Journal of Economic Geology
Vol. 8, No. 1 (2016)
ISSN 2008-7306

مجله زمین‌شناسی اقتصادی
جلد 8، شماره 1 (سال 1395)
صفحات 93 تا 115

رخداد معدنی آهن لولک‌آباد، شمال‌باختر زنجان: کانه‌زایی تیپ آتشفشانی- رسوبی دگرگون و دگرشکل‌شده در زون ایران مرکزی

مهری کرمی، محمد ابراهیمی و حسین کوهستانی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

دریافت: 1393/3/1، پذیرش: 1394/1/19

چکیده

رخداد معدنی آهن لولک‌آباد، در گوشه شمال‌باختری زون ایران مرکزی و در فاصله 55 کیلومتری شمال‌باختر زنجان قرار دارد. کانه‌زایی آهن در این منطقه، به‌صورت رگه‌ای- رگه‌چه‌ای و عدسی‌شکل، درون واحدهای دگرشکل‌شده شیستی، متاولکانیکی (معادل سازند کهر) و گرانیتی رخ داده است. بر اساس بررسیهای میکروسکپی، کانیهای معدنی در لولک‌آباد، شامل اولیژیست، اندکی مگنتیت و پیریت کانیهای باطله، شامل کوارتز، کلسیت و کلریت است. بافت کانه‌ها شامل دانه‌پراکنده، رگه- رگه‌چه‌ای، بِرشی و پرکننده فضای خالی است. دگرسانی شامل سیلیسی، کلسیتی و کلریتی‌شدن بخشهای کانه‌دار است. دو مرحله کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد قابل تفکیک است. کانه‌زایی مرحله اول، به‌صورت مگنتیت‌های دانه‌پراکنده و عدسی‌شکل چینه‌سان و چینه‌کران هم‌زمان با واحدهای آتشفشانی- رسوبی میزبان دیده می‌شود. مرحله دوم کانه‌زایی، به‌صورت رگه و رگه‌چه‌های اولیژیستی- پیریتی- کلسیتی رخ داده و برگ‌وارگی غالب میلونیتی سنگها را قطع کرده است. مقایسه الگوی عناصر نادر خاکی در سنگهای میزبان فاقد کانه‌زایی و بخشهای کانه‌دار، بیانگر غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سنگین نسبت به عناصر نادر خاکی سبک در بخشهای کانه‌دار است. این امر بیانگر نسبت بالای واکنش سیال به سنگ در لولک‌آباد است. مقایسه ویژگیهای زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی و ساخت و بافت ماده معدنی در رخداد معدنی لولک‌آباد با نوعهای مختلف کانسارهای آهن نشان می‌دهد؛ که کانه‌زایی آهن در لولک‌آباد، در ابتدا به‌صورت آتشفشانی- رسوبی تشکیل شده و بعد به‌صورت رگه‌ای تمرکز دوباره یافته است.

واژه‌های کلیدی: *کانه‌زایی آهن، رگه‌ای گرمابی، دگرسانی، لولک‌آباد، زنجان، ایران مرکزی*

مقدمه

رخداد معدنی آهن لولک‌آباد، در خاور ماه‌نشان و فاصله 55 کیلومتری شمال‌باختر زنجان، در محدوده‌ای بین طولهای جغرافیایی 47° 42´ تا 47° 48´ خاوری و عرضهای جغرافیایی 36° 50´ تا 36° 56´ شمالی، در خاور برگه 1:100000 ماه‌نشان (Lotfi, 2001) واقع شده است. بر اساس تقسیم محیطهای تکتونیکی- رسوبی ایران (Alavi, 1991)، این رخداد معدنی در بخش شمال‌باختری زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد. از دیدگاه متالوژنی، زون ایران مرکزی مهمترین ایالت فلززایی آهن در ایران به حساب می‌آید (Ghorbani, 2007). از کانسارهای مهم موجود در این زون، می‌توان به میشدوان، چادرملو، سه‌چاهون و اسفوردی در بلوک بافق- پشت‌بادام اشاره کرد (Daliran, 1990; Daliran, 2002; Moore and Modabberi, 2003; Jami, 2006; Torab and Lehmann, 2006; Jami et al., 2007; Daliran et al., 2007; Daliran et al., 2009; Daliran et al., 2010; Bonyadi et al., 2011).

