

بررسی خاستگاه، فرآیندها و نوع کانه‌زایی آهن بر اساس مقدار زمین شیمیایی کانی مگنتیت و زمین شیمی کل سنگ: پژوهشی در کانسار آهن دلکن، جنوب غرب بردسکن، استان خراسان رضوی

مسیح کسایان، مهرداد بهزادی*

گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۱۲/۲۳)

چکیده: کانسار آهن دلکن در ۳۶ کیلومتری جنوب غرب شهر بردسکن، بین طول‌های جغرافیایی $57^{\circ}47'43''$ تا $57^{\circ}49'98''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}58'37''$ تا $35^{\circ}00'14''$ شمالی واقع است. کانسار آهن دلکن از نظر زمین‌شناسی در بخش شرقی پهنه زمین‌شناسی ایران مرکزی و از نظر ساختاری در قسمت شمال شرقی پهنه زمین ساختی کاشمر-کرمان جای دارد. با توجه به نتایج تجزیه، مقادیر اکسیدهای اصلی و FeO در این کانسار میانگین مقادیر محاسبه شده در نمونه‌های کانه‌زایی آهن دلکن برای آهن کل 21.17% ، مگنتیت 31.88% و هماتیت 11.01% است. مقادیر عناصر کمیاب و عناصر خاکی نادر سبک (LREE) برای کانه مگنتیت و نمونه‌های کل سنگ اندازه‌گیری گردید. بررسی ویژگی‌های زمین شیمیایی مگنتیت نشان‌دهنده نوع اسکارن، محیط گرمایی و خاستگاه ماگمایی برای سیال تشکیل‌دهنده کانه‌زایی است. ناهنجاری عناصر La و Ce در کانه مگنتیت و مقادیر بیش از 1% کانی آپاتیت در معدن دلکن نشانه‌های زمین شیمیایی برای معرفی این کانسار به عنوان نمونه‌ای از کانسارهای نوع ترکیبی اسکارن-اکسید آهن آپاتیت هستند.

واژه‌های کلیدی: دلکن؛ زمین‌شیمی؛ اسکارن؛ اکسید آهن؛ آپاتیت؛ کمر بند ساختاری کاشمر-کرمان.

مقدمه

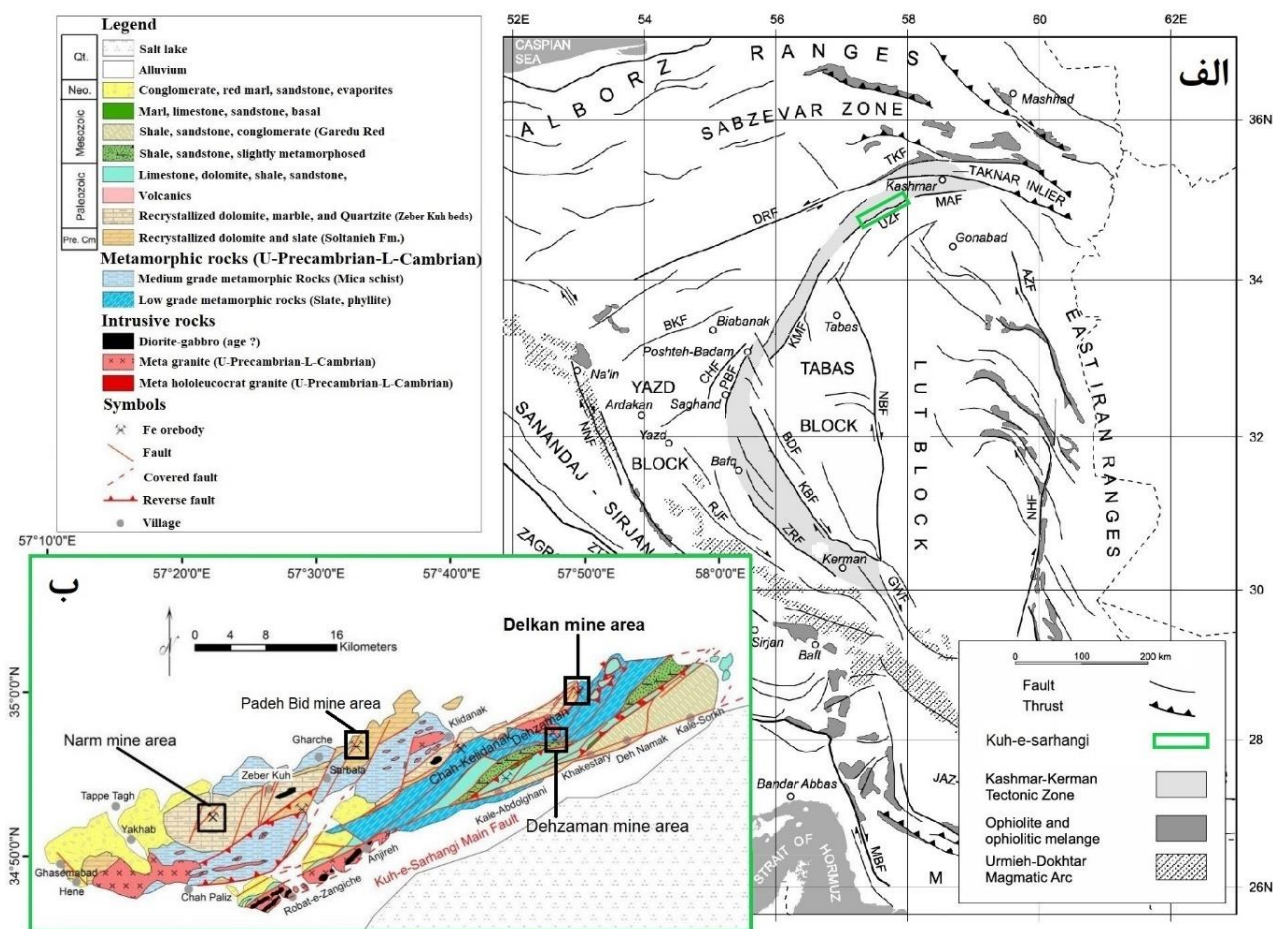
سرهنگی واقع است (شکل ۱ ب). پهنه ساختاری کاشمر-کرمان محل تشکیل برخی از مهمترین کانسارهای آهن ایران و از جمله مهمترین نواحی جهان از نظر تشکیل کانسارهای آهن با نوع اکسید آهن-آپاتیت (IOA) یا کایروناست. ناحیه کوه سرهنگی نیز با وجود چند معدن آهن فعال که برخی از مهمترین آن‌ها معادن ده‌زمان [۲]، پده‌بید [۳]، نرم [۴] و دلکن [۵، ۶] هستند دارای پتانسیل قابل توجهی از نظر رخداد کانه‌زایی آهن است.

کانه‌زایی‌های آهن در ناحیه کوه سرهنگی را از نظر نوع به

کانسار آهن دلکن در ۳۶ کیلومتری جنوب غرب شهر بردسکن و در نزدیکی ارتفاع‌های کوه کال اسب و کوه دلکن بین طول‌های جغرافیایی $57^{\circ}47'43''$ تا $57^{\circ}49'98''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}58'37''$ تا $35^{\circ}00'14''$ شمالی واقع است. از نظر تقسیم‌بندی زمین‌شناسی، این منطقه در بخش شرقی خرده قاره ایران مرکزی قرار دارد [۱]. از نظر تقسیم‌های ساختاری، این کانسار در بخش شمال شرقی پهنه ساختاری کاشمر کرمان (شکل ۱ الف) و در یال شمال شرقی کوه

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۳۸۸۳۹۵۴۸۹، پست الکترونیکی: M_Behzadi@sbu.ac.ir





شکل ۱ الف) پهنه ساختاری کاشمر- کرمان و موقعیت کوه سرهنگی در آن که با مستطیل سبز رنگ مشخص شده است، برگرفته از مراجع [۶، ۷]؛ ب) نقشه زمین‌شناسی کوه سرهنگی و موقعیت برخی از معادن آهن در آن برگرفته از مراجع [۴، ۶، ۸].

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آن دقیق بررسی شده است. امید است که نتایج این پژوهش بخش کوچکی از ابهام‌های زمین‌شناسی و معدنی در ناحیه کوه سرهنگی و پهنه ساختاری کاشمر- کرمان را تکمیل نماید.

زمین‌شناسی و کانه‌زایی

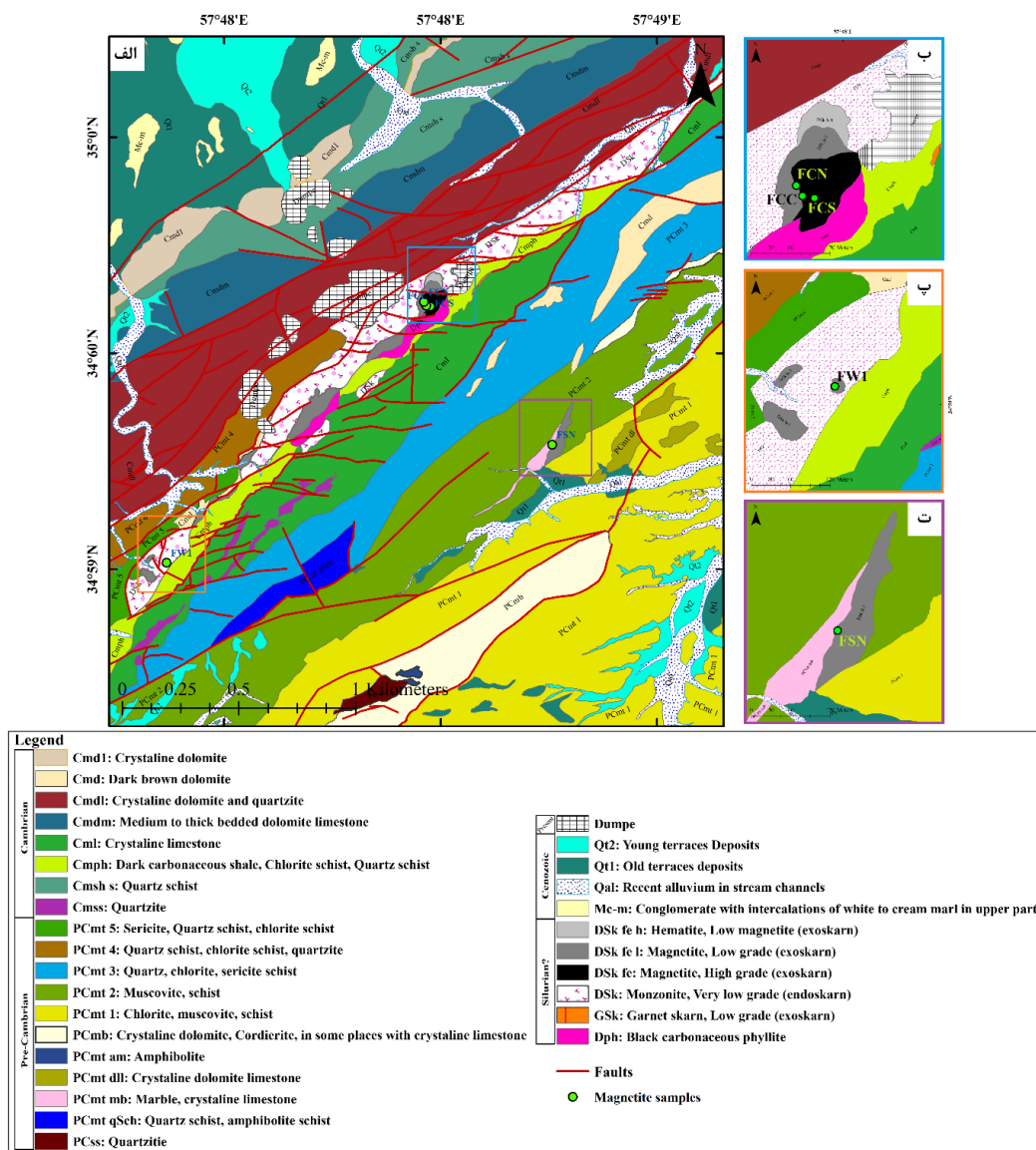
معدن دلکن در گستره مرکزی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ فردوس [۹] و گستره شمالی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ قاسم آباد [۱۰] قرار دارد. نقشه زمین‌شناسی منطقه دلکن برگرفته از بررسی‌های پیشین [۶] در شکل ۲ الف آورده شده است. بر اساس بررسی‌های پیشین [۶]، واحدهای سنگی منطقه شامل واحدهای دگرریخت و دگرگون شده شیست، کوارتزیت، سنگ آهک، دولومیت و آمفیبولیت با سن پرکامبرین (مشخص‌شده با پیشوند PC) واحدهای سنگ آهک، دولومیت شیل‌های کربن‌دار، شیست و کوارتزیت در ارتباط با کامبرین (مشخص‌شده با پیشوند CM)

