

کانسار منگنز توکلان در استان کردستان: فرایندی کم نظیر از کانه‌زایی منگنز

حسین معین وزیری*

دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

(دریافت مقاله: ۹۷/۲/۲۹، نسخه نهایی: ۹۷/۷/۲۲)

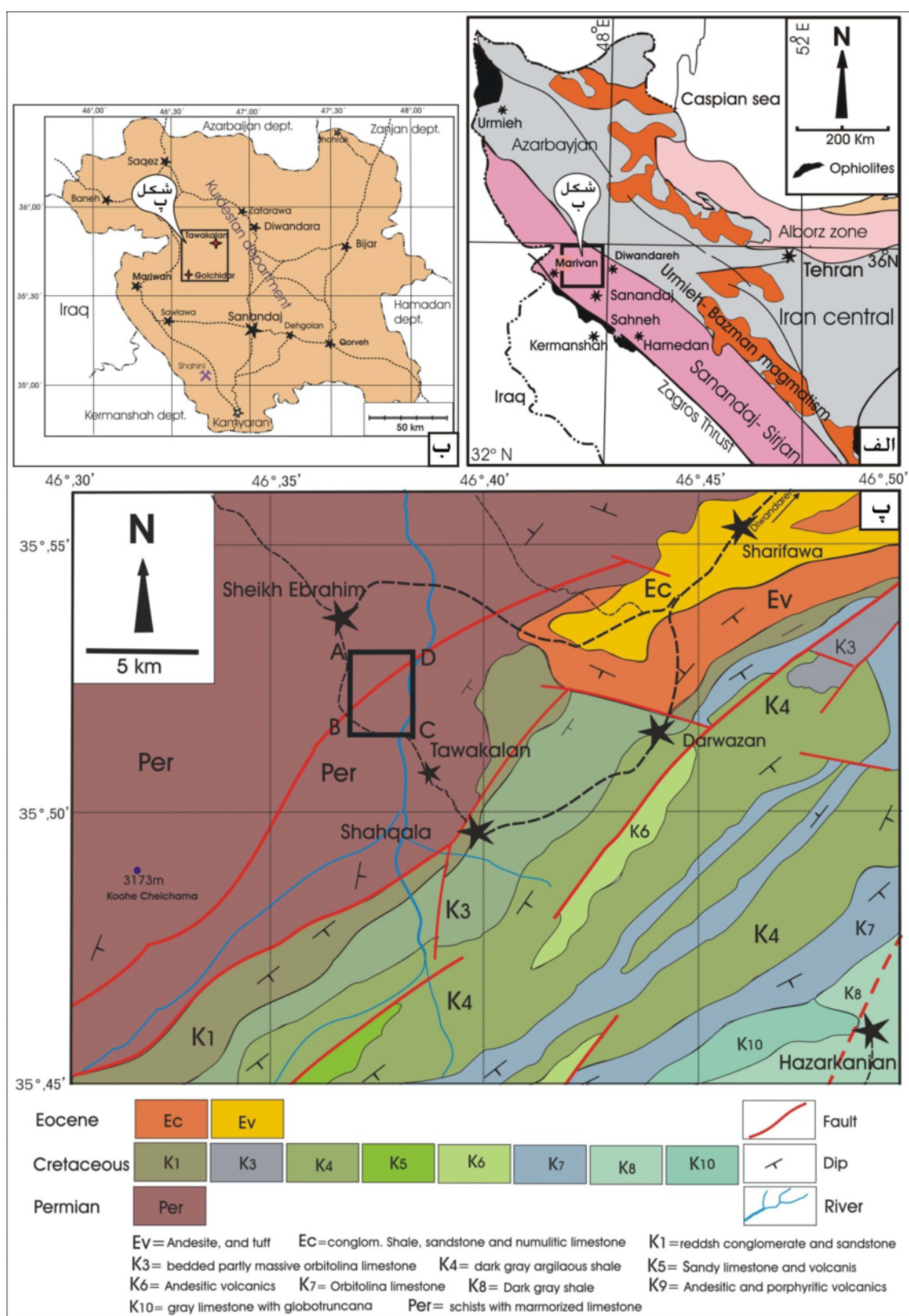
چکیده: در استان کردستان کانه‌زایی منگنز در چند نقطه از جمله شاهینی در جنوب غرب سنندج، سیاناو در غرب مریوان، توکلان در غرب دیواندره و گلچیدر در شرق مریوان، صورت گرفته اما کانسار توکلان دارای ویژگی‌هایی است که با اصول معمول سنگ شناسی قابل تفسیر نیست. این کانسار در دورترین نقطه شمال غربی پهنه‌ی سنندج- سیرجان و در زمین‌های پالئوزوئیک قرار دارد. کانسنگ معدن توکلان از سیلیکات‌های دمای بالا مانند اسپسارتیت و رودونیت گاهی همراه با تفروئیت تشکیل شده است که تبلور آنها اغلب در دماهای بالا و بدون حضور آب انجام میگیرد، درحالی که کانسنگ‌های معدن توکلان به صورت عدسی‌های گسسته و دور از هم درون شیل، ماسه‌سنگ، توف‌های آتشفشانی و رادیولاریت قرار دارند که دگرگونی گرمایی نشده‌اند و آثاری از توده‌ی نفوذی نیز در منطقه دیده نمی‌شود. ترتیب تبلور کانی‌ها در کانسنگ شامل اسپسارتیت و رودونیت، بمانتیت، سیلیکات‌های آبدارمنگنز، رودوکروزیت و اکسیدهای منگنز است. سیلیکات‌های آبدارمنگنز نیز شامل اورینتیت، کاریوپیلیت، زوسمانیت و اکسیدهای منگنز پیرولوزیت و رانسیه-ئیت هستند. باطله از کوارتز (اغلب به صورت ژاسب)، کمی مگنتیت و آنتیگوریت تشکیل شده است. کربنات و اکسیدهای منگنز فرآورده‌های ثانوی و نتیجه‌ی دگرسانی سیلیکات‌های منگنز هستند. پیمایش‌های صحرایی، بررسی‌های آزمایشگاهی و مقایسه معدن منگنز توکلان با کانی‌زایی منگنز در سایر نقاط جهان یک فرایند دومرحله‌ای را برای تشکیل همبرهای دمای بالای منگنز در معدن توکلان پیشنهاد میکند: بدین ترتیب که در مرحله‌ی نخست، اکسیدهای منگنز به صورت رسوبی در لایه‌های آتشفشانی-رسوبی منطقه تشکیل شده و در مرحله‌ی دوم، پس از یک دوره کوهزایی، فعالیت‌های دگرگونی و ژرف توده‌ای، سیال‌های دمای بالای آزاد شده از توده‌های آذرین عمیق اکسیدهای منگنز رسوبی را در خود حل کرده، در افق‌های بالاتر به صورت سیلیکات‌های دمای بالا بجا گذاشته-اند. دگرسانی سیلیکات‌های دمای بالا و تولید کربنات و اکسیدهای منگنز در پایان این مرحله صورت گرفته است که سیال‌ها به سردی گراییده‌اند.

واژه‌های کلیدی: منگنز؛ اسپسارتیت؛ رودونیت؛ کانه‌زایی؛ توکلان؛ کردستان.

مقدمه

در استان کردستان معادن کوچک و پراکنده‌ی منگنز ازجمله شاهینی (جنوب سنندج)، سیاناو (غرب مریوان)، توکلان (غرب دیواندره) و گلچیدر (شرق مریوان) وجود دارند. کانسار منگنز توکلان در غرب شهرستان دیواندره، شمال غرب روستای توکلان، بین ۶۴۵۸۹۶ تا ۶۴۷۹۰۰ متر طول شرقی و ۳۹۶۹۵۴۵ تا ۳۹۷۲۲۴۵ متر عرض شمالی قرار دارد (شکل‌های ۱ الف و ب). مهم‌ترین راه دسترسی به این منطقه راه آسفالت‌هی سنندج-

سقز است که از شمال منطقه می‌گذرد. در این مسیر، در ۱۵ کیلومتری دیواندره، جاده‌ای فرعی به سمت جنوب از جاده‌ی اصلی جدا شده است که پس از طی ۳۵ کیلومتر و عبور از روستاهای ابراهیم‌آوا و شریف‌آوا، به روستای شیخ ابراهیم می‌رسد. از این روستا تا منطقه‌ی مورد بررسی حدود ۱۰ کیلومتر جاده خاکی است. کانسار منگنز توکلان دارای ساختار زمین-شناسی و همبرهای ویژه‌ای است که با اصول معمول سنگ شناسی قابل تفسیر نیست. در این منطقه کانسنگ منگنز



شکل ۱ الف: جایگاه منطقه از نظر تقسیمات ساختاری ایران، ب: نقشه راه‌های استان کردستان و دسترسی به منطقه توکلان، پ: نقشه زمین شناسی منطقه براساس نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ چارگوش سنندج [۱]. منطقه مورد بررسی بصورت چارگوش A، B، C، D نشان داده شده‌است.

