



## کانه‌زایی و فرآیند آب‌شویی در کانسار مس جیان شمال شرق استان فارس: کاربردی از پتروگرافی و ایزوتوپ‌های پایدار

فرید مر<sup>1\*</sup>، عباس اعتمادی<sup>2</sup>، سینا اسدی<sup>1</sup> و نسیم فتاحی<sup>1</sup>

(1) بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(2) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت: 1392/11/16، پذیرش: 1393/3/31

### چکیده

کانسار مس جیان در حاشیه شرقی زون دگرگونی سنندج-سیرجان، در جنوب ایران (195 کیلومتری شمال شرق شیراز) و در توالی آتشفشانی-رسوبی دگرگون شده سوریان به سن پرموتریاس قرار گرفته است. کانه‌زایی، عمدتاً شامل پیریت، کالکوپیریت و مقدار کمتری اسفالریت، پیروتیت و اندکی گالن، کوبانیت و مس خالص می‌باشد. کانه‌زایی شکافه پرکن (مانند رخداد رگه‌ها و رگه‌چه‌های کانه‌دار) در ارتباط با وافشارش هیدرولیک و نشان‌دهنده کانه‌زایی ثانویه در منطقه است. اثرات حاصل از فرآیندهای دگرگونی دینامیک و گرمایی به‌صورت بافتهای شاخص این دگرگونیها در ماده معدنی قابل تشخیص است. رخداد فعالیت دگرگونی-گرمایی در این منطقه باعث تشکیل دو گروه رگه‌های کوارتزی کانه‌دار (تیپ A) و رگه‌های کوارتزی بی‌کانه (تیپ B) شده است. مطالعه میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن بر روی این رگه‌ها نیز تکامل سیال دگرگونی-گرمایی را طی دو مرحله متفاوت نشان می‌دهد. مرحله نخست از کانه‌زایی در ارتباط با یک سیال دما بالا (بیش از 303 درجه سانتی‌گراد)، نسبتاً شور (میانگین 10 درصد وزنی معادل NaCl) و با غلظت بالای CO<sub>2</sub> (بیش از 2/7 درصد وزنی) بوده است. این سیال در ادامه با کاهش دما (میانگین 183 درجه سانتی‌گراد) و شوری (میانگین 5/4 درصد وزنی معادل NaCl) در محیطهای سطحی با نهشت روتیل همراه بوده است. این رگه‌ها تاریخچه برهمکنش سیال-سنگ را در سنگ میزبان دگرگونی کمپلکس سوریان، طی سرد شدگی، بالا آمدگی و کشش نهایی طی فرآیند دگرگونی پس‌رونده که منجر به کانه‌زایی مس شده است، ثبت کرده‌اند. همچنین اثر ناچیز فرآیند غنی‌شدگی سطحی‌زاد<sup>1</sup> در این کانسار با تغییرات جزئی ایزوتوپ‌های مس ( $\delta^{65}\text{Cu} = -0.45 \text{ to } +0.49 \%$ ) نیز تأییدکننده کانه‌زایی مس با منشأ اولیه و عمقی است.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ پایدار، سیال دگرگونی، کانسار مس، جیان (بوانات)، زون سنندج-سیرجان.

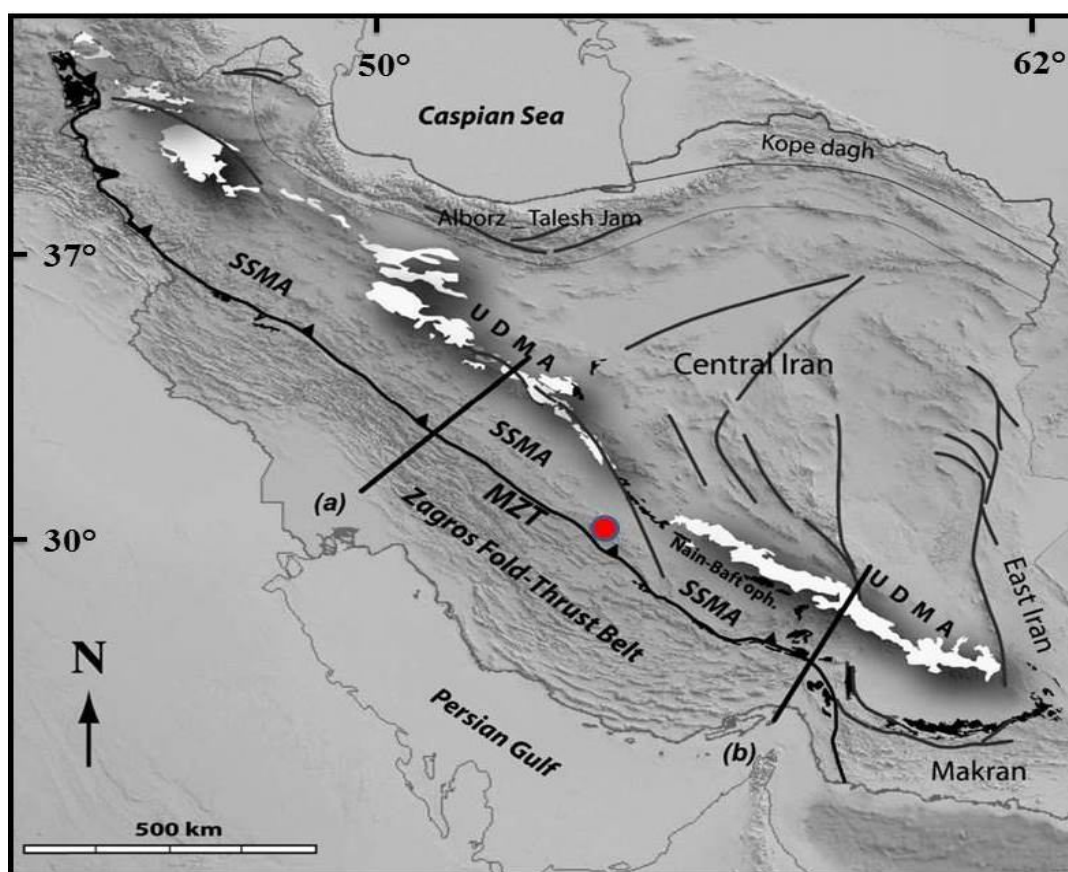
### مقدمه

رخمونهای سطحی در طول دره بوانات به چشم می‌خورد. گسترش سرباره‌های ذوب قدیمی مس (اطراف کانسار مس جیان، جنوب روستای مزایجان و روستای چیر) و آهن (کوه سفید توتک)، در کنار آثار معدن‌کاری شدادی در طول دره بوانات مؤید این موضوع است که استخراج و ذوب مواد معدنی به‌خصوص مس و آهن، قدمت دیرینه دارد. همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی کانسار مس جیان نیز دیده می‌شود، سنگهای درون‌گیر ماده معدنی شامل کلریت شیست، گرافیت شیست، میکاشیست و متاسب ولکانیک‌های حدواسط-بازیک

کانسار مس جیان در زون ساختاری سنندج-سیرجان و در 195 کیلومتری شمال شرق شیراز (در طول جغرافیایی 35° 53' شرقی و عرض جغرافیایی 27° 30' شمالی)، در شهرستان بوانات واقع شده است (شکل 1). از نظر تقسیمات زمین‌ساختی، منطقه بوانات، ذخایر و اندیس‌های معدنی مس موجود در آن، در بخش جنوبی زون سنندج-سیرجان واقع شده است. علاوه بر کانسار مس جیان که فعال می‌باشد، آنومالی‌های کوچک زیادی از کانیهای ثانویه مس به‌صورت

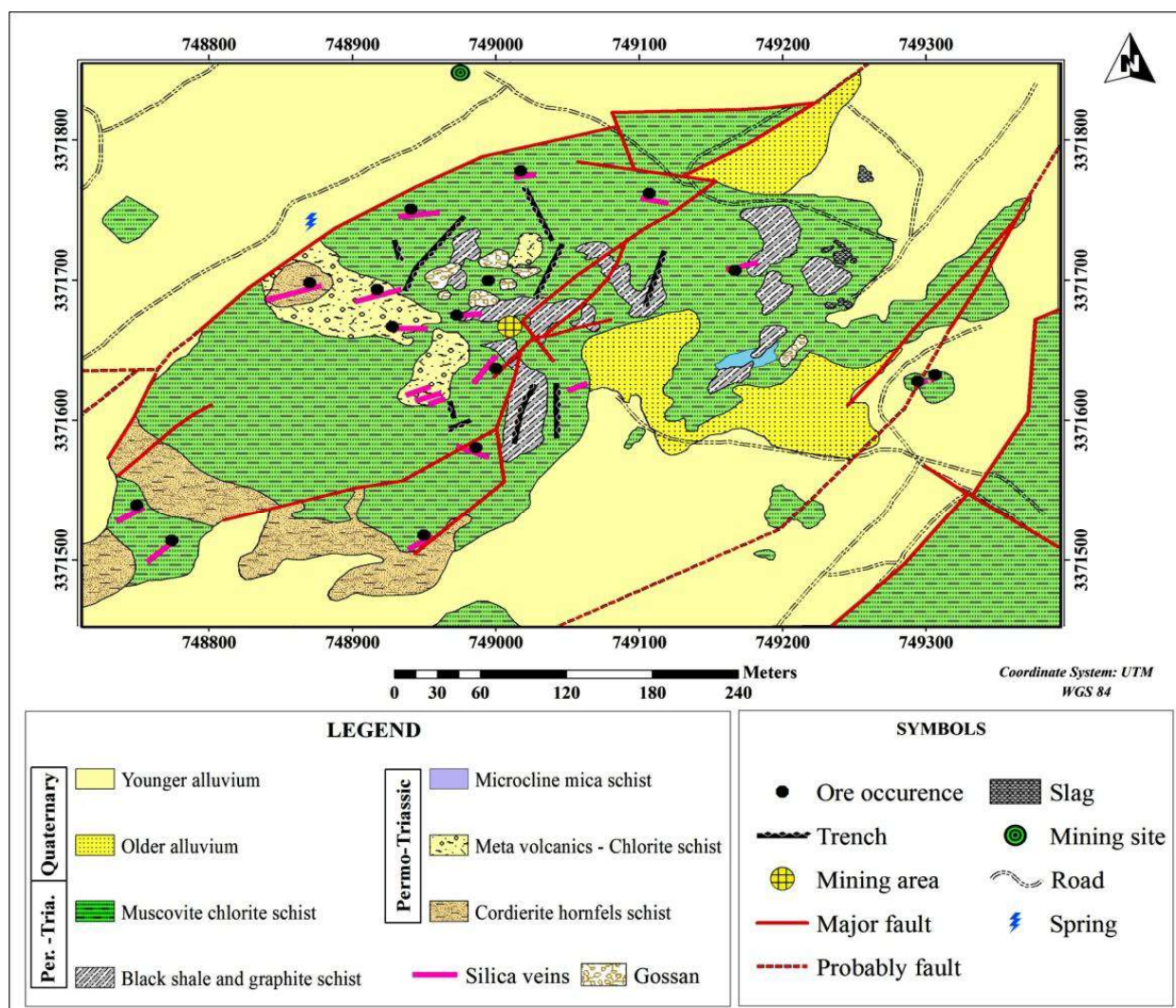
بر روی این کانسار صورت گرفته که آن را از نوع سولفید توده‌ای و آتشفشان‌زاد معرفی می‌کند. یکی از اصول اولیه در مطالعه چگونگی تشکیل یک ذخیره، بررسی‌های کانی‌شناختی، ساخت و بافت ماده معدنی و روابط پاراژنتیکی میان کانسنگ و کانیهاست که می‌تواند اطلاعات مفیدی در رابطه با محیط تشکیل و فرآیندهای شکل‌گیری یک ذخیره به دست دهد. علاوه بر مطالعات پتروگرافی، مطالعات ایزوتوپی نیز در زمین‌شناسی اقتصادی کاربردهای مهم و گسترده‌ای دارد. با توجه به این‌که این ایزوتوپ‌ها واپاشیده نمی‌شوند، از آنها در مطالعات زمین‌شناختی فقط برای تعیین خاستگاه و دماسنجی استفاده می‌شود. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از مطالعات بافتی و ایزوتوپ‌های پایدار؛ نوع فرآیند کانه‌زا که در تشکیل این کانسار نقش داشته است و همچنین میزان تأثیر فرآیند آب‌شویی که با گذشت زمان صورت گرفته، مورد ارزیابی قرار گیرد.

