

زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژنز کانسار بور قره‌گل - جنوب غرب زنجان

حسین رحیم‌پوربناب و حسن کاظمی

دانشگاه تهران، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

(دریافت: ۸۰/۱۱/۲۰؛ پذیرش: ۸۱/۴/۵)

چکیده

معدن بور قره‌گل تنها معدن بور فعال ایران است که در رسوبات سازند قرمز بالائی در ۸۰ کیلومتری غرب-جنوب‌غرب زنجان قرار گرفته است. کانیهای تشکیل دهنده این کانسار بوراتهای آبدار منیزیم، منیزیم-کلسیم و کلسیم می‌باشند که هیدروروبراسیت (بورات منیزیم-کلسیم) مهمترین کانی کانسار است (حدود ۸۰ درصد). دو سیستم گسلی محدوده کانسار را مشخص می‌کنند: سیستم گسلی با امتداد NE-SW بعنوان معبری برای محلولهای سازنده کانسار و همچنین ایجاد کننده فضاهای لازم برای جایگزینی کانسار عمل کرده و سیستم گسلی جوانتر با امتداد NW-SE توده معدنی را در زمانهای بعدی قطع نموده است. توده معدنی بصورت عدسی‌های متقطع با سنگ درونگیر رسی-مارنی با امتداد NE-SW در شکستگیهای موجود در هسته یک تاقدیس قرار گرفته است. آنالیزهای شیمیائی انجام شده بر روی سنگهای در برگیرنده کانسار نشان می‌دهد که با فاصله گرفتن از توده اصلی کانسار از میزان محتوی بور لایه‌ها کاسته می‌شود. بنظر می‌رسد سیالات جوی فرورو از طریق شکستگیهای تکتونیکی به اعماق کم رفته و پس از گرم شدن (بر اثر گردیان ژئوترمال بالای منطقه) با ایجاد یک سلول همرفتی گرمایی با گردش در واحدهای منطقه موجب فروشست واحدهای توفی شده‌اند. سپس این سیالات غنی از بور، در افقهایی که گسلها لایه‌های رسی-مارنی را قطع کرده‌اند (بواسطه مهیا بودن شرایط احیایی)، کانی‌سازی نموده‌اند. تأثیر دگرسانی در کانسار را بواسطه وجود کانی‌های ثانویه مانند کلمانیت و پریسیت می‌توان مشاهده نمود. این کانیها پس از تشکیل توده اصلی کانسار بر اثر واکنش آبهای جوی فرورو با توده اصلی کانسار (هیدروروبراسیت) تشکیل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بور، هیدروروبراسیت، دگرسانی، قره‌گل، ایران.

مقدمه

کانسارهای بور از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردارند و مصارف گوناگونی در صنعت (متالورژی، داروسازی، شیشه‌سازی و تهیه شوینده‌ها) و کشاورزی (تهیه کود شیمیایی و حشره‌کشها) دارند. در ایران نیز برخی ذخایر بور شناسایی شده‌اند که از آن میان در حال حاضر فقط کانسار بور قره‌گل مورد بهره‌برداری می‌باشد و دارای ذخایر اقتصادی است. این کانسار از سال ۱۳۵۱ مورد بهره‌برداری بوده و برای اولین بار در سال ۱۳۵۶ در نقشه زمین‌شناسی تکاب - صائین قلعه ثبت شده است. کانیهای تشکیل‌دهنده این کانسار بوراتهای آبدار منیزیم، منیزیم - کلسیم و کلسیم می‌باشند و هیدروبوراسیت (بورات منیزیم - کلسیم) مهمترین کانی کانسار است (حدود ۸۰ درصد). تاکنون مطالعات اکتشافی مختلفی برای شناسایی گسترش عرضی و عمقی این کانسار و اکتشاف کانسارهای مشابه در نواحی اطراف صورت گرفته اما به لحاظ اینکه شناخت دقیقی از ژنز کانسار وجود نداشته، موفقیت مهمی در این زمینه بدست نیامده است. از جمله این مطالعات می‌توان فرجاد باستانی (۱۳۷۶) و گزارش گروه مهندسی کانسار دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۷۶) را نام برد. با توجه به این نکته و اهمیت اقتصادی بور و نیاز کشور به کشف ذخایر جدید، لزوم انجام یک مطالعه زمین‌شناسی دقیق برای درک صحیح نحوه تشکیل این کانسار بخوبی احساس می‌شد.

اندیسهای دیگری از بور در ایران کشف شده‌اند که شامل اندیس میانج در استان زنجان که شباهتهای زیادی با کانسار قره‌گل دارد و در رسوبات مارنی و کنگلومراپی پلیوسن قرار دارد. این کانسار نیز در ساختمان گسله‌ای واقع است که دارای روند NE-SW می‌باشد. وجود چشم‌های معدنی فعال در اطراف این کانسار حاکی از بالا بودن گرادیان ژئوترمال و فعالیتهای هیدروترمال (احتمالاً وابسته به کمربند آتش‌شانی سهند - بزمان) در ناحیه است و می‌تواند در فهم ژنز کانسار راهنمای مفیدی باشد که در بحث نحوه تشکیل کانسار به آن پرداخته می‌شود.

کانسارهای مهم بور دنیا در کشورهایی مانند آمریکا، ترکیه، روسیه و هند قرار دارند و در مقایسه با آنها ذخایر کشف شده ایران ناچیز می‌باشند. کانسارهای بور ترکیه بخصوص مورد توجه محققینی که در ایران به امر اکتشاف بور می‌پردازند می‌باشد. غالباً ژنز مشابهی برای کانسارهای بور ایران، بخصوص برای کانسار بور قره‌گل، با کانسارهای مهم ترکیه مانند بیگادیک، کستالک، امت در نظر گرفته‌اند (فرجاد باستانی، ۱۳۷۶). کانسارهای اخیرالذکر عمدها همراه با خاکسترها آتش‌شانی و رسوبات آهکی - مارنی دریاچه‌ای بوده و بصورت سنزنتیک و اگزالاتیو ولکانیک تشکیل شده‌اند (Helvaci and Ortı, 1995; Helvaci, 1998). سپس فرآیندهای تحرک مجدد (Remobilization) موجب ایجاد تمرکزهای جدیدی در خلل و

فرجهای سنگهای اطراف شده است (Helvaci, 1995).

موقعیت جغرافیایی کانسار بور قره‌گل

کانسار بور قره‌گل در ۸۰ کیلومتری غرب - جنوب غرب زنجان در حوالی دهکده‌ای به همین نام واقع شده است. علاوه بر این کانسار، یک اندیس معدنی که ظاهراً در ارتباط با این کانسار تشکیل شده است، در فاصله ۱/۵ کیلومتری جنوب‌غرب معدن در ساحل رودخانه قزل اوزن قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی معدن قره‌گل.

