

ژئوشیمی اسکارنهای انجرده و ارتباط آن با کانی زائی اقتصادی مس در آذربایجان - ایران

اردشیر هزارخانی

استادیار

دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

بر اساس مطالعات سیالات درگیر، ترکیب شیمیائی کانی‌ها، پاراژنز و ارتباط آن‌ها، دو رخداد دگرسانی گرمایی و کانی‌زائی وابسته در اسکارن انجرده مشخص شد. رخداد اول (Stage I) بوسیله اولین جهش‌های حاصل از فعالیت مایعات ماگمایی غنی از آهن، که باعث تشکیل گارنت‌هایی با زون‌بندی نوسانی (Oscillatory)، همراه با پیرکسن (دیوپسید و هدنبرژیت) + ولاستونایت و مگنتیت در حرارت بالا (445°C)، مشخص می‌باشد. رخداد دوم (Stage II) در حرارت پائین (360°C) وقتی که سیستم فرو می‌باشد، که خود با تشکیل کانی‌های حرارت پائین تر مانند ترمولیت - اکتینولیت، اپیدوت، کوارتز، کلسیت، آپاتیت، تیتانیت، هماتیت و نهشت مس مشخص است چنین نتیجه‌گیری شده است که کانی‌زائی مس به علت کاهش و افزایش فوگاسیته اکسیژن ($f\text{O}_2$) و (pH) در حرارت‌های پائین تر (400°C) و در آخرین رخداد دگرسانی اسکارن انجرده اتفاق افتاده است.

بررسی‌های دقیق میکروسکوپی در اسکارن‌های انجرده نشان می‌دهند که، گارنت‌های شاخص در اسکارن انجرده، به علت تناوب‌های ممتد در نسبت ($\text{Al}^{+3}/\text{Fe}^{+3}$) و تفاوت ترکیب شیمیائی از آندرادایت ۱۰۰ در صد تا آندرادایت ۷۶ - گروسولار ۲۴ درصد، دارای زون‌بندی نوسانی (Oscillatory) پیچیده شده است. زون‌های منفرد اساساً دارای ترکیب شیمیائی تقریباً آندرادایت (End-member andradite) و یا آندرادایت با حدوداً ۲۰ درصد مولکولار گروسولر می‌باشند. افزایش فلاکس‌های مایع غنی از آهن در سیستم باعث تبلور گارنت آندرادایت نزدیک به خالص (End-member) می‌شده، چرا که سیستم بوسیله مایع بافر می‌گشته است. منشاء آلومینیم در سیستم از توالی مارن‌ها و سنگ آهک‌های کرتاسه می‌باشد، زیرا مقدار کلسیم موجود در محلول‌های ماگمایی بسیار ناچیز و ثابت است. نهشت اقتصادی مس در مرحله دوم دگرسانی اسکارن انجرده و در اثر تغییر در شرایط مربوط به فوگاسیته اکسیژن ($f\text{O}_2$)، (pH) و حرارت (T) بوده است.

کلمات کلیدی

ژئوشیمی، انجرده، اسکارن، مس اقتصادی، ایران.

Anjerd Skarn Geochemistry and its Association with Economic Copper Mineralization, Azarbaijan-Iran

A. Hezarkhani

Assistant Professor

Department of Mining, Metallurgy and
Petroleum Engineering, Amirkabir University

Abstract

Based on the fluid inclusion characterizations, mineral compositions, paragenesis, and their relationships, two stages of hydrothermal alteration and related mineralization within the Anjerd skarn have been identified. The first stage (stage I) was produced by the early pulses of Fe-rich magmatically derived fluids, which caused the formation of oscillatory zoned garnets, followed by pyroxene (diopside and hedenbergite) + wollastonite and magnetite at high temperatures ($\sim 445^{\circ}\text{C}$). The second stage (II) occurred at lower temperature ($\sim 360^{\circ}\text{C}$) when the system collapsed, and is characterised by lower the

temperature minerals like tremolite-actinolite, epidote, quartz, calcite, apatite, titanite, hematite crystallization and copper deposition. It is concluded that the Cu mineralization was due to decreasing and increasing the fO_2 and pH respectively, in lower the temperature ($<400^\circ C$) in the last stage of alteration in the Anjerd skarn.

A detailed mineralogical study presents that the fluctuations in the Al^{+3}/Fe^{+3} ratio at Anjerd skarns, caused a complex oscillatory zoning from andradite₁₀₀ to andradite₇₆-grossular₂₄ in the index garnets. Individual zones are typically composed either of near end-member andradite or andradite containing approximately 20 mole % grossular. Introduction of fresh batches of Fe-rich fluid caused crystallization of near end-member andradite garnet since the system was buffered by fluid. The source of Al in the system was from Cretaceous marls and limestone sequences, since the Al content available from the magmatic solutions is very low and almost constant. Changes in thermodynamic parameters like fO_2 , pH and T within the second stage of skarn alteration in Anjerd, caused an economic copper deposition.

Keywords

Geochemistry, Anjerd, Skarn, Economic Copper, Iran

مقدمه

تزریق ماگماهای آبدار (Hydrous magmas) در ترازهای کم عمق پوسته زمین باعث آزاد سازی حجم زیادی مایع به داخل سنگ های در بر گیرنده می شود. در صورتی که سنگ های در بر گیرنده آهنی باشند، اسکارن ها ایجاد خواهند شد [12,13]. یکی از کانی های مشخصه که در اسکارن های حرارت بالا متبلور می گردد آندرادایت است که در این شرایط، یک زون بندی پیچیده و نوسانی (Oscillatory) از خود بروز می دهد [25]. این شکل از تبلور تحت تاثیر تناوب های موقت ترکیب شیمیایی سیستم ارزیابی شده است [19, 24, 25, 27] و بنابر این اساسا می تواند مبین یک تکامل تدریجی ضبط شده در سیستم گرمایی منجر به اسکارن [33] باشد که در این کار تحقیقی به صورت کمی مورد بررسی قرار می گیرد.

جایگاه زمین شناسی

معدن اسکارن انجرد در ۲۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان اهر در استان آذربایجان قرار دارد (شکل ۱) و شامل یک توده دیوریت/گرانودیوریت تا کوارتز مونزونیتی با سن الیگوسن می باشد (پلوتن شیورداغ) که در سنگهای ساب ولکانیک و آهنک های کرتاسه تزریق شده است [2,3,4,28,30]. فعالیتهای آذرین در این ناحیه به جایگزینی دایکهای آندزیتی حجیمی در بخش شرقی ختم می گردد. حداکثر عمق تزریق بین ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ متر تخمین زده شده است. تزریق این توده های آذرین موجب تشکیل اسکارن های انجرد شده است که از نظر شکل و کانی زائی شباهت زیادی به اسکارن های بخش شرقی معدن مس پورفیری سونگون دارند. بررسی جزئی این اسکارن ها در ادامه به تفصیل صورت خواهد گرفت.

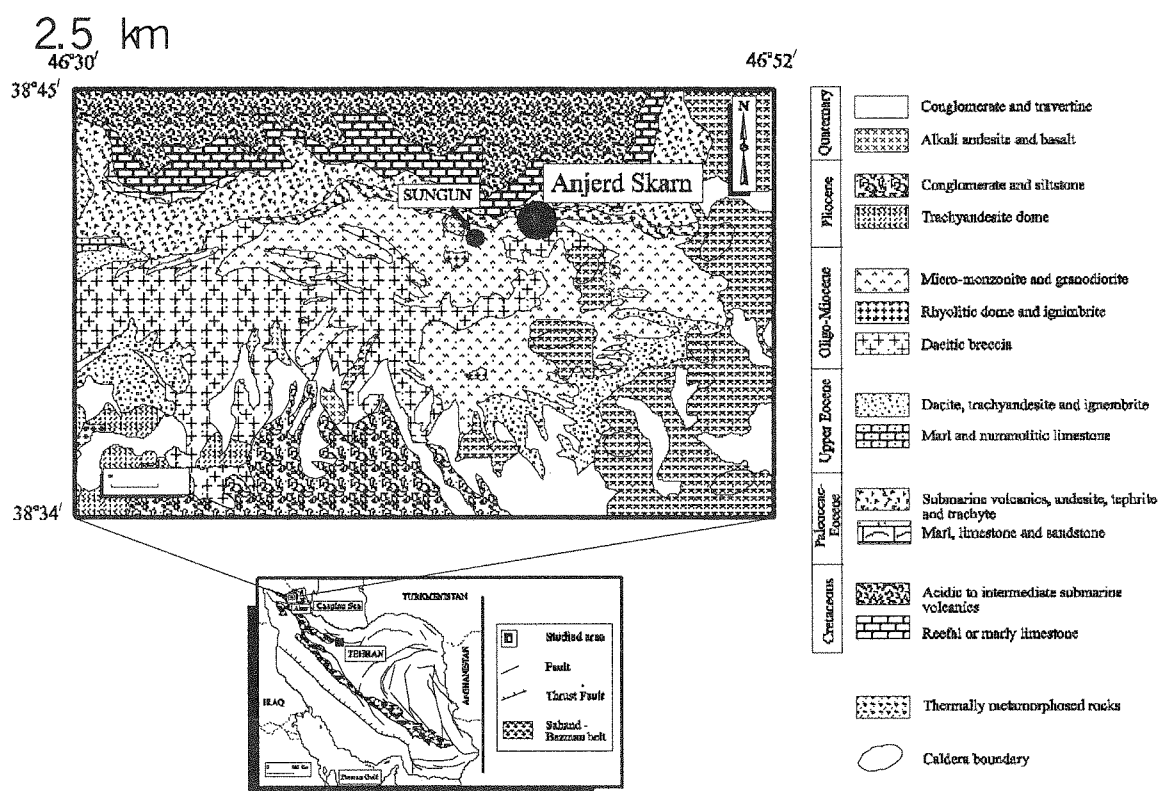
روش های تجزیه ای

ترکیب شیمیایی عناصر اصلی گارنت، پیرکسن و آمفیبول به روش (Wavelength-dispersion spectrometry) و به وسیله دستگاه الکترون میکروپروب مدل (JEOL-8900L) صورت گرفت. شرایط عمل به صورت: ولتاژ شتاب (Acceleration voltage) برابر ۱۵ کیلو ولت (15 kV)، بیم (Beam current) برابر ۳۰ نانو آنگستروم (30 nA) و اندازه نقطه (Spot size) برابر ۲ میکرون (2 μm) و زمان شمارش پیکها (Peak counting) برابر ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. ترکیب شیمیایی معرف گارنت، پیرکسن و آمفیبول در جداول ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب داده شده است. تمرکز عناصر نادر انتخابی در گارنت همچنین توسط بیم (Beam current) ۸۰ نانو آنگستروم (80 nA) و زمان شمارش پیک (Peak counting times) ۳ دقیقه (3 Minutes) اندازه گیری شد.

مطالعات میکروترمومتری بر روی ۲۰ نمونه از گارنت های همراه با بلورهای پیرکسن صورت گرفت. حرارت تغییرات فاز در سیالات درگیر (Fluid inclusions) بوسیله یک (Inc. U.S.G.S.-type gas-flow) (موجود در دانشکده معدن دانشگاه امیر کبیر)،

که توسط عبور گاز نیتروژن از کنار نمونه اندازه‌گیری شد. کالیبریشن دستگاه بوسیله سیالات درگیر سنتتیک صورت گرفت. دقت دستگاه در حرارت شاهد برابر $(\pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C})$ درجه سانتی‌گراد در $(-56.6 \text{ } ^\circ\text{C})$ ، (Triple point of CO_2) و $(\pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C})$ در $(0 \text{ } ^\circ\text{C})$ و درجه سانتی‌گراد (Melting point of ice) و $(\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C})$ در $(374.1 \text{ } ^\circ\text{C})$ درجه سانتی‌گراد (Critical homogenization of H_2O) و $(\pm 9 \text{ } ^\circ\text{C})$ در $(573 \text{ } ^\circ\text{C})$ درجه سانتی‌گراد (Alpha to beta quartz transition). سرعت افزایش حرارت حدودا $(1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min})$ در نزدیکی انتقال فاز کنترل شد.

