

## زمین‌شیمی، کانی‌شناسی و شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی چنگره (جنوب نطنز): رهیافتی برای ردیابی ذخایر برون‌زاد سرب و روی با سنگ میزبان کربناتی

ابراهیم طالع فاضل\*

گروه زمین‌شیمیایی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعالی سینا، همدان، ایران

(دريافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲، نسخه نهاي: ۱۴۰۲/۳/۱۷)

**چکیده:** بررسی شرایط زمین‌شیمیایی-فلزایی و کانی‌شناسی برای تفسیر شرایط اکسایش برون‌زاد، تحرک، جدایش و تمدنست دوباره فلزها در تشکیل ذخایر سرب و روی غیرسولفیدی اهمیت بسیاری دارد. کانسار سرب-(نقره) چنگره که در این پژوهش به عنوان یک الگو بررسی شده در سنگ میزبان دولستون‌های برشی تریاس میانی در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال‌شرقی اصفهان، واقع شده است. کانه‌زایی به دو صورت درون‌زاد سولفیدی و برون‌زاد غیرسولفیدی (اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی)، رخ داده است که فراواترین کانی‌های بخش برون‌زاد اسمیت‌زنیت، همی-مورفیت، هیدروزینسیت، انگلزیت و سروزیت هستند. برپایه شواهد بدست آمده، جداسازی فلز بخش برون‌زاد در اثر تغییر تدریجی از ناحیه اکسایش اسیدی به شرایط قلیایی در سنگ دیواره کربناتی میزبان رخ داده است. پس از آن، تشکیل منطقه اکسایش در سنگ میزبان کربناتی با ایجاد "زربندی" گالن توسط انگلزیت و چند واکنش بافر کننده pH تسهیل شده است. فعالیت بالای یون‌های  $\text{SO}_4^{2-}$  در ارتباط با اسید سولفوریک طی مرحله اکسایش منجر به رسوب انگلزیت نامحلول و کاهش چشمگیر  $\text{Pb}^{2+}$  در سیال باقی مانده می‌شود. براساس شواهد این پژوهش، محدود بودن آبهای جوی و سفره‌های آب زیرزمینی عمیق از کانسنگ غیرسولفیدی در برابر انحلال بعدی محافظت می‌کند که درک این شرایط نقش مهمی در ردیابی ذخایر برون‌زاد غیرسولفیدی دارد.

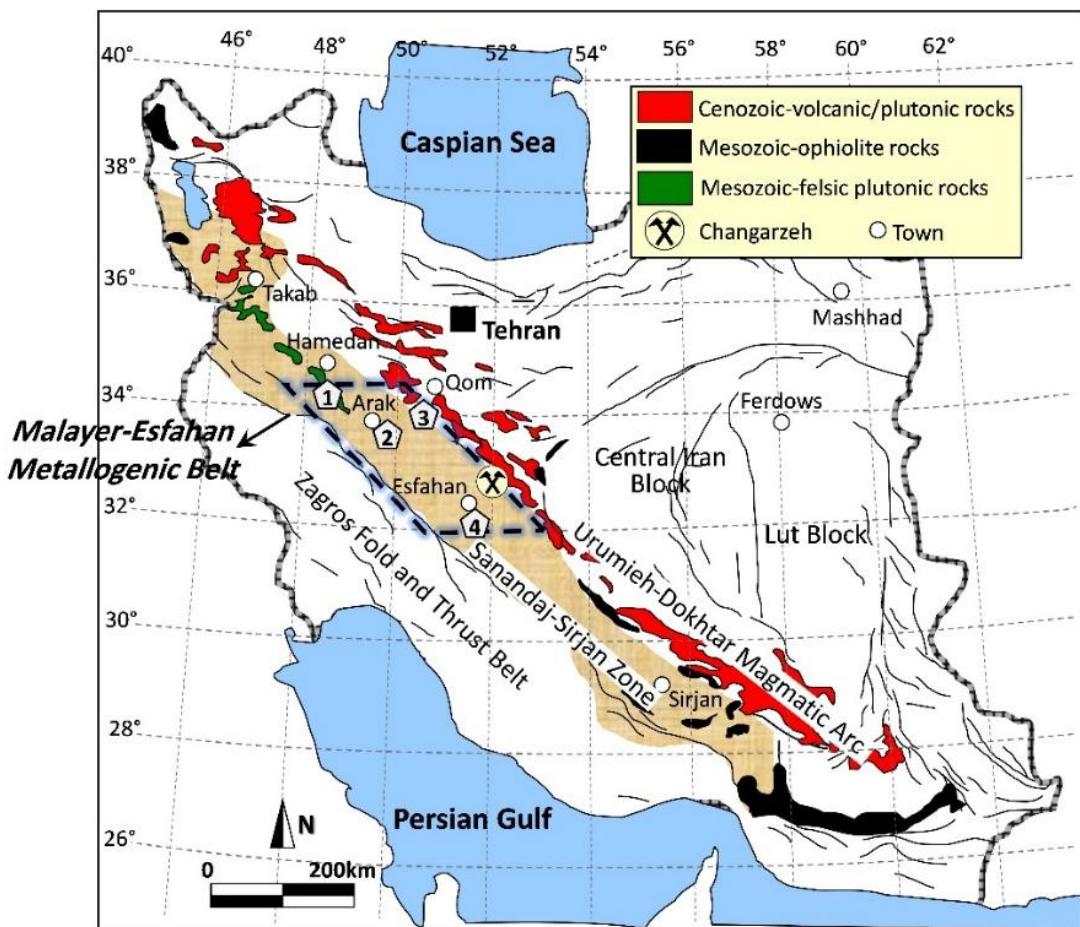
**واژه‌های کلیدی:** کانسنگ غیرسولفیدی؛ واکنش‌های برون‌زاد؛ شرایط زمین‌شیمیایی-فلزایی؛ کمرنند فلزایی ملایر-اصفهان.

دارای گستره‌ی سنی بروتزوژوئیک پسین تا سنوزوئیک هستند [۴]. از بین آنها، کمرنند فلزایی ملایر-اصفهان با راستای شمال-غربی-جنوب‌شرقی، بزرگترین منطقه فلزایی سرب-روی (نقره) ایران است [۳، ۴]. این کمرنند در بخش میانی پهنه دگرگونی سندنج-سیرجان (وابسته به کوهزاد زاگرس) واقع است که ذخایر مهمی چون آهنگران، ایرانکوه، راونج و عمارت از آن معروفی شده‌اند (شکل ۱). پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های استخراج و فراوری ذخایر سرب و روی غیرسولفیدی منجر به افزایش علاوه تجاری و پی‌جویی این نوع ذخایر در سراسر جهان شده است که به ویژه در آغاز قرن بیست و یکم شکوفا شد [۵]. کانسار چنگره با ذخیره قطعی ۲۵۰ هزار تن، دارای استخراج سالیانه ۱۵۰۰۰ تن با عیار

### مقدمه

تفسیرهای زمین‌شیمیایی-فلزایی اغلب برای ذخایر سرب-روی غیرسولفیدی برون‌زاد با سنگ میزبان کربناتی در ارتباط با محیط-های کارست مطرح شده است [۱، ۲]. ذخایر سرب و روی کارستی رایج‌ترین ذخایر غیرسولفیدی هستند که از کانی‌های روی رایج در آنها می‌توان به همی‌مورفیت  $(\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$ ، هیدروزینسیت:  $(\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6)$  و کربناتیای روی (اغلب اسمیت‌زنیت:  $\text{ZnCO}_3$ ) اشاره کرد [۲]. تاکنون بیش از ۳۰۰ کانسار و نشانه معدنی سرب و روی در ایران شناسایی شده است که کمتر از ۶ درصد از این ذخایر به صورت فعل استخراج می‌شود [۳]. در این میان، کانسارات سرب و روی با میزبان کربناتی از مهمترین منابع تأمین کننده‌ی سرب و روی در ایران بوده که

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۸۳۱۱۸۷۹۶، پست الکترونیکی: e.talefazel@basu.ac.ir



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده ایران و موقعیت کانسار چنگرزه در کمرنگ فلزی‌ای ملایر-اصفهان همراه با سایر ذخایر سرب و روی کربناتی شامل (۱) آهنگران (سرب±نقره و آهن)، (۲) عمارت (سرب و روی)، (۳) راونج (سرب و روی±نقره) و (۴) ایرانکوه (سرب و روی).