سه دسته کانه‌زایی آهن نواری (معدن ده‌زمان) [۲]، کانه‌زایی‌های اسکارن (پده‌بید) [۳]، کانه‌زایی‌های دورگه آهن (ترکیبی از اسکارن آهن و اکسید آهن آپاتیت) می‌توان تقسیم نمود: معدن دلکن [۶] و معدن نرم [۴] از جمله معادن با نوع دورگه در ناحیه کوه سرهنگی هستند. بر اساس بررسی‌های پیشین [۶] در معدن دلکن، ویژگی‌های مشترکی در زمینه کانی‌شناسی، دگرسانی‌ها، ویژگی‌های زمین‌ساختی و نوع کانه‌زایی با دیگر انواع‌های کانه‌زایی آهن از جمله اکسید آهن مس طلا (IOCG) دیده شده است. اگرچه نتیجه بررسی‌های پیشین، شناسایی نوع دورگه اسکارن و اکسید آهن آپاتیت برای معدن دلکن بوده است [۶]، در این پژوهش با هدف مدل‌سازی سه بعدی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی کانه‌زایی‌های آهن و شناسایی و مقایسه هرچه بهتر نوع کانه‌زایی آهن در این کانسار در مقایسه با انواع دیگر کانه‌زایی آهن، برای نخستین بار

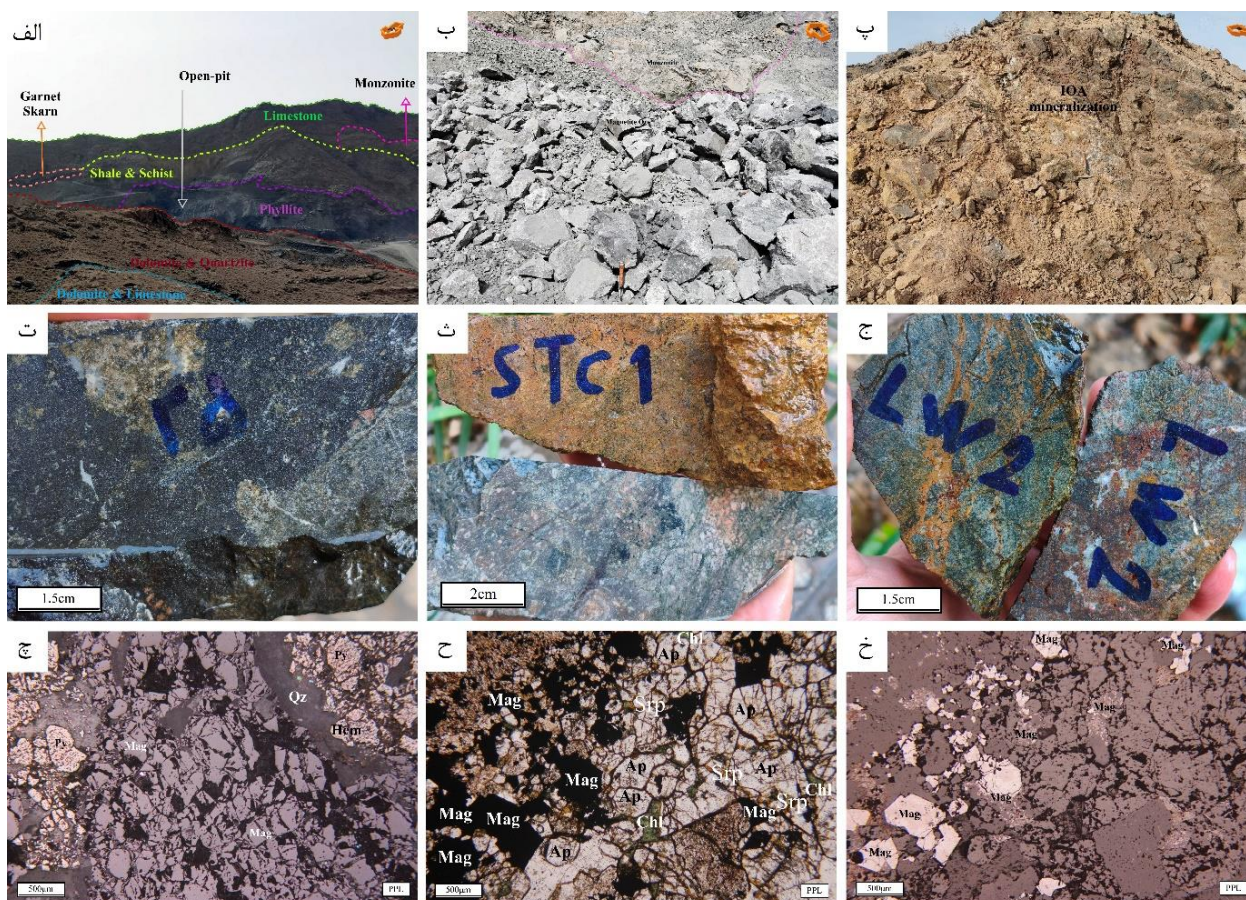
ب، ت، ث و چ)، با مجموعه‌ای از سنگ‌های میزبان فیلیت و شیبست‌های کربن‌دار، شیبست و دولومیت است (شکل ۳ الف) که از نظر عیار و ذخیره، ماده معدنی اصلی استخراجی در این کانسار است. کانه‌زایی‌های محدود اسکارن آهن با فاصله ۱۰۰ متری و ۱ کیلومتری به سمت جنوب از استوک نفوذی نیز، با سنگ‌های میزبان شیبست و سنگ آهک دیده می‌گردند. دسته دوم، کانه‌زایی افشان و رگچه‌ای اکسیدهای آهن همراه با آپاتیت درون استوک نفوذی مونزونیتی است (شکل‌های ۳ پ، ج، ح و خ).

واحدهای تشکیل‌شده از فعالیت‌های ماگمایی و دگرگونی مجاورتی ناشی از نفوذ استوک مونزونیتی و کانه‌زایی‌های متأخر (با سن سیلورین) و در آخر رسوب‌های سنوزوئیک و باطله‌های برآمده از فرآیندهای استخراج ماده معدنی هستند (شکل ۳ الف).

با توجه به بررسی‌های پیشین زمین‌شناسی، زمین‌ساخت، سنگ‌نگاری و ایزوتوپ‌های پایدار [۶]، کانه‌زایی در کانسار دلکن به دو دسته تقسیم شده است. دسته نخست، کانه‌زایی اسکارن آهن به صورت مگنتیت‌های توده‌ای همراه با کمی پیریت به صورت کنارهم و درون استوک نفوذی (شکل‌های ۳



شکل ۲ الف) نقشه زمین‌شناسی معدن دلکن [۶]؛ ب) محل نمونه‌برداری‌های مگنتیت در مرکز منطقه (نمونه‌های FCC، FCS و FCS)؛ پ) محل نمونه‌برداری مگنتیت در غرب منطقه (نمونه FW1)؛ ت) محل نمونه‌برداری‌های مگنتیت در کانه‌زایی دور از استوک نفوذی در جنوب منطقه (نمونه FSN).



شکل ۳ الف) نمایی از سنگ شناسی واحدها در بخش مرکزی منطقه دلکن [۶]؛ ب) کانه‌زایی مگنتیت توده‌ای درون استوک نفوذی (پس از انفجار در کاواک معدن برای استخراج ماده معدنی) [۶]؛ پ) کانه‌زایی‌های به شدت دگرسان شده اکسید آهن آپاتیت درون استوک نفوذی در غرب منطقه [۶]؛ ت) نمونه‌ای از کانه‌زایی مگنتیت توده‌ای دارای مقادیر بالایی از کانی پیریت؛ ث) نمونه‌های به شدت دگرسان شده مونزونیت، نمونه بالایی فاقد کانه‌زایی و نمونه پایینی دارای کانه‌زایی می‌باشد؛ ج) نمونه‌هایی از کانه‌زایی اکسید آهن آپاتیت؛ چ) نمونه میکروسکوپی از کانه‌زایی مگنتیت توده‌ای در نور بازتابی؛ ح) نمونه میکروسکوپی از کانه‌زایی اکسید آهن آپاتیت در نور عبوری [۶]؛ خ) تصویر پیشین در نور بازتابی. Ap: آپاتیت، Ep: اپیدوت، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Srp: سرپانتین [۱۱].

روش بررسی

جداسازی مغناطیسی و سپس جداسازی دستی با میکروسکوپ دوچشمی، ۳ نمونه کل سنگ از بخش کانه‌زایی‌های سطحی و ۹ نمونه کل سنگ از قسمت‌های مختلف دارای کانه‌زایی از مغزه‌های حفاری شده در کانسار دلکن برداشت شده و پس از خردایش و نرم کردن برای بررسی مقادیر برخی عناصر (شامل عناصر کمیاب و دو عنصر خاکی نادر سبک، LREE) به آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود تهران ارسال گردید. این نمونه‌ها نیز با روش طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی تجزیه شدند. ۴ نمونه از ۵ نمونه مگنتیت با نمونه‌های اکسیدهای اصلی + FeO مشترک بوده و دارای مقداری از آهن نیز هستند.