کروماتوگرافی گازی (Gas chromatography) جهت تشخیص نسبت‌های دی‌اکسید کربن، آب و متان در سیالات درگیر کانی‌های اسکارن مورد استفاده قرار گرفت. در این آنالیزها از روش [5] که بوسیله [29] تغییر پیدا کرد استفاده شد. در این روش همچنین ۱ تا ۱/۵ گرم از سنگ در دستگاه خرد شده و سپس بوسیله یک کروماتوگراف گازی (HP5890 "On line") که خود دارای تشخیص‌دهنده القای حرارتی و فتوآیونیزیشن (Photoionization) میباشد آنالیز صورت می‌گیرد. نتایج آنالیز در جدول ۱ آمده است.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه انجرد در شرق سونگون [19].

کانی‌شناسی اسکارن انجرد

در حین دگرگونی مجاورتی، آهک‌های مجاور توده (با سن کرتاسه) به اسکارن‌های گارنت - پیرکسن و دورتر از کنتاکت با استوک به مرمر شامل دانه‌های کلسیت با بافت در هم و همراه با ذرات کوارتز و کلریت تبدیل شده است. مارن دارای رنگ سبز تا سبز مایل به خاکستری بوده شامل اذخالی‌های آهکی و لایه‌های نازک سنگ‌های ولکانوکلاستیک دگرسان شده می‌باشد. مارن همچنین بصورت لایه‌های ضخیم (تا ۷۰ متر ضخامت) در بخش‌های بالائی توالی کربناته کرتاسه دیده می‌شود. این لایه‌ها بر روی واحد آهکی توده‌ای که دارای فسیل اندکس اربیتولین (Orbitolina) هستند قرار دارد. دگرگونی مجاورتی هاله‌ای به ضخامت ~ 300 متر ایجاد نموده است که در آن درجه دگرگونی از کلریت فاسیس تا پیرکسن هورنفلس فاسیس در کنتاکت بلافصل افزایش می‌یابد. سیلیکات‌های اولیه شامل گارنت، پیرکسن و به ندرت ولاستونایت می‌باشد. کنتاکت بین مرمر و اسکارن بسیار مشخص بوده و گاهی به همراه عدسی‌هایی از مجموعه سیلیکات‌های ذکر شده در پیش که به طور موازی با لایه‌بندی که خود توسط گسل‌هایی که با زوایای تند سری‌های قبل را قطع کرده‌اند دیده می‌شود. گارنت و کمتر پیرکسن

(دیوپسید - هدرنبرژیت) در نزدیکی کنتاکت دیوریت/گرانودیوریت دیده می‌شود.

اسکارن‌ها اساساً از گارنت، مگنتیت، پیرکسن (دیوپسید - هدرنبرژیت)، آمفیبول (ترمولیت - اکتینولیت)، ولاستونایت، کلسیت و مقادیر ناچیزی از دولومیت، اپیدوت، کوارتز، آپاتیت، تیتانیت، کالکوپیریت (گاه‌ها تا ۱۵ درصد حجمی)، پیروتیت، اسفالریت و گالن تشکیل شده‌اند. براساس تجمع کانی‌شناسی دو تیپ مختلف اسکارن تشخیص داده شده است: گارنت - پیرکسن اسکارن و اپیدوت - آمفیبول اسکارن. اپیدوت - آمفیبول اسکارن با یک زون بشدت سیلیسی و کانی زائی شده همراه می‌باشد (این بخش بعداً به طور مفصل بحث خواهد شد). بر اساس بررسی‌های صحرایی، گارنت - پیرکسن اسکارن به وسیله زون‌های اپیدوت در بر گرفته شده است. به طور کلی، اسکارن‌های این زون واجد حدوداً ۷ درصد حجمی اکسیدهای آهن و ۱۵ درصد حجمی کانی زائی سولفیدی هستند. مگنتیت و کمی پیریت و پیروتیت در زون گارنت - پیرکسن، و پیریت، کالکوپیریت و آثاری از اسفالریت و گالن در زون آمفیبول - اپیدوت دیده می‌شوند.

نسبت گارنت/پیرکسن به سمت خارج استوک کاهش می‌یابد زیرا پیرکسن جانشین گارنت شده است. گارنت از تیپ آندرادایت بوده که همراه کمی گروسولاریت و آثاری قابل اغماض از اسپسارتی - آلماندین است. پیرکسن‌ها به طور تیبیک از نوع دیوپسیدی می‌باشد که گاه تا ۴۵ درصد مولی خود هدرنبرژیت دارد. سولفیدها و اکسیدهای آهن به صورت پراکنده در بخش‌های دگرسانی اسکارنی دیده می‌شوند. بر اساس ارتباط کانی‌شناسی و پاراژنرها، واضح است که کانی‌های سولفیدی مانند پیریت توده‌ای و کالکوپیریت اساساً در توالی‌های تاخیری تخریب‌های دگرسانی اسکارن ایجاد شده‌اند.

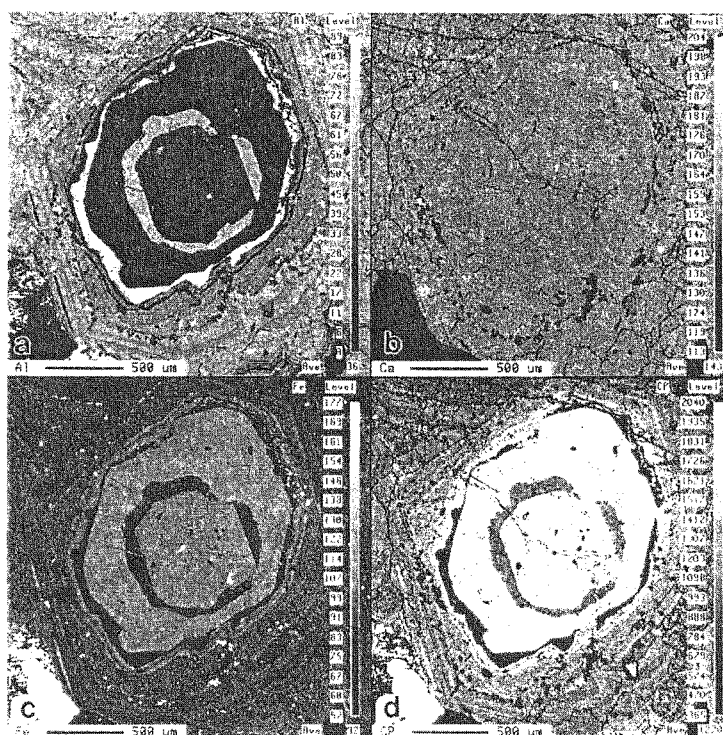
گارنت در نمونه دستی دارای رنگ‌هایی از روشن تا قهوه‌ای تیره می‌باشد. در مقاطع نازک، به شکل زونه‌ای بیرفرنژنت (Birefringent)، نیمه خود شکل تا کاملاً خود شکل (Subhedral to Euhedral)، با ابعادی از چند میکرون تا ۳ میلی‌متر دیده می‌شوند. در نزدیکی با توده دیوریت/گرانودیوریتی، ابعاد دانه‌ها کوچک‌تر شده و آثاری از تغییر شکل توأم با شکستگی (Brittle deformation) در حاشیه‌های بلور قابل رویت است. دورتر از کنتاکت با توده نفوذی، گارنت همراه با کلسیت در هم رگه‌ها و هم در زمینه سنگ‌ها دیده می‌شوند. اپیدوت و کلسیت جانشین بخش آندرادایتی گارنت شده در حالی که گارنت‌های واجد گروسولار کاملاً سالم باقی مانده‌اند.

بلورهای کامل در سطح روبروی فضا‌های خالی جایی که در کنتاکت با کلسیت قرار می‌گیرند رشد کرده‌اند. زون‌بندی توسط تغییرات ایزوتروپی و آنیزوتروپی در بلورها قابل تشخیص است. بطور کلی، بخش‌های داخلی (مغزه‌ها) ایزوتروپ هستند و بوسیله تعداد زیادی لایه‌های تیره واجد ماکل‌های کوچک احاطه شده‌اند. زون‌بندی در دو مقیاس اتفاق افتاده است: الف) در اطراف مغزه‌ها تناوبی از بخش‌های آنیزوتروپ ضخیم و ایزوتروپ نازک لایه، ب) و در حالت بعد، تناوبی از بخش‌های ایزوتروپ ضخیم و آنیزوتروپ نازک لایه.

چهار نمونه معرف برای آنالیز عناصر اصلی (Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mn, Mg and P) و عناصر تریس (Y, Cr, Zr and Yb) از گارنت‌ها انتخاب شد (جدول ۱). بیش از ۹۸ آنالیز الکترون مایکروپروب بر روی بلورهای منفرد صورت گرفت و نقشه‌های ترکیبی (Compositional maps) از (Ca, Al, Fe, Mg) و کروم (Cr) برای بیش از ده نمونه دیگر تهیه شد. شکل ۲ نقشه‌های ترکیب شیمیائی این گارنت‌ها، و شکل ۳ اطلاعات حاصل از آنالیز پیمایشی (Analytical traverses) برای عناصر (Ca, Fe, Al, Mn and Mg) را نشان می‌دهند. اکسیدهای غالب عبارتند از (Ca, Fe, Al and Si) در حالی که مقادیر (Mg, and Mn) بسیار ناچیز است. همچنین مقادیر فسفر و زیرکونیم در حالت اتم در فرمول مولکولی بلورها نیز بسیار ناچیز است (0.23, Zr ≤ 0.03 atom per formula unit (apfu)). دو عنصر اخیر هیچگونه تغییرات سیستماتیکی را نه تنها در بلورهای منفرد بلکه در هیچکدام از نمونه‌های دیگر نشان نمی‌دهند.

نسبت (Fe⁺²) و (Fe⁺³) اندازه‌گیری نشد اما بر اساس جمع کلی آنالیز و استوکیومتری کانی (Mineral stoichiometry)، بنظر میرسد که غالب آهن در سیستم به صورت (Fe⁺³) باشد. نقشه‌های اشعه ایکس (X-ray maps) نیز نشان می‌دهند که زون‌های رنگی ذکر شده در ابتدای بحث که بوسیله تصاویر اسکینینگ الکترون مایکروپروب (SEM backscatter images) مشخص شدند، به علت تغییراتی است که در نسبت آندرادایت در بلور وجود دارد. بلورهای گارنت در نزدیکی شکستگی‌ها عموماً واجد حاشیه‌هایی از آندرادایت تقریباً خالص (End-member andradite) بوده در حالی که دورتر از شکستگی‌ها مقدار گروسولار بشدت افزایش می‌یابد. در بخش‌های مرکزی مقدار گروسولار ممکن است به صفر هم برسد.