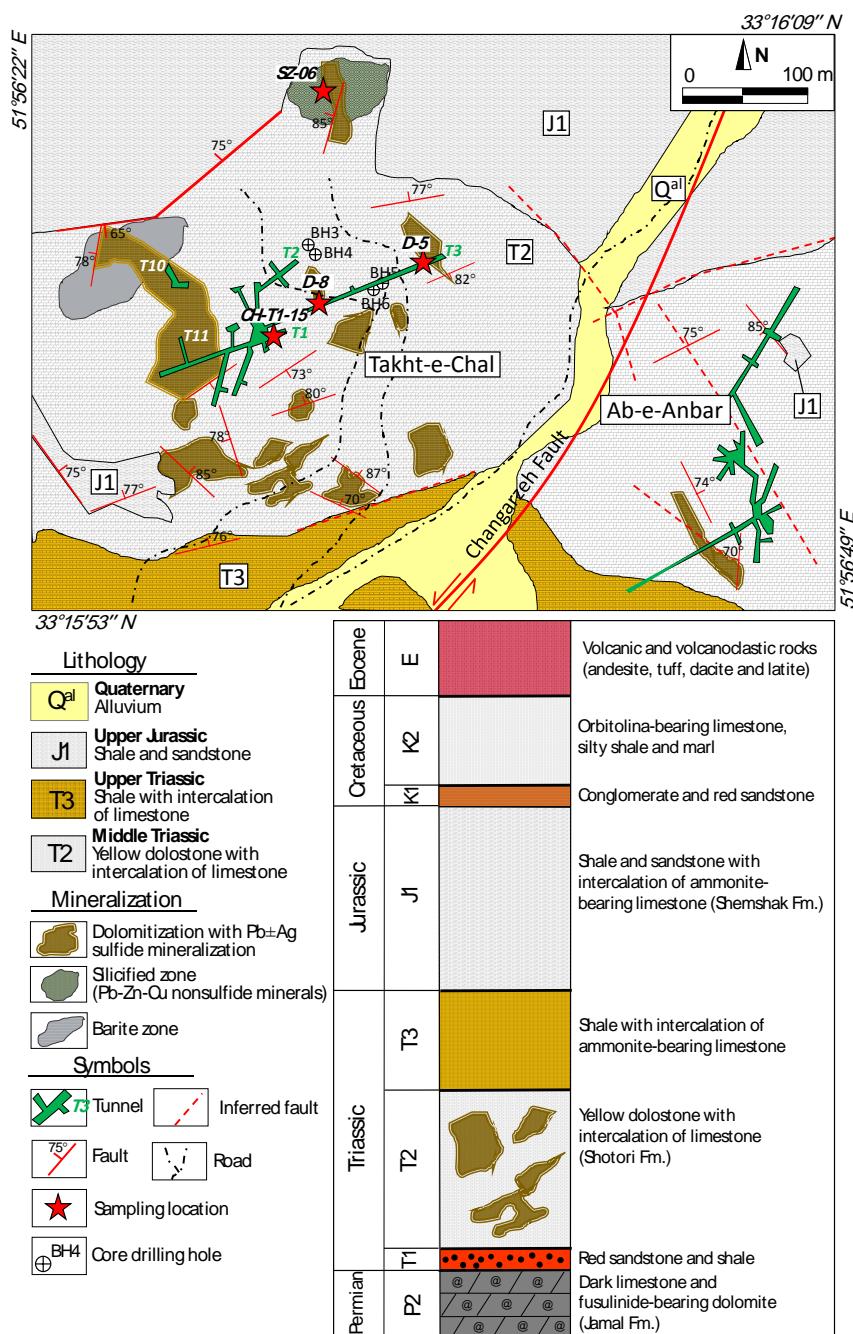
و کانسنگ غیرسولفیدی از تونل‌ها و رخمنونهای صحرایی نمونه برداری شد. موقعیت نمونه‌های برداشت شده در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از آن، ۲۰ مقطع نازک‌صیقلی با میکروسکوپ‌های عبوری-بازتابی قطبشی زایس مدل Axioplan2 سنج نگاری شدند. سپس به منظور شناسایی کانی‌های ثانویه سرب و روی (کربناتی-اکسیدی)، تعداد ۱۰ نمونه پودر سنگ (به اندازه ۷۵ میکرون) با پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD) فیلیپس X'pert با لامپ کبالت، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (کرج) طیف‌سنجی گردیدند. برای شناسایی دقیق کانه‌های غیرسولفیدی پس از انجام انبوود طلا (با ضخامت تقریبی ۲۰۰ آنگستروم)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) مدل EVO MA15 همراه با طیف پراکنده‌گی انژی پرتو ایکس (EDX) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خوارزمی تهیه شده است.

درصد سرب، ۱/۹۹ درصد روی و ۶۹ گرم در تن نقره است [۶]. این کانسار از قدیمی‌ترین معادن استان اصفهان بوده که از دیرباز عملیات پی جویی-استخراجی گستردگی در آن انجام شده و اکنون به صورت یک معدن نیمه فعال است.

در این پژوهش، شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چنگرزه (جنوب نطنز) از دیدگاه زمین‌شیمیایی-فلزی‌ای تعیین شده است. این امر امکان بررسی واکنش‌های اکسایش سولفید، درک بهتر این گروه از ذخایر سرب و روی و سرانجام بهبود مدل‌های پی جویی را فراهم می‌کند. این پژوهش بهطور عمده بر چگونگی جدایش فلزهای سرب و روی و تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چنگرزه بر پایه اقلیم‌های خشک/گرم متتمرکز است.

#### روش بررسی

برای دستیابی به اهداف تعیین شده، از واحد سنگ میزان کربناتی



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساده شده از کانسار چنگرزه به همراه ستون چینه‌شناسی و نمایش واحدهای سنگی مختلف در آن (برگرفته از مجموعه معادن سرمک [۶] با تغییرات).

۲). این واحد به عنوان سنگ بستر منطقه در نظر گرفته می‌شود که اغلب در جنوب گستره معدنی چنگرزه رخنمون دارد. پس از آن، واحد سنگی T1 با ضخامت ۵۰ متر شامل ماسه‌سنگ‌های قرمز رنگ کوارتیت-فلدسباتی و شیل‌های سیاه دربردارنده ماده آلی (معادل سازند سرخ شیل در ایران مرکزی) به صورت هم‌شیب بر افق‌های پرمنی تشکیل شده است [۷]. رخنمون‌هایی از این شیل‌ها در تونل-

