

# کانه‌زایی مس (نقره) نوع "Volcanic Red Bed" در کانسار کشت‌مهکی، شمال باختر صفاشهر، پهنه سنندج - سیرجان جنوبی

مینا بوری کناری<sup>۱</sup>، ابراهیم راستاد<sup>۲\*</sup> و نعمت‌اله رشیدنژاد عمران<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۸

## چکیده

توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه زیرین در شمال باختر و جنوب خاور صفاشهر (دهبید) در زیرپهنه حاشیه‌ای (Marginal sub-zone) سنندج- سیرجان جنوبی، دربرگیرنده کانسار کشت‌مهکی و تعدادی اندیس معدنی مس (-نقره) است. کهن‌ترین رخنمون‌های سنگی منطقه مربوط به واحدهای شیلی و ماسه‌سنگی ژوراسیک است که توالی پیشرونده کرتاسه زیرین با کنگلومرای قاعده‌ای و ماسه‌سنگ و شیل‌های سیلتی به صورت دگرشیب بر روی آنها قرار گرفته است. کان‌زایی مس (-نقره) در سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌های آتشفشانی به سن کرتاسه زیرین رخ داده است. سنگ دربرگیرنده کان‌زایی، کریستال لیتیک توف با ترکیب تراکی آندزیت- آندزیت است که ماده معدنی در آن به صورت چینه کران و عدسی شکل تا ۳۵ کیلومتر، به طور ناپیوسته ادامه یافته است. سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌های آتشفشانی به طور جانبی و در جهت قائم به طور تدریجی به سنگ‌های کربناتی اربیتولین دار تغییر رخساره می‌دهند. کانی‌شناسی ماده معدنی به طور چیره شامل کالکوسیت، بورنیت، مس طبیعی، دیژنیت، کالکوپیریت، پیریت، کلاست‌هالیت نقره‌دار، کولیت، آنلیت، مالاکیت و آزوریت است. بافت کانه به صورت پرکننده فضای خالی، رگه- رگچه‌ای، جانیشینی، دانه‌پراکنده و لامینه‌مانند است. مطالعات لیئوژئوشیمیایی در ۶ ستون سنگ چینه‌ای از شمال باختر تا جنوب خاور صفاشهر، نشان از رخداد کان‌زایی مس (-نقره) در یک موقعیت چینه‌شناسی خاص و همبستگی مثبت آن با عنصر روی است. بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، لیئوژئوشیمیایی و مطالعات میکروسکوپی نشان از آن دارد که مس در ابتدا همراه با فعالیت آتشفشانی در توالی آتشفشانی- آذرآواری رخ داده است (جذب مس توسط هیدروکسید فریک، کانی‌های رسی و جایگزینی در شبکه فلدسپارها) و سپس در طی دیاژنز تدفینی (Burial diagenesis)، بر اثر آب‌زدایی رسوبات تخریبی و آذرآواری و تشکیل سیال‌های گرمایی و دگرسانی ناشی از این سیال‌ها، مس آزاد شده و از طریق سیال‌ها حمل شده تا به واحد سنگی با نفوذپذیری زیاد (کریستال لیتیک توف) و دارای شرایط احیایی با حضور بلورهای پیریت رسیده و در آنجا به صورت کانی‌های سولفیدی مس، جانشین پیریت‌های تشکیل شده در مرحله دیاژنز اولیه شده‌اند. نتایج حاصل از تجزیه ایزوتوپی گوگرد گویای آن است که گوگرد مورد نیاز برای تشکیل سولفیدها از طریق احیای سولفات آب دریا تأمین شده است. ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری، نشان از تشکیل آنها در محیط کافت درون کمان آتشفشانی است. با توجه به مجموعه مطالعات انجام گرفته و با استناد به شواهد مختلف از جمله محیط زمین‌ساختی، سنگ دربرگیرنده، ژئومتری عدسی ماده معدنی، ساخت و بافت و پاراژنز (همبود) کانی‌شناسی و مقایسه آنها با ذخایر مس Volcanic Red Bed (VRB) می‌توان کانسار کشت‌مهکی و اندیس‌های معدنی مس (-نقره) پیرامون آن را در رده ذخایر VRB در نظر گرفت که از مرحله فعالیت آتشفشانی زیردریایی تا مرحله تدفین ژرفایی، تشکیل و تمرکز یافته‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** توالی پیشرونده، آتشفشانی- رسوبی، کرتاسه زیرین، کانسار مس (-نقره)، تیپ VRB، کشت‌مهکی، پهنه سنندج- سیرجان جنوبی، صفاشهر، فارس.

E-mail: rastad@modares.ac.ir

\* نویسنده مسئول: ابراهیم راستاد

## ۱- پیش‌گفتار

پهنه دگرگونی- ماگمایی سنندج- سیرجان با روند شمال باختر- جنوب خاور جزو بخش درونی کوهزاد زاگرس در نظر گرفته شده است (Mohajjel, 1997; Alavi, 1994). در این پهنه ذخایر مهمی از جمله ذخایر طلای کوهزایی (Aliyari et al., 2007, 2009)، طلای نوع اپی ترمال (Daliran, 2008) طلای کارلین (Mehrabi et al., 1999)، ذخایر سولفید توده‌ای (VMS) (Mousivand et al., 2007, 2010)، ذخایر سرب و روی با میزبان کربناتی (Momenzadeh & Rastad, 1973; Momenzadeh, 1976; Rastad, 1981)، ذخایر آهن (توکلی، ۱۳۸۳؛ متولی، ۱۳۸۴؛ کاظمی و همکاران، 2009 (Ehya et al.))، ذخایر آهن (توکلی، ۱۳۷۸؛ فریدن دوست، ۱۳۸۲؛ عبدی، ۱۳۸۶) (۱۳۸۸)، و ذخایر تنگستن (عزیزپور بغوان، ۱۳۷۸؛ فریدن دوست، ۱۳۸۲؛ عبدی، ۱۳۸۶) گزارش شده است.

بررسی‌های صورت گرفته در بخش جنوبی این پهنه در گستره‌ای میان کشت‌مهکی و سیمکان از شمال باختر تا جنوب خاور صفاشهر (دهبید) در ۲۰۰ کیلومتری شمال خاور شیراز، نشان‌دهنده رخداد کان‌زایی مس (-نقره) در طول حدود ۳۵ کیلومتر، به صورت ناپیوسته است (شکل‌های ۱ و ۲). کانسار چینه کران مس (-نقره) کشت‌مهکی و اندیس‌های معدنی کله‌ریزه، شمال خاور حسن‌آباد، خاور حسن‌آباد، خورجان و سیمکان با مختصات جغرافیایی ۵۷° ۰۰' ۵۳" طول‌خاوری و ۳۰° ۴۳' ۰۹" عرض شمالی در ۲۵ کیلومتری شمال باختر- جنوب خاور صفاشهر قرار دارند (شکل ۲).

ذخایر مس رسوبی- دیاژنزی شامل ذخایر کوپرفرشیر، Volcanic Red Bed و Red Bed هستند (Kirkham, 1996 a,b). این ذخایر معمولاً محتوی بیش از یک میلیون تن مس هستند که مس در آنها به صورت سولفید مس و یا مس طبیعی دیده می‌شود (Lydon, 2007). ذخایر مس نوع VRB ممکن است همانند آنچه در کوئیناو میشیگان دیده می‌شود، ارزش اقتصادی بسیار بالایی داشته باشند (White, 1968). این ذخایر در میشیگان، در سال‌های ۱۸۴۵ تا ۱۹۶۸، اصلی‌ترین منبع تأمین‌کننده مس بوده و حدود ۵ میلیون تن مس از این نوع ذخایر استحصال شده است (Kirkham, 1996a). در شیلی، ذخایر چینه کران مس، دومین تولیدکننده اصلی مس پس از ذخایر پورفیری هستند (Wilson et al., 2003b). ذخایر شیلی در کمربندی با جهت شمالی- جنوبی در حدود ۲۰۰ کیلومتر گسترش دارند و ذخایر زیادی با سن ژوراسیک پسین- کرتاسه زیرین بر روی این کمربند قرار می‌گیرند. ذخیره تالکونا در شیلی، دارای تناژ ۱۵ میلیون تن مس با عیار ۱ درصد و نقره با عیار ۲۰ گرم بر تن است (Oyarzun et al., 1998). به طور کلی، ذخایر VRB در محیط‌های sub-aerial (Kirkham, 1996b) تا محیط‌های دریایی کم‌ژرفا و همراه با میان‌لایه‌های Red Bed تشکیل می‌شوند (Lefebure & Church, 1996). یکی از انواع ذخایر مس دنیا که در ایران کمتر گزارش شده است، ذخایر نوع Volcanic Red Bed (VRB) می‌باشد.

پسین - کرتاسه زیرین و میان‌لایه‌هایی از رسوبات دریایی کم‌ژرفا مشخص می‌شود. کانسار مس (- نقره) کشت‌مهکی نیز در این جایگاه زمین‌ساختی، طی دوره‌ای از فعالیت‌های زمین‌ساختی که شامل فعالیت‌های آتشفشانی - آذرآواری همزمان با نهشته شدن واحدهای کربناتی اربیتولین‌دار کرتاسه زیرین بوده است، در یک حوضه دریایی کم‌ژرفا، تشکیل شده است (شکل ۱). اصلی‌ترین سیمای ساختاری در منطقه کشت‌مهکی، تاقدیسی با روند سطح محوری شمال باختر - جنوب خاور است که گسل‌ها و شکستگی‌های با روند شمال باختر - جنوب خاور و گاه شمال خاور - جنوب باختر، سبب جابه‌جایی واحدهای سنگی در آن شده‌اند (شکل ۳).

بر پایه مطالعات سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی انجام شده، در منطقه کشت‌مهکی گستره وسیعی از توالی واحدهای آتشفشانی، آتشفشانی - رسوبی و رسوبی به سن کرتاسه زیرین رخنمون دارند. در این توالی ابتدا واحد ماسه‌سنگ توفی و سپس بر روی آن مجموعه‌ای از سنگ‌های تخریبی متشکل از وکستون سیلنتی و شیل سیلنتی قرار گرفته است. روی این مجموعه، واحدهای آتشفشانی و آذرآواری قرار می‌گیرند که توسط شهادی و طراز (۱۳۶۹) به عنوان واحد Kv نامگذاری شده است (شکل ۲). ترکیب سنگ‌های آتشفشانی از بازالت تا آندزیت تغییر می‌کند. بیشترین حجم سنگ‌های رخنمون‌یافته در منطقه کشت‌مهکی، سنگ‌های آذرآواری متشکل از کریستال لیتیک توف با ترکیب تراکی آندزیت - آندزیت است که فرسایش شدیدی را متحمل شده و با ریخت هموار و کم‌شیب، پروتزد دارد (شکل ۳)، در حالی که سنگ‌های آتشفشانی، ریخت‌شناسی مرتفع دارند. توالی یادشده توسط واحد کربناتی نازک‌لایه کرتاسه زیرین پوشیده می‌شود. سنگ‌آهک‌های نازک‌لایه به‌طور جانبی و به‌صورت میان‌لایه‌ای به واحدهای آذرآواری تغییر رخساره می‌دهند (شکل ۳). ستبرای واحدهای کربناتی در نزدیکی سیمکان حدود ۴۲۸ متر (پروانه‌نژادشیرازی و شهیدآباد، ۱۳۸۱) بوده، در حالی که در بخش شمال باختری و در منطقه کشت‌مهکی به حدود ۲۰ متر می‌رسد (شکل ۴). ستبرای بخش‌های آتشفشانی و آذرآواری به سمت شمال باختر افزایش یافته و به ۱۲۰-۱۰۰ متر می‌رسد. تغییر رخساره جانبی واحد Kv به واحد آهکی توسط برداشت ۶ مقطع سنگ‌چینه‌ای، از شمال باختر تا جنوب خاور صفاشهر، کاملاً مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۴). در بالای واحد آذرآواری و در محل تبدیل آن به واحد کربناتی، رخساره سنگی آذرآواری - کربناتی دیده می‌شود که بیانگر آن است که این واحد، از دو منبع آتشفشانی و رسوبی، تغذیه شده است که در بخش‌های بالایی، به رخساره کاملاً کربناتی تبدیل می‌شود. وجود مقادیر زیادی از توف‌ها و سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب بازالتی تا داسیتی و سنگ‌های رسوبی تخریبی و کربناتی کم‌ژرفا در توالی آتشفشانی - رسوبی کشت‌مهکی، نشان‌دهنده حضور یک حوضه کافی درون‌کمانی است (بویری کناری، ۱۳۸۹).

#### ۴- کانه‌زایی و رخساره کانه‌دار

کانه‌زایی مس (- نقره) با ژنومتری عدسی‌شکل و چینه‌کران درون واحد کریستال لیتیک توف و به صورت هم‌روند و همخوان با لایه‌بندی دیده می‌شود (شکل ۵). بررسی‌ها نشان می‌دهد که عدسی‌های کانه‌دار با ابعاد مختلف در واحد آذرآواری قرار دارند. بزرگ‌ترین این عدسی‌ها، با ابعاد حدود ۲۰ متر طول و ۲ متر ستبرای، در کانسار کشت‌مهکی دیده می‌شود. دیگر عدسی‌های کانه‌دار کوچک‌ترند و با طول ۵-۶ متر و ستبرای ۱۰۰-۵۰ سانتی‌متر قابل پیگیری هستند. از ویژگی‌های این عدسی‌ها می‌توان به محدود بودن آنها به واحد کریستال لیتیک توف (Kct) اشاره کرد (شکل ۵). بخش‌های رگه - رگچه‌ای سیلیسی دارای کانه‌زایی سولفیدی مس نیز درون این عدسی‌ها روی داده‌اند (شکل ۶). مشاهداتی چون محدود بودن رگه - رگچه‌های سیلیسی کانه‌دار به واحد توفی و ادامه نداشتن آن در واحدهای کمربالا و کمرپایین (شکل‌های ۵ و ۶)، نظریه سیال‌های ماگمایی - گرمایی را مورد سوال

این کانسار و اندیس‌های معدنی مس، در واحد آتشفشانی - رسوبی کرتاسه زیرین (Kv) رخ داده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴). پیشینه اکتشافی این کانسار به سال ۱۳۷۷ باز می‌گردد. زمانی که سامانی، پس از گزارش رخداد کانه‌زایی مس در منطقه، عیار آن را در کانسار کشت‌مهکی ۰/۱۲ تا ۱/۵ درصد برآورد کرده است (سامانی، ۱۳۷۷). مقصودی و یونسی (۱۳۸۸) پس از بررسی ژئوشیمی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ دهیید، موقعیت کانه‌زایی را مشخص و عیار مس را با توجه به یافته‌های جدید در مورد کانی‌سازی، حدود ۱ درصد برآورد کرده‌اند. پس از آن شهری (۱۳۸۸) بر پایه مطالعه مغزه‌های چهار گمانه اکتشافی، کانه‌زایی کانسار کشت‌مهکی را از نوع سولفید توده‌ای نوع کوروکو معرفی کرده‌اند.