های XRF، ICP و XRD در شرکت‌های کانساران بینالود و تحقیقات زمین‌شناسی کان‌پژوه انجام شد، اما تجزیه‌ی نقطه‌ای و بررسی میانبارهای سیال در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران صورت گرفت.

زمین‌شناسی محدوده‌ی معدنی

با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ چارگوش سنندج (شکل ۱ پ)، کانسار منگنز توکلان در واحدهای سنگی پرمین قرار دارد. در شمال غرب این منطقه، بیشتر سنگ‌ها وابسته به پرمین و یا قدیمی‌تر هستند و در جنوب شرق منطقه سازندهای مزوزوئیک و ترسیر دیده می‌شوند. سنگ‌های منطقه عبارتند از آگلومرا (شکل ۲ الف)، سیرسیت شیسیت (شکل ۲ ب)، داسیت، ریولیت، شیل و رادیولاریت که کم و بیش دستخوش دگرشکلی شده‌اند. مقاطع میکروسکوپی این سنگ‌ها نیز نشانگر وجود شیسیت، توف‌های داسیتی، ریولیتی، رادیولاریت (شکل ۳)، ماسه سنگ و ژاسپ هستند. ژاسپ، رادیولاریت، توف‌های اسیدی و ماسه سنگ سنگ‌های درونگیر کانسار هستند. چینه بندی در منطقه‌ی معدنی دارای جهت شمالی- جنوبی است، اما در بعضی نقاط به علت نقش گسل‌ها، راستای شرقی- غربی پیدا کرده است. در شرق منطقه، شیب لایه‌ها به طرف شرق و در غرب منطقه، شیب به طرف غرب است. شیب لایه‌ها از چند درجه تا ۳۵ درجه تغییر می‌کند. بیشتر گسل‌های منطقه دارای جهت شمال شرقی- جنوب غربی و تقریباً عمود بر روند عمومی پهنه‌ی زاگرس هستند، اما گسل‌هایی با روند شرقی- غربی، شمال غربی- جنوب شرقی نیز وجود دارند. کانسنگ منگنز به صورت عدسی‌های پراکنده در سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی دیده می‌شود. بیشتر سنگ‌های منطقه جهت‌یافتگی کانی- شناسی نشان نمی‌دهند، اما برخی در اثر گسل‌های امتدادلغز ساخت شیسیتی پیدا کرده‌اند.

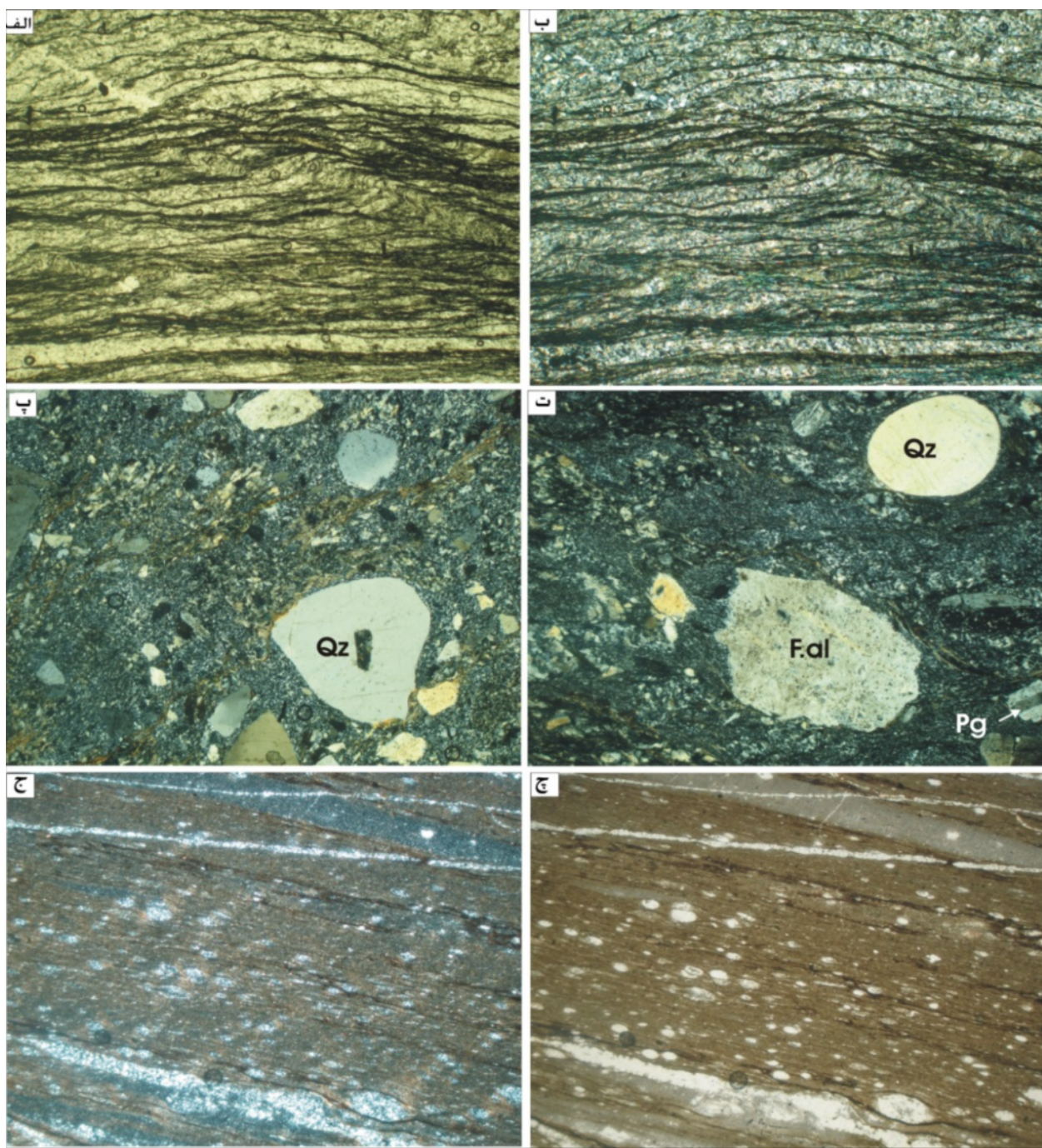
شامل مجموعه‌ای از سیلیکات‌های دمای بالا مانند اسپسارتیت و رودونیت گاهی همراه با تفرویت (نروسیلیکات منگنز) است که تبلور آن‌ها اغلب در دماهای بالا انجام می‌گیرد. این در حالی است که کانسنگ منگنز توکلان به صورت عدسی‌های بریده و نامنظم درون شیل، ماسه سنگ، توف‌های آتشفشانی و رادیولاریت قرار دارد و سنگ‌های درونگیر آن دچار دگرگونی گرمایی نشده‌اند و رخنمونی از توده‌ی نفوذی که سبب این کانی‌سازی دمای بالا شده باشد نیز در منطقه دیده نمی‌شود. متأسفانه به سبب کمبود پژوهش‌ها و انتشاراتی که به چنین همبرزایی در سایر نقاط جهان اشاره کرده باشند در این مقاله تنها به گزارش نتایج بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی پیرامون این کانسار اکتفا می‌شود. امید است که پژوهشگران جوان با داده‌های بیشتر و با استفاده از روش‌های تجزیه دستگاهی پیشرفته (اندازه‌گیری $\delta^{18}\text{O}$ ، سن‌سنجی پرتوسنجی و بررسی دقیق‌تر میانبارها) این پژوهش را ادامه داده و به نتایج مقبول‌تر دست یابند.

