

بررسی زایش لیستونیت‌های طلا دار با استفاده از مطالعات کانی‌شناسی، ژئوشیمی، کانی‌سنگین، میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار (اکسیژن، کربن و گوگرد) در پهنه افیولیت - ملائز خاور کشور (منطقه هنگران - جنوب بیرجند)

رضا منظمی باقرزاده^{۱*}، حسن میرنژاد^۲، پونه اشبک^۳ و محمدحسن کریم‌پور^۴

^۱دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه شمال شرق، مشهد، ایران.

^۲استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۳دانشجوی دکتری، واحد بین‌الملل، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۴استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۳۰

چکیده

لیستونیت (Listvenite) یک سنگ اولترامافیک کربناتی شده (Ophiocarbonate) است که به دلیل داشتن فلزات گرانبها و پایه به‌ویژه طلا، نقره، مس، آرسنیک و جیوه از دید اکتشاف و بهره‌برداری مهم به شمار می‌آید. این سنگ‌ها که در پهنه‌های افیولیت - ملائز و در کنار گسل‌های اصلی و پهنه‌های برشی بیشترین رخنمون را دارند، در نتیجه دگرسانی آب‌دار و کربناتی سنگ‌های اولترامافیک تشکیل شده‌اند. در خاور ایران گسترده‌ترین رخنمون‌های لیستونیتی قابل توجه است. از دید سنگ‌نگاری، لیستونیت‌های هنگران به سه نوع اصلی تقسیم می‌شوند: ۱- لیستونیت‌های کربناتی (نوع I) ۲- لیستونیت‌های سیلیسی (نوع II) و ۳- لیستونیت‌های سیلیسی سولفیددار با بافت برشی (نوع III). مقدار طلا در این سنگ‌ها عموماً پایین است و بالاترین مقدار آن در لیستونیت‌های نوع III، ۲۹۰ ppb اندازه‌گیری شده است. در مطالعه نمونه‌های کانی سنگین در رسوبات آبراهه‌ای لیستونیت‌های منطقه، ذرات طلا، پیریت، کالکوپیریت، سینابر و مس طبیعی تشخیص داده شد. ذرات طلا بیشتر همراه با پیریت هستند و بیشترین اندازه آن به ۸۰ میکرون می‌رسد. داده‌های تجزیه نقطه‌ای نشان می‌دهد که بیشتر سولفیدها از پیریت، مارکاسیت، براوویت (Brovoite) و به مقدار کمتر کالکوپیریت تشکیل و بیشتر پیریت‌ها به مارکاسیت تبدیل شده‌اند. همچنین بیشتر کانی‌های کربناتی موجود در این لیستونیت‌ها، دولومیت و منیزیت است. وجود کانی شاخص براوویت با منطقه‌بندی آشکار و مرتبط با تغییرات مقادیر نیکل، نشانگر تغییرات متناوب فیزیوشیمیایی در سیال گرمایی است. مطالعه کانه‌نگاری و توالی همبود کانی‌ها نشان از تشکیل دولومیت و منیزیت در مرحله پیش از کانی‌سازی و در ادامه آن سولفیدها (بیشتر پیریت) دارد. مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن در ۳ نمونه دولومیت ($\delta^{13}C_{PDB} = 1.57-1.67\%$ ، $\delta^{18}O_{SMOW} = 9.353-9.982\%$) نشان می‌دهد که منشأ ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن می‌تواند از آب‌های اقیانوسی باشد که در اثر حرکت و چرخش این آب‌ها در سنگ‌های اولترامافیک مجموعه‌های افیولیتی و به دنبال آن، رخداد دگرسانی در آنها، دولومیت تشکیل شده است. با توجه به گستره $\delta^{34}S_{CDT}$ در زوج کانی پیریت - مارکاسیت در لیستونیت‌های سیلیسی هنگران (۷/۹ - ۵/۷ %)، چنین به نظر می‌رسد که سولفور کانی‌های سولفیدی اشاره شده، از سنگ‌های گرانیتی جنوب منطقه منشأ گرفته است. با در نظر گرفتن حضور گسترده سنگ‌های اولترامافیکی سرپانتینی شده و همچنین رخنمون‌های گرانیت در منطقه مورد مطالعه، می‌توان منشأ طلا، نقره و عناصر پایه از جمله مس، سرب، روی، جیوه، آرسنیک، آنتیمون را مرتبط با گرانیت‌های منطقه و منشأ کروم، نیکل، تیتان و آهن را مرتبط با اولترامافیک‌ها دانست. نتایج حاصل از مطالعه میانبارهای سیال روی رگه‌های کوارتز کانه‌زایی شده در لیستونیت‌های هنگران نشان می‌دهد که سیال گرمایی مؤثر بر سنگ میزبان شوری پایینی دارد و بیشترین دمای سیال ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است.

کلیدواژه‌ها: لیستونیت، طلا، ایزوتوپ پایدار، افیولیت - ملائز، هنگران، بیرجند.

*نویسنده مسئول: رضا منظمی باقرزاده

E-mail: rmonazzami@yahoo.com

۱- مقدمه

واژه لیستونیت توسط Rose (1837) از منطقه اورال روسیه وارد ادبیات زمین‌شناسی شد و توسط روس‌ها به شکل‌های مختلف مانند Listvanite، Listvenite، Listwanite و Listwanite عنوان شده است (Halls & Zhao, 1994) که اگر این واژه از زبان روسی به انگلیسی برگردانده شود املاي درست "Listvenite" را می‌توان برای آن در نظر گرفت. بیشترین مطالعات بنیادی و مقدماتی در این زمینه توسط زمین‌شناسان روسی و برخی از دیگر پژوهشگران همچون (Kruťoé (1961)، Bök (1953)، Burdaiskii & Lubouchicov (1936) (1963 & 1965)، Allahverdiev & Kashkai (1965)، Pluchkue (1969)، Abodiné (1978)، Sazanov (1975)، Shcherban & Borovikova (1981)، Mikháillof (1981)، Küleshvich (1984)، Buisson & Leblanc (1985)، Spiridonov (1991)، Tuysuz & Erlér (1993)، Halls & Zhao (1994)، Safanov (1997) (1998 & 2000)، Ucurum (2000) و Kozinsky et al. (2009) Colakoglu نگارش و تألیف شده است. در تعریف این نگارندگان، لیستونیت به سنگ‌های کربناتی که در امتداد مرزهایی در توده‌های اولترامافیک

نوع آلپی پدیدار شده‌اند، گفته می‌شود و تصور بر این است که این سنگ‌ها نتیجه کربناتی شدن سنگ‌های اولترامافیک دربرگیرنده شان باشند. لیستونیت‌ها در نقاط مختلف دنیا مانند روسیه، ترکیه، کانادا، جمهوری چک، عربستان سعودی، ایتالیا، مراکش و همچنین ایران گسترده‌ترین رخنمون‌ها را دارند و اهمیت این سنگ‌ها بیشتر به دلیل میزبانی آنها برای ذخایر طلا، آرسنیک، کبالت، نیکل، تنگستن و جیوه است (Ucurum, 2000). از جمله این ذخایر در لیستونیت‌ها می‌توان به ذخایر کبالت در مراکش (Leblanc, 1991, 1988 & 1986)؛ کبالت (Leblanc & Fischer, 1990; Leblanc & Billaud, 1982) از ذخایر بوآذر استخراج شده است، لیستونیتی شدن در رشته‌های ساحلی کالیفرنیا مرتبط با کانی‌سازی جیوه در معادن ناکسویل، هریسن، رید، فیل سرخ، معدن جدید، سولفور بانک، و آیدریای جدید (Barens et al., 1973)؛ کالیفرنیا مرتبط با کانی‌سازی جیوه در معادن ناکسویل، هریسن، رید، فیل سرخ، معدن جدید، سولفور بانک، و آیدریای جدید (Barens et al., 1973)؛ ذخایر طلا و نقره در کانسار طلای لیستونیتی زود (Zod) (Smirnov, 1976) در سنگ‌های گابرویی در قفقاز، کلدیلر برای شمال آمریکا، نواحی آپالاچین و اوتاریو، دونیت‌های آرکنن ییلگارد بلوک استرالیا

(Tirrul et al. 1983) به حوضه فلیشی خاور ایران "زون زمین درز سیستان" نام داده‌اند و بر این باورند که جدایش بلوک افغان (بلوک هیلمند) از بلوک لوت در زمان سنومانین انجام گرفته که با جایگیری گوشته‌های اقیانوسی و انباشت رسوبات فلیشی همراه بوده است.

منطقه هنگران در جنوب مجموعه افیولیتی خاور کشور قرار دارد و رخنمون‌های لیستونیتی، بیشتر سنگ‌شناسی منطقه را تشکیل می‌دهند. مجموعه یاد شده از دید زمین‌ساختی بسیار به هم ریخته و خرد شده و در کنار گسل‌های اصلی و برشی نمایان شده است. بر پایه نقشه زمین‌شناسی هنگران، لیستونیت‌های این منطقه میان طول‌های $30^{\circ} 59' 13''$ تا $00^{\circ} 15' 59''$ و عرض‌های $30^{\circ} 04' 32''$ تا $05^{\circ} 15' 37''$ شمالی در ۱۰۰ کیلومتری جنوب بیرجند قرار گرفته‌اند (شکل ۱). سنگ‌شناسی چیره منطقه اکتشافی هنگران مجموعه افیولیتی خاور کشور و شامل سنگ‌های اولترامافیک سرپانتینی‌شده (Ub) و لیستونیت‌هاست که در کرتاسه پایانی - پالئوسن روی صفحه قاره‌ای خاور ایران روراند شده است. مجموعه لیستونیتی در قالب ۶ واحد از لیستونیت کربناتی (C)، لیستونیت سیلیسی - کربناتی (Sc)، لیستونیت کربناتی همراه با مالاکیت (Cm)، لیستونیت سیلیسی سولفیددار با بافت برشی (Sb)، پهنه لیمونیتی (Z) و بخش‌های کوارتز - فلدسپاری همراه با لیستونیت سیلیسی برشی (g+sb) در کنار سنگ‌های اولترامافیک سرپانتینی‌شده (شکل ۲) و گسل‌های اصلی منطقه تشکیل شده است. گستردگی بخش‌های C و Sc از دیگر تشکیلات لیستونیتی بیشتر است. لیستونیت‌های منطقه هنگران در مقیاس صحرایی از طول چند ده متر تا ۶۰۰ - ۵۰۰ متر و پهنای ۱۰ متر تا بیشینه ۲۰۰ متر را در برمی‌گیرند. بخش شمال نقشه که بیشتر از تشکیلات دیابازی (K_0) تشکیل شده و جزئی از کمپلکس افیولیتی منطقه به‌شمار می‌آید، از دید توپوگرافی نسبت به دیگر تشکیلات، بلندتر و صخره‌سازتر است. بخش‌های کوچکی از مجموعه شیل، ماسه‌سنگ و دیاباز به‌طور پراکنده در میان مجموعه لیستونیتی رخنمون دارند. در بخش‌هایی از جنوب و خاور منطقه، توده نفوذی گرانیتی با سن ترشیری (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مختاران) در همبری با لیستونیت‌ها قابل مشاهده است. بلورهایی از پیریت و کالکوپریت به عنوان تنها کانی‌های فلزی در متن گرانیت دیده می‌شوند. این توده گرانیتی دچار هوازدگی به نسبت شدیدی شده به گونه‌ای که هوازدگی پوست پیازی در بخش‌های سطحی توده گرانیت قابل مشاهده است. رخنمون‌های کوچکی از بیوتیت گنیس نیز در کنار توده گرانیتی دیده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده عملکرد زمین‌ساخت همراه با رخداد دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه باشد.