این پژوهش افزون‌بر بررسی ویژگی‌ها و سیمای شاخص کانه‌زایی مس در کانسار کشت‌مهکی و مطالعه رخداد کانه‌زایی در طول ۳۵ کیلومتر در اندیس‌های معدنی مختلف، ارتباط کانه‌زایی با سنگ‌های آتشفشانی - آذرآواری (واحد Kv) را مشخص و "نوع" آن را با توجه به داده‌های به‌دست آمده، Volcanic Red Bed (VRB) معرفی کرده است. همچنین با توجه به قرارگیری کانسار کشت‌مهکی در زیرپهنه حاشیه‌ای (Marginal Sub-Zone) پهنه سندج - سیرجان جنوبی (شکل ۱) و گسترش واحد Kv در این زیرپهنه، بر بی‌جوایی و اکتشاف رخداد‌های مشابه مس در این زیرپهنه تأکید می‌گردد.

#### ۲- روش مطالعه

پس از گردآوری و ارزیابی اطلاعات پیشین در رابطه با کانسار کشت‌مهکی، بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی به صورت زیر انجام گرفته است:

- مطالعات صحرایی به منظور تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی - معدنی ۱:۲۰۰۰
- پیمایش در طول ۶ ستون سنگ‌چینه‌ای و لیتوژئوشیمیایی و نمونه‌برداری از رخساره‌های سنگی و افق معدنی.
- مطالعه مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های ستون‌های لیتوژئوشیمیایی و سنگ‌چینه‌ای برای شناخت تغییرات افق‌های کانه‌دار و غیرکانه‌دار و ارتباط آنها با یکدیگر.
- تهیه ۳۵ مقطع نازک و ۲۲ مقطع نازک - صیقلی برای مطالعه بافت و ساخت، کانی‌شناسی و بررسی توالی همبود کانه‌ها و مطالعه ارتباط کانه‌ها با کانی‌های سنگ‌ساز.
- تجزیه ۱۱ نمونه به روش XRF و روش ICP-MS و ICP-AES در آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا، تجزیه ۱ نمونه به روش XRD در آزمایشگاه دانشگاه New Brunswick کانادا و ۷ نمونه به روش XRF در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و تجزیه ۱۹ نمونه به روش ICP-AES در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای مطالعه ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب.
- تجزیه ۳۳ EPMA نقطه در آزمایشگاه دانشگاه Technische Universitat Clausthal آلمان و بررسی کانی‌شناسی ماده معدنی.
- تجزیه ۶ نمونه کانی سولفیدی مس برای بررسی تغییرات ایزوتوپی گوگرد در دانشگاه آریزونای آمریکا.

#### ۳- زمین‌شناسی

پهنه سندج - سیرجان توسط (Mohajjel et al. (2003 از جنوب باختر به شمال خاور به ۵ زیرپهنه رادیولاریتی، سنگ‌آهک‌های بیستون، مجموعه افیولیتی، زیرپهنه حاشیه‌ای و زیرپهنه با دگرشکلی پیچیده تقسیم شده است (شکل ۱) که به ترتیب متشکل از رسوبات دریایی ژرف مزوزویک، کربنات‌های دریایی کم‌ژرفا، پوسته اقیانوسی تیتس کمان آتشفشانی و توالی دگرشکل شده پالئوزویک - پسین - مزوزویک هستند. زیرپهنه حاشیه‌ای توسط سنگ‌های آتشفشانی - آذرآواری به سن ژوراسیک

(شکل‌های ۸ و ۹). در بیشتر مقاطع میکروسکوپی مورد مطالعه، کالکوپیریت و بورنیت به صورت هم‌رشد رخ داده‌اند (شکل ۸-د).

بافت رگه-رگچه‌ای: یکی از عمده‌ترین سیماهای مواد معدنی در بخش کانه‌دار، حضور آنها به صورت رگه-رگچه‌ای است که ابعاد آنها از میلی‌متر تا سانتی‌متر و متر متغیر است. رگه‌ها عمدتاً کانی‌شناسی ساده داشته و متشکل از کانی‌های کوارتز، کلسیت و سریسیت (حاصل از دگرسانی گرمایی) به همراه کانه‌زایی سولفیدی مس هستند. این بافت، در کانسار کشت‌مهکی و در همه اندیس‌های معدنی دیده می‌شود. کانی‌شناسی رگه-رگچه‌ها کاملاً همانند با کانی‌های موجود در متن سنگ (کانی‌های دارای بافت لامینه‌مانند و دانه‌پراکنده) بوده و به نظر می‌رسد که این رگه-رگچه‌ها، از نوعی هستند که در موقع سنگ‌شدگی (دیاژنز) شکل گرفته‌اند، زیرا عموماً محدود به رخساره کریستال لیتیک توف هستند (شکل ۶). رگه‌ها از نظر ریخت‌شناسی، ظاهر مسطح تا انحنادار و سینوسی دارند. کانی‌های کالکوسیت، بورنیت، مس طبیعی و کالکوپیریت از عمده‌ترین کانی‌هایی هستند که در این نوع بافت دیده می‌شوند (شکل ۹). این نوع رگه-رگچه‌ها با همین کانی‌شناسی و همین ترکیب سولفیدی در کانسارهای مس مرکز شیلی (Carrillo-Rosua et al., 2003)، شمال شیلی (Espinoza et al., 1996)، ذخایر مس موجود در بازالت‌های پریمین اسلواکی (Ferenc & Rojkovic, 2001) و ذخایر مس نوع VRB (Kirkham, 1996b) نیز گزارش شده‌اند. جالب توجه است که مس طبیعی نیز به همراه دیگر کانی‌های اصلی سولفیدی (بورنیت و کالکوسیت) به صورت پراکنده فضای خالی و رگه-رگچه‌ای در واحد کریستال لیتیک توف میزبان کانه‌زایی دیده می‌شود (شکل ۹-ج).

بافت جانیشینی: در این بافت، پیریت‌هایی که در مرحله دیاژنز آغازین تشکیل شده‌اند، در مرحله دیاژنز تدفینی، توسط سولفیدهای مس جانشین شده‌اند (شکل ۱۰). جانشین شدن پیریت توسط کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت را به خوبی می‌توان توسط حضور زبانه‌ها و یا دنباله‌هایی از سولفیدهای مس در باقیمانده‌های بلورهای پیریت دید (شکل ۱۰). این بافت نشان‌دهنده آن است که ابتدا پیریت در مرحله دیاژنز آغازین تشکیل شده و سپس در مرحله دیاژنز تدفینی، توسط سولفیدهای مس جانشین شده است. بافت جانیشینی در کانی‌های سولفیدی مرحله برون‌زاد (سوپرزاد) نیز به خوبی دیده می‌شوند. کانی‌های سولفیدی ثانویه مانند کالکوسیت ثانویه، دیژنیت، آنیلیت و کوولیت، از اطراف جانشین کانی‌های سولفیدی اولیه مانند کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت شده‌اند (شکل‌های ۸ و ۹-الف). کانی کوولیت در برخی بلورها، جانشین تیغه‌های کالکوپیریت شده است. کانی آنیلیت به صورت بافت جانیشینی و تنها در کانسار کشت‌مهکی دیده می‌شود. کانی یادشده به رنگ زیتونی-قهوه‌ای، در حاشیه دیژنیت دیده می‌شود و هیچ‌گونه حاشیه جانیشینی با کانی‌های کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت ندارد (شکل ۸-د).

بافت لامینه‌مانند: یکی از بافت‌هایی که می‌تواند شرایط رسوبی-دیاژنزی اولیه را نشان دهد، بافت لامینه است. در کانسار کشت‌مهکی، کانی کالکوپیریت به صورت لامینه‌مانند دیده می‌شود (شکل ۹-د). کالکوپیریت در مراحل بعدی و در طی هوازگی به گوتیت و لیمونیت تبدیل شده است. بافت لامینه‌مانند در ذخایر شمال شیلی که از نوع Manto هستند نیز گزارش شده است (Kojima et al., 2007). این بافت در اثر فشارهای ناشی از وزن لایه‌های بالایی در طی دیاژنز تدفینی، حالت منحنی‌مانند و سینوسی به خود گرفته است (شکل ۹-د).

بافت دانه‌پراکنده: این بافت تنها در کانسار کشت‌مهکی و در متن واحد آذرآواری دیده می‌شود. در کانسار مس کشت‌مهکی، کالکوسیت اولیه به صورت دانه پراکنده در زمینه سنگ میزبان دیده می‌شود. پیریت‌های جانشین‌نشده توسط سیال‌های مس‌دار در کانسار نیز به صورت نیمه‌خودشکل تا بی‌شکل و به شکل دانه‌پراکنده دیده می‌شوند. بافت دانه‌پراکنده سولفیدهای مس در ذخیره

قرار داده و نقش محیط رسوبی، رخساره سنگ درونگیر و تغذیه دیاژنزی رگه‌ها از عدسی‌های کانه‌دار را به طور کامل آشکار می‌سازد. موقعیت فضایی کارهای پیشین صورت گرفته در قالب ترانه‌های اکتشافی و همچنین برداشت‌های دقیق روی زمین نشان می‌دهد که عدسی‌های کانه‌دار هم‌روند با لایه‌بندی، بیشترین مکان برای فعالیت‌های معدنکاری بوده‌اند. قطعات سنگی موجود در واحد کریستال لیتیک توف دارای ترکیب تراکتیتی-داسیتی هستند. درشت‌بلورها، خودشکل تا نیمه‌خودشکل بوده و شامل ارتوز، پلاژیوکلاز و کوارتز هستند که در زمینه‌ای ریزبلور از کوارتز، ارتوز، آلپیت و اکسید آهن (هماتیت) قرار گرفته‌اند. کمربالای واحد کانه‌دار بیشتر واحدهای کربناتی نازک‌لایه (K1) و کمرپایین آن، واحدهای آتشفشانی تراکتیتی و تراکی‌اندزیتی است (شکل ۵). عدسی‌های حاوی مواد معدنی ستبرایی حدود ۳-۱/۵ و طول ۲۵-۳ متر دارند که به طور جانبی به رخساره‌های کربناتی نازک‌لایه (K1) تغییر می‌یابند (شکل‌های ۳ و ۴).

## ۵- دگرسانی

به طور کلی، دگرسانی‌های رخ داده در منطقه معدنی کشت‌مهکی را می‌توان در دو گروه اصلی دسته‌بندی کرد: دگرسانی پروپیلیتی که مرتبط با خروج سنگ‌های آتشفشانی در محیط دریایی و ظهور دگرسانی کلریتی، اپیدوتی، کلسیتی و اکسیدی آهن گسترده است که در اثر واکنش با آب دریا ایجاد شده است و دیگری، دگرسانی ناشی از فعالیت سیال‌های کانه‌ساز است که به موجب آن، شورابه‌های حوضه‌ای در اثر افزایش ژرفا در مرحله دیاژنز تدفینی (Deep Burial)، دارای ویژگی‌های سیال‌های گرمایی گشته و موجب دگرسانی در واحدهای آتشفشانی-رسوبی و از جمله واحد آذرآواری شده‌اند. این دگرسانی به صورت کانی‌های کوارتز، کلسیت، اپیدوت، سریسیت، کلریت، زئولیت، هماتیت و آلپیت در منطقه نمود دارد. کانه‌زایی ارتباطی بسیار نزدیک با این دگرسانی‌ها به ویژه در واحد آذرآواری با نفوذپذیری بالا دارد (شکل ۷). حضور زئولیت در سنگ‌های رسوبی، می‌تواند بیانگر رخداد تدفین در حوضه رسوبی باشد که در اثر دگرسانی فلدسپارها ایجاد می‌شود. در کانسار کشت‌مهکی نیز زئولیت یکی از کانی‌هایی است که در اثر دگرسانی (شکل ۷-ه) و در مرحله دیاژنز تدفینی تشکیل شده است. کوارتز به صورت رگه-رگچه‌ای، پراکنده فضای خالی و دانه‌پراکنده روی داده و بیشترین حجم دگرسانی را به خود اختصاص داده است. دگرسانی کلسیتی بیشتر شامل تشکیل کانی‌های کلسیت و پس از آن، اپیدوت و اسفن بوده و به صورت رگه-رگچه‌ای و دانه‌پراکنده در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود. زمینه سنگ بیشتر از کوارتز، ارتوز، آلپیت و اکسید آهن (هماتیت) ریزبلور تشکیل یافته است که پورفیرهای ارتوز و پلاژیوکلاز آنها را همراهی می‌کنند (شکل ۷). سیلیسی شدن و کربناتی شدن، از عمده‌ترین و معمول‌ترین دگرسانی‌ها در کانسارهای مس نوع Manto هستند (Kojima et al., 2007) و کانسارهای مس نوع

## ۶- ساخت و بافت و کانی‌شناسی

ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار کشت‌مهکی و اندیس‌های معدنی اطراف آن به صورت بافت‌های پراکنده فضای خالی، رگه-رگچه‌ای، جانیشینی، دانه‌پراکنده و لامینه‌مانند است.