و رگه‌ها و عدسیه‌های کوارتزیتی هم روند با برگ‌وارگی شیست-ها می‌باشد (شکل 2).  
با توجه به مطالعاتی که بر روی کانسار مس جیان صورت گرفته، به‌طور کلی دو نظریه در مورد منشأ این کانسار وجود دارد. بیشتر مطالعات قدیمی و برخی از مطالعات جدید تاییدکننده منشأ دگرگونی برای این کانسار است. از جمله این مطالعات بررسی زمین‌شیمی و خاستگاه مس است که توسط افرادی چون لیاقت و تقی‌پور (Liaghat and Taghipour, 2000)، زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2001)، تقی‌پور و مُر (Taghipour and Moore, 2000)، فتاحی (Fattahi, 2013) و اسدی و همکاران (Asadi et al., 2013) صورت گرفته و آن را از انواع کانسارهای با ویژگیهای دگرگونی معرفی کرده‌اند. مطالعات دیگری نیز توسط افرادی چون موسیوند و همکاران (Mousivand et al., 2007)، رجب‌زاده و اسماعیلی (Rajabzadeh and Esmaili, 2012)،



شکل 1. نقشه ساختاری ساده شده ایران نشان‌دهنده بخش شمالی و جنوبی زون سنندج-سیرجان (Agard et al., 2006; Molinaro et al., 2005)، همراه با موقعیت کانسار مس جیان (●) در شمال شرق استان فارس.

**Fig. 1.** Simplified structural map of Iran with two cross sections (Agard et al., 2006; Molinaro et al., 2005), along with the position of Jian copper deposit (●) on northeastern Fars province.



شکل 2. نقشه زمین‌شناسی کانسار مس جیان (modified after Asadi et al., 2013).

Fig. 2. Geological map of Jian copper deposit (modified after Asadi et al., 2013).

حوضه سکویی حاشیه قاره‌ای و کششی بوده که با رخداد نازک‌شدگی پوسته در پالئوزوئیک پایینی همراه بوده است. از اواخر پالئوزوئیک بالایی تا تریاس میانی زون سنندج-سیرجان با پدیده کافتش و نهشت کربنات‌ها، گدازه‌های بالشی و برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری همراه بوده است، که نشانگر رژیم زمین‌ساختی کششی و جدایش بلوک ایران مرکزی از گندوانا و گسترش بستر اقیانوس نئوتتیس می‌باشد. از شواهد این مقطع زمانی می‌توان به تشکیل 400 متر بازالت‌های بالشی در کفه خیرآباد (شمال شرق نیریز) اشاره کرد. پس از آن با تغییر رژیم زمین‌ساختی و شروع فرورانش دست کم سه مرحله دگرگونی و دگرشکلی هم‌زمان با

ویژگی‌های زمین‌شناسی و رخدادهای زمین‌ساختی-دگرگونی کانسار مس جیان

کانسار مس جیان در لبه شرقی زون سنندج-سیرجان قرار دارد. بر اساس مطالعات موسیوند و همکاران (Mousivand et al., 2007)، ذخیره آن 6 میلیون تن با عیار میانگین 3 درصد مس، 0/5 درصد روی، 0/68 گرم در تن نقره و 0/5 گرم در تن طلا برآورد شده است. پاراژنز ماده معدنی شامل کلکوپیریت + پیروتیت + اسفالریت + پیریت ± گالن ± مارکازیت می‌باشد (Taghipour, 2000) (Liaghat and Taghipour, 2000). براساس پیشینه زمین‌دینامیکی زون سنندج-سیرجان، منطقه مورد مطالعه در زمان نئوپروتروزوئیک تا دونین یک

به‌منظور مطالعه ایزوتوپی کانیه‌های مس زون اکسیدی آب‌شوییده در کانسار مس جیان، نمونه‌برداری از کومه باطله صورت گرفت. نمونه‌های دیگری نیز از اعماق مختلف کانسار برداشته شد. این کانیه‌ها در نمونه دستی به رنگ سبز تا سبز-آبی و به شکل کلوخه دیده می‌شوند (شکل 3-A). از این میان، 4 نمونه برای بررسی تفکیک ایزوتوپی مس به‌روش MC-ICP-MS و کانی‌شناختی به روش XRD انتخاب و در دانشگاه Juniata آمریکا مورد تجزیه و بررسی قرار گرفت. در کانسار مس جیان، کانه‌زایی با رگه‌های کوارتز همراه است. به‌منظور مطالعه ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن، این رگه‌ها که شامل کوارتزهای کانه‌دار (نسل اول) و کوارتزهای فاقد کانه (نسل دوم) می‌باشند (شکل 3-B)، انتخاب و برای تجزیه به کشور استرالیا ارسال شد. اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپ‌های پایدار برای اکسیژن و هیدروژن نیز به‌ترتیب بر روی کوارتز ( $\delta^{18}\text{O}$ ) و هیدروژن ( $\delta\text{D}$ ) با دقت  $\pm 0/2$  قسمت در هزار (%) بر روی بیوتیت صورت گرفت. جدول 1، داده‌های حاصل از بررسی تغییرات ایزوتوپ‌های پایدار مس در کانسار مس جیان را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن، هیدروژن و مس نیز، در جدول 2 آورده شده است. آماده‌سازی و تجزیه و تحلیل کوارتز برای ایزوتوپ اکسیژن با استفاده از تکنیک‌های استاندارد که جزئیات آن توسط کلیتون و میدا (Clayton and Mayeda, 1963) ارائه شده، انجام شد. روشها استاندارد بوده و شبیه به کارهای انتشار یافته توسط فالیک و همکاران است (Fallick et al., 1987).

#### مطالعات کانی‌شناختی

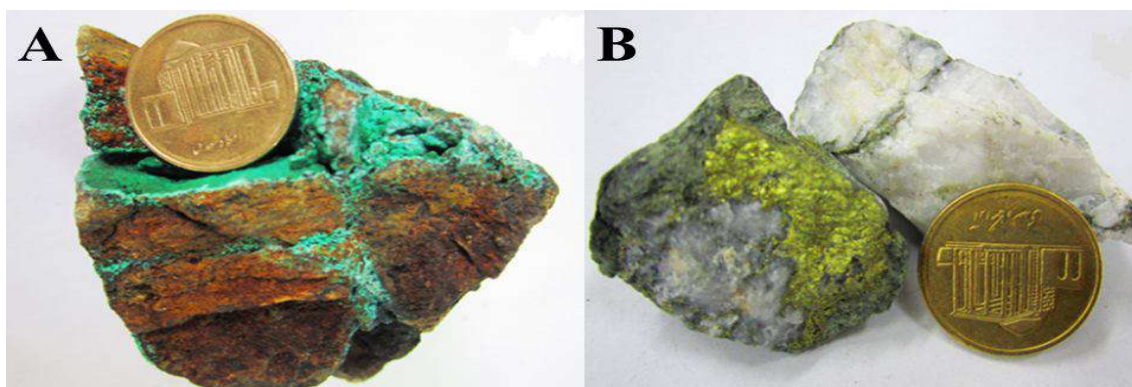
کانه‌زایی در توالی سوربان عمدتاً شامل کانسنگ‌های مس است، ولی مقداری روی، نقره، و مقدار ناچیزی سرب و طلا نیز آن را همراهی می‌کند. کانه‌زایی پاراژنز نسبتاً ساده‌ای دارد. در این کانسار، کانه‌زایی عمدتاً شامل پیریت (شکل 4-A)، کالکوپیریت (شکل 4-B) و مقدار کمتری اسفالریت (شکل 4-C)، پیروتیت (شکل 4-D) و مقادیر جزئی گالن (شکل 4-E)، کوبانیت و مس خالص (شکل 4-F) می‌شود. رگه‌های کوارتز شامل چند نسل متفاوت می‌باشند که بر اساس مطالعات پاراژنزی صورت گرفته، رگه‌های کوارتز کانه‌دار همزمان با کانه‌زایی تشکیل شده‌اند (Asadi et al., 2013).

فرورانش و ایجاد کمربندهای مزدوج و دگرگونی کوه‌زایی ناشی از برخورد (کرتاسه بالایی) در منطقه رخ داده است. پیشینه سن دگرگونی یا نخستین مرحله از رخداد دگرگونی با روش U-Pb در متاپلیت‌های منطقه چاه‌گز در جنوب شرق کانسار جیان  $175/7 \pm 1/7$  Ma ثبت گردیده است (Mousivand et al., 2007). کانه‌زایی مس با برتری کلکوپیریت در طول رگه‌های کوارتزی و یا به‌صورت افشان در سنگهای میزبان دگرگونی (کمپلکس آتشفشانی - رسوبی سوربان) رخ داده است. کمپلکس آتشفشانی - رسوبی سوربان با سن پرموتریاس بر روی کمپلکس آتشفشانی توتک (دونین) قرار گرفته و دارای 1800 متر ضخامت بوده و از پایین به بالا شامل چهار واحد: 1- متا کنگومرا و میکا شیست، 2- تناوب میکا شیست با سنگهای آتشفشانی دگرگون شده حد واسط تا بازیک، 3- میکاشیست، کردیریت هورنفلس شیست، کلریت شیست و شیل سیاه و 4- سنگهای زیر آتشفشانی دگرگون شده همراه با میکاشیست است (Mousivand et al., 2007). کانه‌زایی مس در گستره‌ای به طول 35 کیلومتر و در بخش بالایی واحد 2 و بخش پایینی واحد 4 این کمپلکس رخ داده است.

#### نمونه‌برداری و روش مطالعه

در کانسار جیان، زون گوسان در منطقه رخنمون داشته و اغلب با تشکیل کانیه‌های مالاکیت، آزوریت و تنوریت، همراه با اکسیدهای آهن قابل مشاهده است. تشکیل مالاکیت از سیالهای رقیق با غلظت اندکی از مس (نسبت به شرایط تشکیل آزوریت) و واکنش آنها با  $\text{CO}_2$  کربنات‌ها رخ داده است. گسترش زون اکسیدی در محدوده کانسار نشان‌دهنده حجم بالای سولفیدهای فرسایش یافته در بالای سطح فرسایش کنونی است. یکی از اصول اولیه در مطالعه چگونگی تشکیل یک ذخیره، بررسی‌های کانی‌شناختی، ساخت و بافت ماده معدنی و روابط پاراژنتیکی میان کانسنگ و کانیه‌هاست. بدین‌منظور، از ماده معدنی و سنگ میزبان، مقاطع نازک، صیقلی و دوبر صیقل تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت (15) مقطع صیقلی، 27 مقطع نازک و 5 مقطع دوبر صیقل که به‌علت توجه بیشتر به شیست‌های کانه‌دار و همچنین عدسیه‌های کوارتزی کانه‌دار، بیشترین تعداد نمونه از این واحدهاست.





شکل 3. A: نمونه کانیهای مس زون اکسیدی آب‌شویی در کانسار مس جیان (بوانات)، حاوی مالاکیت و کوارتز. B: نمونه کوارتزهای کانه‌دار (نسل اول)، همزمان با کانسار سازی و کوارتزهای فاقد کانه (نسل دوم).

**Fig. 3.** A: Samples of secondary copper minerals in the Jian copper deposit leached zone (Bavanat), containing malachite, and quartz. B: Ore-bearing quartz samples (first generation), simultaneous with non-mineralized quartz (second generation).

جدول 1. تغییر ترکیب ایزوتوپی کانیهای ثانویه مس (مالاکیت) در کانسار مس جیان.