با توجه به عملکرد گسل‌ها و در ادامه آن ورود محلول‌های گرمایی به تشکیلات سنگی منطقه، دگرسانی‌های برجسته‌ای رخ داده است که برای نمونه می‌توان به دگرسانی‌های کربناتی، سیلیسی، لیمونیتی - هماتیتی و آرژلیک اشاره کرد. پهنه‌های دگرسانی سیلیسی به‌صورت سیلیس بی‌شکل برشی همراه با کانی‌های سولفیدی و ذرات طلا و یا رگچه‌هایی از کوارتزهای بلورین و پهنه دگرسانی لیمونیتی - هماتیتی بیشتر به‌شکل بخش‌های رگه‌ای و با پهنای کم، در کنار لیستونیت‌های سیلیسی سولفیددار مشاهده می‌شوند. دگرسانی اولیه سولفیدها مانند پیریت، کالکوپریت، بورنیت و ... به تشکیل کانی‌های ثانویه (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) انجامیده است. بیشترین گسترش دگرسانی‌های اخیر در مرکز - باختر منطقه (نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰) متمرکز شده است. رخداد محلول‌های گرمایی روی رخنمون‌های گرانیتی منطقه سبب دگرسانی شدید فلدسپارها به کانی‌های رسی (کانولینت) و در نتیجه تشکیل پهنه دگرسانی آرژلیک روی رخنمون‌های گرانیتی شده است. ورود محلول‌های گرمایی غنی از گاز CO_2 به درون پهنه‌های عظیمی از سنگ‌های اولترامافیکی به دگرسان شدن کانی‌های فرمونیزین این سنگ‌ها به کانی‌های ثانویه‌ای همچون کلریت، بیوتیت، آمفیبول و ... و در پی آن تشکیل بخش‌های گسترده‌ای از سنگ‌های کربناتی لیستونیتی (دگرسانی کربناتی) شامل کلسیت، دولومیت و به

(Ucurum, 2000)، لیستونیت‌های دارای فلزات پایه و گرانبها در کمربند‌های مافیک - اولترامافیک سپر عربستان (Buisson & Leblanc, 1986)، در یونان، در کمربند‌های سنگ‌های سبز باربرتن در آفریقای جنوبی، در افیولیت‌های لیگوریا در ایتالیا (Pipino, 1980)، نواحی ششا و لاپین در آذربایجان، نواحی بسازا، بالخاش شمالی و کالبای باختری در قزاقستان (Kashkai & Allakhverdiev, 1965) اشاره کرد. برای اولین بار در ایران، لیستونیت توسط افتخارنژاد (۱۳۵۹) از منطقه سهل آباد بیرجند گزارش شده است. واله و سعیدی (۱۳۶۸)، سعیدی و فرهادیان (۱۳۷۰) نیز در رابطه با لیستونیت و پدیده لیستونیت‌زایی در ایران مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند و روی هم رفته، تعریفی که توسط این پژوهشگران ارائه شده این است که لیستونیت دارای مجموعه‌ای از کانی‌های کربناتی، کوارتز و کلریت به‌همراه کانی‌های فرعی تیره مانند اکسید آهن و اسپینل است که در سرپانتینیت‌ها یافت می‌شود. علوی تهرانی (۱۳۶۱) لیستونیت را با عنوان افی‌سیلیکات دارای کوارتز و کربنات معرفی می‌کند. به باور زرین کوب (۱۳۷۲) و زرین کوب و همکاران (۱۳۸۴) پایه تشکیل لیستونیت بر واکنش‌های آب‌زای دگرگونی استوار است. واکنش‌های آب‌زا که در اثر افزایش درجه حرارت و فشار صورت می‌گیرد سبب آزادسازی فاز سیال غنی از H_2O ، CO_2 و عناصر کانه‌ساز دیگر می‌شود. این سیال تحت تأثیر عواملی همچون دگرگونی و زمین‌ساخت، گرم‌تر شده و حلالیتش بیشتر می‌شود، در این حالت با عناصر فلزی کمیاب کمپلکس‌های کلریدی و سولفیدی ایجاد می‌کند و نهشت این عناصر در شرایط خاص Eh، pH و گریزندگی (CO_2 Fugacity) صورت می‌گیرد. عابدی و ضیایی (۱۳۷۶) برای اولین بار با استفاده از مدل‌های اکتشافی - ژئوشیمیایی ذخایر لیستونیتی کشور روسیه، لیستونیت‌های افیولیت بیرجند (سهل آباد) را مورد مطالعه قرار دادند. در این منطقه، طلا در حد ۰/۵ ppm و جیوه به مقدار ۱/۶ ppm اندازه‌گیری شده است.

در این مقاله، زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی، منشأ و زایش طلا در لیستونیت‌های منطقه هنگران و شرایط فیزیکوشیمیایی سیال گرمایی مؤثر بر سنگ میزبان با استفاده از تجزیه نقطه‌ای کانی‌های موجود در این نوع سنگ‌ها، اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار کربن، اکسیژن و گوگرد کانی‌های کربناتی و سولفیدی و همچنین مطالعه میانبارهای سیال رگه‌های سیلیسی کانه‌زایی شده به‌طور بررسی می‌شود.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه هنگران در جنوب نقشه مختاران (۱:۱۰۰۰۰۰) بخشی از کمربند آمیزه رنگین - فلیش حوضه فلیشی خاور ایران به‌شمار می‌آید که از انباشته‌های ستبری از نهشته‌های فلیش‌گونه با پی‌سنگ افیولیتی وابسته به پوسته اقیانوسی تشکیل شده است. سن کمپلکس‌های فلیش و آمیزه رنگین در این ناحیه معمولاً بر پایه مشاهده فسیل روزن‌بران و نبود فسیل‌های کهن‌تر، به کرتاسه بالایی نسبت داده شده است (آقاباتی، ۱۳۸۳). در آمیزه‌های بخش جنوبی نقشه مختاران، لیستونیت‌ها به رنگ‌های زرد، نارنجی و سرخ - قهوه‌ای (افی کربنات) مشاهده می‌شوند که معمولاً بی‌فاصله در کنار اولترابازیک‌ها یا دیابازها (کمتر) قرار گرفته‌اند. در زیر میکروسکوپ، باقیمانده‌هایی از ساخت مش‌مانند سرپانتین در لیستونیت‌ها را می‌توان مشاهده کرد. سنگ‌های رسوبی درون آمیزه‌های رنگین از شیل‌های سیلیسی و آرژیلی، ماسه‌سنگ رادیولاریت‌دار، شیل‌های رادیولاریتی و سنگ‌آهک پلاژیک تشکیل شده‌اند. پیدایش این حوضه فلیشی نتیجه یک کافت درون قاره‌ای میان دو بلوک لوت در باختر و بلوک هیلمند در خاور در نظر گرفته می‌شود که در کرتاسه پیشین شکل گرفته و محلی مناسب برای جایگیری گوشته اقیانوسی و انباشت نهشته‌های فلیش‌گونه بوده است (افتخارنژاد، ۱۳۵۱). با سرانجام گرفتن اشتقاق خاور ایران، پوسته اقیانوسی به زیر پوسته قاره‌ای بلوک لوت فروورانش کرده و آمیزه‌های افیولیتی - فلیشی خاور ایران به وجود آمده است. (Camp & Griffis 1982) و

زرد مایل به صورتی مشاهده می‌شوند (شکل ۳- A). ابعاد بلورهای خودشکل پیریت در حدود ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون است و در اثر دگرسانی، ذراتی از این کانی به اندازه ۱۰ تا ۴۰ میکرون باقی مانده است. محصولات دگرسانی آن اکسید و هیدروکسیدهای ثانویه آهن است. پیریت کانی فاز اولیه و اصلی است و کانی‌های ثانویه مشتق از آن هماتیت و گوتیت است که در سطوح هوازده پیریت مشهود هستند. در مقاطعی که میزان نیکل در پیریت بالا می‌رود، زوج کانی پیریت- براوویت مشهود می‌شوند.

– **مارکاسیت:** این کانی به صورت بلورهای تیغه‌ای و نیمه‌شکل‌دار (Subhedral) با بازتاب قوی به رنگ زرد برنزی تا سفید به صورت پراکنده در مقاطع صیقلی دیده می‌شود. مارکاسیت از تبدیل پیریت به وجود آمده و مشابه با آن کانی، دچار شکستگی‌های حاصل از فشارهای زمین‌ساختی شده است.

– **براوویت:** این کانی از انواع پیریت به شمار می‌آید و در مقاطع صیقلی به رنگ صورتی کم‌رنگ نمود یافته است (شکل ۳- B). منطقه‌بندی تیره و روشن براوویت با تغییرات میزان نیکل و آهن همراه است. براوویت نیز از کانی‌هایی است که در فاز اصلی شکل گرفته (جدول ۱) و دگرسانی گسترده آن به دلیل پایداری به نسبت کم این کانی است (اشبک، ۱۳۸۸).

– **کالکوپیریت:** این کانی به رنگ زرد مایل به نارنجی با آنیزوتروپی ضعیف و بی‌شکل با کناره‌های نامنظم و بافت کاتاکلاستیک و شکافه‌پرکن است (شکل ۳- C). محصولات دگرسانی آن کالکوسیت، کولیت، مالاکیت و اکسید آهن آبدار است. کالکوپیریت بیشتر همراه با پیریت- مارکاسیت و در رگه‌های سیلیسی به صورت پراکنده و نیز همراه با پیریت، مارکاسیت و براوویت در فاز اصلی تشکیل شده است (جدول ۱). دگرسانی این کانی در کناره‌ها به کانی آزوریت مشهود است.

– **کربنات‌ها:** در مطالعه مقاطع میکروسکوپی، کانی‌های کربناتی بخش زمینه سنگ را تشکیل داده‌اند و گوناگونی آنها با تغییرات رنگ از خاکستری تیره تا روشن در نور پلاریزه شناسایی می‌شوند (شکل ۳- D). اصلی‌ترین کربنات‌های موجود در لیستونیت‌های هنگران، دولومیت و منیزیت است و همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، جزو اولین فازهای تشکیل شده در این سنگ‌ها به شمار می‌آیند. شواهد کانی‌شناسی نشان می‌دهند که کربنات‌ها توسط رگچه‌های سیلیسی و سولفیدها قطع شده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵).

– **گوآرتز:** این کانی بیشتر به صورت رگه سیلیسی نمود یافته و کانی‌های کربناتی در زمینه سنگ و سولفیدها را قطع کرده است که نشان از تبلور کوارتز در مرحله آخر کانه‌زایی دارد (شکل ۶). این کانی با بافت رگه‌ای و شکافه‌پرکن و خاموشی موجی و مرزهای دندان‌دار و سوزنی شکل مشخص می‌شود. در پیرامون بیشتر رگه‌های سیلیسی تمرکز بالای سولفید مشاهده می‌شود.

– **هماتیت و گوتیت:** این دو کانی که در اثر دگرسانی پیریت، مارکاسیت و کالکوپیریت به وجود آمده‌اند، در سطوح هوازده کاملاً مشهود هستند (شکل‌های ۷). مطالعه کانی‌نگاری مقاطع صیقلی نشان از آن دارد که فراوانی هماتیت کمتر از ۳/۵ درصد است.

– **مالاکیت:** به صورت بلورهای کشیده و سوزنی شکل و گاه به صورت مجتمع کانی‌سازی دارد. در برخی بخش‌ها مالاکیت در باطله آغشتگی ایجاد کرده است.

۵- مطالعه شیمی کانی‌ها در لیستونیت‌ها

نتیجه تجزیه نقطه‌ای روی ۷ نقطه از سولفیدهای موجود در یک نمونه لیستونیت سیلیسی سولفیددار از منطقه هنگران در جدول ۲ آورده شده است. مجموعه کانی‌های موجود در برش مورد مطالعه بیشتر پیریت و مارکاسیت (FeS_2) است. ویژگی‌های کانی‌شناسی این دو کانی در زیر میکروسکوپ، مانند شکل کوئیک پیریت با رنگ روشن‌تر و شکل تیغه‌ای و ارتورومبیک مارکاسیت در کنار پیریت‌ها به تشخیص آنها از یکدیگر کمک می‌کند. براوویت با فرمول شیمیایی $NiFeS_2$ (جدول ۲) در زیر

مقدار کم آنکریت و سیدریت انجامیده است. پس از جایگیری افیولیت‌ها روی قاره و دگرسانی سنگ‌های اولترامافیک در منطقه به عنوان محصول دگرسانی گرمایی، سنگ‌های به رنگ زرد تا قهوه‌ای در راستای گسل‌ها و شکستگی‌های بسیار به وجود آمده است که نقش مهمی در لیستونیت‌زایی (Listvinitization) منطقه داشته‌اند. ارتباط میان لیستونیت‌ها و سنگ‌های اولترامافیکی و حتی سنگ‌های نفوذی گرانیتی، گسلی است. این شکستگی‌ها که دنباله سرشاخه‌های سامانه گسلی "نه" هستند به سوی بصیران و جنوب بیرجند با روند NWW گسترش می‌یابند. نقش گسل‌ها و درزه و شکستگی‌های ناشی از آنها در کنترل ساختاری نهشته‌های طلا در لیستونیت‌ها بسیار بنیادین و قابل توجه است (Safanov, 1997).