بافت پراکنده فضای خالی: این بافت که بافت چیره در بردارنده ماده معدنی (مس-نقره) است، فضاهای خالی و تخلخل ناشی از فرایندهای دیاژنزی را پر کرده است. از آنجا که یکی از اصلی‌ترین مراحل فرایندهای دیاژنزی انحلال است، فرایند یادشده فضاهای خالی زیادی را در سنگ ایجاد کرده است که این فضاها مکان مناسبی برای تمرکز مواد معدنی شده‌اند (شکل ۸). در این بافت انواع سولفیدهای مس مانند کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت و مس طبیعی دیده می‌شود

## ۸- مطالعات ایزوتوپی گوگرد

به منظور بررسی منشأ گوگرد در کانی‌های سولفیدی، ۶ نمونه کانی کالکوپیریت و بورنیت از نقاط مختلف سنگ میزبان کانه‌زایی (واحد کریستال لیتیک توف) انتخاب شد. پس از خرد کردن نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ بینوکولار با خلوص بالای ۹۹ درصد، سولفیدها از کانی‌های باطله جدا و در هاون آگاتی پودر شدند. سپس حدود ۰/۵ گرم از کانی سولفیدی به‌دست‌آمده، جدا و به دانشگاه آریزونا آمریکا ارسال شدند. اندازه‌گیری مقادیر ایزوتوپی توسط طیف‌سنج جرمی Finnigan Delta Plus انجام شد. نتیجه تجزیه در جدول ۳ نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود، مقادیر  $^{34}\text{S}$  در کانسار کشت‌مهکی دارای محدوده وسیعی از حدود ۴/۹- تا ۱۳/۷- درصد است که می‌توان بر پایه داده‌های یادشده و با توجه به گسترده بودن دامنه نتایج ایزوتوپی، منشأ احیای باکتریایی سولفات را برای سیال‌های مؤثر در کانه‌زایی در کانسار مس کشت‌مهکی در نظر گرفت (شکل ۱۵). همان گونه که Kirkham (1996b) با مطالعه ذخایر VRB، پیشنهاد می‌دهد که مقادیر منفی  $^{34}\text{S}$  بیانگر آن است که گوگرد مورد نیاز، از احیای باکتریایی سولفات ایجاد شده است و الگوی عمومی پراکندگی ایزوتوپ گوگرد در ذخایر مس نوع VRB همانند ذخایر مس نوع رسوبی و اورانیم ماسه‌سنگی است، چنین استنباط می‌شود که گوگرد لازم برای تشکیل کانی‌های سولفیدی مس در کانسار کشت‌مهکی نیز از طریق احیای سولفات‌های آب دریا تأمین شده است. با توجه به این که شرایط تشکیل سنگ‌ها و رخساره‌های redbed تنها در محیط‌های اکسیدان فراهم می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط اکسیدی ایجاد شده در محیط، واحدهای اکسیدی سرخ رنگ و همچنین هماتیت و اکسیدهای آهن ایجاد شده‌اند که توانسته‌اند مس را حمل کنند. بدیهی است که در ذخایر سولفیدی، سولفیدهای مس (کالکوزیت، بورنیت و کالکوپیریت) در شرایط احیایی تشکیل می‌شوند. به عبارت دیگر، حمل کمپلکس‌های مس‌دار (مانند کانی‌های محلول اورانیم) در محیط اکسیدان (Red Bed) صورت می‌گیرد ولی ته‌نشینی آنها تنها در محیط‌های احیایی که پیریت یا مواد آلی در آنجا حضور دارند، صورت خواهد گرفت (Kirkham, 1996b).

## ۹- توالی همبود و مراحل تشکیل کانسار

بر پایه مطالعات انجام‌شده در مقیاس صحرایی، نمونه دستی و میکروسکوپی و با توجه به ارتباط ساخت و بافت کانه‌ها و کانی‌های سنگ درونگیر، توالی همبود (پاراژنتیک) کانسار مس (-نقره) کشت‌مهکی ترسیم و در شکل ۱۶ ارائه شده است. کانه‌زایی، شکل عدسی و چینه‌کران داشته و محدود به جایگاه چینه‌شناسی ویژه‌ای در واحد کریستال لیتیک توف است. ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی شامل کالکوسیت، بورنیت، مس طبیعی، دیژنیت، کالکوپیریت، کلاست‌هالیت نقره‌دار، سلنید نقره، کولیت و آنیلیت بوده و بافت آن به صورت پراکنده فضای خالی، رگه-رگچه‌ای، جان‌شینی و لامینه‌مانند است.

با توجه به نمودار توالی همبود (شکل ۱۶)، مراحل مختلف تشکیل کانسار کشت‌مهکی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

مرحله فعالیت آتشفشانی و دیاژنز اولیه (pre-mineralization): در این مرحله در شرایط کشتی حاکم بر حوضه کافتی درون کمان آتشفشانی کرتاسه زیرین در زیرپهنه حاشیه‌ای سندج-سیرجان و در محدوده حوضه شمال باختر-جنوب خاور صفاشهر، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری به‌همراه سنگ‌های تخریبی و کربناتی تشکیل شده است. بر پایه مطالعات ICP-MS انجام‌شده، میزان مس در گدازه‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی موجود در منطقه مورد مطالعه حدود ۳۰-۲۰ پی‌پی‌ام است (جدول ۲) که در مقایسه با میزان کلارک آن در سنگ‌های آندزیتی معمولی (حدود ۵۵ پی‌پی‌ام)، تهی‌شدگی نشان می‌دهد. همچنین هیچ نوع بی‌هنجاری ژئوشیمیایی

(Ramirez et al., 2006b) Mantos Blancos, (Wilton & Sinclair, 1988) Sustut و کانسارهای مرکز و شمال شیلی (Espinonza et al., 1996; Carillo-Rousa et al., 2003) نیز گزارش شده است.

## ۷- ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری و محیط زمین‌ساختی

به منظور بررسی و ثبت تغییرات عناصر اصلی، فرعی و کمیاب، واحدهای مختلف سنگی پس از مطالعه مقاطع میکروسکوپی، ۵ نمونه از سنگ‌های کمربالا و کمرپایین (گدازه‌های تراکیتی-تراکی آندزیتی) و ۶ نمونه از سنگ میزبان کانه‌زایی (کریستال لیتیک توف) انتخاب و پس از خردایش توسط سنگ‌شکن آگاتی، به آزمایشگاه ALS-Chemex در ونکوور کانادا برای انجام تجزیه‌های XRF, ICP-AES و ICP-MS ارسال شد. نتایج ژئوشیمیایی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب در نرم‌افزارهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل آماری زمین‌شناسی قرار گرفت. بر مبنای این نتایج، گدازه‌ها در نمودار سیلیس در برابر قلیایی‌ها (Irvin & Baragar, 1971)، در دو محدوده آلکالن و ساب‌آلکالن و توف‌ها بیشتر در قلمرو ساب‌آلکالن قرار دارند (شکل ۱۱- الف)، برخی از نمونه‌ها نیز ماهیت تحولی دارند، همچنین بر پایه نمودار AFM (Irvin & Baragar, 1971)، بیشتر نمونه‌ها در محدوده کالک آلکالن قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱- ب). برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آذرین از نمودار دوتایی  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  در برابر  $\text{Nb}/\text{Y}$  (Winchester & Floyd, 1977)، (شکل ۱۱- ب) و برای رده‌بندی سنگ‌ها از نمودار دوتایی  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \cdot 0.0001$  در برابر  $\text{SiO}_2$  (Winchester & Floyd, 1977) (شکل ۱۱- ب) استفاده شده است. بر پایه نمودار Y در برابر Zr (Barrett & MacLean, 1994)، سنگ‌ها دارای ماهیت تحولی هستند (شکل ۱۱- ج) (داده‌های XRF در جدول ۱ آمده است).

با توجه به نمودارهای یادشده، نمونه‌ها ترکیبی از آلکالی‌بازالت-ساب‌آلکالن بازالت تا داسیت (شکل ۱۲- الف) و آندزیت‌بازالت تا داسیت (شکل ۱۲- ب) دارند. بر پایه نتایج به دست‌آمده از داده‌های ژئوشیمیایی، سنگ‌های منطقه معدنی به کافت درون کمان آتشفشانی (شکل‌های ۱۳- الف و ب) در ارتباط با حاشیه فرورانش تعلق دارند. ماگماهای کالک آلکالن معمولاً در جزایر آتشفشانی بالغ و در کمان‌های قاره‌ای، در مکان‌هایی که سنگ‌های آتشفشانی دارای ترکیب بازالت تا ریولیت و عمدتاً حدواسط (آندزیتی) هستند، بیشتر گسترش دارند (Murphy, 2007).

عناصر خاکی کمیاب، از مفیدترین عناصر کمیاب بوده و مطالعه آنها، کاربرد مهمی در سنگ‌شناسی (آذرین، رسوبی و دگرگونی) دارد. این عناصر در طی فرایندهای هوازگی، دگرگونی درجه پایین و دگرسانی گرمایی، به نسبت غیرمتحرک هستند (Rollinson, 1993). ترکیب عناصر کمیاب و خاکی کمیاب در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری منطقه کشت‌مهکی در جدول ۲ آورده شده است. الگوی پراکندگی عناصر کمیاب در مجموعه کریستال لیتیک توف با بی‌هنجاری مثبت در میزان Th, Ba, Zr, و بی‌هنجاری منفی Nb و بی‌هنجاری منفی شدید در Pb, Rb, Cr و Ni مشخص می‌شود که نشان از آلودگی پوسته‌ای دارد. مقادیر پایین نیکل و بی‌هنجاری منفی نیوبیم (شکل ۱۴- الف)، نشان‌دهنده تعلق واحدهای سنگی منطقه به مناطق کمان آتشفشانی است (Wilson, 1989; Pearce, 1996). میزان Gd, La/Lu, La/Yb در این واحدها بالا است که سبب شیب‌دار شدن الگوی عناصر خاکی کمیاب در آن شده است. از LREE تا Eu شیب‌ها ملایم هستند، از Eu به سمت HREE الگوی عناصر به صورت مسطح دیده می‌شود. در واقع با توجه به روند یکسان الگوی تغییرات عناصر خاکی کمیاب برای همه نمونه‌ها (شکل ۱۴- ب)، می‌توان گفت که سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری منطقه، به مناطق کمان آتشفشانی تعلق دارند (Wilson, 1989). میزان منفی عنصر Eu نیز در بیشتر کانسارهای پروندمی از جمله نوع VRB و ماتو (مانند Mantos Blancos) معمول است (Ramirez et al., 2006a).

و (Oliveros et al., 2008; Kojima et al., 2007; Maskaev et al., 2003) ذخایر نوع لایه‌های سرخ آتشفشانی (VRB) (Cabral & Beaudoin, 2007;) (Wilton & Sinclair, 1988) مقایسه شده است.

کانسار کشت‌مهکی، با توجه به نوع ساخت و بافت، نوع سنگ درونگیر، محیط زمین‌ساختی، همبود کانیایی و نوع دگرسانی، با کانسارهای سولفید توده‌ای (VMS) و کانسارهای مس چینه‌سان رسوبی (SSC) متفاوت است. در حالی که، از نظر شاخص‌های اصلی (سنگ میزبان، کانی‌شناسی، بافت و ساخت و دگرسانی) بیشترین شباهت را با کانسارهای مس نوع مانتو و نوع VRB نشان می‌دهد. از این رو، کانسار مس کشت‌مهکی را با توجه به ویژگی‌های یاد شده، می‌توان با کانسارهای نوع مانتو (در شیلی و آمریکای لاتین) و نوع VRB (در کانادا و آلمان)، مقایسه کرد. یادآوری می‌نماید که (Kojima et al., 2007) کانسارهای نوع مانتو را معادل کانسارهای نوع VRB در کانادا در نظر گرفته و علت نامگذاری متفاوت آنها را مربوط به دو محل و موقعیت جغرافیایی متفاوت در کانادا و آمریکای لاتین (شیلی) می‌داند. برای مشخص کردن "نوع" کانسار کشت‌مهکی، برخی از ویژگی‌های شاخص ذخایر نوع مانتو و VRB با کانسار کشت‌مهکی در ادامه مقایسه شده است.

#### ۱-۱۰. محیط زمین‌ساختی

(Kirkham 1996b) و (Cabral & Beaudoin 2006, 2007) محیط زمین‌ساختی تشکیل کانسارهای نوع VRB را مربوط به رخدادهای کششی در خاستگاه کوهزایی می‌دانند. بر پایه مطالعات (Espinonza et al., 1996) و (Ramirez et al., 2006a) بیشترین رخداد کانه‌زایی مس نوع مانتو در مناطق کششی و در کمربندهای ماگمایی مرتبط با فرورانش ژوراسیک تا کرتاسه، صورت گرفته است.

کانسار مس کشت‌مهکی در توالی آتشفشانی-رسوبی و محیط کافتی درون کمان آتشفشانی در زیرپهنه حاشیه‌ای (Mohajjel et al., 2003) پهنه سندج-سیرجان رخ داده و متشکل از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه زیرین همراه با میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک است که به طور جانبی و قائم به رخساره‌های آهکی تغییر می‌یابند.

#### ۱-۱۰. ۲. سنگ میزبان

سنگ میزبان کانسارهای مس نوع VRB سنگ‌های آندزیتی-داسیتی (که میان‌لایه‌هایی از رسوبات سیلیسی کلاستیک دارند)، توف‌ها و رولیت‌ها هستند. سنگ میزبان کانسارهای مس نوع مانتو نیز بیشتر سنگ‌های آذرآواری آندزیتی و گدازه‌های آندزیتی آمیگدالوئیدال در توالی آتشفشانی آندزیتی-بازالتی کالک‌آلکان تا آندزیتی-داسیتی است (Oyarzun et al., 1998; Tosdal & Monizaga, 2003; Tristán-Aguilera et al., 2006; Wilson et al., 2003a; Guzman et al., 2000; Lane & George, 2000).

از ویژگی‌های بنیادین کانسار مس کشت‌مهکی، رخداد کانه‌زایی مس در یک افق سنگ‌چینه‌نگاری ویژه و محدود به واحد آذرآواری است. کانه‌زایی مس همراهی نزدیکی با میزان فضای خالی موجود در این واحد توفی دارد. بر پایه (Sato 1984) و (Weege & Pollock 1972) وجود نفوذپذیری مناسب، یکی از عوامل مهم برای تشکیل این کانسارها است.

#### ۱-۱۰. ۳. کانی‌شناسی و همبود

کانی‌شناسی کانسارهای نوع VRB شامل کالکوسیت، بورنیت، تنانیت (آرژانتیت)، دیژنیت، احتمالاً آنیلیت، کوولیت، کالکوپیریت، مس طبیعی، نقره پراکنده و مالاکیت است (Lortie & Clark, 1987; Kirkham, 1996b; Cabral & Beaudoin, 2007). در کانسارهای نوع مانتو نیز کانی‌های اصلی شامل بورنیت، کالکوسیت، کالکوپیریت، کوولیت و دیژنیت، به همراه مقادیری اسفالریت و پیریت است (Oyarzun et al., 1998; Tristán-Aguilera et al., 2006; Ramirez et al., 2006a; Oliverous et al., 2008; Kojima et al., 2003).