روش بررسی

پس از پیمایش‌های مکرر و آگاهی از ساختار زمین شناسی منطقه با استفاده از نقشه‌ی زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ چارگوش سنندج [۱]، از کانسنگ و سنگ‌های دربرگیرنده آن نمونه برداری شد. نمونه‌های کانسنگ به روش‌های طیف سنجی فلئورسانس پرتوی ایکس (XRF) و طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP) مورد تجزیه‌ی شیمیایی قرار گرفتند و با استفاده از پراش‌سنجی پرتوی ایکس (XRD) از نظر کانی‌شناسی نیز بررسی شدند. افزون بر این، ۲۰ نقطه از دو نمونه کانسنگ توسط ریز پردازش الکترونی (EPMA) تجزیه گردید. همچنین میانبارهای سیال کوارتز و اسپسارتیت به منظور تعیین دمای تبلور این کانی‌ها بررسی شدند. بررسی-



شکل ۲ الف) آگلومرا متشکل از قطعات ریولیت و داسیت به صورت میان‌لایه با متاولکانیتها و ب) سیرسیت شیسیت دارای شیسیت وارگی و نوارشکنجی. مقطع میکروسکوپی سیرسیت شیسیت در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی سریسیت شیبست دارای دگرشکلی S_1 و S_2 (الف و ب)، ریولیت و داسیت دارای ساخت پورفیری شامل درشت بلورهای کوارتز و فلدسپات (پ و ت) و رادیولاریت با آثاری از شعاعیان تغییرشکل یافته (ج و چ). ریولیت و داسیت جهت یافتگی ندارند. تصاویر الف و ج با نور PPL بقیه با XPL ثبت شده‌اند.

شواهد صحرایی کانه‌زایی

کانسنگ منگنز شامل سیلیکات‌های منگنز، کربنات و اکسیدهای منگنز همراه با ژاسپ است که به صورت توده‌های پراکنده در سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ و ۵). در این منطقه، کانه‌زایی نخست به صورت

سیلیکات‌های منگنز (اسپارتیت + رودونیت $\pm$ تفرویت) صورت گرفته است و در نتیجه‌ی دگرسانی سیلیکات‌ها، منگنز آزاد شده و به صورت اکسیدهای بی‌شکل همراه با سیلیس آهن- دار (ژاسپ قرمز) در شکستگی‌های سنگ مادر و یا در قاعده‌ی آن رسوب کرده‌اند. در منطقه کانسار توکلان، یازده رخمون

قطبشی تشخیص داده نمی‌شوند، بلکه به کمک پراش سنج پرتوی ایکس نیز به سختی قابل تشخیص هستند.

زمین‌شیمی کانسنگ

نتایج تجزیه شیمیایی ۹ نمونه کانسنگ به روش XRF در جدول ۱ آورده شده است. کانسنگ توکلان دارای ۳۳/۶۵ تا ۶۱/۶۹ درصد MnO، ۱۴/۵۶ تا ۴۴/۲۸ درصد SiO₂، کمتر از ۱۴/۶۳ درصد Fe₂O₃ و ۳/۳۵ درصد Al₂O₃ است. Al₂O₃ و Fe₂O₃ احتمالاً در ساختار اسپسارتیت و بخش مهمی از CaO در ساختار رودوکروزیت بکار رفته است. در جدول ۲ نیز عناصر کمیاب یک نمونه کانسنگ (AH) به روش ICP دیده می‌شود.

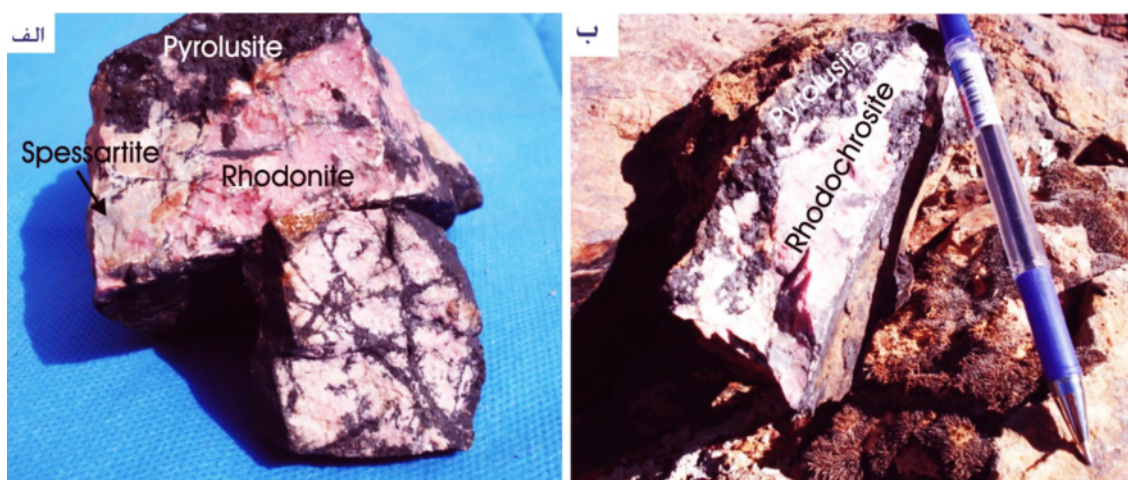
منگنز دیده شده است. آرایش رخنمون‌ها از چینه‌شناسی منطقه پیروی نمی‌کند. به عبارت دیگر، راستای رگه‌ها گاهی با چینه‌بندی موازی و گاهی نسبت به آن متقاطع است.

ویژگی‌های میکروسکوپی کانسنگ

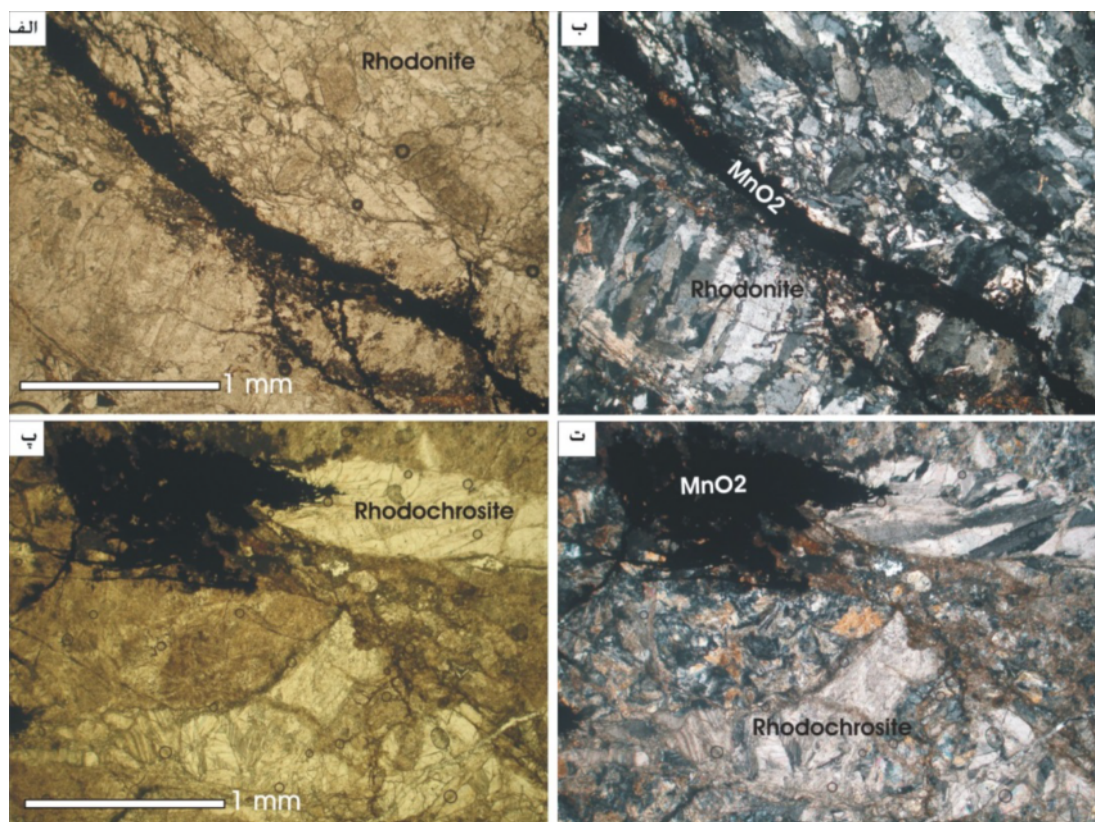
اسپسارتیت به صورت بلورهای کوچک خود شکل به قطر ۲۰ میکرون در زمینه‌ای از بمانتیت دیده می‌شود. رودونیت با حجم بیشتر، دارای بلورهای درشت به قطر بیشینه یک میلی‌متر است (شکل‌های ۶ الف و ب). رودوکروزیت که در نتیجه واکنش سیلیکات‌های منگنز با سیال‌های گاز کربونیک داربوجود آمده است نیز حضور دارد (شکل‌های ۶ پ و ت). اکسیدهای منگنز توکلان اغلب بی‌شکل هستند که نه تنها با میکروسکوپ



شکل ۴ رخنمون کانسنگ منگنز در سطح زمین (الف) و در ترانشه‌های اکتشافی (ب). قلوه‌ها اغلب از ژاسب و سیلیکات‌های منگنز تشکیل شده‌اند.