**Table 1.** Variation of isotopic composition in secondary copper minerals (malachite) in the Jian copper deposit.

Nr.	Mineralogy	$\delta^{65}\text{Cu}$ (SRM976)‰	Depth
1	Malachite & Quartz	- 0.45	0-5
2	Malachite & Quartz	- 0.15	10
3	Malachite & Quartz	+ 0.19	25
4	Malachite & Quartz	+0.49	35

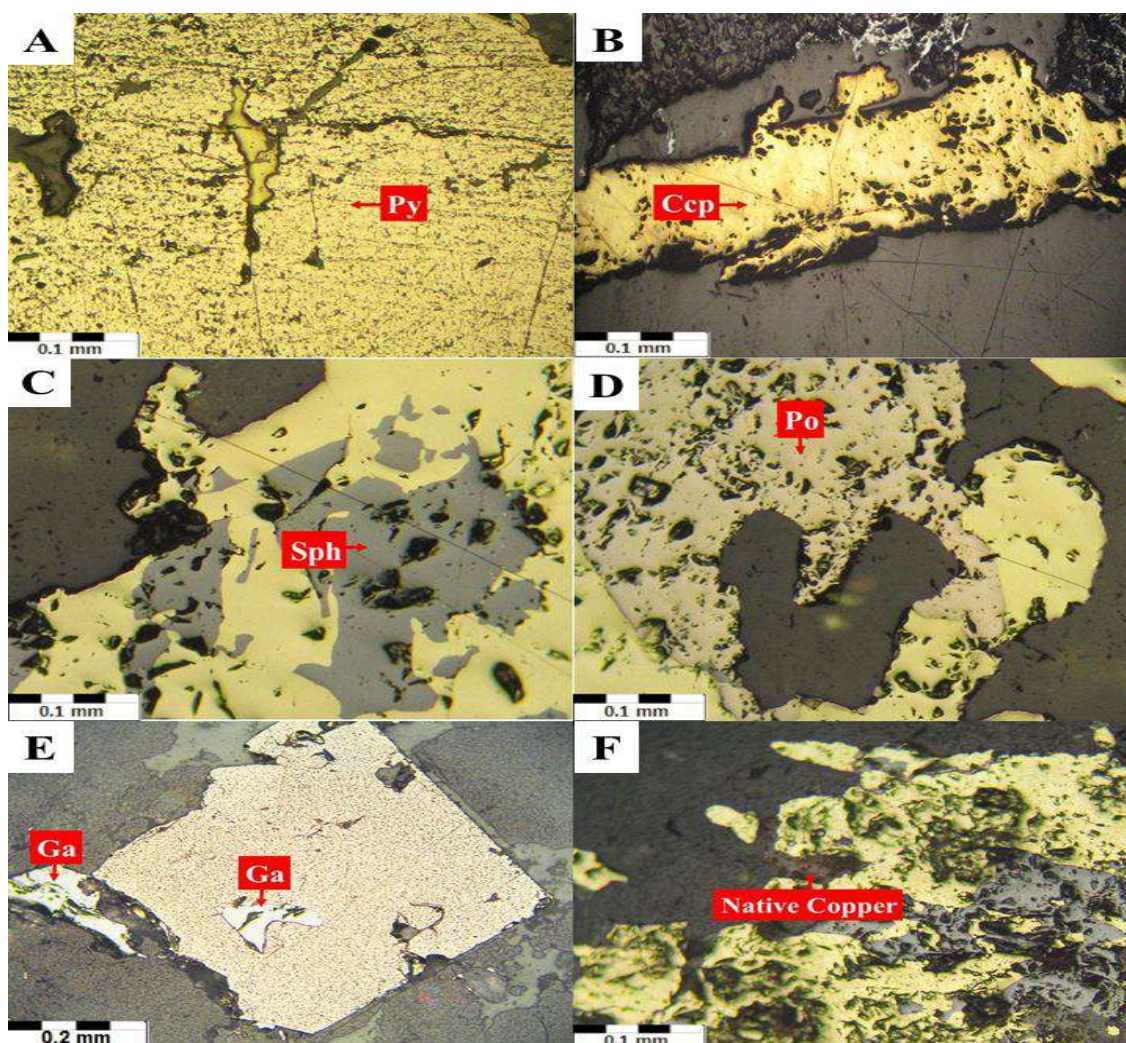
جدول 2. تغییر ترکیب ایزوتوپی اکسیژن (نمونه کوارتز) و هیدروژن (کانی بیوتیت) رگه‌های کوارتز (نوع A و B) در کانسار مس جیان (Asadi et al., 2013). مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  سیال برای نمونه‌های کوارتز نوع A از معادله  $1000\ln\alpha_{\text{quartz-fluid}} = 3.34(106/T2) - 3.31$  (Matsuhisa et al., 1979) و برای نمونه‌های کوارتز نوع B با استفاده از معادله  $1000\ln\alpha_{\text{quartz-fluid}} = 3.306(106/T2) - 2.71$  (Zhang et al., 1989) محاسبه شده است. نمونه‌های بیوتیت به دلیل دارا بودن آب در ساختار کانیایی نیاز به تصحیح ندارند (Anderson et al., 2004).

**Table 2.** The  $\delta^{18}\text{O}$  (quartz samples) and  $\delta\text{D}$  (biotite mineral) values from different quartz veins (A and B type) at the Jian deposit (Asadi et al., 2013). The  $\delta^{18}\text{O}$  fluid values for quartz samples vein-type A were calculated using the equation:  $1000\ln\alpha_{\text{quartz-fluid}} = 3.34(106/T2) - 3.31$  (Matsuhisa et al., 1979) and for quartz samples vein-type B were calculated using the equation:  $1000\ln\alpha_{\text{quartz-fluid}} = 3.306(106/T2) - 2.71$  (Zhang et al., 1989). Biotite samples need not to be corrected due to water in the mineral structure (Anderson et al., 2004).

Sample type	$\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}}$ V-SMOW (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}^{\text{a}}$ V-SMOW(‰)	$1000\ln\alpha^{\text{b}}$	$\delta\text{D}_{\text{biotite}}$ V-SMOW (‰)	Mean $T_{\text{h}}$ (°C)
vein-type A	+ 15.8	+ 8.9	6.9	- 33.1	312
vein-type A	+ 15.9	+ 7.6	8.3	- 41.2	275
vein-type A	+ 18.4	+ 10.7	7.7	- 38.5	290
vein-type B	+ 17.9	+ 5.1	12.8	- 53.9	188
vein-type B	+ 16.6	+ 4.7	11.9	- 52.3	202

سامانه برگ‌وارگی  $S_1$  و  $S_2$  در منطقه معرفی شده است. برگ‌وارگی  $S_1$  در اکثر سنگهای منطقه به‌وفور دیده می‌شود بر اثر فاز دگرشکلی  $D_1$  شکل گرفته است. این فاز براساس مطالعات شیخ‌الاسلامی و همکاران (Sheikhholeslami et al., 2008) مقارن با پیشینه فاز دگرشکلی در منطقه و همزمان با کوه‌زایی کیمرین اولیه (تریاس بالایی) رخ داده است. برگ‌وارگی  $S_2$  به‌صورت کلیواژ کنگره‌ای<sup>1</sup> در شیست‌های منطقه به‌خوبی توسعه یافته است. کانه‌زایی در کمپلکس سوریان بیشتر از روند برگ‌وارگی شیست‌ها و به موازات فاز  $S_2$  تبعیت می‌کند.

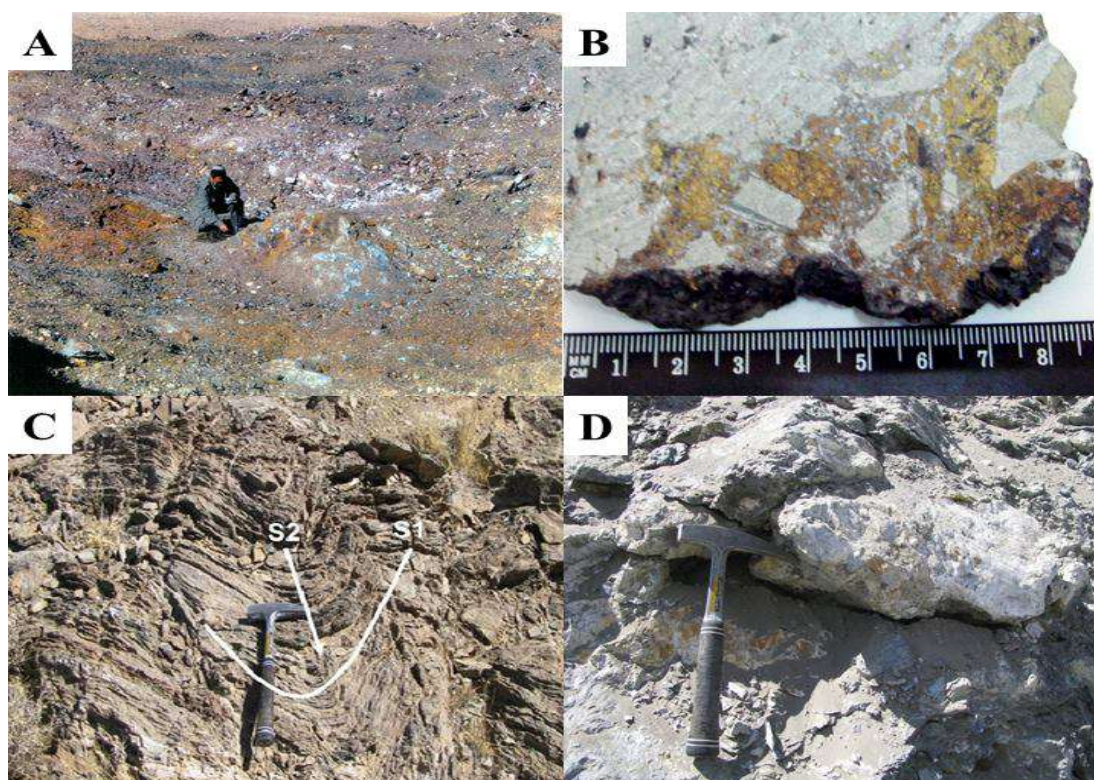
مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن بر روی این نسل از رگه‌های کوارتز انجام شده است. وجود ساختهای شبه گوسان (شکل 5-A)، پرشی (شکل 5-B)، برگ‌وارگی، چین‌خوردگی (شکل 5-C) و رگه‌ای-رگه‌چهای (شکل 5-D) در محدوده کانسار و درون حفره اصلی معدن، نشان‌دهنده کانه‌زایی ثانویه است. در بین شیست‌ها، عدسیه‌های کوارتزی وجود دارد که در شکستگی‌های آنها رگه‌چهای حاوی کانه‌های مس دیده می‌شود (al., 2011 Moore et). ضخامت رگه‌های کوارتز در منطقه از چند سانتی‌متر تا یک متر و در محدوده کانسار مس جیان تا چند متر هم می‌رسد. بر اساس مطالعات سرکاری‌نژاد (Sarkarinejad, 2007)، دو



شکل 4. کانیهای فلزی بر اساس فراوانی در کانسار مس جیان: A: پیریت (Py)، B: کالکوپیریت (Ccp)، C: اسفالریت (Sph)، D: پیرویت (Po)، E: گالن (Ga)، F: مس خالص (Native Copper)

**Fig. 4.** Metallic minerals based on abundance in the Jian copper deposit (A: Pyrite, B: Chalcopyrite, C: Sphalerite, D: Pyrrhotite, E: Galena, and F: Native Copper)





شکل 5. ساختهای نشان‌دهنده کان‌زایی ثانویه در کانسار مس جیان (A: ساخت شبه گوسان، B: ساخت برشی، C: برگ‌وارگی و چین‌خوردگی، D: ساخت رگه‌ای و رگه‌چهای کوارتزهای هم‌زمان با کان‌زایی).