تعداد ۱۳۰۳ نمونه سنگی، شامل ۱۷۳ نمونه به صورت نیم‌رخ از نقاط مختلف سطحی کانسار و ۱۱۳۰ نمونه از مغزه‌های حفاری شده در کانسار دلکن برداشت شده و پس از خردایش و نرم کردن برای بررسی مقادیر اکسیدهای اصلی + FeO به آزمایشگاه شرکت زراآرما تهران ارسال گردید. مقادیر FeO به روش تیت‌ر کردن اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقادیر اکسیدهای اصلی، نمونه‌ها با روش ذوب پراکسیدی آماده و سپس با روش طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) تجزیه شدند. تعداد ۱۷ نمونه شامل ۵ نمونه خالص‌سازی شده از کانه مگنتیت (با ترکیب روش‌های

نتایج بررسی‌ها

مقادیر اکسیدهای اصلی و FeO

با توجه به تعداد زیاد نمونه‌های مورد بررسی برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی + FeO، در راستای خلاصه‌سازی بهینه نتایج و امکان گزارش آن در اینجا مقادیر به دست آمده برای هر یک از اکسیدها، از مقادیر پایین تا مقادیر بالا به ۴ چارک تقسیم و مقادیر کمینه و بیشینه برای هر چارک به همراه پارامترهای آماری کل داده‌های هر اکسید در جدول ۱ آورده شده است. مقادیر نخستین عدد در چارک اول و آخرین عدد در چارک چهارم، از نظر آماری مقادیر کمینه و بیشینه برای هر اکسید را نشان می‌دهند.

مقادیر عناصر کمیاب و دو عنصر خاکی نادر سبک در مگنتیت

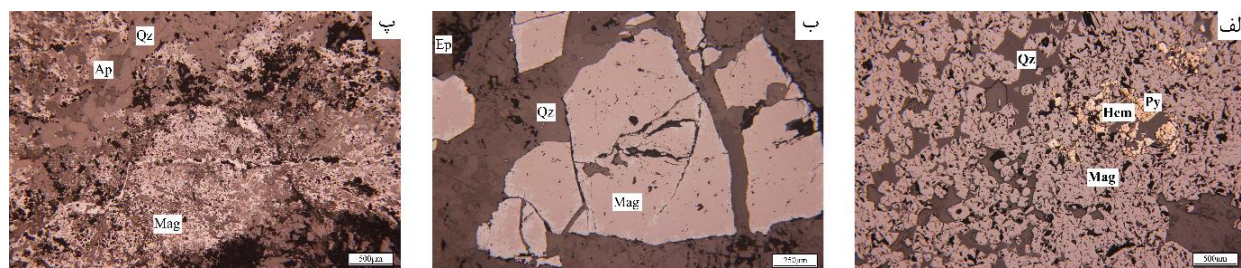
کانه‌های مگنتیت در معدن دلکن را بر اساس شکل دانه‌های مگنتیت، نوع و میزان جانشینی کانه مگنتیت با دیگر کانی‌ها و نیز نوع کانی‌های باطله همراه با کانه‌زایی مگنتیت به سه دسته می‌توان تقسیم نمود. مگنتیت‌های نوع ۱ بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار، دارای اندازه ۰/۲ تا ۲ سانتی‌متر هستند (شکل ۴ الف). کانی‌های باطله همراه با آن‌ها در نقاط مختلف متفاوت بوده و شامل کانی‌های پیریت، کوارتز، کلسیت، کالکوپیریت، هماتیت، اکتینولیت، ترمولیت، کلریت و به ندرت گارنت هستند. حدود ۸۵٪ از مگنتیت‌های معدن دلکن از این نوع

هستند. این نوع از مگنتیت به ندرت در محل تماس با رگه و رگچه‌های سیلیسی و در لبه دانه‌ها توسط هماتیت جانشین شده است و میزان خردشدگی در این نوع از مگنتیت در نقاط مختلف منطقه متغیر است. مگنتیت‌های نوع ۲ اغلب شکل‌دار و دارای اندازه ۰/۲ تا ۲ سانتی‌متر هستند (شکل ۴ ب). کانی‌های باطله همراه با آن‌ها شامل کوارتز، کلسیت، اپیدوت و آلپیت هستند. این نوع از مگنتیت بیشتر در کانه‌زایی‌های دور از استوک نفوذی دیده می‌گردد و اغلب در لبه و رخ‌های کانه مگنتیت به صورت مارتیتی شدن جانشین شده است. مگنتیت-های نوع ۳ اغلب بی‌شکل و یا به صورت نیمه‌شکل‌دار هستند (شکل ۴ پ). کانی‌های باطله همراه با آن‌ها شامل کلریت، کوارتز، آپاتیت، اکتینولیت، پیریت و اکسیدهای ثانویه آهن هستند. این نوع از مگنتیت به صورت محدود در کناره شمالی استوک نفوذی دیده می‌گردد. کانه‌های مگنتیت به شدت با هماتیت و اکسیدهای ثانویه آهن جانشین شده‌اند، خردشدگی نیز به شدت در آن‌ها دیده می‌گردد.

نمونه‌های اولیه مگنتیت، از هر سه نوع مگنتیت دیده شده در معدن دلکن انتخاب شدند. محل برداشت این ۵ نمونه در شکل ۲ مشخص گردیده است. نتایج تجزیه مقادیر عناصر کمیاب و دو عنصر La و Ce در مگنتیت‌های خالص‌سازی شده برای این نمونه‌ها در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۱ خلاصه نتایج تجزیه و پارامترهای آماری برای مقادیر اکسیدهای اصلی + FeO در معدن دلکن. مقادیر گزارش شده بر حسب % هستند. حد تشخیص (D.L) برای FeO برابر با ۰/۱٪ و برای دیگر اکسیدهای اصلی برابر با ۰/۰۵٪ است.

نوع اکسید	مقادیر				میانگین	انحراف معیار
	چارک پایین	چارک میانی- پ	چارک میانی- ب	چارک بالا		
SiO ₂	۲/۲ - ۴۲/۲۲	۴۲/۲۲ - ۴۸/۵۹	۴۸/۶۱ - ۵۵/۱۵	۵۵/۲۰ - ۷۶/۲۱	۴۶/۲۱	۱۳/۱۶
BaO	<۰/۰۵ - <۰/۰۵	<۰/۰۵ - ۰/۰۶	۰/۰۶ - ۰/۰۹	۰/۰۹ - ۷/۹۷	۰/۱۱	۰/۳۲
CaO	۰/۹۰ - ۵/۲۳	۵/۲۴ - ۷/۰۵	۷/۰۶ - ۹/۳۲	۹/۳۲ - ۳۳/۷۰	۷/۷۰	۳/۷۱
Fe ₂ O ₃	۳/۳۷ - ۱۲/۰۴	۱۲/۰۶ - ۱۷/۲۸	۱۷/۳۲ - ۲۳	۲۳/۰۶ - ۸۳/۳۷	۲۱/۶۹	۱۵/۷۱
K ₂ O	<۰/۰۵ - ۱/۷۱	۱/۷۱ - ۲/۵۶	۲/۵۷ - ۳/۱۵	۳/۱۵ - ۶/۹۶	۲/۴۱	۱/۲۲
MgO	۰/۱۹ - ۱/۱۹	۱/۱۹ - ۱/۷۳	۱/۷۳ - ۲/۵۴	۲/۵۴ - ۱۶/۲۷	۲/۱۳	۱/۵۲
MnO	۰/۰۷ - ۰/۳۳	۰/۳۳ - ۰/۴۴	۰/۴۴ - ۰/۵۹	۰/۵۹ - ۲/۱۶	۰/۴۹	۰/۲۳
P ₂ O ₅	<۰/۰۵ - <۰/۰۵	<۰/۰۵ - ۰/۱۰	۰/۱۰ - ۰/۱۹	۰/۱۹ - ۱/۲۷	۰/۱۵	۰/۱۵
SO ₃	<۰/۰۵ - ۰/۴۱	۰/۴۱ - ۱/۰۵	۱/۰۵ - ۲/۳۲	۲/۳۳ - ۴۲/۸۰	۲/۱۱	۳/۳۱
TiO ₂	<۰/۰۵ - ۰/۵۷	۰/۵۸ - ۱/۰۸	۱/۰۹ - ۱/۷۸	۱/۷۸ - ۳/۹۵	۱/۲۶	۰/۸۴
FeO	<۰/۱ - ۵/۲۷	۵/۲۷ - ۷/۰۵	۷/۰۵ - ۸/۹۱	۸/۹۲ - ۲۴/۷۵	۷/۷۰	۳/۹۶



شکل ۴ تقسیم بندی انواع مگنتیت در معدن دلکن: الف) مگنتیت‌های نوع ۱، ب) مگنتیت‌های نوع ۲ و پ) مگنتیت‌های نوع ۳. همه تصاویر در نور قطبیده صفحه‌ای (PPL) با میکروسکوپ بازتابی ثبت شده‌اند (Ep: اپیدوت).

جدول ۲ مقادیر برخی عناصر در نمونه‌های مگنتیت خالص‌سازی شده معدن دلکن.

عناصر	حد تشخیص	واحد	FCS	FCC	FW1	FCN	FSN	نام نمونه
			۱	۱	۳	۱	۲	نوع مگنتیت
Al	۰/۰۱	%	۰/۷۷	۰/۱۴	۴/۳۲	۰/۰۶	۰/۲۷	
As	۵	ppm	۲۶	۲۴	۶۴	۱۰	۵<	
Ba	۱۰	ppm	۱۲۳	۴۶	۲۲۶۸	۲۴	۴۷۸۷	
Be	۱	ppm	۲۳	۵	۴	۴	۱<	
Ca	۰/۰۱	%	۵>	۳/۵۶	۵>	۵>	۴/۷۳	
Cd	۱	ppm	5	۱۰	۱<	۵	۸	
Ce	۱	ppm	۱۲۳	۹۵	۳۰۲۶	۱۸۰	۲۴	
Co	۱	ppm	۳۰	۲۸	۴۰	۲۷	۳۷	
Cr	۱	ppm	۱<	۱<	۱<	۱<	۱<	
Cu	1	ppm	۱۵	۲۲	۱۹۳۰	۱۴	۴۱۴	
Fe	۰/۰۱	%	۵>	۵>	۵>	۵>	۵>	
Ga	۱۰	ppm	۱۰<	۲۵	۳۲	۱۷	۱۰<	
K	۰/۰۱	%	۰/۷۶	۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۰۶	۰/۰۵	
La	۱	ppm	۹۱	۸۱	۱۸۶۲	۱۳۹	۳۶	
Li	۱	ppm	۹۹	۷	۶۲	۸	۵	
Mg	۰/۰۱	%	۴/۷۳	۰/۱۳	۰/۶	۰/۲۱	۲/۹۲	
Mn	۱۰	ppm	۶۴۶۲	۲۸۹۲	۹۰۲	۴۰۱۱	۷۱۴۷	
Mo	۱	ppm	۱۲	۱<	۵	۱<	۱<	
Na	۰/۰۱	%	۲/۳۷	۰/۱۸	۰/۳۴	۰/۱۷	۰/۱۵	
Ni	۱	ppm	۱۶	۷	۲۲	۱۴	۲۰	
P	۱۰	ppm	۱۰۶۴	۸۰۹	۱۷۲۳۶	۴۳۵۷	۱۰۳	
Pb	۲	ppm	۳۳	۱۹	۹	۵	۲<	
S	۰/۰۱	%	۰/۲۲	۰/۴۷	۰/۰۷	۰/۳۷	۰/۱۶	
Sb	۵	ppm	۱۶	۲۲	۵<	۱۷	۲۴	
Sc	۱	ppm	۸	۲	۱۹	۴	۱<	
Sn	۱۰	ppm	۱۰<	۱۰<	۱۰<	۱۰<	۱۰<	
Sr	۱	ppm	۱۱۹	۷۷	۵۸۶	۸۹	۵۲۸	
Th	۲۰	ppm	۲۰<	۵۴	۲۵۲	۴۱	۴۵	
Ti	۰/۰۱	%	۰/۴۵	۰/۳۲	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۰۲	
U	۱۰	ppm	۱۰<	۱۰<	۱۰<	۱۰<	۱۰<	
V	۱	ppm	۱۲۶	۳۸۴	۱۳۲	۲۱۴	۹	
W	۱۰	ppm	۴۸	۵۰	۱۰<	۱۰<	۱۰<	
Zn	۲	ppm	۸۹۲	۲۲۲	۲۰۶	۲۲۲	۳۳	
Zr	۱	ppm	۱۳۱	۷۵	۱<	۳	۳۹	