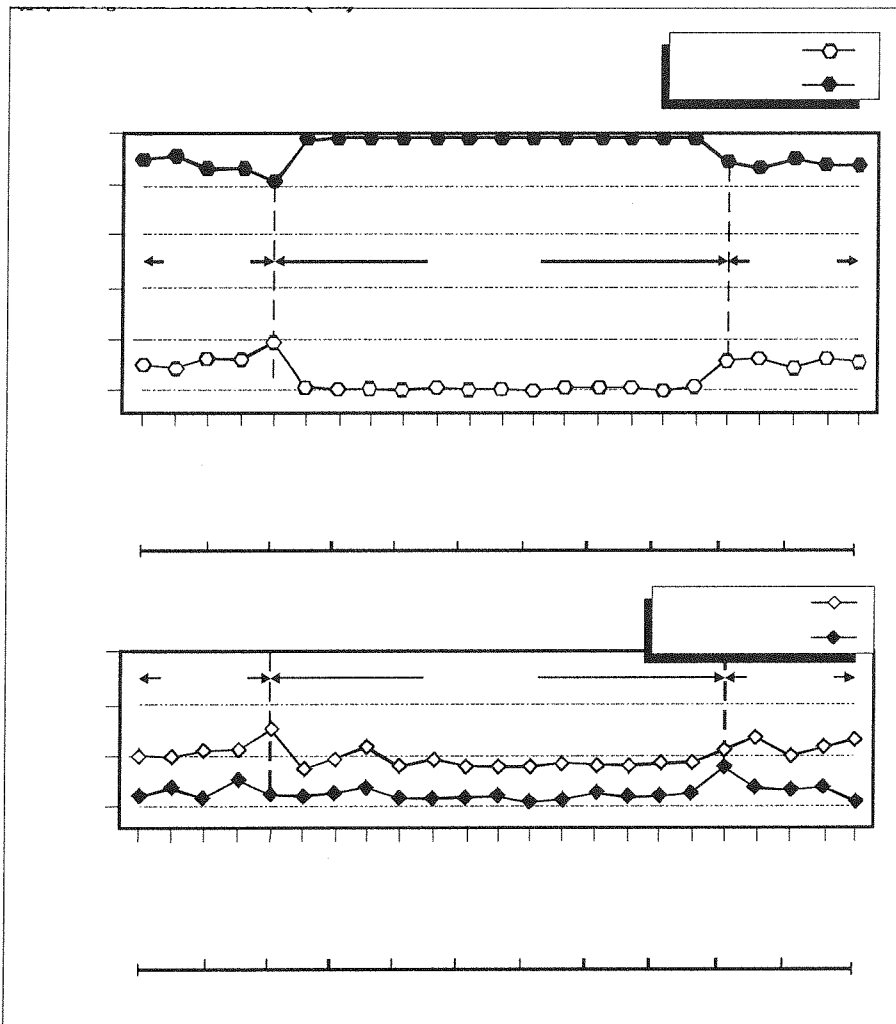
منطقه‌بندی نوسانی (Oscillatory zonation) به وسیله (SEM backscatter images) در شکل ۲ بهتر نشان داده شده است. بلور در شکل ۲ که در حقیقت در کنار یک شکستگی رشد کرده است، مقایسه‌ای است بین یک مغزه سیاه، دارای گروسولار ($X_{\text{grossular}} \leq 0.22$) که به وسیله یک زون ضخیم از آندراایت ($X_{\text{andradite}} \geq 0.79$) و زون های نازک‌تری از گراندیت احاطه شده است.



شکل (۲) آنالیز (X-ray analyses) و اسکیننگ الکترون فتومیکروگراف (Backscatter images) از گارنت‌هایی که از زون گارنت - پیرکسن انتخاب شده است. منطقه‌بندی نوسانی (Oscillatory zonation) با بزرگ نمایی بیشتر از آنچه در مقطع میکروسکوپی دیده می‌شود، نشان‌دهنده نسبت جانشینی (Fe/Al)، رشد آندراایت تقریباً (End-member) بر روی مغزه‌های گراندیتی و پراکندگی تقریباً یکنواخت کلسیم می‌باشد.

پیرکسن در اسکارن‌های آنچرد، در نور طبیعی به رنگ صورتی پریده تا بی رنگ، و شامل انکلوژن‌های مگنتیت هستند. بلورها به صورت نیمه خود شکل تا خود شکل، دارای جهت یافتگی اتفاقی، ابعاد تا یک میلی‌متر، و با ترکیب متغییر از دیوپسید تا هدنبرژیت (Diop_{45-70}) می‌باشند (جدول ۲). پیرکسن‌ها هم در داخل دانه‌های گارنت، به صورت انکلوژن‌های خود شکل و در مغزه‌های گروسولار دار که توسط آمفیبول (Tremolite-actinolite) در حال جانشینی هستند، و هم در بین دانه‌های کلسیت که خود در مراحل دگرسانی/کانی زائی تشکیل شده‌اند دیده می‌شوند. ولاستونیت بصورت بلورهای کمیاب در زمینه اسکارن‌های گراندایت و دیوپسید دار و با حداکثر ۵ میلی متر طول دیده می‌شود. مگنتیت با بیش از ۷ درصد حجمی سنگ مهمترین کانی اکسید است که در گارنت - پیرکسن اسکارن دیده می‌شود. آثاری ناچیز از مگنتیت نیز در مغزه‌های گروسولاردار گارنت‌های نوسانی دیده می‌شود. همچنین مگنتیت به صورت بلورهای بی شکل تا خود شکل در کانی‌های دیوپسید و آمفیبول، هم در رگه‌ها و هم در سنگ وجود دارد. آمفیبول ترمولیت - اکتینولیت (Tremolite-actinolite) با بلورهای بسیار کوچک (حداکثر ۷ میلی‌متر طول) و با جهت یافتگی کاملاً اتفاقی که پیرکسن‌ها را جانشین کرده است، تمامی حفرات و نیز متن سنگ را فرا گرفته‌اند. این شکل از پر کردگی نشان می‌دهد که آن‌ها بسیار دیر تشکیل شده‌اند. در حفره‌ها و رگه‌ها، کوارتز و کلسیت همراه آمفیبول‌ها دیده می‌شوند. دانه‌های کوارتز غالباً نیمه خود شکل تا خود شکل بوده و در بین بلورهای گارنت، آمفیبول (Tremolite-actinolite) و اپیدوت وجود دارند. نمونه‌های معرف برای آنالیز عناصر اصلی (Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mn, Mg, Na and K) از آمفیبول‌ها انتخاب شد (جدول ۳). عناصر اکسیدی (Si, Mg, Fe, Ca) و (Al) بسیار بیشتر از اکسیدهای (K and Na)

می‌باشند به طوری که ($\text{Na} \leq 0.29, \text{K} \leq 0.17$ atom per formula unit (apfu)) است. مقدار کلسیم در تمام آنالیزها ثابت می‌باشد. نسبت‌های (Fe^{+2}) و (Fe^{+3}) اندازه‌گیری نشد، اما با توجه به جمع کلی آنالیز و استوکیومتری (Stoichiometry) کانی، به نظر می‌رسد که بیشتر آهن به صورت (Fe^{+2}) باشد. هیچ تغییرات منطقه‌ای در یک بلور واحد دیده نشد.



شکل (۳) تغییرات ترکیب شیمیائی در مقطع گارنت، بر حسب اتم در ترکیب مولکولی (شکل ۲). خطوط قائم منقطع، نشان‌دهنده مرزهای بین زون‌های گراندایت می‌باشند (به این زون‌ها در شکل ۲ نگاه کنید). همچنین به تطابق مثبت بین منگنز و منیزیم توجه شود.

اپیدوت، آپاتیت و تیتانیت به ترتیب بیش از ۳۵ و ۳-۵ و ۱ درصد حجمی سنگ را تشکیل داده‌اند. همگی این کانی‌ها در مراحل تاخیری ایجاد شده‌اند. اپیدوت به صورت بلورهای کوچک تخته‌ای شکل، نیمه خود شکل تا بی شکل، و با ابعادی تا ۱ میلی متر، و به صورت هم پرکردگی فضاهای خالی و هم در زمینه سنگ دیده می‌شود. پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت به طور پراکنده با اپیدوت هم رخداد هستند. آپاتیت به صورت بی شکل و با ابعاد تا ۵۰ میکرون ($50 \mu\text{m}$) هم در زمینه سنگ و هم در رگه‌ها رخ داده است.

کلسیت و کوارتز به طور پاراژنتیک در مراحل آخر دگرسانی و در میان کانی‌های دیگر و هم در رگه‌ها تشکیل شده‌اند. کلسیت رگه‌ای نیمه خود شکل تا بی شکل بوده و همراه با کانی‌زائی مس نمی‌باشد، در حالی که کلسیت در زمینه سنگ به همراه گارنت، دیوپسید، اپیدوت، کوارتز، آمفیبول و کانی زائی سولفیدی دیده می‌شود. کوارتز بسیار کم، بجز در زون‌های به شدت سیلیسی که به بیش از ۳۸ درصد حجمی (Up to 38 vol%) سنگ را در بر گرفته است، به خصوص در جایی که ظهور آن به صورت پرکردگی فضاهای خالی می‌باشد (و غالباً همراه با کلسیت) دیده می‌شود.

کالکوپیریت کانی اصلی مس بوده و غالباً همراه با پیریت وجود دارد. هر دوی آنها بلورهای از نیمه خود شکل تا خود شکل، و کاملاً پراکنده دارند. پیریت به صورت عمومی به وسیله کالکوپیریت جانشین شده است. در فاسیس‌های گارنت - پیرکسن و گارنت - اپیدوت، سولفیدها فضا‌های خالی بین دانه‌های خود شکل گارنت را پر نموده‌اند، که خود نشان‌دهنده تاخیری بودن آنها است. سولفیدها، با کوارتز بین جداری، اپیدوت و آمفیبول به طور همزمان تشکیل شده‌اند.

مطالعات سیالات درگیر

روش اجرا شده در این تحقیق، این موقعیت را ایجاد نمود که در یک نمونه گارنت در حین افزایش حرارت دستگاه، تمام مجموعه به صورت همزمان گرم گردد. برای به حداقل رسانیدن کشیدگی (Stretching) و مغشوش شدن سیالات درگیر، آنالیزهای انجماد بعد از آزمایش‌های حرارتی صورت گرفت. سیالات درگیر قابل مطالعه در بعضی از کانی‌های حاصل از اسکارن مانند گارنت، پیرکسن، و کوارتز دیده می‌شوند. بیش از ۱۱۰ سیاله درگیر که غالباً در کانی گارنت بوده‌اند در طول زون اسکارنی بررسی شده‌اند. بیشتر گارنت‌ها و کمتر پیرکسن و کوارتز واجد سیالات با قطری از ۳ میکرون ($3 \mu\text{m}$) تا حداکثر ۱۰ میکرون ($10 \mu\text{m}$) می‌باشند. سیالات با ابعاد ۱۰ میکرون بسیار نادر هستند. بیشتر سیالات در گارنت‌ها در امتداد زون‌های رشد قرار داشته و به نظر می‌رسد که در حین رشد آن‌ها در سیستم درگیر شده باشند. سیالات در گیر ثانویه در این مجموعه بسیار نادر است. غالب سیالات درگیر در یک دانه بلور گارنت دارای حرارت همگن شدن یکسان بوده و با منشاء اولیه بودن آن‌ها در تشابه می‌باشد. اکثر سیالات آنالیز شده دو فازه بوده و غالباً به مایع همگن می‌شوند. تعداد معدودی از این سیالات که غنی از گاز هستند به گاز همگن شده‌اند. هیچ آثاری از فازهای غیر قابل امتزاج (Immiscible phases) مانند دی اکسید کربن مایع دیده نشد، و نیز آزمایش‌های کراشینگ (Crushing tests) در گارنت‌ها، پیرکسن‌ها و کواتز در روغن مایع معرف (Immersion oil) نیز آن را اثبات نمودند. بعضی از گارنت‌ها در زون اسکارنی نزدیکی توده اصلی نفوذی واجد بلورهای دختر (Daughter minerals) می‌باشند که بر اساس مطالعات اپتیک از جنس هالیت و سیلویت تشخیص داده شدند.