برای اولین بار کانه‌زایی آهن در لولک‌آباد، توسط شرکت زمین‌گستر (Zamin Gostar Company, 2007) شناسایی شد. فعالیتهای اکتشافی انجام‌شده توسط آن شرکت، شامل حفر 2 ترانشه و بررسیهای مغناطیس‌سنجی است. با وجود این، مطالعه علمی دقیقی بر روی آن انجام نشده بود. در این پژوهش، ویژگیهای زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمیایی

*مسؤول مکاتبات: kouhestani@znu.ac.ir

رخداد معدنی لولک‌آباد مورد بررسی قرار گرفته و نوع کانه‌زایی و خاستگاه آن تعیین شده است. مطالعه دقیق این نوع کانه‌زاییها، می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی را برای اکتشاف کانه‌زاییهای مشابه در این بخش از زون ایران مرکزی، معرفی کند و به‌عنوان الگوی اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

برای مطالعه زمین‌شناسی و کانه‌زایی منطقه مورد پژوهش، علاوه‌بر انجام بررسیهای صحرایی، تعداد 10 مقطع نازک و 6 مقطع نازک- صیقلی، از واحدهای سنگی و بخشهای کانه‌دار تهیه و در دانشگاه زنجان بررسی شد. سپس بر اساس تغییرات سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی، تعداد 7 نمونه برای تعیین میزان عناصر فرعی، کمیاب و نادر خاکی، به‌روش ICP–OES به آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ارسال و آنالیز شد

زمین‌شناسی عمومی منطقه

بر اساس نقشه زمین‌شناسی مقیاس 1:100000 ماه‌نشان (Lotfi, 2001)، مجموعه‌های سنگی رخنمون‌یافته در منطقه لولک‌آباد، شامل واحدهای سازندهای کهر، باروت، زایگون، لالون، روته، واحدهای تخریبی پلیو-کواترنری و توده گرانیتی هستند (شکل 1). سازند کهر در این منطقه شامل سنگهای شیستی، فیلیتی و اسلیتی به رنگ سبز مایل به خاکستری است؛ که میان‌لایه‌هایی از واحدهای آتشفشانی (توف و گدازه‌های آندزیتی) دگرگون‌شده در آن دیده می‌شود (Lotfi, 2001). در واحدهای این سازند، آثار دگرشکلی به‌صورت چین‌خوردگی دیده می‌شود. سازند باروت، دربردارنده تناوبی از شیل‌های سبز تا ارغوانی میکادار است؛ که در بخش زیرین خود با لایه‌هایی از دولومیت زرد رنگ همراه می‌شود. لایه‌های دولومیتی عدسی‌شکل و دارای گرهکها و نوارهای چرت تیره هستند (Lotfi, 2001). سازند زایگون به رنگ قرمز شرابی دیده می‌شود و شامل شیل‌های رسی تا سیلتی با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ است؛ که سازند باروت را می‌پوشاند. بر اساس لطفی (Lotfi, 2001)، سازند لالون در منطقه لولک‌آباد، شامل ماسه‌سنگ آرکوزی صورتی تا ارغوانی رنگ است و حدود 100 تا 200 متر ضخامت دارد و میان‌لایه‌هایی از شیل نازک‌لایه نیز در آن دیده می‌شود. سازند روته به‌صورت تناوبی از آهک و آهک دولومیتی، با لایه‌بندی متوسط (20-30 سانتی‌متر ضخامت) به رنگ خاکستری رخنمون دارد. توده گرانیتی منطقه از نوع گرانیت آناتکسی است. این گرانیت از دو فاز مختلف گرانیت بیوتیت‌دار و گرانیت سفید تشکیل شده است و برای فاز غنی از بیوتیت آن، سن 27 ± 548 میلیون سال پیشنهاد شده است (Hassanzadeh et al., 2008). گرانیت سفید، جوانتر از فاز غنی از بیوتیت است (Lotfi, 2001; Babakhani and Sadeghi, 2004). واحد پلیو- کواترنری عمدتاً از کنگلومرا و ماسه‌سنگ سخت‌نشده به رنگ خاکستری روشن و تراس‌های رودخانه‌ای تشکیل شده و دارای ستبرای بیشتر از 100 متر است.

