ساکونیت و اسمکتیت) می‌باشند، که ممکن است با کربنات‌های سرب (سروزیت)، سولفات‌های سرب (مانند آنگلزیت) و اکسی-هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، هماتیت) همراه باشند (Coppola et al, 2008; Boni and Mondilio, 2015; Navarro et al, 2016). اکسیداسیون و حفظ کانسنگ‌های ناسولفید معمولاً بعد از مزوزوئیک (یا سن کمتر) است، زیرا کانه‌های ناسولفید اکسید شده اگرچه از نظر شیمیایی نسبتاً پایدار هستند اما در برابر فرسایش مکانیکی بسیار آسیب پذیر بوده و از بین می‌روند (Boni et al, 2009). ذخایر ناسولفیدی روی بر اساس ویژگی‌های کانی‌شناسی، زمین‌شناسی و موقعیت ژنتیکی، به دو دسته هیپوژن و سوپرژن تقسیم می‌شوند (Hitzman et al, 2003). ذخایر هیپوژن توسط سیالات گرمایی با منشا گرمایی یا دگرگونی که شیمی کانه‌های سولفیدی اولیه را تغییر می‌دهند، تشکیل می‌شوند و عمدتاً شامل مجموعه‌ای از سیلیکات و اکسیدهای روی بی‌آب مانند ویلیمیت، زینسیت، فرانکلینیت هستند که به صورت محلی با سولفیدها همزیست می‌باشند. ذخایر سوپرژن، ناشی از اکسیداسیون و هوازدگی کانسنگ سولفیدی بوده که در سطح یا نزدیک به سطح تشکیل می‌شوند و شامل کانی‌های همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، هیدروزنیت، سروزیت و اکسی-هیدروکسیدهای آهن هستند (Santoro et al, 2020). ایران به علت وجود سکوه‌های کربناته بسیار گسترده دارای طیف وسیعی از ذخایر سرب و روی از جمله ذخایر MVT، ذخایر Irish و ذخایر SEDEX می‌باشد (Rajabi et al, 2012). در حال حاضر بیشتر از ۳۵۰ نهشته و رخداد روی-سرب در ایران شناخته شده که بیشترین ذخایر سرب و روی با میزبان رسوبی در خرده قاره ایران مرکزی و زون سندج - سیرجان

قرار دارد (Ehya et al, 2010; Rajabi et al, 2023). کانسار منصورآباد در خرده قاره ایران مرکزی، کمربند یزد-انارک و در ۷۵ کیلومتری جنوب تفت در ارتباط با سازند آهکی تفت قرار دارد. بخش سولفیدی این کانسار پیشتر توسط مغفوری (Maghfouri, 2017) در قالب رساله دکتری مورد پژوهش قرار گرفته است، اما تاکنون مطالعات علمی دقیقی بر روی کانسنگ ناسولفیدی آن انجام نشده است. این پژوهش، تلاشی برای بررسی کانی‌شناسی، مطالعات بافت و ساخت، بررسی سنگ میزبان و چگونگی تشکیل کانسنگ ناسولفید کانسار منصورآباد می‌باشد.

## جایگاه زمین‌شناسی

صفحه ایران بسته شدن حداقل دو اقیانوس به نام پالئوتتیس در مزوزوئیک و نئوتتیس در سنوزوئیک را ثبت می‌کند (Maanijou et al, 2020). در پرمین، پوسته اقیانوس پالئوتتیس در جهت شمال به زیر صفحه توران فرورانش کرده و باعث ایجاد کشش در گندوانا و پیدایش نئوتتیس شده است (Stampfli and Borel, 2002). در تریاس پیشین فرورانش پوسته اقیانوس نئوتتیس به زیر ایران مرکزی موجب بالا آمدن این خرده قاره شده است که این جنبش‌ها در نهایت منجر به تشکیل هورست و گرابن‌ها در تریاس پسین در این خرده قاره گردید (Rajabi et al, 2015; Mirnejad et al, 2012). در اکثر نقاط ایران مرکزی رخساره‌هایی مانند ماسه‌سنگ، شیل و مارن در دوره ژوراسیک تشکیل شده است. فاز کوهزایی سیمین پسین یک فاز فشاری همراه با دگرگونی و ماگماتیسم بوده و گرانیته شیرکوه از نوع S محصول این فعالیت‌ها می‌باشد (Ghorbani, 2013). به دنبال فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس در زیر حاشیه جنوبی صفحه ایران در کرتاسه پیشین حوضه پشت قوس نائین-بافت شروع به باز شدن کرده و بدین ترتیب پهنه سندج-سیرجان از ایران مرکزی جدا می‌شود (Aliani et al, 2012; Maanijou et al, 2020). با باز شدن حوضه‌های پشت قوس در کرتاسه گروه شمشک به رسوبات تخریبی (سازند سنگستان) و رسوبات عمیق دریایی (سازند تفت و آبکوه) تغییر می‌کند. بنابراین محیط کششی پشت قوس بین ایران مرکزی و سندج - سیرجان در زمان کرتاسه پیشین شرایط مساعدی را برای تشکیل نهشته‌های روی-سرب SEDEX (ایرانکوه) و Irish

کوه‌های زاگرس و البرز، حوضه کپه‌داغ و ایران مرکزی یافت می‌شود (Hosseini and Conrad, 2008; Godet et al, 2014). بلوک یزد غربی‌ترین بلوک خرده قاره ایران مرکزی است که از شمال توسط گسل کویر بزرگ-درونه از غرب توسط گسل دهشیر- بافت و از شرق توسط گسل انار-چاپدونی از دیگر پهنه‌های ساختاری ایران جدا می‌گردد (Golonka 2004). با توجه به اینکه توالی (لایه‌های) رسوبی کرتاسه زیرین در بلوک یزد میزبان کانه‌زایی سولفید و ناسولفید در کانسار منصورآباد می‌باشد در زیر به شرح واحدهای آن پرداخته می‌شود (شکل ۱). پایین‌ترین قسمت این توالی سازند سنگستان با سن بارمین است که به طور ناهمشیب بر روی گرانیته شیرکوه به سن ژوراسیک قرار دارد. این سازند متشکل از رسوبات تخریبی دانه درشت و دانه‌ریز (شامل کنگلومراهای قرمز، ماسه‌سنگ و سیلت-استون) با میان لایه‌هایی از آهک الیتی می‌باشد که منعکس کننده شرایط خشک- نیمه‌خشک در کرتاسه است (Schlagintweit and Wilmsen, 2014). سازند سنگستان در کانسار منصورآباد رخنمونی نداشته و با مطالعه گمانه-های حفاری مشخص شد این سازند در عمق ۱۵۰ متری قرار دارد. بخش میانی این توالی، سازند تفت بوده که بر اساس فسیل‌های موجود در آن، سن بارمین تا آپتین را نشان می‌دهد. این سازند که به صورت همشیب بر روی سازند سنگستان قرار دارد، متشکل از سنگ آهک نازک لایه، آهک ضخیم لایه، آهک فسیل‌دار (رودیست و اربیتولین)، دولومیت و آهک دولومیتی می‌باشد. قسمت پایینی آن، آهک نازک لایه با میان لایه‌های شیل می‌باشد که بر روی آن آهک ضخیم لایه قرار دارد. کانسار سولفیدی و ناسولفیدی کانسار منصورآباد در بخش بالایی آهک ضخیم لایه دولومیتی شده سازند تفت قرار دارد (شکل ۲). بالاترین بخش این توالی، سازند آبکوه (دره زنجیر) است که شامل ماسه‌سنگ، شیل و سیلت‌استون می‌باشد. این واحد به صورت همشیب بر روی سنگ آهک-های تفت و در زیر واحد کنگلومرای کرتاسه فوقانی قرار می‌گیرد (شکل ۲).

(منصورآباد) ایجاد کرد (Ghasemi and Talbot, 2006; Shafaii Moghadam et al, 2013).

در نتیجه کمربندهای سرب و روی ملایر- اصفهان در پهنه سندانج - سیرجان و یزد - انارک در ایران مرکزی هر دو از مناطق مهم کانه‌زایی فلزات پایه در ایران بوده است (Hossini-Dinani and Mohammad Yazdi, 2021). موقعیت حوضه پشت کمانی و حضور منابع آذرین در این مناطق تأمین کننده گرمای مورد نیاز برای حرکت سیالات هستند که منجر به تسریع گردش سیالات گرمایی در توالی رسوبی و غنی‌شدگی سیال از فلزات می‌گردند (Rajabi et al, 2023).