در بررسی‌هایی که روی درزه‌های موجود در برونزدهای لیستونیتی منطقه هنگران صورت گرفته است دو فاز اصلی درزه‌های منطقه روند NNE-SSW (۱۵ درجه خاوری) و NW-SE (۱۳۵ درجه خاوری) هم‌روند با شاخه باختری گسل "نه" و گسل‌های راندگی منطقه هستند که در بخش جنوبی منطقه مختاران دیده می‌شوند. همچنین در روند چیره E-W, NE-SW (۶۵ درجه خاوری) سامانه‌های فرعی شکستگی‌ها نیز شکل گرفته است. همه درزه‌ها و شکستگی‌های اندازه‌گیری شده مربوط به بخش‌های مختلف لیستونیت‌ها و به‌ویژه رگه‌های سیلیسی تکنونیزه (sb)، رگه‌های کوارتز-فلدسپاری (Q)، بخش‌های گرانیتی، سنگ میزان اولترابازیکی سرپانتینی شده (tub) و پهنه‌های اکسیدان دارای اکسیدهای آهن و سولفیدهای دگرسان شده (z) است.

۳- روش مطالعه

به منظور بررسی‌های زمین‌شناسی و آزمایشگاهی و تعیین منشأ و خاستگاه طلا و عناصر همراه در سنگ‌های لیستونیتی، از انواع مختلف این سنگ‌ها به‌ویژه لیستونیت‌های سیلیسی دارای سولفید نمونه‌برداری شد. ۱۸ مقطع نازک و صیقلی و ۵ نمونه دوبرصیقل به منظور مطالعات سنگ‌نگاری، کانی‌نگاری و میانبارهای سیال آماده‌سازی شدند. بررسی میانبارهای سیال در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور صورت گرفت. میکروسکوپ مورد مطالعه Nikon مدل Ep200 با عدسی‌های شیئی 10x-50x-100x است. این میکروسکوپ تغییرات دمایی در حدود ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد دارد و مجهز به سامانه نمایش همزمان متصل به رایانه با قابلیت تهیه فیلم و اسلاید است. همه مراحل کار با استفاده از یک نرم‌افزار MDS و با استفاده از مانتورینگ انجام می‌شود. برای تعیین درصد شوری و چگالی و رسم نمودارها از نرم‌افزار مدلینگ (Modelling for Fluid Inclusion V 2.6 PVTX Software) استفاده شده است. به منظور تعیین منشأ طلا و دیگر عناصر همراه و دمای تشکیل این نوع کانی‌سازی طلا در لیستونیت‌ها، نمونه‌هایی برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن، کربن و گوگرد تهیه شد. ۳ نمونه از دولومیت‌های موجود در لیستونیت‌های کربناتی و کربناتی-سیلیسی برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن، و ۶ نمونه نیز از سولفیدهای موجود در لیستونیت کربناتی-سیلیسی برای اندازه‌گیری ایزوتوپ گوگرد انتخاب و پس از انجام مراحل خردایش و نمایش با خلوص بالا و در تیوب‌های ویژه برای تجزیه به آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اتاوا کانادا فرستاده شد.

۴- کانی‌شناسی

بر پایه نتایج حاصل از مطالعه مقاطع نازک، نازک-صیقلی و تجزیه نقطه‌ای، کانی‌های اولیه موجود در لیستونیت‌های هنگران شامل پیریت، مارکاسیت، براوویت، کالکوپیریت، دولومیت و منیزیت می‌شود. نتایج کانی‌نگاری به شرح زیر است:

– **پیریت:** در مقاطع موجود، پیریت‌ها بیشتر به صورت گردشده و با بازتاب قوی به رنگ

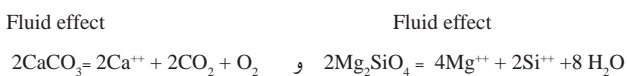
کرومیت، هماتیت، پیروکسن، اولوین، آمفیبول، آپاتیت، زیرکن، روتیل و به مقدار کمتر کانی‌های اسفن و باریت است. همچنین از دید زمین‌شناسی اقتصادی، کانی‌های با ارزش طلا، سینابر و نیز پیریت، کالکوپیریت و مس طبیعی (Native Copper) در این نمونه‌ها مشاهده شده است. در شماری از نمونه‌های مورد مطالعه، ۱ تا ۴ ذره طلا با شکل‌های مختلفی همچون کلوخه‌ای، اسفنجی و رشته‌ای و در اندازه ۳۰ تا ۱۵۰ میکرون مشاهده شده است.

در ادامه این مطالعات، از لیستونیت‌های سیلیسی دارای سولفید و همچنین از پهنه اکسیدان نمونه‌هایی انتخاب و خردایش شد که در دو اندازه ۸۰- و ۴۰- مش آماده‌سازی و پس از بروموفورم‌گیری توسط میکروسکوپ بینوکولار مطالعه شدند (Artificial Heavy Minerals). در این نمونه‌ها، ذرات طلا مشاهده نشد ولی شمار زیادی دانه‌های پیریت دیده شد. جالب توجه این که، پس از تجزیه شیمیایی مجموعه دانه‌های پیریت (کنسانتره پیریت)، طلا به مقدار ۵ ppm در نمونه ۸۰- مش و به مقدار ۴/۳ ppm در نمونه ۴۰- مش به دست آمد که این موضوع خود می‌تواند همبستگی مثبت طلا با پیریت (و احتمالاً سولفیدهای دیگر) را نشان دهد. از دید اقتصادی، پهنه‌های غنی از پیریت یا آرسنور و رگه‌های کوارتز تأخیری (ریزبلور)، مناسب‌ترین بخش دارای طلا و عناصر همراه در لیستونیت‌ها به شمار می‌آیند. این رگه‌های کوارتز در آخرین مرحله حضور محلول‌های گرمایی همراه با تشکیل سولفیدها و فلزات با ارزش (مانند طلا) تشکیل می‌شوند. دانه‌های ریز طلا در کناره دانه‌های پیریت اکسید شده دیده شده‌اند (Buisson & Leblank, 1985).

۷- ایزوتوپ‌های پایدار O، C و S

مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن، کربن و گوگرد اهمیت فراوانی در شناسایی منشأ و شرایط تشکیل کناسار و ترکیب سیال‌های کانه‌دار دارد (Hoefs, 1997). به همین منظور، نسبت‌های ایزوتوپی $^{18}O/^{16}O$ ، $^{13}C/^{12}C$ و $^{34}S/^{32}S$ در نمونه‌های وابسته به لیستونیت‌های هنگران اندازه‌گیری و به شرح زیر بررسی شد.

مقدار $\delta^{18}O_{SMOW}$ و $\delta^{13}C_{PDB}$ در دولومیت‌های موجود در لیستونیت نوع کربناتی-سیلیسی به ترتیب میان ۹ تا ۱۰ ‰ و ۱/۵۷ تا ۱/۶۸ ‰ متغیر هستند (جدول ۴) که با مقادیر گزارش شده از منابع مختلفی همچون کربناتیت، کربنات‌های دریایی، سنگ‌آهک و مرمر همپوشانی دارد (شکل ۸). با توجه به شرایط تشکیل لیستونیت‌ها، ایزوتوپ کربن ۱۳ مربوط به دولومیت به احتمال زیاد منشأ در کربنات‌های ژرف دریایی دارد (شکل ۹). با توجه به شرایط تشکیل لیستونیت‌ها و دامنه تغییرات نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن که نشانگر محیطی به نسبت کم‌دما است، منشأ کربنات‌ها را می‌توان محیط اقیانوسی در نظر گرفت که طی روند افیولیت‌زایی، همراه با سنگ‌های اولترامافیک روی پوسته قاره‌ای رانده شده‌اند. به باور Ziyakirmaci & Akdag (2005) سیال‌های گرمایی توانایی شستشو و حمل یون کلسیم (Ca^{++})، کربن و اکسیژن موجود در سنگ آهک و یا کلسیت و یون منیزیم (Mg^{++}) موجود در کانی‌های فرمونیزین سنگ‌های اولترامافیک و مافیک موجود را به صورت محلول دارند بوده و کربن و اکسیژن در سیال را به صورت دی‌اکسید کربن (CO_2) محلول حمل کرده‌اند.



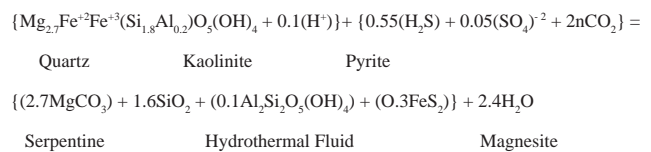
ولی با ایجاد تغییرات فیزیکی شیمیایی در سیال، شرایط مناسب برای ته‌نشست و جایگیری یون‌های اشاره شده در سنگ میزبان لیستونیتی به وجود آمده است و کربنات‌های مورد نظر در سنگ جایگزین شده‌اند (Ziyakirmaci & Akdag, 2005):



(Dolomite)

میکروسکوپ با منطقه‌بندی شاخص (شکل ۳- B) و رنگ صورتی کم‌رنگ نسبت به سولفیدهای دیگر کاملاً تمیز داده می‌شود. منطقه‌بندی در کانی براویت می‌تواند بیانگر تغییرات متناوب pH و Eh و به‌ویژه مقدار نیکل سیال گرمایی در هنگام تشکیل کانی مزبور بوده باشد. مقدار نیکل در بخش‌های روشن میان ۲۹ تا ۳۰ درصد است که این مقدار در بخش‌های تیره کانی به چند دهم درصد می‌رسد (جدول ۲).

با توجه به نتایج به دست آمده از تجزیه نقطه‌ای، کانی‌های کربناتی موجود در لیستونیت نوع کربناتی بیشتر منیزیت (نقاط ۱، ۳ و ۶) و دولومیت (نقاط ۲، ۴، ۵، ۱۰ A1 و 10A2) (جدول ۳ و شکل ۳- D) است که البته دولومیت فراوانی بیشتری دارد. در زمان تشکیل سرپانتینیت، محلول گرمایی غنی از H_2O ، CO_2 و دیگر مواد فرار با دگرگونی سنگ‌های اولترامافیک، فرایند کربنات‌زایی در این سنگ‌ها را سبب شده‌اند (Buisson & Leblank, 1985). افزوده شدن CO_2 و دیگر مواد فرار همچون SO_4^{2-} با خروج سیلیس همراه بوده و نتیجه آن، دگرسانی سنگ اولترامافیک به کربنات و کائولینیت و نهشت پیریت به همراه کوارتز در لیستونیت‌های نوع کربناتی و کربناتی-سیلیسی است:



(Silicified – Carbonatized listvenite)

متاسوماتیسم گسترده CO_2 در لیستونیت‌ها با کانی‌سازی طلا همراه می‌شود و به دگرسانی کربناتی سنگ‌های اولترامافیک می‌انجامد (Schandle and Naldrett, 1992). متاسوماتیسم می‌تواند بر پایه کاهش پتانسیل اکسیداسیون و افزایش فوگاسیته سولفور، توالی پروپلیت‌ها-- گامبیت‌ها-- برسیت‌ها-- لیستونیت‌ها را ایجاد کند (Baksheev et al., 2004).

مجموعه همبند کانی‌ها در رگه‌های کوارتز طلا دار در لیستونیت‌ها از مرحله اول تا پایان عبارتست از: کوارتز، کوارتز-پیریت، کوارتز-اسفالریت-کالکوپیریت-گالن و طلا-تلورید-کوارتز (Zhilyaeva et al., 2000). معمولاً طلا (۹۰ درصد) در کانسنگ‌ها به صورت دانه‌های آزاد (Native) رخ می‌دهد که با کوارتز و سولفیدها همراه است (Zhilyaeva et al., 2000). در این نوع کناسارهای گرمایی، طلای طبیعی در رگچه‌های کوچک در کوارتز و به شکل‌های بی‌قاعده و به صورت پرشدگی ترک‌ها و در مرز دانه‌ها تشکیل شده است. طلا در رخداد با سولفیدهای Cu-Fe ماگمایی به‌ویژه پیریت، پیرویت و آرسنوپیریت گسترش پیدا می‌کند. انتقال طلای سولفیدی توسط یک سیال، واقعی‌تر به نظر می‌رسد. احتمال استخراج طلا از دیگر کانی‌ها دست کم در یک محیط ایستا (Statics) کمتر است (Safanov, 1997).