### زمین‌شناسی

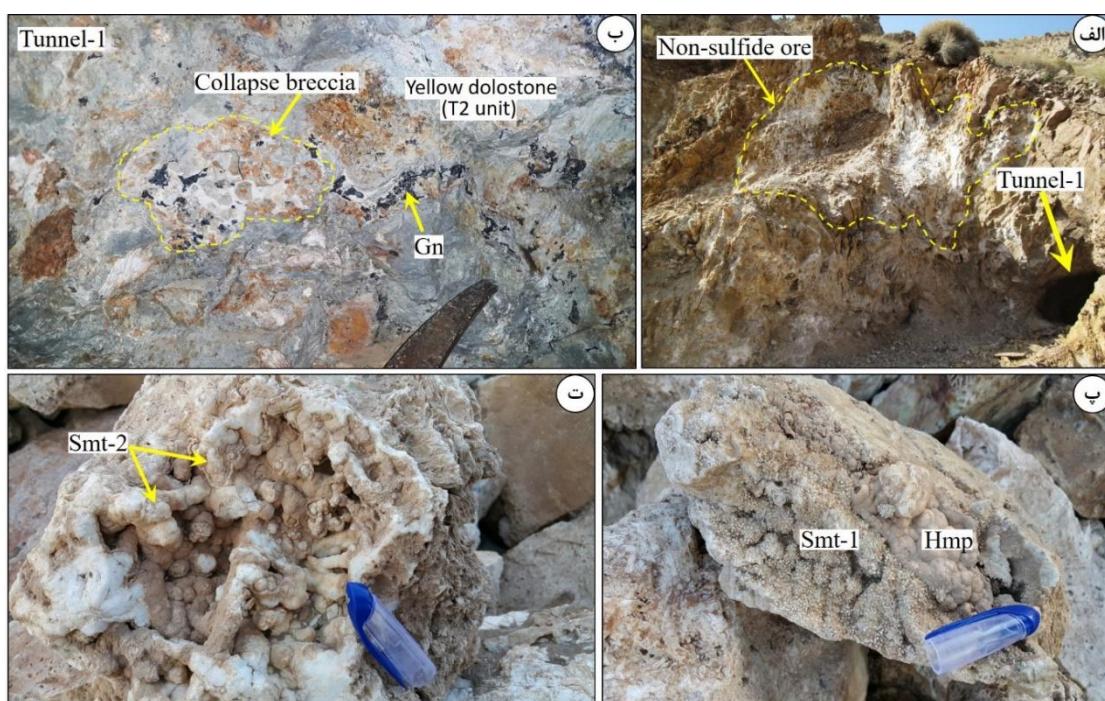
بر اساس پیمایش‌های صحرایی و نقشه‌های زمین‌شناسی محلی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ [۶]، قدیمی‌ترین واحد سنگی رخنمون یافته در منطقه چنگرزه مربوط به واحد آهک تیره و دولومیت فوزولین دار (واحد سنگی P2) با ضخامت ۳۵۰ متر بوده که معادل پرمین میانی تا پسین (هم ارز سنگ آهک و دولستون سازند جمال) است (شکل

در راستای گسل اصلی منطقه تشکیل شده است.

#### کانه‌زایی و مراحل رخداد ذخیره

کانسار سرب و روی چنگرژه با سنگ میزان دولستون (واحد T2) وابسته به سازند شتری (تریاس میانی) در دو منطقه‌ی شرقی (کوه آب انبار) و غربی (کوه تخت‌چال)، شکل گرفته است (شکل ۲). این دو منطقه توسط گسل اصلی چنگرژه با راستای شمال-شمال‌غرب (NNE) و مولفه چپگرد از هم جدا شده است (شکل ۲). کانه‌زایی در کانسار چنگرژه به دو صورت درون‌زاد (بخش سولفیدی) و برون‌زاد (بخش غیرسولفیدی اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی) رخنمون دارد. کانه‌زایی بخش درون‌زاد سولفیدی اغلب در بخش‌های زیرسطحی و تونل‌ها دیده می‌شود (شکل‌های ۳ الف و ب) که شامل کانه‌های گالن، اسفالریت، پیریت و سولفوسالت (سری تراهدریت-تنانتیت) هستند. کانه‌زایی برون‌زاد غیرسولفیدی نیز در قالب سه نوع کانسنگ دولومیتی، سیلیکاتی و باریتی بهویژه در بخش‌های سطحی رخ داده که شامل کانه‌های اکسیدی (هماتیت و گوتیت)، کربناتی (مالاکیت، اسمیت‌زونیت و سروزیت) و سیلیکاتی (همی‌مورفیت) است (شکل‌های ۳ پ و ت). کانی‌های کلسیت، دولومیت، کوارتز، باریت، سنگ گچ و آرگونیت مهمترین باطله‌های همراه کانه‌زایی هستند.

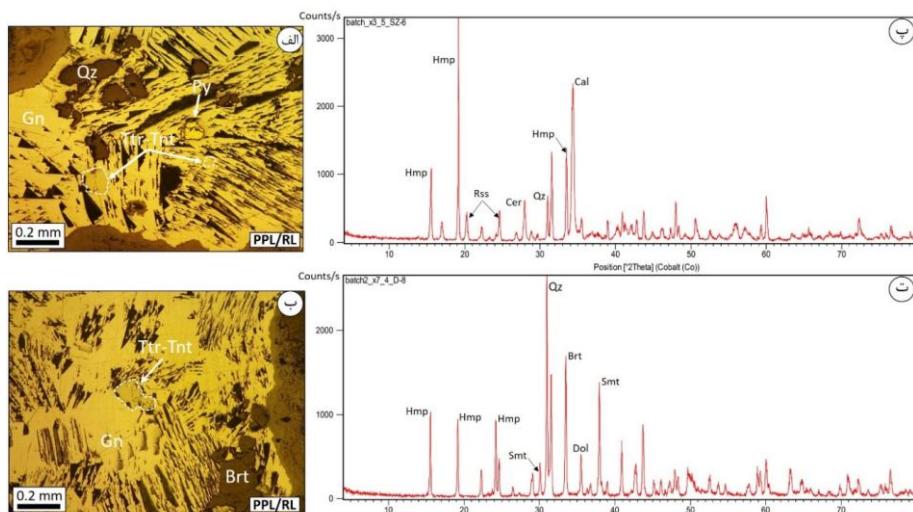
های زیززمینی منطقه دیده شد. پس از آن، واحد دولستون زردنگ (واحد سنگی T2) با ضخامت ۶۱۰ متر همراه میان لایه‌های آهک سفیدرنگ و سن تریاس میانی (معادل سازند شتری در ایران مرکزی) با یک ناپیوستگی همشیب بر واحد ماسه‌سنگ و شیلی T1 نهشته شده است. واحد دولستون T2 مهمترین میزان کانه‌زایی سرب و روی سولفیدی و غیرسولفیدی (کربنات، سیلیکات و اکسید) در منطقه چنگرژه است. واحد سنگی شیل با میان لایه‌های ماسه-سنگ و آهک آمونیت‌دار (واحد سنگی T3) با ضخامت ۵۴۰ متر و سن تریاس پسین بهصورت همشیب روی دولستون‌های تریاس میانی قرار دارد. بر پایه شواهد صحراوی بهنظر می‌رسد که این واحد سنگی در اثر فعالیت فاز کوه‌زایی سیمیرین پیشین و پسروی تدریجی پس از تریاس میانی شکل گرفته است [۲]. پس از این واحد، لایه‌های متناوب ماسه‌سنگ و شیل با میان لایه آهک آمونیت-دار (واحد سنگی J1) و ضخامت ۹۸۰ متر وابسته به لیاس (معادل سازند شمشک) تشکیل شده‌اند. سنگ آهک اوربیتولین دار به همراه شیل‌های لای دار و مارن (واحد سنگی K2) با ضخامت ۳۵۰ تا ۵۰۰ متر و سن کرتاسه پیشین روی واحدهای زوراسیک قرار دارد. این واحد سنگی در شمال منطقه معدنی چنگرژه رخنمون دارد. واحد رسوب‌های کواترنری (Q<sup>al</sup>) بهصورت نهشته‌های آبرفتی بهویژه واحد رسوب‌های کواترنری (Q<sup>al</sup>) بهصورت نهشته‌های آبرفتی بهویژه