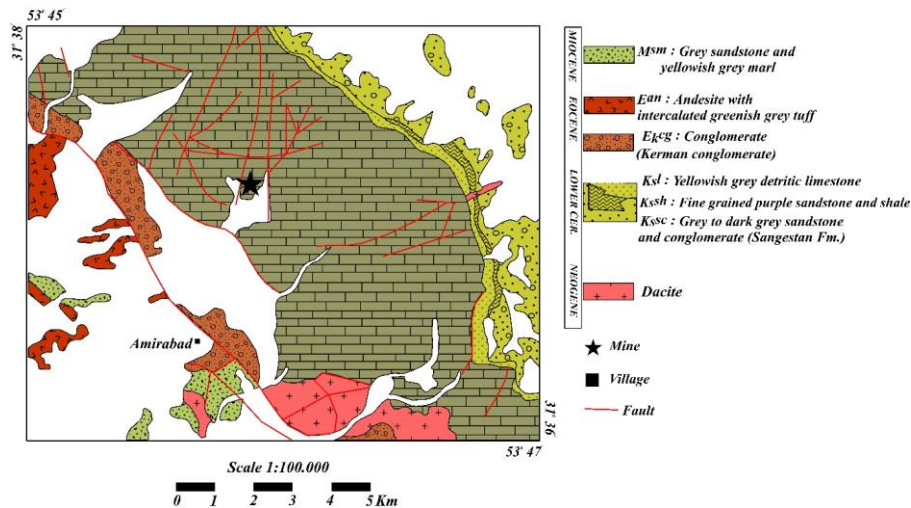
### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی‌های زمین‌شناسی و مطالعه ویژگی‌های کانسنگ ناسولفیدی (شناسایی کانی‌های حاوی روی با استفاده از سیال زینک زپ (Zinc Zap) باز دیده‌های صحرایی انجام گرفت و تعداد ۳۰ نمونه از تمامی بخش‌ها برداشت شد. برای مطالعات کانی‌شناسی و بررسی ساخت و بافت کانسنگ ناسولفیدی، تعداد ۱۵ آنالیز XRD، ۱۲ مقطع نازک و ۱۵ مقطع نازک‌صیقلی در آزمایشگاه زرآما تهیه و در دانشگاه شیراز مطالعه گردید. تمامی مقطع نازک و مقطع نازک‌صیقلی با استفاده از میکروسکوپ المپیوس در دو نور XPL و PPL و با بزرگنمایی 4X و 10X مطالعه شد. همچنین برای شناسایی فازهای کانیایی و پراکندگی و غلظت عناصر، ۱۲ نمونه نازک‌صیقلی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با مدل TESCAN-Vega3 که دارای رزولوشن بالاتر از ۵۰ نانومتر است در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز مطالعه شد. برای انجام مطالعه مقاطع نازک‌صیقلی در این دستگاه در ابتدا باید تمامی مقاطع با طلا توسط دستگاه sputter coater پوشش داده شوند.

### منطقه‌ی مورد مطالعه

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی کانسار منصورآباد در ایران توالی رسوبات کربناته کرتاسه در نواحی مختلف از جمله در رشته



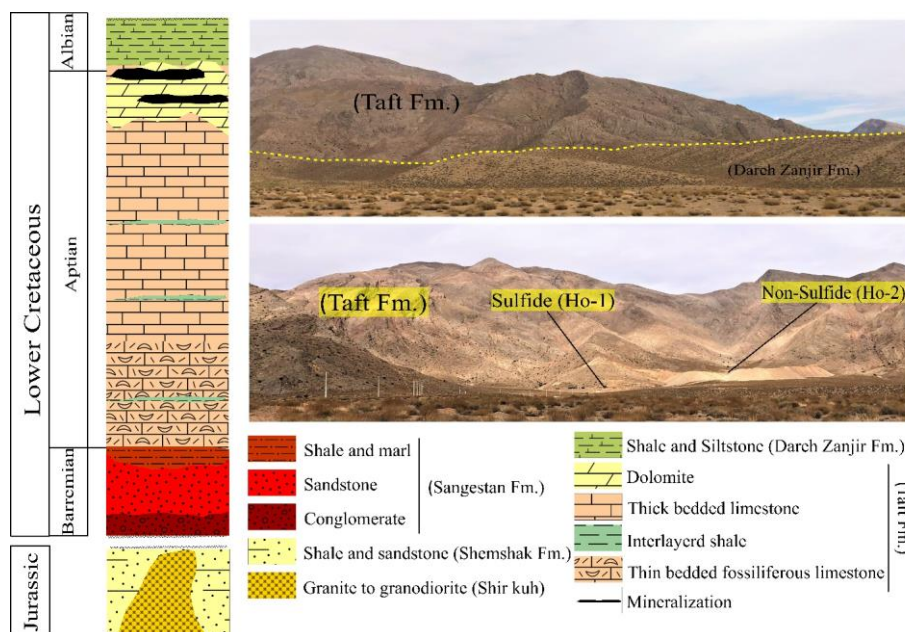


شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه که در آن موقعیت کانسار روی-سرب منصورآباد نشان داده شده است (Haj Molla Ali and Alavinaini, 1993).

Fig. 1: Simplified geological map of the studied area where the location of Mansourabad Zn-Pb deposit is also shown (Haj Molla Ali and Alavinaini, 1993).

گسل‌های عادی تهنشست یافته است)، برشی شدن در نزدیک گسل‌ها، وجود دگرسانی‌های گرمابی در بخش فرادیواره گسل و وجود بافت رگه-رگچه‌ای همراه با کانی-های سولفیدی می‌باشد. در نتیجه می‌توان ذکر کرد که این گسل‌های همزمان با رسوبگذاری در کانسار منصورآباد به عنوان معابر انتقال سیال گرمابی به کف دریای کرتاسه زیرین بوده که در زمان تشکیل کانه فعال بوده و نقش اساسی در تشکیل کانسنگ سولفیدی کانسار را داشته است.

مطالعات زمین‌شناسی در کانسار منصورآباد نشان‌دهنده قرارگیری این منطقه در نزدیکی گسل دهشیر-بافت می-باشد. همچنین بررسی‌های صورت گرفته در این منطقه نشان از وجود گسل‌های همزمان با رسوبگذاری بوده به طوری که کانه‌زایی در بخش فرادیواره این گسل‌ها ایجاد شده است. شواهد این گسل‌ها در کانسار مورد مطالعه عبارت‌اند از: تغییر ضخامت رسوبات از محل گسل به سوی اطراف (به طوری که بیشترین ضخامت رسوبات در فرادیواره



شکل ۲: ستون چینه‌شناسی کانسار منصورآباد به همراه عکس‌های صحرایی از سازند تفت (میزبان کانه‌زایی) و سازند آبکوه

Fig. 2: Schematic stratigraphic column of the Mansourabad deposit along with field photographs of the Taft Formation (the host of mineralization) and the Abkouh Formation.

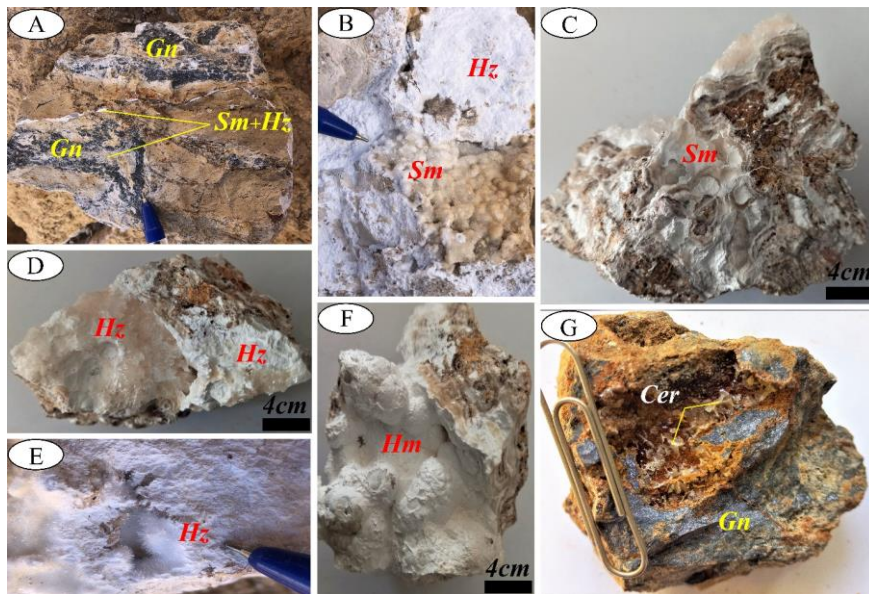
## نتایج

## کانه‌زایی و افق کانسنگی

در کانسار منصورآباد ۲ افق کانسنگی وجود دارد که هر دو افق از لحاظ موقعیت چینه‌ای، در بخش بالایی آهک ضخیم لایه دولومیتی شده سازند تفت قرار دارند (شکل ۲). افق اول کانه‌زایی، بخش کانسنگ سولفیدی کانسار است که به صورت تونل استخراج می‌شود. کانی مشاهده شده در این بخش عموماً گالن می‌باشد که بافت توده‌ای، جانیشینی و رگه‌ای را نشان می‌دهد (شکل ۳ A). اسفالریت به علت اینکه به کانی‌های روی ناسولفید تبدیل شده، به ندرت دیده می‌شود. پیریت‌های خود شکل نیز تحت تاثیر اکسیداسیون به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. افق دوم کانه‌زایی، بخش کانسنگ ناسولفیدی کانسار است که از هوازدگی کانسنگ سولفیدی ایجاد می‌شود. در برخی مناطق که دگرسانی شدت کمتری داشته، آثاری از سولفیدهای اولیه (گالن) در کنار کانی‌های ناسولفید به عنوان باقیمانده برجای مانده است (شکل ۳ A). با انجام مطالعات صحرایی، میکروسکوپی و بررسی آنالیزهای XRD مشخص شد که کانی‌های یافت شده در کانسنگ ناسولفید شامل اسمیت-زونیت، هیدروزونیت، همی‌مورفیت و سروزیت به همراه اکسیدهای آهن می‌باشند (شکل ۴). بر اساس مشاهدات صحرایی و بر اساس تفاوت‌های رنگ و بافت، سه نوع اسمیت‌زونیت در کانسنگ ناسولفید منصورآباد مشاهده شد. اسمیت‌زونیت نوع I به شکل جانیشینی بر روی سنگ میزبان کربنات قرار دارد که عموماً به رنگ سفید دیده می‌شود. اسمیت‌زونیت II شامل دانه‌های بوتریوتیدی از بلورهایی به رنگ سفید و قهوه‌ای کم‌رنگ با ظاهری ناهموار در نمونه دستی هستند (شکل ۳ B). اسمیت‌زونیت نوع III بافت کلوفرم را دارند. رنگ‌های متفاوت موجود در این کانی احتمالاً به علت وجود آهن در ساختار آن می‌باشد به طوریکه بخش‌های دارای آهن تیره (قهوه‌ای) هستند (شکل ۳ C). آبشویی اسمیت‌زونیت سفید منجر به تشکیل اسمیت‌زونیت قهوه‌ای تا قرمز با بافت کلوفرم همراه با هیدروزونیت یا همی‌مورفیت می‌شود. هیدروزونیت در