۶- مطالعه کانی سنگین

به منظور درک هر چه بهتر از چگونگی حضور طلا در سنگ‌های لیستونیتی از یک سو و دستیابی به پهنه‌های طلا دار از سوی دیگر و باتوجه پایین بودن مقدار طلا در نمونه‌های سنگی این نوع از سنگ‌ها (بیشینه ۲۹۰ ppb) (باباخانی و منظمی باقرزاده، ۱۳۸۴) نمونه‌های کانی سنگین نمونه برداری و مطالعه شدند. در این راستا، از بخش‌های کنگلومرای- ماسه‌سنگی ۴۴ آبراهه اصلی منشعب از این سنگ‌ها نمونه برداری شد. بدین منظور، نمونه‌ها در عرض رودخانه‌های پایین دست رخنمون‌های لیستونیتی و از ژرفای ۳۰ سانتی‌متری برداشته شد. وزن هر نمونه ۵ کیلوگرم رسوب خشک الک‌شده در زیر الک ۲۰ مش است. در اولین مرحله، نمونه‌ها با آب شسته (مرحله لاوک‌شویی) و سپس در مرحله بروموفورم‌گیری، کانی‌های سنگین با وزن مخصوص بیش از ۲/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب از کانی‌های سبک جدا شدند. نتایج حاصل از مطالعه نمونه‌های کانی سنگین نشان‌دهنده وجود کانی‌های مگنتیت،

سیال را مشخص می‌کند که ۲ نوع آن دوفازی (L+V) و H_2O-CO_2 و نوع سوم تک‌فازی (CO_2) بوده است. بیشتر میانبارهای سیال مطالعه‌شده اولیه، بی‌شکل و بسیار ریز هستند. دمای همگن‌شدگی (T_m) در دامنه ۱۱۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. مقدار شوری به‌دست آمده برای این سیال‌ها پایین بوده است به‌گونه‌ای که در دامنه ۱/۴۸ تا ۵/۱۶ wt% NaCl قرار می‌گیرد. دمای پایین تا متوسط و pH پایین از جمله ویژگی‌های سیال‌های گرمابی مرتبط با توده‌های لیستونیتی سیلیس-کربنات به‌شمار می‌رود (Buisson & Leblanc, 1985).

جدول ۷ داده‌های به‌دست آمده از مطالعه میانبارهای سیال در لیستونیت‌های نوع کربناتی-سیلیسی منطقه هنگران را نشان می‌دهد. به‌طور کلی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال گرمابی مؤثر بر سنگ میزبان را می‌توان چنین خلاصه کرد:

۱- دمای همگن‌شدگی در میانبارهای سیال (۱۱۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد) نشان از پایین تا متوسط بودن دمای سیال دارد. این دما در محدوده کانسراهای گرمابی نوع اپی‌ترمال-مزوترمال قرار می‌گیرد.

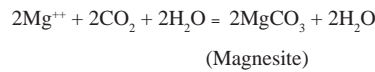
۲- درصد شوری کم میانبارهای سیال مطالعه شده (۵/۱۶ تا ۱/۴۸ wt% NaCl) بیانگر شوری پایین سیال کانه‌دار و در نتیجه منشأ شهاب سنگی و یا آمیختگی آب‌های جوی با ماگمای است.

۳- با توجه به پایین بودن میزان شوری در سیال گرمابی و در نتیجه پایین بودن میزان کمپلکس (Cl^-) در محیط سیال (Stepanov, 2000)، می‌توان چنین گفت که فلزات پایه و گرانبها توسط کمپلکس‌های دیگری همچون یون سولفور (H_2S) و کربنات (CO_3^{2-}) حمل شده‌اند.

۴- بالا بودن میزان دی‌اکسیدکربن در این سیال‌ها نشان‌دهنده بالا بودن فشار جزئی CO_2 در سیال گرمابی و در نتیجه ایجاد شرایط فیزیکوشیمیایی مناسب برای تشکیل کانی‌های کربناتی در واکنش‌های صورت گرفته میان سیال با سنگ میزبان در هنگام تشکیل لیستونیت‌های نوع کربناتی و کربناتی-سیلیسی است (Ucurum, 2000). همان‌گونه که پیش از این هم اشاره شد هنگام شکل‌گیری کانی‌های کربناتی در لیستونیت‌های نوع کربناتی و کربناتی-سیلیسی، سیال گرمابی اشاره‌شده غنی از یون کربنات (CO_3^{2-}) به‌صورت محلول بوده ولی پس از فعالیت ماگمای و تشکیل توده‌های گرانیتی، در اثر تبادلات شیمیایی میان ماگما و سیال گرمابی، میزان یون سولفور (H_2S) به‌صورت محلول در سیال گرمابی افزایش یافته (Jenlin et al., 2009) و در پی آن، سیال پتانسیل تشکیل کانی‌های سولفیدی در لیستونیت‌های منطقه را پیدا کرده است.

۹- نتیجه‌گیری

مطالعات میدانی انجام‌شده در ایران و دیگر نقاط دنیا نشان از آن دارد که مقدار فلز گرانبهای بیشتر لیستونیت‌ها پایین است و بیشتر آنها از نظر اقتصادی مهم نیستند. چند لیستونیت دارای طلا از پروتوزوویک پایانی و کمپلکس افیولیتی آلپ، مقدار طلا ۱ تا ۱۰ ppm دارند (Buisson & Leblanc, 1985). در مطالعات مختلفی که روی لیستونیت‌ها صورت گرفته است غنی‌شدگی طلا با ورود و دخالت سیلیس مرتبط می‌شود (Buisson & Leblanc, 1985; Auclair et al., 1993; Halls & Zhao, 1994; Ucurum, 2000; Akbulut et al., 2006). کمپلکس‌های طلا و سولفیدها ممکن است از سنگ‌های اولترامافیکی در یک الگوی مشابه با آنچه Buisson & Leblanc (1986) و Ucurum (2000) تشریح کرده‌اند، منشأ گرفته باشد. با توجه به مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لیستونیت‌های سنگ‌های اولترامافیکی منطقه هنگران که بیشتر در امتداد پهنه‌های برشی و گسل‌های اصلی قرار دارند به سه نوع کربناتی، کربناتی-سیلیسی و سیلیسی سولفیددار رده‌بندی می‌شوند. با ورود آب‌های ژرف اقیانوسی به درون مجموعه‌های اولترامافیکی، چرخش در ژرفای پوسته و افزایش دما، واکنش‌های شیمیایی میان این سیال گرمابی و سنگ



در نمودار $\delta^{13}C$ در برابر $\delta^{18}O$ (شکل ۱۰) که بر پایه داده‌های جدول ۵ تنظیم شده است، مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن دولومیت‌های لیستونیت هنگران با کربنات‌های لیستونیت‌های ۷ منطقه مختلف دنیا مقایسه شده‌اند. (Baksheev et al. (2001) با توجه به مقادیر منفی $\delta^{13}C$ (۳/۹- تا ۱۱/۹- ‰) و مقادیر مثبت $\delta^{18}O$ (۶ تا ۲۲ ‰) در مناطق اورال مرکزی، قزاقستان، سبیری، آمریکا و کانادا، منشأ درونی برای کربنات‌های موجود در نهشته‌های طلادار پیشنهاد کرده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر مثبت $\delta^{13}C$ (۹/۳۵ تا ۹/۹۸ ‰) و $\delta^{18}O$ (۱/۵۷ تا ۱/۶۸ ‰) در کربنات‌های موجود در لیستونیت‌های کربناتی-سیلیسی هنگران می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که منشأ این کربنات ارتباطی با فعالیت‌های ماگمایی ندارد و همان‌گونه که پیش از این گفته شد احتمالاً منشأ ژرف اقیانوسی داشته که پس از تشکیل مجموعه‌های افیولیتی، در سطح قرار گرفته است و تحت تأثیر سیال‌های گرمابی، کانی‌های کربناتی در سنگ میزبان سرپانتینیتی و لیستونیتی جایگزین شده‌اند.

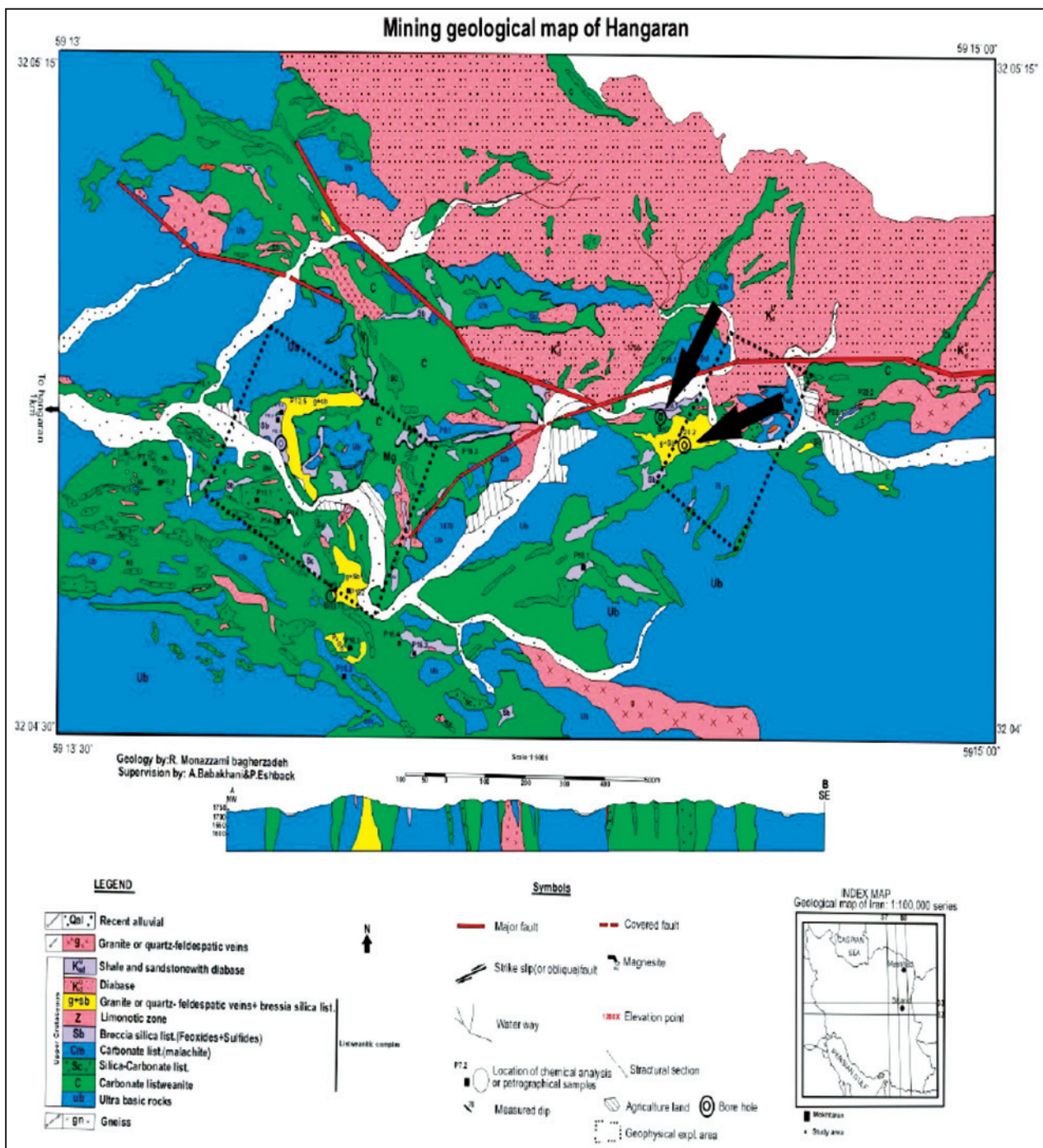
مقدار $\delta^{34}S$ در کانی‌های سولفیدی افزون بر ترکیب ایزوتوپی کل سولفور به شرایط محیط رسوب‌گذاری نیز وابسته است. سولفیدهای موجود در لیستونیت‌های هنگران شامل پیریت، مارکاسیت، براویت و به میزان کمتر کالکوپیریت هستند. مطالعات کانی‌شناسی نشان‌دهنده این است که بیشتر پیریت‌های موجود در لیستونیت‌های منطقه همراه با مارکاسیت است. بنابراین، برای مطالعه ایزوتوپ گوگرد، نمونه‌برداری از این زوج کانی صورت گرفته است. مقادیر $\delta^{34}S_{CDT}$ کانی‌های پیریت و مارکاسیت در لیستونیت‌های نوع کربناتی-سیلیسی هنگران میان ۵ تا ۸ ‰ تغییر می‌کند (جدول ۶) که با مقادیر گزارش شده از گوگرد منابعی همچون سنگ‌های گرانیتی، مجموعه‌های رسوبی و سنگ‌های دگرگونی همخوانی دارد (شکل ۱۱ و ۱۲). از آنجایی که توده‌های گرانیتی رخنمون‌قابل توجهی در جنوب منطقه مورد مطالعه و در کنار لیستونیت‌ها دارند، این احتمال می‌رود که گوگرد موجود در لیستونیت‌های هنگران از چنین منبعی تأمین شده باشند. با توجه به حضور سولفیدهای مس در توده گرانیتی منطقه، احتمال منشأ گرفتن طلا و عناصری از جمله سرب، روی، جیوه، آنتیموان، آرسنیک و مس همراه با کوارتز در لیستونیت‌های سیلیسی منطقه هنگران از توده گرانیتی منطقه نیز وجود دارد؛ در حالی که عناصر Ni, Cr, Ti و Fe معمولاً از سنگ‌های اولترامافیک مشتق می‌شوند. نقش کنترل‌کنندگی کانسنگ‌ها توسط ساختارها می‌تواند به جریان محلول‌ها یا گازهای اولیه با درجه حرارت بالا مرتبط شود که از سطوح ژرف و وابسته به فرایندهای ماگمایی منشأ گرفته است (Safanov, 1997).