کانی‌شناسی کانسار مس کشت‌مهکی شامل کالکوسیت، بورنیت، مس طبیعی،

مس در واحدهای تخریبی و کربناتی رسوبی دیده نمی‌شود. همراه با رخداد فعالیت آتشفشانی و در مرحله دیاژنز اولیه، پیریت نیز در سنگ‌های آذرآواری تشکیل شده و سبب ایجاد وضعیت احیایی در حوضه شده است. همان‌گونه که در بخش مطالعات ایزوتوپی گوگرد اشاره شد، باکتری‌های احیاکننده سولفات در محیط حضور داشته‌اند و فعالیت آنها، سبب ایجاد شرایط احیایی در حوضه و در نتیجه نهشته شدن پیریت شده است. حضور پیریت عامل مهمی برای ایجاد وضعیت احیایی در سنگ میزبان کانه‌زایی به شمار می‌رود.

مرحله دیاژنز تدفینی (Late diagenesis~deep burial) (Mineralization): با توجه به میزان بالای اکسید آهن (هماتیت) در زمینه گدازه‌ها و کریستال لیتیک توف (شکل ۷-الف)، می‌توان چنین استنباط کرد که هیدروکسیدهای آهن فریک و کانی‌های رسی، مس را از طریق جذب سطحی با خود همراه و آن را حمل کرده‌اند. در طی عملکرد فرایندهای دیاژنز تدفینی (Late Diagenesis) بر اثر آب‌زدایی، هیدروکسید فریک به اکسید آهن متبلور (هماتیت) تبدیل شده و موجب آزادسازی مس می‌شود. از سوی دیگر در این مرحله در اثر رخداد دگرگونی تدفینی (Burial Metamorphism) در حد رخساره ژئولیتی، کانی‌های فلدسپار به ژئولیت، کلسیت، اپیدوت، کلریت و کوآرتز تبدیل می‌شوند (شکل‌های ۷-ه، و) و در نتیجه مس موجود در شبکه آنها نیز آزاد و به همراه سیال‌های گرمایی ناشی از دیاژنز تدفینی حمل می‌شود و در مسیر خود به واحد سنگی مناسب با نفوذپذیری بالا و شرایط احیایی در نتیجه حضور پیریت (کریستال لیتیک توف) می‌رسد و به جای پیریت‌های تشکیل شده در مرحله پیشین، جانشین شده و سبب تشکیل سولفیدهای مس می‌شود. گفتنی است که حضور ژئولیت در سنگ‌های رسوبی، نشان‌دهنده رخداد تدفین در این محیط‌ها و حضور آن در منطقه مورد مطالعه یکی از شواهد رویداد تدفین در سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی-رسوبی منطقه کشت‌مهکی است. احتمالاً مس پس از شسته شدن از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری، به صورت کلریدی حمل شده و پس از واکنش با پیریت، به صورت سولفیدهای مس (کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت) جانشین پیریت‌های تشکیل شده در مرحله پیش از کانه‌زایی شده است (شکل ۱۶). نتایج حاصل از مطالعات انجام شده بر روی ذخایر نوع مانتو در شیلی نیز نشان از آن دارد که کانه‌زایی در دو مرحله رخ داده است. در مرحله اول، پیریت کلوپورم و بلورهای خودشکل پیریت تشکیل شده و در مرحله بعدی سیال‌های غنی از مس، باعث کانه‌زایی سولفیدی مس از طریق جانشینی آنها به جای پیریت‌های اولیه شده‌اند (Wilson & Zentilli, 1999; Wilson et al., 2003a). داده‌های ایزوتوپی گوگرد منشأ گرفتن آنها را از احیای سولفات آب دریا تأیید کرده است (شکل ۱۵). مرحله سوپرژن (Post-mineralization): در این مرحله و پس از رویداد فرایندهای زمین‌ساختی در منطقه در اثر چین‌خوردگی و بالاآمدگی واحد میزبان کانه‌زایی، فرایند سوپرژن سبب تغییراتی در ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌ها و تغییر و تبدیل کانی‌های سولفیدی اولیه به کانی‌های سولفیدی ثانویه مانند دیژنیت، کالکوسیت و کوولیت و کانی‌های کربناتی مس مانند مالاکیت و آزوریت و کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی شده است.

#### ۱-۱۰. بحث

ذخایر سولفیدی چینه‌کران و چینه‌سان، یکی از بزرگ‌ترین ذخایر سولفیدی برای کانه‌زایی مس هستند. محیط نهشته‌شدن این ذخایر بسیار متنوع بوده و می‌تواند در همه مراحل یک چرخه زمین‌ساختی ماگمایی-رسوبی تشکیل شوند. برای مشخص شدن "نوع" کانسار کشت‌مهکی، این کانسار با انواع ذخایر سولفیدی چینه‌کران و چینه‌سان مس، مانند ذخایر سولفید توده‌ای آتشفشانی (VMS) (Galley et al., 2006)، ذخایر مس چینه‌سان رسوبی (Manto) (Lefebure & Alldrick, 1996) (SSC)، ذخایر نوع مانتو (Manto)

طی تدفین ژرف، مس آزاد شده از تبدیل کانی‌های هیدروکسید آهن (تشکیل شده در مرحله فعالیت آتشفشانی) به اکسیدهای آهن (هماتیت) و نیز مس آزاد شده از شبکه کانی‌های فلدسپار موجود در واحدهای آتشفشانی دگرسان شده را حمل کرده و پس از چرخش در واحدهای سنگی و حرکت به سمت بالا، به واحد کریستال لیتیک توف با تخلخل و نفوذپذیری بالا و دارای کانی پیریت رسیده و کانی‌های کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت، جانشین بلورهای پیریت تشکیل شده در مرحله دیاژنز آغازین شده‌اند (شکل ۱۰). بنابراین چنین نتیجه‌گیری می‌شود که عنصر مس از سنگ‌های میزبان آتشفشانی - رسوبی نشأت گرفته است. مقایسه الگوی تشکیل کانسار مس (- نقره) کشت‌مهکی (شکل ۱۷) با الگوی تشکیل ذخایر نوع VRB و نوع Manto (با تأکید بر زیر تیپ Host-Rock Derived Epigenetic Theory, Kojima et al., 2007) نشان‌دهنده منشأ گرفتن عناصر از سنگ میزبان است. همچنین مقایسه ویژگی‌های شاخص کانسار مس (-نقره) کشت‌مهکی با ویژگی‌های شاخص کانسارهای VRB و Manto (زیر تیپ Host-Rock Derived) مانند رویداد کانه‌زایی در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه زیرین، سنگ میزبان آذرآواری با میان‌لايه‌های آهنکی، بافت و ساخت پرکننده فضای خالی، رگه - رگچه‌ای و جاننشینی سولفیدها، کانی‌شناسی کالکوسیت، مس طبیعی و بورنیت، داده‌های ژئوشیمیایی، محیط زمین‌ساختی کافت درون‌کمان و ژئومتری چینه‌کران ماده معدنی، همگی نشانگر مشابهت این کانسار با ذخایر نوع VRB و مانتو (با تأکید بر زیر تیپ منشأ گرفتن عناصر کانه‌ساز از سنگ میزبان) است (بویری و همکاران، ۱۳۸۸).

در پایان، با توجه به تشکیل و گسترش کانسار مس (-نقره) کشت‌مهکی و اندیس‌های معدنی مس کله‌ریزه، شمال خاور و خاور حسن آباد، خورجان و سیمکان در گستره‌ای حدود ۳۵ کیلومتر در زیرپهنه حاشیه‌ای پهنه سندیج - سیرجان جنوبی، بی‌جویی و اکتشاف این نوع از کانسارها در مقیاس ناحیه‌ای، پیشنهاد و بر آن تأکید می‌شود.

### سپاسگزاری

نگارندگان برای انجام این پژوهش از حمایت‌های معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت‌مدرس برخوردار بوده‌اند که از ایشان سپاسگزاری می‌شود. از مسئولین محترم سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به‌خاطر همکاری صمیمانه در تجزیه نمونه‌ها و نیز از جناب آقای خسروانی معاون محترم فرمانداری خرمید برای مساعدت‌های فراوان، سپاسگزاری می‌شود.

دیژنیت، کالکوپیریت، پیریت، کلاست‌هالیت نقره‌دار، آنیلیت و کوولیت است. مالاکیت و آزوریت نیز در پیرامون سولفیدهای مس در سطح شکستگی‌ها تجمع یافته‌اند.

### ۱-۴. دگرسانی

دگرسانی‌های آلپیتی، کلریتی، اپیدوتی، زئولیتی، سیلیسی و اکسیدی آهن‌ازدگرسانی‌های شاخص کانسارهای نوع VRB است (Cabral & Beaudoin, 2006). این دگرسانی‌ها بر اثر عملکرد سیال‌های گرمایی ایجاد شده در طی دیاژنز (دگرگونی تدفینی) ایجاد می‌شوند. بر پایه مطالعات (Tristá-Aguilera et al. (2006); Espinonza et al. (1996); Sato (1984); Wilson et al. (2003a) دگرسانی اصلی کانسارهای مس نوع مانتو نیز کلریتی، اپیدوتی، آلپیتی، سیلیسی، کلسیتی و اسفنی است.

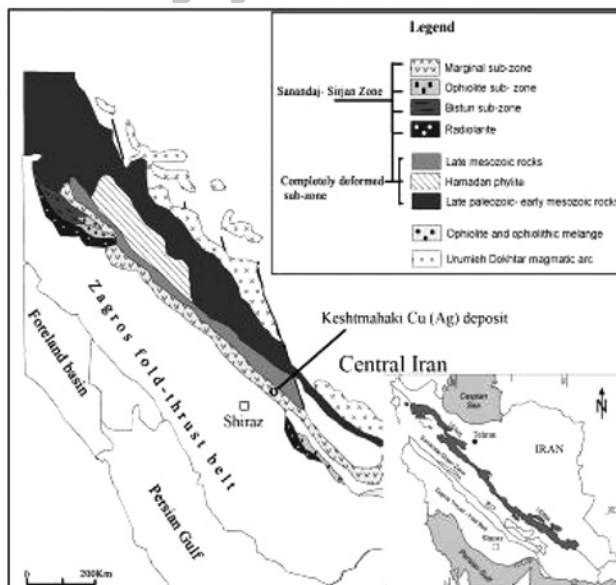
دگرسانی‌های رخ داده در کانسار کشت‌مهکی بیشتر سیلیسی، کلسیتی، کلریتی، اپیدوتی، زئولیتی و اکسیدی (هماتیت) است. کانه‌زایی ارتباطی نزدیک و تنگاتنگ با دگرسانی‌های یاد شده دارد و هر جا دگرسانی به میزان زیاد روی داده است، کانه‌زایی نیز به فراوانی یافت می‌شود.

### ۱-۵. بافت ماده معدنی

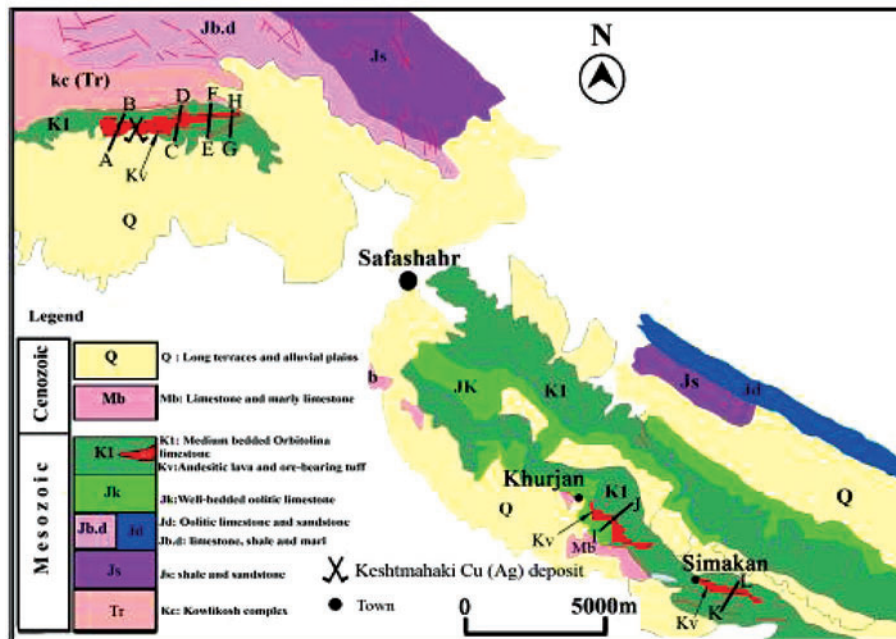
به‌طور کلی بافت‌های چیره در کانسارهای مس نوع VRB و مانتو، پرکننده فضای خالی، رگه - رگچه‌ای، جاننشینی و پراکنده است (Espinonza et al., 1996; Ramirez et al., 2006a; Ferenc & Rojkovic, 2001; Kirkham, 1996b; Lefbure & Church, 1996; Maksiyev et al., 2003). از مهم‌ترین بافت‌های موجود در کانسار کشت‌مهکی می‌توان به پرکننده فضای خالی، رگه - رگچه‌ای، جاننشینی، دانه‌پراکنده و لامینه‌مانند اشاره کرد.