**Fig. 5.** The structures that show secondary mineralization in Jian copper deposit (A: Formation of pseudo-gossan, B: shearing, C: Foliation and folding, D: Formation of parallel quartz veins and veinlets with mineralization).

#### مطالعات بافتی

##### بافتهای موجود در کان‌های حاصل از فرآیند دگرگونی

در بررسی میکروسکوپی نور انعکاسی، به‌ویژه مطالعه کان‌ها، شناسایی و تفسیر روابط بین دانه‌ها (بافت)، به‌همان اندازه مهم است که شناسایی کان‌ها اهمیت دارد. شناسایی بافت کان‌ها در موارد زیر کاربرد دارند: (Liaghat and Jami, 1999)

1- مشخص کردن ماهیت فرآیندهای درگیر در نهشته‌شدن کان‌ها.

2- مشخص کردن رخداد‌های ثانویه مانند برقراری تعادل دوباره، هوازدگی، اکسایش و سیمانی شدن.

اسپری (Spry, 1969)، مرجع مناسبی برای مطالعه گسترده انواع بافتهای دگرگونی است. بسیاری از ذخایر بر اثر فرآیندهای دگرگونی تشکیل شده‌اند ولی شمار زیادی نیز تحت تأثیر دگرسانی ناشی از عملکرد دگرگونی قرار گرفته‌اند. آثار دگرگونی بیشتر وابسته به نوع کان اولیه پیش از دگرگونی است. بافتهای حاصل نیز به ساختارهای اولیه و میزان تأثیر

فرآیند دگرگونی بستگی دارد.

##### اثر دگرگونی دینامیک<sup>1</sup>

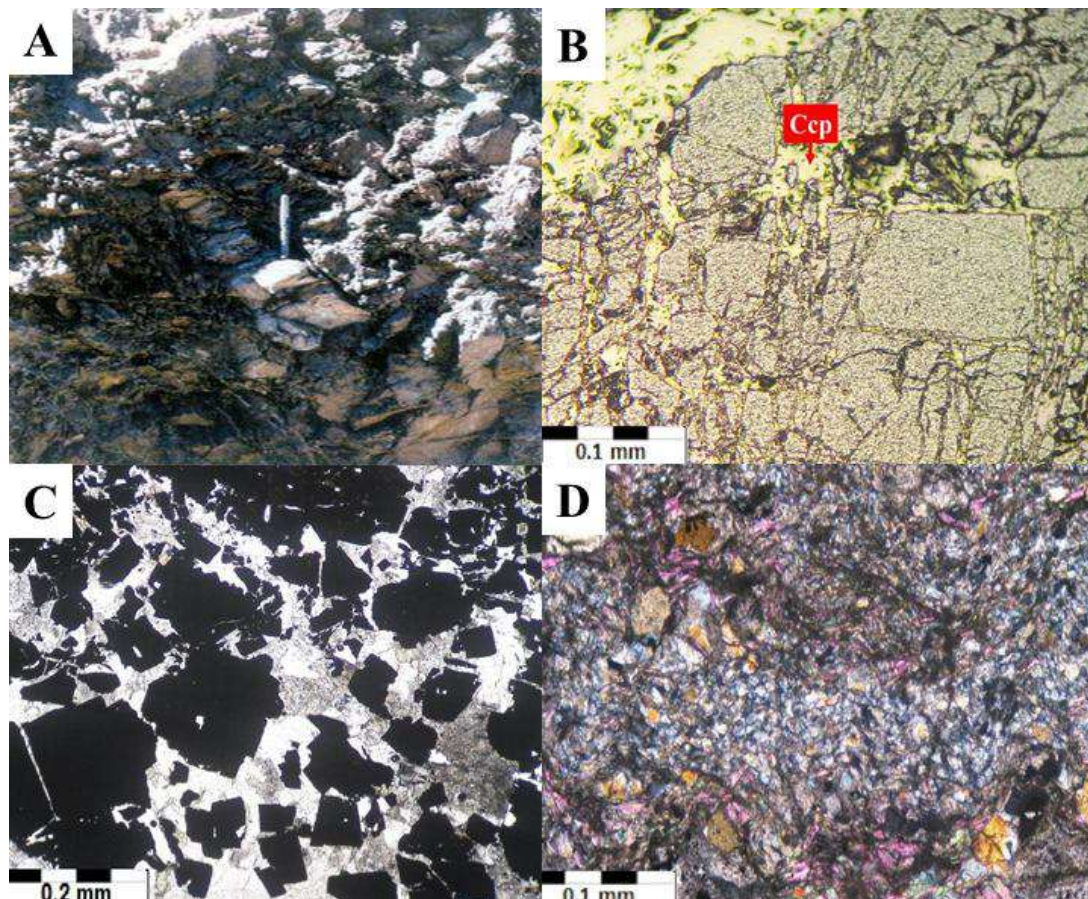
بافتهایی چون بودیناژ در رگه‌های کوارتزی (شکل 6- A) نشان‌دهنده اثر فرآیندهای دینامیکی است. اثر این تیپ دگرگونی در شکستگیها و یا کان‌های شکننده‌ای آشکار می‌شود که تبلور مجدد یافته، یا بر اثر شکل‌پذیری در کانیهایی نرم‌تر پدیدار شده‌اند. نتیجه آمیخته شدن دو پدیده بالا احتمالاً زمانی پدیدار می‌شود که کانیهایی شکل‌پذیر شکستگیهای کانیهایی شکننده را پر می‌کنند. سولفیدهای شکل‌پذیر احتمالاً در اثر فشارهای وارده در امتداد سطوح رخ یا درون مناطق نسبتاً کم فشار قرار می‌گیرند (شکل 6- B). در چنین شرایطی نمی‌توان توالی پاراژنزی را به‌کار برد (Liaghat and Jami, 1999). علاوه بر این، بافت برشی (شکل 6- C) و شیستوزیته و چین‌خوردگی (شکل 6- D) در مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی، دوقلوپیهایی دگرشکلی،

1. Dynamic metamorphic effects



که بیشتر آنها در کنسار جیان مشاهده گردید.

آثار رخهای انحنادار، نوارهای شکنجی، خاموشی موجی و میانبارهای جهت‌یافته از دیگر علایم دگرگونی دینامیکی است



شکل 6. اثرات دگرگونی دینامیکی در کنسار مس جیان (A: بودیناژ در رگه‌های کوارتزی، B: پرشدگی رگه‌های پیریت به‌وسیله کالکوپیریت (Ccp)، C: بافت پرشی در نور عبوری، D: شیستوزیته و چین‌خوردگی در مقیاس میکروسکوپی).

**Fig. 6.** The effects of dynamic metamorphism in Jian copper deposit (A=filling of pyrite fracture by chalcopyrite veins, B=Boudinage in quartz veins, C=Schistosity and folding in microscopic scale, D=Shear texture in transmitted light).

بافتهای حاصل، به درجه دگرگونی بستگی دارد. در درجه‌های پایین، کانیهایی که دیرگداز هستند متأثر نمی‌شوند و کانه‌های دماپایین نیز دچار تبلور مجدد می‌شوند. با افزایش درجه دگرگونی، برخی کانیهای مقاوم مقداری از اجزای متحرک (گوگرد) خود را از دست داده، اکسید شده و به‌طور کلی به شکل کاذب تبلور مجدد پیدا می‌کنند (Liaghat and Jami, 1999). پیریت گسترده‌ترین و فراوانترین کانی سولفیدی در پوسته زمین است، و به‌طور معمول فاز اپاک اولیه در نهشته‌های معدنی را تشکیل می‌دهد. بنابراین فهم رفتار و ارتباط آن با پیریت در ذخایر سولفیدی دگرگون شده دارای یافته‌های گوناگونی است (McClay and Ellis, 1984; Cook,)

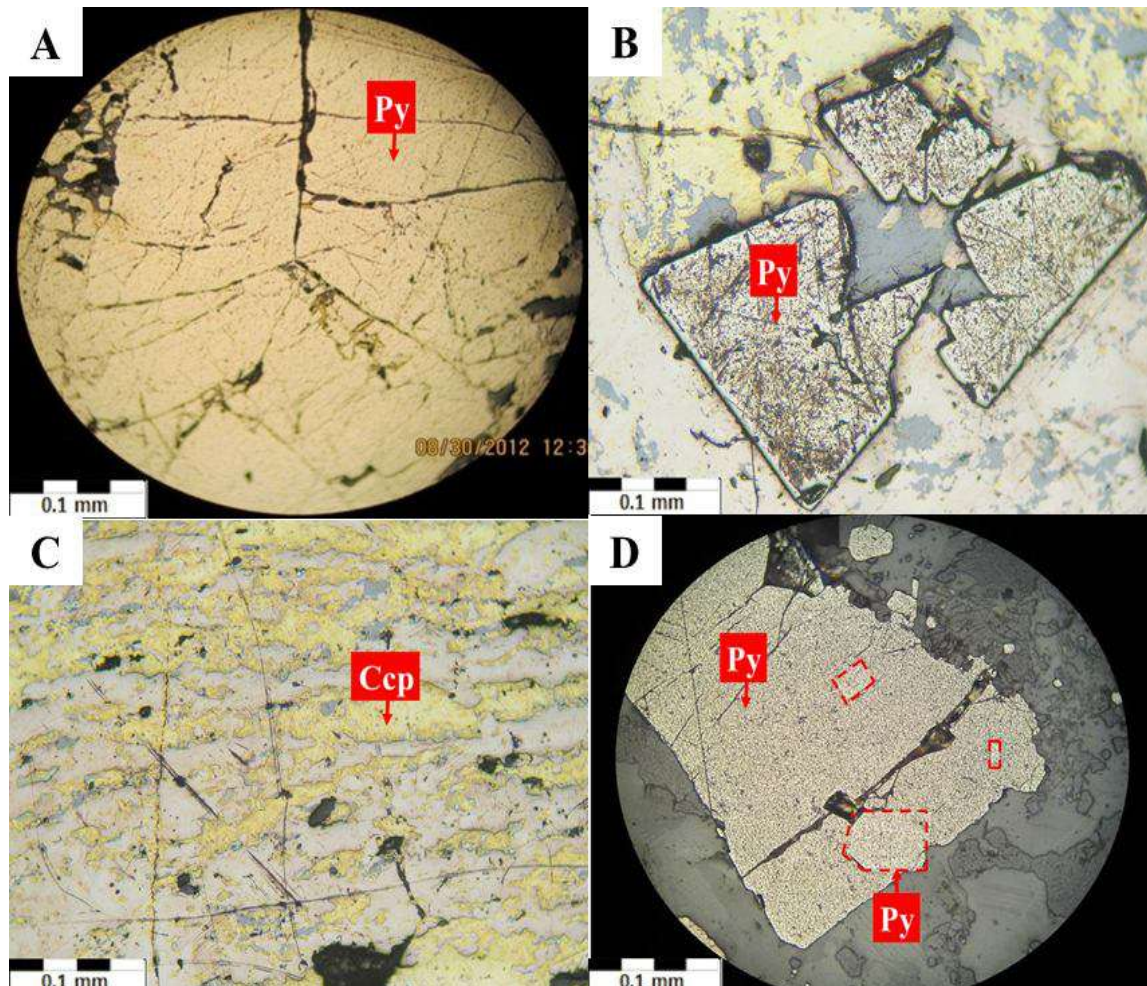
#### اثر دگرگونی گرمایی

احتمال دارد که کانه‌ها ابتدا تحت تأثیر دگرگونی دینامیکی واقع شده باشند. اثرهای دگرگونی گرمایی ممکن است باعث رشد دوباره دانه‌ها، پیدایش سه گوشه‌هایی با زاویه 120 درجه (بافت پیوستگاه سه‌گانه) در مجموعه‌های تک‌کانه‌ای (شکل A-7) و تبلورپذیری مجدد در امتداد حاشیه دانه‌های اولیه شود. تشکیل شکفته بلورها (شکل B-7)، جهت‌یابی جریان کالکوپیریت (شکل C-7) و رورشدی پیریت بر روی پیریت (شکل D-7) نیز از اثرهای دگرگونی گرمایی است که در مقاطع صیقلی مشاهده گردید.