۸- میانبارهای سیال در رگچه‌های سیلیسی لیستونیت‌های کربناتی و کربناتی-سیلیسی هنگران

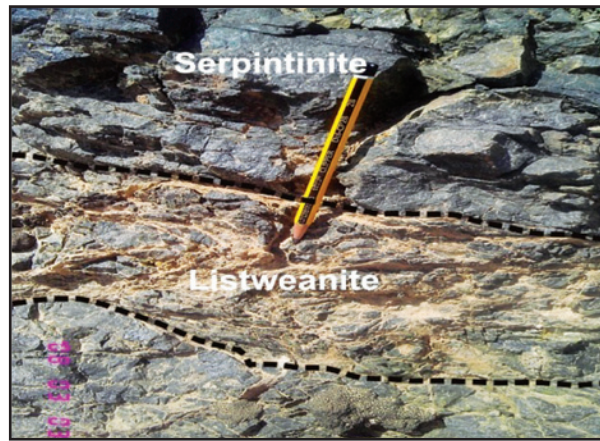
با توجه به مناسب بودن کانی کوارتز برای مطالعه میانبارهای سیال، ۴ نمونه از رگچه‌های کوارتز دارای کانی‌های سولفیدی موجود در لیستونیت نوع کربناتی-سیلیسی (شکل ۱۳) انتخاب و در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مطالعه شد. بیشتر کوارتزهای موجود در این رگچه‌ها، ریزبلور و دارای میانبارهای سیال بسیار ریزی هستند (شکل ۱۴). با توجه به مطالعات صحرایی گسترده روی رخنمون‌های لیستونیتی محدوده‌های گسترده‌ای از خاور کشور به‌ویژه منطقه هنگران، مشخص شد که بیشتر کانی‌های سولفیدی با کوارتزهای تأخیری نهان‌بلور به رنگ خاکستری همراه هستند. این کوارتزها در آخرین مرحله کانی‌سازی مرتبط با محلول‌های گرمابی تشکیل شده‌اند. احتمالاً سرعت بالای تشکیل آنها همزمان با کاهش دما و فشار از جمله شرایط تشکیل این نوع کوارتزها می‌تواند باشد. مطالعه ریزدماسنجی میانبارهای سیال تشکیل‌شده در این کوارتزها، ۳ نوع مختلف میانبار

می‌دهد که هنگام تشکیل سنگ‌های لیستونیتی، فشار جزئی دی‌اکسید کربن در سیال گرمابی بالا، شوری سیال پایین (۵/۱۶ wt% NaCl - ۱/۴۸) و محدوده دمای سیال ۱۱۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. با این شرایط، کانی‌سازی طلا در لیستونیت‌ها را می‌توان نوعی کانی‌سازی گرمابی (در محدوده اپی‌ترمال تا مزو‌ترمال) در نظر گرفت. در پایان در اثر تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی و ناپایداری کمپلکس فلزات یادشده، نهشت کانی‌های سولفیدی (بیشتر پیریت، مارکاسیت و به میزان کمتر کالکوپیریت) همراه با طلا در سنگ میزبان لیستونیتی رخ داده است. بنابراین سنگ‌های اولترامافیک و توده‌های گرانیتی جنوب منطقه را می‌توان به عنوان منشأهای احتمالی برای طلا و دیگر عناصر همراه (گرانها و پایه) موجود در لیستونیت‌های منطقه مورد مطالعه دانست.

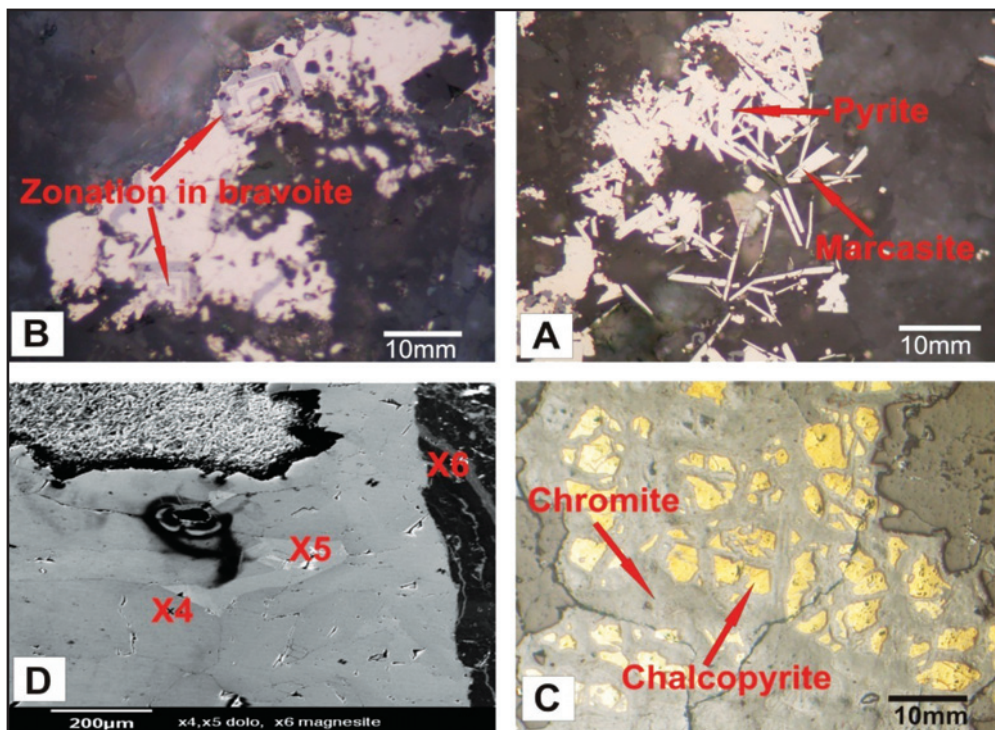
میزبان اولترامافیکی صورت گرفته و در نتیجه ورود CO_2 و H_2O و خروج SiO_2 ، سنگ‌ها ابتدا به سرپانتینیت و در ادامه با دگرسانی بیشتر به لیستونیت‌ها تبدیل شده‌اند. با توجه به داده‌های ایزوتوپی سولفیدهای موجود در لیستونیت‌ها، به نظر می‌رسد که فعالیت ماگمایی گرانیتی در منطقه نقش اصلی در تأمین سولفور (H_2S) سیال‌های گرمابی برای تشکیل کمپلکس‌های فلزی مانند طلا و انتقال آنها به ژرفای کمتر برای کانی‌سازی داشته است. ورود سیلیس و غنی‌شدگی عناصر Sb, Pb, Cu, Ag, Au ، لیستونیت فعال بوده‌اند (Akbulut et al., 2006; Ucurum, 2000). داده‌های میانبرهای سیال کوارتزهای موجود در رگه‌های کانی‌سازی شده نشان



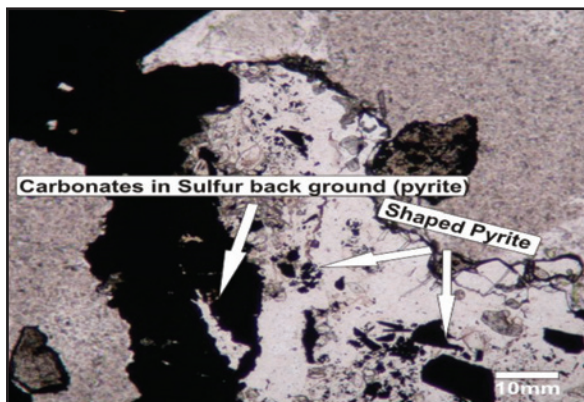
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰,۰۰۰ هنگران (منظمی باقرزاده، ۱۳۸۲).



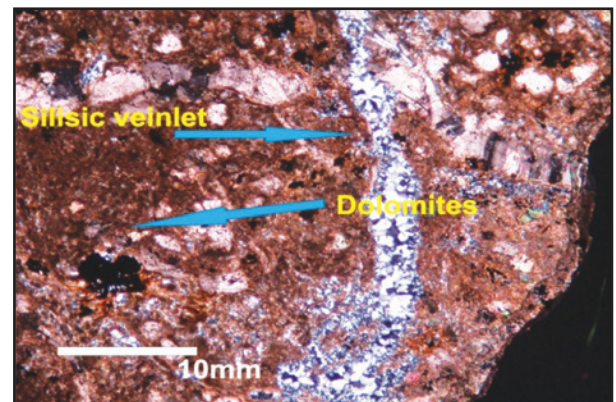
شکل ۲- پدیده لیستونیتی شدن در سنگ میزبان سرپانتینیت.



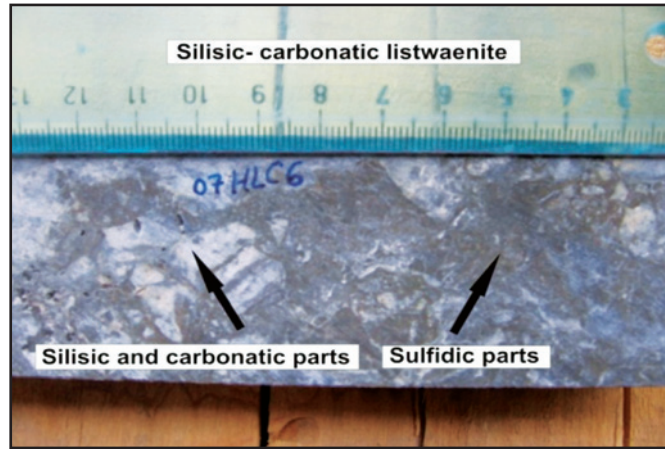
شکل ۳- (A) دانه‌های پیریت در کنار مارکاسیت؛ (B) کانی دارای منطقه‌بندی براویت در زمینه کربنات؛ (C) بافت کاتاکلاستیک در کالکوپیریت و (D) انواع کربنات (۴ و ۵: دولومیت، ۶: مگنیزیت).



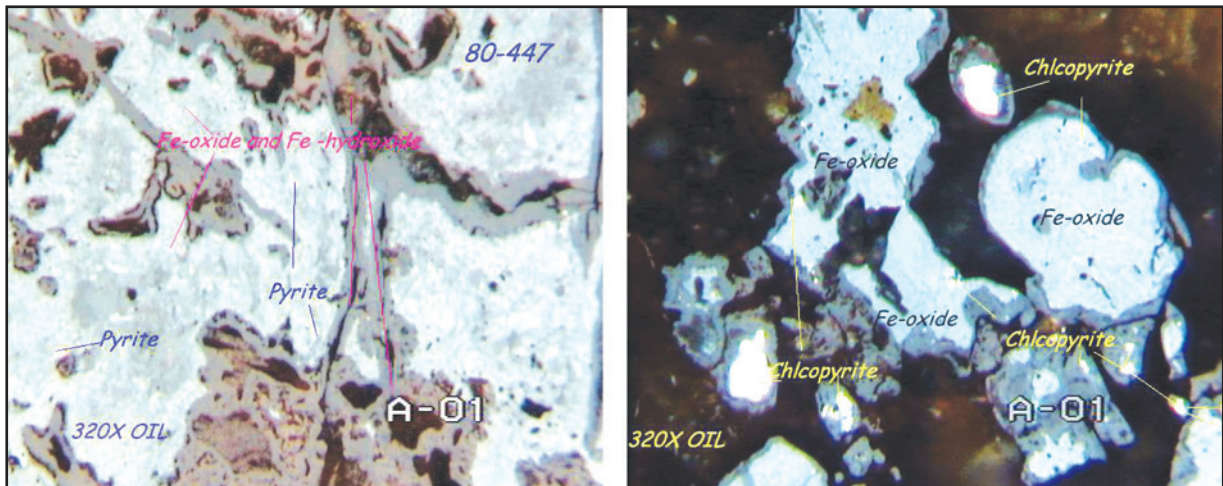
شکل ۵- تشکیل کانی پیریت پس از تبلور کربنات‌ها.