زمین‌شناسی، چینه‌شناسی و تکتونیک منطقه

این کانسار در نقشهٔ زمین‌شناسی چهارگوش تکاب - صائین قلعه واقع شده است. در این ناحیه سازند قرمز زیرین بدون ناپیوستگی مشخصی روی توفهای ائوسن قرار می‌گیرد و خود با مرز مشخص توسط آهکهای دریایی سازند قم پوشیده می‌شود. پسروی دریا در الیگومیوسن موجب ایجاد رژیم کولابی - قاره‌ای در این ناحیه شده و بدین ترتیب سازند قرمز بالایی، که شامل مجموعهٔ رنگارنگی از لایه‌های تبخیری، شیل، مارن، ماسه سنگ و لایه‌های توف است، نهشته می‌گردد. این سازند در این ناحیه از پایین به بالا به سه بخش M1، M2، M3 تقسیم شده است. رسوبات کواترنری در این ناحیه گسترش زیادی ندارند و عمدتاً شامل تراسهای آبرفتی رودخانهٔ قزل اوزن هستند. واحدهای آذرین در منطقهٔ معدنی شامل توفها و پیروکلاستیک‌هایی با ترکیب داسیتی تا ریوداسیتی می‌باشند که بصورت ولکانوسدیمنتر در حوضهٔ دریایی سازند قم تقریباً همزمان با آهکهای ممبر ۳ تشکیل شده‌اند. توفهایی با ترکیب مشابه بصورت بین‌لایه‌ای در سازند قرمز فوقانی و در ناحیهٔ معدنی گسترش دارند.

در محدودهٔ کانسار مورد مطالعه واحدهای چینه‌شناسی شامل بخش‌های زیر است:

(الف) یک واحد مارنی - تبخیری به ضخامت حدود صد متر در جنوب‌غرب کانسار که توسط یک سری متناوب از کنکلومرا و گلسنگ پوشیده شده و از زون کانه‌دار جدا گردیده است. در این واحد لایه‌های توفی ریوداسیتی وجود دارند که در ترانشهٔ معدن بخوبی دیده می‌شوند (شکل ۲).

(ب) یک واحد رسی - تخریبی به ضخامت حدود صد و پنجاه متر که در بر گیرندهٔ کانسار مورد نظر است و حاوی لایه‌های رسی و مارنی با رنگهای مختلف می‌باشد. تودهٔ معدنی در امتداد سیستم گسلهای در این بخش عمدتاً بصورت عدسیهای مجزا و متوالی قرار دارد. این عدسیهای با ضخامت یک تا بیست متر دارای امتداد NE-SW (به تبعیت از گسلهای اصلی معدن) می‌باشند (شکل ۳). لامینه‌های واروی که حاوی تمرکزهای ناچیز و غیر اقتصادی بور هستند در مرز عدسیهای معدنی و رسهای تیره رنگی دیده می‌شوند (شکل ۴). این رسهای با رنگ قهوه‌ای سوخته تا سیاه در اکثر موارد همراه با مادهٔ معدنی دیده می‌شوند و عنوان لایه راهنمای در معدن استفاده مورد استفاده می‌باشند. اینها را می‌توان عنوان هالهٔ دگرسانی در نظر گرفت که توسط سیالات گرم کانه‌ساز ایجاد شده‌اند. در اطراف تودهٔ معدنی مارن استونهای در بر گیرندهٔ کانسار لمس صابونی دارند که احتمالاً در اثر تحمل فشار مربوط به حرکت گسلهای حاوی کانسار حاصل شده است. واحد در بر گیرندهٔ کانسار را می‌توان معادل بخش M1 سازند قرمز بالایی در نظر گرفت.



شکل ۲- مقطع عرضی رخنمون توپهای ریوداسیتی در محل ترانشه معدنی، نگاه به سمت جنوبغرب (RD = Rhyodacite)

(ج) یک واحد کنگلومرایی - رسی با ضخامت حدود ۲۵۰ متر که بصورت همшиб واحد قبلی را می‌پوشاند و فاقد هر گونه کانی‌سازی می‌باشد. این واحد را می‌توان معادل بخش M3 سازند. قرمز بالایی در نظر گرفت.

(د) یک واحد تراورتنی با گسترش محدود که از نظر سنی جوانترین واحد سنگی محدوده کانسار می‌باشد و بصورت دگرشیب روی واحد قبلی را بصورت محلی در ناحیه معدن می‌پوشاند (شکل ۵). این واحد فقط در بالاترین افق چینه‌شناسی در محدوده معدن حضور دارد و در نواحی مجاور دیده نمی‌شود. این واحد حاکی از فعالیت یک سلول هیدروترمال در این ناحیه می‌باشد که دربحث تعیین ژنز کانسار مورد توجه قرار می‌گیرد. این واحد بر روی سیستم گسله اصلی معدن که کانی‌سازی در آن صورت گرفته قرار دارد و ظاهراً بطور همزمان با توده معدنی تشکیل شده است.

نقشهٔ زمین‌شناسی چهارگوش تکاب - صائین قلعه از نظر تکتونیکی به چهار زون تقسیم شده است. کانسار مورد مطالعه در قسمت شرقی این نقشه و در زون B قرار می‌گیرد. پیش روی دریایی ترشیری در حوضه‌ای که در طی حرکات تکتونیکی مربوط به قبل از ترشیری در این زون تشکیل شده بود موجب بوجود آمدن یک حوضهٔ رسوبی وسیع گردیده است. در زون فرعی Ba قدیمی‌ترین سنگهای منطقه که شامل گنیسهای پرکامبرین و گراینیت دوران می‌باشد تا رسوبات عهد حاضر کم و بیش رخنمون دارند (باستثنای سازندهای سیلورین-کربنیفر). اما در زون فرعی Bb که کانسار در آن واقع است قدیمی‌ترین واحدها شامل سنگهای آهکی و

ولکانیکی کرتاسه زیرین می‌باشد. در زون Bb فعالیتهای تکتونیکی شدیدتر بوده و موجب ایجاد گسلهای معکوس زیادی در این ناحیه شده است. روندهای ساختمانی کلی در زون B عمدتاً توسعه گسلهای نئوژن کنترل می‌شوند و دارای روند NW-SE هستند. سیستم گسلی واضحی از گسلهای معکوس با امتداد NW-SE حوضه باریک و طویلی را ایجاد کرده‌اند که رسوبات پلیوسن در آن نهشته شده‌اند.