حرارت‌های همگن‌سازی، برای تمام سیالات اولیه دارای رنج تغییرات از 295°C تا 510°C درجه سانتی‌گراد بوده، اما یک حالت سیستماتیک نسبت به مراحل اسکارن زائی و دگرسانی مربوطه دیده می‌شود. در مرحله اول اسکارن، حرارت‌های همگن‌شدن سیالات درگیر از 340°C تا 500°C درجه سانتی‌گراد با مد 445°C درجه سانتی‌گراد است. حرارت‌های مربوط به سیالات درگیر که بیش از 445°C درجه سانتی‌گراد می‌باشند بیشتر از گارنت‌ها و کمتر از پیرکسن‌ها است. در مقابل، سیالات درگیر در مرحله دوم اسکارن دارای حرارت‌های کاملاً مشخص زیر 360°C درجه سانتی‌گراد هستند. گروه‌های مشابه از حرارت‌های همگن‌شدن در سیالات درگیر بخش‌های مرکزی و شمال غربی زون اسکارنی، روندهای کاملاً مشابهی را نشان می‌دهند. بالاترین حرارت در مرز اسکارن با توده آذرین و پائین‌ترین حرارت مربوط به مرمرها و جایگزین‌های کربناتی دور از اسکارن است. غالباً، برای یک گاه مشخص اسکارن، حرارت‌های همگن‌شدن در نقاط شمال شرقی زون بالاترین و در جنوب غربی زون، پائین‌ترین می‌باشد.

حضور نا محسوس بلورهای دختر هالیت و سیلوایت در سیالات درگیر گارنت‌ها و پیرکسن‌ها و در زون اسکارنی شمال شرقی نشان می‌دهد که شوری (Salinity) مایعات به طور محلی به بیش از ۲۹ درصد وزنی هالیت (Equiv. wt percent NaCl) می‌رسد. به هر حال، این آنکلوژن‌ها بسیار کوچکتر از آن بودند که بتوان حرارت همگن‌شدن فازهای دختر (Daughter phases) را برای محاسبه دقیق درجه شوری در آن‌ها اندازه گرفت. برای آنکلوژن‌هایی که واجد بلورهای دختر نمی‌باشند، درجه شوری (Salinity) را می‌توان با توجه به آخرین حرارت ذوب شدگی سیال، با توجه به انحلال ساده بلور نمک در سیستم اندازه‌گیری نمود اولین حرارت انجماد از 43°C تا 35°C - درجه سانتی‌گراد متغییر می‌باشد و نشان‌دهنده آن است که بعضی از آن‌ها ممکن است دارای (MgCl_2) یا (CaCl_2) باشند. درجه شوری برای ۴۰ سیاله درگیر که از ۱۷ نقطه متفاوت اسکارنی بدست آمده‌اند محاسبه شده است. به طور کلی، سیالات درگیر بخش غربی اسکارن دارای حرارت و شوری بالاتر، (که حد میانگین آن برابر 450°C درجه سانتی‌گراد با شوری بیش از ۱۵/۱ درصد وزنی هالیت) نسبت به سیالات درگیر دورتر از محل کنتاکت است. سیالات درگیر بخش مرکزی اسکارن دارای حرارت کمتر با میانگین حدود 360°C درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۰/۸ درصد هالیت (10.8% NaCl) و آن‌هایی که از بخش شرقی می‌باشند دارای حرارت با میانگین 340°C درجه و شوری ۷/۵

درصد هالیت (7.5% NaCl) هستند. دو نمونه گارنت از بخش تقریباً مرکزی زون اسکارن که از نظر فضائی هم بعد بودند، دارای گروه‌هایی از سیالات درگیر هم تشکیل بوده و به فاز گاز و یا به فاز مایع همگن می‌شوند، که دمای این هموزن شدن در هر دو مورد حدود 350°C درجه سانتی گراد بوده که می‌تواند نشانه‌ای از پدیده جوشیدن باشد. آنالیز سرمایش سیالات درگیر غنی از مایع (Liquid-rich inclusion) در یک نمونه شوری ۱۱/۲ درصد هالیت را نشان داد در حالی که در نمونه‌های دیگر این مقدار معمولاً حول و حوش ۱۶/۱۳ درصد هالیت می‌باشد.

با توجه به اطلاعات موجود، فشار در هنگام درگیر شدن سیالات برای این دو نمونه به ترتیب برابر با 250 و 350 بار است. این فشارها به اعماق 700 تا 850 متر مربوط می‌گردد، به شرط اینکه فرض کنیم شرایط کاملاً لیتواستاتیک بوده، و 1600 تا 2000 متر، به شرط فرض شرایط کاملاً هایدرواستاتیک. عمق تزریق توده استوک بیشینه 2000 متر تعیین شده است که با این اندازه‌گیریها کاملاً مطابقت دارد. نمونه‌های مورد مطالعه از مغزه‌های تا 500 متر نسبت به سطح کنونی برداشته شده است. بنابراین شرایط در زمان بروز جوشش، احتمالاً بسیار نزدیکتر به هایدرواستاتیک بوده است تا لیتواستاتیک. به هر حال، یک افزایش فشار از 37 به 65 بار که به راحتی می‌تواند در شرایط لیتواستاتیک رخ دهد، به طور کامل می‌توانسته جلوی جوش آمدن حتی گرم‌ترین سیال را بگیرد. بنابر این بخش عظیمی از اسکارن انجرد احتمالاً تحت شرایط غالب هایدرواستاتیک ایجاد شده و در آن جوشش در زمانی که سیستم با مایع کنترل می‌شده است باعث تغییرات ترمودینامیکی سیستم و در نتیجه نهشت اقتصادی مس در مرحله دوم اسکارن بوده است. در تمام این مراحل، تغییرات شدیدی در فشار حاکم بر سیستم بر اثر شکستگیهای ممتد اعمال می‌شده.

مراحل دگرسانی/کانی زائی (Alteration/Mineralization Stages)

بر اساس پاراژنزهای کانی‌شناسی و ارتباط سنگ‌ها بر روی زمین، دو مرحله از دگرسانی در اسکارن‌های انجرد شناسائی شد. مرحله اول (Stage I)، که با گارنت‌های نوسانی گرانادایت ($Gross_{20}$) و ($Andr_{100}$)، به همراهی مگنتیت، ولاستونایت، پیروکسن‌های دیوپسید - هدنبرژیت (Diopside-hedenbergite) مشخص می‌گردد. شکستگی‌های اولیه (و حفرات) بوسیله گارنت که خود توسط لایه‌هایی از آندرادایت احاطه شده است، پر شده‌اند. مرحله دوم (Stage II)، با گسترش اسکارن‌های اپیدوت - آمفیبول و جاننشینی گارنت‌ها و پیرکسن‌های مرحله اول به ترتیب به وسیله اپیدوت و آمفیبول مشخص می‌شود. تقریباً تمامی مگنتیت، دیوپسید و ولاستونایت که در مرحله اول تشکیل شده بودند در این مرحله به هماتیت، آمفیبول و اپیدوت - کلسیت دگرسان شده‌اند. بر اساس دلایل کانی‌شناسی، کالکوپیریتی که اساساً در حین تشکیل آمفیبول و اپیدوت نهشته شده (که بخش اقتصادی مس را ایجاد نموده است)، به همراه دیگر سولفیدها، مانند گالن، پیروتیت و اسفالریت، در مرحله دوم تشکیل شده است.

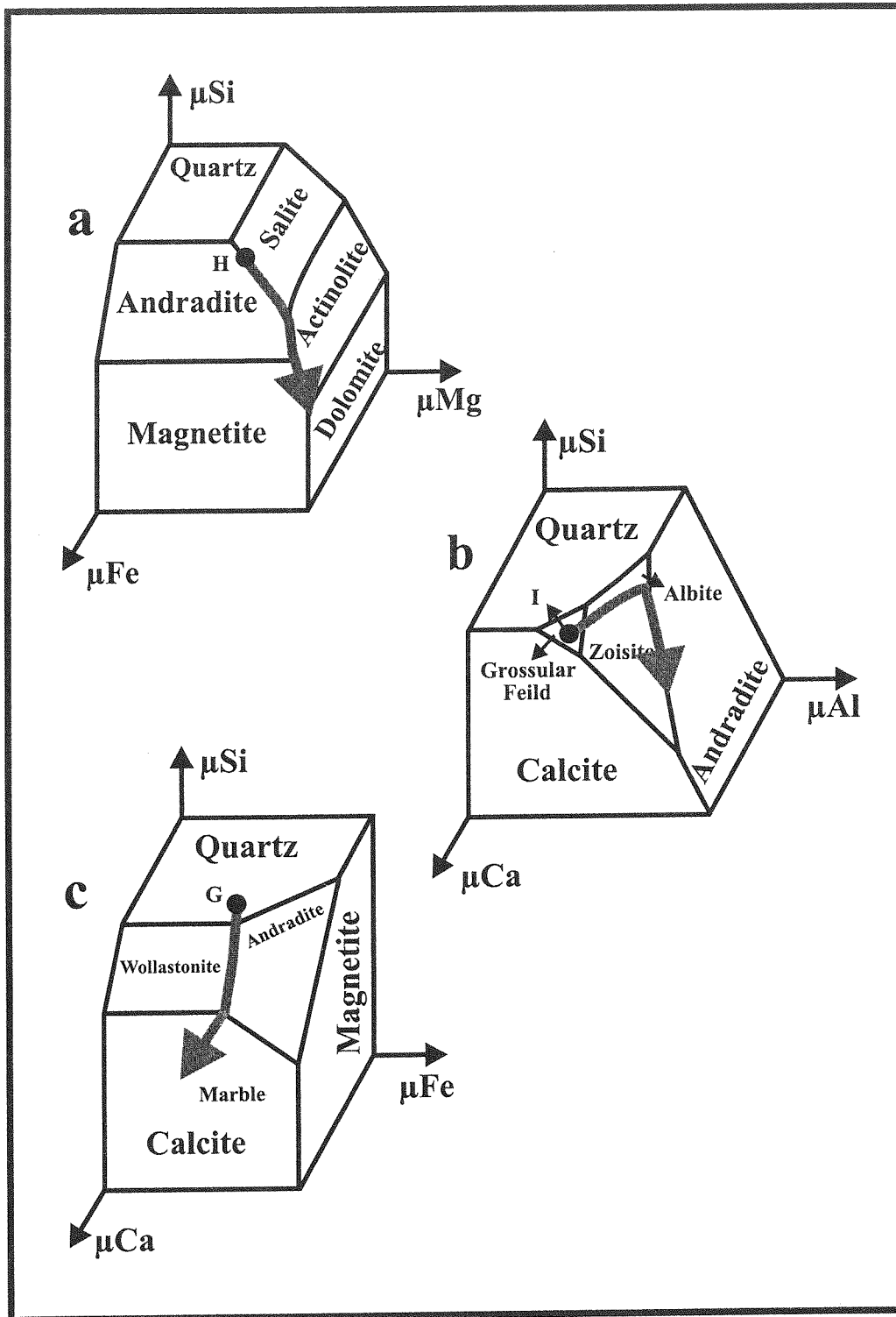
براساس تجمع کانی‌شناسی دگرسانی مرحله دوم و به کار بردن برنامه کامپیوتری ژئوکالک (Geo-Cal) که توسط [6, 7] ابداع شده است، و ثابت کردن درجه حرارت تعادل در 360°C تا 445°C درجه سانتی گراد و فشار 500 بار (محاسبه شده توسط مطالعه سیالات درگیر و هم بسیار شبیه به آنچه توسط [19, 20, 21] برای جایگزینی استوک سونگون انجام شد) مدلینگ اسکارن انجام گرفت. سولفیدهای مس‌دار در مرحله دوم اسکارن نهشته شده‌اند، و حرارت اندازه‌گیری شده برای آنها حدود 340°C تا 360°C درجه سانتی گراد محاسبه شد. کلسیت رسوبات اولیه در حین مرحله اول به وسیله گرونا - پیرکسن جانشین شده، و ولاستونایت بعدی از باقیمانده کلسیت سیستم منشاء گرفته است. بررسی‌های پترولوژیکی نشان می‌دهد که کلسیت در حین مرحله دوم دگرسانی پایدار بوده و فضاهای باقی مانده را پر کرده است. پایداری کلسیت در مرحله دوم دگرسانی اسکارن می‌تواند نتیجه مخلوط شدگی (Mixing) سیالات با شوری بالاتر و با منشاء ماگمایی با سیالات با شوری کمتر و با منشاء جوی باشد. کاهش حرارت و شوری در حین مخلوط شدگی، باعث افت شدید حلالیت کلسیت می‌گردد (Ellis, 1963). به هر حال، سیالات درگیر قابل اندازه‌گیری در کلسیت یافت نشد تا این تئوری آزموده گردد.