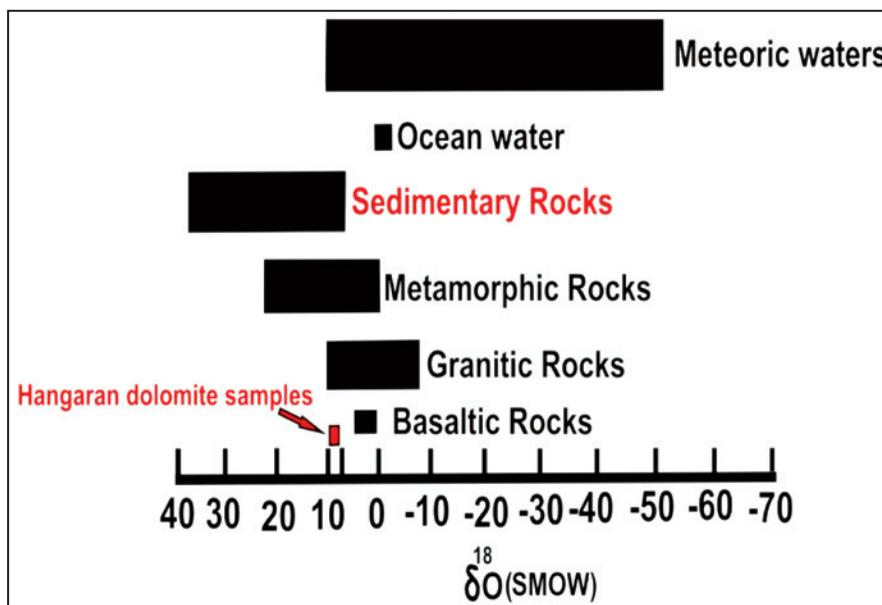
شکل ۴- قطع‌شدگی دولومیت توسط رگچه سیلیسی دارای کانی‌های سولفیدی.



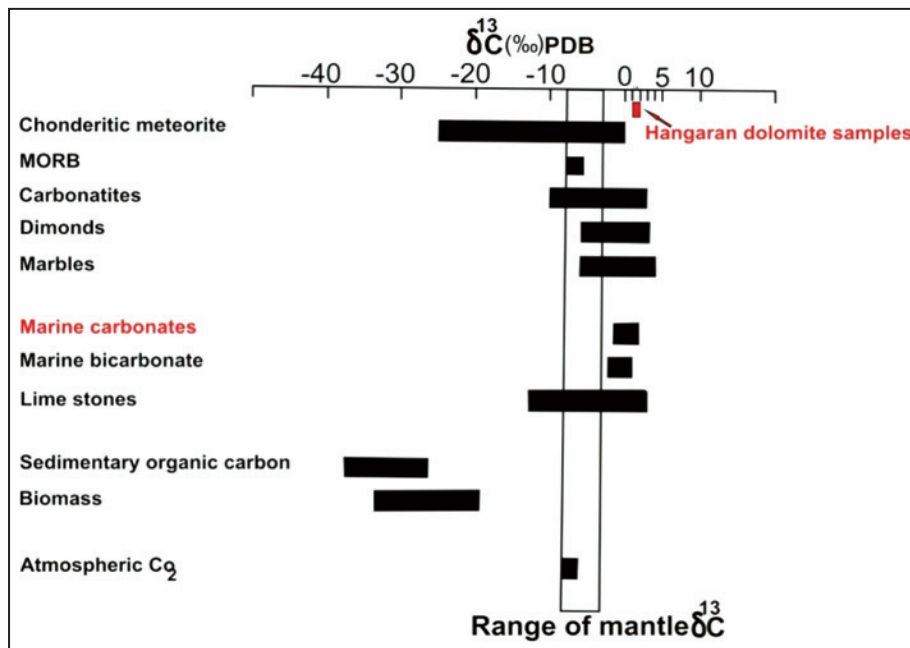
شکل ۶- کانی سازی فاز سولفیدی پس از تشکیل فاز کربناتی و سیلیس.



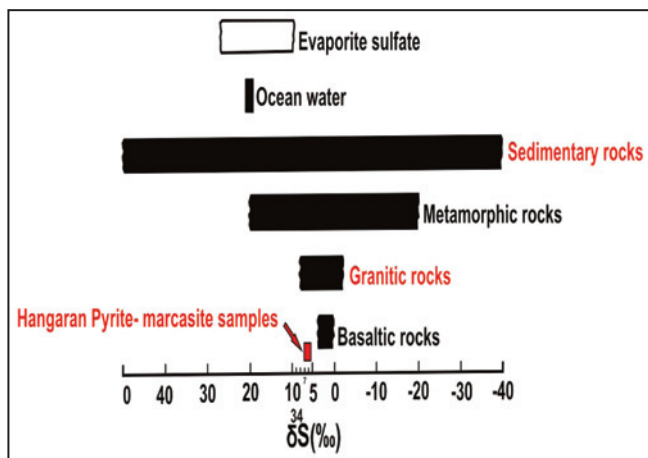
شکل ۷- دگرسانی کانی‌های پیریت و کالکوپیریت به اکسید و هیدروکسید آهن.



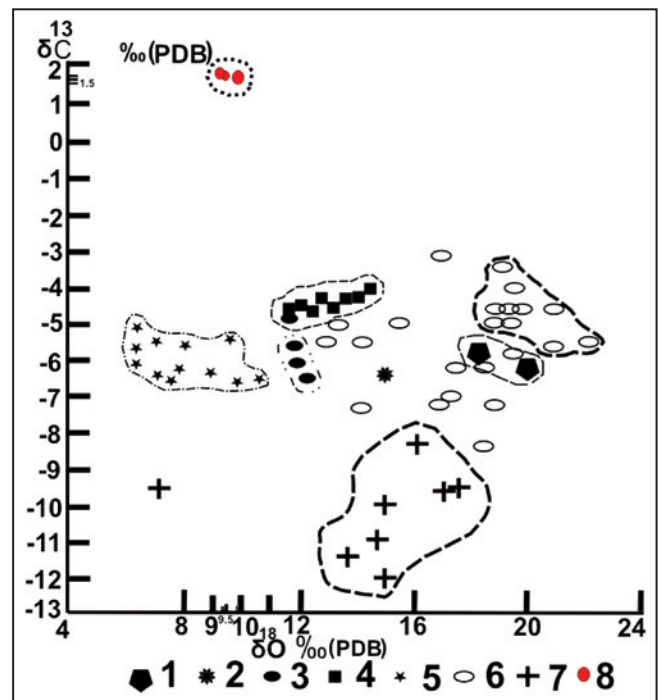
شکل ۸- منابع احتمالی برای ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در کربنات‌های هنگران (Hoefs, 1997).



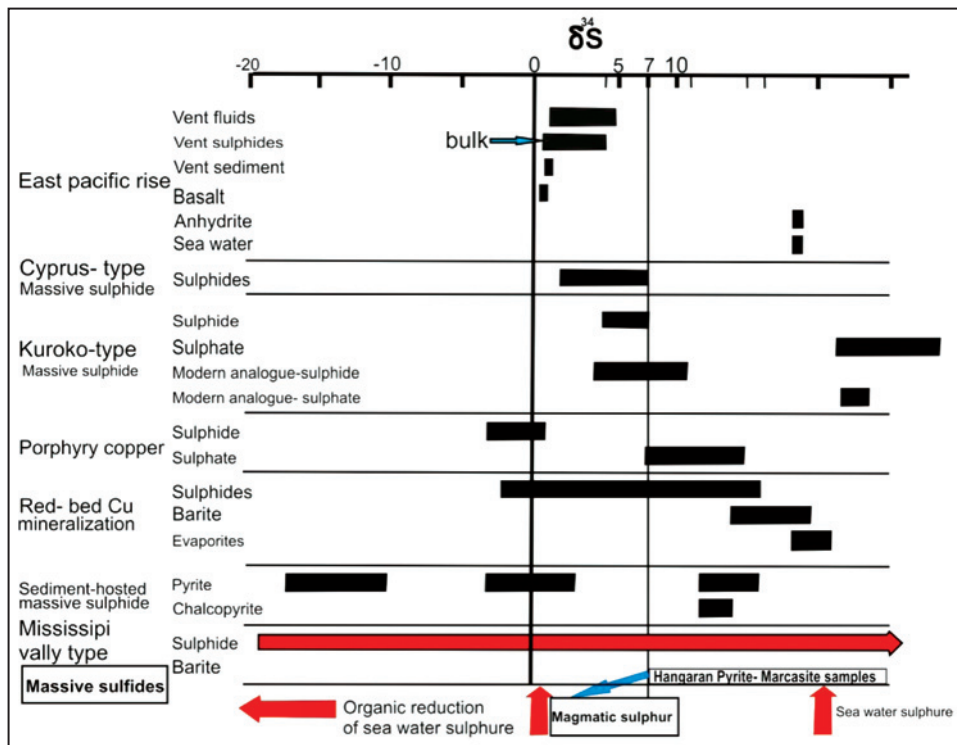
شکل ۹- منابع احتمالی برای ایزوتوپ کربن ۱۳ در کربنات‌های هنگران (Rollinson, 1993).



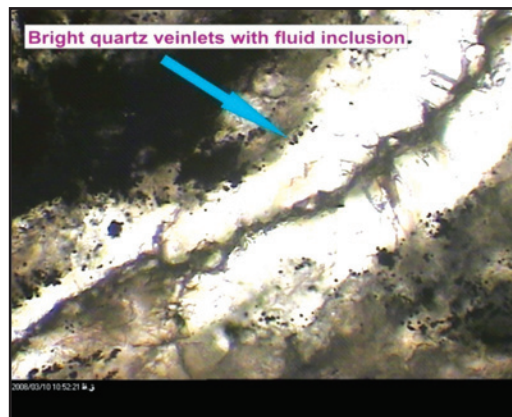
شکل ۱۱- منابع احتمالی ایزوتوپ گوگرد ۳۴ سولفیدهای هنگران.



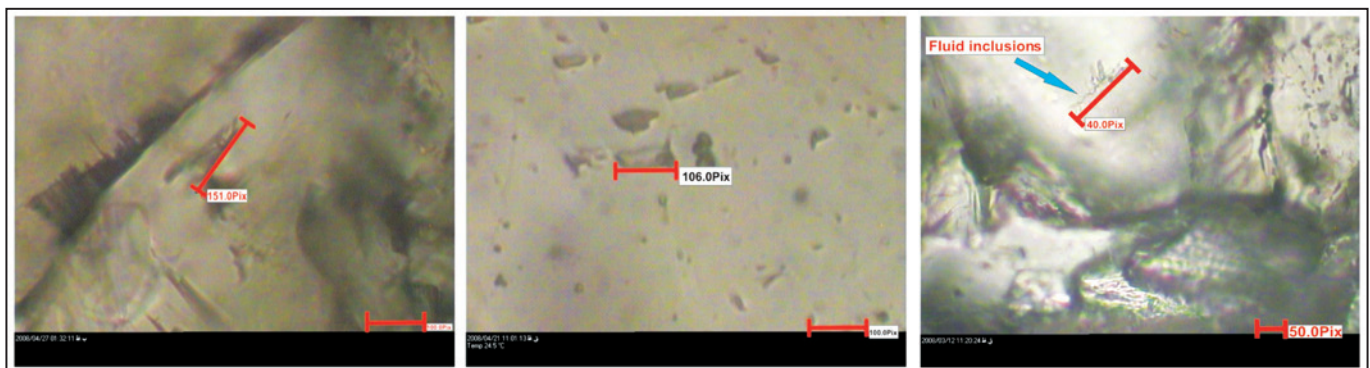
شکل ۱۰- مقایسه مقادیر مختلف $\delta^{13}\text{C}$ و $\delta^{18}\text{O}$ در کربنات‌های لیستونیت‌های برخی کشورها و لیستونیت هنگران (ایران). ۱ و ۲: نهشته‌های بروسکو در اورال مرکزی، ۳: نهشته‌های بستایب در شمال قزاقستان، ۴: نهشته‌های زلامیت در شمال قزاقستان، ۵: نهشته‌های متفاوت در شرق سبیری، ۶: نهشته‌های مادرلود آمریکا، ۷: نهشته‌های برالون پیونیر، کانادا (Baksheev et al., 2001) و ۸: نهشته‌های طلا دار هنگران، ایران. بر پایه داده‌های جدول ۵.



شکل ۱۲- مقادیر ایزوتوپ گوگرد ۳۴ برای کانی‌های سولفیدی نهشته‌های گرمایی (Ohmoto & Rye, 1979).



شکل ۱۳- نمونه‌ای از رگچه پر شده از کوارتز روشن دارای میانبار سیال در لیستونیت نوع کربناتی - سیلیسی هنگران.



شکل ۱۴- تصاویر میکروسکوپی از میانبارهای سیال در لیستونیت‌های نوع کربناتی - سیلیسی هنگران. در این تصاویر ۳ نوع مختلف میانبار سیال تشخیص داده شده است که ۲ نوع آن دو فازی (L+V) و (H_2O-CO_2) و نوع سوم تک‌فازی (CO_2) است. بیشتر میانبارهای سیال مطالعه‌شده اولیه، بی‌شکل و بسیار ریز هستند.