مقادیر عناصر کمیاب و دو عنصر خاکی نادر سبک در کل سنگ

مقادیر عناصر کمیاب و دو عنصر La و Ce برای نمونه‌های سنگی معدن دلکن در جدول ۳ گزارش شده است. محل برداشت نمونه LS4 از یک رگه سیلیسی در واحد فیلیت استو سایر نمونه‌ها از نقاط مختلف دارای کانه‌زایی با مقادیر متغیر آهن برداشت شده‌اند. نمونه‌هایی که نام آن‌ها تنها از عدد تشکیل شده است از مغزه‌های حفاری در معدن دلکن انتخاب شده‌اند. اساس این نمونه‌برداری بر ایجاد امکان بررسی و تفکیک تغییر مقادیر عناصر کمیاب و خاکی نادر در بخش‌های فرعی کانه‌زایی و در سنگ میزبان بوده است. بررسی و مقایسه مقادیر عناصر (چون La, Mg, Ca, Ti) با مقادیر آنها در انواع کانه‌زایی‌های اصلی و پریکار مگنتیت در کانسار می‌تواند در راستای فهم و تفسیر بهتر ویژگی‌های زمین شیمی کانه‌زایی در ارتباط با تغییرهای نوع سنگ میزبان مؤثر باشند.

محاسبه مقادیر حقیقی آهن کل، مگنتیت، هماتیت و نقشه‌های پراکندگی عناصر

در بیشتر روش‌های معمول تجزیه مانند پراش پرتوی ایکس (XRD) و نیز روش‌های غیرمعمول (به علت هزینه بالا) مانند طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت‌شده القایی و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) برای اندازه‌گیری مقادیر اکسیدهای اصلی، تنها مقادیر Fe_2O_3 برای آهن قابل اندازه‌گیری است، که نتایج آن تنها نشان‌دهنده مقادیر آهن III در نمونه هستند و مقادیر آهن کل اغلب به صورت Fe_2O_{3t} گزارش می‌گردد. برای محاسبه مقادیر حقیقی آهن کل در کانسارهایی که مانند کانسار آهن دلکن بیش از یک نوع از کانی‌های اکسیدی آهن را در ذخایر خود جای داده‌اند می‌توان از ترکیب روش‌های تجزیه مقادیر FeO که نشان‌دهنده میزان آهن II موجود در نمونه است با روش‌های دیگر که نشان‌دهنده مقدار آهن III موجود در نمونه باشند استفاده نمود.

جدول ۳ مقادیر برخی عناصر در نمونه‌های کل سنگ از معدن دلکن.

عناصر	واحد	حد تشخیص	۱۱	۱۲	۱۳	۲۱	۲۲	۲۳	۳۱	۳۲	۳۳	FE2	LS4	FSN2	نام
Al	%	۰.۰۱	۴.۳۷	۵.۰۷	۳.۶۴	۴.۷۴	۵.۰۷	۰.۲۸	۰.۰۷	۰.۲	۵.۰۷	۵.۰۷	۲.۸۹	۰.۱۹	
As	ppm	۵	۱۵	۲۷	۶	۹	۱۱	۹۲	۵۰	۲۰	۲۴	۱۰	۵۰	۱۱	
Ba	ppm	۱۰	۸۲۸	۷۰۶	۵۱۰	۳۶	۱۴۲۶	۳۲	۱۰۰	۳۷	۸۰۲	۷۵۰	۱۳۸	۵۹۱۹	
Be	ppm	۱	۱۴	۳	۶	۲۲	۷	۸	۱۳	۱۱	۱۶	۴	۱۰	۱۰	
Ca	%	۰.۰۱	۴.۳۸	۳.۵	۵.۷	۵.۷	۲.۴۲	۲.۴۳	۵.۷	۵.۷	۴.۷۲	۵.۷	۰.۴۹	۵.۷	
Cd	ppm	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۸	۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	
Ce	ppm	۱	۶۳	۶۴۳	۹۲	۲۹۱	۲۸۴	۲۹	۱۲۱	۳۰۹	۹۲	۲۶۵	۲۰	۱۰	
Co	ppm	۱	۱۳	۲۹	۱۱	۱۳	۱۵	۳۶	۲۵	۱۳	۲۶	۳۳	۱۴۳	۴	
Cr	ppm	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۲۲	۱۲	۱۰	
Cu	ppm	۱	۲۵	۱	۶۰	۱	۱۰	۴۳	۹	۱۸۷	۶۲	۳۴	۱۴	۵	
Fe	%	۰.۰۱	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۱.۱۳	۵.۷	
Ga	ppm	۱۰	۲۶	۲۶	۲۱	۲۴	۲۵	۱۶	۱۷	۱۰۰	۲۷	۲۰	۱۰۰	۱۰۰	
K	%	۰.۰۱	۱.۳۹	۲.۱۱	۱.۶۹	۰.۲۳	۵.۷	۰.۳۸	۰.۱۱	۰.۰۵	۳.۴۴	۱.۹۶	۰.۴۴	۰.۰۹	
La	ppm	۱	۵۱	۳۷۸	۶۳	۱۸۳	۱۵۹	۳۴	۸۲	۲۶۸	۶۰	۱۵۵	۱۴	۹	
Li	ppm	۱	۲۰	۶	۹	۳۷	۴۱	۵۴	۱۰	۱۶	۱۴	۲۷	۷	۹	
Mg	%	۰.۰۱	۱.۵۳	۰.۵۱	۱.۰۱	۱.۰۸	۱.۹۱	۱.۴۷	۰.۵۱	۰.۴۷	۱.۰۵	۰.۸۲	۰.۱۹	۳.۵۲	
Mn	ppm	۱۰	۲۱۹۹	۱۰۳۴	۳۵۳۶	۱۸۷۹	۱۶۳۱	۴۷۶۵	۷۸۷۵	۴۷۶۵	۲۹۶۴	۱۷۷۴	۹۷	۱۰۰۱۰	
Mo	ppm	۱	۳	۱۰	۱	۴	۶	۸	۱۰	۱۰	۴	۲	۲	۷	
Na	%	۰.۰۱	۱.۵۶	۴.۶۷	۱.۹۶	۳.۱	۱.۳	۰.۷۸	۰.۲	۰.۰۹	۲.۷۱	۳.۴۸	۱.۳۸	۰.۲۲	
Ni	ppm	۱	۱۴	۳	۵	۱۰	۱۰	۸	۵	۱۷	۳۲	۲۹	۱۲	۵۹	
P	ppm	۱۰	۳۳۸	۵۲۴۰	۵۲۴	۱۱۲۳	۳۰۲۳	۳۴۲	۲۵۵	۳۴۱۷	۶۴۴	۴۴۶۲	۳۲۱	۱۲۸	
Pb	ppm	۲	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۴	۳	۳	۲۰	۲۰	۲	۲۰	
S	%	۰.۰۱	۰.۳۷	۰.۱	۰.۱۱	۰.۲۶	۰.۰۵	۱.۴۶	۰.۰۶	۰.۶۵	۱.۱۲	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۲۴	
Sb	ppm	۵	۵۰	۵۰	۵۰	۱۱	۸	۲۶	۱۴	۲۲	۹	۵۰	۵۰	۳۰	
Sc	ppm	۱	۶	۵	۶	۹	۸	۴	۹	۶	۱۱	۲۱	۳	۱۰	
Sn	ppm	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
Sr	ppm	۱	۱۳۹	۱۷۶	۱۸۰	۱۶۸	۱۶۳	۴۹	۱۰۰	۲۹۲	۱۷۰	۲۵۲	۱۲۳	۱۸۳۶	
Th	ppm	۲۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۲۸	۲۰۰	۴۱	۳۶	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	
Ti	%	۰.۰۱	۰.۱۹	۱.۵	۱.۱۳	۰.۲۴	۰.۸	۰.۷۵	۰.۸۷	۰.۱۱	۰.۲۹	۱.۲۹	۰.۱۲	۰.۰۲	
U	ppm	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
V	ppm	۱	۶۱	۴۶	۳۵	۸۱	۳۳	۲۰۵	۱۴۹	۷۱	۳۶	۱۳۷	۱۶	۵	
W	ppm	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۹	۱۰۰	۱۳	۲۵	۱۰۰	۱۴	۱۸	۱۰۰	۶۰۱	۱۰۰	
Zn	ppm	۲	۱۰۱	۲۹	۶۱	۵۱	۱۵۷	۱۷۸	۵۸۳	۲۱	۲۶	۶۳	۲۹	۱۰	
Zr	ppm	۱	۲۹۵	۵۷	۱۲۸	۱۸۳	۱۳۵	۵۹	۵۷	۱۰	۱۲۴	۲۹	۱۰	۳۳	

و از مجموع نتایج به دست آمده، مقادیر آهن کل محاسبه می‌گردد (شکل ۶).

در آخرین مرحله، براساس مقادیر گزارش شده در نتایج تجزیه FeO و Fe_2O_3 ، همچنین مقدار آهن کل نمونه محاسبه شده در مرحله پیشین، می‌توان با استفاده از ضرایب تبدیل آهن به مگنتیت و آهن به هماتیت مقدار کانی‌های مگنتیت و هماتیت موجود در نمونه را نیز محاسبه نمود (شکل ۷).

برای تبدیل مقادیر Fe_2O_3 و FeO به مقادیر Fe ، مگنتیت و هماتیت، در مرحله نخست باید جرم اتمی Fe ، O ، مگنتیت، هماتیت و ضرایب تبدیل حالت‌های مختلف آهن به هم را دانست (شکل ۵).