از نظر ساختاری، منطقه مورد بررسی، دارای چین‌خوردگیها و گسل‌خوردگیهای زیادی است. چینهای کوچک‌مقیاس، بیشتر در واحدهای شیستی سازند کهر دیده می‌شوند؛ درحالی‌که چینهای بزرگ‌مقیاس، بیشتر در واحدهای جوانتر دیده می‌شوند. این چینها دارای محورهایی با روند غالب شمال-باختر- جنوب‌خاور است؛ که در اثر سازوکار یک گسل تراستی با شیب راندگی به طرف شمال‌خاوری، به شکل یک چین برگشته درآمده است (Lotfi, 2001). گسلها و شکستگیها دارای دو روند اصلی شمال‌باختر- جنوب‌خاور و شمال‌خاور- جنوب‌باختر هستند. گسلهای با روند شمال‌باختر- جنوب‌خاور، گسلهای اصلی منطقه را تشکیل می‌دهند. این گسلها معمولاً از نوع تراستی با راندگی به سمت شمال‌خاور هستند. امتداد این گسلها از $N100^{\circ}$ تا $N130^{\circ}$ متغیر است. گسلهای با روند شمال‌خاور- جنوب‌باختر، گسلهای فرعی منطقه را تشکیل می‌دهند. عموماً امتداد این گسلها عمود بر راستای گسلهای اصلی است.

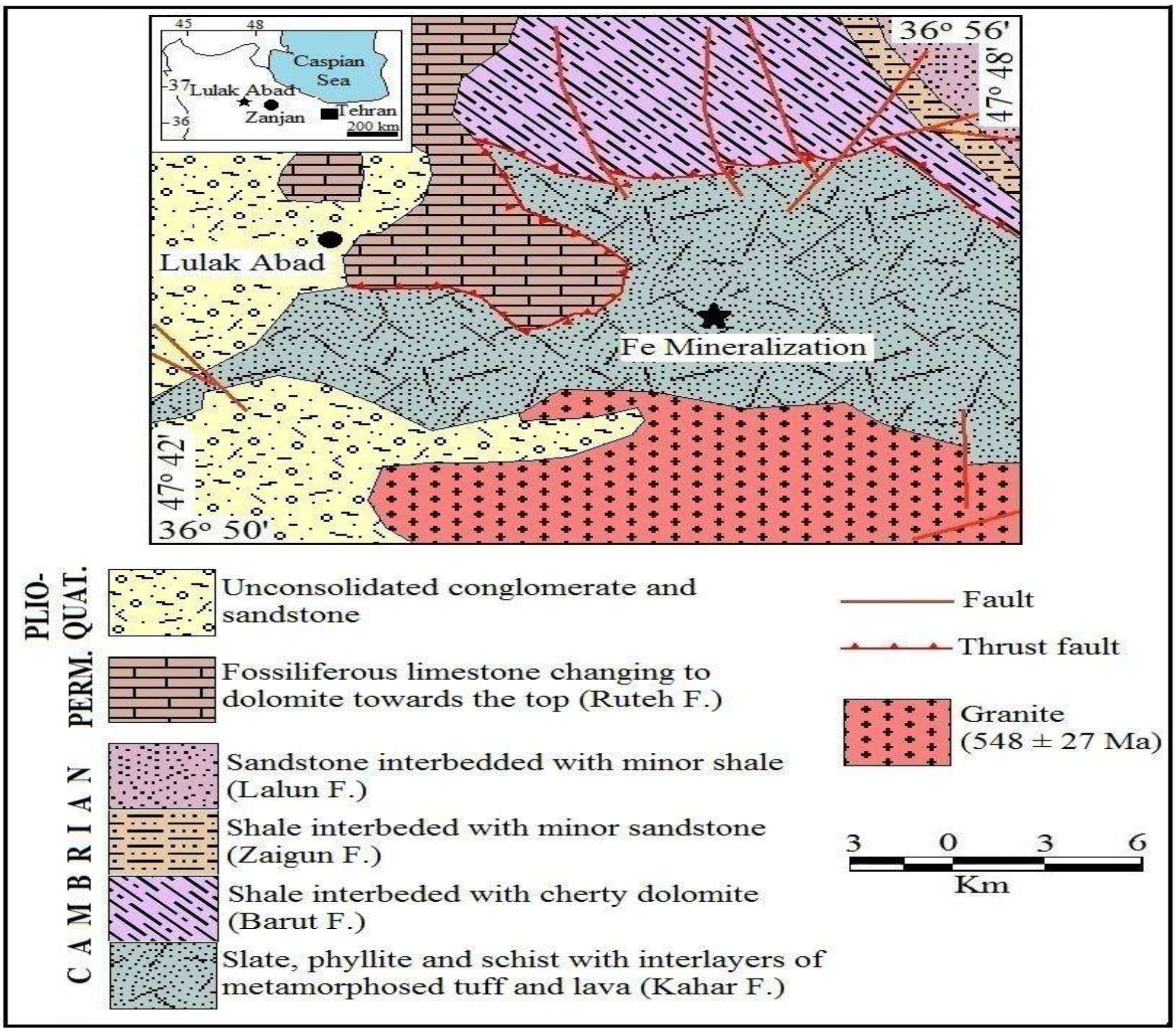
زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه لولک‌آباد