جدول ۱- توالی همبود (پاراژنتیک) کانی‌ها در سنگ‌های لیستونیتی سولفیددار.

Minerals	Timeline			Altration
	initial	Main	Late	
Pyrite	...	—————		
Marcasite	...	—————		
Bravoite		—————	..	
Calcopyrite	..	—————		
Magnesite	...	—————		
Dolomite	..	—————		
Quartz			.. —————	..
Muscovite			—————
Hematite				—————
Geothite				—————
Azorite				—————
Chlorite				—————

جدول ۲- نتایج تجزیه نقطه‌ای سولفیدهای موجود در لیستونیت‌های هنگران.

Sample	Fe	Co	Ni	Cu	As	S	TOTAL
HLC-10CA (Pyrite)	46.63	0	0	0	0	53.76	100.39
HLC-10CA (Pyrite)	46.70	0	0.02	0	0	54.23	100.95
HLC-10CA (Pyrite)	46.97	0	0	0	0.01	53.72	100.70
HLC-10CA (Pyrite)	46.51	0	0.01	0	0	53.67	100.19
HLC-10CA (Pyrite)	45.46	0	0.13	0.01	0.30	54.05	99.95
HLC-10CA (Pyrite)	45.57	0	0.13	0	0.16	53.50	99.36
HLC-10CA (Pyrite)	46.54	0	0.03	0	0	54.32	100.89
HLC-10CA (Marcasite)	46.81	0	0	0	0	53.93	100.74
HLC-10CA (Marcasite)	46.16	0	0	0	0.02	54.02	100.20
HLC-10CA (Marcasite)	46.48	0	0.48	0	0.24	54.69	101.18
HLC-4-1 (Bravoite)	16.93	1.37	29.57	0.07	0.04	52.32	100.30
HLC-4-2 (Bravoite)	45.46	0.03	1.10	0.03	0.63	53.01	100.26
HLC-4-3 (Bravoite)	41.78	0.11	4.56	0.05	0.58	53.02	100.10
HLC-4-4 (Bravoite)	9.44	1.18	36.58	1.12	0	51.75	100.07
HLC-4-5 (Bravoite)	44.6	0.03	0.67	0.09	0.69	52.89	98.97
HLC-4-6 (Bravoite)	7.48	3.13	36.49	1.24	0.18	51.92	100.44
HLC-4-7 (Bravoite)	43.3	0.07	0.41	0.09	0.47	50.93	95.27

جدول ۳- نتایج تجزیه نقطه‌ای کربنات‌های لیستونیت‌های هنگران.

Sample	Cao	Mgo	Feo	Mno	TOTAL	Ca	Mg	Fe	Mn
7HLC-3-1 (Magnesite)	0.32	44.78	5.31	0.1	50.51	0.01	1.864	0.124	0.002
7HLC-3-2 (Dolomite)	29.86	19.39	3.68	0.08	53.01	0.999	0.903	0.096	0.002
7HLC-3-3 (Magnesite)	0.18	43.13	7.1	0.15	50.56	0.005	1.822	0.168	0.004
7HLC-3-4 (Dolomite)	30.22	22.14	0.87	0	53.23	0.98	0.998	0.022	0
7HLC-3-5 (Dolomite)	30.05	20.15	2.79	0.07	53.06	0.996	0.93	0.072	0.002
7HLC-3-6 (Magnesite)	0.22	44.28	6.11	0.11	50.72	0.007	1.848	0.143	0.003
HLC-10A1 (Dolomite)	33.02	21.42	0.05	0.12	54.61	1.049	0.947	0.001	0.003
HLC-10A2 (Dolomite)	32.01	20.95	0.09	0.15	53.2	1.044	0.95	0.002	0.004

جدول ۴- مقادیر ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن در دولومیت لیستونیت‌های کربناتی - سیلیس هنگران.

شماره نمونه	محدوده مورد مطالعه	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB)	شماره نمونه	محدوده مورد مطالعه	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB)
30	"	6.0	-6.8	1	مانرلود آمریکا	13.0	-5.4
31	"	6.0	-5.2	2	"	13.5	-5.4
32	"	7.0	-6.5	3	"	14.0	-5.4
33	"	7.0	-5.5	4	"	14.5	-5.4
34	"	7.5	-6.5	5	"	15.0	-4.5
35	"	8.0	-5.5	6	"	14.2	-5.3
36	"	8.0	-6.4	7	"	15.0	-5.8
37	"	9.0	-6.5	8	"	14.2	-5.3
38	"	9.5	-5.3	9	"	15.0	-5.8
39	"	10.0	-6.7	10	"	15.0	-5.9
40	"	11.0	-6.5	11	"	16.5	-7.0
41	پستلیب (شمال قزاقستان)	12.0	-6.5	12	"	17.0	-6.9
42	"	11.0	-5.5	13	"	17.0	-6.0
43	"	11.5	-5.5	14	"	18.0	-8.6
44	"	11.5	-4.7	15	"	18.0	-6.3
45	زلامیت (شمال قزاقستان)	11.5	-4.5	16	"	19.0	-7.0
46	"	11.5	-4.4	17	"	19.0	-5.8
47	"	12.0	-4.3	18	"	18.0	-4.5
48	"	12.2	-4.3	19	"	19.0	-3.9
49	"	13.0	-4.4	20	"	22.0	-5.0
50	"	14.0	-4.3	21	برالون پایونیر کانادا	7.0	-9.5
51	"	14.0	-4.0	22	"	14.0	-11.3
52	"	15.0	-3.9	23	"	15.0	-11.3
53	اورال مرکزی (لیستونیت برسیبی)	18.0	-6.0	24	"	15.0	-10.9
54	"	19.8	-6.1	25	"	15.5	-11.9
55	شرق سیبری	14.5	-6.4	26	"	16.0	-8.0
56	هنگران (شرق ایران)	1.66	9.37	27	"	16.9	-9.5
57	"	1.68	9.35	28	"	16.0	-9.2
58	"	1.57	9.98	29	شرق سیبری	6.0	-6.2

جدول ۵- مقادیر ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و کربن ۱۳ ۵۵ کانی کربناتی از لیستونیت‌های برخی از کشورها و مقایسه آن با لیستونیت‌های هنگران.

شماره نمونه	کانی	$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB)
07-HLC-1	دولومیت	1.67	9.374	-20.9
07-HLC-2	دولومیت	1.68	9.353	-20.92
07-HLC-3	دولومیت	1.57	9.982	-20.31

جدول ۶- مقادیر به دست آمده از ایزوتوپ گوگرد ۳۴ زوج کانی پیریت - مارکاسیت لیستونیت‌های کربناتی - سیلیسی هنگران.

شماره نمونه	کانی	D ³⁴ S (CDT)
07- HLC- 4	پیریت - مارکاسیت	D ³⁴ S (CDT)
07- HLC- 4	پیریت - مارکاسیت	D ³⁴ S (CDT)
07- HLC- 4	پیریت - مارکاسیت	D ³⁴ S (CDT)
07- HLC- 4	پیریت - مارکاسیت	D ³⁴ S (CDT)
07- HLC- 4	پیریت - مارکاسیت	D ³⁴ S (CDT)
07- HLC- 4	پیریت - مارکاسیت	D ³⁴ S (CDT)

جدول ۷- نتایج مطالعه میان‌راه‌های سیال در رگچه‌های سیلیسی لیستونیت‌های نوع کربناتی - سیلیسی منطقه هنگران.

شماره ادخال سیال	نوع فاز در ادخال	نوع ادخال	شکل ادخال	اندازه بر حسب میکرون	درجه پرشدگی	دمای ذوب یخ (T _m) (°C)	دمای همگن شدگی (T _h)	دمای ذوب CO ₂ (T _m)	دمای همگن شدگی CO ₂ (T _h)	دمای ذوب کلاتریت (°C)	درصد وزنی نمک (Wt%)	چگالی
۱	V+L	اولیه	دارای یخ	۲۰*۴	۰/۹۱	-۳/۲	۱۳۶	-	-	۳/۵	۵/۱۶۵۷	۰/۹۶۸۰
۲	V+L	اولیه	بی شکل	۱۲۵*۴	۰/۹۲	-۰/۹	۱۵۷	-	-	۴/۲	۱/۴۸۷۱	۰/۹۲۵۲
۳	V+L	اولیه	بی شکل	۲۸*۴	۰/۹۶	-۱/۲	۱۱۰	-	-	۴/۱	۱/۹۷۹۵	۰/۹۶۷۲
۴	CO ₂	اولیه	دارای یخ	۱۰/۶*۳/۵	۰/۸۸	-۲/۶	۲۳۰	-۵۷/۷	۱۰	-	۴/۲۳۲۱	۰/۷۶۰۸
۵	CO ₂	اولیه + ثانویه	دارای یخ	۱۵*۳/۵	۰/۹۲	-۱/۷	۲۸۰	-۵۶/۸	۷/۷	-	۲/۷۹۳۹	۰/۷۷۱۵

کتابنگاری

- آقاباتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- اشبک، پ.، ۱۳۸۸- بررسی ژنز لیستونیت‌ها و کانه‌زایی احتمالی طلا در منطقه هنگران، جنوب بیرجند، دانشگاه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۴۲ صفحه.
- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۹- تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضعیت ساختمانی در ارتباط با حوضه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت، شماره ۸۲، صفحات ۱۹ تا ۲۸.
- باباخانی، ع.ر. و منظمی باقرزاده، ر.، ۱۳۸۴- مطالعه ژئوشیمی، کانی‌سنگین، خاستگاه و پتانسیل طلا در لیستونیت‌های هنگران- ناحیه مختاران، فصلنامه علوم زمین، شماره ۵۷، صفحات ۹۸ تا ۱۰۹.
- زرین کوب، م. ح.، امینی، ص.، آقایی، ع. و کریم‌پور، م. ح.، ۱۳۸۴- کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، موقعیت ساختمانی و ارائه مدل ژنتیکی برای لیستونیت‌های خاور ایران، مجله انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال سیزدهم، شماره ۲.
- زرین کوب، م. ح.، ۱۳۷۲- بررسی مواد معدنی با تأکید بر واکنش‌های آب‌زا و پدیده لیستونیتی شدن در منطقه سهل‌آباد بیرجند، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- سعیدی، م. و فرهادیان، س. ح.، ۱۳۷۰- سیر تکاملی تکنیکی کمربندهای کوهزایی تیس در زون سیستان، فصلنامه علوم زمین، سال سوم، شماره ۱۸، صفحه ۱۲ تا ۲۰.
- عابدی، آ. و ضیایی، م.، ۱۳۷۶- مطالعات اکتشافی بر روی لیستونیت‌های حاصل از سرپانتینیت‌ها در منطقه بیرجند، مجموعه مقالات همایش شناخت توانمندی‌های معدنی شرق کشور، دانشگاه صنایع و معادن بیرجند.
- علوی‌تهرانی، ن.، ۱۳۶۱- مجموعه سنگ‌های افیولیتی در ایران، سازمان تحقیقات زمین‌شناسی و معدنی کشور، صفحه ۵۹ تا ۷۲.
- منظمی باقرزاده، ر.، ۱۳۸۲- گزارش اکتشاف طلا در لیستونیت‌های مناطق مختاران و سهل‌آباد (مرحله اکتشاف نیمه‌تفصیلی) به انضمام نقشه‌های ۱:۵۰۰۰ نواحی مورد مطالعه طرح اکتشاف مواد معدنی در جنوب خراسان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی مدیریت منطقه شمال شرق.
- واله، م. و سعیدی، م.، ۱۳۶۸- بررسی چینه‌شناسی واحدهای سنگی کرتاسه فوقانی- سنوزوییک، کپه‌داغ خاوری، فصلنامه علوم زمین، سال ششم، شماره ۲۴، صفحه ۱۷ تا ۳۰.