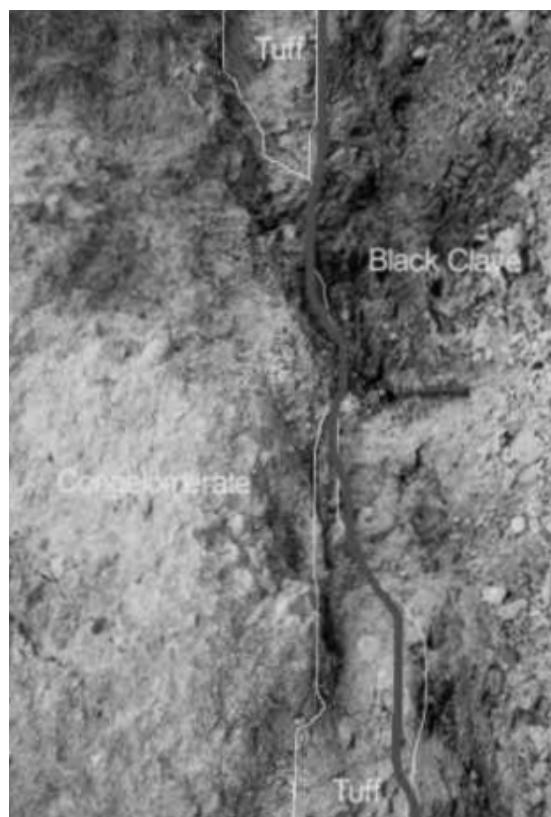
در محل کانسار وضعیت تکتونیکی و ساختمانی با بخش‌های دیگر زون Bb دارای تفاوت‌هایی است. برای مثال واحدهای رسوبی دربرگیرنده کانسار که متشکل از رس‌ها و مارن‌های ملون بوده دارای امتداد NE-SW هستند. لایه‌های در برگیرنده کانسار دارای ساختمان تاقدیسی بوده و کانی‌سازی در امتداد سطح محوری گسله این تاقدیس که دارای امتداد NE-SW و پلانتری حدود ۲۵-۲۰ درجه بسمت شمال شرقی است، صورت گرفته است. شب بالهای این تاقدیس حدود ۲۵ درجه بوده و با نزدیک شدن به محور این شب افزایش یافته بطوریکه در نزدیکی آن شب لایه‌ها نزدیک به قائم می‌شود. دو سیستم گسلی در محدوده کانسار بخوبی دیده می‌شوند. سیستم گسلی اصلی که در کانی‌سازی بور نقش مهمی را ایفا نموده و دربرگیرنده ماده معدنی است. این سیستم دارای روند NE-SW و شبیه حدود ۷۵ تا ۸۰ درجه به سمت

جنوب‌شرقی است. سیستم گسلی دیگری با روند NW-SE بصورت عمود بر سیستم گسلی اصلی بوده و ماده معدنی را در شمال شرقی و جنوب‌غربی قطع و محدود نموده است. با توجه به عدم وجود ماده معدنی در سیستم گسلی اخیرالذکر و تبعیت آن از روند ساختمانی کلی منطقه و قطع شدن سیستم، گسلی اصلی کانسار توسط این سیستم، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم گسلی NW-SE جوانتر بوده و حاکی از فعالیتهای زمین‌ساختی در ناحیه بعد از تشکیل کانسار است.

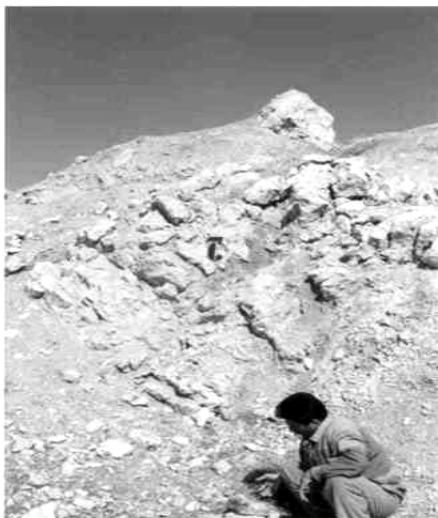


شکل ۳- ترانشه معدن و عدسيهای ماده معدنی،
نگاه به سمت جنوب‌غرب

لازم به ذکر است که در دیواره شمالی تراشه معدنی اثر سطح محوری گسل NW-SE دیده می‌شود که از عرض توده معدنی هم عبور کرده است ولی در عدسی‌های توده معدنی اثری از خرد شدگی مشاهده نمی‌شود. این پدیده را می‌توان به فرآیندهای ثانویه‌ای که بر روی توده معدنی اثر گذاشته و موجب جوش‌خوردگی (healing) و محو اثر گسل در توده معدنی شده‌اند نسبت داد. وجود روند فرعی NE-SW در این ناحیه را می‌توان به وجود یک سیستم کششی با روند مشابه نسبت داد که موجب بوجود آمدن گسلهای نرمال با امتداد NE-SW (مشا به گسله اصلی کانسار قره‌گل) شده است. همین ساختار کششی باعث تسهیل فعالیت سیستمهای هم‌رفتی گرمایی و ایجاد شرایط مساعد برای کانی‌سازی شده است.



شکل ۴- رسهای تیره رنگ همراه با کانی‌سازی



شکل ۵- واحد تراووتونی، نگاه به سمت شمال.

روش مطالعه

در این مطالعه در مجموع ۹۰ نمونه از توده معدنی و لایه‌های در بر گیرنده آن برداشت شد. از نمونه‌های مناسب جهت مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک تهیه گردید و برای شناسایی دقیق‌تر کانیها از پراش اشعه ایکس نیز استفاده شد.

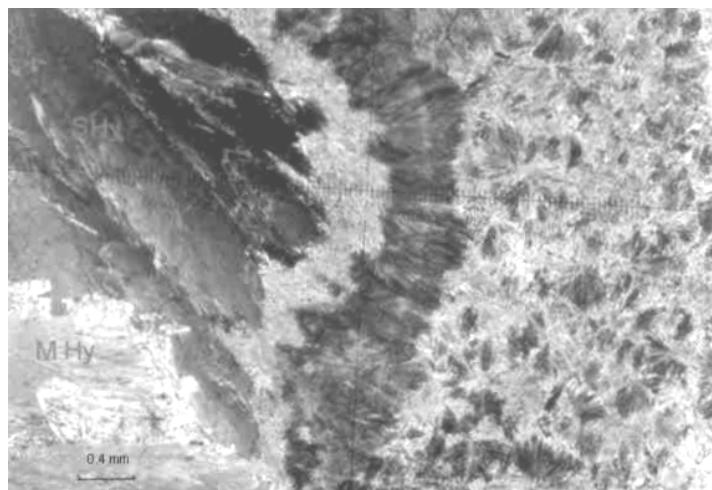
کانی‌شناسی و پتروگرافی

برای شناسایی کانیهای بور از مقاطع میکروسکوپی و پراش اشعه ایکس استفاده شد. از میان کانی‌های بور هیدروبوراسیت (CaMg[B₃O₄(OH)₃]·2.3H₂O) و کلمانیت [Ca[B₃O₄(OH)₃]]₂ قابل مطالعه در مقاطع نازک هستند و کانیهای زایبلیت (Mg₂OH[B₂O₄OH]₂)، پریسیت (یا پاندرمیت) (Ca₄B₁₀O₁₉·7H₂O) و ارتوبیناکیولیت (MnBO₅) بعلت آنکه بسیار ریز دانه هستند توسط اشعه ایکس شناسایی شدند. فراوانترین کانیهای بور در این کانسال بترتیب عبارتند از هیدروبوراسیت، کلمانیت، پریسیت، زایبلیت و ارتوبیناکیولیت. ژیپس و انیدریت نیز بصورت رگه‌های نازک پراکنده در برخی نقاط دیده می‌شوند. کانیهای دیگر مشاهده شده در مقاطع میکروسکوپی شامل ژیپس، پلازیوکلаз و کوارتز است.

بافت‌های متنوعی در مقاطع نازک مشاهده می‌شود که از مهمترین آنها بافت شعاعی در هیدروبوراسیت است. این بافت خود دارای انواع مختلفی می‌باشد که یکی از آنها بلورهای

شعاعی متحدم‌المرکز است. در شکل ۶ بلورهای با بافت اسفلولیتی هیدروبوراسیت در سمت راست دیده می‌شوند. در مرکز مقطع بلورهای متحدم‌المرکز هیدروبوراسیت قرار دارند که توسط بلورهای موزائیکی این کانی، که مربوط به نسل بعدی است، قطع شده‌اند. در حقیقت بلورهای موزائیکی هیدروبوراسیت پس از انحلال بلورهای شعاعی این کانی، در فضاهای خالی ایجاد شده، تشکیل شده‌اند. در برخی مقاطع همراه با کانی هیدروبوراسیت با بافت شعاعی، بلورهای اتمورف و اتیزن پلازیوکلаз با ماکل مشخص و کوارتز دیده می‌شوند (اشکال ۷ و ۸).