بیشتر کانی‌زائی مس در اسکارن‌های انجرد در بخش بالا و پائین زون‌های غنی از کوارتز و در مرحله دوم صورت گرفته است. کمترین کانی‌زائی مس به طور محلی در بین لایه‌های مرمر دیده می‌شود. درجه توزیع مس غیر منظم بوده و بیشترین آن مربوط به زون‌های غنی از کوارتز است. میزان این مس از $1/37$ تا 30 درصد وزنی در نمونه‌های منفرد متفاوت است، اما

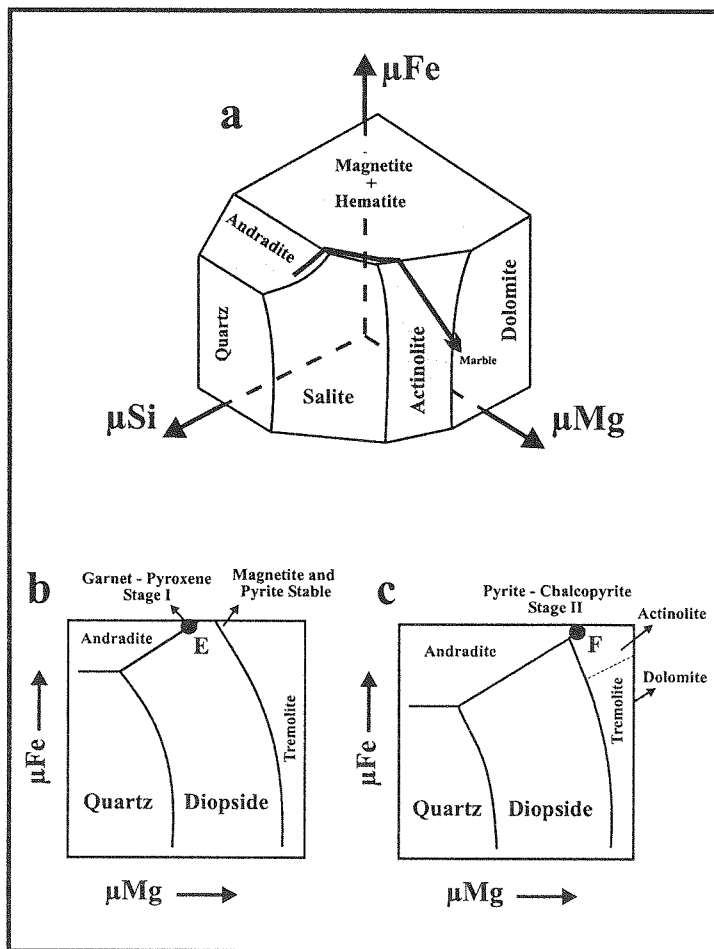
متوسط آن بین ۰/۳ تا ۲ درصد وزنی است. نهشت مس همچنین هم زمان با آخرین زون غنی از آندرادایت است که به صورت نوسانی بوده و همراه ترمولیت - آکتینولیت، اپیدوت و دولومیت دیده می‌شود.

تغییرات ژئوشیمیائی متاسوماتیسم

ترکیب شیمیائی گارنت در زون غنی از کوارتز (زون با کانی‌زائی بسیار بالا) اساساً آندرادایتی می‌باشد، که نشان‌دهنده پتانسیل شیمیائی بالای آهن (μFe) در حین تبلور است [13,14] این حالت همچنان توأم با حجم وسیعی از پیریت و کالکوپیریت در این زون می‌باشد. تعادل با مایعات حاصل از دگرسانی که دارای مقادیر بالائی از آهن می‌باشند، با محیط اسکارن می‌تواند با هم نفوذپذیری و جریان مایع (Fluid influx) و هم تفاوت‌های پتانسیل شیمیائی اجزائی چون (Fe^{+3} , Al^{+3} , Mg^{+2} and Ca^{+2}) صورت گرفته باشد. برای بررسی تکامل ژئوشیمیائی در حین دگرسانی و کانی‌زائی در اسکارن انجرده، گذرهای ژئوشیمیائی مختلف بر اساس پارائنز کانی‌ها بر روی نمودارهای پتانسیل شیمیائی محاسبه شده است. نمودارهای کاربردی پیوسته، از فشار (P)، مول فرکشن دی‌اکسید کربن ($X\text{CO}_2$)، حرارت (T) و فوگاسیته اکسیژن ($f\text{O}_2$) مستقل می‌باشند. شکل ۴ نشان‌دهنده سیستم (Si-Ca-Fe-Al-O-C-H) در پارامترهای ترمودینامیک (T , $X\text{CO}_2$ and $f\text{O}_2$) ثابت و در پتانسیل شیمیائی کلسیم (μCa) مشخص به علت حضور کلسیت می‌باشد. شکل ۴a برای بخشی از سیستم (Si-Mg-Fe-O-C-H) محاسبه شده است که در آن شرایط تشکیل کانی‌های مرحله اول اسکارن در انجرده را نشان می‌دهد، که به سمت کانی‌زائی مرحله دوم حالت پیش رونده دارد. گذر متاسوماتیسم می‌تواند از نقطه (H) شروع شده که با تشکیل آندرادایت - پیرکسن و سپس به اکتینولیت با افزایش پتانسیل شیمیائی منیزیم (μMg) ادامه یابد. افزایش نسبت مایع به سنگ می‌تواند باعث افزایش نسبت ($\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Al}$) گردد و خود باعث تشکیل گارنت‌های غنی از آندرادایت که دارای رشد مجدد نوسانی (Oscillatory overgrowth) بر روی گارنت واجد گروسولار اولیه است، شود. این واقعیت توسط کانی‌های پارائنز سنگ‌های این مرحله از اسکارن دیده می‌شود. پیرکسن که در حین تشکیل آندرادایت متبلور شده است همچنین از نوع غنی از آهن (Diopside-hedenbergite) و همراه با زون‌بندی نا منظم می‌باشد (جدول ۲). شکل ۴ b و ۴ c نشان‌دهنده گذر متاسوماتیک در مرحله دوم دگرسانی اسکارن، برای سیستم (Si-Ca-Fe-O-C-H) محاسبه شده است. آندرادایت و ولاستونایت به علت افزایش پتانسیل شیمیائی کلسیم (μCa) که از منشاء سنگ‌های در بر گیرنده است، و پتانسیل شیمیائی آهن (μFe) که از منشاء فیلتریشن مایعات ماگمائی است، در سیستم همراه با یکدیگر تشکیل می‌شوند. با کاهش پتانسیل شیمیائی سیلیس (μSi)، گذر متاسوماتیسم به سوی میدان کلسیت می‌باشد. در مرحله دوم دگرسانی اسکارن، آندرادایت و کلسیت در حال تعادل بوده و ولاستونایت دیده نمی‌شود. شکل ۵ a سطح اشباع برای سیستم (Fe-Si-Mg-O-C-H) در حرارت، مول فرکشن دی‌اکسید کربن ($X\text{CO}_2$) و فوگاسیته اکسیژن ($f\text{O}_2$) ثابت را نشان می‌دهد (نمودار با تغییر بعد از [12,13,14] این شرایط می‌تواند مرحله دوم دگرسانی اسکارن را در انجرده به نمایش بگذارد. اولین کانی که به مرحله اشباع می‌رسد آندرادایت و به دنبال آن کوارتز است. تبلور کوارتز و آندرادایت می‌توانسته است باعث کاهش پتانسیل شیمیائی سیلیسیوم (μSi) و در پی آمد آن افزایش پتانسیل شیمیائی آهن (μFe) و در نتیجه نهشت مگنتیت و هماتیت شده باشد. مرحله دوم اسکارن همچنین شامل آثاری از مگنتیت دگرسان شده است که خود می‌تواند نشانه افزایش فوگاسیته اکسیژن ($f\text{O}_2$) در این مرحله باشد. کاهش بعدی پتانسیل شیمیائی آهن (μFe) می‌تواند عامل تشکیل هماتیت بوده که خود منجر به یک افزایش در پتانسیل شیمیائی منیزیم (μMg) و به دنبال آن تبلور آکتینولیت و دولومیت (مرمر) شده باشد. شکل‌های ۵ b و ۵ c نمودارهای مقاطع پتانسیل شیمیائی در طول محور پتانسیل شیمیائی سیلیسیوم در شکل ۴a می‌باشد. نقطه (E) در شکل ۵b شرایط معرف مرحله اول دگرسانی اسکارن را نشان می‌دهد که واجد گارنت، پیرکسن و مگنتیت است. نقطه (F) در شکل ۵c نشان‌دهنده شرایط ترمودینامیکی پایدار برای مجموعه کانی‌های مرحله دوم است. بایستی توجه داشت که در این شرایط دیوپسید پایدار نبوده اما اکتینولیت و آندرادایت پایدار هستند.



شکل ۴) نمودارهای سه تایی پتانسیل شیمیایی، برای سیستم (Si-Ca-Fe-Al-O-C-H)، [13]. کلیه دیگرام‌های پتانسیل این تحقیق در شرایط فشار (P)، حرارت (T)، فوگاسیته اکسیژن ($f(O_2)$) و مول فرکشن دی اکسید کربن (XCO_2) ثابت محاسبه شده‌اند. شکل ۴a برای بخشی از سیستم که شامل (Si-Mg-Fe-O-C-H) می‌باشد، ترسیم شده است و همان طور که دیده می‌شود، گذر متاسوماتیسم که منجر به ایجاد دگروسانی و تشکیل اسکارن مرحله اول است را نشان می‌دهد. این گذر، از نقطه (H) که در حالت تعادل با آندرادایت - پیرکسن (Andradite-pyroxene) و در ادامه، تبلور اکتینولیت (Actinolite) به علت افزایش پتانسیل شیمیایی منیزیم (μMg) را نشان می‌دهد. شکل ۴b یک روند متاسوماتیسم را در سیستم (Si-Al-Ca-O-C-H) برای اسکارن مرحله اول به نمایش می‌گذارد که در آن با افزایش پتانسیل شیمیایی سیلیس (μSi) یا کلسیم (μCa) باعث حرکت دگروسانی به دو منطقه متفاوت از نقطه (I) شده است. برای درک بهتر مطلب، لطفاً به توضیحات متن برگردید. شکل ۴c حرکت و روند متاسوماتیسم را از نقطه (G) با برتری کوارتز و به سمت تبلور کلسیت در مرحله دوم اسکارن انجود نشان داده شده است.