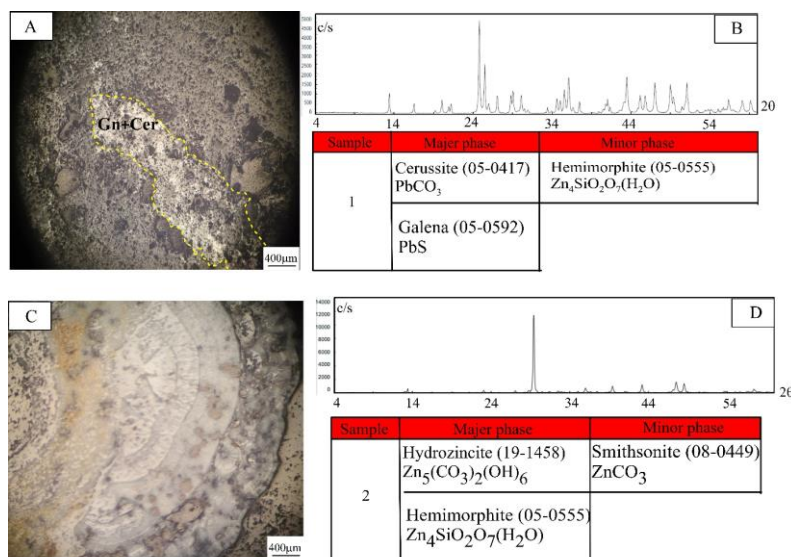
شرایط عادی (فشار CO<sub>2</sub> اتمسفر و حضور آب) پایدار است. این کانی به دو شکل در کانسار منصورآباد یافت می‌شود. هیدروزونیت نوع I به رنگ و ظاهر گچ مانند بر روی سنگ میزبان کربناته قرار دارد. هیدروزونیت نوع II به صورت دانه‌های شیشه‌ای بی‌رنگ و صورتی خود شکل همراه با اسمیت‌زونیت یافت می‌شوند (شکل‌های ۳ D و ۳ E). همی‌مورفیت معمولاً در انتهای توالی پاراژنتیکی ناسولفیدی، زمانی که اکثر سیالات در گردش، واکنش خود را با میزبان‌های کربناتی کامل کرده‌اند، تشکیل می‌شوند که معمولاً منجر به رسوب این کانی در رگه و فضاهای خالی می‌شود. در کانسار مورد مطالعه ۲ نوع همی‌مورفیت بر اساس ساخت و بافت شناسایی شد. نوع I به شکل بلورین، که بر روی اکسیدهای آهن قرار دارد و نوع II با بافت کلوفرم و به رنگ سفید و قهوه‌ای می‌باشد (شکل ۳ F). تنها فاز سرب شناسایی شده در بخش ناسولفیدی کانسار منصورآباد، کانی سروزیت می‌باشد. بر اساس مشاهدات صحرایی دو نوع سروزیت در منطقه شناسایی شده است. نوع I به شکل جانیشینی گالن بر روی سنگ میزبان کربنات قرار دارد. نوع II به صورت صفحات در هم تنیده خود شکل شیشه‌ای بی‌رنگ بوده که عموماً بر روی فازهای اکسید آهن درون فضاهای خالی شکل می‌گیرد (شکل ۳ G). در کانسنگ ناسولفید سوپرژن، اکسید-هیدروکسیدهای آهن عمدتاً در نواحی باقی‌مانده (گوسان) در بالای سنگ معدنی اکسید شده متمرکز شده‌اند. این کانی‌ها (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) رنگ زرد تا قرمز به منطقه می‌دهند. به عنوان یک قاعده کلی، هماتیت در دماهای بالا (نیمه گرمسیری و گرمسیری) و pH خنثی و گوتیت در دماهای پایین‌تر و pH پایین ایجاد می‌شود (Santoro et al, 2020). وجود آنیون‌هایی مانند SO<sub>4</sub> مسیر تبدیل و سرعت تبلور را تغییر می‌دهد. به طوریکه در حضور SO<sub>4</sub> تشکیل هماتیت نسبت به گوتیت ارجحیت دارد (Lin et al, 2003). بخش گوسان در کانسار منصورآباد به علت حضور SO<sub>4</sub> و شرایط آب و هوایی گرمسیری بیشتر شامل کانی‌های هماتیت و لیمونیت و کمتر شامل کانی گوتیت می‌باشد.





شکل ۳: تصاویر نمونه دستی از بخش ناسولفید کانسار منصورآباد. A: وجود بخش سولفید و ناسولفید در کنار هم بر روی دولومیت هیدروترمال؛ B: اسمیت زونیت با بافت بتروپیدی در کنار هیدروزنسیت؛ C: اسمیت زونیت با بافت کلوفرم بر روی دولومیت هیدروترمال؛ D: هیدروزنسیت با بافت بلوری در کنار هیدروزنسیت با ظاهر گچ مانند؛ E: هیدروزنسیت ایجاد شده در فضای خالی؛ F: همی مورفیت با بافت کلوفرم؛ G: بلورهای در هم تنیده سروزیت در کنار گالن در کانسنگ قرمز. Gn: گالن. Sm: اسمیت زونیت. Hz: هیدروزنسیت. Hm: همی مورفیت. Cer: سروزیت.

Fig. 3: Hand specimen images of the non-sulfide part of the Mansourabad deposit. A: The coexistence of sulfide and non-sulfide minerals on hydrothermal dolomite; B: Smithsonite with botryoidal texture next to hydrozincite; C: Smithsonite with colloform texture on hydrothermal dolomite; D: Hydrozincite with crystalline texture next to hydrozincite with gypsum appearance; E: hydrozincite formed in open space; F: Hemimorphite with colloform texture; G: Intertwined cerussite crystals next to galena in red ore. Gn: Galena. Sm: Smithsonite. Hz: hydrozincite. Hm: Hemimorphite. Cer: Cerussite (Whitney and Evans, 2010).



شکل ۴: تصاویر مقاطع میکروسکوپی به همراه آنالیز XRD از کانی‌های سروزیت و هیدروزنسیت. A: تصویر میکروسکوپی از جانشینی سروزیت در اطراف گالن؛ B: نتایج آنالیز XRD کانی سروزیت؛ C: تصویر میکروسکوپی از بافت کلوفرم کانی هیدروزنسیت؛ D: نتایج آنالیز XRD کانی هیدروزنسیت.

Fig. 4: Microscopic photograph along with XRD analysis of cerussite and hydrozincite minerals. A: Microscopic photograph of cerussite substitution around galena; B: XRD analysis results of cerussite mineral; C: Microscopic photograph of colloform texture of hydrozincite mineral; D: XRD analysis results of hydrozincite mineral.

**مطالعات SEM-EDX**

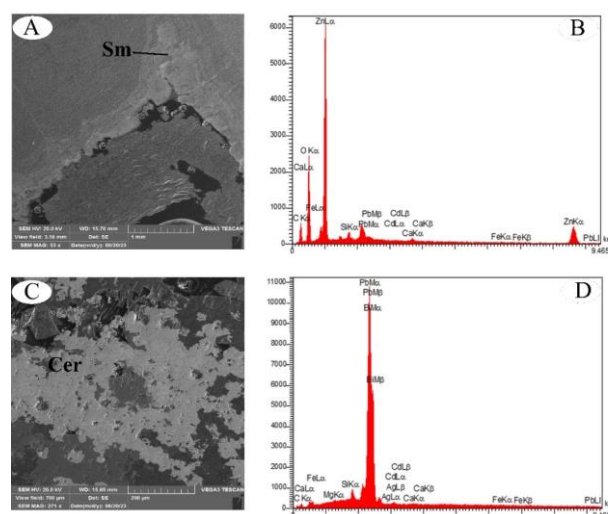
اسمیت زونیت ( $ZnCO_3$ ) ترکیب ساده اکسید روی می باشد. مطالعات SEM-EDX بر روی این کانی نشان می دهد که علاوه بر روی، اکسیژن و کربن عناصر دو ظرفیتی دیگری مانند Cd, Fe, S می توانند در ساختمان این کانی جای گیرند (جدول ۱). رنگ های متنوع آن در کانسنگ ناسولفیدی منصورآباد (سفید تا قهوه ای) نیز به علت وجود همین ناخالصی ها است. این کانی همانند اسفالریت میزبان بسیار مناسبی برای کادمیوم بوده و می تواند تا 45500 ppm کادمیوم را در خود جای دهد (Schwartz, 2000). بر پایه مطالعات انجام شده بر روی این کانی مشخص شد که اسمیت زونیت منطقه دارای کادمیوم بسیار ناچیزی می باشد.