References

- Abodiné, S. B., 1978- Genetic of listwenites of the Armenian republic and their metalogenic significance, (Zapiski Armi an skoe otdelenie veseoiliznogo), mineralogicheskogo obshchestva, No.9, PP: 98-109.
- Akbulut, M., Piskin, O. & Karayigit, A., 2006- The genesis of the carbonatized and silicified ultramafics know as listvenites: a case study from the Mihaliccik region (Eskisehir), NW Turkey. Geological Journal, 41, 557-580.
- Auclair, M., Trottier, J., Jebrak, M. & Chartrand, F., 1993- Mineralogy, geochemistry, and paragenesis of the eastern metals serpentinite-associated Ni-Cu-Zn deposit, Quebec Appalachians. Economic Geology, 88, 123-138.
- Baksheev, I. A., Prokofiev, V. Yu. & Stinov, V. I. U., 2001- Genesis of metasomatic rocks and mineralized veins at the Berezovskoe deposit, central urals: Evidence from fluid inclusion and stable isotopes, Faculty of geology, Moscow state university, Vorob evy groy, Moscow, 119899 Russia, Vol.39, Suppl.2, 2001, PP:129-144.
- Baksheev, I. A., Ustinov, V. I. & Kudryavtseva, O. E., 2004- Isotopic geochemistry of mesothermal deposition of talc, tungsten, and gold: Evidence from mineral deposits of the Urals. Geochemistry International, Vol.42, No.8, PP.736-743.
- Barens, I., O'Neil, J. R., Rapp, J. B. & White, D. E., 1973- Silica-carbonate alteration of serpentinites: wall rock alteration in mercury deposits of the California Coast Ranges. Economic Geology, 68: 388-398.
- Bök, I. I., 1953- Listvenites, their special features, varieties and conditions of formation, Isvestiya Akademi Nauk Kasakhshoi SSR, Ser. Geol.22, PP:3-22.
- Buisson, G. & Leblanc, M., 1985- Gold bearing listweanite (carbonatic ultramafic rocks) from ophiolite complexes. Economic Geology, V.80, PP: 2028-2029.
- Buisson, G. & Leblanc, M., 1986- Gold bearing listweanite (carbonatic ultramafic rocks) from ophiolite complexes. In: Gallagher, M. J., Ixer, R. A., Neary, C. R. & Prichard, H. M., (Eds) Metallogeny of basic and ultrabasic rocks, Proceedings. The Institution of Mining and Metallurgy, London, p. 121-131.
- Burdaiskii, E. A. & Lubouchicov, M. G., 1936- A giant structurally induced permeability, Kalgoorlie, Special publication of the geological society of south Africa, No, 7, PP: 79-86.
- Camp, V. E. & Griffis, R. J., 1982- Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. Lithos., ISSN 0024-4937; NOR., DA. 1982.
- Colakoglu, A. R., 2009- Geology and geochemical characteristics of Gevas listwaenites (Van-Turkey). Yerbilimleri, 30(1), 59-81.
- Halls, R. & Zhao, R., 1994- Listvenite and related rocks: Perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbuan, Co. Mayo, Republic of Ireland, Department of geology, Royal school of mines, Imperial collage, London, SW 72 BP, UK, Vol.56, PP.307-313.
- Henderson, F. B., 1969- Hydrothermal alteration and ore deposition in serpentinite-type mercury deposits. Economic Geology. V.64, 489-499.
- Hoefs, J., 1997- Stable isotope geochemistry, Institute of geochemistry, University of Gottingen, Gold schmidtstrabel, D-37077, Gottingen, Germany.
- Jenlin, G. R. T., Fullick, A. E., Farrow, C. M. & Bowes, G. E., 2009- Geol: a formation composition progress for modeling stable isotopes in cooling closed system, compact, Geosci, Vol:17, PP: 391-412.
- Kashkai, M. A. & Allahverdiev, Sh. I., 1963- Listvenites, their origin and classifications, Institute geology in Akad nauk Azebaid zhanskoi. S.S.R, Baku, PP:142.

- Kashkai, M. A. & Allakverdiev, Sh. I., 1965- Listwaenites, their origin and classification. (Izdat. Akad. Nauk Azerbaidzhanskoï SSSR. Baku, 1965). U.S. Geological Survey (translated by Vitaliano, D.B. for USGS in 1982), 212 pp.
- Kozinsky, S., Popevic, A., Karamat, U. S. & Kurdykov, E., 2000- Prograde metamorphic transformation of mafic rocks in the contact aureole beneath the zlatibor ultramafic massif. In: Karamata, S., Jankovic, S., (EDS), Proceedings of the international symposium (Geology and metallogeny in the Dinarides and the Vardan zone), Academia of sciences and arts of the republic of srpsku, collections and monographs, Department of natural mathematical and technical sciences, Vol.1, PP: 165-170.
- Krutoé, F., 1961- Sivas-Divirgi arasyndaki sahanin, Jeolojisi vejipsli seriler hakkında Müshadeler: Modern Tetkik ve Arama Bülteni Vol. 56, PP:14-25.
- Küleshvich, L. V., 1984- Listvenites in the greenstone of eastern Karelia, Geologia Rudnykh mestorozhndii, Geology of deposits, PP:112-116.
- Leblanc, M., 1986- Co-Ni arsenide deposits with accessory gold in ultramafics rocks from Morocco.
- Leblanc, M., 1988- Cobalt arsenide orebodies related to and upper proterozoic ophiolite: Bou Azzer (Morocco). Economic geology, 77: 162-175.
- Leblanc, M., 1991- Platinum- group elements and gold in ophiolitic complexes: distribution and fractionation from mantle to oceanic floor. In peters. T.J. Nicolas, A. & Coleman, R. G., (eds). Ophiolite genesis and evolution of the oceanic lithosphere. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 231-260.
- Leblanc, M. & Billaud, P., 1982- Cobalt arsenide orebodies related to an Ypper proterozoic ophiolite: Bou Azzer (Morocco). Econ. Geol., 77, 162-175.
- Leblanc, M. & Fischer, W., 1990- Gold and platinum group elements in cobalt-arsenide ores: hydrothermal concentration from a serpentinite source rocks (Bou Azzer, Morocco). Mineralogy and petrology, 42, 197- 209.
- Mikháillofve, Z., 1981- Accessory spinels of the two main zones of Alpine ultramafic rocks in Yugoslavia, Academie serbe des scienset et Naturalles, Bulletin 21, PP:13-26.
- Ohmoto, H. & Rye, R. O., 1979- Isotopes of sulfur and carbon in Baren's H.L, Geochemistry of hydrothermal ore deposits, wiely, New york, PP: 509-567.
- Pipino, G., 1980- Gold in Ligurian ophiolite (Italy), in Panayiotou, A., (ed). Proceedings of International ophiolite symposium, 1979, Nicosia (Lefkose), Cyprus: The Geological Survey Department, Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia, Cyprus, p.765-780.
- Pluchkue, J. P., 1965- Secondary cleavages in ductile shear zones. Journal of structural geology. Vol. 6, PP: 439-442.
- Rose, G., 1837- Mineralogisch-geognostische Reise nach de mural, dem Altalund dem Kaspischen Meere, Vol.2, PP:641-823.
- Rollinson, H. R., 1993- Using geochemical data: Evaluation, Presentation and Interpretation, Longman Singapore publishers(Pre)Ltd, New york, 19th edition, PP. 266- 315.
- Safanov, Yu. G., 1997- Hydrothermal gold deposits: Distribution, geological-genetic types, and productivity of ore-forming systems. Geology of ore deposits, Vol.39, No.1, PP:20-32.
- Sazanov, V. N., 1975- Listvenitization and mineralization (Listvenitizaciya iorudneniye) Izdatelistvo Nauka (Science Publishers, Moscow).
- Schandl, E. S. & Naldrett, A. J., 1992- CO₂ metasomatism of serpentinites, south of Timmins, Ontario. Canadian Mineralogist, Vol.30, PP:93-108.
- Shcherban, I. P. & Borovikova, G. A., 1969- Thermodynamic data on the genesis of listvenites and listwaenitized rocks, Doklady Akademii Nauk. S.Sr, Vol. 191, PP:1389-1392.
- Shields, H. N., 1983- Comparative geology and geochemistry with respect to precious metal mineralization of selected California Coast Range mercury mining districts: Unpublished MS thesis, university of Nevada, Reno, USA, 122p.
- Smirnov, V. I., 1976- Geology of mineral deposits, 779 p.
- Spiridonov, E. M., 1991- Listwaenites and Zodites, International geology review 33, Vol.4 , PP: 397- 407.
- Stepanov, V. A., 2000- The Bamsk gold deposit, Stanovoi range, Russia, Amur institute of intergrated research, far east division, Russian Academy of sciences, Relochnyi per,1, Blagoveshchensk, 675000 Russia, Geology of ore deposits, Vol.43, No.1, 2001, PP.33-45.
- Tirral, R., Bell, I. R., Griffis, R. J. & Camp, V. E., 1983- The Sistan suture zone of eastern Iran. Geological Society of America Bulletin 94, 134–150.
- Tuysuz, N. & Erler, A., 1993- Geochemistry and evolution of listwaenites in the Kagizman region, Chemie der Erde, Vol.53, PP: 315-329.
- Ucurum, A., 1998- Application of the Correspondence -Type Geostatistical Analysis on the Co, Ni, As, Ag and Au Concentrations of the Listwaenites from Serpentinites in the Divirgi and Kuluncak Ophiolitic Mélanges. Tr. J. of Earth Sciences, 7, 87-95.
- Ucurum, A., 2000- listwaenites in turkey: perspectives on formation and precious metal with refrence to occurances in east- central Anatolia, Department of geological enjineering , Cumhuriyet university, 58140 Sivas , Turkey, Ofioliti, 2000, Vol25(1), PP:15–29.
- Zhilyaeva, A. I., Naumov, V. B. & Kudryavtseva, G. P., 2000- Mineral composition and fluid regime of formation of the Yubileinoe gold deposit (Transbaikalian region, Russia). Geology of ore deposits, Vol.42, PP.57-67.
- Ziyakirmaci, M. & Akdag, K., 2005- Origin of dolomite in the late Cretaceous-Paleocene limestone turbidities, Eastern pontides, Turkey, Sedimentary geology, Vol. 181, PP: 39-57.

Investigation of Au-Bearing Listvenite Using Mineralogy, Geochemistry, Fluid Inclusion and Stable Isotopes (Oxygen, Carbon and Sulfur) in Ophiolite-Melange Zone of East Iran (Hangaran Area, South Birjand)

R. Monazzami Bagherzadeh ^{1*}, H. Mirnejad ², P. Eshback ³ & M. H. Karimpour ⁴

¹ Ph.D. Student, Ferdowsi University of Mashhad; Geological Survey of Iran, Northeast Territory, Mashhad, Iran.

² Assistant Professor, Faculty of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

³ Ph.D. Student, International Unit, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

⁴ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Received: 2010 June 16

Accepted: 2011 October 22

Abstract

Listvenites or ophiocarbonates are considered important for exploration of precious and base metals particularly Au, Ag, Cu, As and Hg. These rocks, which crop-out dominantly in ophiolite-mélange zones and in the vicinity of main faults and shear zones, have formed as the result of hydrous and carbonic alteration of ultramafic rocks. Listvenites occur extensively in eastern Iran. Based on petrography, Hangaran listvenites are grouped into three major types: 1. Carbonatic listvenite (type I), 2. Silicic listvenite (type II), and 3. Sulfide-bearing silicic listvenite with brecciated texture (type III). Gold contents of listvenites is generally low and the highest concentration (290 ppb) has been found in type III. Studies of mineral concentrates from stream sediments reveal the presence of gold, pyrite, chalcopyrite, cinnabar and native copper. Gold grains reach to a maximum sizes of 80 microns, and they are often associated with pyrite. Electron microprobe analyses on several sulfides and carbonates in Hangaran listvenites show that sulfide minerals are mainly pyrite, marcasite, bravoite and to a lesser amount chalcopyrite, and that many pyrite grains have been altered to marcasite. Important carbonated minerals are magnesite and dolomite. The presence of ubiquitous bravoite zonation that results from alternations in Ni content indicates periodic changes in the physicochemical conditions of the hydrothermal solution. Petrographic studies and paragenetic sequence of minerals show that magnesite and dolomite formed prior to the mineralization stage, which was then followed by the formation of sulfides (mainly pyrite). Studies on the oxygen and carbon isotopes in 3 dolomite samples ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 9.353\text{-}9.982\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = 1.57\text{-}1.67\text{‰}$) show that oxygen and carbon can originate from oceanic waters, and that dolomite has formed due to the circulation of this water in ultramafic rocks and their subsequent alteration. Considering the variation in marcasite-pyrite pairs from Hangaran silicic listvenite ($\text{D}^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ value 5.7-7.9 ‰), it seems that sulfur has originated from granitic rocks in south of the study area. Taking into account the extensive outcrops of serpentinized ultramafic rocks and granite in the region can be considered the source of Au, Ag and base elements such as Cu, Pb, Zn, Hg, As, Sb in related to granite masses, and Cr, Ni, Ti and Fe in related to serpentinized ultramafic rocks. Fluid inclusion studies on mineralized quartz in Hangaran listvenites show that the hydrothermal fluid affecting the host rocks was low salinity and had a maximum temperature of 280°C.

Keywords: Listvenite, Gold, Stable isotope, Ophiolite-melange, Hangaran, Birjand.

For Persian Version see pages 131 to 144

*Corresponding author: R. Monazzami Bagherzadeh; E-mail: rmonazzami@yahoo.com