در مرحله دوم با استفاده از ضریب تبدیل Fe_2O_3 به Fe و FeO به Fe ، مقادیر گزارش شده برای Fe_2O_3 و FeO در نتایج تجزیه یکی از نمونه‌های مربوط به با کانه‌زایی در معدن دلکن (نمونه DL-TR15-S89) به مقادیر آهن II و III تبدیل شده،



جرم اتمی عنصر
 $\text{Fe} = 55.85 \text{ gr/mol}$

→



جرم اتمی عنصر
 $\text{O} = 16 \text{ gr/mol}$

جرم اتمی

{

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (Hematite)} = 159.7 \text{ gr/mol}$

$\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ (Magnetite)} = 231.55 \text{ gr/mol}$

$\text{FeO} = 71.85 \text{ gr/mol}$

با توجه به مطالب فوق برای تبدیل هر یک از حالات آهن به یکدیگر می‌توان یک ضریب محاسبه نمود:

$2\text{Fe} / \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (Hematite to Fe)} = (2 \times 55.85) / 159.7 = 0.699$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 / 2\text{Fe} \text{ (Fe to Hematite)} = 159.7 / (2 \times 55.85) = 1.43$

$3\text{Fe} / \text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ (Magnetite to Fe)} = (3 \times 55.85) / 231.55 = 0.723$

$\text{Fe}_3\text{O}_4 / 3\text{Fe} \text{ (Fe to Magnetite)} = 231.55 / (3 \times 55.85) = 1.38$

$\text{Fe} / \text{FeO} \text{ (FeO to Fe)} = (1 \times 55.85) / 71.85 = 0.777$

$\text{FeO} / \text{Fe} \text{ (Fe to FeO)} = 71.85 / (1 \times 55.85) = 1.29$

شکل ۵ روش محاسبه ضرایب تبدیل هر یک از حالت‌های آهن به هم.

مقادیر ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 73.71\%$) و ($\text{FeO} = 20.47\%$) برای نمونه DL-TR15-S89 گزارش شده است، در نتیجه:

$$\text{آهن فریک در آنالیز} = 73.71 \times 0.699 = 51.52\%$$

$$\text{آهن فرو در آنالیز} = 20.47 \times 0.777 = 15.90\%$$

$$\text{آهن کل} = 51.52 + 15.90 = 67.42\%$$

شکل ۶ روش محاسبه مقادیر آهن کل.

مقادیر ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 73.71\%$) و ($\text{FeO} = 20.47\%$) برای نمونه DL-TR15-S89 گزارش شده است

و مقادیر محاسبه شده برای ($\text{آهن کل} = 67.42\%$) می‌باشد، در نتیجه:

$$\text{آهن فرو نمونه} = 20.47 + 2(20.47) = 61.41\%$$

$$\text{آهن فریک نمونه} = 67.42 - 61.41 = 6.01\%$$

$$\text{مگنتیت} = 61.41 \times 1.38 = 84.74\%$$

$$\text{هماتیت} = 6.01 \times 1.43 = 8.59\%$$

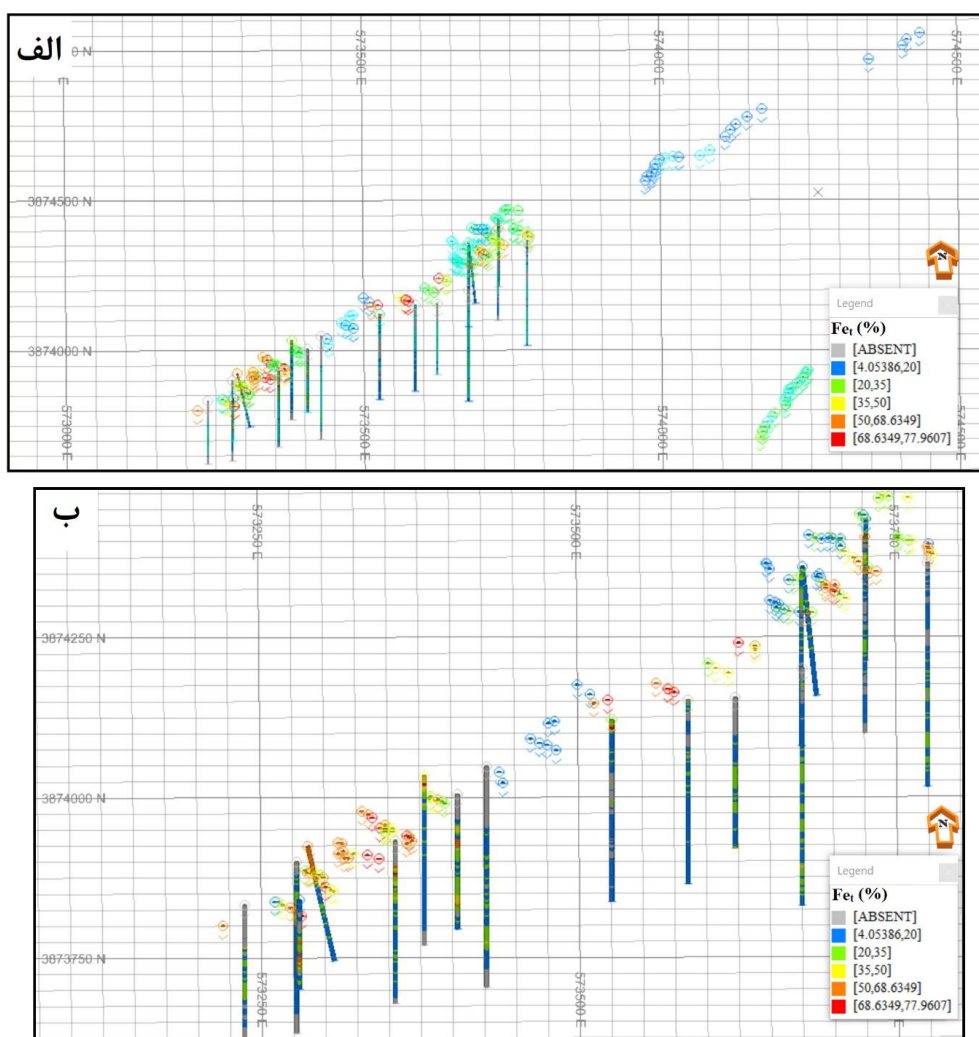
شکل ۷ روش محاسبه مقادیر مگنتیت و هماتیت در نمونه.

شکل ۹، کانه هماتیت در شکل ۱۰ و مقادیر P_2O_5 که در ارتباط با رخداد کانه‌زایی‌های اکسید آهن آپاتیت در کانسار آهن دلکن هستند در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.

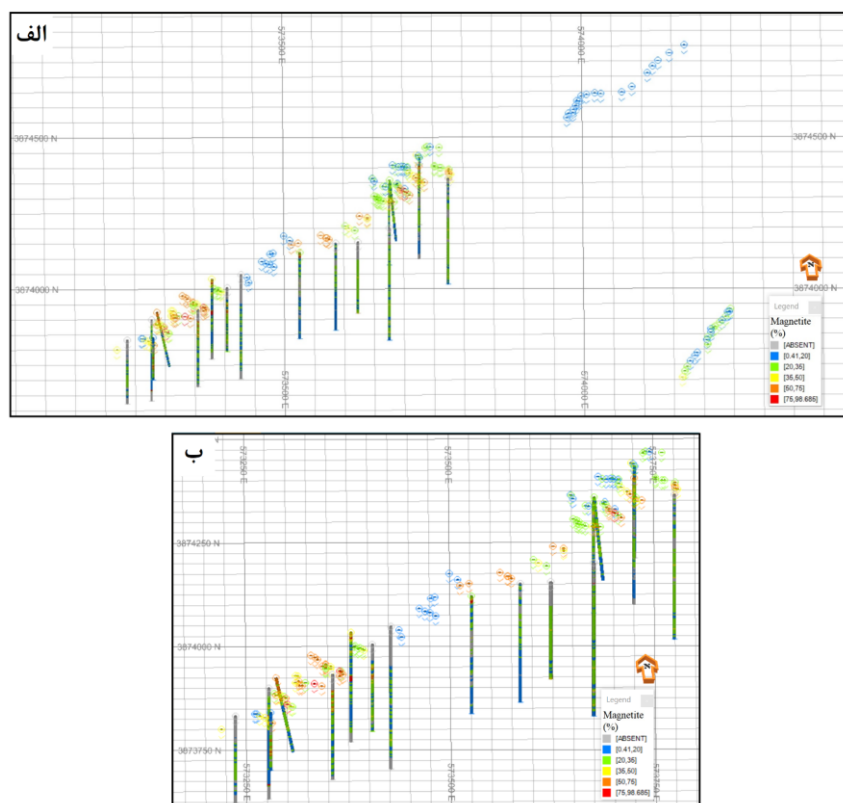
مقادیر محاسبه شده برای آهن کل، مگنتیت و هماتیت در نمونه در معدن دلکن که دارای هر دو اکسید Fe_2O_3 و FeO هستند در جدول ۴ گزارش شده است. مدل‌های سه بعدی پراکندگی و مقادیر آهن کل در شکل ۸، کانه مگنتیت در

جدول ۴ مقادیر محاسبه شده برای آهن کل (Fe_t)، مگنتیت و هماتیت در ۱۳۰۳ نمونه در معدن دلکن که دارای هر دو اکسید Fe_2O_3 و FeO هستند. مقادیر محاسبه شده بر حسب % هستند.

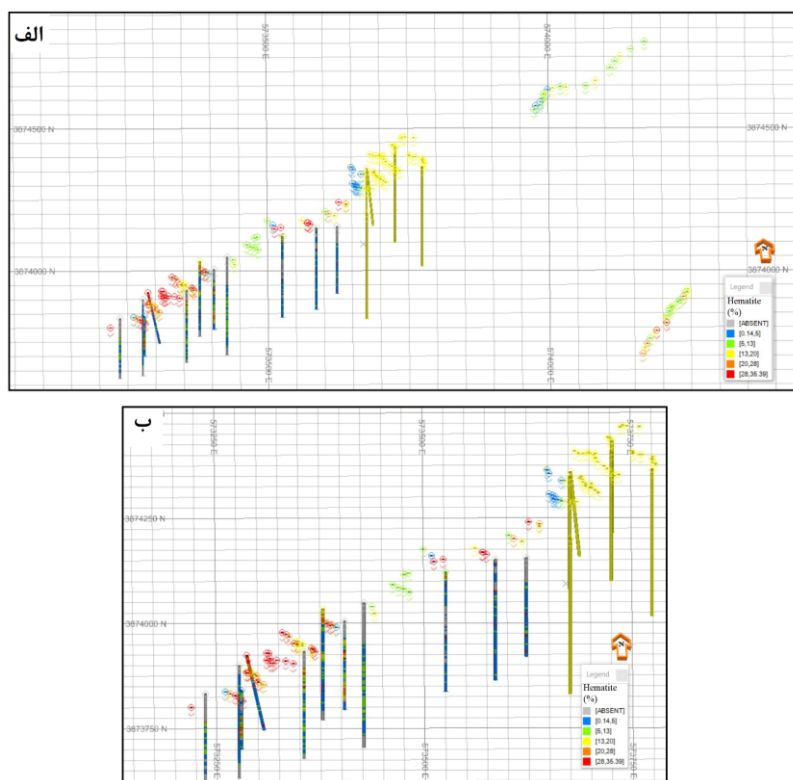
نوع	مقادیر				میانگین	انحراف معیار
	چارک بالا	چارک میانی-ب	چارک میانی-پ	چارک پایین		
Fe_t	۲۲,۵۸ - ۷۷,۸۶	۱۷,۷۲ - ۲۲,۵۶	۱۲,۶۰ - ۱۷,۷۲	۴,۰۵ - ۱۲,۵۶	۲۱,۱۷	۱۳,۶۹
Magnetite	۳۶,۹۲ - ۹۸,۶۸	۲۹,۱۸ - ۳۶,۹۲	۲۱,۸۱ - ۲۹,۱۸	۰,۴۱ - ۲۱,۸۱	۳۱,۸۸	۱۶,۴۰
Hematite	۱۲,۷۵ - ۳۵,۳۹	۱۰,۰۸ - ۱۲,۷۵	۷,۵۳ - ۱۰,۰۸	۰,۱۴ - ۷,۵۳	۱۱,۰۱	۵,۶۶