علت این امر احتمالاً اکسیداسیون و شسته شدن کانی های روی و جدا شدن روی از کادمیوم در این کانسنگ است (شکل های A و B). سرروزیت: کانی های حاوی سرب در کانسار منصورآباد نسبت به کانی های حاوی روی فراوانی کمتری دارند. سرروزیت کانی کربناته سرب بوده که در ترکیب خود حدود ۸۳ درصد سرب دارد. بررسی انجام شده بر روی این کانی نشان می دهد که علاوه بر سرب، اکسیژن و کربن عناصر نقره، روی و بیسموت در ترکیب آن وجود دارد (جدول ۱). بالاترین مقدار نقره در سرروزیت مشاهده شد. زیرا عنصر نقره به علت شعاع یونی تقریباً یکسان می تواند در ساختار کانی های سرب مانند سرروزیت جای گیرد (Keim et al, 2016) (شکل های C و D).

جدول ۱: ترکیب عنصری کانی های اسمیت زونیت و سرروزیت با استفاده از روش آنالیز SEM در کانسار منصورآباد.

Table 1: Elemental composition of smithsonite and cerussite minerals using the SEM analysis method in the Mansourabad deposit.

| total | Bi    | S     | C     | O     | Ag    | Cd    | Ca    | Pb    | Zn    | Fe    | نام کانی/عنصر |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 100   | ----- | 0.08  | 5.43  | 55.05 | ----- | 0.57  | 0.23  | ----- | 38.17 | 0.47  | اسمیت زونیت   |
| 100   | ----- | 0.22  | 24.31 | 49.81 | ----- | 0.39  | 0.41  | ----- | 24.52 | 0.25  | اسمیت زونیت   |
| 100   | ----- | 0.38  | 19.19 | 39.30 | ----- | 0.50  | ----- | ----- | 39.74 | 0.62  | اسمیت زونیت   |
| 100   | ----- | 0.30  | 21.61 | 38.08 | ----- | 0.35  | 0.59  | ----- | 38.55 | 0.52  | اسمیت زونیت   |
| 100   | ----- | 0.18  | 23.65 | 40.70 | ----- | 0.51  | 0.12  | ----- | 34.35 | 0.49  | اسمیت زونیت   |
| 100   | ----- | 0.21  | 22.12 | 40.02 | ----- | 0.70  | 0.33  | ----- | 36.21 | 0.41  | اسمیت زونیت   |
| 100   | 1.11  | 0.24  | 13.56 | 10.63 | 0.77  | ----- | 0.55  | 72.86 | ----- | 0.28  | سرروزیت       |
| 100   | 1.10  | ----- | 12.37 | 14.52 | 1.52  | ----- | ----- | 70.37 | ----- | 0.12  | سرروزیت       |
| 100   | 0.83  | 0.19  | 15.37 | 15.06 | 0.81  | ----- | 0.18  | 67.56 | ----- | ----- | سرروزیت       |
| 100   | ----- | 0.07  | 17.29 | 14.51 | 0.81  | ----- | 0.24  | 66.46 | ----- | 0.62  | سرروزیت       |
| 100   | 1     | ----- | 11.61 | 15.44 | 0.88  | ----- | 0.43  | 70.05 | ----- | 0.59  | سرروزیت       |
| 100   | 0.91  | 0.16  | 12.18 | 12.10 | 1.1   | ----- | 0.12  | 73.13 | ----- | 0.30  | سرروزیت       |

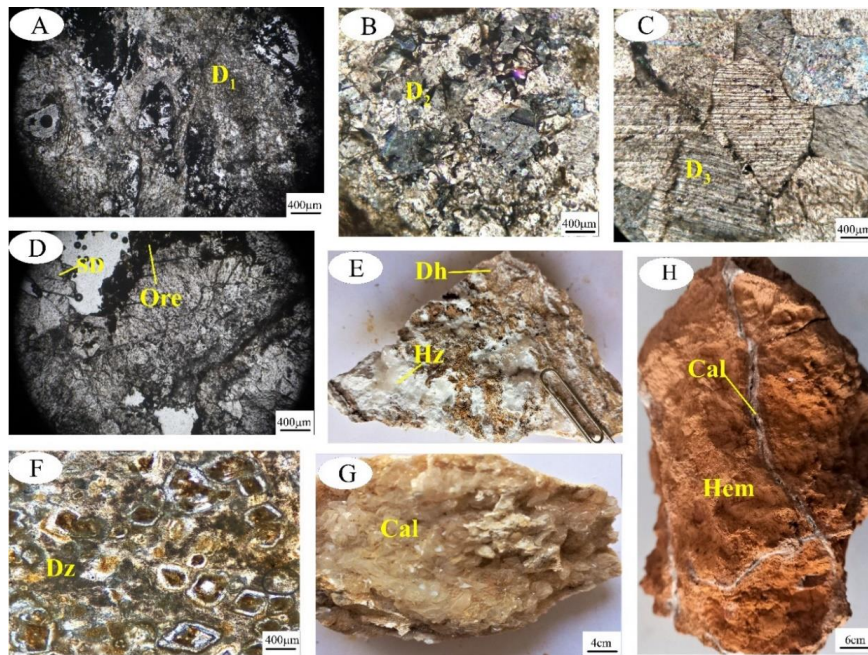


شکل ۵: A و B: تصویر BSE از کانی اسمیت زونیت به همراه نمودار طیفی؛ C و D: تصویر BSE از کانی سرروزیت به همراه نمودار طیفی.  
Fig. 5: A, B: BSE image of the mineral smithsonite with spectral diagram; D, C: BSE image of the mineral cerussite with spectral diagram.

## دگرسانی‌ها

از آنجایی که بسیاری از حوضه‌های رسوبی تحت شرایط تکتونیکی کششی آغاز می‌شوند می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های جریان گرمایی گسترده که منجر به استقرار دولومیت‌های زین‌اسبی (Saddle dolomite) می‌شوند، به احتمال زیاد در محیط‌های کششی رخ می‌دهند (Davies and Smith, 2006). دگرسانی موجود در کانسنگ منصورآباد به شکل جانشینی بخشی یا کامل سنگ آهک میزبان توسط سیال گرمایی شکل گرفته است که توسط آن بخشی یا همه سنگ دچار دگرسانی شده‌اند. دگرسانی‌های مشاهده شده در کانسار منصورآباد عموماً به شکل دولومیتی شدن و کلسیتی شدن مشاهده می‌شود (شکل ۶). با توجه به تقسیم‌بندی دولومیت‌ها بر اساس بافت و پس از انجام بررسی‌های سنگ‌نگاری سه نوع دولومیت در کانسار منصورآباد تشخیص داده شد. دولومیت‌های ریز بلور (D1)، دولومیت متوسط بلور (D2)، دولومیت درشت بلور (D3). دولومیت‌های ریز بلور (D1): این دولومیت‌ها که به دولومیت ناحیه‌ای معروف‌اند به رنگ خاکستری تیره، دارای بلورهای بی شکل بوده که طی مراحل اولیه دیاژنز رسوبات آهکی تشکیل می‌شوند (Lee and Wilkinson, 2002; Wilkinson, 2003). تشکیل دولومیت‌های ناحیه‌ای با افزایش تخلخل و نفوذپذیری در سنگ میزبان، بستر خوبی را برای ادامه جریان سیال کانه‌دار مهیا می‌کند. برای تشکیل این دولومیت‌ها (با ضخامت زیاد) به حجم بالایی از سیال غنی از منیزیم (به طور معمول آب دریا) نیاز است. در نتیجه تنها منشا منیزیوم این دولومیت‌ها آب دریا می‌باشد. بر اساس فابریک، وجود فسیل و اندازه بلورهای بسیار ریز، چنین بر می‌آید که دولومیت‌های نوع اول در شرایط دمایی کم، نزدیک سطح و در طی فرایند دیاژنز آغازین تشکیل شده باشند (شکل ۶ A). دولومیت متوسط بلور (D2): این دولومیت‌ها، متراکم، متوسط بلور و دارای مرز غیرمسطح بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و به صورت موزائیک-های هم‌اندازه هستند (Warren, 2000). دولومیت‌های نوع دوم معمولاً در مرحله دیاژنز تاخیری (تدفین کم‌عمق تا