مهمترین واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در منطقه لولک‌آباد، شامل واحدهای شیستی و متاولکانیکی میلونیتی (معادل سازند کهر)، گرانیت میلونیتی و میکرودیوریت است.

واحدهای شیستی

واحدهای شیستی اصلی‌ترین واحدهای سنگی منطقه هستند. بر اساس بررسیهای سنگ‌نگاری، واحدهای شیستی از نوع کلریت- بیوتیت- مسکویت شیست و مسکویت شیست هستند. بر پایه این بررسیها، بافت این سنگها،

گرانولپیدوبلاستیک است (شکل A -2). مگنتیت کانی کدر اصلی موجود در این واحدهاست و بیشتر به‌صورت دانه‌پراکنده و هم‌روند با برگ‌وارگی دیده می‌شود. از نظر کانی‌شناسی، کلریت- بیوتیت- مسکویت شیست‌ها دارای مسکویت، بیوتیت، کلریت، کوارتز، پلاژیوکلاز و کانیهای کدر هستند. بیوتیت‌ها اغلب در حال تبدیل به کلریت هستند. کوارتزها بیشتر به‌صورت بلورهای ریزدانه و ناخودشکلند و در اثر اعمال نیروهای تکتونیکی دارای خاموشی موجی هستند. کانیهای کدر (مگنتیت) معمولاً به‌صورت پورفیروکلاست‌های ریز ناخودشکل و یا درشت‌خودشکل تا نیمه‌خودشکل دیده می‌شوند. معمولاً این کانیها در راستای برگ‌وارگی قرار گرفته‌اند و پدیده‌های دگرشکلی مانند چرخش بلور، دورزدن برگ‌وارگی در اطراف آنها و سایه واتنشی رشد بلورهای کوارتز در اطراف آنها دیده می‌شود (شکل B -2). مسکویت شیست‌ها از مسکویت، کوارتز، فلدسپات آلکالن و کانیهای کدر تشکیل شده‌اند. کوارتزها در اثر اعمال نیروهای تکتونیکی، خاموشی موجی دارد و در بیشتر مناطق، مرز بین دانه‌های آنها دندانه‌دار است و درون دانه‌های مجاور فرورفتگی را نشان می‌دهند. این کانیها بیشتر به‌صورت بلورهای درشت در راستای برگ‌وارگی کشیده و از حاشیه‌ها، توسط کوارتزهای ریزبلور احاطه شده‌اند (شکل C -2). در این سنگها، مگنتیت به‌صورت پورفیروکلاست‌های ریز ناخودشکل، پورفیروکلاست‌های درشت خودشکل تا نیمه‌خودشکل و گاهی پورفیروکلاست‌های ناخودشکل هم‌روند با برگ‌وارگی دیده می‌شود و دارای سایه واتنشی از جنس کوارتز است.