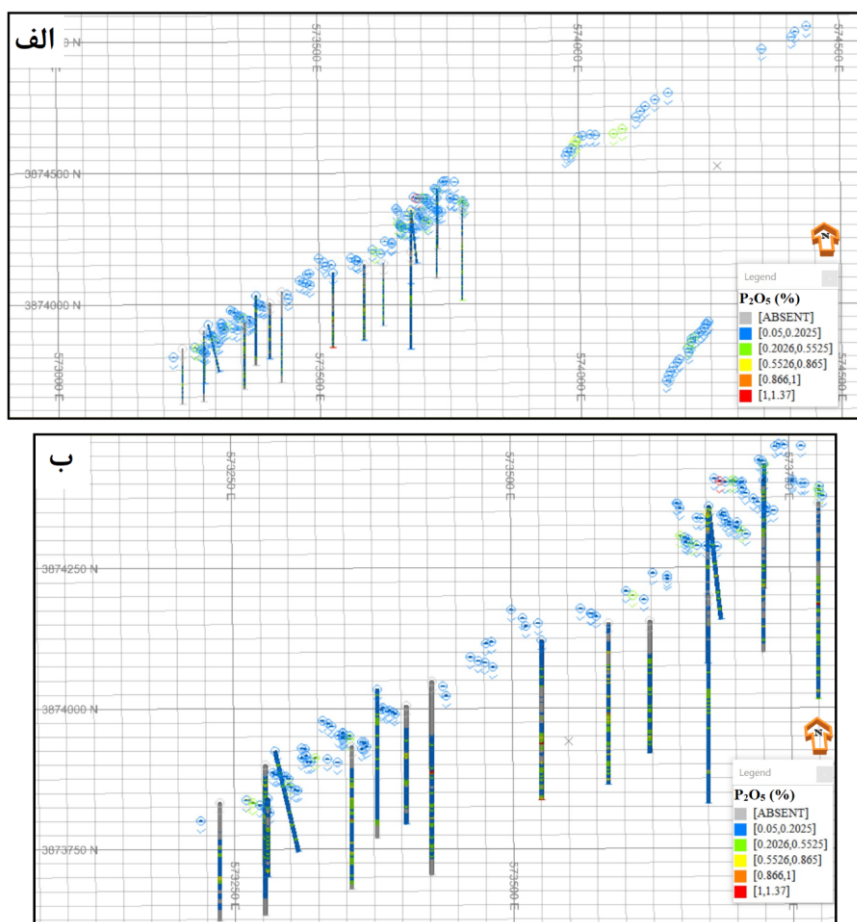
شکل ۸ نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر آهن کل در معدن دلکن؛ (ب) نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر آهن کل با تمرکز بر بخش پر عیار کانه‌زایی و گمانه‌ها در معدن دلکن.



شکل ۹ نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر کانه مگنتیت در معدن دلکن؛ (ب) نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر کانی کانه مگنتیت با تمرکز بر بخش پر عیار کانه‌زایی و گمانه‌ها در معدن دلکن.



شکل ۱۰ نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر کانه هماتیت در معدن دلکن؛ (ب) نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر کانی آپاتیت با تمرکز بر بخش پر عیار کانه‌زایی و گمانه‌ها در معدن دلکن.



شکل ۱۱ نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر P_2O_5 وابسته به رخداد کانه‌زایی‌های اکسید آهن آپاتیت در معدن دلکن؛ ب) نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر P_2O_5 وابسته به رخداد کانه‌زایی‌های اکسید آهن آپاتیت با تمرکز بر قسمت پر عیار کانه‌زایی و گمانه‌ها در معدن دلکن.

برخی از کانسارهای اکسید آهن آپاتیت ماگمایی یا برخی کانسارهای REE ماگمایی). برخی کانسارها نیز پس از تشکیل و یا ورود سیال گرمایی به سامانه و در نتیجه فرآیندهای گرمایی شکل می‌گیرند (مانند بیشتر سامانه‌های پورفیری، کانسارهای مس یا طلا گرمایی، بیشتر کانسارهای اسکارن، برخی کانسارهای اکسید آهن آپاتیت و غیره). در این بخش، با توجه به محتوای زمین شیمیایی کانی مگنتیت، فرآیند مؤثر در تشکیل کانسار بررسی شده است.

برای تعیین فرآیندهای مؤثر در رخداد کانه‌زایی‌های آهن در معدن دلکن از داده‌های زمین شیمیایی کانه مگنتیت در ۳ نمودار V نسبت به Ti برگرفته از مرجع [۱۴] (شکل ۱۳ الف)، Ti نسبت به Ni/Cr برگرفته از مرجع [۱۵] (شکل ۱۳ ب) و Fe/(Mg+Al+Mn) نسبت به Ti برگرفته از مرجع [۱۶] (شکل ۱۳ پ) استفاده گردید.

تعیین نوع و گستره دمایی رخداد کانه‌زایی

ترکیب شیمیایی اکسیدهای آهن مانند مگنتیت و هماتیت می‌تواند در راستای تعیین نوع کانسارها استفاده شود [۱۲]. برای تعیین نوع و گستره‌های دمایی رخداد کانه‌زایی‌های آهن در معدن دلکن از داده‌های زمین شیمیایی کانه مگنتیت در ۳ نمودار Ni/(Cr+Mn) نسبت به Ti+V (شکل ۱۲ الف)، Ca+Al+Mn نسبت به Ti+V (شکل ۱۲ ب) و Cr نسبت به V (شکل ۱۲ پ) [۱۳] استفاده گردید.

تعیین فرآیندهای مؤثر در تشکیل کانه‌زایی

مقادیر آهن کل در ۴ نمونه از ۵ نمونه مگنتیت در جدول ۵ گزارش شده است.

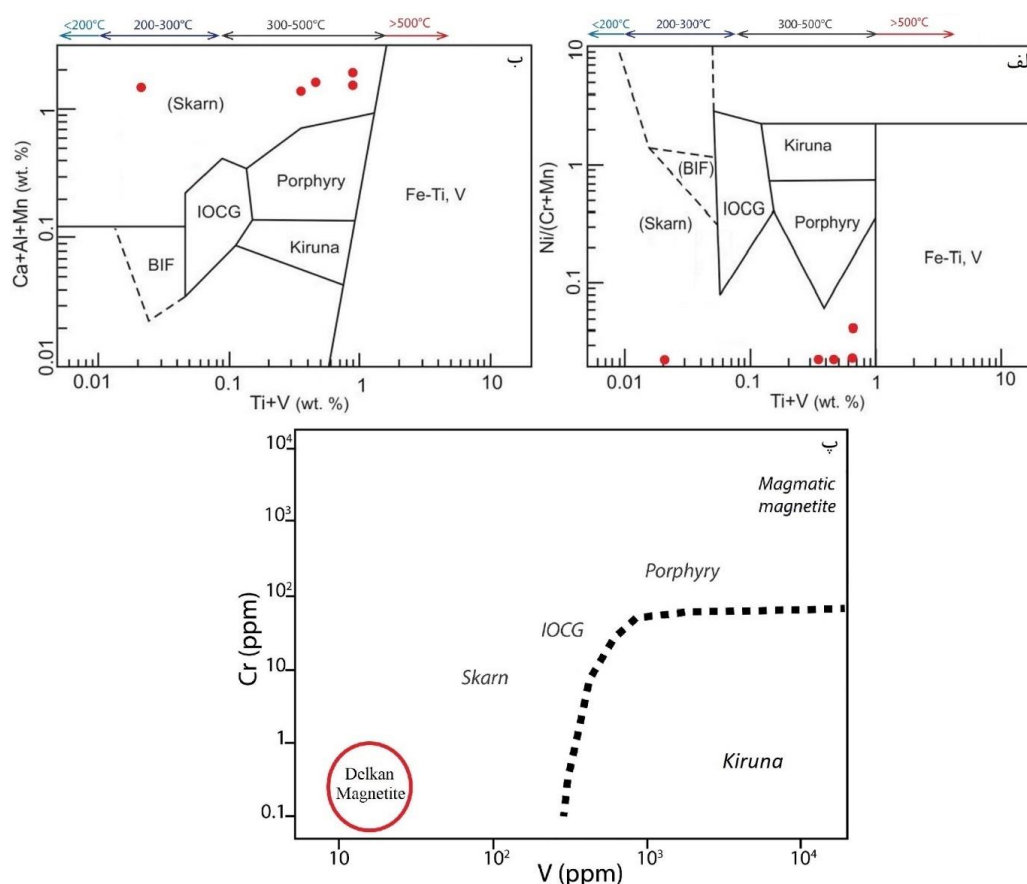
برخی از کانسارها دارای فرآیند تشکیل ماگمایی هستند، یعنی مستقیم در خود ماگما و بدون دخالت هیچ سیال گرمایی تشکیل می‌شوند (چون کانسارهای آهن و تیتانیوم ماگمایی یا

تعیین خاستگاه سیال گرمابی مؤثر در کانه‌زایی

برای تعیین خاستگاه سیال گرمابی مؤثر در کانه‌زایی در معدن دلکن از مقادیر داده‌های زمین شیمیایی کانه مگنتیت در نمودار Ce/Ce^* نسبت به ΣREE (شکل ۱۴) استفاده گردید. شاخص Ce/Ce^* در این نمودار از بهنجارسازی یا تقسیم مقادیر Ce و La نمونه به مقادیر این عناصر در کندریت به دست آمده است، مقادیر کندریت برگرفته از مرجع [۱۷]. شاخص ΣREE نیز مجموع مقادیر REE موجود در هر نمونه از کانه مگنتیت (در اینجا مجموع مقادیر عناصر Ce و La در هر نمونه) است.