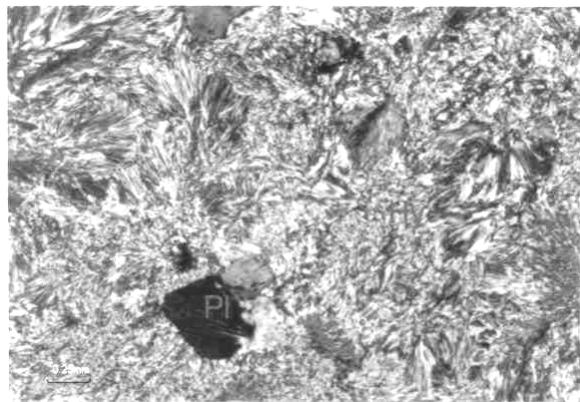
از بافت‌های دیگر مشاهده شده در مقاطع میکروسکوپی بافت موزائیکی است که معمولاً همراه با درشت بلورهای هیدروبوراسیت با بافت شعاعی هستند و عمدتاً بصورت پرکننده حفرات خالی می‌باشند (شکل ۶). در شکل ۹ بلورهای موزائیکی کلمانیت با بافت موزائیکی مشاهده می‌شوند که حاوی ادخالهای کلسیت هستند. این بافت حاکی از رشد بلورهای کلمانیت در فضاهای خالی است. این بلورها تدریجاً در حال تبدیل به کلسیت می‌باشند. در شکل ۱۰ بلورهای شعاعی (بادبزنی شکل) هیدروبوراسیت به همراه بلورهای موزائیکی کلمانیت مشاهده می‌شوند.



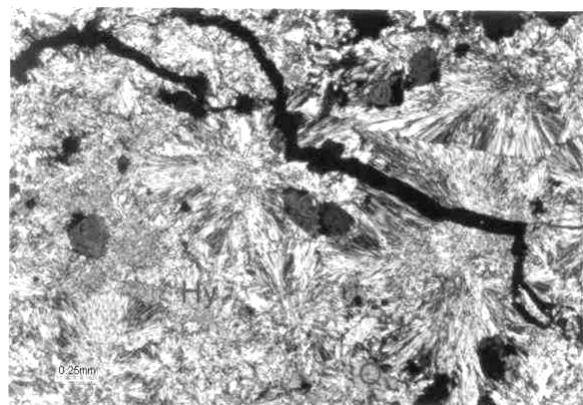
شکل ۶- نسلهای مختلف هیدروبوراسیت با بلورهای شعاعی متحدم‌المرکز در مرکز میدان دید. در سمت راست بافت جریانی در این کانی مشاهده می‌شود (بزرگنمایی ۴۰ برابر، نور پلاریزه).

در بافت جریانی (شکل ۱) بلورهای نسبتاً ریزدانه درجهت مشخصی جهت‌یافته نشان می‌دهند. بافت اسفلولیتی و بافت جریانی مربوط به رشد اولیه هیدروبوراسیت است. بنابراین در بخش‌هایی که این بافت مشاهده می‌شود کانسار کمتر تحت فرآیندهای مختلف دگرسانی قرار گرفته است (Orti and Alonso, 2000).

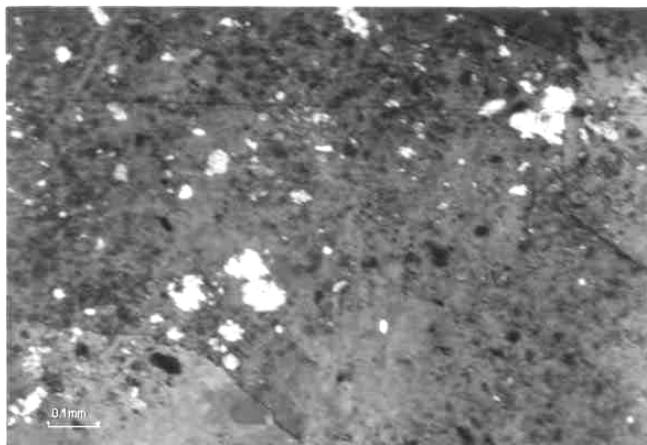
بافت اولیه بوده و انواع بافت‌های شعاعی در مراحل بعدی و نهایتاً بافت موزائیکی بصورت پرکننده فضاهای خالی باقیمانده یا انحلالی است. بلورهای کلمانیت غالباً بصورت پرکننده حفرات یا سیمان با بافت موزائیکی هستند و لذا پس از هیدروبوراسیت تشکیل شده‌اند. کانی زایبلیت بطور عمده در لامینه‌های واروی به همراه کانیهای رسی مشاهده شده است. مطالعه پتروگرافی این مقاطع نشان می‌دهد که کلمانیت و پریسیت کانیهای ثانویه‌ای هستند که از دگرسانی هیدروبوراسیت حاصل شده‌اند. تعداد ده نمونه برای مطالعه به روش پراش اشعه ایکس انتخاب شدند که در آنها علاوه بر کانی‌های شناسایی شده در زیر میکروسکوپ کانیهای زایبلیت، پریسیت، ارتوبیناکیولیت و گیبسیت مورد شناسایی قرار گرفتند.



شکل ۷- بلورهای اتومورف پلازیوکلаз(PL) اتیلن با ماکل مشخص آنها در زمینه هیدروبوراسیت (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، نور پلاریزه).



شکل ۸- بلورهای کوارتز(Q) اتیلن در زمینه هیدروبوراسیت (بزرگنمایی ۴۰ برابر، نور پلاریزه).

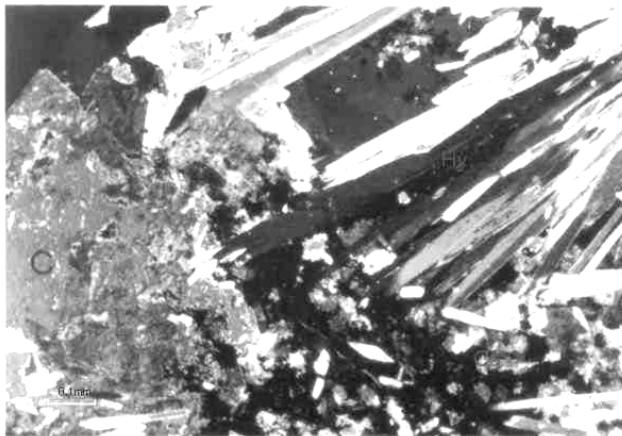


شکل ۹- بلورهای بزرگ کلمانیت با بافت موزائیکی حاوی ادخالهای کلسیت
(بزرگنمایی ۲۵ برابر، نور پلازیزه).

ژئوشیمی بور

عنصر بور در طبیعت نسبتاً کمیاب بوده و بواسطه میل شدید آن برای اکسید شدن بطور آزاد یافته نمی‌شود. این عنصر دارای قدرت احیاکنندگی بسیار قوی می‌باشد. بعلت پتانسیل یونی بالا دارای تحرک ژئوشیمیابی زیادی است و از طرفی هم از عناصر HFS می‌باشد و لذا در حین تبلور ماقما در سیالات باقیمانده همراه با یونهای Li, Be, Rb, Cs, REE, U, Nb, Ge وغیره، تمرکز می‌یابد. بعلت پتانسیل یونی بالا کمپلکسها ای با پایداری زیاد در محلول می‌سازد و لذا قدرت تحرک زیادی در محیط‌های سوپرژن اکسیک دارد. در این محیط‌ها تغییرات شدید اسیدیتنه (از ۳ الی ۸) نیز باعث خروج آن از محلول نمی‌شود و وجود شرایط احیایی برای نهشته شدن کانیهای آن ضروری است (Oi *et al.*, 1989).

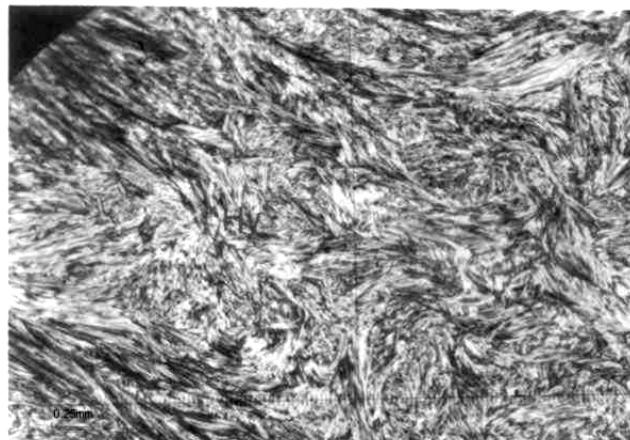
نتایج آنالیزهای شیمیابی توفهای موجود در ناحیه معدنی مورد مطالعه بخوبی آنومالی مثبت بور در توفها را نشان می‌دهد که از حدود ۳۶۰ تا بیش از ۱۰۰۰ ppm می‌باشد (گزارش گروه مهندسی کانسار دانشکده فنی دانشگاه تهران ۱۳۶۷). این آنالیزها نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از سنگهای دربرگیرنده توده معدنی (رس، مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا) میزان بور در این لا یه ها با سرعت کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- بلورهای بزرگ بادبزنی شکل هیدروبوراسیت (سمت راست) به همراه کلمانیت با بافت موزائیکی (سمت چپ) (بزرگنمایی ۲۵ برابر، نور پلاریزه).

براساس این مطالعه میزان لیتیم در اکثر نمونه‌ها بسیار ناچیز است و معدل آن حدود ۱٪ درصد است. این در حالی است که طبق نظر (Orti and Alonso, 2000) میزان لیتیم در کانیهای رسی همراه با کانسارهای بور سینزنتیک از نوع اگزالاتیو رسوبی بالا بوده و بیش از ۳٪ درصد می‌باشد.

در منطقه معدنی در واحدهایی که شرایط اکسیدان در آنها حاکم بوده (مانند رسوبات ماسه‌ای، کنگلومرازی و توده تراورتنی معاصر با کانی‌سازی)، علیرغم وجود فضاهای خالی مناسب برای نهشته شدن کانسار و قرار داشتن این واحدها در محدوده سلول چرخشی هیدروترمال کانی‌ساز، تمرکز بور مشاهده نمی‌شود. اصولاً تمرکزهای مهم بور در این کانسار همراه با رخساره‌های احیایی است. این مشاهده حاکی از این است که برای کانی‌سازی بوراتها وجود شرایط احیایی ضروری است (Gasca *et al.*, 1998).



شکل ۱۱- بلورهای هیدروبوراسیت با بافت جریانی (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، نور پلاریزه).

وجود ژیپس و انیدریت همراه با کانیهای اولیه بور حاکی از غنی بودن یون سولفات در این سیالات است. با توجه به پاراژنر کانی‌شناسی در این کانسار و شرایط پایداری کانیهای بور (Smith and Medrano, 1996)، حضور ادخالهایی از بلورهای اتیزن کوارتز و فلدسپات در کانیهای بور و مطالعات دیگر انجام شده در کانسارهای بور دنیا، pH سیالات کانی‌ساز را حدود ۸ الی ۹ می‌توان در نظر گرفت (e.g., Floyd *et al.*, 1998; Palmer and Helvacı, 1995) (You *et al.*, 1993; Oi *et al.*, 1989; Alonoso *et al.*, 1988).

دگرسانی

کانسارهای بورات نثوزن عموماً پس از تدفین تغییرات ثانویه گستردگی را متحمل شده‌اند (Smith and Medrano, 1996). این تغییرات در اثر افزایش حرارت، فشار یا تاثیر آبهای جوی فرورو بوده است، بدین لحاظ معمولاً مجموعه کانیهای اولیه بوراتها ندرتاً حفظ شده‌اند (Smith and Medrano, 1996). کانیهای ثانویه عموماً دارای نسبت آب به بورات بالاتری هستند که حاکی از یک سیستم دگرسانی آب-حاکم (water-dominated) است. مطالعه ایزوتوپهای پایدار در ذخایر بورات در دریاچه سیرلز (Searles) نشان می‌دهد که حتی نهشته‌های بظاهر اولیه بورات با سن حدود ۳۵۰۰ هزار سال نیز دچار دگرسانی شده‌اند (Friedman *et al.*, 1986).

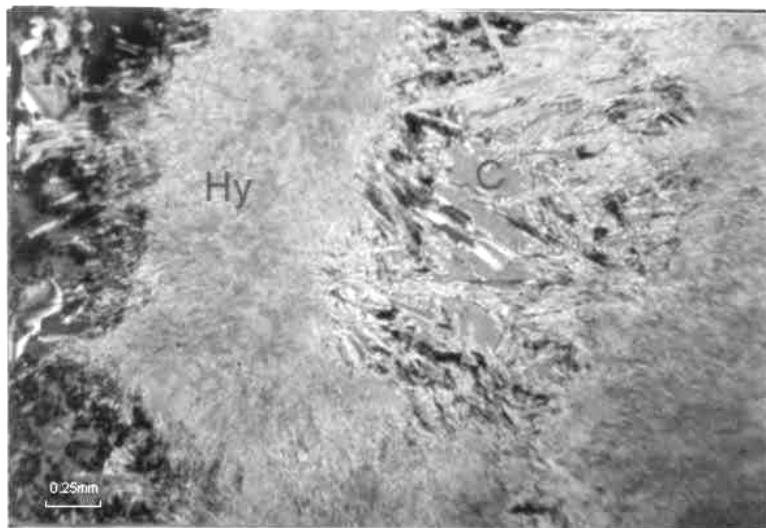
بطور کلی معمولاً دگرسانی‌هایی که در کانسارهای بورات مشاهده می‌شود شامل

دگرسانی‌هایی است که در اثر تدفین، افزایش حرارت و فشار حادث می‌شوند. بخشی از این دگرسانی‌ها نیز بر اثر واکنش با محلولهای گرم و آبهای زیرزمینی با کانسار روی می‌دهند. بواسطه عمق کم تدفین می‌توان اثرات حرارت و فشار در دگرسانی کانسار مورد مطالعه را نادیده گرفت. اما دگرسانی بر اثر واکنش با محلولهای گرم و آبهای زیرزمینی در این کانسار اهمیت زیادی دارد و هم اکنون نیز در حال وقوع است.