شکل 1. نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای ساده شده از منطقه لولک‌آباد، با تغییرات از لطفی (Lotfi, 2001)

Fig. 1. Simplified regional geological map of the Lulak Abad area modified after Lotfi (2001)

متاولکانیک‌ها

واحدهای متاولکانیکی در واقع سنگهای دگرگونه آتشفشانی تا آذرآواری با ترکیب اسیدی تا حدواسط هستند که تحت‌تأثیر فازهای دگرگونی و دگرشکلی تا رخساره شیست سبز دگرگون شده و در آنها فابریک‌های میلونیتی ایجاد شده است. بر پایه بررسیهای میکروسکپی، واحدهای متاولکانیکی از نوع متاداسیت، متاتوف ریولیتی و متاآندزیت هستند. بر اساس بررسیهای سنگ‌نگاری، عمدتاً متاداسیت‌ها از درشت‌بلورهای کوارتز و پلاژیوکلاز در یک خمیره تشکیل شده از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت، کلریت، مسکویت و کانیهای کدر (مگنتیت) تشکیل شده‌اند. بر اساس این بررسیها، بافت غالب در این سنگها از نوع پورفیریتیک و سرییت است (شکل 2- D). کوارتز حدود 45 تا 50 درصد کانیهای سنگ را تشکیل می‌دهد. پورفیروکلاست‌های کوارتز، اغلب در اثر اعمال نیروهای تکتونیکی به‌صورت بلورهای خردشده، با حاشیه‌های مضرسی و سایه فشاری دیده می‌شود و پورفیروکلاست‌های فلدسپات آلکالن ساختار سیگما را نشان می‌دهند (شکل 2- D). بر مبنای بررسیهای میکروسکپی، متاتوف به‌علت داشتن 30 تا 35 درصد قطعات خرده‌سنگی و میزان فراوان بلورهای خردشده در محدوده لیتیک- کریستال توف قرار می‌گیرد. با توجه به جنس بلورها (کوارتز و فلدسپات)، ترکیب واحد متاتوفی از نوع ریولیتی است. اندازه قطعه‌های خرده‌سنگی موجود، از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر متغیر است (شکل 2- E). در این سنگها، مؤلفه‌های دگرریختی مانند برگ‌وارگی میلونیتی و دورزدن آن در اطراف جزایر کوارتزی به خوبی دیده می‌شود (شکل 2- F). متاآندزیت‌ها از پلاژیوکلاز، بیوتیت، کوارتز و فلدسپات آلکالن تشکیل شده‌اند. پلاژیوکلازها حدود 60 درصد کانیهای سنگ را تشکیل داده‌اند و دارای ماکل آلبیت- کارلسباد هستند. کانیهای کدر موجود در سنگهای متاآندزیتی، اولیژیست و به‌میزان کمتر مگنتیت هستند. بافت غالب در این سنگها از نوع پورفیریتیک با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه‌ای متشکل از میکرولیت‌های فلدسپات است. در این سنگها نیز برگ‌وارگی میلونیتی به‌صورت ضعیف گسترش یافته است.

گرانیت میلونیتی

واحد گرانیت میلونیتی در روی زمین به رنگ سفید تا خاکستری روشن دیده شده و به‌شدت دگرشکل‌شده است. بررسیهای صحرایی و میکروسکپی نشان می‌دهد؛ که این گرانیت پس از فرآیندهای دگرگونی، در سنگهای دگرگونی منطقه نفوذ کرده است. بلورهای دانه‌درشت کوارتز آن با چشم غیر مسلح و به‌راحتی دیده می‌شود (شکل 3- A). عمدتاً، این سنگ از کوارتز و فلدسپات آلکالن و به میزان کمتر، مسکویت و پلاژیوکلاز تشکیل شده است. کوارتز حدود 40 تا 50 درصد کانیهای سنگ را تشکیل داده است و اغلب به‌صورت بلورهای دانه‌درشت ناخودشکل با خاموشی موجی و حاشیه مضرسی دیده می‌شود. فلدسپات آلکالن نزدیک به 20 درصد کانیهای سنگ را تشکیل می‌دهد. عموماً، بلورهای این کانی پرتیتی شده‌اند (شکل 3- B). در این سنگ، فابریک‌های میلونیتی به‌صورت برگ‌وارگی میلونیتی و دور زدن آن، اطراف پورفیروکلاست‌ها و بافت ساروجی (Zhou and Wang, 1999) به‌خوبی گسترش یافته است.