بحث

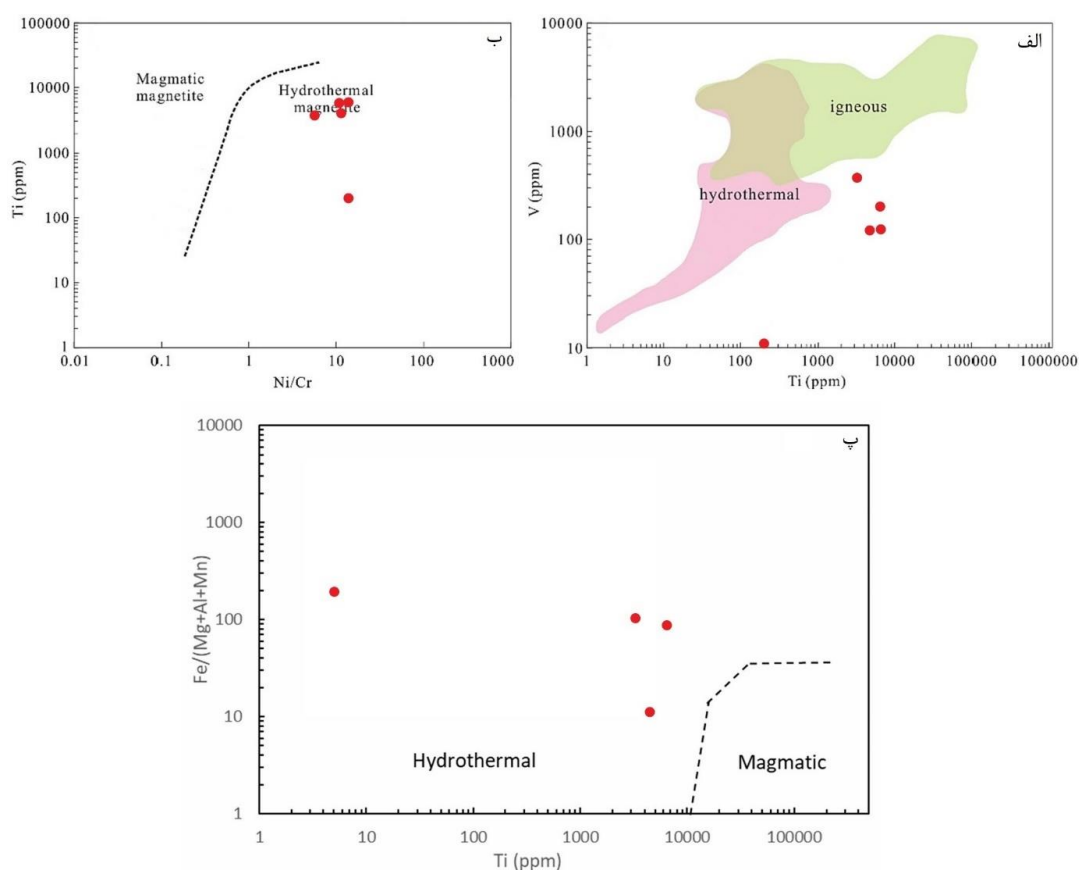
بررسی‌های ایزوتوپی اکسیژن بر کانه مگنتیت در معدن دلکن [۶]



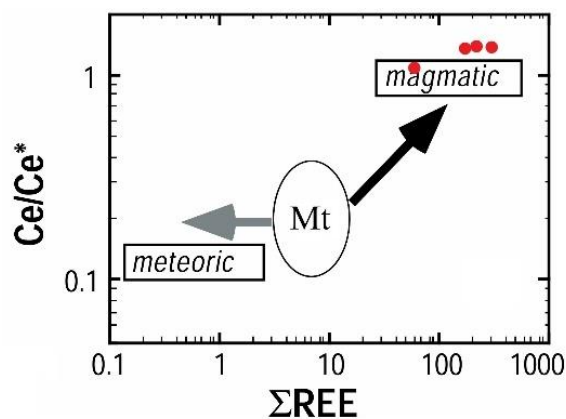
شکل ۱۲ تعیین نوع و گستره دمایی تشکیل کانه‌زایی‌های آهن در معدن دلکن با استفاده از داده‌های زمین شیمیایی مگنتیت: (الف) نمودار $Ni/(Cr+Mn)$ نسبت به $Ti+V$ [۱۲] که گستره‌های دمایی برگرفته از مرجع [۱۳] هستند؛ (ب) نمودار $Ca+Al+Mn$ نسبت به $Ti+V$ [۱۲] که گستره‌های دمایی برگرفته از مرجع [۱۳] هستند؛ (پ) نمودار Cr نسبت به V [۱۴].

جدول ۵ مقادیر محاسبه شده برای آهن کل (Fe_t) در ۴ نمونه از ۵ نمونه اولیه برگزیده برای بررسی‌های زمین شیمی مگنتیت.

نوع	واحد	FCS	FCC	FCN	FSN
نوع مگنتیت		۱	۱	۱	۲
Fe_t	%	۶۴٫۸۰	۵۳٫۱۲	۵۸٫۸۵	۱۹٫۵۸



شکل ۱۳ تعیین شرایط رخداد کانه‌زایی‌های آهن در معدن دلکن بر پایه داده‌های زمین شیمیایی کانه مگنتیت و آهن موجود در نمونه‌های اولیه: الف) نمودار V نسبت به Ti برگرفته از مرجع [۱۴]؛ ب) نمودار Ti نسبت به Ni/Cr برگرفته از مرجع [۱۵]؛ پ) نمودار Fe/(Mg+Al+Mn) نسبت به Ti برگرفته از مرجع [۱۶].



شکل ۱۴ تعیین خاستگاه سیال گرمایی مؤثر برای کانه‌زایی در معدن دلکن بر پایه داده‌های زمین شیمیایی کانه مگنتیت در نمودار Ce/Ce^* نسبت به ΣREE [۱۸].

مکان رخداد در کانه‌زایی‌ها تبدیل می‌کند. با مقایسه مقادیر Ti و گستره دمایی تشکیل مگنتیت در این نمونه (۲۰۰ تا ۳۰۰ °C) نسبت به دیگر نمونه‌های مگنتیت (شکل‌های ۱۲ الف و ب) و با توجه به محل تشکیل این نمونه (شکل ۲) که در

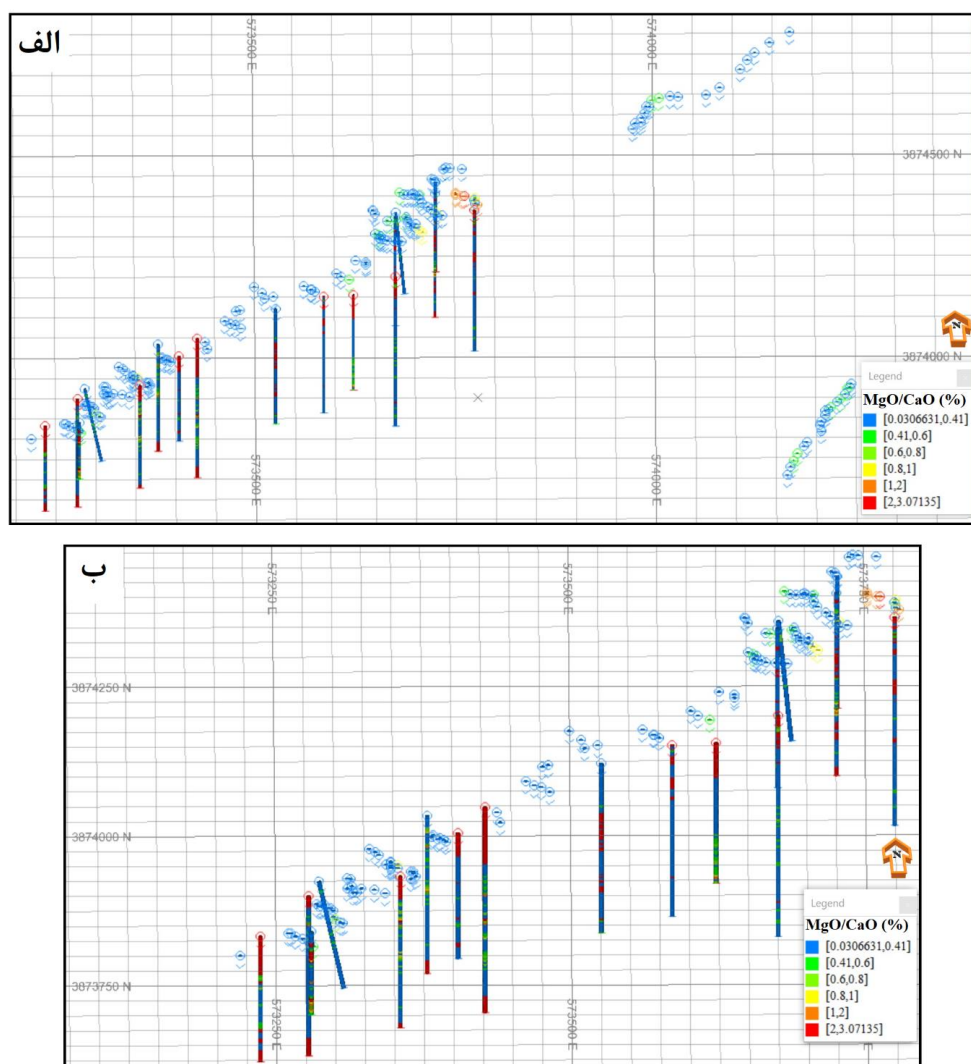
مقدار Ti با افزایش دما در محیط‌های ماگمایی و گرمایی دمای بالا افزایش می‌یابد، در حالی که مقادیر Ti در سیال‌های گرمایی دمای پایین ناچیز است [۱۹، ۲۰]. این امر Ti را به یکی از عناصر مهم در تفسیر ویژگی‌های دمایی در مقایسه با

کانه‌زایی‌های جنوب شرقی منطقه، حدود یک کیلومتر دورتر از استوک نفوذی است، می‌توان نتیجه گرفت که سیال گرمایی مؤثر در کانه‌زایی، با فاصله گرفتن از خاستگاه اولیه خود (استوک نفوذی مونزونیتی) دچار کاهش دما گردیده است که اثر مستقیم بر کاهش مقادیر Ti در مگنتیت‌های نوع ۲ را در پی داشته است.

یکی از ویژگی‌های نوعی کانسارهای آهن اسکارن مقادیر بالای عناصر Ca و Si آن‌ها در مقایسه با کانسارهای نوع اکسید آهن مس طلا، پورفیری و کاپروناست [۱۲]. این امر با مقادیر بالایی از عناصر Ca و Si (میانگین CaO برابر با ۷۷۱ و میانگین SiO₂ برابر با ۴۶۲۱ درصد) در کانسار آهن دلکن نیز دیده می‌شود. با توجه به جنس سنگ میزبان که شامل لایه‌های دولومیتی در شمال استوک نفوذی و مجموعه سنگ‌های آهکی در جنوب استوک نفوذی و کانه‌زایی‌های دور از خاستگاه (شکل ۲)، و نیز مجموعه کانی‌های فراورده دگرتهادی در کانسار آهن دلکن، که هم شامل کانی‌های اسکارن کلسیمی (آندرادی، کلسیت، اپیدوت و...) و هم کانی‌های اسکارن منیزی (ترمولیت و سرپانتین) است [۶]، می‌توان نتیجه گرفت که نوع کانه‌زایی اسکارن در این معدن اسکارن منیزی و اسکارن کلسیمی به صورت همزمان است. این امر در بررسی‌های زمین شیمیایی کانسار نیز با توجه به مقادیر ۲/۵۴٪ تا ۱۶/۲۷٪ در چارک بالایی و میانگین ۲/۱۳٪ برای MgO و مقادیر ۹/۳۲٪ تا ۳۳/۷٪ در چارک بالایی و میانگین ۷/۷۱٪ برای CaO در نمونه‌های در ارتباط با کانه‌زایی (جدول ۱) به خوبی قابل تشخیص است. برای تفکیک ضریب تأثیر هر یک از انواع اسکارن کلسیمی و منیزی در رخداد کانه‌زایی‌ها، از شاخص MgO/CaO استفاده شد که از تقسیم مقادیر MgO به مقادیر CaO در هر نمونه از ۱۳۰۳ نمونه سطحی بررسی شده برای مقادیر اکسیدهای اصلی در معدن دلکن به دست آمده و نتایج آن در شکل ۱۴ آورده شده است. کانه‌زایی در نقاطی که با رنگ‌های نارنجی و قرمز با ضریب تأثیر ۱ تا ۳/۰۷ در این شکل مشخص شده‌اند، بیشترین شباهت را با نوع اسکارن منیزی دارد، و کانه‌زایی‌ها در سایر نقاط بیشتر در اثر دگرتهادی آهکی-سیلیکاتی (اسکارن کلسیمی) است. این کانه‌زایی‌ها بیشتر به صورت مگنتیت‌های نوع ۱ با مقادیر متفاوتی از پیریت در منطقه دیده می‌گردند (شکل ۱۵).