دگرگونی می‌شود (Scott et al., 1971). مقاومت بیشتر پیریت عامل رفتار دیرگداز بودن آن طی دگرگونی است. این کانی در تمام سنگها با درجه‌های مختلف دگرگونی دیده می‌شود و از درجه شیست‌سبز تا آمفیبولیت همچنان پایدار می‌ماند (Stanton, 1972).

(1994). فازهای همراه در دگرگونی سنگهای پیریت‌دار برای تفسیر نحوه تشکیل و تحولات پسا رسوبی آنها ضروری است (Craigie et al., 1998). دگرگونی معمولاً بافت‌های اولیه را از بین می‌برد ولی مطالعات اخیر نشان داده است که ماهیت دیرگدازی پیریت باعث حفظ شدن بعضی از بافت‌های پیش از



شکل 7. اثرات دگرگونی گرمایی در کانسار مس جیان (پیریت؛ (Py)، کالکوپیریت؛ (CCp)) (A: بافت پیوستگاه سه‌گانه، B: تشکیل شکفته بلور یا پورفیروبلست‌ها، C: جهت‌یابی جریان کالکوپیریت، D: بافت تعادل مجدد: رورشدی پیریت بر روی پیریت).

**Fig. 7.** The effects of thermal metamorphism in Jian copper deposit (A= triple junction texture, B= formation of porphyroblast crystal, C= flow orientation texture in chalcopyrite, D= re-equilibrium texture: overgrowth of pyrite on pyrite).

تقسیم یا جدایش ایزوتوپ‌ها بین مواد مختلف، و یا فازهای مختلف یک ماده است که این نسبتها در بسیاری از محیط‌های زمین‌شناختی، مشخص و تعریف شده است، و در شناسایی خاستگاه سیال کانه‌زا، دمای کانی‌سازی و شرایط فیزیکی و

#### مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار

اساس استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار در مطالعات زمین‌شناختی، رخداد پدیده تفکیک ایزوتوپی بین ایزوتوپ‌های پایدار یک عنصر است. مفهوم تفکیک ایزوتوپی،

میزان بارش سالانه زیاد باشد تا سیال اکسیدی با محتوای بالای  $^{65}\text{Cu}$  بتواند به آسانی به سمت عمق مهاجرت کند (Haest et al., 2009).

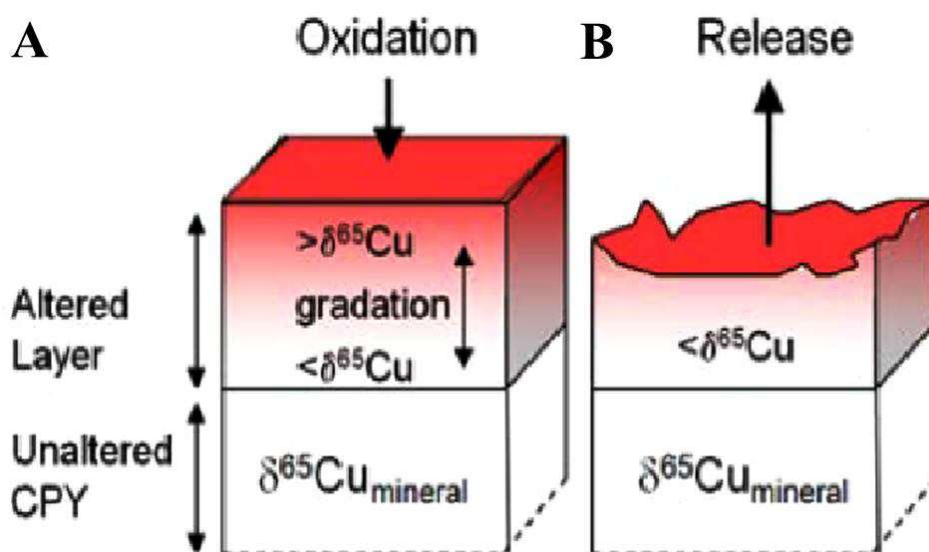
بر این اساس می‌توان گفت که در منطقه جیان با وجود عملکرد فرآیندهای زمین‌ساختی، نبود سایر عوامل مانند بارندگی زیاد و نبود زون نفوذپذیر، مانع از تأثیر شدید فرآیند هوازدگی بر روی این کانسار شده است. نفوذپذیری اندک سنگهای منطقه می‌تواند در ارتباط با فرآیندهای دگرگونی باشد که سنگ مادر اولیه مافیک و رسوبی را دگرگون کرده‌اند. هرچه تغییرات ایزوتوپی مس در زون اکسیدی آب‌شوییده بیشتر باشد نشان‌دهنده تأثیر بیشتر فرآیندهای سطحی در فرآیند غنی‌شدگی سطحی‌زاد است و برعکس. داده‌های تجزیه‌ای کانیهای سطحی در کانسار مس جیان نشان می‌دهد که تغییرات ایزوتوپی مس در زون اکسیدی آب‌شوییده این کانسار بسیار کم است. این موضوع به‌طور کامل با ذخایر مس در تضاد بوده و نشان‌دهنده بی‌اثر بودن فرآیند آب‌شویی بر روی این کانسار است. در این باره می‌توان گفت که کانی‌سازی مس در عمق، اولیه بوده و آب‌شویی سطحی و فرآیند غنی‌شدگی سطحی‌زاد اندک بوده است.

مطالعات صورت گرفته توسط ماتور و همکاران (Mathur et al., 2009; Mathur et al., 2005) بر روی بسیاری از ذخایر مس در دنیا نشان می‌دهد که، زون ژرف‌زاد<sup>3</sup> با منشأ اولیه، تفکیک ایزوتوپی کمی از مس را نشان می‌دهد (1- تا +1) در حالی که کانیهای مس زون سطحی‌زاد مقادیر مثبت و کانیهای مس زون اکسیدی آب‌شوییده مقادیر منفی را نشان می‌دهد (شکل‌های 9 و 10). این موضوع کاملاً با تأثیر و نقش سیالات جوی در تشکیل این نوع ذخایر سازگار است. تغییرات ایزوتوپ مس نسبت به عمق در ملاکیت‌های کانسار مس جیان، نشان می‌دهد که هرچه به سمت عمق حرکت می‌کنیم تغییرات ایزوتوپی از منفی (برای ملاکیت‌های کم عمق‌تر) به مثبت (برای ملاکیت‌های با عمق بیشتر) تغییر می‌کند. مقادیر منفی در ارتباط با ناچیز بودن آب‌شویی ملاکیت‌های موجود در سطح و عمق کم است، در حالی که افزایش این مقدار به سمت عمق نشان‌دهنده نزدیک شدن تغییرات به سیال با منشأ اولیه است (شکل 11).

شیمیایی نهشت کانسنگ کاربرد دارد (Hoefs, 2009). مطالعه زمین‌شیمیایی ایزوتوپ‌های پایدار، در سال 1947 با مقاله کلاسیک یوری<sup>1</sup> در مورد ویژگیهای ترمودینامیکی ایزوتوپ‌ها، و نیز توسط نایر<sup>2</sup> با ساختن طیف‌سنج جرمی، آغاز شد (Alirezaei, 2009). بزرگی تفکیک ایزوتوپی به چند عامل مهم به‌ویژه مشارکت واکنش‌های اکسایش - کاهش و واکنشهایی که با حضور عوامل زیست‌شناختی رخ می‌دهند، بستگی دارد.

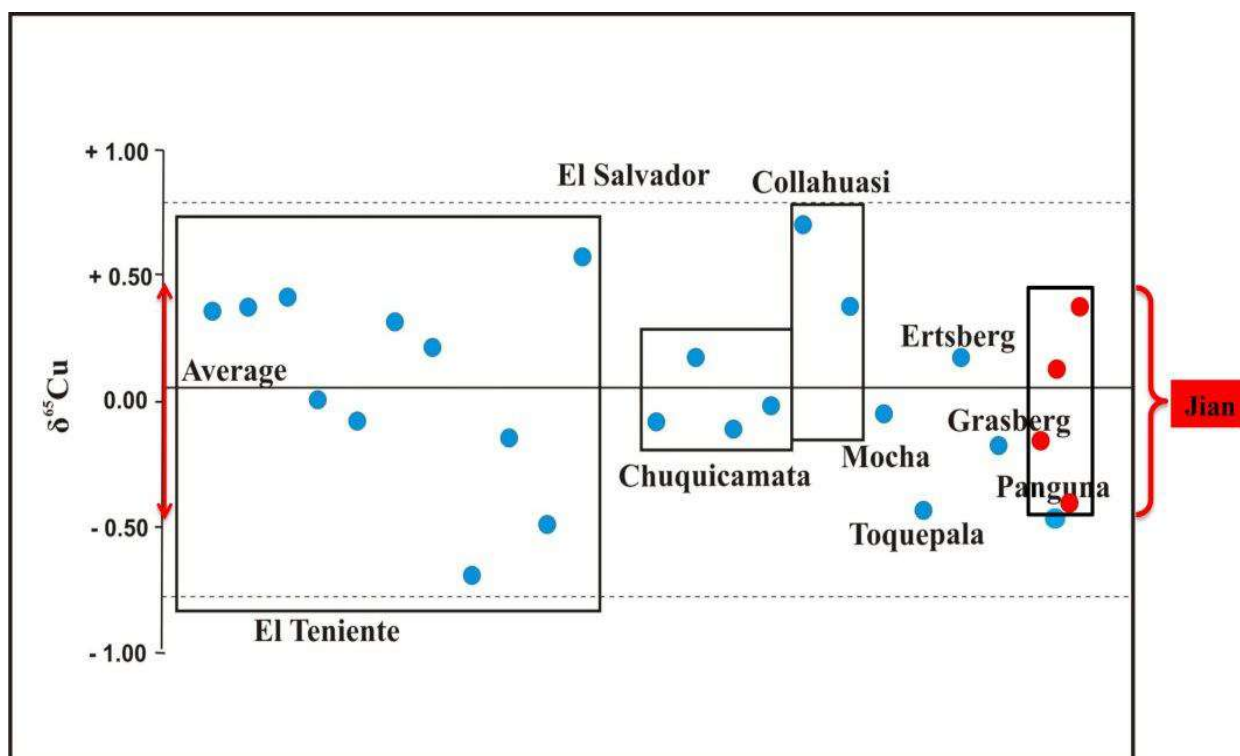
در این بخش، با توجه به این‌که تجزیه ایزوتوپی مس بر روی ملاکیت‌های زون اکسیدان صورت گرفته، شرایط تشکیل این کانی را مورد بررسی قرار داده و نتایج حاصل از بررسی تغییرات ایزوتوپ‌های پایدار مس، اکسیژن و هیدروژن را شرح می‌دهیم. کانسارهای مس غنی از سولفید، در صورتی که در سطح زمین رخنمون داشته باشند، کانیهای پیریت، کالکوپیریت و بورنیت در اثر فرآیند هوازدگی، اکسید شده و زون غنی از آهن را تشکیل می‌دهد. سولفید به سولفات اکسید شده و به کاهش pH آب منجر می‌شود. غلظت مس حل شده در آب در زون اکسیدی تابع pH است. بسیاری از محققان بر این باورند که تفکیک ایزوتوپی مس بر اثر واکنش‌های کاهشی در سامانه‌های طبیعی رخ می‌دهد (Walker et al., 1958). واکنش کاهشی بین  $\text{Cu}^+$  و  $\text{Cu}^{2+}$  فرآیند اصلی مسؤل تفکیک ایزوتوپ‌های مس در طبیعت است (Ehrlich et al., 2004). در زیر مدلی از چگونگی تغییرات ایزوتوپ مس طی فرآیند اکسایش سولفیدهای اولیه (کالکوپیریت)، نشان داده شده است که در آن ایزوتوپ‌های سنگین طی فرآیند اکسایش از کانیهای سولفیدی اولیه که در سطح قرار دارند شسته شده و در مناطق عمقی‌تر با شرایط کاهشی رسوب می‌کنند. در این فرآیند ایزوتوپ‌های سنگین و سبک مس تفکیک می‌شوند (شکل 8-A). طی این فرآیند، بخشی از آبهای حامل ایزوتوپ سنگین مس نیز وارد چرخه آبهای سطحی می‌شود که این موضوع از نظر اکتشافات زمین‌شیمیایی اهمیت دارد (شکل 8-B). تأثیر فرآیند‌های غنی‌شدگی سطحی‌زاد و هوازدگی بر روی تغییرات ایزوتوپی مس، بین کانیهای سطحی و عمقی یک کانسار، بیشتر در مناطقی دیده می‌شود که میزان شکستگی و عملکرد فرآیندهای زمین‌ساختی (ایجاد زون نفوذپذیر) و همچنین