شکل ۵ تصاویر نمونه دستی کانسنگ منگنز توکلان: الف: کانسنگ دارای رودونیت، اسپسارتیت و پیرولولزیت و ب) کانسنگ دارای رودوکروزیت (سفید صورتی) و پیرولولزیت (سیاه). پیرولولزیت شکستگی‌های سنگ مادر را پر کرده‌است.



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی کانسنگ منگنز شامل رودونیت با برجستگی متوسط و دوشکستی ضعیف (الف و ب) و رودوکروزیت با دوشکستی بالا شبیه به سایر کربناتها (پ و ت). بلورهای رودوکروزیت و رودونیت جهت یافتگی نشان نمیدهند بنابراین تحت تأثیر نیروهای زمین‌ساختی قرار نگرفته‌اند (تصاویر سمت راست با نور PPL و سمت چپ با XPL).

جدول ۱ غلظت اکسید عناصر اصلی (برحسب درصد وزنی) ۹ نمونه کانسنگ تعیین شده به روش XRF (تجزیه نمونه های A.1 و A.2 توسط شرکت تحقیقاتی زمین شناسی کانپژوه و سایر نمونه ها توسط شرکت کانساران بینالود انجام شده است).

اکسیدها	A.1	A.2	A.3	K.1	B.3	S.3	M.7	M.10	M.3
SiO ₂	۱۷.۹۶	۱۴.۵۶	۴۰.۴۲	۴۴.۲۸	۲۷.۸۶	۱۵.۲۴	۲۷.۷۱	۳۵.۱۱	۲۱.۷۵
Al ₂ O ₃	۱.۶۵	۱.۷۰	۰.۵۷	۰.۱۷	۳.۳۵	۱.۳۷	۲.۷۶	۲.۹۸	۱.۷۳
Fe ₂ O ₃	۲.۴۵	۲.۱۲	۲.۳۲	۰.۹۶	۸.۲۹	۱.۱۶	۱۴.۶۳	۱۰.۵۶	۰.۷۲
CaO	۳.۳۷	۳.۲۹	۲.۶۳	۵.۳۲	۵.۸۶	۲.۵۳	۰.۸۶	۳.۶۵	۶.۳۶
Na ₂ O	۰.۰۶	۰.۰۹	۰.۰۲	۰.۰۹	۰.۲۶	۰.۲۲	۰.۱۶	۰.۳۴	۰.۳۲
K ₂ O	۰.۲۸	۰.۲۱	۰.۰۴	۰.۱۱	۰.۱۰	۰.۲۱	۰.۰۳	۰.۱۶	۰.۱۱
MgO	۰.۳۲	۰.۳۶	۱.۰۲	۰.۱۶	۰.۳۵	۰.۴۹	۱.۱۱	۰.۴۱	۰.۵۳
TiO ₂	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۱۲	۰.۰۷	۰.۲۵	۰.۰۳	۰.۲۱	۰.۲۲	۰.۰۱
MnO	۵۵.۵۲	۵۹.۵۷	۴۲.۴۶	۴۳.۷۲	۴۱.۷۱	۶۱.۶۹	۳۷.۳۳	۳۳.۶۵	۵۰.۸۷
P ₂ O ₅	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۵	۰.۱۶	۰.۲۵	۰.۱۱	۰.۱۲	۰.۱۱	۰.۰۷
S	<۰.۰۲	<۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
L.O.I.	۱۳.۶۸	۱۲.۵۶	۶.۸۹	۲.۸۰	۸.۰۴	۸.۲۹	۱۰.۰۷	۹.۳۴	۱۰.۷۲
Total	۹۵.۳۰	۹۴.۵۰	۹۶.۵۵	۹۷.۸۵	۹۶.۳۳	۹۱.۳۵	۹۵.۰۰	۹۶.۵۴	۹۳.۲۰

جدول ۲ غلظت عناصر (برحسب گرم در تن) یک نمونه کانسنگ (AH) تعیین شده به روش ICP.

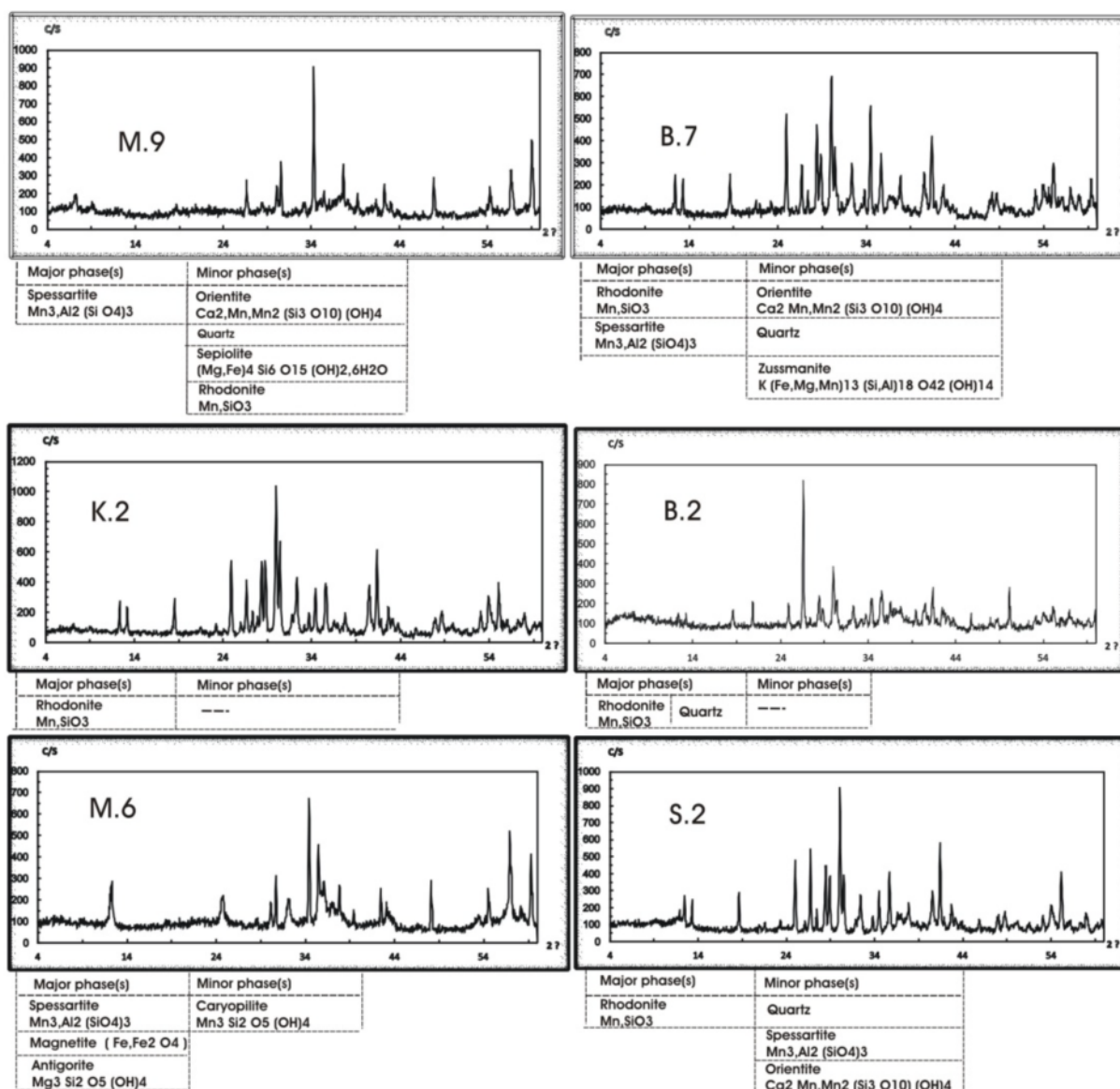
نمونه	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cu
AH	۱	۵	۱۰	۱	۵	۱	۱	۱	۱
	Cr	Ga	La	Li	Mo	Ni	Pb	Sb	Sn
AH	۱	۱۰	۱	۱	۱	۱	۱۱	۵	۱۰
	Sr	Th	Tl	U	V	W	Zn	Zr	
AH	۱	۲۰	۱۰	۱۰	۱	۱۰	۲	۱	