### ۱۱- الگوی تشکیل و نوع کانسار

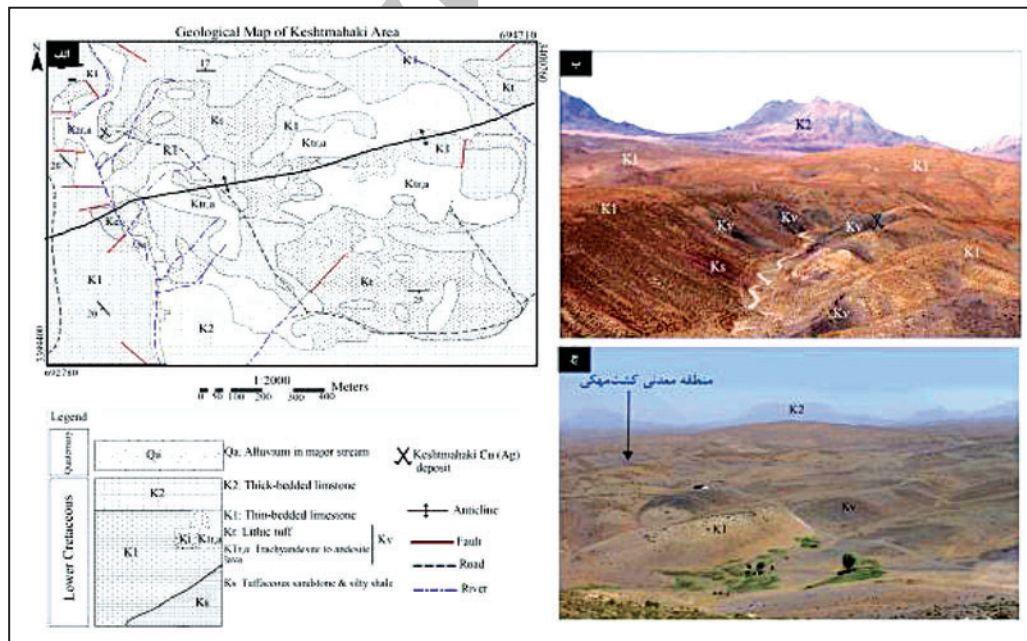
میزان مس در واحدهای آتشفشانی - آذرآواری کانسار مس (- نقره) کشت‌مهکی، نسبت به میزان معمول آن در سنگ‌های آندزیتی، تهی‌شدگی نشان می‌دهد که می‌توان این تهی‌شدگی را ناشی از دگرسانی پروپیلیتی گسترده‌ای که در این گدازه‌ها روی داده است، دانست (Sato, 1984; Cabral & Beaudoin, 2007). در واقع چنین تصور می‌شود که دگرسانی باعث شستشو و حرکت عناصر کانیاپی در طی تدفین (دگرگونی) شده است (Sato, 1984). با توجه به گستردگی رویداد دگرسانی‌های سیلیسی، کلریتی، اپیدوتی، کلسیتی، زئولیتی و آلپیتی در کانسار کشت‌مهکی، می‌توان چنین در نظر گرفت که سیال‌های گرمایی ایجاد شده در



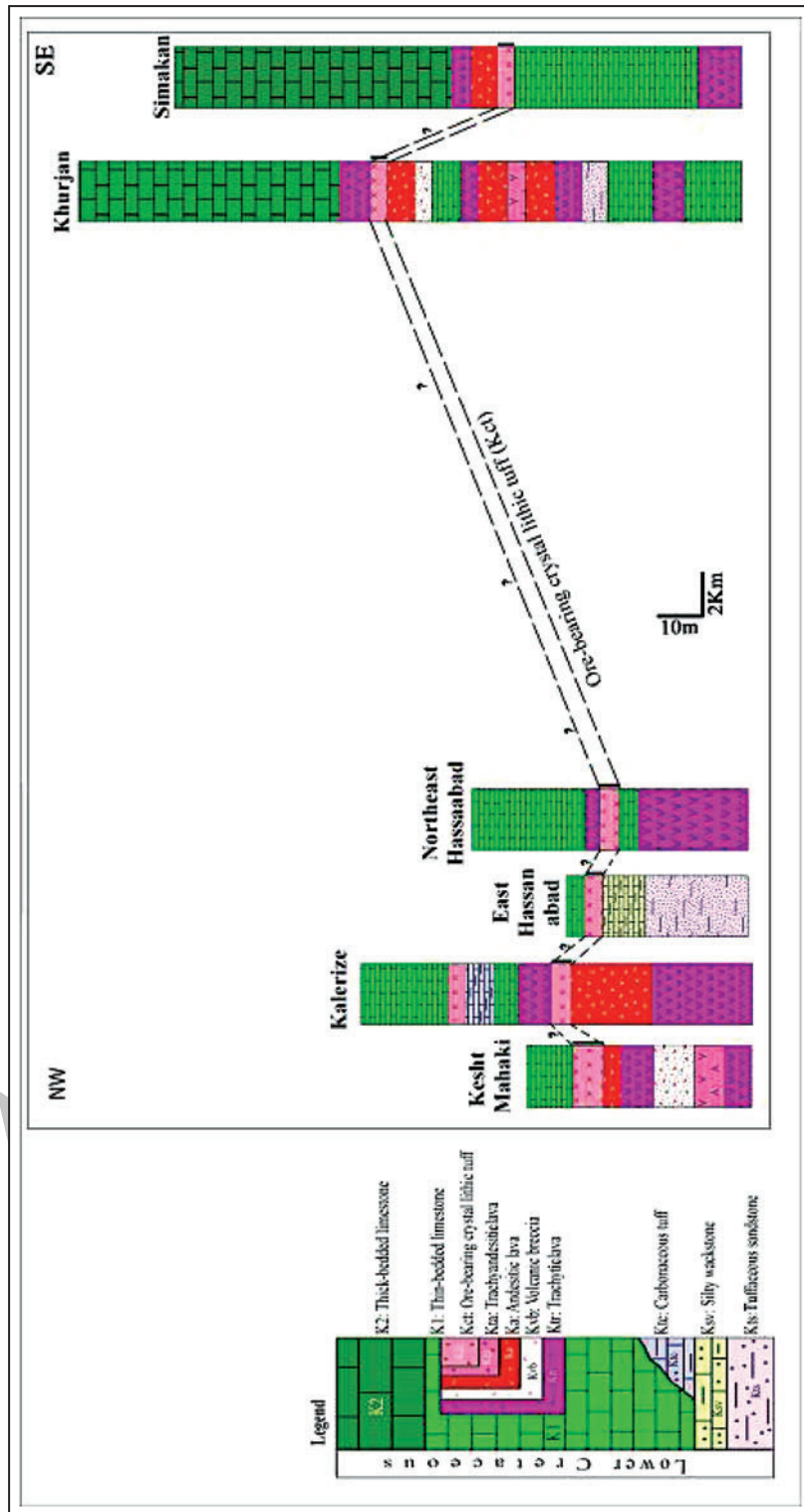
شکل ۱- موقعیت کانه‌زایی مس (- نقره) کانسار کشت‌مهکی و اندیس‌های معدنی در زیرپهنه حاشیه‌ای (Marginal Sub-Zone) از پهنه سندیج - سیرجان (برگرفته از Mohajjel et al., 2003)



شکل ۲- بخشی از نقشه زمین شناسی ساده شده ۱:۲۵۰۰۰۰ اقلید (برگرفته از اوهایان و همکاران، ۱۳۶۷) و گسترش واحد Kv در آن. واحد Kv در شمال باختر- جنوب خاور صفاشهر به صورت جانبی به واحد آهکی اربیتولین دار تغییر رخساره می دهد (مقطع AB کانسار کشت مهکی و مقاطع CD, EF, GH, IJ به ترتیب محل مقاطع سنگ چینه ای اندیس های معدنی کله ریزه، شمال خاور حسن آباد، خاور حسن آباد، خورجان و سیمکان هستند که ستون سنگ چینه نگاری آنها در شکل ۴، نشان داده شده است).

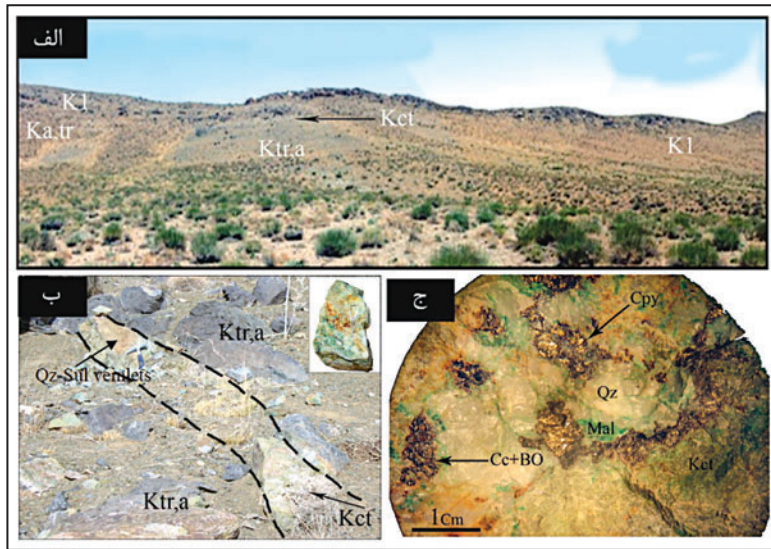


شکل ۳- الف) نقشه زمین شناسی ۱:۲۰۰۰ و موقعیت کانسار کشت مهکی در واحد Kv در پیشانی طاقدیس؛ ب) رخنمون واحدهای سنگی کرتاسه زیرین و واحد Kv (رخساره آتشفشانی- آذرآواری کانه دار) در منطقه معدنی کشت مهکی؛ ج) گسترش واحد گدازه ای و توفی (Kv) و ارتباط آن با واحد آهکی نازک لایه (K1) در منطقه مورد مطالعه.

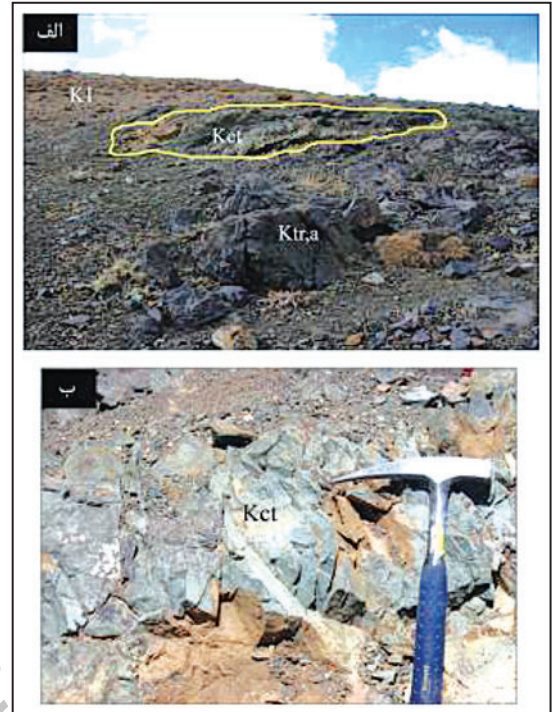


شکل ۴- تغییر رخساره جانبی واحد آتشفشانی- رسوبی کانه‌دار (KV) به واحد کربناتی اربیتولین دار کرتاسه زیرین از شمال باختر تا جنوب خاور صفاشهر.

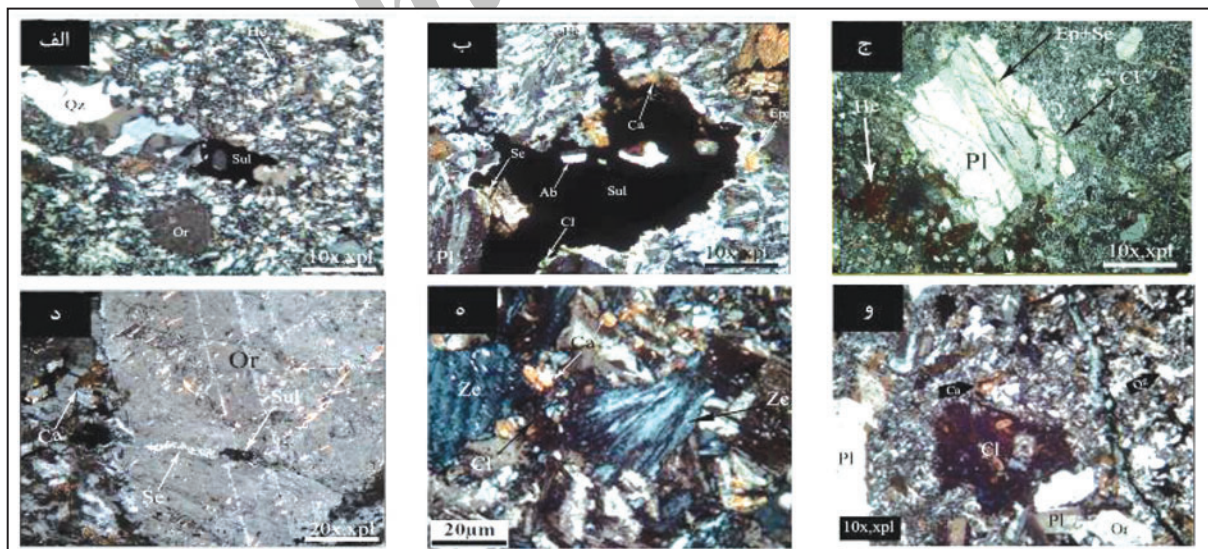




شکل ۶- الف) نمایی از واحدهای سنگ‌شناختی و کریستال لیتیک توف در منطقه کله‌ریزه. واحدهای دیده شده از قدیم به جدید شامل گدازه‌های تراکی آندزیتی - آندزیتی (Ktr, a)، کریستال لیتیک توف کانه‌دار (Kct) و آهک نازک لایه (K1 است؛ ب) رگه - رگچه‌های سیلیسی - سولفیدی کانه‌دار (Qz-Sul Veinlets) که به واحد کریستال لیتیک توف (Kct) محدود شده است. (خط منقطع، روند لایه‌بندی را نشان می‌دهد که واحد کریستال لیتیک توف کانه‌دار (Kct) در میان واحد گدازه تراکی آندزیتی - آندزیتی محدود شده است؛ ج) تصویر میکروسکوپی از رگه - رگچه‌های سیلیسی - سولفیدی در واحد کریستال لیتیک توف کانه‌دار (رگه سیلیسی: Qz، کالکوپیریت: Cpy، کالکوسیت: Cc، بورنیت: Bo و مالاکیت: Mal).