شکل (۵) سطح اشباع برای سیستم (Fe-Si-Mg-O-C-H) در حرارت، مول فرکشن دی اکسید کربن (XCO_2) و فوگاسیته اکسیژن (fO_2) ثابت را نشان می‌دهد (نمودار با تغییر بعد از [13]). این شرایط می‌تواند مرحله دوم دگرسانی اسکارن را در انجود به نمایش بگذارد. اولین کانی که به مرحله اشباع می‌رسد آندرادایت و به دنبال آن کوارتز است. تبلور کوارتز و آندرادایت می‌توانسته است باعث کاهش پتانسیل شیمیایی سیلیسیوم (μSi) و در پی آمد آن افزایش پتانسیل شیمیایی آهن (μFe) و در نتیجه نهشت مگنتیت و هماتیت شده باشد. مرحله دوم اسکارن همچنین شامل آثاری از مگنتیت دگرسان شده است که خود می‌تواند نشانه افزایش فوگاسیته اکسیژن (fO_2) در این مرحله باشد. کاهش بعدی پتانسیل شیمیایی آهن (μFe) می‌تواند عامل تشکیل هماتیت بوده که خود منجر به یک افزایش در پتانسیل شیمیایی منیزیوم (μMg) و به دنبال آن تبلور آکتینولیت و دولومیت (مرمر) شده باشد. شکل‌های b و c نمودارهای مقاطع پتانسیل شیمیایی در طول محور پتانسیل شیمیایی سیلیسیوم در شکل ۴a می‌باشد. نقطه (E) در شکل b شرایط معرف مرحله اول دگرسانی اسکارن را نشان می‌دهد که واجد گارنت، پیرکسن و مگنتیت است. نقطه (F) در شکل c نشان دهنده شرایط ترمودینامیکی پایدار برای مجموعه کانی‌های مرحله دوم است. بایستی توجه داشت که در این شرایط دیوپسید پایدار نبوده اما اکتینولیت و آندرادایت پایدار هستند.

بحث

شرایط فشار و حرارت

همان‌گونه که در ابتدا ذکر شد، حرارت‌های همگن‌سازی در کانی‌های اصلی دگرسانی اسکارن در انجود، برای تمام سیالات اولیه دارای رنج تغییرات از $340^\circ C$ تا $510^\circ C$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، اما یک حالت سیستماتیک از نظر رنج این حرارت‌ها نسبت به مراحل مختلف اسکارن‌زائی و دگرسانی مربوطه وجود دارد. در مرحله اول اسکارن، حرارت‌های همگن شدن سیالات درگیر از $350^\circ C$ تا $500^\circ C$ درجه سانتی‌گراد با مد $445^\circ C$ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود. حرارت‌های مربوط به سیالات درگیر که بیش از $445^\circ C$ درجه سانتی‌گراد می‌باشند بیشتر از گارنت‌ها و کمتر از پیرکسن‌ها است. در مقابل، سیالات درگیر

در مرحله دوم اسکارن دارای حرارت‌های کاملاً مشخص با میانگین 360°C درجه سانتی‌گراد می‌باشند. این حرارت‌ها می‌توانند معرف حداقل دو تیپ مختلف دگرسانی اسکارنی باشند. بر اساس بازسازی چینه‌شناسی و تصحیحاتی که بر روی اطلاعات خاص از سیالات درگیر انجام شد فشار در هنگام تزریق توده 500 بار به دست آمد.

در حین اولین فیلتریشن مایعات گرمابی ماگماتیک به درون مارن‌ها و سنگ آهک‌های کرتاسه، کانی‌های اصلی سنگ به طور کامل به وسیله مجموعه‌ای از کالک - سیلیکات‌ها جانشین گردیده است. این مجموعه شامل گارنت ($X_{\text{Andradite}} \geq 0.80$)، پیرکسن (Diop_{41-76})، ولاستونایت و مگنتیت می‌باشد. حواشی گارنت اساساً شامل آندرادایت تقریباً خالص (Near-end-member) که شامل ماگنیزیموم 25 درصد گروسولار است می‌باشد. گارنت غنی از آندرادایت بر روی یک بخش مرکزی واجد گروسولار که بسیار هم کوچک و خورده شده است رشد کرده و در شکستگی‌ها بیشتر دیده می‌شود. این شکل نشان‌دهنده تغییر شرایط مایع مولد است. در بعضی از موارد، گارنت دور تر از شکستگی‌ها دارای یک مغزه آندرادایتی می‌باشند، که می‌تواند به علت تأثیرات نفوذپذیری و یا کاهش حرارت و یا هر دو باشد.

آنالیزهای میکروپروب نشان می‌دهد که منیزیموم، منگنز و احتمالاً زیرکونیوم با مقادیر بسیار ناچیز در گارنت‌ها وجود دارند. پیمایش‌های ترکیبی از میان گارنت در شکل ۳ نشان می‌دهد که میزان منیزیموم از مرکز به سمت حاشیه‌ها کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده کاهش منیزیموم در مایعات گرمابی در مرحله دگرسانی اسکارن اولیه که نمونه از آن برداشته شده. منگنز رفتاری مشابه آلومینیوم نشان می‌دهد که نشانه آن است که منگنز توسط سنگ به محیط اعمال شده.

مرحله اول اسکارن‌ها به وسیله رسوبات غیر قابل نفوذ از هر دو طرف احاطه شده است، به طوری که کنترل حرکت مایعات در طول لایه‌بندی را موجب شده است. ترکیب گارنت‌ها یک تغییرات سیستماتیک را از کنتاکت با توده تا زون‌های خارجی متاسوماتیسم نشان می‌دهد که معرف تداوم و نیز حرکت مایعات مولد دگرسانی در یک محیط کاملاً تراوا می‌باشد.

چندین مولف در ارتباط با نفوذپذیری ایجاد شده توسط دگرسانی اسکارن بحث نموده‌اند. برای مثال، این نفوذپذیری می‌تواند توسط شکستگی ساده [12,13,14]، یا توسط واکنش‌های شیمیایی بین مایعات و سنگ میزبان [31] و یا توسط مجموعه‌ای از هر دوی آن‌ها [27] صورت گرفته باشد. بررسی‌های سنگ‌شناسی و مطالعات روی زمین نشان می‌دهد که در اسکارن‌های انجرده، مجموعه‌ای از شکستگی و واکنش‌های شیمیایی باعث ایجاد نفوذپذیری در آهک‌ها و دیگر سنگ‌های کربناته کرتاسه شده است. این مهم بوسیله تشکیل فضاهای خالی که در حین اولین هجوم مایعات گرمابی در سنگ‌های کربناته (که توسط گارنت پر شده‌اند)، و در مراحل بعدی، پر شدن آن‌ها توسط کلسیت، آمفیبول و اپیدوت، صورت گرفته، ثابت می‌گردد. به نظر می‌رسد که بیشتر فضاهای خالی بر اثر شکست سیستم و نه توسط انحلالی ساده باشند.

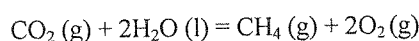
تغییرات دائمی و پیوسته در میزان آلومینیوم و آهن و در زون‌های گارنت، بر اثر تغییر در نسبت مایع به سنگ به عنوان نتیجه‌ای از این - فیلتریشن (Infiltration) مایعات ماگماتی غنی از آهن (Fe-rich Magmatic fluid) و واکنش آن‌ها با مارن‌های آلومینیوم دار کرتاسه می‌باشد. زمانی که نسبت مایع به سنگ (Fluid/rock) بالا بوده، سیستم به وسیله مایع بافر می‌شده است، نسبت (Fe/Al+Fe) نیز به علت ماهیت غنی از آهن مایعات، بالا بوده است. این مسئله باعث شد که گارنت‌های غنی از آندرادایت ($X_{\text{Andradite}} \geq 0.98$) تشکیل شوند. بر عکس، وقتی که هجوم مایعات به درون سیستم کاهش می‌یافت، ترکیب شیمیایی سیستم توسط سنگ (مارن) بافر شده و نسبت (Fe/Al+Fe) بر اثر اخذ آلومینیوم از مارن‌ها کاهش می‌یافته است. این مسئله موجب تشکیل گرانادایت ($X_{\text{Grossular}} \leq 0.20$) شده است. در حین دگرسانی مرحله دوم، نفوذپذیری به علت ایجاد شکستگی‌ها و گسلش‌ها و در پی آمد آن هجوم مایعات گرمابی به درون سیستم، مجموعه توسط مایع بافر شده است. این مسئله توسط تشکیل حواشی از گارنت غنی از آندرادایت همراه با آمفیبول (Tremolite-actinolite)، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، آپاتیت، تیتانیت، کالکوپیریت، پروتیت، گالن، اسفالریت و هماتیت شده است.

جانشینی مگنتیت به پیریت در مرحله دوم، نشان می‌دهد که مقدار سولفات مایعات گرمابی در این مرحله بیشتر بوده است. مگنتیت نیز خود به هماتیت "در حالت تیبیک مرحله دوم دگرسانی اسکارنی"، تبدیل شده است. کانی زائی کالکوپیریت درست در زمانی که مگنتیت به پیریت و یا هماتیت دگرسان می‌شده است، اتفاق افتاده. دورتر از کنتاکت توده نفوذی، مگنتیت کمتر پایدار بوده و تماماً توسط هماتیت جانشین شده است، این مسئله نشان می‌دهد که حرارت کاهش یافته و هجوم آب‌های جوی که خود باعث افزایش فوگاسیته اکسیژن است، بیشتر صورت گرفته.

واکنش بین ترمولیت - اکتینولیت (Tremolite-actinolite) و دیوپسید نشان می‌دهد که آمفیبول در مرحله دوم اسکارن، پیرکسن را جانشین شده است. کوارتز به صورت بین جداری در گارنت، آمفیبول (Tremolite-actinolite) و اپیدوت دیده می‌شود که نشان‌دهنده تاخیری بودن آن است. اپیدوت، کالکوپیریت، پیریت، و پیروتیت تماما در مرحله دوم دگرسانی تشکیل شده‌اند.

بر اساس آنالیزهای (Gas chromatographic) از نمونه‌های مختلف گارنت از مرحله اول و دوم دگرسانی اسکارن، نسبت دی اکسید کربن به آب ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$) برای تخمین مول فرکشن دی اکسید کربن و مول فرکشن آب (X_{CO_2} and $X_{\text{H}_2\text{O}}$) استفاده شد. مقادیر اندازه‌گیری شده برای (X_{CO_2}) برابر $0/0021$ و $0/0007$ (با متوسط $0/002$) و $0/9985$ و $0/9971$ به دست آمد. شکل ۶ نشان می‌دهد که در شرایط فشاری و حرارتی اندازه گرفته شده از روی سیالات درگیر و نیز مول فرکشن ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) بدست آمده از آنالیز (Gas chromatographic) با متوسط $0/999$ و مول فرکشن (X_{CO_2}) با متوسط $0/002$ ، کدام مجموعه کانی‌های در دو مرحله دگرسانی اسکارن انجرد پایدار هستند. شکل ۶ در حقیقت مدل برازش شده‌ای است برای مشخص نمودن حرارت و فشاری که در آن اسکارن انجرد تشکیل شده است. از ویژگی‌های مهم این نمودار نمایش حرکت تدریجی روند متاسوماتیسم از مرحله اول دگرسانی اسکارن به مرحله دوم آن است. میدان پایداری کانی‌ها بر اساس برنامه کامپیوتری پی - تی - ایکس (PTX) که توسط [6, 7] تدوین شده است، صورت گرفت. همان گونه که قبلا توضیح داده شد، مراحل اول و دوم توسط گراندایت گارنت (Gross_{22}) و (Andr_{100})، مگنتیت، ولاستونیت، و پیرکسن (Diopside-hedenbergite)، و نیز بوسیله گسترش اپیدوت - آمفیبول در مرحله دوم، که بوسیله جانشینی گارنت و پیرکسن مرحله اول به وسیله اپیدوت - آمفیبول در مرحله دوم است صورت گرفته. بر اساس مشاهدات میکروسکوپی از کانی‌ها، مشخص شده است که کالکوپیریت اساسا در مرحله‌ای نهشته شده است که آمفیبول و اپیدوت مرحله دوم گذاشته شده‌اند. مجموعه سیلیکات‌های محاسبه شده در نمودار دارای تطابق کاملی هستند با آنچه که در مراحل اول و دوم وجود دارد. حرارت‌هایی که این میدان‌های پایداری بر اساس آنها محاسبه شده‌اند به ترتیب 445°C و 360°C درجه سانتی‌گراد، توسط سیالات درگیر محاسبه شده‌اند.