کانی‌شناسی کانسنگ منگنز توکلان

به‌منظور شناخت بهتر کانیهای سازنده‌ی کانسنگ منگنز توکلان، تعداد ۶ نمونه از کانسنگ توسط شرکت کانساران بینالود و ۲ نمونه توسط شرکت تحقیقاتی زمین‌شناسی کانپژه به روش XRD بررسی شدند. افزون بر این، در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران تعداد ۲۰ نقطه از کانسنگ شامل اکسیدهای منگنز، کربنات منگنز و سیلیکات‌های منگنز (اسپسارتیت و رودونیت) توسط ریز پردازشگر تجزیه‌ی نقطه‌ای شدند. همچنین تعدادی از میانبرهای دوفازی موجود در کانی‌های اسپسارتیت و کوارتز نیز در این مرکز بررسی شدند.

نتایج بررسی‌ها در ادامه شرح داده می‌شود.

بررسی کانی‌ها به روش XRD: بررسی نمونه‌ها به روش پراش پرتوی ایکس نشان داده است که کانسنگ از رودونیت، MnSiO_3 ، اسپسارتیت، $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ، کمی اورینتیت، $(\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3\text{Ca}_2\text{MnMn}_2(\text{Si}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_4)$ ، رانسیه‌ئیت، $(\text{Ca,Mn})\text{Mn}_4\text{O}_9\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ، زوسمانیت، $(\text{K(Fe,Mg,Mn)}_{13}(\text{Si,Al)}_{18}\text{O}_{42}(\text{OH})_{14})$ ، کاریوپیلیت، $(\text{Mn}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ ، سپیولیت، $(\text{Mg,Fe})_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، کوارتز، آنتی‌گوریت و مگنتیت تشکیل شده‌است (شکل ۷).



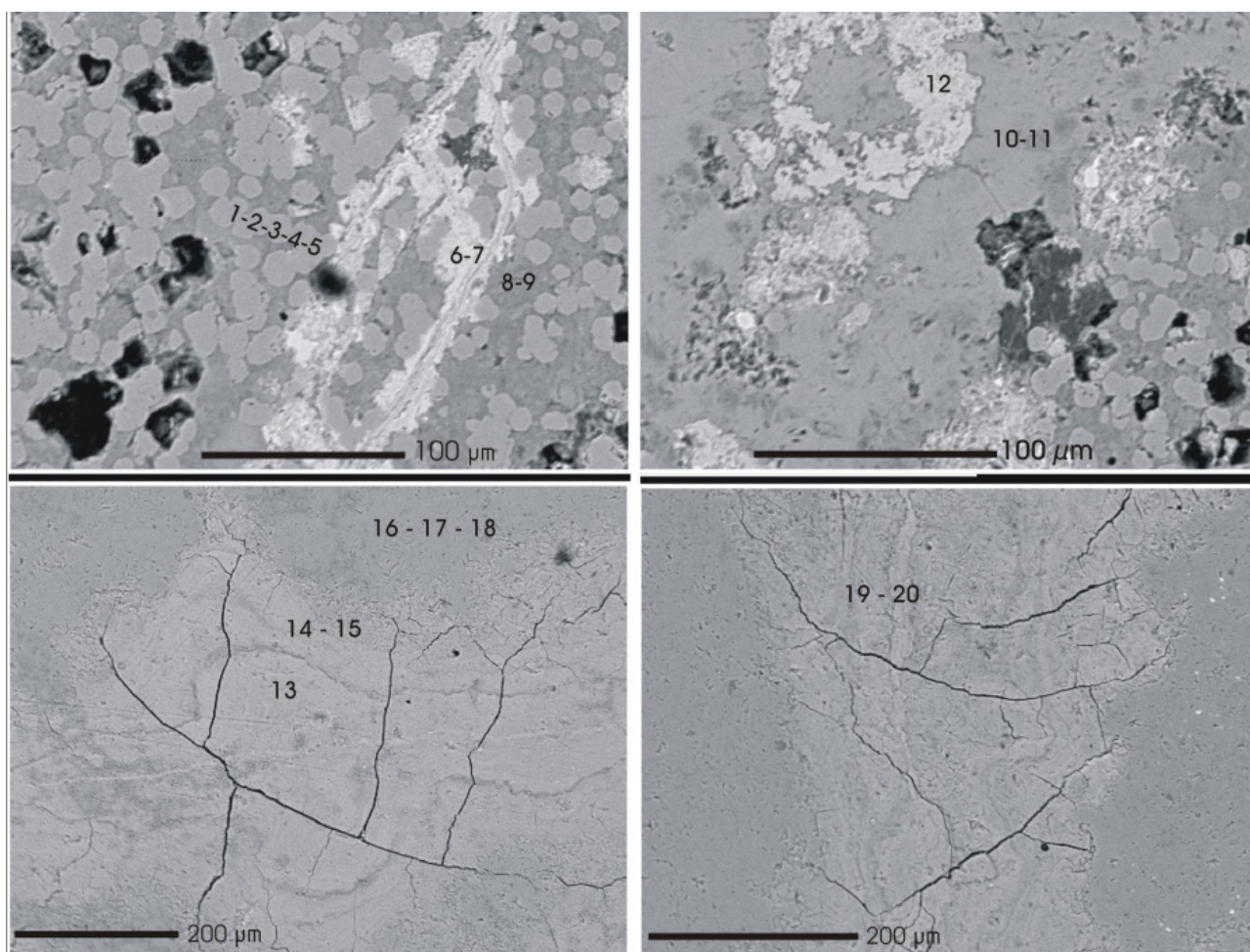
شکل ۷ طیف‌های XRD نشان‌دهنده کانیهای سازنده شش نمونه کانسنگ. رودونیت و اسپسارتیت نمونه‌های غالب هستند.

موجود در کوارتز در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران بررسی شدند (شکل ۹). از آنجا که قطر میانبارها کمتر از ۱۲ میکرون بود، محاسبه و اندازه‌گیری دما و شوری آن‌ها با دشواری بسیار صورت گرفت. باوجود این، دماهای همگن‌سازی دو فاز مایع و گاز در ۳ میانبار دوفازی بخار و مایع کوارتز ۲۱۸، ۲۲۳ و ۳۹۱ درجه‌ی سانتیگراد و شوری سیال ۲/۸۵ درصد وزنی معادل کلوروسدیم بدست آمد که نشان دهنده شرایط گرمایی دمای بالاست. در یک میانبار دو فاز اما بسیار کوچک اسپسارتیت دمای همگن‌سازی ۱۳۰ درجه‌ی سانتیگراد بدست آمد، اما به علت قطر کم میانبار، امکان اندازه‌گیری شوری مایع میسر نشد. بدون شک این میانبار در اسپسارتیت ثانوی است زیرا در شکستگی‌های بلور وارد شده است به ویژه دمای تبلور اسپسارتیت بسیار بالاتر از این درجه است.