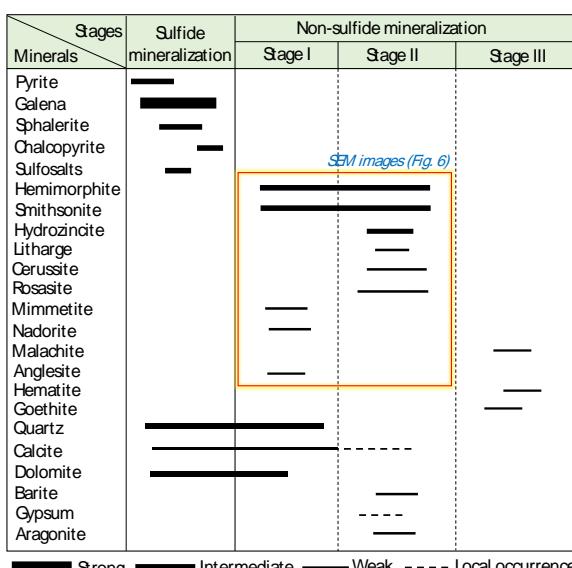
شکل ۳ تصاویر کانه‌زایی و ساخت و بافت کانسنگ غیرسولفیدی در کانسار چنگرژه: (الف) رخنمون کانه‌زایی غیرسولفیدی سرب و روی در دهانه تونل ۱، (ب) گالن-های افسان همراه با کانسنگ برشی فروریخته در دیواره تونل ۱، (پ) بافت دانه شکری اسمیت‌زونیت در کنار بافت گل‌کلمی همی‌مورفیت، (ت) بافت قشری در اسمیت‌زونیت. (گالن Gn، همی‌مورفیت Hmp، اسمیت‌زونیت Smt) [۸].

همیمورفیت بادبزنی (Hmp-2)، اسمیت‌زونیت دارای منطقه‌بندی (Smt-2)، لیتارژ (PbO)، هیدروزینسیت (Zn<sub>5</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>)، سروزیت و روزازیت، همراه باطله‌های باریت، سنگ گچ و آرگونیت تشکیل شده است (شکل‌های ۴ پ و ت). پس از شکل‌گیری کانسنگ سولفیدی و غیرسولفیدی، مجموعه کانی‌های اکسیدی‌هیدروکسیدی (زیرمرحله سوم) هماتیت، مالاکیت و گوئیت به صورت ثانویه در اثر فعالیت‌های دگرسانی و شستشوی کانسنگ پیشین تشکیل شدند. مجموعه مراحل رخداد کانسار چنگرزه در شکل ۵ نمایش داده شده است.

در مرحله کانه‌زایی سولفیدی، پیریت‌های ریزبلور افشار به-صورت آزاد یا میانبار در میزان گالن تشکیل شده‌اند. به همراه گالن، اسفالریت و میانبارهای میکرونی سولفوسالتس‌های گروه فهلو (سری تراهدریت-تنانیت) نیز تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۴ الف و ب). دگرسانی دولومیتی با حضور دولومیت‌های میکریتی ریزبلور، در این مرحله رخداده است. مرحله کانه‌زایی غیرسولفیدی از دو زیر مرحله شامل ۱) همیمورفیت ریزبلور (Hmp-1)، اسمیت‌زونیت بی‌شکل (Smt-1)، میمیتیت، نادوریت و انگلزیت همراه باطله‌های کوارتز، کلسیت و دولومیت و ۲) مجموعه کانی‌های



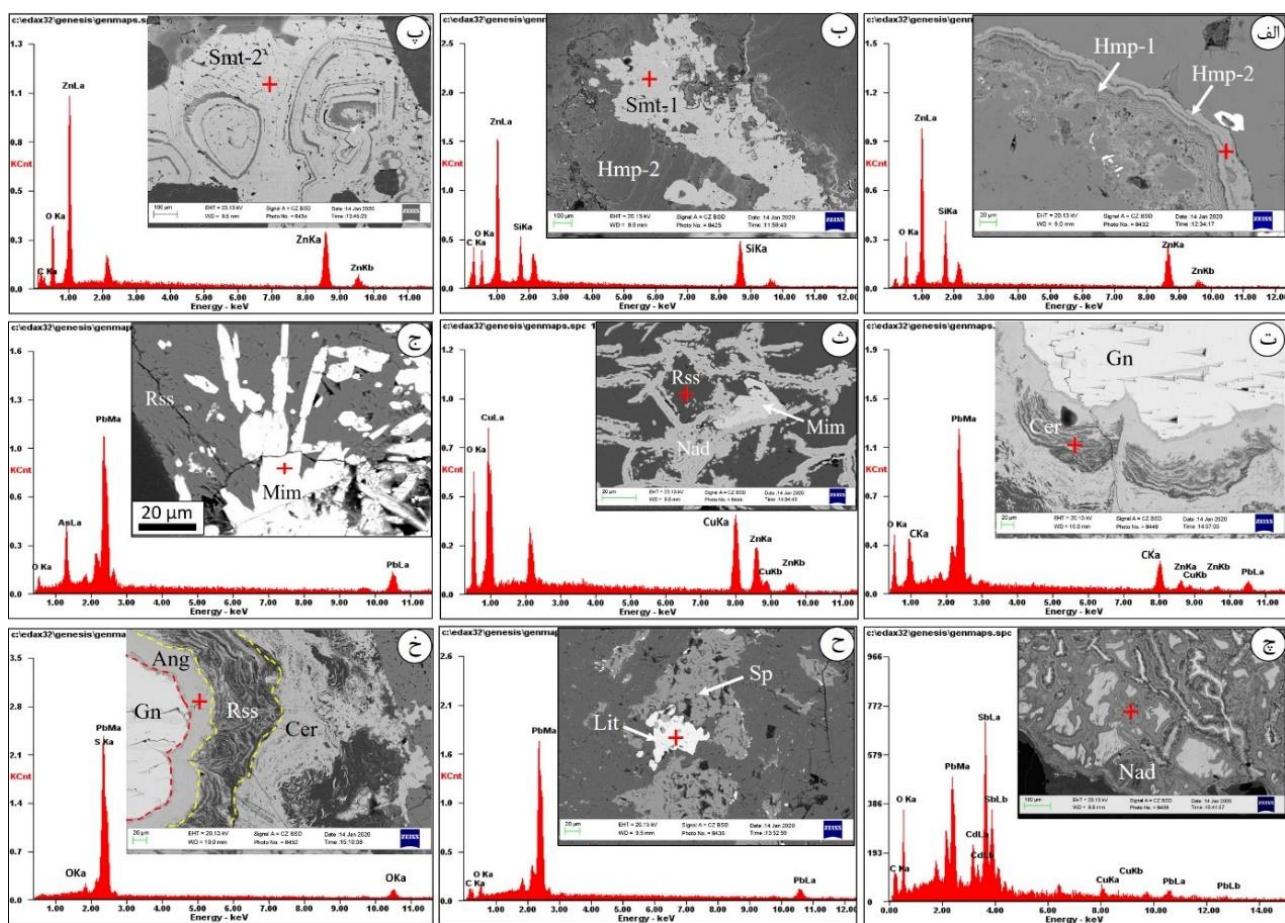
شکل ۴ الف و ب) تصاویر میکروسکوپی از رخداد میانبارهای ریز سولفوسالتس (سری تراهدریت-تنانیت) در میزان گالن، پ و ت) الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) از کانسنگ غیرسولفیدی و حضور کانی‌های همیمورفیت، اسمیت‌زونیت، روزازیت و سروزیت همراه با کانی‌های باطله کوارتز، باریت، کلسیت و دولومیت. (گالن، پیریت، Gn، پیریت Py، سری تراهدریت-تنانیت Ttr-Tnt، همیمورفیت Hmp، اسمیت‌زونیت Smt، سروزیت Cer، روزازیت Dol، کوارتز Qz، باریت Brt، کلسیت Cal، دولومیت Dol [۸].