عمق متوسط) و از جانشینی سنگ‌های آهکی قبلی و یا از تبلور مجدد دولومیت‌های نوع یک تشکیل می‌شوند (شکل ۶ B). دولومیت درشت بلور (D3): این دولومیت با رنگ روشن، شامل بلورهای درشت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار غیرمسطح و شفاف‌اند که محصول دیاژنز تاخیری در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۶ C). منشا سیالات دولومیت ساز در این مدل دولومیتی شدن، آب منفذی است (Mahboubi et al, 2016). منیزیم لازم برای دولومیتی شدن نوع سوم می‌تواند از تبدیل و بی‌آب شدن کانی‌های رسی درون شیل-ها، شورابه‌های حوضه‌ای و همچنین سیالات گرمایی فراهم شود (Machel et al, 2002). دولومیت زین‌اسبی معمولاً در شکستگی‌ها، مرحله آخر دیاژنز، به وسیله سیالات شور و در دمایی بالاتر از ۶۰-۵۰ تشکیل می‌شود و نشان دهنده محیط کاهشی می‌باشد (Mazzullo, 1992). دولومیت‌های زین‌اسبی، گرمایی هستند و می‌توانند به عنوان یک شاخص غیرقابل تردید برای فعالیت گرمایی در نظر گرفته شوند (شکل ۶ D). دولومیت‌های نوع سوم (دولومیت‌های گرمایی) میزبان کانه‌زایی در کانسار مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۶ E). برخی از این دولومیت‌های خودشکل، دارای منطقه‌بندی (زونینگ) هستند به این شکل که مرکز دولومیت تیره و حاشیه آن شفاف است. علت این منطقه‌بندی، تفاوت در ترکیب به ویژه حضور اکسید آهن در طی ته‌نشست دولومیت می‌باشد. آهن در بسیاری از بلورهای دولومیت به عنوان جایگزینی برای منیزیم رایج است. بنابراین، برخی از بلورهای دولومیت لوزی شکل، ممکن است حاوی مناطق متحدالمرکز، به شکل تناوب سطح قرمز غنی از آهن و شفاف فقیر از آهن باشند (شکل ۶ F). کلسیتی شدن به سه شکل در منطقه رخ می‌دهد: نوع I به شکل جانشینی کلسیت میکرواسپارایت درون فسیل‌های اوربیتولین آهک خاکستری تفت مشاهده شده است. نوع II به شکل کلسیت‌های بسیار درشت بلور بوده که در کنار کانسنگ سولفیدی و ناسولفیدی یافت می‌شوند، نوع III به صورت رگه-رگچه‌هایی می‌باشد که سنگ میزبان کربناته را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۶ G و ۶ H).



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی و نمونه دستی از دگرسانی‌های کانسنگ منصورآباد. A: دولومیت ریز بلور نوع اول؛ B: دولومیت متوسط بلور نوع دوم؛ C: دولومیت درشت بلور نوع سوم (دولومیت هیدروترمال)؛ D: دولومیت زین اسبی و درشت بلور در کنار ماده معدنی بخش سولفیدی؛ E: دولومیت هیدروترمال میزبان کانه زایی بخش ناسولفید؛ F: دولومیت با بافت منطقه‌بندی؛ G: کلسیت درشت بلور؛ H: کلسیت با بافت رگه-رگه‌ای. SD دولومیت زین اسبی. Cal کلسیت. Dz دولومیت زونینگ‌دار، Dh دولومیت هیدروترمال.

Fig. 6: Microscopic images and hand samples of alterations in the Mansourabad ore deposit. A: Fine-crystalline dolomite type I; B: Medium-crystalline dolomite type II; C: Coarse-crystalline dolomite type III (hydrothermal dolomite); D: Saddle and coarse-crystalline dolomite next to the mineralization of the sulfide part; E: Hydrothermal dolomite hosting the mineralization of the non-sulfide part; F: Zoned dolomite; G: Coarse-crystalline calcite; H: Calcite with vein-veinlet texture. SD Saddle dolomite. Cal Calcite. Dz Zoned dolomite. Dh Hydrothermal dolomite.

ذخایر جانشینی سنگ دیواره (کانسنگ سفید): این نوع ذخایر که به کانسنگ سفید معروف‌اند، معمولاً دارای کمتر از ۴۰ درصد روی، کمتر از ۷ درصد آهن و مقدار بسیار کم سرب هستند (Boni et al, 2007; Borg et al, 2015). زمانی که کانسنگ سولفیدی به تدریج اکسید می‌شوند، آب زیرزمینی اسیدی حاوی فلزات به داخل میزبان آهنی مهاجرت کرده و طی واکنش با آن کانسنگ ناسولفید جانشین سنگ دیواره را به دور از کانسنگ سولفیدی تشکیل می‌دهد. تشکیل این ذخایر معمولاً تحت تأثیر بالا آمدن تکتونیکی نهشته و نفوذپذیری سنگ میزبان کنترل می‌شود. از آنجا که سنگ دیواره (کربناته) واکنش‌پذیری بالایی دارد، روی در این نهشته‌ها به غلظت‌های بالاتری می‌رسد. در نتیجه، غلظت روی در ذخایر جانشینی سنگ دیواره معمولاً بیشتر از ذخایر جانشینی مستقیم است. براساس مطالعات زمین‌شناسی و کانی‌شناسی، کانسنگ ناسولفید کانسار منصورآباد به دو نوع کانسنگ قرمز و سفید

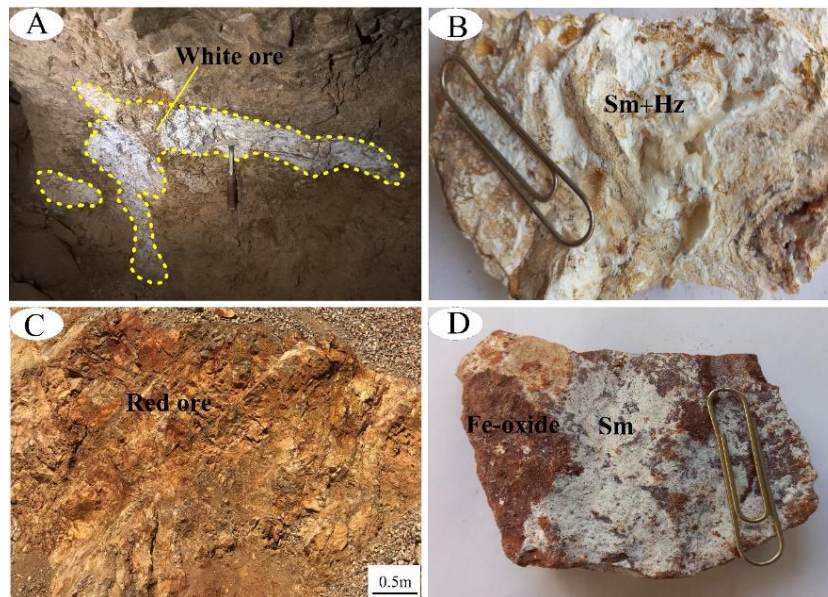
#### کانه‌زایی ناسولفیدی کانسار منصورآباد

ذخایر سوپرژن عموماً به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: ذخایر جانشینی مستقیم و ذخایر جانشینی سنگ دیواره. ذخایر جانشینی مستقیم: این ذخایر به کانسنگ قرمز معروف است حاوی بیش از ۲۰ درصد روی، بیش از ۷ درصد آهن و محتوای بالای سرب می‌باشند (Reichert and Borg, 2008; Choulet et al, 2014; Maghfouri et al, 2018). ذخایر جانشینی مستقیم از اکسیداسیون کانسنگ سولفیدی و بسیار نزدیک به آن ایجاد می‌شوند. به دلیل حضور فراوان کانی‌های سولفیدی مانند پیریت، گالن و اسفالریت در تشکیل این ذخایر، ذخایر جانشینی مستقیم معمولاً از نظر کانی‌شناسی پیچیده بوده و شامل طیف گسترده‌ای از کانی‌های اکسیدی، سیلیکاتی و کربناتی هستند. کانی‌های یافت شده در این ذخایر شامل همی-مورفیت، اسمیت‌زونیت، هیدروزنیت، سروزیت و اکسی-هیدروکسیدهای آهن هستند (Hitzman et al, 2003).



هیدروکسیدهای آهن می‌باشد (شکل‌های C ۷ و D ۷). از شواهد وجود کانسنگ قرمز در کانسار مورد مطالعه می‌توان به: وجود کانی‌های ناسولفیدی مانند (اسمیت‌زونیت، هیدروزنیت، همی‌مورفیت، سرزیت و هماتیت / گوتیت)، وقوع جانیشینی ناسولفید بر روی کانسنگ سولفیدی، حضور و تشکیل کانسنگ ناسولفید درون حفره‌های کارستی و وجود گوسن اشاره کرد (Navarro-Ciurana et al, 2016).

تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۷). در این کانسار کانسنگ سفید بسیار بیشتر از کانسنگ قرمز است. کانسنگ سفید (جانیشینی سنگ دیواره)، شامل اسمیت‌زونیت، هیدروزنیت، همی‌مورفیت است. یکی از ویژگی‌های کانسنگ سفید در کانسار منصورآباد وجود بافت کلوفرم است (شکل‌های A ۷ و B ۷). کانسنگ قرمز شامل کانی‌های همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، هیدروزنیت، اکسی



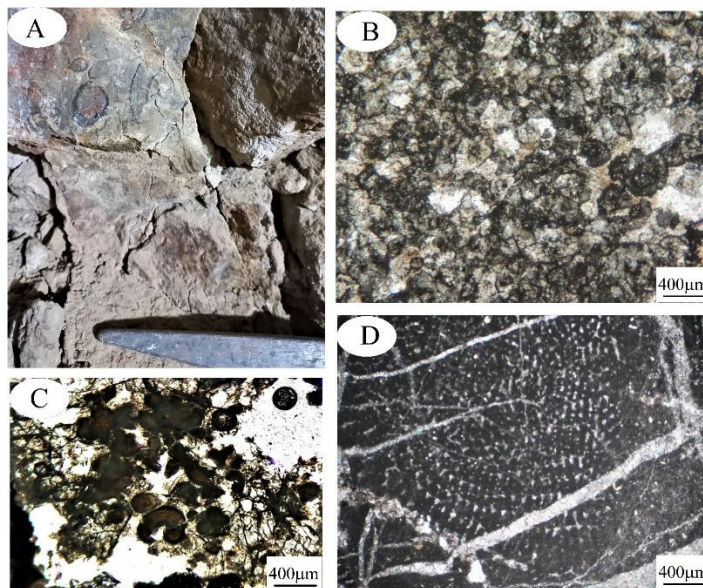
شکل ۷: تصاویر صحرایی و نمونه دستی از انواع کانسنگ ناسولفیدی کانسار منصورآباد. A: کانسنگ سفید جانیشین سنگ دیواره؛ B: نمونه دستی از کانسنگ سفید (اسمیت‌زونیت و هیدروزنیت)؛ C: کانسنگ قرمز جانیشین مستقیم؛ D: نمونه دستی از کانسنگ قرمز دارای اکسی-هیدروکسیدهای آهن به همراه اسمیت‌زونیت.

Fig. 7: Field photographs and hand samples of different types of non-sulfide ore from the Mansourabad deposit. A: White ore wall rock replacement; B: Hand specimen of white ore (smithsonite and hydrozincite); C: Direct replacement red ore; D: Hand specimen of red ore containing iron oxyhydroxides with smithsonite.

سانتیگراد یعنی در عرض‌های جغرافیایی پایین زندگی می‌کردند که نشان‌دهنده دمای بالا در زمان تشکیل سنگ کربناته بوده است. همچنین فراوانی اربیتولین نمایانگر پیشروی آب دریا و تغییر در شکل سکوی کربناته می‌باشد (Flugel and Munnecke, 2010). حضور سیمان‌های کلسیتی به صورت موزاییکی و بی شکل در واحد سنگ آهک خاکستری اربیتولین دار بیانگر تشکیل واحدهای رسوبی در محیط‌های کم‌عمق، کم انرژی، دما بالا و در یک محیط سکوی کربناته است (Peernajmodin et al, 2018).

#### شرایط محیط تشکیل سنگ میزبان

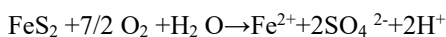
با مطالعات صحرایی و میکروسکوپی بر روی آهک‌های سازند تفت مشخص شد که این واحد کربناته دارای فسیل‌های رودیست و اربیتولین می‌باشد (شکل ۸) (Schlagintweit et al, 2013). رودیست‌ها از اجزای مهم پلت فورم‌های کم‌عمق کربناته از انتهای ژوراسیک تا انتهای کرتاسه بوده‌اند که مشخصاً سن آلبین-آپتین را نشان می‌دهند. وجود و فراوانی این فسیل نشان دهنده گسترش سکوی کربناته می‌باشد (Skelton and Gili, 2012). رودیست‌ها در محیط‌هایی با دمای بالاتر از ۲۵ درجه



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپی و نمونه دستی از آهک‌های سازند تفت. A: نمونه دستی از سنگ کربناته فسفیل‌دار سازند تفت؛ B و C: تصاویر میکروسکوپی از فسفیل اربیتولین در سنگ آهک سازند تفت (در نور XPL)؛ D: تصویر میکروسکوپی فسفیل رودیست (در نور XPL).  
 Fig. 8: Microscopic images and hand samples of limestones from the Taft Formation. A: Hand sample of fossiliferous carbonate rock from the Taft Formation.; B: and C: Microscopic images of Orbitolina fossils in the limestone of the Taft Formation.; D: Microscopic images of rudist.

به آب در آب و هوای خشک، سیالاتی که در طی فرآیند اکسیداسیون تولید شده‌اند، از نظر روی و سایر فلزات بسیار غنی می‌شوند. اکسایش کانی‌های سولفیدی مانند پیریت، منجر به تولید اسیدسولفوریک و اسیدی شدن محیط می‌شود (Bertorino et al, 1995) (واکنش رابطه ۱):

رابطه ۱)



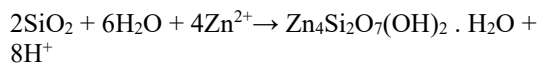
اسید تولید شده با کربنات‌ها واکنش داده و منجر به کارستی شدن و افزایش نفوذپذیری ثانویه کربنات‌ها می‌شود. تماس هر چه بیشتر این اسید با کربنات‌ها، موجب افزایش pH، خنثی‌سازی اسید و آزاد شدن یون‌های Ca، Mg،  $\text{CO}_3$ ،  $\text{HCO}_3^-$  از کربنات و رسوب یون‌های فلزی نظیر Cd، Mn، Zn، Pb در کربنات‌ها می‌گردد. اسمیت‌زونیت در مراحل اولیه تشکیل کانسنگ ناسولفیدی همزمان با اکسیداسیون کانسنگ سولفیدی در زیر سطح ایستایی تشکیل می‌شود. به علت سرعت کم انتشار دی‌اکسیدکربن در زیر سطح ایستایی، فعالیت  $\text{CO}_2$  در آن افزایش می‌یابد. در نتیجه تشکیل و پایداری این کانی نیاز به  $\text{PCO}_2$  (g) بالایی دارد. چندین منبع  $\text{CO}_2$  برای توضیح  $\text{PCO}_2$  (g) بالا و در نتیجه عدم تعادل با جو وجود دارد. این منابع شامل فرآیندهای بیولوژیکی و اکسیداسیون کانسنگ سولفیدی هستند (Boni et al, 2003). در فرآیندهای بیولوژیکی،

#### شرایط تشکیل کانسنگ ناسولفیدی

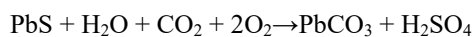
مهم‌ترین شرایطی که برای تشکیل کانسنگ ناسولفیدی با میزبان کربنات وجود دارند عبارتند از: ماهیت کانسنگ سولفیدی، بالا آمدن تکتونیکی و شرایط آب و هوا (Reichert and Borg, 2008). در سنگ‌های کربناته به دلیل برهمکنش سیالات غنی از روی (با pH پایین) با کربنات‌ها در شرایط اکسیدکننده، غالباً کانی‌های اسمیت-زونیت و هیدروزونیت ایجاد می‌شوند در صورتی که سنگ‌های تخریبی (به علت وجود سیلیس) عمدتاً تمایل به تشکیل همی‌مورفیت و ساکونیت دارند (Sangameshwar and Barnes, 1983). بالا آمدن تکتونیکی منجر به قرار گرفتن کانسنگ سولفیدی در سطح و اکسیداسیون آن می‌شود. همچنین منجر به شکسته شدن کربنات‌های میزبان شده که عملکرد آب‌های جوی را تسهیل می‌کند. مطلوب‌ترین شرایط برای اکسیداسیون در آب و هوای خشک تا معتدل به دست می‌آید که در آن حداکثر مقدار فلز برای حمل و نقل در دسترس است. فصل‌های بارانی اساساً آب‌های جوی و اکسیژن آزاد موجود در آن را فراهم می‌کنند، در حالی که در فصول خشک که سطح آب زیرزمینی معمولاً پایین است منجر به ورود جریان‌های گازها ( $\text{CO}_2$ ،  $\text{O}_2$ ) به درون کانی سولفیدی و اکسیداسیون آنها می‌شود (Choulet et al, 2014). به دلیل دسترسی محدود

معمولاً در انتهای پاراژنز کانسنگ ناسولفیدی، زمانی که اکثر سیالات در گردش، واکنش خود را با میزبانهای کربناته کامل کرده‌اند، یعنی در حضور سیلیس و  $PCO_2$  پایین یافت می‌شوند (واکنش رابطه ۲) (شکل ۹). سیلیس مورد نیاز برای تشکیل این کانی از کوارتز موجود در سنگ میزبان تامین می‌شود. در مناطقی که سیلیس به میزان بیشتری بوده همی مورفیت سفیدرنگ و در مناطقی که مقدار سیلیس کم بوده همی مورفیت شیشه‌ای در حفره‌های باز تشکیل می‌شود (Gilg et al, 2008). تشکیل سروزیت نیز توسط چندین پارامتر مانند  $pH$ ،  $pCO_2$  و تحرک سرب در سیال کنترل می‌شود. در شرایط  $pH$  خنثی و  $PCO_2$  بالا سروزیت به شکل بلورهای خود شکل در فضاهای خالی شکل می‌گیرد (واکنش رابطه ۳) (Garrels, 1954).