نتایج تجزیه‌ی نقطه‌ای: تعداد ۲۰ نقطه از یک نمونه کانسار که پیشتر به کمک میکروسکوپ بررسی شده بودند، توسط ریزپردازشگر الکترونی تجزیه‌ی نقطه‌ای شدند (شکل ۸). نتایج (جدول ۳) نشان‌داد که کانی‌های مهم کانسار عبارتند از: اسپسارتیت، رودونیت، رودوکروزیت و پیرولولزیت. در تأیید این نتایج لازم به یادآوری است که بررسی مقاطع میکروسکوپی کانسنگ توسط میکروسکوپ قطبشی نیز وجود رودونیت و رودوکروزیت را در کانسنگ تأیید کرده است (شکل ۶)، افزون بر این، در تصویر فرامیکروسکوپی کانسار (شکل ۸) نیز بلورهای خودشکل و نسبتاً کوچک گارنت قابل تشخیص هستند.

ریزدماسنجی میانبارهای سیال

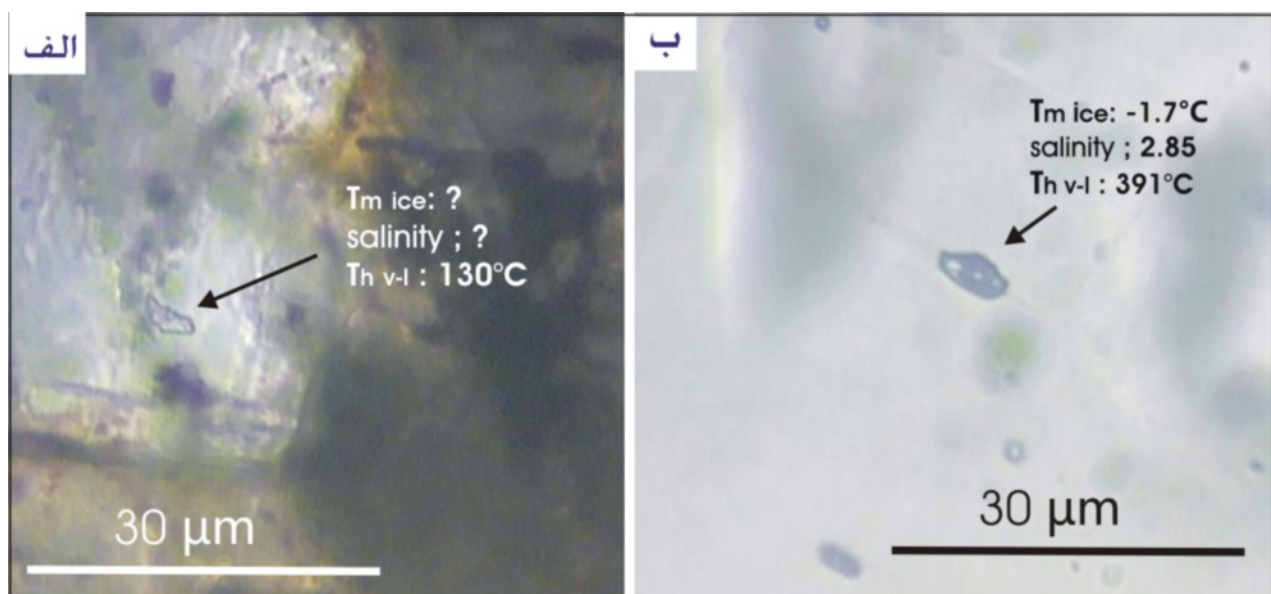
دو میانبار دوفازی موجود در اسپسارتیت و سه میانبار دوفاره‌ی



شکل ۸. معرفی نقاط تجزیه شده توسط ریزپردازشگر الکترونی. شماره‌های ۱ تا ۵: اسپسارتیت، ۶ و ۷ پیرولولزیت، ۸ تا ۱۱ بمانتیت، ۱۲ تا ۱۵ پیرولولزیت، ۱۶ تا ۱۸ رودونیت، ۱۹ و ۲۰ پیرولولزیت هستند.

جدول ۳ نتایج تجزیه شیمیایی کانیهای دو نمونه کانسنگ (M1 و M5) به روش ریزپردازش الکترونی (برحسب درصد وزنی)

شماره نقاط	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	FeOt	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Total	
۱ / ۵	۰٫۰۵	۰	۰٫۰۹	۴	۳۶٫۸۲	۳٫۵۱	۱۷٫۵۶	۳۴٫۵۱	۰٫۶۵	۹۷٫۱۷	
۲ / ۵	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۵	۲٫۵۵	۳۸٫۸۵	۳٫۳۵	۱۷٫۵۷	۳۴٫۴۸	۱٫۴۵	۹۸٫۳۲	
۳ / ۵	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۳	۲٫۸۱	۳۸٫۲۹	۳٫۹۴	۱۷٫۲۲	۳۴٫۸۲	۰٫۷۹	۹۷٫۹۰	اسپارتیت
۴ / ۵	۰٫۰۲	۰	۰٫۲۸	۲٫۰۲	۳۷٫۴۵	۵٫۸۸	۱۳٫۹۲	۳۰٫۱۶	۶٫۵۰	۹۶٫۲۳	
۵ / ۵	۰٫۰۳	۰	۰٫۰۳	۲٫۸۳	۳۸٫۵۵	۳٫۹۱	۱۷٫۹۰	۳۴٫۷۸	۰٫۴۱	۹۸٫۴۴	
۶ / ۵	۰٫۱۳	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۶۶	۷۲٫۶۶	۱٫۸۵	۰٫۰۸	۰٫۶۵	۰٫۷۸	۹۶٫۹۳	پیرولوژیت
۷ / ۵	۰٫۱۲	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۵۰	۷۳٫۶۶	۱٫۸۰	۰٫۱۰	۱٫۰۹	۰٫۱۰	۷۷٫۴۳	
۸ / ۵	۰	۰	۲٫۲۳	۰٫۱۵	۱۷٫۸۶	۲۲٫۹۸	۴٫۵۶	۳۹٫۲۹	۰٫۴۸	۸۷٫۶۴	
۹ / ۵	۰	۰٫۰۵	۲٫۴۲	۰٫۴۱	۱۷٫۵۹	۲۱٫۸۱	۴٫۴۸	۴۰٫۲۸	۰٫۴۵	۸۷٫۴۹	بمانتیت
۱۰ / ۵	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۲٫۷۳	۰٫۰۱	۳۱٫۵۷	۱۷	۱٫۷۰	۳۶٫۰۱	۰٫۰۲	۸۹٫۱۰	
۱۱ / ۵	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۲٫۵۵	۰٫۰۳	۳۲٫۳۵	۱۶٫۰۱	۱٫۲۷	۳۶٫۸۹	۰٫۰۱	۸۹٫۱۳	
۱۲ / ۵	۰٫۲۱	۰٫۱۱	۰٫۰۴	۰٫۴۶	۷۴٫۳۸	۰٫۹۲	۰٫۰۹	۰٫۸۵	۰٫۰۲	۷۷٫۰۹	
۱۳ / ۵	۰٫۳۹	۰٫۱۵	۰٫۶۰	۶٫۴۸	۶۵٫۴۳	۰٫۶۰	۰٫۱۴	۰٫۶۶	۰٫۰۱	۷۷٫۴۶	پیرولوژیت
۱۴ / ۵	۰٫۳۶	۰٫۱۷	۰٫۵۳	۵٫۹۰	۶۶٫۷۱	۰٫۵۰	۰٫۱۰	۰٫۴۹	۰٫۰۲	۷۴٫۸۵	
۱۵ / ۵	۰٫۳۷	۰٫۱۱	۰٫۵۴	۵٫۶۷	۶۲٫۴۰	۰٫۶۰	۲٫۹۲	۵٫۴۹	۰٫۰۹	۷۸٫۱۸	
۱۶ / ۱	۰٫۰۳	۰	۰٫۲۶	۵٫۰۸	۴۷٫۶۲	۰٫۵۱	۰٫۴۰	۴۶٫۲۱	۰٫۰۲	۱۰۰٫۱۵	
۱۷ / ۱	۰	۰	۰٫۱۷	۵٫۲۶	۴۸٫۱۱	۰٫۳۲	۰٫۰۳	۴۶٫۵۸	۰	۱۰۰٫۴۷	رودونیت
۱۸ / ۱	۰٫۰۹	۰	۰٫۱۸	۵٫۲۴	۴۷٫۹۰	۰٫۳۶	۰٫۰۴	۴۶٫۳۶	۰	۱۰۰٫۱۷	
۱۹ / ۱	۰٫۷۳	۰٫۲۰	۰٫۷۶	۷٫۸۳	۶۶٫۰۶	۰٫۷۴	۰٫۰۳	۰٫۵۳	۰٫۰۴	۷۶٫۹۲	پیرولوژیت
۲۰ / ۱	۰٫۳۹	۰٫۱۲	۰٫۶۵	۶٫۱۲	۶۷٫۶۷	۰٫۸۵	۰٫۰۳	۰٫۷۵	۰	۷۶٫۵۹	



شکل ۹ تصاویر میکروسکوپی از میانبرهای سیال دوفازی مورد بررسی. الف: میانبرهای سیال دوفازی بخار و مایع در اسپسارتیت و ب: میانبرهای سیال دوفازی بخار و مایع در کوارتز. بنظر میرسد که میانبرهای اسپسارتیت ثانوی باشند، زیرا در شکستگی بلور به دام افتاده‌اند.