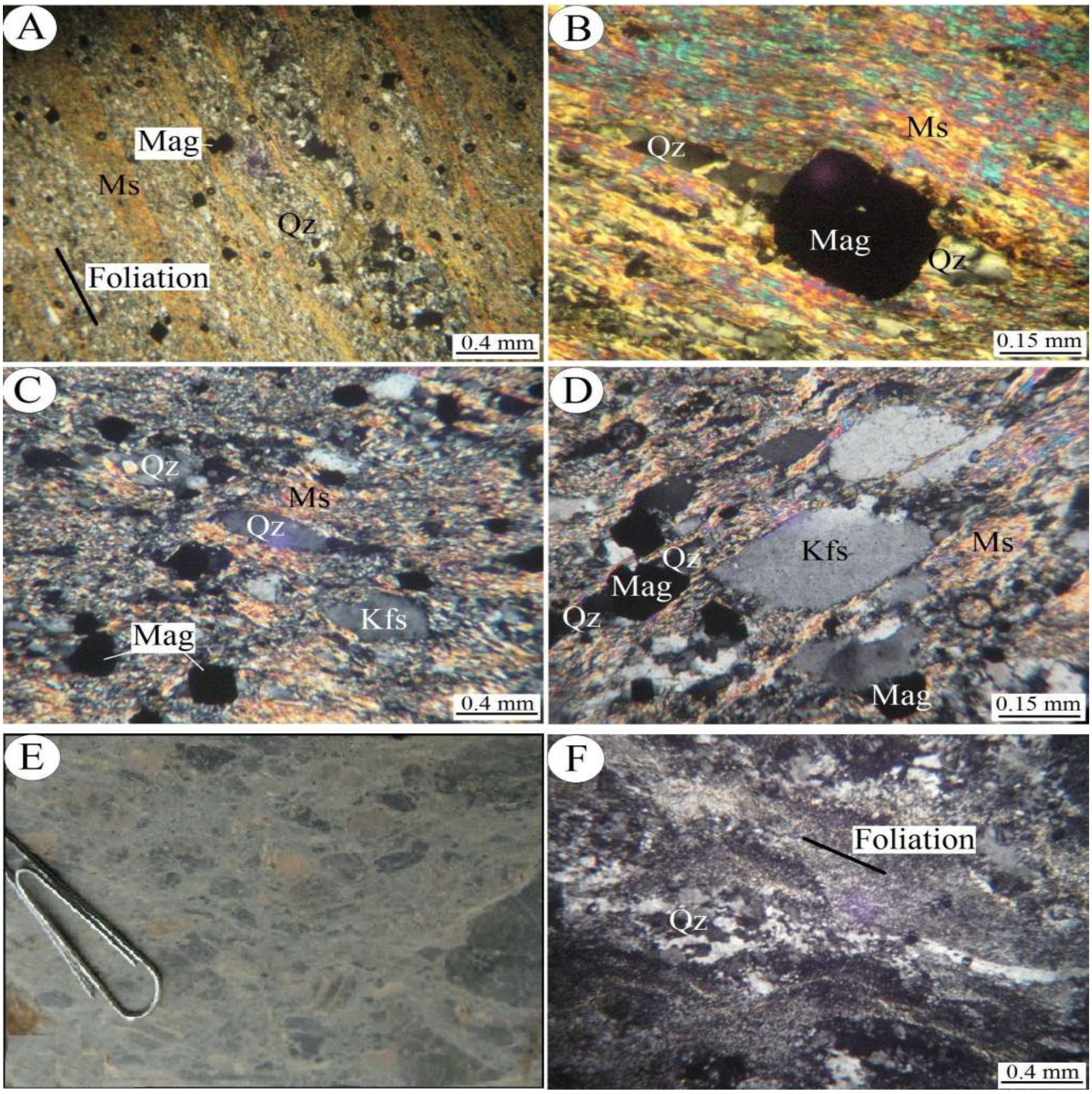
میکرودیوریت

واحد میکرودیوریتی جوانترین واحد سنگی موجود در منطقه لولک‌آباد است. این واحد پس از فرآیندهای دگرگونی و دگرشکلی در منطقه تزریق شده و فاقد شیستوزیته و برگ‌وارگی میلونیتی است. نتایج بررسیهای سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که این واحد به‌طور عمده از پلاژیوکلاز تشکیل شده و دارای بافت میکروگرانولار است (شکل 3- C). مگنتیت و به‌میزان کمتر پیریت، کانیهای کدر موجود در واحد میکرودیوریتی هستند. معمولاً این کانیها به‌صورت دانه‌پراکنده دیده می‌شوند. پلاژیوکلاز حدود 60 درصد کانیهای سنگ را تشکیل می‌دهد. این کانی اغلب به شکل بلورهای نیمه‌خودشکل تا خودشکل دارای ماکل آلبیت- کارلسباد است و در اثر دگرسانی به سریسیت تبدیل شده است.

دگرشکلی

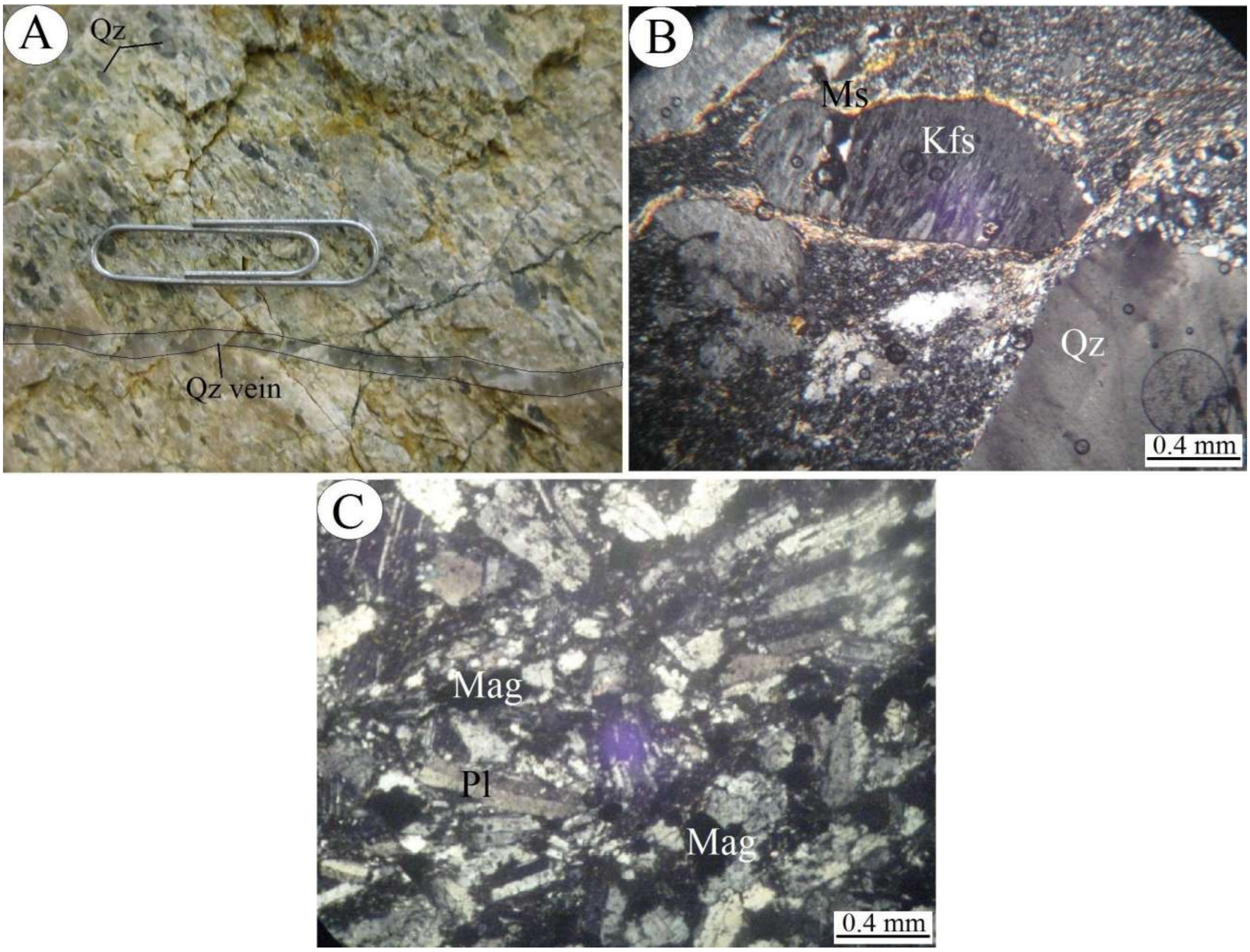
بر اساس بررسیهای ساختاری انجام‌شده، دو نوع دگرشکلی شکل‌پذیر و شکنا در منطقه لولک‌آباد، قابل تفکیک است؛ که در این بین، مهمترین دگرشکلی، دگرشکلی شکل‌پذیر بوده و طی آن شدیدترین تغییرات ساختاری در سنگها ایجاد شده است. بر پایه این پژوهشها، دگرشکلی شکل‌پذیر شامل دو مرحله D_1 و D_2 است. دگرشکلی مرحله اول (D_1)، باعث گسترش برگ‌وارگی نسل اول (S_1) به‌صورت ساختارهای