ترکیب‌های زمین شیمیایی مگنتیت و هماتیت وابسته به نوع کانه‌زایی، شرایط فیزیکوشیمیایی سیال طی کانه‌زایی و شرایط شیمیایی محیط تشکیل تغییر می‌کند [۱۲]. چنان که

پیش‌تر نیز اشاره شد، بررسی‌های پیشین [۶] بیانگر رخداد کانه‌زایی‌های اکسید آهن آپاتیت در معدن دلکن بوده است. مگنتیت اصلی‌ترین کانی در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت به شمار می‌رود که می‌تواند با مقادیر متفاوتی از آپاتیت (۱ تا ۵۰٪)، اکتینولیت و/یا پیروکسن همراه باشد [۲۱]. از نظر زمین شیمیایی، بزرگترین نشانه این نوع کانه‌زایی در کانسار دلکن را به طور کلی می‌توان وجود مقادیر بالای P₂O₅ (تا بیش از ۱/۲۷٪) وابسته به رخداد کانی‌زایی‌های آپاتیت دانست. اصلی‌ترین اکسید آهن در همراهی با این آپاتیت‌ها، مگنتیت‌های نوع ۳ هستند. وجود بیشترین مقادیر Ti (۰/۶۵٪) در این نوع از مگنتیت‌ها (جدول ۲) نشان دهنده رخداد اولیه آن‌ها از نظر همبرزایی و در گستره دمایی بالاتر در مقایسه با دیگر انواع مگنتیت است. این مگنتیت‌ها در اثر فرآیندهای دگرتهادی متأخر در کانسار که باعث تشکیل انواع دیگر مگنتیت در کانسار شده‌اند، به شدت دگرسان و با اکسیدهای دیگر آهن جانشین شده‌اند. این جانشینی‌ها باعث تعادل دوباره مقادیر بسیاری از عناصر نوعی در ارتباط با نوع تشکیل مگنتیت (Ca, Mg, Si, V, Al, Mn, Cr)، از نوع اکسید آهن آپاتیت به سمت نوع اسکارن شده است، با این حال، وجود ناهنجاری‌های قابل توجه عناصر Ce (۳۰۲۶ ppm) و La (۱۸۶۲ ppm) در مگنتیت‌های نوع ۳ از مهمترین نشانه‌های اثر نوع اکسید آهن آپاتیت در تشکیل آن‌ها در مقایسه با دیگر انواع مگنتیت در این کانسار است. طیف گسترده‌ای از فرآیندهای تشکیل در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت، از ماگمایی کامل (۱۰۰۰ تا ۸۰۰°C) تا ماگمایی-گرمایی و گرمایی (کمتر از ۶۰۰°C) دیده می‌گردد [۲۱]. فرآیندهای مؤثر در رخداد کانه‌زایی آهن در معدن دلکن با توجه به شکل ۱۳ کاملاً گرمایی، و با توجه به (شکل‌های ۱۲ الف، ب و ۲) دارای گستره‌های دمایی ۲۰۰-۳۰۰°C برای کانه‌زایی‌های دور از خاستگاه و ۳۰۰-۵۰۰°C در کانه‌زایی‌های نزدیک به استوک نفوذی بوده است. رخداد کانسارهای اسکارن بیشتر در محیط‌های گرمایی با خاستگاه ماگمایی و یا ماگمایی-گرمایی دیده می‌گردد. تشکیل کانسارهای آهن در محیط‌های گرمایی در دیگر کانسارهای آهن کوه سرهنگی (پدیده) نیز دیده شده است [۳]. با توجه به تشکیل مقادیر متوسط آپاتیت (۰/۵۵ - ۰/۲) در کانه‌زایی‌های دور از خاستگاه جنوب شرقی کانسار (شکل ۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که محیط اصلی تشکیل ذخایر اکسید آهن آپاتیت در این کانسار نیز کاملاً یک محیط گرمایی بوده است.



شکل ۱۵ نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر شاخص MgO/CaO در معدن دلکن؛ (ب) نقشه سه بعدی (سطحی و زیرسطحی) پراکندگی مقادیر شاخص MgO/CaO با تمرکز بر قسمت پر عیار کانه‌زایی و گمانه‌ها در معدن دلکن.

سپاس‌گزاری می‌شود. این مقاله از پیشنهادهای ارزشمند سه داور مجله بهره‌مند شده است که از آن‌ها سپاس‌گزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Stöcklin J., "Structural history and tectonics of Iran: areview". AAPG Bull 25 (1968) 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- [2] Iman pour B., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., "Study of mineralization and geochemistry of Deh Zaman iron deposit (southwest of Bardaskan) in comparison with banded iron firmation deposits (In Persian)". Iranian Journal of Crysallography and Mineralogy 24(4) (2016) 675-690.

برداشت

کانسار دلکن را با توجه به بررسی های زمین شیمیایی انجام شده بر روی کانه‌های مگنتیت و نمونه‌های کل‌سنگ در این محدوده می‌توان یک کانسار ترکیبی آهن با نوع اسکارن-اکسید آهن آپاتیت دانست. فرآیند تشکیل کانه‌زایی در این کانسار یک فرآیند گرمایی و سیال تشکیل‌دهنده کانه‌زایی دارای خاستگاه ماگمایی می‌باشد.

قدردانی

از همکاری‌های ارزشمند مدیر محترم گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان جناب آقای دکتر جمالی در راستای انجام برخی امور آزمایشگاهی و همچنین مساعدت‌های مدیر عامل محترم شرکت دلکن کاوان پاسارگاد و پرسنل معدن دلکن

- [12] Dupuis C., Beaudoin G., "Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types". *Miner. Deposita* 46 (2011) 319-335.
- [13] Palma G., Barra F., Reich M. Simon A.C., Romero R., "A review of magnetite geochemistry of Chilean Iron Oxide-Apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes". *Ore [1] Geology Reviews* 126 (2020) 103-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103748>
- [14] Knipping J.L., Bilenker L.D., Simon A.C., Reich M., Barra F., Deditius A.P., Munizaga R., "Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes". *Geochim. Cosmochim. Acta* 171 (2015b) 15-38.
- [15] Dare S.A.S., Barnes S.J., Beaudoin G., "Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators". *Miner. Deposita* 49 (2014) 785-796. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0529-0>
- [16] Hu X., Xiao B., Jiang H., Huang J., "Magnetite texture and trace element evolution in the Shaquanzi Fe-Cu deposit, Eastern Tianshan, NW China". *Ore Geology Reviews* 154 (2023) 105306.
- [17] Boynton W.V., "Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare Earth Element Geochemistry*". *Developments in Geochemistry* 2 (1983) 63-114.
- [18] Kato Y., "Rare Earth Elements as an Indicator to Origins of skarn deposits: Examples of the kamioka Zn-Pb and Yoshiwara-Sannotake Cu(-Fe) deposits in Japan". *Resource Geology* 49 (1999) 183-198.
- [19] Nielsen R.L., Forsythe L.M., Gallahan, W.E., Fisk M.R., "Major element and trace element magnetite-melt equilibria". *Chem. Geol.* 117 (1994) 167-191.
- [20] Toplis M.J., Carroll M.R., "An experimental study of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems". *J. Petrol.* 36 (1995) 1137-1170.
- [21] Reich M., Simon A.C., Barra F., Palma G., Hou T., Bilenker, L.D., "Formation of iron oxide-apatite deposits". *Nature Reviews Earth & Environment* 3 (2022) 758-775. <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-022-00335-3>.
- [3] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., Shabani S., "Geology, mineralogy, and geochemistry of the Padehbid iron occurrence, southwest of Bardaskan, South Khorasan Province (In Persian)". *Advanced Applied Geology* 8(3) (2018) 51-62. <https://doi.org/10.22055/aag.2019.26711.1881>
- [4] Parvaresh Darbandi M., Malekzadeh Shafaroudi A., Azimzadeh A.M., Karimpour M.H., "Magnetite mineralization properties of Narm iron mine with respect to petrology and geochemistry of its adjacent gabbroic- dioritic rocks (North of Tabas, South Khorasan Province) (In Persian) ". *Petrological Journal* 11(1) (2020) 103-128. <https://doi.org/10.22108/ijp.2020.118478.1145>
- [5] Shabani S., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., "Geology and Mineralization of Delkan Mine, southwest of Bardaskan, Razavi Khorasan province (In Persian)". 7th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Damghan University, Iran (2015).
- [6] Kassaeian M., Behzadi M., "Genesis of the Delkan iron deposit based on geological, tectonic, petrographic as well as $\delta^{18}O$ and $\delta^{34}S$ stable isotope studies (Southwest of Bardaskan, Khorasan Razavi Province) (in Persian)". *Petrological Journal* 16(4) (2025) 57-82. <https://doi.org/10.22108/ijp.2025.146371.1369>
- [7] Ramezani J., Tucker R.D., "The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics". *American journal of science* 303(7) (2003) 622-665. <http://dx.doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- [8] Nozaem R., Mohajjel M., Rossetti F., Della Seta M., Vignaroli G., Yassaghi A., Eliassi M., "Post-Neogene right-lateral strike-slip tectonics at the north-western edge of the Lut Block (Kuh-e-Sarhangi Fault), Central Iran". *Tectonophysics* 589 (2013) 220-233. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.001>
- [9] Eftekharneshad J., Valeh N., Ruttne A., Nabavi M.H., Alavi M., Haghipour A., " Geological map of Ferdows, Scale 1:250000". Geological survey of Iran, Tehran (1977).
- [10] Sahandi M.R., Qasemi M.R., Ekhtiarabadi M., "Geological map of the Qasem Abad, Scale 1:100000 Sheet No. 7559. Geological Survey of Iran, Tehran (2010).
- [11] Warr L.N., "IMA-CNMNC Approved Mineral Symbols". *Mineralogical Magazine* 85 (2021) 291-320. <https://doi.org/10.1180/sgm.2021.43>