بحث و بررسی

کانسارهای منگنز جهان به ۵ دسته رسوبی، رسوبی-آتشفشانی، دگرگونی، گرمابی و برونزادی تقسیم شده‌اند [۲]. در ایران، کانسارهای منگنز دارای خاستگاه گرمابی یا رسوبی هستند، از جمله معدن منگنز چشمه فریزی در جنوب غرب سبزوار [۳]، نصیرآباد [۴] و سنگان در شمال شرق خاش [۵] خاستگاه گرمابی دارند. کانی‌سازی منگنز در فرزنه (جنوب شرق مشهد) نتیجه فعالیت آبهای فرورو و شسته شدن منابع گوگردی است [۶]. کانی‌سازی منگنز دهنو در جنوب زاهدان دارای خاستگاه گرمابی زیردریایی بوده که توسط رسوبات مافیک تقویت شده است [۷]. کانی‌سازی منگنز در آباد، طشت (نیریز) و سرخ‌وند (کرمانشاه) دارای خاستگاه تخریبی در حوضه‌های پشت قوس بوده که رسوب منگنز با دخالت باکتریها رخ داده است [۸]. در همه این کانسارها، کانسنگ منگنز شامل انواع اکسیدهای منگنز، کربنات منگنز با یا بدون گوگرد است، حال آنکه در معدن توکلان کانسنگ منگنز شامل سیلیکاتهای منگنز است که معمولاً در دماهای بالا تر از دمای بحرانی آب متبلور می شوند. تبلور اسپسارتیت، رودونیت و تفرونیت در اسکارنها امری عادی است، اما در لایه‌های رسوبی غیرآهکی و بدون حضور توده نفوذی چنین نیست. تبلور این نوع سیلیکاتها بصورت کانی‌های فرعی در پگماتیت ها دیده شده است اما همبری (پاراژنز) کانسار منگنز توکلان همبری پگماتیت نیست. همچنین کانسار منگنز توکلان (اسپسارتیت، رودونیت و گاهی تفرونیت) نمی‌تواند رسوب دریایی باشد. پراکندگی نامنظم توده‌های کانسار، به ویژه در بیشتر نقاط رگه‌ها یکدیگر را نیز قطع کرده‌اند، فرایندهای گرمابی دمای بالا و یا دگرنهادی آذرین را الهام میکند، اما در منطقه معدنی توکلان توده آذرین درونی که موجب فعالیتهای دگرنهادی آذرین و یا گرمابی شده باشد دیده نمی‌شود.

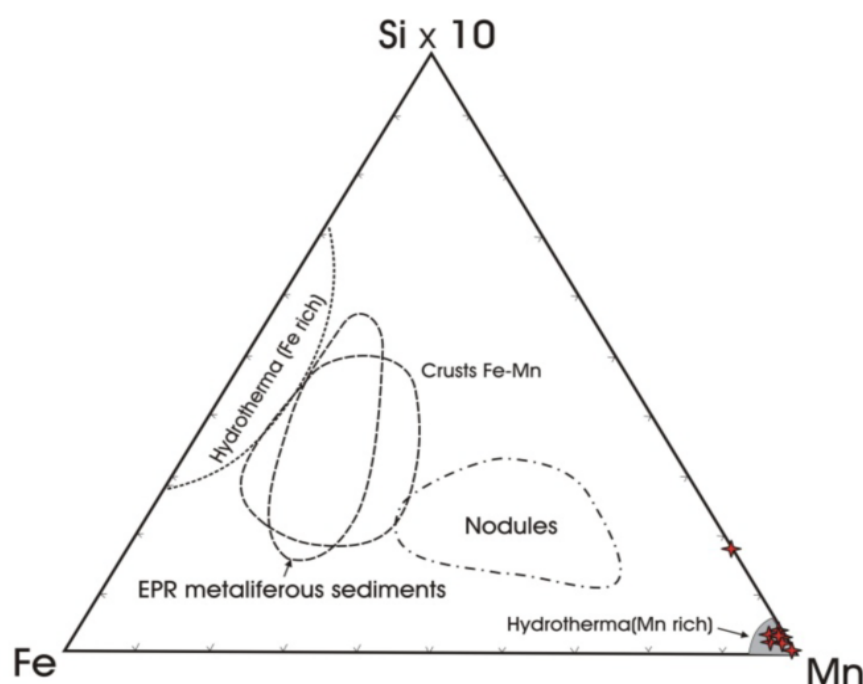
بررسی مقاطع صیقلی کانسار توکلان (شکل ۸) ترتیب تبلور این کانی‌ها را به صورت ۱- اسپسارتیت و رودونیت، ۲- بمانتیت، ۳- رودوکروزیت و ۴- پیرولولوزیت معرفی میکند. بنابراین اکسیدهای منگنز فرآورده های ثانوی و نتیجه دگرسانی اسپسارتیت و رودونیت هستند که به شکل رگه‌های

مقاطع شکستگیهای سنگ مادر را پر کرده و گاهی در قاعده سنگ مادر با عیار بالا تر رسوب کرده‌اند. از بافت کانسنگ چنین برمی‌آید که بمانتیت در مرحله نخست و کمی پس از اسپسارتیت متبلور شده است (شکل ۸).

بررسی میانبراهای کوارتز (شکل ۹) دماهای ۲۱۸ تا ۳۹۱ درجه و اسپسارتیت ۱۳۰ درجه سانتیگراد را برای شرایط همگن شدن دو فاز مایع-گاز نشان داده است. برپایه پژوهش نیکسون و همکاران [۹]، نسبت بسیار پائین Fe/Mn (۰/۰۱) تا $(۲/۴۹)$ در پیرولولوزیت نشانه خاستگاه گرمابی است. همچنین ترکیب شیمیایی پیرولولوزیت در نمودار سه قطبی $(Si \times 10)$ - $Mn-Fe$ [۱۰] نیز در گستره کانسارهای گرمابی قرار می‌گیرد (شکل ۱۰).

بررسی نتایج پژوهش های پیرامون کانسارهای منگنز با خاستگاه گرمابی نشان می‌دهد که این کانسارها در بخش‌های بالایی مجموعه‌های آتشفشانی-رسوبی و به‌ویژه در گذر سنگ‌های آتشفشانی (شیل‌های توفی، توف‌ها و گدازه‌های بازالتی) به رادیولاریت‌ها تشکیل می‌شوند. در کانسارهای منگنز همراه با مجموعه‌های آتشفشانی-رسوبی، کانه‌زایی به دو شکل توده‌ای و رگه‌ای صورت می‌گیرد که در دو حالت توده‌ای و رگه-ای آثاری از کانه‌های منگنز دمای بالا مانند اسپسارتیت و رودونیت دیده نمی‌شود.

به تازگی پژوهش‌هایی پیرامون کانی‌زایی منگنز در کمربند پیریت‌دار ایبرین کشور پرتغال (منطقه آلبرنوا) که دارای همبرزایی اسپسارتیت-کلریت-آلبت $\pm$ رودونیت است و به همبری کانسنگ توکلان شباهت دارد صورت گرفته است [۱۱] و [۱۲]. بر این اساس برای تشکیل چنین کانسارهایی با همبرزایی دمای بالا و دمای پائین سه مرحله در نظر گرفته شد: مرحله اول تشکیل کانسنگ توده‌ای دمای پایین است. در این مرحله، کانه‌زایی منگنز توده‌ای در طی فرایندهای آتشفشانی-رسوبی و بوسیله سیال‌های گرمابی دما و شوری پایین و دور از مجاری گرمابی صورت می‌گیرد. کانی اصلی و اولیه منگنز در این مرحله انبوهی از بلورهای دانه‌ریز براونیت $(Ba, Mn_2O_3, MnSiO_3)$ با ساختار چارگوشی است که سپس توسط پیرولولوزیت جانشین می‌شود.