مقادیر میانگین برای متان (CH_4) و دی اکسید کربن (CO_2) برابر $1/143$ و $67/991$ در مرحله اول و $0/873$ و $3/112$ در مرحله دوم می‌باشد. نسبت (CO_2/CH_4) برای تخمین فوگاسیته اکسیژن (f_{O_2}) طبق واکنش ذیل به کار گرفته شد:



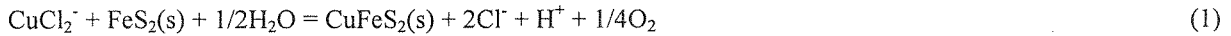
لگاریتم فوگاسیته اکسیژن بر اساس لگاریتم ($\log K$) برای واکنش فوق و در 500 بار فشار محاسبه و بهترین حرارت برازش که عبارت بودند از 445°C درجه سانتی‌گراد در مرحله اول و 360°C درجه سانتی‌گراد در مرحله دوم برای اسکارن‌های انجرد، به کار گرفته شد. برنامه کامپیوتری (SUPCRT92) که توسط [23] تدوین و در [24] تکمیل گردیده است، با تغییراتی که برای برازش آن در شرایط انجرد لازم بود و نیز در نظر گرفتن عدد یک برای اکتیویتی آب، به کار گرفته شد. نسبت (CO_2/CH_4) که برای محاسبه ($\log f_{\text{O}_2}$) به دست آمد، با یک فاکتور تصحیح از $0/996$ در 350°C درجه سانتی‌گراد [23] برای جلوگیری از اختلافی که این نسبت از آنالیز در هر مرحله از حرارت‌های بدست آمده از سیالات درگیر داشتند، به کار گرفته شد. مقادیر متوسط ($\log f_{\text{O}_2}$) برای مرحله اول برابر $25/11$ - در 445°C درجه سانتی‌گراد، و افزایش آن به متوسط $30/11$ - در 360°C درجه سانتی‌گراد در مرحله دوم می‌باشد.

شرایط شیمی - فیزیکی نهشت مس در اسکارن انجرد

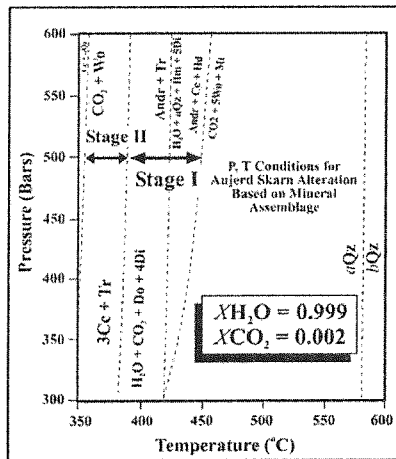
کالکوپیریت کانی اصلی مس در استوک انجرد و با حرارت نهشت در کمتر از 400°C درجه سانتی‌گراد می‌باشد [19, 20]. کالکوپیریت، پیروتیت و پیریت در مرحله دوم دگرسانی اسکارن و در زون غنی از کوارتز نهشته شده‌اند. نهشت کالکوپیریت به طور موقتی هم زمان و یا بعد از آخرین زون نوسانی غنی از آندرادایت در گارنت صورت گرفته است (شکل ۷). نهشت کالکوپیریت در حد اقتصادی در اسکارن انجرد بر اثر تغییرات در پارامترهای ترمودینامیکی چون (f_{O_2})، (T) و (pH) صورت گرفته است. بر اساس محاسبات انجام شده بر روی انحلال مس بر اثر تغییرات حرارتی [20, 21]، مشخص شده است که در شرایط انجرد تمامی مس در حرارتی بین 360°C تا 445°C درجه سانتی‌گراد (با مد 350°C درجه) که در مرحله دوم

دگرسانی اسکارن اتفاق می‌افتد صورت گرفته.

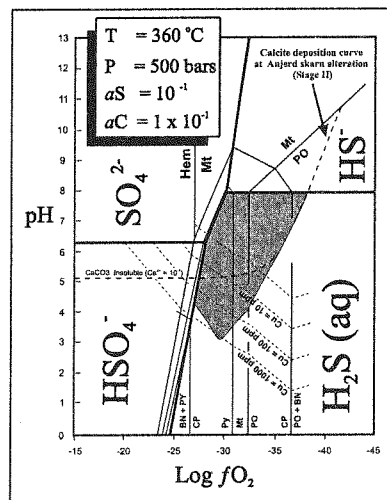
تغییرات در (fO_2) و یا (pH) همچنین می‌تواند کنترل‌کننده نهشت و یا انحلال مس در اسکارن انجرده باشد. بر اساس وجود مرز واکنشی بین کالکوپیریت و پیریت در نمونه‌های اسکارنی، واکنش ذیل را می‌توان برای بر آورد نهشت کالکوپیریت به کار برد:



بر اساس واکنش فوق، انحلال مس با کاهش (fO_2) و افزایش (pH) کاهش می‌یابد. اگر همان‌گونه که در بالا بحث شد، سولفور کافی در محلول موجود باشد، تغییری یک واحدی در (pH) ممکن است باعث نهشت تقریباً تمامی مس محلول در سیستم گردد که در حرارت $360^\circ C$ درجه هنوز حالت محلول بودن خود را حفظ کرده است [10, 18, 19, 20, 21]. از سوی دیگر یک واحد لگاریتمی تغییر در (fO_2) می‌تواند باعث کاهش حلالیت مس به مقدار بسیار زیادی گردد [1, 8, 10, 32].



شکل (۶) شرایط فشار و حرارت برای مجموعه کانی‌های پایدار در $(XH_2O = 0.999)$ و $(XCO_2 = 0.002)$ ، و در مراحل به ترتیب یک و دو دگرسانی اسکارن انجرده.



شکل (۷) نمودار $Log fO_2$ -pH که برای کانی‌زایی و دگرسانی اسکارن مرحله دو انجرده قابل تعمیم است (Hezarkhani, 2002a). در این نمودار میدان پایداری کانسار، سیلیکاتها و اکسیدها در دمای $360^\circ C$ و فشار ۵۰۰ bar آمده است. پایداری کانیها در سیستم‌های K-Al-Si-O-H و Cu-Fe-S-O با قدرت یونی برابر ۱ و مولالیته ۰/۱ تا ۰/۰۱ $Ca^{+2} = 0/04$ و $aK^+ = 0/1$ و $aS = 10^{-1}$ محاسبه شده است. شرایط ترمودینامیکی که در طی آن مس در اسکارن انجرده نهشته شده است مربوط به نقاطی می‌شود که میزان مس محلول در سیستم به پائین‌ترین حد خود رسیده باشد. علائم اختصاری: پیروتیت (PO)، پیریت (PY)، مگنتیت (Mt)، کالکوپیریت (CP)، بورنیت (BN)، هماتیت (Hem)، فلدسپات پتاسیم دار (Kspar)، کوولیت (CV)، کالکوسیت (CC)، کوارتز (Qz) و موسکویت (Mus).

جدول (۱) تجزیه الکترون ماکروپروب گروناهای اسکارن انجرد.

Table 1 Electron Microprobe Representative Analysis of Garnets in Anjerd Skarn

Sample no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂ (wt %)	35.11	35.35	34.95	35.14	36.24	36.19	37.32	35.10	36.72	35.39	35.74	37.01	35.28	36.21
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	2.28	4.94	5.63	2.30	2.99	2.65	3.23	6.21	3.10	5.23	5.00	7.01	0.79	0.29
FeO ²	28.72	25.43	27.25	29.32	27.35	29.25	27.23	24.27	27.87	25.21	24.18	23.11	31.08	31.88
MnO	0.29	0.42	0.37	0.29	0.31	0.21	0.27	0.30	0.26	0.32	0.34	0.34	0.29	0.26
MgO	0.02	0.03	0.02	0.04	0.05	0.04	0.07	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09
CaO	33.28	33.84	33.51	33.22	33.96	33.76	33.81	34.10	33.82	33.96	34.12	34.02	33.15	33.15
Y ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.21	0.20	0.22	0.21	0.22	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZrO ₂	0.02	0.04	0.01	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
Yb ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Total	99.93	100.27	99.99	100.57	101.17	102.25	102.17	100.33	102.10	100.41	100.50	101.79	100.89	102.11
No. of atoms based on 11 O														
Si	3.01	3.11	3.12	3.14	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95	2.96	2.95	2.93	2.94
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.22	0.47	0.35	0.16	0.31	0.21	0.32	0.53	0.29	0.51	0.53	0.61	0.08	0.03
Fe ³⁺	1.82	1.58	1.70	1.88	1.71	1.82	1.70	1.49	1.73	1.54	1.49	1.42	1.97	2.02
Mn	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	3.00	2.99	2.98	3.00	3.01	3.00	3.00	2.99	3.00	2.96	2.99	2.98	3.00	2.99
Y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Yb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	9.09	8.20	8.18	8.23	8.02	8.01	8.01	8.01	8.01	8.00	8.01	8.01	8.02	8.02
sum cations	5.06	5.07	5.04	5.07	5.05	5.05	5.04	5.04	5.04	5.03	5.04	5.05	5.08	5.07
Anchadite %	95.12	90.08	92.42	95.68	93.38	95.46	93.08	88.95	93.79	89.31	88.84	87.23	97.78	98.74
Grossular %	4.42	9.29	7.03	3.61	6.08	4.14	6.39	10.46	5.65	10.09	10.44	12.15	1.63	0.65
Pyrope %	0.06	0.06	0.04	0.10	0.12	0.10	0.18	0.14	0.20	0.16	0.14	0.14	0.18	0.24
Spessartine %	0.39	0.57	0.52	0.41	0.42	0.30	0.38	0.42	0.36	0.44	0.48	0.48	0.39	0.38
Fe/(Fe+Mg)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
FeO ² = Fe _{Total}														

جدول (۲) تجزیه الکترون ماکروپروب پیرکسن های اسکارن انجرد.

Table 2 Electron Microprobe Representative Analyses of Pyroxene From Anjerd Skarn

no.	ann-3-P	ann-3-P	ann-3-P	ann-3-P	ann-3-P	ann-3-P	34-239-P	4-239-P	4-239-P	4-239-P
SiO ₂	51.16	51.97	51.37	50.79	51.36	50.27	52.54	52.29	52.46	51.84
TiO ₂	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.11	0.00	0.07
Al ₂ O ₃	0.94	0.70	0.61	0.15	0.28	1.78	0.26	1.26	0.24	1.21
FeO ²	12.67	12.18	15.27	16.88	13.75	12.13	9.45	8.21	9.51	8.34
MnO	0.48	0.36	0.98	1.70	0.59	0.81	0.56	0.47	0.63	0.54
MgO	9.99	10.71	8.75	6.82	9.62	10.44	12.54	12.81	12.15	12.90
CaO	24.01	24.38	23.24	23.78	24.11	22.67	24.49	24.59	24.73	24.27
Na ₂ O	0.26	0.29	0.25	0.17	0.28	0.23	0.28	0.37	0.16	0.23
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01
Total	99.78	100.62	100.47	100.27	99.98	98.37	100.14	100.12	99.93	99.40
No. of atoms based on 6 O										
Si	1.97	1.97	1.98	1.99	1.98	1.95	1.98	1.96	1.98	1.96
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.08	0.01	0.06	0.01	0.05
Fe	0.41	0.39	0.49	0.55	0.44	0.39	0.30	0.28	0.30	0.28
Mn	0.02	0.01	0.03	0.06	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02
Mg	0.57	0.61	0.50	0.40	0.55	0.60	0.70	0.72	0.63	0.73
Ca	0.99	0.99	0.98	1.00	1.00	0.94	0.99	0.99	1.00	0.98
Na	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02
Fe + Mg	0.98	1.00	0.99	0.95	0.99	0.99	1.00	0.98	0.98	0.99
Di	58.16	61.00	50.51	42.11	55.56	60.61	70.00	73.47	69.39	73.74
Hd	41.84	39.00	49.49	57.89	44.44	39.39	30.00	26.53	30.61	26.26
FeO ² = Fe _{Total}										

نتیجه گیری

توده آذرین سونگون با ترکیب کانی‌شناسی دیوریت/گرانودیوریتی با سن میوسن میانی در مارن‌ها و آهک‌های کرتاسه تزریق، و مجموعه اسکارنی انجرد را پدید آورده است. دو مرحله فعالیت اسکارن‌زائی تشخیص داده شد. در مرحله اول، اسکارن گارنت - پیرکسن بر اثر واکنش مایعات غنی از آهن با سنگ‌های در برگیرنده و در حرارتی کمتر از 500°C درجه سانتی‌گراد و فشار 500 بار صورت گرفته است. زونیشن نوسانی (Oscillatory zonation) در گارنت‌ها بر اثر تغییرات در نسبت (Fe/Al) می‌باشد که خود دال بر تغییرات منقطع نسبت مایع به سنگ (Fluid/rock) می‌باشد. در نسبت‌های بالای مایع به سنگ (Fluid/rock) سیستم بوسیله مایع بافر شده و آندرادایت تشکیل می‌شده است. در نسبت‌های پائین مایع به سنگ (Fluid/rock) سنگ می‌توانسته به طور بخشی ترکیب شیمیائی گارنت را کنترل نموده و تشکیل گرانادایت را موجب گردد.