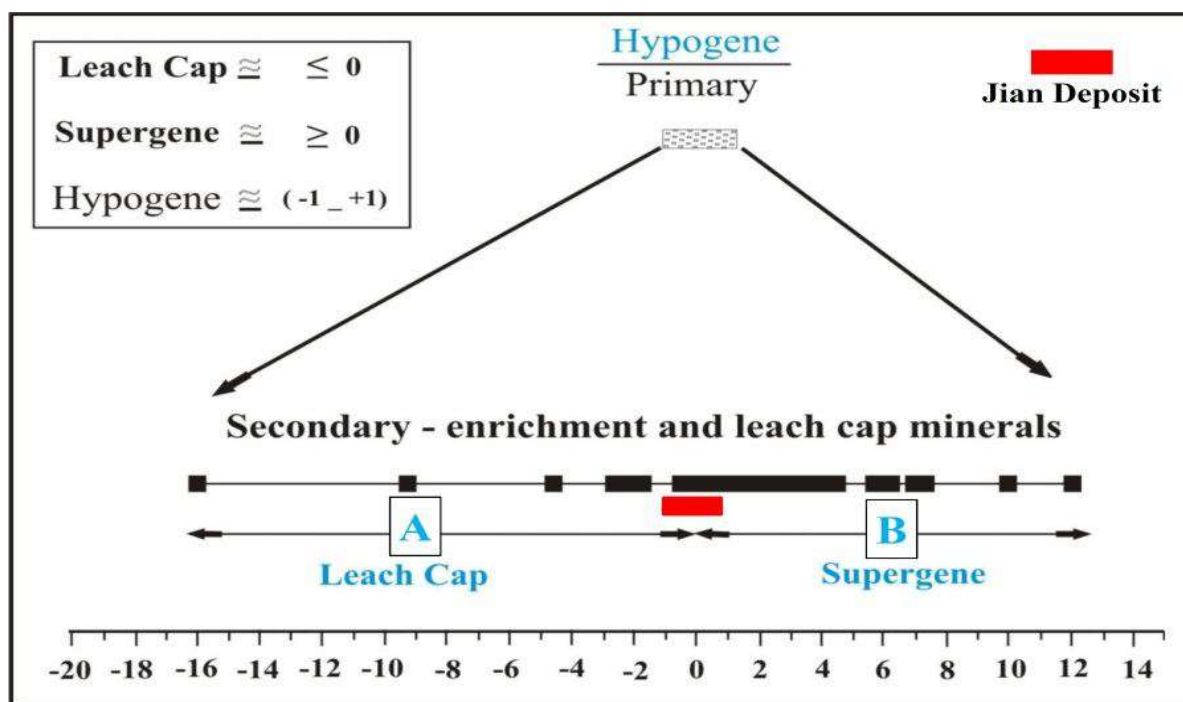
شکل 8. مدل تفکیک ایزوتوپی مس طی اکسایش کالکوپیریت (CPY)، (Borrah et al., 2012). A: اکسایش Cu(I) به Cu(II) در کانیهای سطح B: رها شدن مس به درون محلول و تهی‌شدگی در مناطق سطحی.

**Fig. 8.** Schematic model for copper isotope fractionation during chalcopyrite oxidation (chalcopyrite = CPY), (Borrah et al., 2012). A: oxidation of Cu (I) to Cu (II) at the surface mineral, B: liberation of copper into solution and depletion from surface areas.



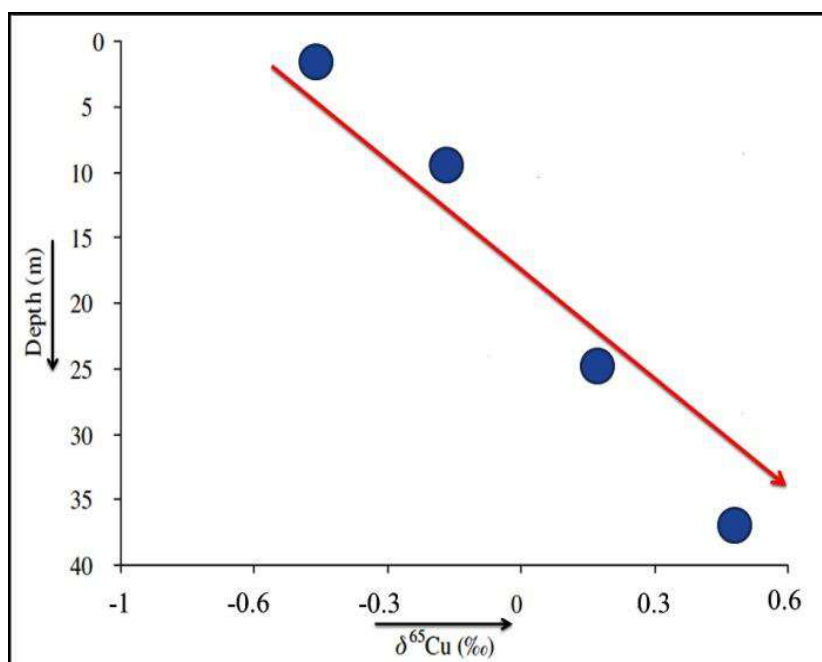
شکل 9. تغییرات ایزوتوپ‌های پایدار مس زون ژرف‌زاد در ذخایر مس (Mathur et al., 2005) و کانسار مس جیان.

**Fig. 9.** The design of stable isotope changes in the hypogene zone of porphyry copper deposits (Mathur et al., 2005).



شکل 10. تغییرات کلی نسبت ایزوتوپ‌های مس در ذخایر مس (Mathur et al., 2009). A: مقادیر منفی تغییرات ایزوتوپی مس در زون اکسیدی آب‌شوییده ذخایر مس. B: مقادیر مثبت تغییرات ایزوتوپی مس در زون سطحی‌زاد ذخایر مس.

**Fig. 10.** Cu isotope fractionation in the different parts of copper porphyry deposits such as Butte- Montana USA, Silver Bell- AZ USA, Collahuasi- Rosario-chile, Collahuasi- Ujina- Chile, Chuquicamata- Chile, Bisbee- Arizona USA, Escondida- Chile and El Salvador- Chile (Mathur et al., 2009).



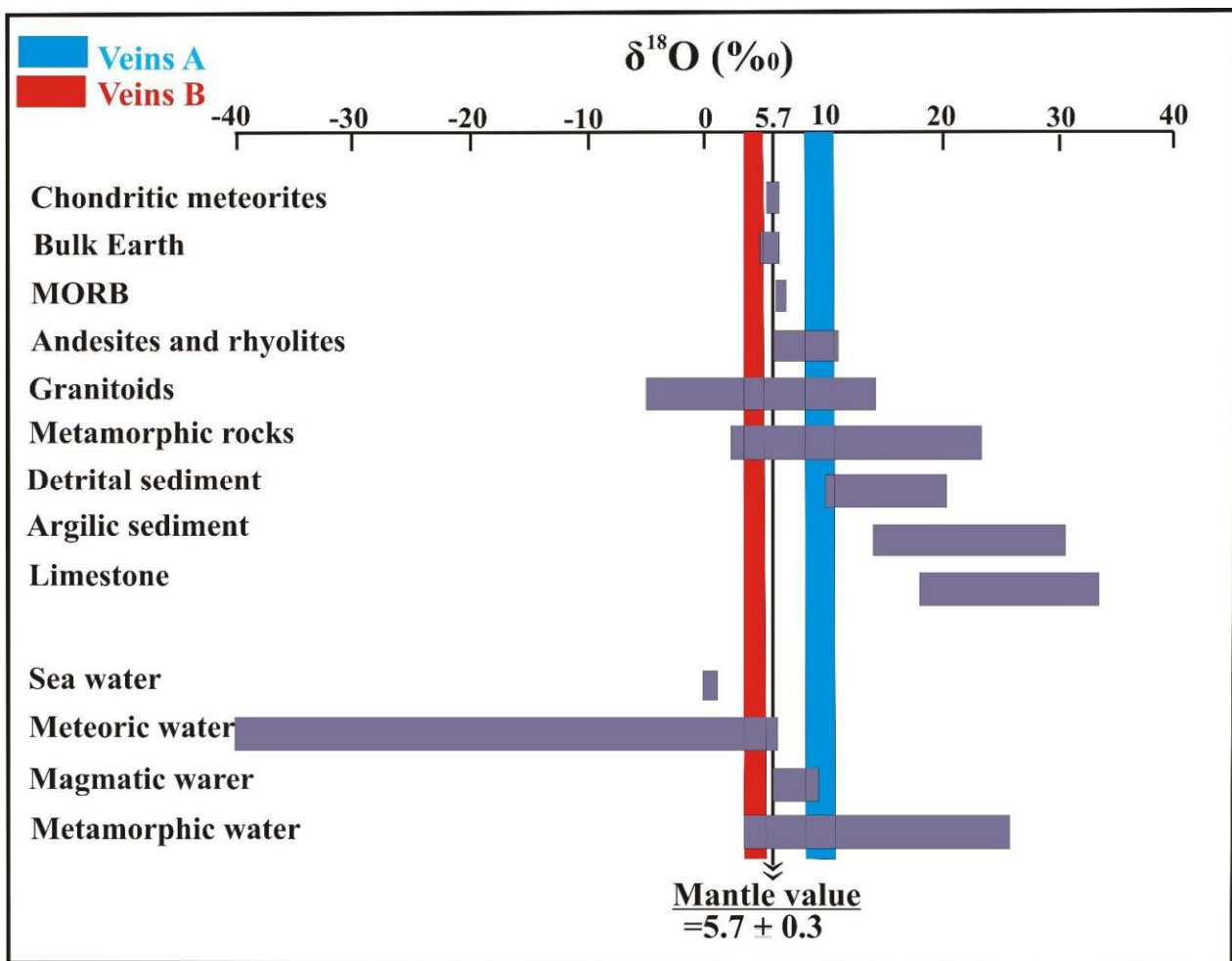
شکل 11. تغییرات  $\delta^{65}\text{Cu}$  کانیه‌های ثانویه مس نسبت به عمق در کانسار مس جیان.

**Fig. 11.** Copper isotope variations in secondary Cu minerals (malachite) of the Jian copper deposit toward the depth.



گوشته‌ای از  $\delta^{18}\text{O}$  غنی شده‌اند، درحالی‌که آب دریا و آب‌های جوی تهی شده‌اند. در کانسار مس جیان، تغییرات  $\delta^{18}\text{O}$  از  $+7/6$  تا  $+10/7$  قسمت در هزار در کوارتز کالکوپیریت‌دار و از  $+4/7$  تا  $+5/1$  قسمت در هزار در کوارتز روتیل دار تغییر می‌کند و نشان می‌دهد که هر دو نوع نمونه، در محدوده سنگ‌های دگرگونی قرار می‌گیرند (شکل 12).

ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن نسبت به استاندارد میانگین آب اقیانوس<sup>1</sup> سنجیده شده و با  $\delta\text{D}$  و  $\delta^{18}\text{O}$  نشان داده می‌شود. از این ایزوتوپ‌های پایدار برای تعیین منشأ سیال کانه‌زا و روند تکامل سیالات گرمایی استفاده می‌شود. مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  در طبیعت تا حدود 100% تغییر می‌کند که حدود نیمی از این گستره در آب‌های جوی است. بیشتر گرانیته‌ها، سنگ‌های دگرگونی، و رسوبات نسبت به مقادیر



شکل 12. مقایسه تغییرات  $\delta^{18}\text{O}$  مخازن طبیعی ایزوتوپ اکسیژن (Rollinson, 1993)، با داده‌های حاصل از کانسار مس جیان.

**Fig. 12.** Comparison of oxygen isotope changes ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in natural reservoirs (Rollinson, 1993) with data from Jian copper deposit.

هیدروژن، نتایج حاصل از ایزوتوپ اکسیژن را تأیید می‌کند. با توجه به تغییرات داده‌های ایزوتوپی پایدار، این سیال میانه‌دمایی<sup>2</sup> براساس نمودار اوانز (Evans, 1997) در گروه سیالات نوع دگرگونی قرار می‌گیرد (شکل 14). هرچند که تقریباً 90 درصد نمونه‌ها در گروه سیالات دگرگونی جای

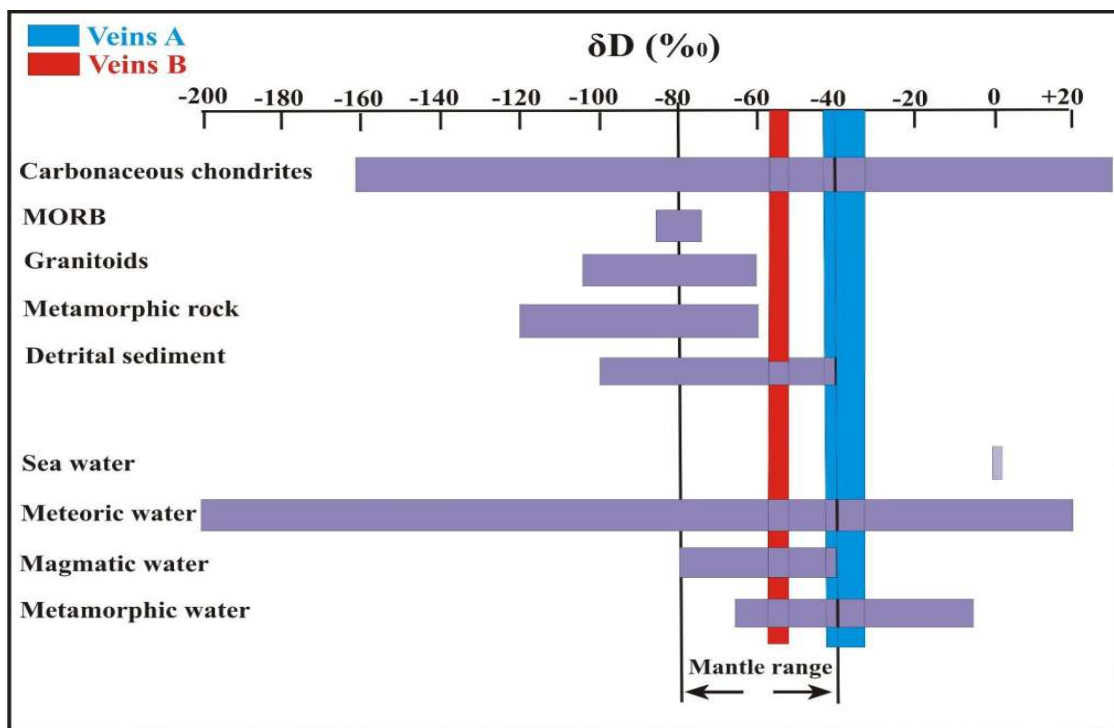
در شکل 13، خلاصه‌ای از مقادیر  $\delta\text{D}$  برای انواع رایج سنگ و آب ارائه شده است. مقادیر گوشته معمولاً در گستره -40 تا -80 تغییر می‌کند. تغییرات  $\delta\text{D}$  حاصل از تجزیه ایزوتوپی سیالات موجود در رگه‌های کوارتز موجود در کانسار مس جیان و مقایسه آن با تغییرات  $\delta\text{D}$  در مخازن طبیعی ایزوتوپ

<sup>1</sup>. SMOW

<sup>2</sup>. mesothermal

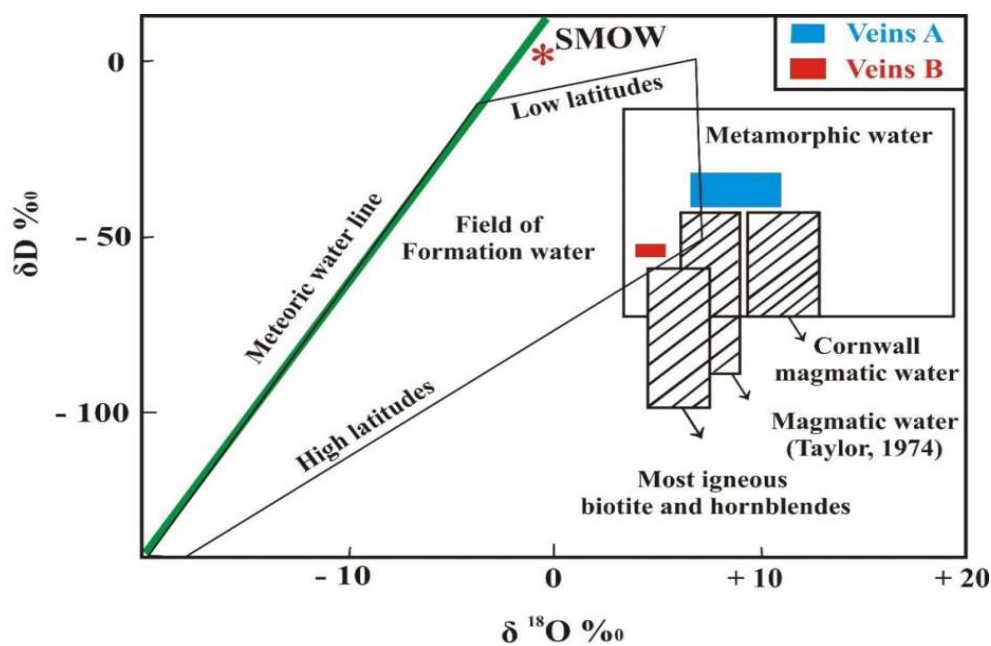
کالکوپیریت و کوارتز روتیل نشان می‌دهد (شکل 15).

می‌گیرند اما داماسنجی با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن دو گستره متفاوت را برای تشکیل رگه‌های کوارتز



شکل 13. مقایسه تغییرات δD مخازن طبیعی ایزوتوپ هیدروژن (Rollinson, 1993)، با داده‌های حاصل از کانسار مس جیان.

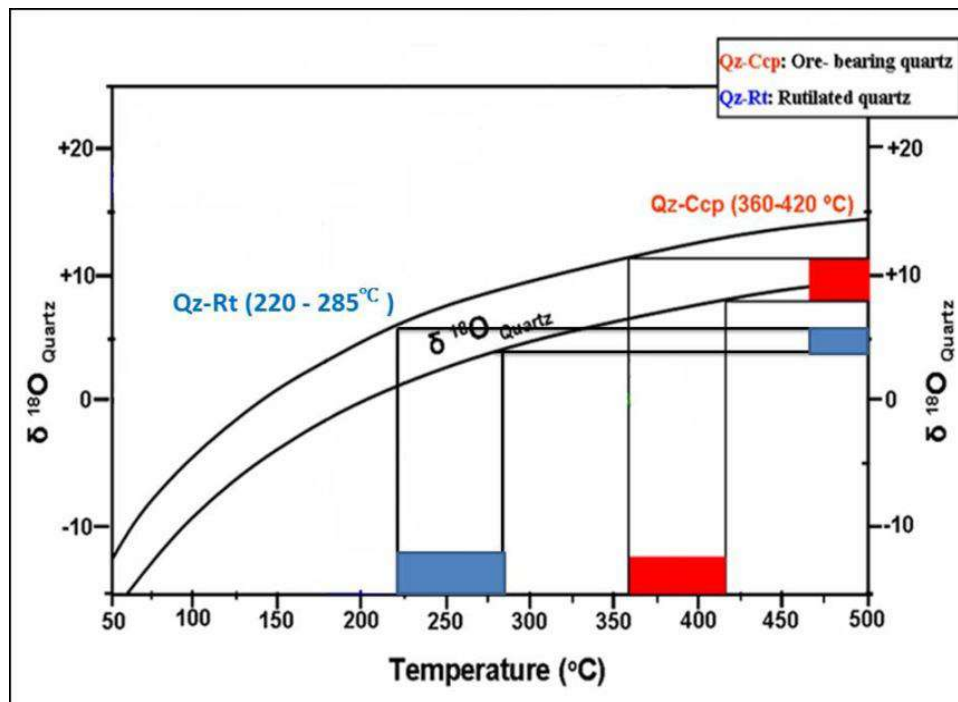
Fig. 13. Comparison of hydrogen isotope changes (δD) in natural reservoirs (Rollinson, 1993) with data from Jian copper deposit.



شکل 14. نمودار تعیین منشأ δ<sup>18</sup>O در مقابل δD، نمودار اقتباس از اوانز (Evans, 1997)

Fig. 14. Diagram of δ<sup>18</sup>O vs. δD to determine the origin of fluids (Figure adapted from Evans, 1997).





شکل 15. دماسنجی با استفاده از تغییرات  $\delta^{18}\text{O}$ ، نمودار اقتباس از آندرسون و همکاران (Anderson et al., 2004)

Fig. 15. Thermometry using the  $\delta^{18}\text{O}$  changes (Figure adapted from Anderson et al., 2004).

است. همچنین از آبهای سطحی موجود در منطقه که دارای نسبت بالایی از ایزوتوپ‌های سنگین مس است می‌توان به‌عنوان ابزاری اکتشافی استفاده کرد. شواهد ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن نیز نشان‌دهنده منشأ سطحی‌زاد کانه‌زایی مس است که طی فرآیندهای دگرگونی صورت گرفته است. این شواهد همچنین نشان می‌دهند که دو نوع رگه کوارتز مورد بررسی، مربوط به فرآیندهای متفاوت دگرگونی می‌باشند که در زمانهای مختلفی صورت گرفته‌اند.

#### قدردانی

نویسندگان از شرکت معدن جویان فارس و همچنین جناب آقای عباسی، مالکیت شخصی معدن مس جیان، جهت مشارکت و هماهنگی که در انجام این پژوهش با دانشگاه شیراز انجام دادند، سپاس‌گزاری می‌نمایند.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه که در بالا گفته شد، می‌توان به این نتیجه رسید که به‌علت هوازدگی ناچیز صورت گرفته در کانسار مس جیان، pH به اندازه کافی در مناطق سطحی کاهش نیافته است تا مس را از مناطق سطحی شسته و کانسارسازی سطحی‌زاد تشکیل بدهد. نفوذپذیری کم سنگهای منطقه می‌تواند در ارتباط با فرآیندهای دگرگونی باشد که سنگ مادر اولیه مافیک و رسوبی را دگرگون ساخته است. وجود کانیهای کربناتی مس (مالاکیت) با تغییرات ایزوتوپی کم مس (0/45- تا +0/49 در هزار) در بخشهای سطحی این کانسار نیز تأییدکننده اثر ناچیز فرآیند هوازدگی و غنی‌شدگی سطحی‌زاد در این کانسار و کانه‌زایی با منشأ اولیه و عمقی است. این موضوع نشان می‌دهد که در کانسار مس جیان کاکوزیت ثانویه ناشی از فرآیند آبشویی وجود ندارد و اگر کاکوزیتی هم در عمق وجود داشته باشد دارای منشأ اولیه

#### References

Agard, P., Monie, P., Gerber, W., Omrani, J., Molinaro, M., Labrousse, L., Vrielynck, B., Meyer, B., Jolivet, L. and Yamato, P., 2006. Transient, syn-obduction exhumation of

Zagros blueschists inferred from P-T-deformation-time and kinematic constraints: implications for Neotethyan wedge dynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(11): 1-28.