شکل ۱۰ ترکیب شیمیایی پیرولوئیت در نمودار سه قطبی $10 \text{ Mn} - \text{Fe} - \text{Si} \times 10$

برداشت

مقالات علمی منتشر شده پیرامون شکل‌گیری منگنز کانی-سازی منگنز را اغلب به رسوب مستقیم اکسید منگنز در دریا (یکمک رسوبات قاره‌ای یا اقیانوسی غنی از منگنز) یا رسوب اکسید منگنز از سیال‌های داغ خارج شده از شکاف‌های کف اقیانوس، مثلاً دودخان‌ها و یا به دگرگونی نسبت داده‌اند. هرچند نسبت Fe/Mn در پیرولوئیت توکلان (۰/۰۱ تا ۲/۴۹) نشانگر خاستگاه گرمایی آن است، اما نمی‌توان شرایط گرمایی را برای تبلور اسپسارتیت و رودونیت که به دماهای بالاتر از دمای بحرانی آب نیاز دارند در نظر گرفت. احتمال دارد که اسپسارتیت، رودونیت و تفرؤئیت از سیال‌های ابر بحرانی دودخان‌های کف اقیانوس بوجود آمده و به تدریج که دمای سیال کاهش یافته است، سیلیکات‌های آبدار، سپس رودوکروزیت و سرانجام اکسیدهای منگنز بوجود آمده باشند اما گسترش و ضخامت بسیار سنگ‌های اسیدی (داسیت و ریولیت) بصورت توف و گاهی گدازه و کمیابی بازالت در توکلان با محیط‌های اقیانوسی در حال کشش به ویژه جائیکه در آن دودخان‌ها فعالیت دارند مغایرت دارد.

مرحله دوم رخداد دگرگونی ناحیه‌ای مربوط به کوهزایی است. در این مرحله رخدادهای دگرگونی ناحیه‌ای دمای لازم برای باز تبلور و دگرگونی کانه‌های اولیه منگنز و تشکیل کانه‌های دمای بالا (اسپسارتیت، رودونیت و آلپیت) را فراهم می‌کنند. دماسنجی بر زوج کلریت-بیوتیت دما را در این مرحله ۳۷۰ تا ۴۱۵ درجه سانتیگراد برآورد نموده است که با رخساره شیست سبز همخوانی دارد [۱۱]. مرحله سوم شامل گسلش پس از کوهزایی است این مرحله پس از دگرگونی صورت می‌گیرد و با فعالیت‌های گسترده گرمایی همراه است. دماسنجی براساس ترکیب شیمیایی کلریت، دمایی حدود ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد را نشان داده است [۱۲] و این دما می‌تواند شرایط گسترش کانی‌های دمای بالا مانند اسپسارتیت را در کانسنگ توده‌ای منگنز فراهم سازد. همچنین، در این مرحله با کاهش دمای سیال کانه‌دار شرایط برای شکل‌گیری کانه‌های آبدار از دگرسانی کانه‌های بی‌آب فراهم می‌گردد. کانی‌های شاخص این مرحله شامل پیرولوئیت و رومانشیت است که بوسیله کانی‌های کوارتز، میکا، ایلیت، لیتیوفوریت، هماتیت و گوتیت همراهی می‌شوند.

stratiform manganese deposit", Southwest Sabzevar basin, Iran, Ore Geological review.

[4] Zarasvandi A., Lentz D., Rezaei M., Pourkaseb H., "Geochemical evidences. *Chemie der Erde*", (2013), 73(4):495–508.

[5] Kahrazehi M.R., Lotfi M., Ghaderi M., Mohajjel M., Mohammadreza Jafari M.R., "First Report of Geochemical Characteristics of the Sangan Manganese Occurrence, Northeast Khash (Iran)", Indian Journal of Science and Technology, (2015),

[6] Mazhari N., Malekzadeh-Shafaroudi A., Ghaderi M., Geology, "mineralogy and geochemistry of Ferezh ferromanganese anomaly", east of Sangan mines complex, NE Iran. Journal of Economic Geology, Vol. 7, No. 1 (2015), 2p.

[7] Lotfi M., Kahrazehi M., Ghaderi M., "Geochemistry and origin of Dehoo manganese deposit, south Zahedan, southeastern Iran". Arabian Journal of Geosciences, (2017), 10:142.

[8] Zarasvandi A., Pourkaseb H., Sepahvand Rezaei M., "Tracing of hydrothermal ore forming process in the Sorkhvand manganese deposit", Kermanshah province Iran. Arabian Journal of Geosciences. (2016).

[9] Nicholson K., Nayak V.K., Nanda J.K., "Manganese ores of the Ghoriajhor-Monmunda area, Sundergarh District, Orissa", India: Geochemical evidence for a mixed Mn source. Geological Society of London Special Publication, 119, (1997), 117–121.

[10] Toth, J.R., "Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron", Geological Society of America Bulletin, (1980) 91(1): 44–54.

[11] Moreira, B., Figueiras J., Mateus A., Rodrigues P., Jorge R., Goncalves L., "A new manganese mineralisation type in the Iberian Pyrite Belt? Congresso Iberico de Geoquimica", (2015) - XVIII Semana de Geoquimica.

[12] Inoue A., Meunier A., Patrier-Mas P., Rigault C., Beaufort D., Vieillard P., "Application of chemical geothermometry to low temperature trioctahedral chlorite", Clay Clay Miner. V. 57(3) 371–382.

بررسی معادن آهن استان کردستان که توسط نویسندگان در حال انجام است نشان داده که تشکیل غالب کانسارهای آهن در این استان در دو مرحله صورت گرفته است: در مرحله نخست، آهن بصورت رسوبی در دریا تشکیل شده همچنانکه وجود لایه‌های پراکنده هماتیت و لاتریت در بین لایه‌های آتشفشانی-رسوبی پرمین در شمال غرب این استان شاهی از وجود این نوع آهن رسوبی در منطقه است. در مرحله دوم عمل جابجایی صورت گرفته است، بدین ترتیب که آهن رسوبی توسط سیال‌های دما بالای آزاد شده احتمالاً از انجماد توده‌های نفوذی عمیق بحركت درآمده و در افق‌های بالاتر رگه‌های پرعیار ماگنیت را بوجود آورده است. در بیشتر معادن آهن غرب دیواندره که معدن منگنز توکلان نیز در آنجا قرار دارد، توده‌ی نفوذی دیده نمی‌شود، درحالی‌که رگه‌های ماگنیت با مجموعه کانی‌هایی شبیه به اسکارن چون گارنت، اپیدوت، آکتینولیت و آلبيت همراه هستند. مقایسه‌ی معدن منگنز توکلان با معادن آهن مناطق همسایه این باور را تلقین می‌کند که شاید کانی-سازی منگنز توکلان نیز نتیجه چنین فرایندی باشد.

قدردانی

وظیفه‌ی خود میدانم که از همکاران محترم مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران بویژه آقایان دکتر بهروز کریمی، دکتر کاظم قلیزاده و خانم مهندس آقاجانی بخاطر انجام تجزیه‌ی نقطه‌ای و بررسی میانبارهای سیال بسیار تشکر کنم. از دوست عزیز و همکار محترم آقای دکتر بهزاد مهربانی بخاطر فراهم کردن شرایط این همکاری‌ها سپاسگزارم. همچنین از آقای لقمان احمدی دارنده‌ی پروانه‌ی اکتشاف معدن که امکانات بازدید و مسافرت‌ها را فراهم نموده بودند نیز قدردانی می‌کنم.

مراجع

- [1] Geological quadrangle Map of Sanandaj, 1/250000 No.C5. Geological survey & Mineral exploration of Iran.
- [2] Fan D., Yang P., "Introduction to and classification of manganese deposits of China", Ore Geology Reviews, (1999), 15(1), 1–13.
- [3] Maghfouri S., Rastad E., Mousivand F., Choulet F., Ye L., "Geological and geochemical constraints on the Cheshmeh-Frezi volcanogenic