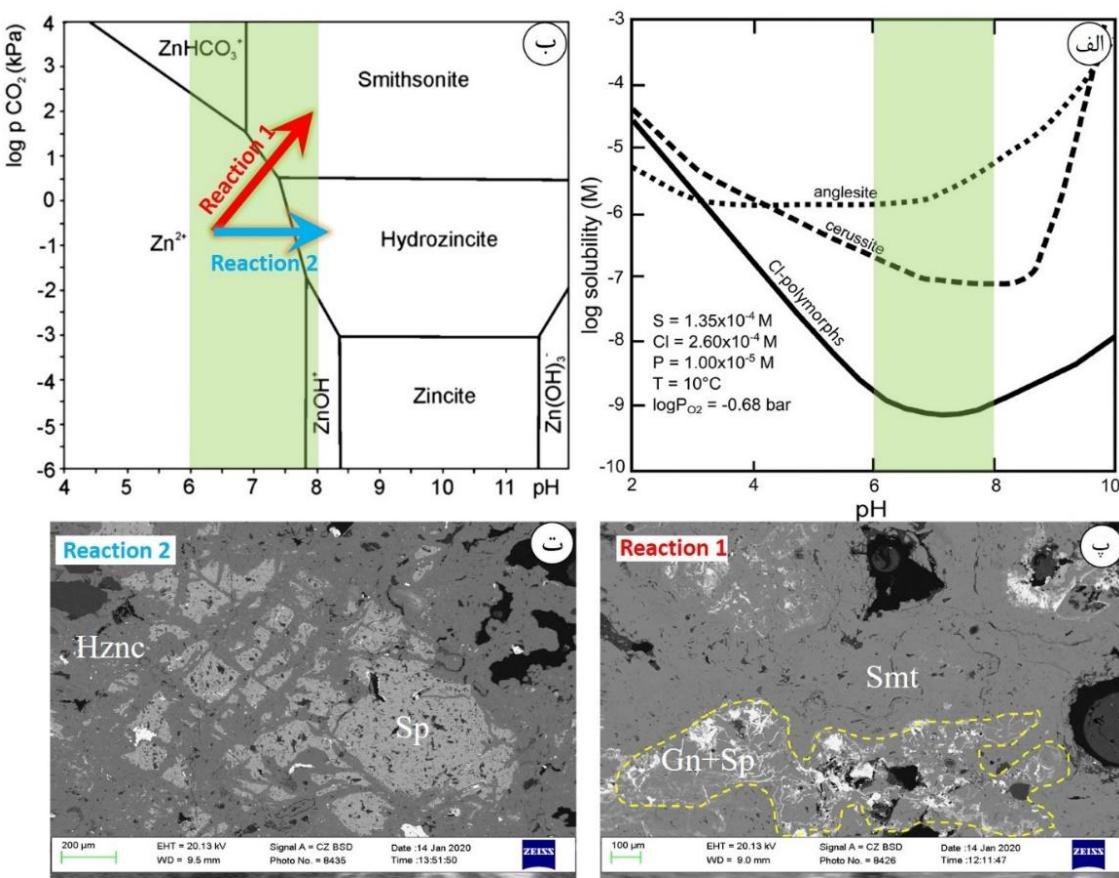
شکل ۵ جایگاه مجموعه کانی‌های غیرسولفیدی در توالی همبازایی کانسار چنگرزه.

اسفالریت، گالن، کلسیت، سروزیت و لیمونیت دیده می‌شود. اسمیت‌زونیت را به عنوان کربنات روی می‌شناسند و با توجه به ترکیب و شکل بلورها از همی‌مورفیت متمایز می‌شود. در تصاویر SEM اسمیت‌زونیت در کانسار چنگرزه در دو نسل یکی بلورهای بی‌شکل (شکل ۶ ب) و دیگری بافت منطقه‌بندی (شکل ۶ پ) قابل مشاهده است. سروزیت با ترکیب  $PbCO_3$ ، مشابه آراغونیت با ساختار راستگوشی متبلور می‌شود. کانی‌های همراه آن بیشتر شامل لیمونیت، ملاکیت و اسمیت‌زونیت هستند. در کانسار چنگرزه سروزیت اغلب به صورت جانشینی در لبه بلورهای خوش وجه گالن دیده شد (شکل ۶ ت). هیدروزینسیت  $(Zn_5(CO_3)_2(OH)_6)$  با بازماندی از تجزیه اسفالریت‌ها تشکیل شده است (شکل ۷ ت).

کانی شناسی و ساخت و بافت کانسنگ غیرسولفیدی چنان که اشاره شد، مهمترین کانه‌های فلزی غیرسولفیدی در کانسار چنگرזה شامل اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت، هیدروزینسیت، انگلزیت و سروزیت هستند که کانی‌های کمیاب نادوریت، روزازیت، لیتاڑ و میمتیت نیز آنها را همراهی می‌کنند. همی‌مورفیت با ترکیب  $Zn_4(Si_2O_7)(OH_2)H_2O$  فراوانترین کانی هیدروکسیدی سیلیکاتی روی است که انبووه‌های بلوری توده‌ای آن در ذخایر غیرسولفیدی روی با عنوان عمومی کالامین (Calamine) نامیده می‌شود [۹، ۱۰]. در تصاویر میکروسکوب الکترونی این کانی با بافت قشری و نواری مشاهده شد (شکل ۶ الف). اسمیت‌زونیت با ترکیب  $ZnCO_3$  مهمترین کانی کربناتی روی در اغلب کانسارهای سرب و روی غیرسولفیدی است [۵]. این کانی بهطور معمول با



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی و طیفهای EDX از انواع کانی‌های غیرسولفیدی در کانسار چنگرده: (الف) نسل‌های مختلف همی‌مورفیت در کنار هم (ب) اسمیت‌زنیت همراه با همی‌مورفیت نسل دوم، (پ) بلورهای اسمیت‌زنیت دارای منطبقه‌بندی، (ت) سروزیت در لبه گالن، (ث) روزازیت، (ج) بلورهای تیغه‌ای شکل میمتیت، (چ) کانی کمیاب نادریت، (ح) لیتاژ، (خ) زره پوش شدن گالن توسط انگلزیت. (شامل: گالن Gn، اسفالریت Sp، همی‌مورفیت Hmp اسمیت-زونیت Smt، Ang اینگلزیت Mim، سروزیت Cer، لیتاژ Lit، نادمه Nad، بت Rss، روزازیت Taz، ایکل بت Ang)



شکل ۷ (الف) نمودار pH نسبت به احلال پذیری فلز [۱۱] که در آن بیشترین میزان ته نشست گونه‌های غیرسولفیدی سرب در گستره pH بین ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود، (ب) پایداری گونه‌های مختلف کانی‌های روی در نمودار دوتایی (pH-log $p\text{CO}_2$ ) (برگرفته از مکفیل و همکاران [۱۲]) و روند ته نشست کانی‌های اسمیت‌زنیت (واکنش ۱) و هیدروزینیت (واکنش ۲)، (پ) تصویر میکروسکوپ الکترونی از روند شماره ۱ (تجزیه اسفالریت به اسمیت‌زنیت) و (ت) تصویر میکروسکوپ الکترونی از روند شماره ۲ (تجزیه اسفالریت به هیدروزینیت). (گالن Sp، اسفالریت Gn، هیدروزینیت Hznc، اسمیت‌زنیت Smt).

نام دارد، اما پس از تبلور، لیتلر نامیده می‌شود [۱۴]. این کانی در منطقه چنگرزه به صورت درهم‌رشدی با اسفالریت تشکیل شده است (شکل ۶ ح). انگلزیت ( $\text{PbSO}_4$ ) به صورت زره پوش (armouring) پیرامون بلورهای گالن شکل گرفته است (شکل ۶ خ). گوتیت با ترکیب  $\text{FeO}(\text{OH})$  با رنگ قرمز تا قهوه‌ای به ویژه در رخمنون‌های صحرابی و توپل‌های منطقه چنگرزه دیده شد. گوتیت فراوان‌ترین کانی پهنه اکسایشی بوده که در نتیجه اکسیدشدنگی کانی‌های سولفیدی اولیه چون پیریت تشکیل شده است.