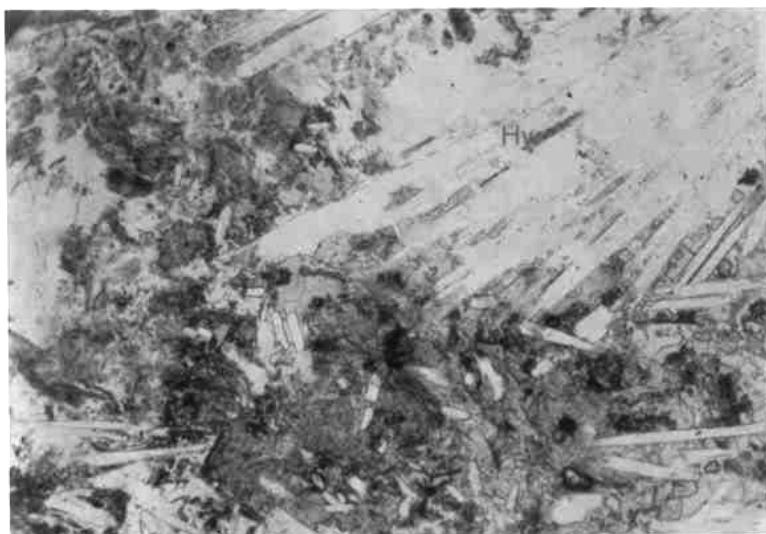
بواسطه دگرسانی، مجموعه‌های کانی‌شناسی در افقهای مختلف این کانسار تغییر می‌کند، بدین ترتیب که در کم عمق ترین عدسی‌های توده معدنی، کانی اصلی بور پریسیت (بورات کلسیم) است. در زیر این افق، کلمانیت (بورات کلسیم آبدار) اهمیت می‌یابد. سپس با افزایش بیشتر عمق به افقی برخورد می‌کنیم که کانی اولیه بور یعنی هیدروبوراسیت (بورات کلسیم و منیزیم آبدار) در آن فراوانی بسیار زیادی دارد. این کانی سازنده حجم اصلی توده معدنی می‌باشد (حدود ۸۰ درصد). با افزایش بیشتر عمق، تا جایی که گمانه‌های حفر شده نشان می‌دهند مرتبأ درصد این کانی در عدسی‌های معدنی افزایش می‌یابد. کانیهای زایبلیت و ارتوپیناکیولیت در لامینه‌های واروی شکل رسی که حاوی تمرکزهای ناچیز بور هستند، مشاهده می‌شوند.

نفوذ و گردش آبهای جوی از طریق سیستم گسلهای گسترده‌ای که در محل معدن وجود دارد به سمت افقهای پایینتر صورت می‌گیرد. این سیالات که غالباً غنی از یونهای مختلف بخصوص کلسیم هستند موجب دگرسانی کانی اولیه بور، یعنی هیدروبوراسیت، که بسیار واکنش‌پذیر است، می‌گردد. از کانیهای ثانویه مهم که حاصل دگرسانی هیدروبوراسیت است کانی کلمانیت می‌باشد. در طی این فرایند دگرسانی تبادل Mg با Ca بین هیدروبوراسیت و سیالات جوی صورت می‌گیرد و کانی کلمانیت حاصل می‌شود. این دگرسانی در مقاطع نازک نمونه‌های این کانسار نیز بخوبی مشاهده می‌شود (اشکال ۱۳ و ۱۲). کلمانیت‌هایی که بدین ترتیب حاصل شده‌اند در اثر واکنش با این محلولها و آبگیری تبدیل به پریسیت می‌شوند و در برخی مواقع شدت واکنش با سیالات آنچنان زیاد است که کانیهای ثانویه بور بنیان بورات خود را نیز با کربنات محلولها مبادله می‌کنند و نهایتاً کلسیت حاصل می‌شود. این کلسیتی شدن در مقاطع نازک عمدتاً در امتداد شکستگیها دیده می‌شود (اشکال ۹ و ۱۴).

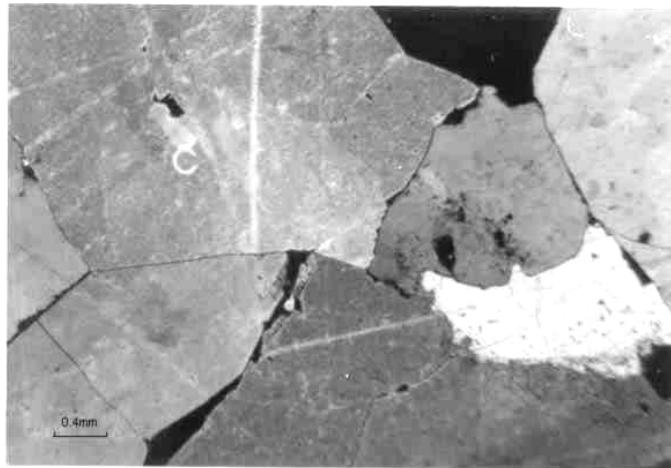
در لامینه‌های واروی شکل هیدروبوراسیتهای ثانویه بترتیب با ازدست دادن کلسیم و جانشینی منگنز به کانیهای زایبلیت و ارتوپیناکیولیت تبدیل شده‌اند (Orti and Alonso, 2000). به علت حلالیت بالا (Orti and Alonso, 2000) کانیهای اخیرالذکر فقط در لامینه‌های رسی، که از واکنش با سیالات در امان هستند، حضور دارند.



شکل ۱۲- بلورهای شعاعی هیدروبوراسیت در حال تبدیل شدن به کلمانیت (مرکز و چپ تصویر) (بزرگنمایی ۲۵ برابر، نور پلاریزه).

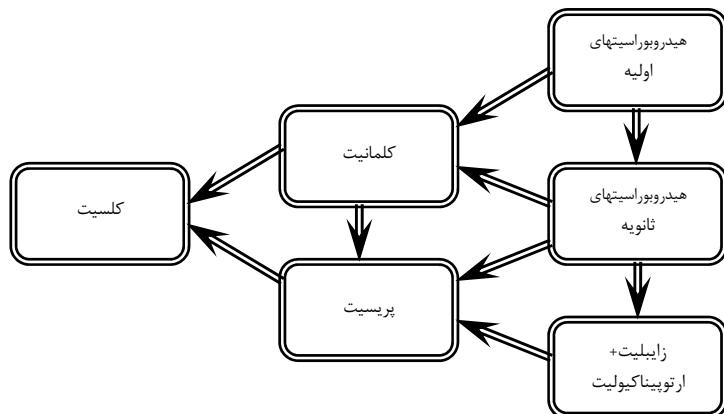


شکل ۱۳- بلورهای کلمانیت (C) در فضاهای خالی مابین بلورهای ریز شعاعی هیدروبوراسیت (Hy) (بزرگنمایی ۲۵ برابر، نور طبیعی).