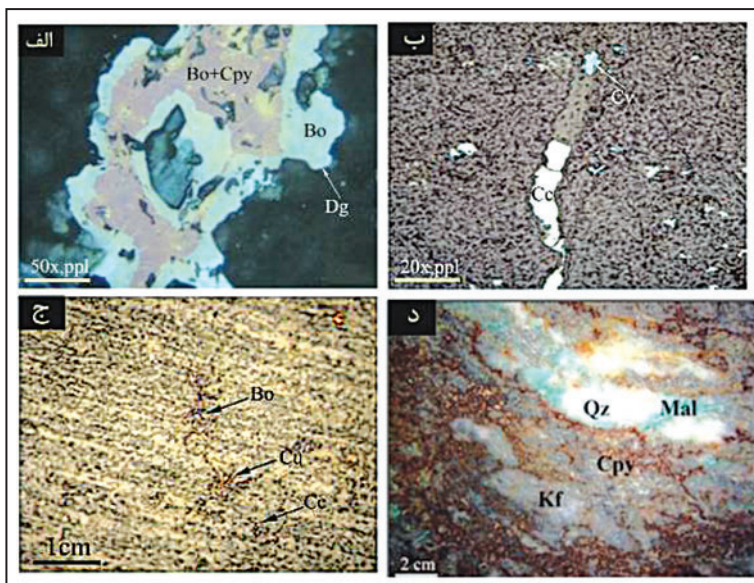
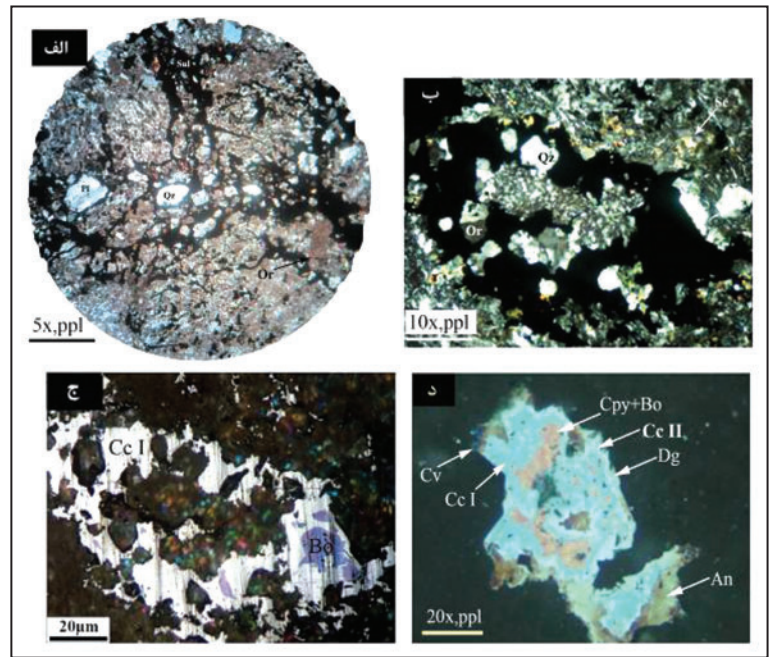


شکل ۵- الف) نمایی از واحد کریستال لیتیک توف کانه‌دار (Kct) هم‌روند با گدازه‌های Ktr, a (فرودیواره) و واحد آهکی K1 (فرادیواره)؛ (ب) نمایی نزدیک‌تر از واحد کریستال لیتیک توف کانه‌دار (Kct). رنگ این واحد در سطح به دلیل اکسید شدن سولفیدهای مس، در جهت هم‌روند با لایه‌بندی، سبز رنگ (مالاکیت‌دار) است.



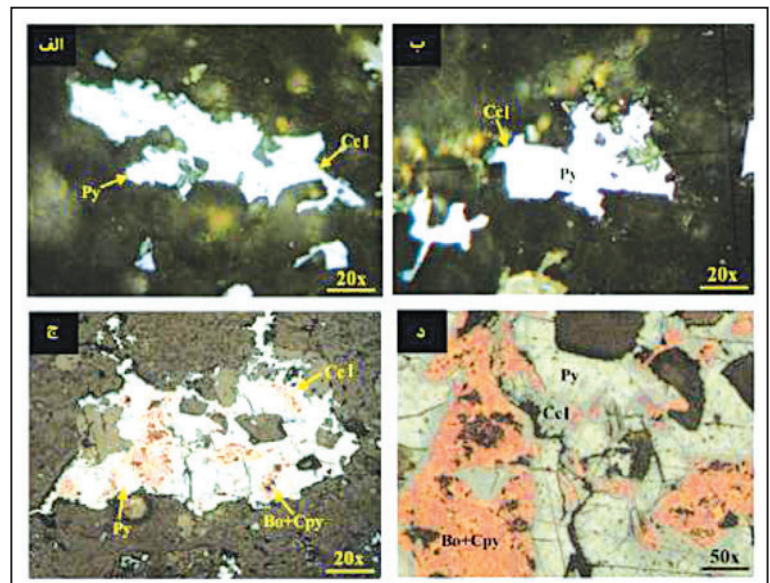
شکل ۷- دگرسانی و ارتباط آن با کانه‌زایی سولفیدی. الف) دگرسانی سیلیسی (Qz) و همراهی آن با سولفیدها (Sul). زمینه سنگ متشکل از بلورهای ریز کوارتز، ارتوز و هماتیت (He) است که ارتوز (Or) و کوارتز درشت به صورت پورفیر در آن قرار دارد؛ (ب) دگرسانی سریسیتی (Se)، کلسیتی (Ca)، آلپیتی (Ab) و اپیدوتی (Ep) همراه با کانه‌زایی سولفیدی (Sul)؛ (ج) اپیدوتی شدن (Ep) و کلریتی شدن (Cl) بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) در زمینه‌ای از کواتز، آلپیت (Ab) و هماتیت (He)؛ (د) دگرسانی ارتوز به سریسیت (Se) و کلسیت (Ca) همراه با کانه‌زایی سولفیدی در رگچه‌ها و زمینه سنگ؛ (ه) زنولیتی شدن (Ze) بلورهای فلدسپار (Or, Pl) در طی دگرگونی تدفینی. کلریت، کلسیت و کوارتز همراه با کانه‌زایی سولفیدی دیده می‌شوند؛ (و) کلریتی شدن (Cl) بلورهای فلدسپار و رخداد دگرسانی کلسیت، کوارتز و هماتیت (He) همراه با کانه‌زایی سولفیدی (Sul) در واحد کریستال لیتیک توف کانه‌دار.

شکل ۸- بافت پرکننده فضای خالی از سولفیدها در کریستال لیتیک توف میزبان کان‌زایی؛ الف و ب) تصاویری از واحد کریستال لیتیک توف میزبان کان‌زایی و بافت پرکننده فضای خالی از سولفیدها. کانی‌های کدر سولفیدها و بخش‌های روشن پورفیرهای پلاژیوکلاز، ارتوز و کوارتز هستند. زمینه سنگ کوارتز، ارتوز، آلپیت و هماتیت است (نور عبوری، ppl)؛ ج و د- بافت پرکننده فضای خالی از کانی‌های سولفیدی که متشکل از کالکوسیت (Cc)، بورنیت (Bo)، کالکوپیریت (Cpy) و دیژنیت (Dg) هستند (نور بازتابی). دیژنیت (Dg)، کویلیت (Cv)، آنیلیت (An) و کالکوسیت ثانویه (CcII)، سولفیدهای ثانویه مس هستند که از اطراف جانشین سولفیدهای اولیه (کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت) شده‌اند.

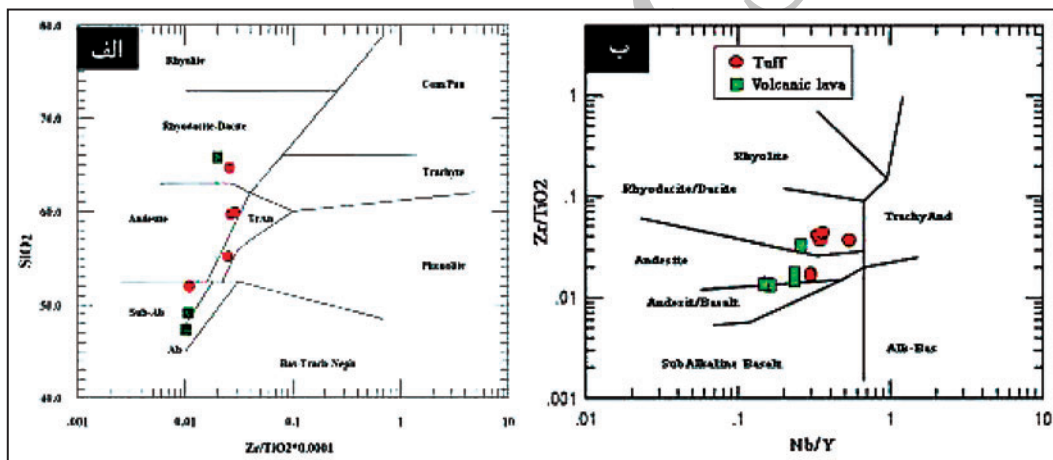
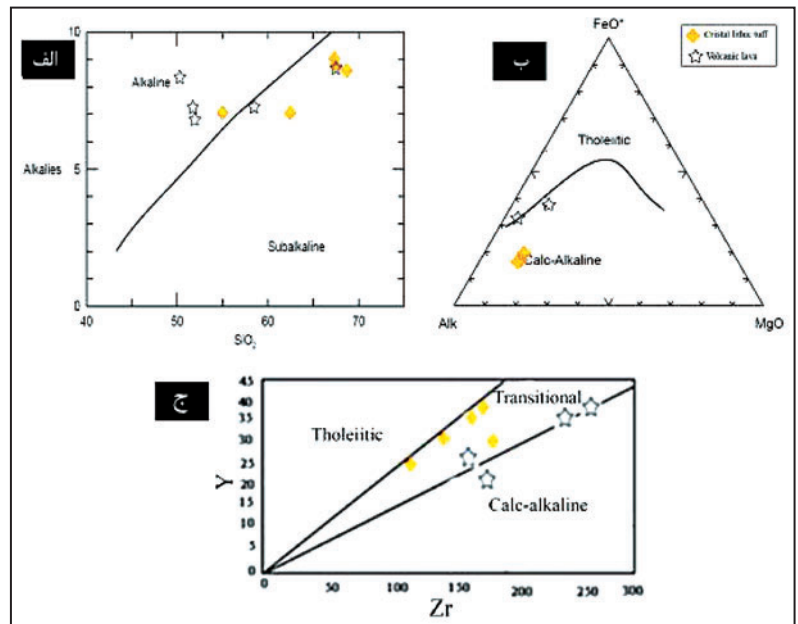


شکل ۹- بافت‌های جانشینی، رگه- رگه‌ای و لامینه‌مانند در کریستال لیتیک توف میزبان کان‌زایی. الف) جانشینی بلورهای دیژنیت در اطراف کانی بورنیت؛ ب) بافت رگه- رگه‌ای متشکل از کانی کالکوسیت اولیه که توسط کویلیت جانشین شده است؛ ج) بافت رگه- رگه‌ای از کالکوسیت، بورنیت و مس طبیعی؛ د) بافت لامینه‌مانند از کالکوپیریت در واحد کریستال لیتیک توف (کالکوپیریت: Cpy، بورنیت: Bo، کالکوسیت: Cc، دیژنیت: Dg، کویلیت: Cv، مالاکیت: Mal، فلدسپار پتاسیم: Kf).

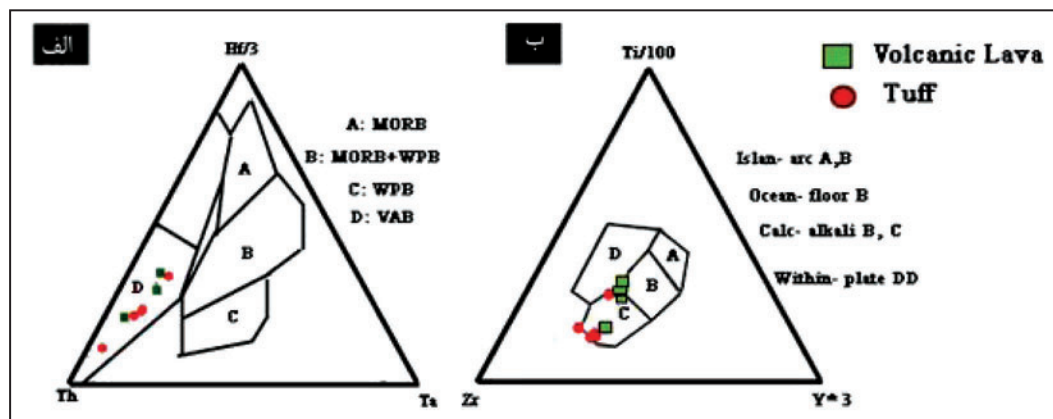
شکل ۱۰- تصاویری از جانشین شدن پیریت توسط سولفیدهای مس. الف و ب) جانشینی کالکوسیت به جای بلورهای پیریت (Py). همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، کالکوسیت وارد بلورهای پیریت تشکیل شده در مرحله پیش از کان‌زایی شده و جانشین آن شده است؛ ج و د) جانشینی کالکوسیت (Cc)، بورنیت (Bo) و کالکوپیریت (cpy) (مرحله اصلی کان‌زایی) به جای بلورهای پیریت که در مرحله پیش از کان‌زایی تشکیل شده‌اند. همان‌گونه که در تصویر دیده می‌شود، تنها تکه‌هایی از بلورهای پیریت تشکیل شده از مرحله پیش، باقی مانده است و بیشتر بخش‌های این بلورها، توسط سولفیدهای مس جانشین شده است (همه تصاویر با عدسی Oil گرفته شده‌اند).



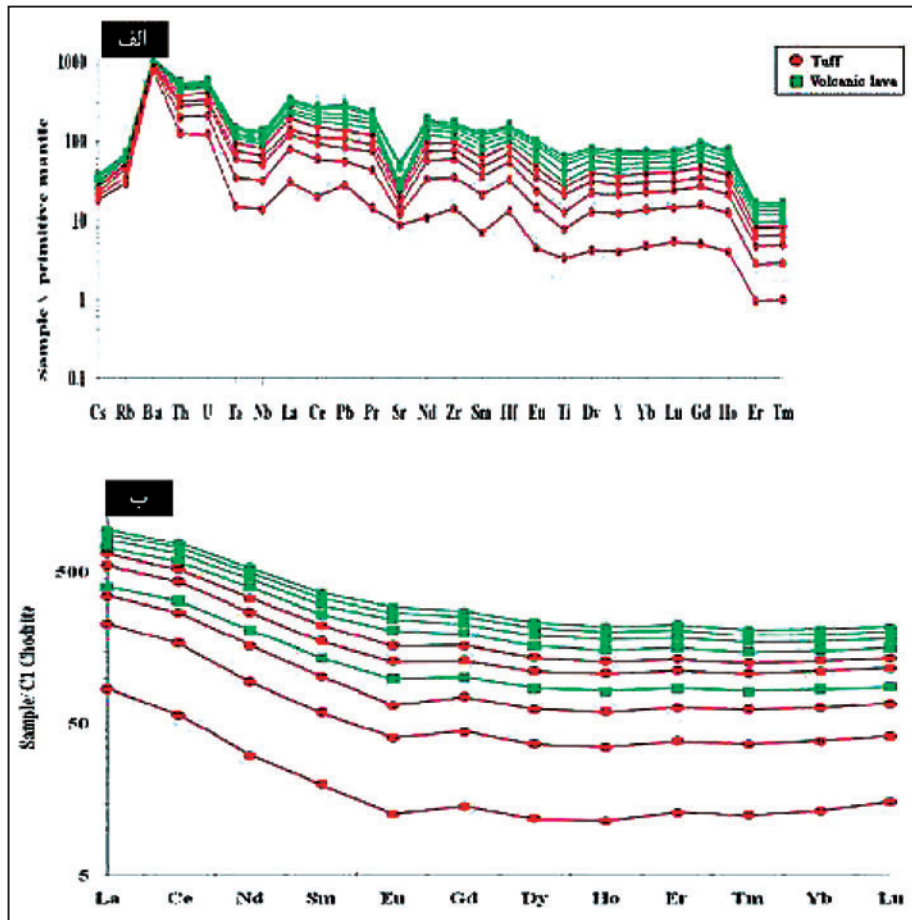
شکل ۱۱- الف) نمودارهای ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی و آذرآوری الف) ماهیت ساب‌آلکان و آلکان در برابر قلیایی‌ها (Irvin & Baragar, 1971)؛ ب) ماهیت کالک‌آلکان سنگ‌های آتشفشانی و آذرآوری بر مبنای نمودار AFM (Irvin & Baragar, 1971)؛ ج) ماهیت تحولی سنگ‌های آتشفشانی و آذرآوری بر پایه نمودار Y در برابر Zr (Barrett & MacLean, 1994).