#### بحث

کانسارهای سرب و روی غیرسولفیدی برون‌زاد با کنترل کننده‌های زمین‌شیمی، سنگ‌شناسی و ساختاری تشکیل می‌یابند [۱۵]. از

روزازیت با ترکیب  $(\text{Cu}, \text{Zn})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$  از کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب در کانسار چنگرزه بوده که نام آن از معدن روساس (Rosas) در ساردنیا (ایتالیا) گرفته شده است [۱۳]. سامانه بلوری آن تک میل است و در رده‌بندی کربناتیا قرار می‌گیرد. نادوریت (با ترکیب  $\text{PbSbO}_2\text{Cl}$ ) یک کانی کلرید آنتیمون و سرب کمیاب در منطقه است که با بافت مشبك اغلب همراه روزازیت و میمتیت دیده می‌شود (شکل‌های ۶ ث و ج). کانی‌های میمتیت (با ترکیب  $\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$ )، روزازیت و نادوریت به صورت کانی‌های همبزراد غیرسولفیدی در کانسار چنگرزه هستند. این ترکیب‌ها به صورت بلورهای تیغه‌ای کشیده قابل مشاهده است (شکل ۶ چ). اکسید سرب با ترکیب  $\text{PbO}$  یک کانه ثانویه سرب است. این ترکیب اگر ماهیت بلوری نداشته باشد، ماسیکوت

کیلوپاسکال است که در فشارهای بیشتر بر پایه واکنش زیر پدروزینسیت به جای اسمیتزوئیت جایگزین می‌شود [۱۹].

$$5\text{ZnCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6 + 3\text{CO}_2 \quad (۳)$$

افزون بر آن، بالاترین نرخ اتحال پذیری و در بی آن، پیشرفت واکنش‌های اکسایش تشکیل دهنده کانی‌های غیرسولفیدی سرب و روی در pH بین ۶ تا ۸ رخ می‌دهد (شکل ۷ الف). در ناحیه غیراشباع، با ارتباط بیشتر با جو، هیدروزینسیت پایدارتر از اسمیتزوئیت است، زیرا پایداری اسمیتزوئیت به فشار گاز  $\text{CO}_2$  بالاتری نسبت به فشار جو نیاز دارد [۱۹]. این در حالی است که در آغاز فرایند برونزاد در کانسار چنگرژه، سیال‌های اسیدی به آسانی خنثی و بافر می‌شوند و گاز  $\text{CO}_2$  از اتحال سنگ میزبان کربناتی به محیط افزوده می‌گردد. این امر منجر به افزایش موقت فشار گاز  $\text{CO}_2$  شده که در صورت پایین بودن فعالیت سیلیس (a $\text{SiO}_2$ )، رسوب اسمیتزوئیت آغاز می‌شود [۱، ۲۰] (شکل‌های ۷ ب-ت). اگر شرایط زمین‌شیمیایی دوباره متعدد شود، فشار گاز  $\text{CO}_2$  به مقادیر فشار جو باز می‌گردد، اسمیتزوئیت به سرعت هیدراته شده و در بی آن، هیدروزینسیت تشکیل می‌شود [۲۰، ۲۱]. افزون بر این، اگر سیلیس در سامانه موجود باشد، به دلیل بالا رفتن a $\text{SiO}_2$  همی‌مورفیت ممکن است همراه با هیدروزینسیت رسوب کند. از سوی دیگر، مقدار بالای همی‌مورفیت در بخش کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چنگرژه (شکل ۳)، گویای وجود منبعی برای سیلیکات است. به احتمال بسیار واحد ماسه‌سنگ کوارتزیت-فلدیپاتی ریزدانه (واحد T1) که در زیر سازند دولستون شتری، منبع مطلوب و ممکن برای سیلیس در همی‌مورفیت‌های کانسار چنگرژه باشد توسط سامانه‌های گسلی دچار جابجایی صعودی یا جانبی شده است. رخداد همی‌مورفیت در مرحله پایانی کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد نشان دهنده کاهش ظرفیت بافری (تونانی یک محلول برای مقاومت در برابر تغییرات pH) کربناتیای میزبان و تحرک بسیار  $\text{SiO}_2$  در محیط است [۵].

از دیگر نکات در مورد کانی‌های غیرسولفیدی در کانسار چنگرژه حضور مجموعه کانی‌های کمیاب غیرسولفیدی برونزاد چون روزازیت، میمتیت و نادوریت است که تصاویر میکروسکوپ الکترونی آنها در شکل ۶ آورده شده است. براساس نمودارهای دوتایی pH نسبت به  $\log(a\text{Pb}^{2+}/a^2\text{H}^+)$  (شکل ۸)، این مجموعه کانی‌ها در

جمله کنترل کننده‌های کلیدی در تشکیل ذخایر غیرسولفیدی سرب و روی با میزبان کربنات، ماهیت و در دسترس بودن کانسنگ سولفیدی نزدیک به سطح، واحد سنگی واکنش‌پذیر، بالاًمدگی زمین ساختی، شرایط اقلیمی و سامانه آب زمین شناسی منطقه هستند [۱۶، ۹]. افزون بر این، اکسایش کانسنگ سولفیدی درون-زاد، آزادسازی فلزها از کانه‌های سولفیدی اولیه، حرکت، انتقال و ته-نشست دوباره آنها توسط سیال‌ها اکسید کننده با منشأ جوی نیز در گسترش کانسنگ غیرسولفیدی نقش موثری دارد [۱۷].

#### فرایندهای زمین‌شیمیایی-فلزیابی

از بارزترین عوامل موثر در شکل‌گیری کانسنگ غیرسولفیدی، فرایند جدایش فلزی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فرایندهای متعددی به طور همزمان طی رخداد این نوع کانسنگ‌ها انجام می‌شوند که عبارتند از (۱) حلایت‌های فلزی و پایداری کانی‌های مختلف روی و سرب، (۲) زره پوش شدن کانه‌ها (بازداری واکنش گالن و کلسیت) و (۳) جذب فلز روی ترکیب‌های سنگ گچ و اکسیدهای آهن آبدار [۱]. گالن در محیط‌های برونزاد اغلب با انگلزیت که در بردارنده ذرات میلی‌متری گالن است، دربرگرفته می‌شود. ضخامت پوشش انگلزیت کمتر از ۱۵۰ میکرومتر است که در حضور یون سولفات و pH پایین برپایه واکنش زیر رسوب می‌کند (شکل ۶ خ).



در نتیجه این فرایند، انگلزیت یک زره بر گالن تشکیل داده و آن را از تماس مستقیم با معرفه‌های اکسید کننده محیطی محافظت می-کند. تشکیل چنین زره نامحلولی در pH پایین (اسیدی) اغلب با شکل‌گیری کربناتیای سرب نامحلول چون سروزیت یا هیدروسروزیت متناسب با فشار گاز  $\text{CO}_2$  برپایه واکنش زیر ادامه می‌پاید (شکل ۶ ت) [۱۸]:



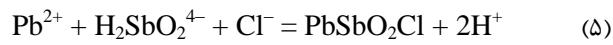
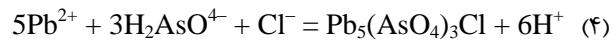
سروزیت به دلیل رفتار غیرمتحرک در منطقه اکسایش و غلظت کم در محلول اولیه، به مقدار بسیار ناچیز تشکیل می‌شود.