- Alirezaei, S., 2009. Stable Isotope Geochemistry. Press University Publication Center, Tehran, 332 pp.
- Anderson, R., Graham, C.M., Boyce, A.J. and Fallick, A.E., 2004. Metamorphic and basin fluids in quartz-carbonate-sulphide veins in the SW Scottish Highlands: a stable isotope and fluid inclusion study. *Geofluids*, 4(2): 169-185.
- Asadi, S., Moore, F. and Fattahi, N., 2013. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the Jian copper deposit, Sanandaj-Sirjan metamorphic zone, Iran. *Geofluids*, 13(1): 66-81.
- Borrak, D.M., Navarrete, J.U. and Kafantaris, F.C.A., 2012. A model for copper isotopic fractionation during weathering and transport. 22th Goldschmidt Conference, Montreal, Canada.
- Clayton, R.N., and Mayeda, T.K., 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27(1): 43-52.
- Cook, N.J., 1994. Post-recrystallisation mobilization phenomena in metamorphosed stratabound sulphide ores. *Mineralogical magazine*, 57(1): 482-486.
- Craig, J.R., Voke, F.M. and Solberg, T.N., 1998. Pyrite: physical and chemical textures. *Mineralium Deposita*, 34(1): 82-101.
- Ehrlich, S., Butler, I., Halicz, L., Rickard, D., Oldroyd, A., and Matthews, A., 2004. Experimental study of the copper isotope fractionation between aqueous Cu (II) and covellite, CuS. *Chemical Geology*, 209(3): 259-269.
- Evans, A.M., 1997. An Introduction to Economic Geology and its Environmental Impact. John Wiley and Sons, London, 403 pp.
- Fallick, A.E., Jocelyn, J., and Hamilton, P.J., 1987. Oxygen and hydrogen stable isotope systematics in Brazilian agates, In: R. Rodriguez-Clemente (Editor), *Geochemistry of the earth surface and processes of mineral formation*. Instituto de Geologia (Consejo Superior de Investigaciones Cientificas-Spanish National Research Council), Madrid, pp. 99-117.
- Fattahi, N., 2013. Study of geochemistry and the copper genesis in the Surian complex, Jian (Bavanat, Fars province). M.Sc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 241 pp.
- Haest, M., Muchez, P., Petit, J.C. and Vanhaecke, F., 2009. Cu isotope ratio variations in the Dikulushi Cu-Ag deposit, DRC: of primary origin or induced by supergene reworking? *Economic Geology*. 104(7): 1055-1064.
- Hoefs, J., 2009. *Stable Isotope Geochemistry*. Springer, Amsterdam, 203 pp.
- Liaghat, S. and Jami, M., 1999. The history of the ore microscopy applications. Shiraz University Press, Shiraz, 273 pp.
- Liaghat, S. and Taghipour, N., 2000. Genesis of Jian occurrence. 4th Symposium of Geological Society of Iran, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian)
- Mathur, R., Ruizi, J., Titley, S., Liermann, L., Buss, H. and Brantley, S., 2005. Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69 (22): 5233-5246.
- Mathur, R., Titley, S., Barra, F., Brantley, S., Wilson, M., Phillips, A., Munizaga, F., Makshev, V., Vervoort, J. and Hart, G., 2009. Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(3): 1-6.
- Matsuhisa, Y., Goldsmith, J.R. and Clayton, R.N., 1979. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(2): 1131-1140.
- McClay, K.R. and Ellis, P.G., 1984. Deformation of pyrite. *Economic Geology*, 79(2): 400-403.
- Molinaro, M., Leturmy, P., Guezou, J.C., Frizon de Lamotte, D. and Eshraghi, S.A., 2005. The structure and kinematics of the southeastern Zagros fold-thrust belt, Iran: From thin-skinned to thick-skinned tectonics. *Tectonics*, 24(3): 1-19.
- Moore, F., Asadi, S. and Fattahi, N., 2011. Metamorphic-Hydrothermal fluid evolution based on thermo-barometry and stable isotope studies in Bavanat copper deposit, Sanandaj-Sirjan zone. 15th Symposium of Geological Society of Iran, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Mousivand, F., Rastad, E., Hoshino, K. and Watanabe, M., 2007. The Bavanat Cu-Zn-Ag orebody: first recognition of a Besshi-type VMS deposit in Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 183(3): 297-315.
- Rajabzadeh, M.A. and Esmaili, S., 2012.

- Petrography and geochemistry of meta-basalts of Jian copper deposit. 15th Symposium of Geological Society of Iran, University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Publisher, London, 345 pp.
- Sarkarinejad, Kh., 2007. Quantitative finite strain and kinematic flow analyses along the Zagros transpression zone, Iran. *Tectonophysics*, 442(1): 49-65.
- Scott, S.D., Both, R.A. and Kissin S.A., 1971. Sulfide petrology of the Broken Hill region, New South Wales. *Economic Geology*, 72(8): 1410-1425.
- Sheikholeslami, M.R., Pique, A., Mobayen, P., Sabzehei, M., Bellon, H. and Emami, M.H., 2008. Tectono-metamorphic evolution of the Neyriz metamorphic complex, Quri-Kor-e-Sefid area (Sanandaj-Sirjan Zone, SW Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4-6): 504-521.
- Spry, A., 1969. *Metamorphic Textures*. Pergamon Press, Oxford, 286 pp.
- Stanton, R.L., 1972. *Ore Petrology*. McGraw-Hill, New York, 713 pp.
- Taghipour, N. and Moore, F., 2000. Texture and REE geochemistry in the Jian copper occurrence. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 10(2): 51-65.
- Walker, E.C., Cuttitta, F., and Senftle, F.E., 1958. Some natural variations in the relative abundance of copper isotopes. *Geochimica et cosmochimica acta*, 15(3): 183-194.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Moore, F., 2001. Geochemical prospecting project of copper in the Bavanat area, Fars Province. 5th Symposium of Geological Society of Iran, University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Zhang, L.G., Liu, J.X., Zhou, H.B. and Chen, Z.S., 1989. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system. *Economic Geology*, 84(6): 1643-1650.





## Mineralization and leaching process in the Jian copper deposit, northeastern Fars province: Application of petrography and stable isotopes

Farid Moore<sup>1</sup>, Abbas Etemadi<sup>\*2</sup>, Sina Asadi<sup>1</sup> and Nasim Fattahi<sup>1</sup>

1) Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

2) Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: Feb. 5, 2014

Accepted: June 21, 2014

**Keywords:** *stable isotope, metamorphic fluid, copper deposit, Jian (Bavanat), Sanandaj-Sirjan zone.*

### Introduction

One of the first principles in the formation of a reserve is mineralogical, construction and mineral textures studies and investigation of paragenetic relations in the ore minerals. In addition, to petrographic studies, isotopic investigations have wide applications in economic geology. In general, copper isotope variability in primary (high temperature) mineralization forms a tight cluster, in contrast to secondary mineralization, which has a much larger isotope range. A distinct pattern of heavier copper isotope signatures is evident in supergene samples, and a lighter signature characterizes the leached cap and oxidation-zone minerals. This relationship has been used to understand oxidation–reduction processes (Hoefs, 2009). Also for a better understanding of the origin of the Jian Cu deposit, this research focuses on the origin and composition of the fluid and elucidation of its evolution during the mineralization process. In order to achieve this end, field observations, vein petrography, microthermometry of fluid inclusions and stable isotope analyses of veins and minerals were investigated. The present study also compares high and low temperature sulfide samples in an attempt to document and explain diagnostic  $\delta^{65}\text{Cu}$  ranges in minerals from the Jian deposit.

### Materials and methods

The samples were taken from different depths to measure Cu isotope variations within each reservoir. Mineralogical composition was determined using X-ray diffractometry. In addition, chromatographic separation was carried

out on all samples (except for native Cu samples) in a clean lab and was conducted as outlined in Mathur et al. (Mathur et al., 2009). These samples were measured into a Multicollector Inductively-Coupled-Plasma Mass Spectrometer (MC-ICPMS, the Micro mass Isoprobe at the University of Arizona) in low resolution mode using a microconcentric nebulizer to increase sensitivity for the samples with lower concentrations of copper. Preparation and analysis of quartz for oxygen isotopes was performed using the standard techniques detailed by Clayton and Mayeda (Clayton and Mayeda, 1963). Fluid inclusions were extracted for  $\delta\text{D}$  measurement from quartz samples selected as far as possible to avoid late inclusions. The methods were standard and similar to those published in Fallick et al. (Fallick et al., 1987). Stable isotope analysis for oxygen and hydrogen isotopes was undertaken at the isotope geochemistry laboratory, University of Queensland.

### Results

$\delta^{65}\text{Cu}$  values for analyzed samples range from -0.45 to +0.49 ‰ in the secondary copper minerals (malachite). The  $\delta^{18}\text{O}$  values for analyzed quartz samples, collected from different quartz veins of the Jian deposit, fall in a narrow range varying from +15.8 to +18.4‰ (avg. +16.7‰) for type A veins and +16.6 to +17.9‰ (avg. +17.2‰) for type B veins. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of the fluids calculated from the Jian quartz samples range from +7.6 to +10.7‰ (avg. +9.1 ‰) for type A veins and +4.7 to +5.1‰ (avg. +4.9 ‰) for type B veins. The  $\delta\text{D}$  values of the fluid inclusions hosted by quartz samples range from -33.1 to -

\*Corresponding authors Email: moore@susc.ac.ir

41.2‰ (avg. -37.6‰) for type A and -52.3 to -54.9‰ (avg. -53.1‰) for type B veins.

### Discussion

Based on mineralization style and structures, Th, salinity and composition of fluid inclusions, stable isotope systematics, timing of the mineralization with respect to deformation and metamorphism, host rocks, ore and gangue minerals, the Jian deposit can be classified either as a metamorphogenic or mesothermal Cu-bearing quartz deposit. Precipitation of secondary  $\text{Cu}^+$ -sulfide minerals from the  $\text{Cu}^+$  complexes present in this fluid would result in sulfide minerals with low copper isotopic variations (-0.45 to +0.49‰) in the Jian copper deposit. This could explain why a low variation in the isotopic composition of Cu is observed in a horizontal plane. Isotopically, mineralization is most probably the result of varied isotopic fractionation processes including low copper leaching,  $\text{Cu}^+$  to  $\text{Cu}^{2+}$  oxidation-reduction reactions, and fluid-mineral fractionations. Oxygen and hydrogen isotope compositions suggest that the main metallization occurred from a metamorphic dehydration in type A veins. These sulfide-bearing quartz veins are interpreted as a small-scale example of redistribution of mineral deposits by metamorphic fluids. This study suggests that mineralization at Jian is interpreted as metamorphogenic in style, probably related to a deep-seated mesothermal system.

### Acknowledgements

The authors would like to thank Managing director of the Jian Corporation Ltd. for his help during fieldwork and sampling. Logistical and financial supports were provided by Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Shiraz University.

### References

- Clayton, R.N., and Mayeda, T.K., 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27(1): 43-52.
- Fallick, A.E., Jocelyn, J., and Hamilton, P.J., 1987. Oxygen and hydrogen stable isotope systematics in Brazilian agates, In: R. Rodriguez-Clemente (Editor), *Geochemistry of the earth surface and processes of mineral formation*. Instituto de Geologia (Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Spanish National Research Council), Madrid, pp. 99-117.
- Hoefs, J., 2009. *Stable Isotope Geochemistry*. Springer, Amsterdam, 203 pp.
- Mathur, R., Titley, S., Barra, F., Brantley, S., Wilson, M., Phillips, A., Munizaga, F., MaksaeV, V., Vervoort, J. and Hart, G., 2009. Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(3): 1-6.