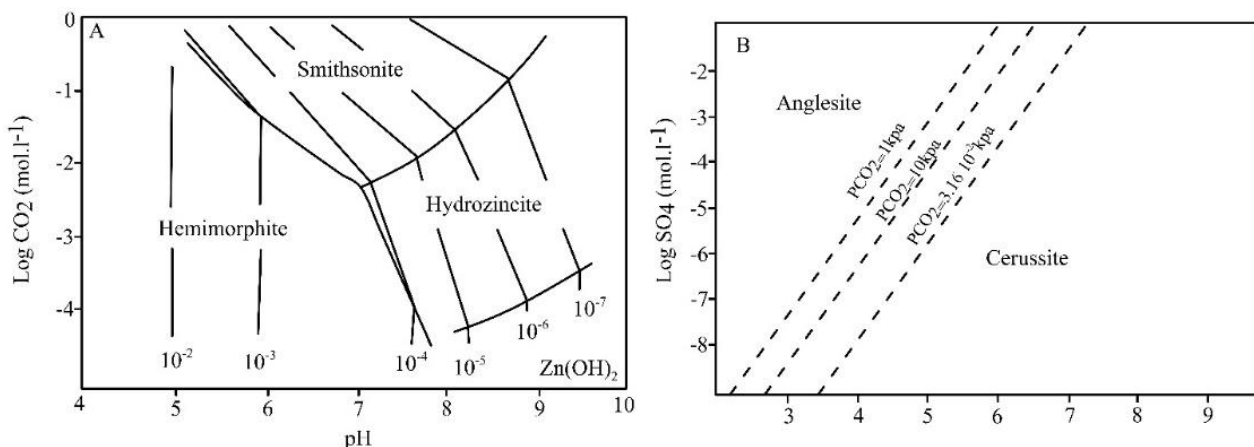
رابطه ۲



رابطه ۳



مقدار بالای  $CO_2$  از اکسیداسیون کربن آلی موجود در شیل‌های سیاه غنی از مواد آلی تامین می‌شود. در اکسیداسیون کانسنگ سولفیدی، منبع  $CO_2$ ، واکنش اسیدسولفوریک حاصل از اکسیداسیون پیریت با سنگ میزبان کربناته و آزادسازی گچ، آب و دی‌اکسید کربن است. این فرایند را می‌توان منبع مهمی از دی‌اکسید کربن در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک فرض کرد. همچنین تاکاهاشی (Takahashi, 1960) اشاره کرد که  $pH$  نیز یکی از عوامل اصلی کنترل تشکیل کانی‌های روی ثانویه از سیال حاوی فلز است. به طوری که در سیالات تقریباً خنثی تا کمی قلیایی ( $pH$  بین ۷ تا ۸)، اسمیت‌زونیت اغلب به عنوان اولین کانی و سپس با کاهش  $pH$  هیدروزنیت و سپس همی مورفیت (در شرایط اسیدی) تشکیل می‌شود (شکل ۹) (Meda et al, 2017). هیدروزنیت برای تشکیل نیاز به  $PCO_2$  (g) اتمسفر و حضور آب دارد. در بالای سطح ایستایی،  $CO_2$  به اتمسفر می‌رود و در نتیجه فعالیت آن کاهش یافته و هیدروزنیت تشکیل می‌شود. همی مورفیت



شکل ۹: A: محدوده پایداری کانی‌های ثانویه روی؛ B: محدوده پایداری کانی‌های ثانویه روی؛ C: محدوده پایداری کانی سروزیت (خط چین نشان دهنده فشار  $PCO_2$ ، فشار  $PCO_2$  اتمسفر  $3.16 \cdot 10^{-2}$ ) (Takahashi, 1960; Reichert and Borg, 2008).

Fig. 9: A: Stability range of secondary zinc minerals; B: Stability range of cerussite mineral (dashed line indicates  $PCO_2$  pressure, atmospheric  $PCO_2$  pressure  $3.16 \cdot 10^{-2}$ ).

الگوی زایش کانسنگ ناسولفید منصورآباد (Maghfouri, 2017). با اختلاط شورابه فلزدار اسیدی با آب سرد و قلیایی و دارای سولفور دریا باعث تشکیل دولومیت هیدروترمال و ته‌نشست کانه‌زایی سولفیدی در زیر کف دریا در واحد آهکی (دولومیت هیدروترمال) سازند تفت می‌شود. همانند تمام ذخایر ناسولفید در دنیا کانسنگ ناسولفید منصورآباد تحت شرایط بالآمده‌گی، آب و هوای خشک و توسعه گسل‌ها ایجاد می‌شود. در اواخر کرتاسه همزمان با بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و حاکم شدن شرایط

### الگوی زایش کانسنگ ناسولفید منصورآباد

کانسار چینه کران منصورآباد در واحدهای سنگ آهک و دولومیت در مجاورت یک گسل نرمال همزمان با رسوبگذاری قرار دارند. آب دریا منشا سیالات در این کانسار می‌باشد که با چرخش در سنگ‌های تخریبی واحد زیرین (سازند سنگستان) فلزات درون آن مانند سرب، روی، نقره و مس را شسته، اسیدی شده (شورابه فلزدار) و از طریق گسل همزمان با رسوبگذاری به سمت بالا حرکت می‌کند



است. در بخش ناسولفیدی، کانی‌هایی مانند اسمیت‌زونیت، هیدروزنسیت، همی‌مورفیت و سرروزیت به همراه اکسیدهای آهن دیده می‌شوند. مهم‌ترین نوع دگرسانی در این منطقه دولومیتی شدن و پس از آن کلسیتی شدن است. تشکیل کانسنگ ناسولفیدی در این منطقه تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب کانی‌های اولیه (که نوع کانی‌های ثانویه را تعیین می‌کند)، جنس سنگ‌های میزبان، گسل‌ها و شکستگی‌ها (که به نفوذ آب و تسریع اکسیداسیون کمک می‌کنند) و شرایط آب‌وهوایی قرار دارد. در اواخر کرتاسه، با بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و وقوع کوه‌زایی لارامید، فشارهای زمین‌ساختی به همراه شرایط گرم و خشک ایران مرکزی، فرایند هوازدگی و اکسایش سولفیدها را تشدید کردند. بالاآمدگی سریع پوسته باعث شد کانی‌های سولفیدی به سطح نزدیک‌تر شده و سریع‌تر اکسید شوند. همچنین، گسل‌ها با ایجاد مسیرهایی برای نفوذ آب‌های جوی اکسیدکننده، انحلال سنگ میزبان و جانشینی کانی‌های سولفیدی را تسهیل کردند. این شرایط باعث اکسیداسیون گسترده سولفیدها و تشکیل کانسنگ ناسولفیدی در منطقه شده‌اند.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مالی کمیته تحقیقات دانشگاه شیراز و شرکت معدنی کانی فرآوران و آقای مهندس دهقان به سبب فراهم ساختن امکانات اقامتی و همکاری در بازدیدهای صحرایی تشکر می‌کنند.

فشارشی بر ایران موجب ایجاد فعالیت‌های کوه‌زایی (تشکیل کوه‌زایی لارامید) و ساختاری شده که به همراه شرایط آب و هوایی (گرم و خشک) ایران مرکزی، باعث هوازدگی و اکسایش بخش سولفیدی و تبدیل و تغییر آن به بخش ناسولفیدی شده است. بالاآمدگی سریع پوسته باعث قرار گرفتن کانی‌های سولفیدی به محیط اکسیدی (نزدیک به سطح) و اکسایش آن‌ها و تشکیل کانسنگ ناسولفید می‌شود. گسل خوردگی‌ها در کانسار منصورآباد منجر به نفوذ آب‌های جوی اکسیدکننده درون سنگ میزبان (سنگ‌های کربناته) و انحلال آن‌ها شده. این برهمکنش بین سیال‌های اکسیدی و کانسنگ سولفیدی سبب تشکیل بخش ناسولفیدی در کانسار منصورآباد به صورت جانشینی سنگ میزبان (کانسنگ سفید)، جانشینی کانی‌های سولفیدی (کانسنگ قرمز) و پرکننده حفرات شده است. در شرایط آب و هوایی خشک، اکسیژن حل شده در سیالات جوی به بالاترین حد خود نسبت به سایر اقلیم‌ها می‌رسد. سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در این شرایط پایین است که باعث باز شدن منافذ و اتصال شکستگی‌های سنگی شده و در نتیجه موجب تسهیل حرکت آب‌های جوی اکسیدی به درون کانسنگ سولفیدی و اکسایش آن‌ها می‌شود.

### نتیجه‌گیری

کانسنگ ناسولفیدی منصورآباد درون آهک‌های دولومیتی‌شده سازند تفت با سن کرتاسه زیرین قرار دارد. این کانسار شامل دو نوع کانه‌زایی سولفیدی و ناسولفیدی

### References

- Aliani, F., Maanijou, M., Sabouri, Z. and Sepahi, A.A., 2012. Petrology, geochemistry and geotectonic environment of the Alvand Intrusive Complex, Hamedan, Iran. *Geochemistry*, v. 72(4), p. 363-383.
- Bertorino, G., Caredda, A.M. and Zuddas, P., 1995. Weathering of Pb-Zn mine tailings in pH buffered environment. *Water Rock Interaction. Proceedings of the 8th International Symposium on Water-Rock Interaction*, p. 859-862.
- Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., Schneider, J., Allen, C.R. and Moore, F., 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran. *Mineralium Deposita*, v. 42, p. 799-820.
- Boni, M., Balassone, G., Arseneau, V. and Schmidt, P., 2009. The nonsulfide zinc deposit at Accha (Southern Peru): geological and mineralogical characterization, *Economic Geology*, v. 104(2), p. 267-289.
- Boni, M. and Mondillo, N., 2015. The "Calamines" and the "Others": The great family of supergene nonsulfide zinc ores. *Ore Geology Reviews*, v. 67, p. 208-233.
- Borg, G., Archibald, S.M. and Piercey, S.J., 2015. A review of supergene nonsulphide zinc (SNSZ) deposits-the 2014 update. In: Archibald, S.M., Piercey, S.J. (Eds.), *Current Perspectives of Zinc Deposits*. Irish Association for Economic Geology, Dublin, p. 123-147.