شکل ۱۴- بلورهای بزرگ کلمانیت (زمینه تصویر) در حال تجزیه به کلسیت در امتداد بلورهای
(بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، نور پلاریزه).

بطور کلی حداقل دگرسانی در حواشی عدسی‌های کانسار دیده می‌شود و بخش‌های مرکزی این عدسیها از دگرسانی تا حد زیادی مصون مانده‌اند، البته در مقاطع نازک نسلهای مختلفی از کانی هیدروبوراسیت دیده می‌شود که حاکی از انحلال و تبلور مجدد این کانی است (شکل ۶).
شکل ۱۵ شماتیک کلی دگرسانی‌های این کانسار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- دیاگرام شماتیک نشاندهنده مراحل دگرسانی در کانسار مورد مطالعه.

نحوه تشکیل کانسار و نتیجه‌گیری

بطور کلی برای ژنر کانسارهای بور دنیا دو مدل اصلی ارائه شده است که شامل کانسارهای بور-اگزالاتیو رسوی و کانسارهای بور هیدروترمال است. کانسارهای گروه اول درنهشته‌های رسوی-تبخیری بصورت سینترنیک یعنی در حین نهشته شدن رسوبات تشکیل شده‌اند. در این حوضه‌ها فورانهای ولکانیکی در بستر حوضه موجب ورود یونهای بور به حوضه و نهشته شدن کانسارهای بور بصورت همزمان با رسوبگذاری شده است. در این کانسارها ساختمانهای رسوی مختلف مانند ریپل مارک، ترکهای گلی و غیره دیده می‌شوند. از مشخصات مهم این کانسارها استراتاباند و استراتیفرم بودن این نهشته‌ها است. رخسارهای لایه‌ای و نواری این نوع از کانسارهای بور حاکی از نهشته شدن آنها در یک محیط آبی است (Orti and Alonso, 2000; Helvacı 1995). در این نوع کانسارها هیچ ارتباط خاصی بین گسلها و کانی‌سازی دیده نمی‌شود (Orti and Alonso, 2000).

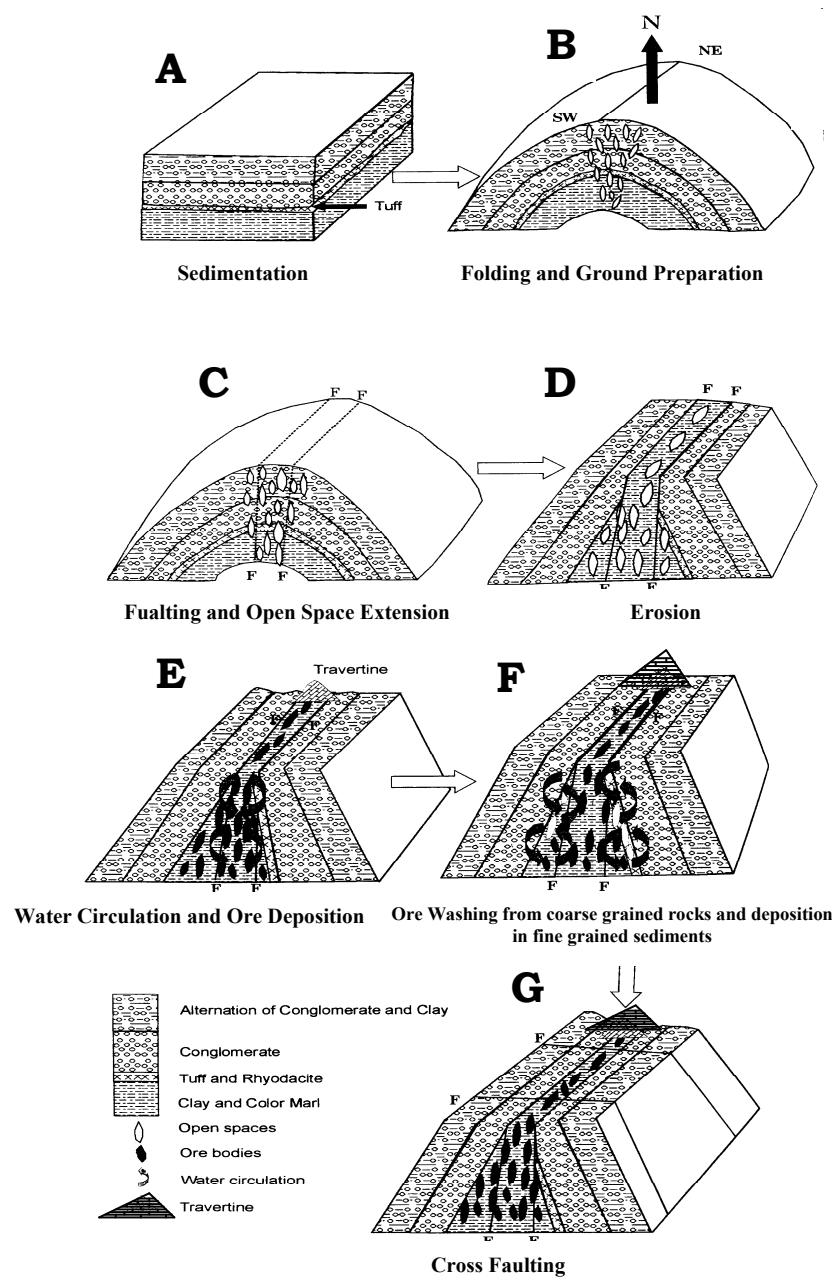
این گروه از کانسارها ساختمان استراتیفورم و حتی استراتاباند ندارند و عموماً بصورت متقطع (Cross-cut) با سنگهای میزبان قرار دارند. این نوع کانسارهای بور آنومالی مثبت شدیدی از عناصر Sr , Li , As و S نشان می‌دهند (Alonso *et al.*, 1991). رسهای همراه با این کانسارها عموماً دارای لیتیم تا حدود 0.03% درصد هستند (Burns *et al.*, 1995). در کانسار مورد مطالعه هیچگونه ساختمان رسوی مشاهده نمی‌شود و توده معدنی استراتیفرم و استراتاباند نبوده بلکه کانی‌سازی بصورت متقطع با سنگهای میزبان در امتداد گسلهای معدن و در افقهای مختلف روی داده است.