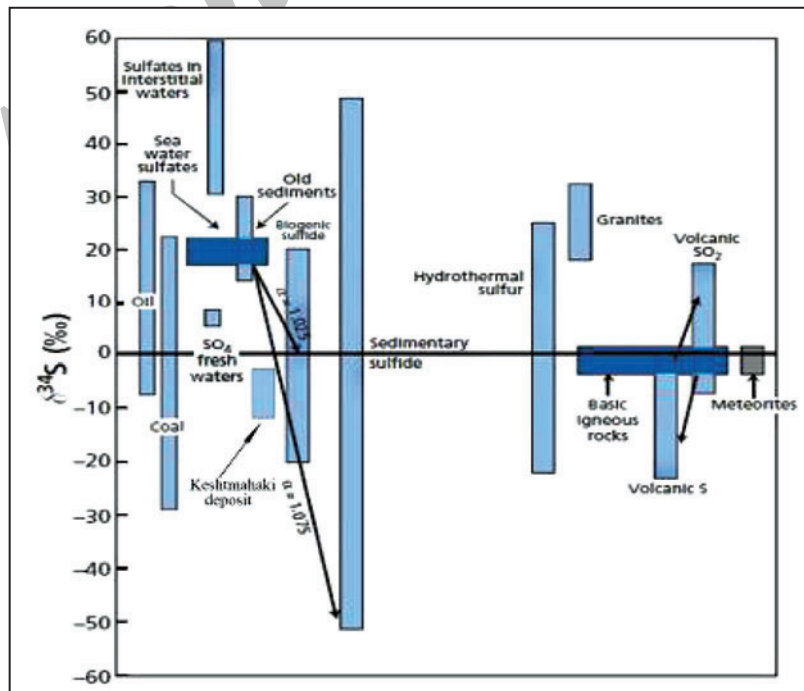
شکل ۱۲- الف) سنگ‌های آتشفشانی و آذرآوری منطقه معدنی با استفاده از نمودار  $\text{SiO}_2$  در برابر  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \cdot 0.0001$  (Winchester & Floyd, 1977)؛ ب) ترکیبی از ساب‌آلکان بازالت تا داسیت-ریوداسیت؛ ج) ماهیت نمودار دوتایی  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  در برابر  $\text{Nb}/\text{Y}$  (Winchester & Floyd, 1977)، ترکیبی از آندزیت بازالت تا ریوداسیت-داسیت دارند.



شکل ۱۳- با توجه به موقعیت داده‌ها بر روی نمودارهای الف) (Wood (1980) و ب) (Pearce & Cann (1973)، سنگ‌های کانسار مس (-نقره) کشت‌مهکی به موقعیت زمین‌ساختی کمان آتشفشانی کالک‌آلکان تعلق دارند.



شکل ۱۴- الگوهای پراکندگی الف) عناصر کمیاب و ب) عناصر خاکی کمیاب در کانسار مس (-نقره) کشت‌مهکی در نمودارهای ژئوشیمیایی (Sun & MaDonough (1989).

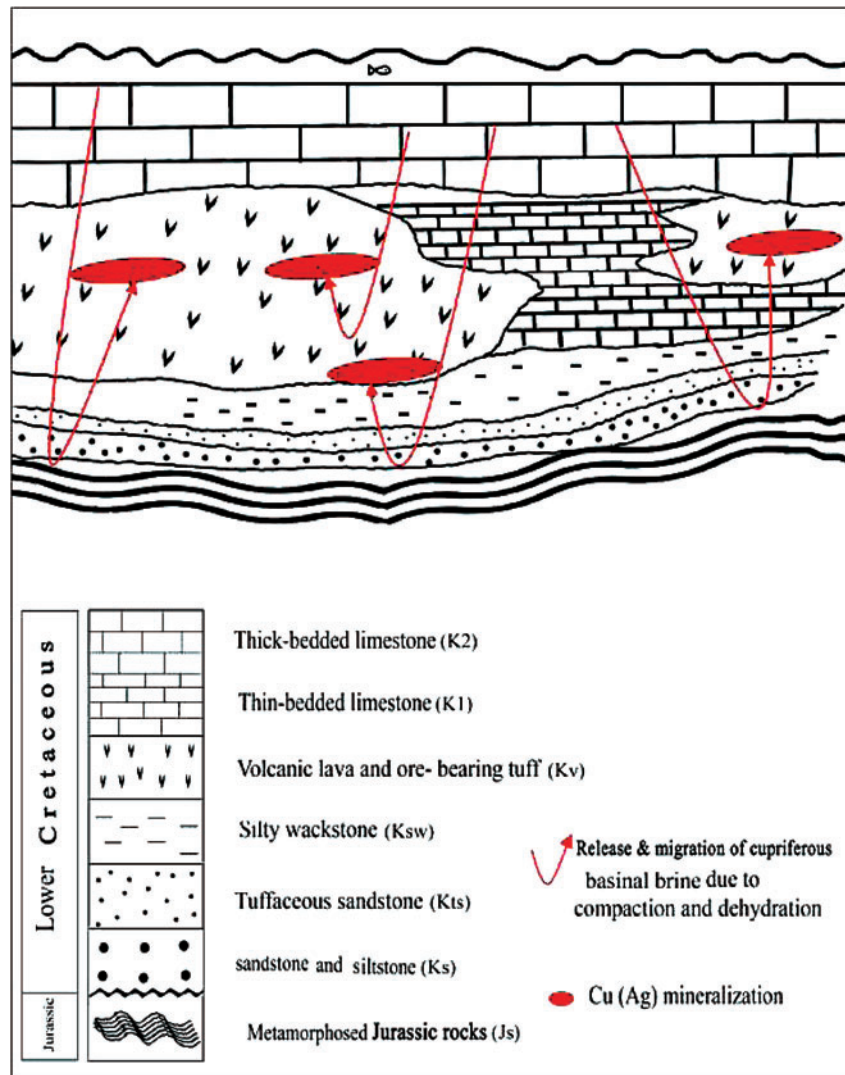


شکل ۱۵- محدوده ایزوتوپی گوگرد در کانسار مس کشت‌مهکی نشانگر منشأ گرفتن آن از سولفات آب دریا است (با تغییرات، پس از Allegre, 2008).

Stages Minerals	Pre-mineralization	mineralization	Post-mineralization
	Volcanism & Early diagenesis	Late diagenesis (Deep burial)	Supergene
Pyrite	—————		
Chalcocite I		—————	
Chalcocite II			—————
*Bornite+Chalcopyrite		—————	
Bornite		—————	
Native copper		—————	
Chalcopyrite		—————	
Silver-bearing Clausthalite		—————	
Albite	—————		
Orthoclase	—————		
Sericite		—————	
Chlorite		—————	
Epidote		—————	
Zeolite		—————	
Calcite		—————	
Quartz I	—————		
Quartz II		—————	
Hematite I	—————		
Hematite II		—————	
Anilite			—————
Covellite			—————
Digenite			—————
Malachite			—————
Azurite			—————
Geothite			—————
Textures	Laminated-like	—————	
	Open space filling	—————	—————
	Vein-veinlet	—————	—————
	Replacement	—————	—————

\*Exsolution of Chalcopyrite and Bornite

شکل ۱۶- مراحل تشکیل و تکوین کانه‌زایی و توالی همبود کانه‌ها و کانی‌ها و ساخت و بافت آنها در کانسار مس (-نقره) کشت مهبکی.



شکل ۱۷- الگوی تشکیل و تکوین نمادین کانسار مس (-نقره) کشت‌مهکی در طی دیاژنز تدفینی (Burial Metamorphism) (بر پایه Kojima et al., 2007). سنگ میزبان، واحد آتشفشانی- آذرآواری (Kv) است.

جدول ۱- نتایج تجزیه XRF نمونه‌های کانسار مس (-نقره) کشت‌مهکی که در آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا انجام شده است (بر حسب درصد وزنی).

Field N.	Rock type	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	Cr2O3	TiO2	MnO	P2O5	SrO	BaO	LOI	Sum
3	ore-bearing tuff	62.45757	17.02874	5.227427	0.7920344	5.6234442	5.8271102	1.2219959	0.0113148	0.7015162	0.1244625	0.2376103	0.0339443	0.712831	5.17	93.6
412	ore-bearing tuff	67.466111	16.631908	2.8258603	1.2513034	1.6579771	8.2794578	0.5109489	0.0104275	0.9489051	0.0521376	0.2815433	0.0104275	0.0729927	2.24	98.1
413	andesite	51.946678	18.03851	9.4583157	6.5065595	5.1311892	6.5488785	0.2644943	0.0211595	1.4705882	0.1904359	0.370292	0.0423191	0.0105798	4.69	99.2
414	trachyandesite	51.727909	15.201225	9.7550306	10.03937	4.1229221	7.152231	0.0984252	0.0218723	1.3013998	0.2296588	0.328084	0.0109361	0.0109361	7.74	99.2
501	ore-bearing tuff	89.311557	2.8219971	4.341534	1.6022328	0.2894356	0.5168493	0.4444904	0.031011	0.5065123	0.020674	0.0723589	0.020674	0.020674	1.34	98.1
A1	ore-bearing tuff	67.341203	16.863406	2.4170883	1.3041034	1.6975829	8.1506464	0.8881394	0.0112423	1.0230467	0.0449691	0.2248454	0.0112423	0.0224845	2.96	91.9
A15	ore-bearing tuff	55.003173	17.45293	9.6995981	2.2530146	6.1561244	6.8013539	0.2538608	0.0211551	1.7770256	0.2115507	0.3384811	0.0105775	0.0211551	3.73	98.3
C31	ore-bearing tuff	68.699655	16.340621	2.1864212	1.2197929	1.4959724	8.561565	0.0460299	0.0115075	1.0241657	0.0345224	0.287687	0.0115075	0.0805524	3.16	90.1
K33	andesite	67.494102	15.181044	4.9748692	1.7437686	0.5949328	8.2469997	0.4308134	0.0205149	0.9642015	0.0307724	0.2974664	0.0102575	0.0102575	0.49	98
R32	andesite	50.299658	14.340753	12.253853	11.825771	0.2675514	8.2619863	0.0856164	0.0107021	2.1618151	0.1177226	0.3531678	0.0107021	0.0107021	7.14	100.5
R34	trachyandesite	58.485039	13.391923	11.770245	5.827579	0.6591337	7.2190835	0.0523122	0.0104624	2.1134128	0.0627746	0.3871103	0.0104624	0.0104624	3.31	98.9

جدول ۲- نتایج تجزیه ICP که در آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا انجام شده است (همه مقادیر بر حسب ppm هستند).

Field N.	Rock type	Ag	Cu	Nb	Zr	Y	Zn	Ni	Pb	U	Co	Ni	Eu	
1	3	ore-bearing tuff	19	10000	9.6	155	17.9	157	46	5	2.53	26.7	46	0.74
2	412	ore-bearing tuff	12	10000	12.5	234	37.1	58	15	5	1.78	9.4	15	1.6
3	413	andesite	1	22	7.6	148	32.3	152	62	8	0.71	29	62	1.56
4	414	trachyandesite	1	33	5.9	121	25.1	152	40	5	0.47	18.6	40	1.42
5	501	ore-bearing tuff	6	10000	1.5	42	10.1	13	5	15	0.37	2.4	5	1.57
6	A1	ore-bearing tuff	27	10000	13.9	264	38.9	60	12	5	1.77	8.9	12	1.53
7	A15	ore-bearing tuff	10	10000	9.6	184	32	212	40	5	0.74	28.4	40	1.84
8	C31	ore-bearing tuff	33	10000	12.8	237	36.9	55	16	5	1.78	8.3	16	1.73
9	K33	andesite	1	30	8.6	187	33	31	12	5	1.28	5.2	12	1.95
10	R32	andesite	1	5	5.8	178	37.6	31	5	5	0.27	4.3	5	2.5
11	R34	trachyandesite	1	41	5.8	169	36	41	5	5	0.33	7.7	5	2.28

## کتابنگاری

اوهانیان، ت.، سهندی، ر.، طراز، ح.، آقائباتی، ع.، سهیلی، م. و آزر، ف.، ۱۳۶۷- نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ اقلید، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

بوری کناری، م.، ۱۳۸۹- زمین شناسی، کانی شناسی، ساخت و بافت، ژئوشیمی، ژنز و تیپ کانسار مس کشت مهکی، شمال باختر صفاشهر (استان فارس)، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

بوری کناری، م.، راستاد، ا. و رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۸۸- کانه زایی مس تیپ Volcanic Red Bed در توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه تحتانی، شمال غرب - جنوب شرق دهیبد، استان فارس، بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران، تهران.

پروانه نژاد شیرازی، م. و شهیدا، م.، ۱۳۸۱- چینه شناسی و فسیل شناسی نهشته های کرتاسه در زون سندج- سیرجان.

توکلی، ح.، ۱۳۸۳- کانی شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانسارهای آهن شمال غرب همدان، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

سامانی، ب.، ۱۳۷۷- گزارش ارزیابی استعداد معدنی منطقه گاو کشته- مهره دراز در شمال غربی دهیبد.