- Choulet, F., Charles, N., Barbanson, L., Branquet, Y., Sizaret, S., Ennaciri, A. and Chen, Y., 2014. Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan High Atlas: Multi-scale characterization and origin. *Ore Geology Reviews*, v. 56, p. 115-140.
- Coppola, V., Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G. and Dejonghe, L., 2008. The "calamine" nonsulfide Zn-Pb deposits of Belgium: petrographical, mineralogical and geochemical characterization. *Ore Geology Reviews*, v. 33(2), p. 187-210.
- Davies, G.R. and Smith Jr, L.B., 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview. *AAPG bulletin*, v. 90(11), p. 1641-1690.
- Ehya, F., Lotfi, M. and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 37(2), p. 186-194.
- Fazli, S., Taghipour, B. and Lentz, D.R., 2018. The Zn-Pb sulfide and Pb-Zn-Ag non-sulfide Kuh-e-Surmeh ore deposit, Zagros Belt, Iran: Geologic, mineralogical, geochemical, and S isotopic constraints. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 194, p.146-166.
- Flügel, E. and Munnecke, A., 2010. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*, Springer, v. 976, 984 p.
- Garrels, R.M., 1954. Mineral species as functions of pH and oxidation-reduction potentials, with special reference to the zone of oxidation and secondary enrichment of sulphide ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 5(4), p. 153-168.
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 26(6), p. 683-693.
- Ghorbani, M., 2013. *The economic geology of Iran, Mineral deposits and natural resources*. Springer, p. 1-450.
- Gilg, H.A., Boni, M., Hochleitner, R. and Struck, U., 2008. Stable isotope geochemistry of carbonate minerals in supergene oxidation zones of Zn-Pb deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 33(2), p. 117-133.
- Godet, A., Hfaiedh, R., Arnaud-Vanneau, A., Zghal, I., Arnaud, H. and Ouali, J., 2014. Aptian palaeoclimates and identification of an OAE1a equivalent in shallow marine environments of the southern Tethyan margin: Evidence from Southern Tunisia (Bir Oum Ali section, Northern Chott Chain). *Cretaceous Research*, v. 48, p. 110-129.
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics*, v. 381(1-4), p. 235-273.
- Haj Molla Ali, A. and Alavinaini, M., 1993. Geological map of Khezrabad, scale 1:100,000, Geological Survey of Iran (In Persian).
- Hitzman, M.W., Reynolds, N.A., Sangster, D.F., Allen, C.R. and Carman, C.E., 2003. Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, v. 98(4), p. 685-714.
- Hosseini, S. and Conrad, M.A., 2008. Calcareous algae, foraminifera and sequence stratigraphy of the Fahliyan Formation at Kuh-e-Surmeh (Zagros Basin, SW of Iran). *Geologia Croatica*, v. 61(2-3), p. 215-237.
- Hossini-Dinani, H. and Yazdi, M., 2021. Multi-dataset analysis to assess mineral potential of MVT-type zinc-lead deposits in Malayer-Isfahan metallogenic belt, Iran. *Journal of Arabaian Geosciences*, v. 14, p. 1-23.
- Lee, M.J. and Wilkinson, J.J., 2002. Cementation, hydrothermal alteration, and Zn-Pb mineralization of carbonate breccias in the Irish Midlands: Textural evidence from the Cooleen zone, near Silvermines, County Tipperary. *Economic Geology*, v. 97(3), p. 653-662.
- Lin, X., Burns, R.C. and Lawrance, G.A., 2003. Effect of cadmium (II) and anion type on the ageing of ferrihydrite and its subsequent leaching under neutral and alkaline conditions. *Water, air, and soil pollution*, v. 143, p. 155-177.
- Keim, M.F., Vaudrin, R. and Markl, G., 2016. Redistribution of silver during supergene oxidation of argentiferous galena: A case study from the Schwarzwald, SW Germany. *Neues JB Miner. Abh (J. Min. Geochem.)*, v. 193, p. 295-309.
- Maanijou, M., Fazel, E.T., Hayati, S., Mohseni, H. and Vafaei, M., 2020. Geology, fluid inclusions, C-O-S-Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 195, p. 104339.
- Machel, H.G. and Lonnee, J., 2002. Hydrothermal dolomite—A product of poor definition and imagination. *Sedimentary geology*, v. 152(3-4), p. 163-171.
- Maghfouri, S., 2017. *Geology, Geochemistry, Ore Controlling Parameters and Genesis of Early Cretaceous Carbonate-clastic Hosted Zn-Pb Deposits in Southern Yazd Basin, with Emphasis on Mehdiabad Deposit (Ph.D. Thesis)*, Tabriz University, Iran, 475 p (In Persian).
- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M.R., Rajabi, A. and Choulet, F., 2018. A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran. *Geoscience Frontiers*, v. 9(1), p. 249-272.
- Mahboubi, A., Nowrouzi, Z., Al-Aasm, I.S., Moussavi-Harami, R. and Mahmudy-Gharaei, M.H., 2016. Dolomitization of the Silurian Niur Formation, Tabas block, east central Iran: Fluid

- flow and dolomite evolution. *Marine and Petroleum Geology*, v. 77, p. 791-805.
- Mazzullo, S.J., 1992. Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review, *Carbonates and evaporites*, v. 7, p. 21-37.
- Medas, D., Podda, F., Meneghini, C. and De Giudici, G., 2017. Stability of biological and inorganic hemimorphite: implications for hemimorphite precipitation in non-sulfide Zn deposits, *Ore Geology Reviews*, v. 89, p. 808-821.
- Mirnejad, H., Simonetti, A. and Molasalehi, F., 2015. Origin and formational history of some Pb-Zn deposits from Alborz and Central Iran: Pb isotope constraints, *International Geology Review*, v. 57(4), p. 463-471.
- Moghadam, H.S., Stern, R.J., Chiaradia, M. and Rahgoshay, M., 2013. Geochemistry and tectonic evolution of the Late Cretaceous Gogher-Baft ophiolite, central Iran, *Lithos*, v. 168, p. 33-47.
- Mondillo, N., Arfè, G., Boni, M., Balassone, G., Boyce, A., Joachimski, M. and Villa, I.M., 2018. The Cristal Zinc prospect (Amazonas region, northern Peru). Part I: New insights on the sulfide mineralization in the Bongará province. *Ore geology reviews*, v. 94, p. 261-276.
- Navarro-Ciurana, D., Campos-Quipe, L.A., Cardellach, E., Vindel, E., Gómez-Gras, D., Griera, A. and Corbella, M., 2016. Mineralogical and geochemical characterization of the Riópar non-sulfide Zn-(Fe-Pb) deposits (Prebetic Zone, SE Spain). *Ore Geology Reviews*, v. 79, p. 515-532.
- Peernajmodin, H., Rastad, E. and Rajabi, A., 2017. Ore structure and texture, mineralogical and fluid inclusions studies of the Kouh-Kolangeh Zn-Pb-Ba deposit, Malayer- Isfahan metallogenic belt, Southern Arak, Iran. *Scientific Quarterly Journal*, v. 27, p. 289-290 (In Persian).
- 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(14), p. 1649-1672.
- Rajabi, A., Mahmoodi, P., Rastad, E., Canet Miquel, C., Alfonso Abella, M.P., Niroomand, S. and Akbari, Z., 2023. An introduction to Irish-type Zn-Pb deposits in early Cretaceous carbonate rocks of Iran. In *Irish-type Zn-Pb Deposits Around the World: Papers volume*, p. 511-532.
- Reichert, J. and Borg, G., 2008. Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 33(2), p. 134-151.
- Sangameshwar, S.R. and Barnes, H.L., 1983. Supergene processes in zinc-lead-silver sulfide ores in carbonates. *Economic Geology*, v. 78(7), p. 1379-1397.
- Santoro, L., Putzolu, F., Mondillo, N., Boni, M. and Herrington, R., 2020. Influence of genetic processes on geochemistry of Fe-oxy-hydroxides in supergene Zn non-sulfide deposits. *Minerals*, v. 10(7), p. 602.
- Schlagintweit, F. and Wilmsen, M., 2014. Orbitolinid biostratigraphy of the top Taft Formation (Lower Cretaceous of the Yazd Block, Central Iran). *Cretaceous Research*, v. 49, p. 125-133.
- Schwartz, M.O., 2000. Cadmium in zinc deposits: economic geology of a polluting element. *International Geology Review*, v. 42(5), p. 445-469.
- Skelton, P.W. and Gili, E., 2012. Rudists and carbonate platforms in the Aptian: a case study on biotic interactions with ocean chemistry and climate. *Sedimentology*, v. 59(1), p. 81-117.
- Stampfli, G.M. and Borel, G.D., 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary science letters*, v. 196(1-2), p. 17-33.
- Takahashi, T., 1960. Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone. *Economic Geology*, v. 55(6), p. 1083-1115.
- Warren, J., 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, v. 52(1-3), p. 1-81.
- Wilkinson, J.J., 2003. On diagenesis, dolomitisation and mineralisation in the Irish Zn-Pb orefield. *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 968-983.
- Whitney, D.L. and Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American mineralogist*, v. 95(1), p. 185-187.