براساس نظر (Helvacı and Ortı, 1998) کانسارهای بور که در ارتباط با فعالیتهای آتشفشاری تشکیل شده‌اند حاوی کانیهای رالگار، ارپیمان، گوگرد و سلسنتین بوده و غنی شدگی از عناصر Li , Sr , As و S نشان می‌دهند. با توجه عدم حضور کانیهای رالگار، ارپیمان، گوگرد و سلسنتین در کانسار مورد مطالعه، عدم غنی شدگی این کانسار از عناصر با منشاء آتشفشاری یعنی این نکات و مطالعات صحرایی، میکروسکوپی و ژئوشیمیایی نحوه و مراحل تشکیل این کانسار را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد (شکل ۱۶):

رسوبات سازند قرمز فوقانی در میوسن بالایی در این ناحیه در یک محیط قاره‌ای -کولابی نهشته شدند. در طی حرکات تکتونیکی بعدی این رسوبات چین خورده، گسلها و شکستگی‌هایی در آنها ایجاد شد. گسلهای با امتداد NE-SW از طرفی موجب گسترش تخلخل از نوع شکستگی در این رسوبات شده و از طرف دیگر امکان گردش سیالات جوی فرورو در آنها را فراهم آوردند. این سیالات با نزول به اعماق با توجه به گرادیان حرارتی بالای ناحیه (بواسطه مجاورت با زون سهند-بزمان) گرم شده و با فروشست (Leaching) لایه‌های توفهای ریوداسیتی، که بصورت بین‌لایه‌ای در سازند قرمز فوقانی در منطقه وجود دارند، از بور غنی گردیدند. مطالعات ژئوشیمیایی و ایزوتوپی در سیالات هیدروترمال نیوزیلند نشان داده است که بور موجود در بسیاری از این سیالات بوسیله فروشست سنگهای آذرین اسیدی حاصل شده است (Giggenbach, 1995). این فروشست بور از سنگهای آذرین می‌تواند حتی بدون ظهور آثار تجزیه‌ای مهم در این سنگها باعث غنی‌شدگی سیالات از بور گردد (Slack and Coad, 1989).

بدین ترتیب یک سلول از جریان همرفتی گرمایی موجب چرخش سیالات با منشاء جوی در ناحیه ایجاد گردید. این سیالات غنی از بور از طریق گسلهای منطقه چرخش نموده و در افقهایی که این گسلها لایه‌های رسی-مارنی را قطع می‌کرند بواسطه برقراری شرایط احیایی امکان نهشته شدن هیدروبوراسیت فراهم گردید. گسلهای با امتداد NE-SW نقش بسیار مهمی در ایجاد تخلخل مورد نیاز و معبری مناسب برای گردش سیالات و ایجاد سلول همرفتی گرمایی در این ناحیه ایفا نموده‌اند. توده تراورتنی موجود در بالاترین افق چینه شناسی این ناحیه که بصورت دگرشیب و محلی روی جوانترین واحدهای منطقه را می‌پوشاند و در ناحیه معدنی بصورت کاملاً موضعی وجود دارد، در ارتباط مستقیم با این سیستم گسلی بوده و در حقیقت در انتهای بالایی این گسل واقع است. وجود این واحد نشانه مهمی از وجود یک این سلول همرفتی گرمایی در گذشته در این ناحیه است. ظاهرا این توده تراورتنی بصورت همزاد با توده کانسار توسط این سیستم همرفتی در ناحیه معدنی بوجود آمده است.

در زمانهای بعدی حرکات تکتونیکی در ناحیه موجب ایجاد گسلهایی با امتداد NW-SE در توده معدنی و سنگ درونگیر گردید. این گسلها ایجاد شکستگی‌های جدیدی نمودند که امکان گردش مجدد سیالات در توده معدنی و دگرسانی‌های بعدی در آن را فراهم آورد. با توجه به اینکه سیستم گسلی کانی‌ساز رسوبات کواترنر را قطع نموده‌اند می‌توان سن کانی‌سازی را مربوط به بعد از این زمان دانست. سیستم گسلی جوان NW-SE، با روندی که منطبق با روند کلی این ناحیه است (رونده NW-SE)، سیستم گسلی فوق‌الذکر و توده معدنی را قطع نموده است.



شکل ۱۶- مدل شماتیک نشانده‌نده مراحل مختلف تشکیل کانسار بور قره‌گل.

References

- Alonso, R.N., Helvaci, C., Sureda, R., and Viramonte, J. (1988) *A new Tertiary borax deposit in the Andes*. Mineral. Deposita **23**, 299–305.
- Alonso, R.N., Jordan, T.E., Tabbutt, K.T., and Vandervoort, D.S. (1991) *Giant evaporite belts of the Neogene central Andes*. Geology, **19**, 401–404.
- Burns, P.C., Grice, G.D., and Howthorne, F.C. (1995) *Borate Minerals. I. Polyhedral clusters and fundamental building blocks*. Can. Mineral., **33**, 1131–1151.
- Floyd, P.A., Helvaci, C., and Mittwede, S.K. (1998) *Geochemical discrimination of volcanic rocks associated with borate deposits: an exploration tool?* J. Geoch. Exp. **60**, 185–205.
- Friedman, I., Smith, G.I., and Matsuo, S. (1986) *Economic implication of the deuterium anomaly in the brine and salts in Searles lake, California*. Econ. Geol., **81**, 694–702.
- Gasca, M.A.M., Caballero, J.A.G., and Eastoe, C.J. (1998) *Borate deposits of Northern Sonora, Mexico: stratigraphy, tectonics, stable isotopes and fluid inclusions*. Econ. Geo., **93**, 510–523.
- Giggenbach, W.F. (1995) *Variation in the chemical and isotopic composition of fluid discharge from the Taupo volcanic zone, New Zealand*. In Grew, E.S and Anovitz, L.M., (eds), 1996, Boron mineralogy, petrology and geochemistry, Reviews in Mineralogy, Min. Soc. Am. **33**, 862p.
- Helvaci, C. (1995) *Stratigraphy, mineralogy, and genesis of the Bigadic borate deposits, western Turkey*. Econ. Geol., **90**, 1237–1260.
- Helvaci, C., and Ortı, F. (1998) Sedimentology and diagenesis of Miocene colemanite-ulexite deposits (Western Anatolia, Turkey). J. Sed. Res. **68**, 1021–1033.
- Oi, T., Nomura, M., Musashi, M., Ossaka, T., Okamoto, M., and Kakihana, H. (1989) *Boron isotopic composition of some boron minerals*. Geochim. Cosmochim. Acta, **53**, 3189–3195.
- Ortı, F., and Alonso, R.N. (2000) *Gypsum-hydroboracite association in the Sijies Formation (Miocene, NW Argentina)*: Implications for genesis of Mg-bearing borates. J. Sed. Res. **70**, 664–681.
- Slack, J.F., and Coad, P.R. (1989) *Multiple hydrothermal and metamorphic events in the Kidd Creek volcanogenic massive sulphide deposit, Timmins, Ontario: Evidence from tourmalines and chlorites*. Can. J. Earth Sci. **26**, 694–715.
- Palmer, M.R., and Helvaci, C. (1995) *The boron isotope geochemistry of the Kirka borate deposit, western Turkey*. Geochim. Cosmochim. Acta, **59**, 3599–3605.
- Smith, G.I., and Medrano, M.D. (1996) *Continental borate deposits of Cenozoic age*, In Grew, E.S and Anovitz, L.M., (eds), 1996, Boron mineralogy, petrology and geochemistry, Reviews in Mineralogy, Miner. Soc. Am., **33**, 862P.
- You, C.F., Spivack, A.J., Smith, J.H., and Gieskes, J.M. (1993) *Mobilization of boron in convergent margins: implications for the boron geochemical cycle*. Geology **21**, 207–210.

فرجاد باستانی، م. (۱۳۷۶) کانی‌شناسی، کانی‌زایی، خاستگاه و عوامل کنترل کننده محیطی
تمرکز بور در کارسuar بور قره‌گل زنجان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی،
۳۰۷ ص.

گروه مهندسی کارسuar دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۶۷) گزارش کانه‌آرایی کانسنسنگ معدن
بور قره‌گل زنجان، ۵۸ ص.