#### نقش سنگ میزبان کربنات، فشار گاز $\text{CO}_2$ و a $\text{SiO}_2$

بالا بودن فشار گاز  $\text{CO}_2$  به دلیل افزایش فعالیت یون‌های آبگین  $\text{CO}_3^{2-}$  و  $\text{HCO}_3^-$ ، منجر به پایداری اسمیتزوئیت در سیال اکسیدی می‌شود. براساس گزارش ریچرت و بورگ [۱۱]، کمترین فشار گاز  $\text{CO}_2$  لازم برای تشکیل اسمیتزوئیت حدود ۰.۴

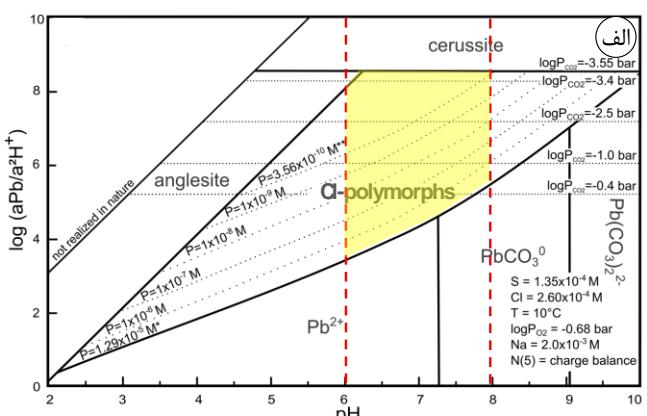
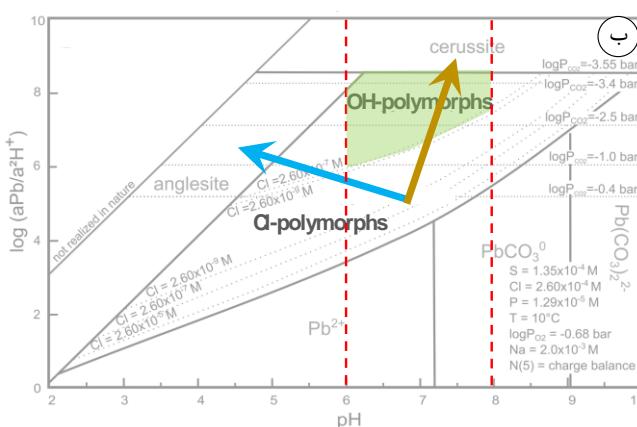
سرب و روی جهان در طیف گستره‌های از شرایط آب و هوایی شکل می‌گیرند [۵]. براساس پژوهش‌های اخیر [۲۱، ۲۲، ۲۳]، وضعیت آب و هوایی گرم و خشک (مانند کانسار چنگرزو) مساعدترین شرایط برای تشکیل و گسترش های اکسایش-کاهاش کانی‌سازی-های بروون‌زاد در ایران هستند. در آب و هوای خشک‌گرم، افزایش اکسایش سولفیدها به فعالیت ناچیز زیستی در خاک و نرخ پایین پراکندگی، رقیق شدن و حذف عناصر نسبت داده می‌شود. چنین ویژگی‌هایی بیشتر مربوط به سطوح ایستابی عمیق در مناطق خشک‌گرم هستند. سطح آب زیرزمینی در آب و هوای خشک اغلب پایین است. این منجر به باز شدن منافذ و درزهای پر از آب پس از یک رویداد بارندگی منفرد شده و بنابراین جریانی از گازهای اکسیژن  $\text{O}_2$  را درون شبکه کانی سولفیدی فراهم می‌کند [۱۵، ۱۶، ۱۷]. این سامانه اغلب به دلیل فرایندهای اتحال (کارستی‌شدن) سنگ میزبان کربناتی به یک سامانه بسیار نفوذپذیر تغییر می‌کند. به دلیل دسترسی محدود به آب در اقلیم‌های خشک و ابر‌خشک، سیال‌هایی که در طی فرایند اکسایش تولید شده‌اند، از نظر روی و سایر فلزها بسیار غنی می‌شوند. این غلظت‌های فلزی بالا از شکل‌گیری کانی‌های فلزی پایه غیرسولفیدی پشتیبانی می‌کنند. بنابراین اقلیم خشک یا نیمه خشک چنگرزو بهترین شرایط را برای اکسایش کانسنگ سولفیدی و در بی آن حفظ کانی‌های غیرسولفیدی فراهم کرده است.

شرایط  $\log \text{PO}_2 = -0.68$  bar و دمای ۱۰ درجه سانتیگراد (شرایط بروون‌زاد) تشکیل می‌شوند [۱۱]. چنان که دیده می‌شود، با افزایش فشار گاز  $\text{CO}_2$  و فراهم بودن یون‌های  $\text{Pb}^{2+}$  شرایط به سمت تشکیل سروزیت پیش می‌رود. در این بین، با فراهم بودن یون کلر در ترکیب سیال بروون‌زاد (به احتمال بسیار برآمده از شورابه‌های اکسایشی غنی از کلر) و وجود عناصر آرسنیک و آنتیموان (ناشی از تجزیه کانه‌های سولفیدی چون گالن)، مجموعه کانی‌های کلریدی میمیتیت (واکنش ۴) و نادوریت (واکنش ۵) تشکیل شده‌اند [۱۱] (شکل ۸ الف):



به همین ترتیب، با افزایش فشار گاز  $\text{CO}_2$  و تخریب بیشتر کانه‌های سولفیدی اولیه چون اسفالریت و کالکوپیریت، کانی‌های هیدروکسیدی کربناتی مس و روی نظری روزازیت تشکیل شده‌اند (شکل ۸ب).

اثر اقلیم بر سامانه زمین‌شیمیایی و گسترش واکنش‌های اکسایش یکی دیگر از شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی بروون‌زاد، وضعیت اقلیمی است. گفتنی است که آب و هوای همچنین ویژگی‌های سنگ میزبان کربناتی (چون کارستی‌شدن) بر غلظت اکسیژن و سیال فرورونده و بنابراین، pH و توانایی سیال برای اتحال  $\text{CO}_2$  کربنات موثر هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ذخایر غیرسولفیدی



شکل ۸ نمودارهای دوتایی pH نسبت به  $\log(\text{aPb}/\text{a}^2\text{H}^+)$  برای نمایش پایداری گونه‌های غیرسولفیدی سرب [۱۱]: (الف) گستره پایداری کانی‌های کلرید سرب چون میمیتیت و نادوریت (ناحیه زرد رنگ) و (ب) گستره پایداری کربنات هیدروکسیدی مس و روی (روزانه) (ناحیه سبز رنگ). پیکان قهقهه‌ای مسیر تبدیل کانی سولفیدی به سروزیت (شکل ۵ خ) و پیکان آبی مسیر تبدیل کانی سولفیدی به انگلزیت را نشان می‌دهد. گستره پایداری کانی‌های غیرسولفیدی در pH بین ۶ تا ۸ است (خط چین قرمز).

چنگرزه همخوانی دارند. فرایند بالا آمدن پوسته بهویژه از آغاز برخورد صفحه عربستان به ایران، موجب رخمنون کانسنگ سولفیدی بروزنزاد و در پی آن واکنش‌های گسترده و تشکیل پهنه بروزنزاد غیرسولفیدی سرب و روی در کانسار چنگرزه شده است. دست کم یک محیط خشک بهویژه برای تشکیل کانی‌های سرب و روی غیرسولفیدی با عیار بالا مطلوب است، در حالی که آب و هوای مرتبط و موقعیت عمیق سولفیدی اولیه اغلب اثربخشی تشکیل کانی‌های غیرسولفیدی سرب و روی را کاهش می‌دهد. بازترین نتیجه این پژوهش شناسایی دو مرحله مجزا، از نظر زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی در گسترش کانسنگ سرب و روی بروزنزاد است. ارتباط کانسنگ غیرسولفیدی بروزنزاد چنگرزه با تنوع زیادی از بافت‌های کانی‌های سرب و روی مشخص می‌شود که شامل اسمیت‌زونیت و همی‌مورفیت به عنوان فازهای اصلی و سروزیت و هیدروزینسیت به عنوان اجزای فرعی است. کانی‌های غیرسولفیدی با تجزیه سولفیدهای سرب و روی اولیه از طریق فرایندهای بروزنزاد چندمرحله‌ای در آب و هوای خشک/گرم و افزایش اکسایش سولفیدها، که منطقه چنگرزه، تشکیل شده‌اند.

#### قدرتانی

بدین وسیله از حمایت شرکت معادن سرمک برای همکاری در بازدید صحرایی و انجام برخی از تجزیه‌های دستگاهی قدردانی می‌شود. از داوران مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران بهدلیل دقت نظر و پیشنهادهای سازنده سپاسگزاریم.