مرحله دوم دگرسانی اسکارنی در انجرد با تشکیل ترمولیت/اکتینولیت - اپیدوت همراه است. تبلور اپیدوت و آمفیبول هم زمان با آخرین تبلور بیرونی ترین زون گارنت ($X_{\text{Andradite}} \geq 0.98$) بوده و با کوارتز، کلسیت، کالکوپیریت، پیروتیت، پیریت و آناری از گالن و اسفالریت دیده می‌شود. این مایع دارای حرارت پائین‌تر (360°C درجه سانتی‌گراد)، و در زمانی که سیستم به خاموشی می‌گراییده است، حالت چرخشی داشته. کانی‌زائی مس در این مرحله به علت تغییر در شرایط، فوگاسیته اکسیژن ($f(\text{O}_2)$)، (pH) و حرارت (T) بوده است. آلکالینیته و فوگاسیته اکسیژن به ترتیب افزایش و کاهش داشته است و آن به علت واکنش مایعات گرمایی با سنگ‌های آهکی کرتاسه در حین دگرسانی مرحله دوم بوده است. این تغییرات نه تنها باعث تحولات مهم در ترکیب شیمیائی و نوع کانی‌ها شده بلکه موجب کاهش شدید حلالیت مس و در نتیجه نهشت کالکوپیریت در اسکارن انجرد گشته است.

جدول (۳) تجزیه الکترون ماکروپروب آمفیبول‌های اسکارن انجرد.

Table 3. Electron Microprobe Representative Analyses of Amphiboles from Anjerd Sazan

no	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	52.49	52.49	52.52	52.98	52.92	53.13	53.26	52.61
TiO ₂	0.08	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18
Al ₂ O ₃	2.06	4.96	2.56	2.61	2.14	2.54	3.12	4.02
FeO*	13.80	11.25	14.92	13.96	13.72	12.58	11.79	12.31
MnO	0.37	0.17	0.24	0.17	0.18	0.21	0.31	0.17
MgO	16.29	16.50	14.82	14.80	14.82	14.32	15.98	16.24
CaO	12.59	12.42	12.43	12.43	12.26	12.42	12.44	12.43
K ₂ O	0.25	0.30	0.30	0.31	0.29	0.30	0.29	0.30
K ₂ O	0.09	0.08	0.12	0.12	0.13	0.10	0.12	0.13
Total	97.03	98.25	97.89	97.78	98.92	97.80	97.51	98.47
No. of atoms based on 6 O								
Si	8.07	7.72	7.93	8.06	8.07	7.92	8.00	7.85
Ti	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Al	0.37	0.97	0.44	0.49	0.38	0.45	0.55	0.71
Fe	1.49	1.40	1.80	1.77	1.75	1.58	1.48	1.54
Mn	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02
Mg	3.67	3.45	3.31	3.29	3.27	3.66	3.57	3.61
Ca	2.04	1.98	2.02	2.01	2.05	2.00	2.00	1.94
K ₁	0.07	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09
K ₂	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
FeO* = Fe _{total}								

References

- [1] Barnes, H. L., 1979, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: Wiley and Sons, p.798.
- [2] Berberian, M., 1976, Contribution to the Seismotectonics of Iran (part II). *GEOLOGICAL SURVEY OF IRAN*. v. 39, p518.
- [3] Berberian, M., 1983, The southern Caspian: A compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust: *CANADIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES*. v. 20, p. 163-183.
- [4] Berberian, M., and King, G. C., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *CANADIAN*

- [5] **Bray, C. J., and Spooner, E. T. C., 1992**, Fluid inclusion volatile analysis by gas chromatography with photoionization/micro-thermal conductivity detectors: Applications to magmatic MoS_2 and other $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ and $\text{H}_2\text{O-CH}_4$ fluids: *GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA*, v. 56, p. 261-272.
- [6] **Brown, H. T., Berman, G. R., and Perkins, H. E., 1988**, GEO-CALC. Software for calculation and display of pressure-temperature-activity phase diagrams. University of British Columbia, Vancouver, B.C.
- [7] **Brown, H. T., 1995**, TWQ202 (version 2.02.). Software for calculation and display of pressure-temperature-activity phase diagrams. Department of Geological Sciences University of British Columbia, Vancouver, B.C.
- [8] **Crerar, D. A., and Barnes, H. L., 1976**, Ore solution chemistry V. Solubilities of chalcopyrite assemblages in hydrothermal solution at 200 to 350 °C. *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 71, p. 772-794.
- [9] **Crawford, M. L., 1977**, Calcium zoning in almandine garnet, Wissahickon formation, Philadelphia, Pennsylvania: *CANADIAN MINERALOGIST*, v. 15, p. 243-249.
- [10] **Crerar, D., Scott, W., and Brantley, S., 1985**, Chemical controls on solubility of ore-forming minerals in hydrothermal solutions: *CANADIAN MINERALOGIST*, v. 23, p. 333-352.
- [11] **Dubessy, P. J., 1984**, Simulation des équilibres chimiques dans le système C-O-H. Conséquences méthodologiques pour les inclusion fluids. *BULL. MINÉRAL.*, v. 107, p. 155-168.
- [12] **Einaudi, M. T., 1977**, Petrogenesis of the copper-bearing skarn at the Mason Valley mine, Yerington district, Nevada: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 72, p. 769-795.
- [13] **Einaudi, M. T., and Burt, D. M., 1982**, A special issue devoted to skarn deposits, introduction terminology, classification, and composition of skarn deposits, *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 77, p. 745-753.
- [14] **Einaudi, M. T., Meinert, L. D., and Newberry, R. J., 1982**, Skarn deposits, *ECONOMIC GEOLOGY*, 75th Anniversary, v. 77, p. 317-391.
- Ellis, A. J., 1963**, The solubility of calcite in sodium chlorite solutions at high temperatures: *AMERICAN JOURNAL OF SCIENCES*. v. 261, p. 259-267.
- [15] **Emami, H., 1992**, Geology of the Sungun copper deposit: Internal reports, Sungun copper company. 90 p.
- [16] **Etminan, H. 1977**, A porphyry copper-molybdenum deposit near the Sungun village: Internal Report, *GEOLOGICAL SURVEY OF IRAN*. 24p.
- [17] **Etminan, H. 1978**, Fluid inclusion studies of the porphyry copper ore bodies at Sar-Cheshmeh, Darreh Zar and Mieduk (Kerman region, southeastern Iran) and porphyry copper discoveries at Sungun, Gozan, and Kighal, Azarbaijan region (north-western Iran). International association. Genesis of Ore Deposits 5th Symp., Snowbird, Utah, Abstr., p. 88 [abstr].
- [18] **Harris, N. B., and Einaudi, M. T., 1982**, Skarn deposits in the Yerington district, Nevada: Metasomatic skarn evolution near Ludwig, *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 77, p. 877-898.
- [19] **Hezarkhani, A., (2002)a**. Specific Physico-Chemical Conditions (360 °C) for Chalcopyrite Dissolution/Deposition in the Sungun Porphyry Copper Deposit, Iran. *Amirkabir Journal of Science and Technology* (in press).
- [20] **Hezarkhani, A., (2002)b**. Mass Changes During the Hydrothermal Alteration/Mineralization in a Porphyry Copper Deposit, Eastern Sungun, Northwestern Iran, Elsevier, *Asian Earth Sciences*, (In press)
- [21] **Hezarkhani, A., and Williams-Jones, A. E., 1998**, Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit: Evidence from Fluid Inclusion and Stable Isotopes. *Economic Geology* vol. 93, pp. 651-670.
- [22] **Hezarkhani, A. 1988**, Geology and petrology of the Kashan igneous rocks, from Ravand to Naragh; Central Iran: M.Sc thesis, Tehran University. 161p.
- [23] **Johnson, J. W., and Norton, D., 1985**, Theoretical prediction of hydrothermal conditions and chemical equilibria during skarn formation in porphyry copper systems: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 80, p. 1797-1823.
- [24] **Johnson, J. W., Oelker, E. H., and Helgeson, H. C., 1992**, SUPCRT92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0 °C to 1000 °C: *Computers and Geosciences*, v. 18, n. 7, p. 899-947.
- [25] **Jamtveit, B., 1991**, Oscillatory zonation patterns in hydrothermal grossular-andradite garnet: nonlinear dynamics in regions of immiscibility. *AMERICAN MINERALOGIST*, v. 76, p. 1319-1327.
- [26] **Jamtveit, B., Bucher-Nurminen, K., and Stijfhoorn, D. E., 1992**, Contact metamorphism of layered shale-carbonate sequence in the Oslo Rift: I. Buffering, infiltration and the mechanisms of mass transport: *JOURNAL OF PETROLOGY*, v. 33, p. 327-422.
- [27] **Kwak, T. A. P., and Tan, T. H., 1981**, The geochemistry of zoning in skarn minerals at the King Island (Dolphin) Mine: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 76, p. 468-497.
- [28] **Mehrpour, M., 1993**, Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigations on Sungun Cu-Mo porphyry deposit, (North-West of Iran). Ph.D thesis, Hamburg Univ. Hamburg, 245 p.
- [29] **Salvi, S., and Williams-Jones, A. E., 1996**, Fluid-inclusion volatile analyses by gas chromatography: application of wide-bore porous-polymer capillary column to the separation of organic and inorganic compounds: *GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA*, in press.

- [30] Stöcklin, J., 1977, Structural correlation of the Alpine ranges between Iran and Central Asia. Mem. H. Aser. Soc. Geol. France, pp. 333-353.
- [31] Taylor, JR. H. P., 1974, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition: ECONOMIC GEOLOGY, v. 69, p. 843-883.
- [32] Var'yash, L. N., and Rekharskiy, V. I., 1981, Behaviour of Cu(I) in chloride solutions: GEOCHEMISTRY INTERNATIONAL, No. 7, p.1003-1008.
- [33] Yardley, B. W. D., Rochelle, C. A., Barnicoat, A. C., and Lloyd, G. E., 1991, Oscillatory zoning in metamorphic minerals: an indicator of infiltration metasomatism: MINERALOGICAL MAGAZINE, v. 55, p. 357-365.