شهری، ع.، ۱۳۸۸- اکتشاف معادن متروکه شمال استان فارس، مطالعات اکتشافی در محدوده کشت مهکی.

شهیدی، ع. و طراز، ح.، ۱۳۶۹- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دهیبد، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

عبدی، م.، ۱۳۸۶- بررسی لیتوژئوشیمیایی و خاستگاه کانی سازی در کانسارهای تنگستن- قلع (مس) ده حسین و نظام آباد و مقایسه آن با کانسار بامسر، جنوب غرب شازند اراک، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

عزیزپور مغوان، م.، ۱۳۷۸- ژئوشیمی، کانی شناسی و زلزله های معدنی تنگستن اسکارنی بامسر و رگه ای روش و مقایسه آنها با کانسار تنگستن نظام آباد (شازند- اراک)، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

فردین دوست، ز.، ۱۳۸۲- ژئوشیمی ایزوتوپی و عناصر کمیاب ذخایر تنگستن (قلع و مس)، جنوب غرب آستانه اراک، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

کاظمی راد، م.، راستاد، ا. و محجل، م.، ۱۳۸۸- کانی شناسی، دگرسانی و ساخت و بافت کانسارهای آهن- منگنز هنشک، گلی و چشمه اسی در شمال شرق صفاشهر، استان فارس، بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران.

متولی، ک.، ۱۳۸۴- کانی شناسی، ژئوشیمی و منشأ کانسارهای آهن خسروآباد و تکیه بالا در شمال خاوری سنقر، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

مقصودی قره بلاغ، ع. و یونسی، س.، ۱۳۸۶- گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی کانی سنگین در وره ۱:۱۰۰۰۰۰ دهیبد، سازمان زمین شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور.

## References

- Alavi, M., 1994- Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, v. 229, p. 211-238.
- Aliyari, F., Rastad, E. & Zengqian, H., 2007- Orogenic Gold Mineralization in the Qolqoleh Deposit, Northwestern Iran. *Resource Geology*, v. 57, No. 3, p. 269-282.
- Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M. & Marehart, G. B., 2009- Geology and geochemistry of D–O–C isotope systematics of the Qolqoleh gold deposit, Northwestern Iran: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, v. 36, p.306-314.
- Allegre, C. J., 2008- *Isotope geology*. 534p (book).
- Barrett, T. J. & MacLean, W. H., 1994- Chemostratigraphy and hydrothermal alteration in exploration for VMS deposits in greenstones and younger volcanic rocks, *In* Lentz, D. R., (ed.), *Alteration and Alteration Processes Associated with Ore-Forming Systems: Geological Association of Canada, Short Course Notes*, v. 11, p. 433-467.
- Cabral, A. R. & Beaudoin, G., 2006- Red Bed Copper deposits of the Quebec Appalachians.
- Cabral, A. R. & Beaudoin, G., 2007- Volcanic Red Bed Copper mineralisation related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada. *Miner Deposita*, v. 42, p. 901-912.
- Carrillo-Rosua, F. J., Morales-Ruano, S., Morata, D., Boyce, A. J., Belmar, M., Fallick, A. E., Fenoll Hachali, P. & Munizaga, F., 2003- Sulfur isotope studies in Chilean Manto-type Cu- (Ag) deposits in the Coastal range of central Chile.
- Daliran, F., 2008- The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran—hydrothermal alteration and mineralization. *Miner Deposita*, v.43, p.383-404.
- Ehya, F., Lotfi, M. & Rasa, I., 2009- Emarat carbonate-hosted Zn–Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 37, Issue 2, p. 186-194.
- Espinnoza, R. S., Veliz, G. H., Esquivel, L. J., Arias, F. J. & Moraga, B. A., 1996- The cupriferous province of the coastal ranges, Northern Chile *In* Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny. *Soc. Econ. Geologists, special publication*, No. 5, Camus, F., Sillitoe, R.H. and Petersen, R., p. 19-32.
- Ferenc, S. & Rojkovic, I., 2001- Copper mineralisation in the Permian basalts of the Hronicum Unit, Slovaki. *Geoscience*, N. 13.
- Galley, A., Hannington, M. & Jonasson, I., 2006- Volcanogenic-associated massive sulfide deposits (VMS).
- Guzman, J., Collao, S. & Oyarzun, R., 2000- Andacollo copper-gold district, La Serena, Chile: preliminary data from the porphyry copper and possible relationships between Cu and Au mineralization.
- Irvine, T. N. & Baragar, W. R. A., 1971- A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, p.523-548.
- Kirkham, R. V., 1996a- Sediment-hosted stratiform copper. *In* Eckstrand, O.R, Sinclair, W.D., and Thorpe, R.I., (eds.), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types: Geological Survey of Canada, Geology of Canada, No. 8*, p. 223-240 (also Geological Society of America, *The Geology of North America*).
- Kirkham, R. V., 1996b- Volcanic redbed copper, *In* Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., and Thorpe, R.I., (eds.), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types: Geological Survey of Canada, Geology of Canada, No. 8*, p. 241-252 (also Geological Society of America, *The Geology of North America*).
- Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Trista, D. & Hayashi, K., 2003- Ore mineralogy, fluid inclusion and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of northern Chile, *Miner Deposita*, v. 38, p. 208-216.
- Kojima, S., Trista, A. D. & Hayashi, K. I., 2007- Genetic aspects of the manto-type copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. *Resource geology*, v. 59, No. 1, p. 87-98.
- Lane, R. A. & George, P., 2000- Northeast- Central Region, Ministry of energy and mines.
- Lefebure, D. V. & Alldrick, D. J., 1996- Sediment-hosted Cu+/-Ag+/-Co, in *Selected British Columbia*.
- Lefebure, D. V. & Church, B. N., 1996- Volcanic Red Bed Cu.
- Lortie, R. B. & Clark, A. H., 1987- stratabound cupriferous sulphide mineralization associated with continental rhyolitic volcanic rocks, Northern Chile: I. the Jardin copper- silver deposit. *Econ Geo*, v. 82, p. 546- 570.
- Lydon, J. W., 2007- An overview of the economic and geological contexts of Canada's major mineral deposit types, in Goodfellow, W.D., (ed.), *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 No. 5*, p. 3-48.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C. & Camus, F., 2003- Metallic ore deposits In *Genesis of copper mineralization and associated alterations in Jurassic volcanic rocks of Buena Esperanza, The geology of Chile*, Moreno.



- Mehrabi, B., Yardley, B. W. D. & Cann, J. R., 1999- Sediment-hosted disseminated gold mineralisation at Zarshuran, NW Iran. *Miner Depos*, v. 34, p. 673–696.
- Mohajjel, M., 1997- Structure and tectonic evolution of Palaeozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. Ph.D. thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia (unpublished).
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. & Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 21, p. 397–412.
- Momenzadeh, M. & Rastad, E., 1973- Zinc, lead and iron mineralization in Cretaceous carbonatic rocks in the West-Central Iran metallogenic zone. *Geological Survey of Iran*, 4p.
- Momenzadeh, M., 1976-“Stratabound lead-zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments the Malayer–Esfahan district (west central Iran)”, *Lithology, Metal content, Zonation and Genesis*. Ph.D thesis, Univ Heidelberg, 300p.
- Mousivand, F., Rastad, E., Hoshino, K. & Watanabe, M., 2007- The Bavanat Cu-Zn-Ag orebody: First recognition of a Besshi-type VMS deposit in Iran. *N. Jb. Miner. Abh.* v. 183, p. 297–315.
- Mousivand, F., Rastad, E., Meffre, S., Peter, J. M., Solomon, M. & Zaw, K., 2010- U-Pb geochronology and Pb isotope characteristics of the Chahgaz volcanogenic massive sulphide deposit, southern Iran.
- Murphy, J. B., 2007- igneous rock associations 8. Arc magmatism II: geochemical and isotopic characteristics. *Geoscience of Canada*, v. 34, No. 1.
- Oliveros, V., Feraud, G., Aguirre, L., Ramirez, L., Fornary, M. & Palacios, C., 2008- Detailed  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. *Miner Deposita*, v. 43, p. 281-293.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. & Oyarzun, J., 1998- Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts. v. 33, p. 547-559.
- Pearce, J. A. & Cann, J. R., 1973- Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 12, p. 339-349.
- Pearce, J. A., 1996- Guide to basalt discrimination diagrams. *In Wyman, D.A., (ed.), Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration, geological association of Canada, short coarse notes*, v. 12, p. 79-113.
- Ramirez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A. N., Turiel, J. L. F., Gimeno, D., Valles, M. G. & Lehmann, B., 2006- the Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia- style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. *Miner Deposita*, v. 41, p. 246-258.
- Ramirez, L. E., Parada, M. A., Palacios, C., Wittenbrink, J., Lehmann, B. & Sial, A. N., 2006- Magma sources of Mantos Blancos copper deposit, Coastal range of Northern Chile.
- Rastad, E., 1981- Geological, mineralogical and ore facies investigations on the lower Cretaceous stratabound Zn-Pb- (Ba-Cu) deposits of the Irankuh mountain range, Esfahan, west central Iran. PhD thesis.
- Rollinson, H. R., 1993- Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation. London, UK, 652p.
- Sato, T., 1984- Manto type copper deposits in Chile, a review. *Bulletin of the geological survey of Japan*, v. 35, p. 565-582.
- Sun, S. S. & McDonough, W. F., 1989- Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *In Saunders AD., Norry MJ. (ed.), Magmatism in Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ.*, London, p. 313–345.
- Tosdal, R. M. & Munizaga, F., 2003- Lead sources in Mesozoic and Cenozoic Andean ore deposits, north-central Chile (30–34\_S). *Miner Deposita*, v. 38, p. 234–250.
- Tristá-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S. & Ferraris, F., 2006- Re–Os isotope systematics for the Lince–Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Miner Deposita* v. 41, p. 99–105.
- Weege, R. J. & Pollock, J. P., 1972- The geology of two native copper mines in the native copper district of Michigan. *Econ Geo*, v. 67, p. 622-633.
- White, W. S., 1968- the native-copper deposits of Northern Michigan. *In Ridge JD (ed.), Ore deposits of the United States, 1933–1967: the Graton–Sales volume. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York*, p 303–325.
- Wilson, M., 1989- Igneous Petrogenesis, A global tectonic approach.
- Wilson, N. S. F. & Zentilli, M., 1999-The role of organic matter in the genesis of the El Soldado volcanic-hosted manto-type Cu deposit, Chile. *Econ Geol*, v. 94, p. 1115– 1136.

- Wilson, N. S. F., Zentilli, M. P. H. & Boric, R. R., 2003- Age of mineralization by basinal fluids at the El Soldado manto-type copper deposit, Chile:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of K-feldspar. *Chemical Geology*, v. 197, p. 161– 176.
- Wilson, N. S. F., Zentilli, M. & Spiro, B., 2003- A sulfur, carbon, oxygen, and strontium isotope study of the volcanic-hosted El Soldado manto-type Cu deposit, Chile: the essential role of bacteria and petroleum. *Econ Geol*, v. 98, p. 163–174.
- Wilton, D. H. C. & Sinclair, A. J., 1988- Ore petrology and genesis of a strata bound disseminated copper deposit at Sustut, British Columbia. *Econ Geol*, v. 83, p. 30-45.
- Winchester, J. A. & Floyd, P. A., 1977- Geochemical magma type discrimination; application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth Planet Sci Lett*, v. 28, p. 459-469.
- Wood, D. A., 1980- The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 50, p. 11-30.

Archive of SID

# Volcanic Red Bed Type Copper (-Silver) Mineralization in Keshtmahaki Deposit, Northwest of Safashahr, Southern Sanandaj-Sirjan Zone

M. Boveiri Konari<sup>1</sup>, E. Rastad<sup>2\*</sup> & N. Rashidnejad-Omran<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2011 February 26

Accepted: 2012 June 17

## Abstract

Lower Cretaceous volcano-sedimentary sequence in the northwest and southeast of Safashahr (Dehbid) in marginal subzone of southern Sanandaj-Sirjan Zone comprises the Keshtmahaki deposit and few other occurrences of copper (-silver). The oldest rock units in the region are Jurassic shale and sandstone, which are unconformably overlain by the Lower Cretaceous progressive sequence with basal conglomerate, sandstone and silty shale. Copper (-Ag) mineralization occurred in the Lower Cretaceous pyroclastics and volcanic lava. The host rock is a crystal lithic tuff with trachyandesite-andesite affinity in which the stratabound and lenticular ore body is extended discontinuously over 35 km that laterally and vertically changed into orbitolina limestone. Ore minerals include chalcocite, bornite, native copper, digenite, chalcopyrite, pyrite, Ag-bearing clausthalite, covellite, anilite, malachite and azurite. Ore textures and structures are open space filling, vein-veinlet, replacement, disseminated and laminated-like. The lithogeochemical studies in 6 lithostratigraphic profiles from NW to SE of Safashahr indicated Cu (-Ag) mineralization occurrence in a specific stratigraphic unit and a positive relationship with Zn. The lithological, mineralogical, lithogeochemical and microscopic investigations revealed that mineralization initially occurred contemporaneously with volcanism in volcano-sedimentary sequences (absorption of Cu by ferric hydroxide, clay minerals and replacement in feldspar lattice) and then in burial diagenesis during dehydration of pyroclastic and detrital units and alteration resulting from this hydrothermal fluid, Cu released and transported by hydrothermal diagenesis fluids. When this ore-bearing hydrothermal fluid received by the rock unit with high permeability (pyrite-bearing crystal lithic tuff) and reduced conditions resulted from abundance of pyrite, replaced them as copper sulphide minerals. S isotopic data of sulphidic minerals indicated that the bacterially sulfate reduction of sea water as an important role provided the necessary sulfur for sulfide mineralization. Geochemical features of volcanic and pyroclastic units indicated that they formed in an intra-arc rift. On the basis of this study and with respect to some evidences such as tectonic setting, host rock, lenticular shape of the ore body, structure and texture as well as mineral paragenesis we suggest that Keshtmahaki Cu (-Ag) mineralization and surrounding occurrences are Volcanic Red Bed (VRB) type deposit that formed and concentrated contemporaneously with submarine volcanism to deep burial diagenesis processes.

**Keywords:** Progressive Sequence, Volcano-Sedimentary, Lower Cretaceous, Cu(-Ag) Ore Deposit, VRB Type, Keshtmahaki, Southern Sanandaj-Sirjan Zone, Safashahr, Fars.

For Persian Version see pages 19 to 36

\*Corresponding author: E. Rastad; E-mail: rastad@modares.ac.ir