#### مراجع

- [1] Reichert J., Borg G., "Numerical simulation and geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulfide zinc deposits". *Ore Geology Reviews* (2008) 33, 134–151.
- [2] Paradis S., Simandl G.J., Keevil H., Raudsepp A., "Carbonate-Hosted Nonsulfide Pb-Zn Deposits of the Quesnel Lake District, British Columbia, Canada". *Economic Geology* (2016) 111, 179–198.
- [3] Maanijou M., Tale Fazel E., Hayati S., Mohseni H., Vafaei M., "Geology, fluid inclusions, C–O–S–Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb–Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western

رهیافت پی جویی برای ردیابی ذخایر غیرسولفیدی ویژگی‌های زمین‌شناختی توصیف شده و رفتار زمین‌شیمیایی کانی‌های موجود، فرایند چند مرحله‌ای اکسایش سولفید اولیه و تشکیل کانسنگ سرب و روی غیرسولفیدی را نشان می‌دهد. یک پیش شرط برای یک فرایند اکسایش کارآمد، در دسترس بودن اکسیژن در یک محیط نزدیک به سطح است. بالا آمدن پوسته و پدیده سرب‌آورده (exhumation) سنگ میزبان کربناتی و سولفید موجود در آن باید پیش از هر فرایند اکسایش بروزنزاد صورت گیرد. در مورد کانسار چنگرزه، یک فرایند بالا بردن قوی به ویژه از شروع برخورد صفحه عربستان به ایران وجود دارد. در پی آن، توالی کربناتی توسط آب‌های جوی و زیرزمینی نفوذ می‌کند که منجر به گسترش فرایندهای کارستی با گسل و شکستگی می‌شود. سامانه کارست، به نوبه خود، جریان اکسیژن و در نتیجه فرایند اکسایش کانسنگ سولفیدی را افزایش می‌دهد. بخش‌های ناپوسته، شکستگی‌ها و برش‌های فروریخته (collapse breccias) نیز به عنوان مجرای سیالهای بروزنزاد عمل می‌کنند [۲۷]. چنین برش‌های انحلالی (کارست) دارای سطح واکنشی به نسبت بزرگی از قطعه‌های برش و افزایش نفوذپذیری و تخلخل برای ته نشست کانسنگ غیرسولفیدی هستند که شواهد آن در دیواره تومن ۱ کانسار چنگرزه دیده می‌شود (شکل ۳ ب). بخش عدهای از کانی‌های غیرسولفیدی سرب و روی به صورت سیمان همراه قطعه‌های برش تشکیل می‌شوند. مدل زمین‌شیمیایی برای تشکیل ذخایر سرب و روی غیرسولفیدی با سنگ میزبان کربناتی ارائه شده در اینجا به نفع یک آب و هوای خشک (تا نیمه خشک) برای پیدایش آنها است. با این حال، شرایط آب و هوایی در این منطقه جغرافیایی طی زمان بین شرایط مرتبط و ابر خشک تغییر کرده [۲۳] و در نتیجه بر پیدایش منطقه مورد بررسی نیز اثر گذاشته و منجر به تغییر پایداری مواد معدنی شده است. این شرایط جغرافیایی دیرینه پیشتر برای کانسار سرب و روی مهدی آباد توسط ریچرت و همکاران [۲۴] گزارش شده است.

#### برداشت

بررسی‌های زمین‌شیمیایی-فلزایی انجام شده شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی با سنگ میزبان کربناتی را مشخص می‌کند و نتایج این بررسی‌ها و فرایندهای نظری با مشاهده رخدادهای کانسار

- [14] Worthing M., Sutherland H., "The composition and origin of massicot, litharge ( $PbO$ ) and a mixed oxide of lead used as a traditional medicine in the Arabian Gulf". *Mineralogical Magazine* (1996) 60, 509–513.
- [15] Choulet F., Charles N., Barbanson L., Branquet Y., Sizaret S., Ennaciri A., Badra L., Chen Y., "Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan High Atlas: multiscale characterization and origin". *Ore Geology Reviews* (2014) 56, 115–140.
- [16] Borg G., "A review of supergene non-sulfide zinc (SNSZ) deposits the 2014 update". In: Archibald SM, Piercy SJ (eds) *Current Perspectives of Zinc deposits*. Irish Association for (2015) *Economic Geology*, Dublin, 123–147.
- [17] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Choulet F., "Supergene nonsulfide Zn–Pb mineralization in the Mehdabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type deposit, Iran". *International Journal of Earth Sciences* (2020) 109, 2531–2555.
- [18] Sangameswar S.R., Barnes H.L., "Supergene processes in zinc–lead–silver sulfides ores in carbonates". *Economic Geology* (1983) 78, 1379–1397.
- [19] Takahashi T., "Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone". *Economic Geology* (1960) 55, 1083–1115.
- [20] Arfè G., Mondillo N., Boni M., Balassone G., Joachimski M., Mormone A., Di Palma T., "The Karst-Hosted mina grande non-sulfide zinc deposit, Bongara District (Amazonas Region, Peru)". *Economic Geology* (2017) 112, 1089–1110.
- [21] Reichert J., "A geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulfide zinc deposits". In: Titley SR (ed) *Supergene Environments, Processes, and Products*. Society of Economic Geologists (2009) Special Publication, pp 69–76.
- [22] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F., "Hypogene Iran". *Journal of Asian Earth Sciences* (2020) 195, 104339.
- [4] Tale Fazel E., "Petrography and chemical composition of dolomites in the Khan Sormeh Pb-Zn deposit (western Isfahan) and relationship with sulfide mineralization". *Applied Sedimentology* (2021) 11, 65–80.
- [5] Hitzman M.W., Reynolds N.A., Sangster D.F., Allen C.R., Carman C., "Classification, genesis and exploration guides for non-sulfide zinc deposits". *Economic Geology* (2003) 98, 685–714.
- [6] Sormak Mines Co., 2015. "Exploration report of the Changarzeh deposit", pp. 59.
- [7] Zahedi M., Rahmati M., "Targh geological map, scale 1:100,000". Geological Survey of Iran (2000).
- [8] Warr L.N., "IMA-CNMNC approved mineral symbols". *Mineralogical Magazine* (2021) 85, 291–320.
- [9] Large D., "The geology of non-sulfide zinc deposits — an overview". *Erzmetall* (2001) 54, 264–274.
- [10] Hitzman M.W., "Zinc oxide and zinc silicate deposits—a new look". *Geological Society of America, Program with Abstracts* (2001) 33, 1–336.
- [11] Keim M.F., Markl G., "Weathering of galena: Mineralogical processes, hydrogeochemical fluid path modeling, and estimation of the growth rate of pyromorphite". *American Mineralogist* (2015) 100, 1584–1594.
- [12] McPhail D.C., Summerhayes E., Welch S., Brugger J., "The Geochemistry of Zinc in the Regolith". In: Roach, I.C. (Ed.), *Advances in Regolith*. CRC for Landscape Environments and Mineral Exploration, (2003) 287–291.
- [13] Frost R.L., Jagannadha Reddy B., Wain D.L., Martens W.N., "Identification of the rosasite group minerals—An application of near infrared spectroscopy". *Spectrochemical Acta Part A. Molecular and Biomolecular Spectroscopy* (2007) 66, 1075–1081.

- [24] Reichert J., Borg G., Rashidi B., "Mineralogy of calamine ore from the Mehdi Abad zinc-lead deposit, Central Iran". In: Eliopoulos DG (ed) Mineral Exploration and Sustainable Development. Millpress, Rotterdam (2003), 97–100.
- [23] Sadiq A.M., Nasir S.J., "Middle Pleistocene karst evolution in the State of Qatar, Arabian Gulf". Journal of Cave and Karst Studies (2002) 64, 132–139.
- Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran". Mineralium Deposita (2007) 42, 799–820.