نواری و لایه‌بندی ترکیبی (Davis and Reynolds, 1996) تشکیل شده از لایه‌های غنی کانیهای مافیک (بیوتیت) و لایه‌های غنی از کانیهای فلسیک (کوارتز و فلدسپات)، در سنگهای منطقه شده است (شکل 4- A).



شکل 2. A: بافت گرانولپیدوبلاستیک در واحد کلریت- بیوتیت- مسکویت شیست و قرارگیری کانیهای کدر (مگنتیت) در راستای برگ‌وارگی، B: رشد بلورهای کوارتز در اطراف پورفیروکلاست مگنتیت و ایجاد سایه واتنشی رشد با ساختار سیگما در واحد کلریت- بیوتیت- مسکویت شیست، C: کشیدگی بلورهای درشت کوارتز در راستای برگ‌وارگی در واحد مسکویت شیست، D: بافت پورفیریتیک در متاداسیت. ساختار سیگما در پورفیروکلاست فلدسپات در تصویر مشخص است، E: واحد متاتوف ریولیتی حاوی قطعات سنگی با اندازه‌های چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر، F: توسعه برگ‌وارگی میلونیتی در واحد متاتوف ریولیتی و دور زدن آن، در اطراف رگه‌های کوارتزی. همه تصویرهای میکروسکپی در نور دوبار پلاریزه انکساری گرفته شده‌اند. (Kfs: فلدسپات آلکالن، Mag: مگنتیت، Ms: مسکویت، Qz: کوارتز)

Fig. 2. A: Granolepidoblastic texture in chlorite- biotite- muscovite schist along with foliation-parallel opaque minerals (magnetite), B: Magnetite porphyroclast with quartz strain shadows creating Σ-type structure in chlorite-biotite-muscovite schist, C: Foliation-parallel elongated coarse-grained quartz in muscovite schist, D: Porphyritic texture in metadacite. Σ-type structure of feldspar porphyroclast is also observed, E: Rhyolitic metatuff containing lithic fragments with mm to cm in size, F: Development of mylonitic foliation in rhyolitic metatuff surrounding the quartz veins, All photomicrographs are taken in transmitted light, XPL. (Kfs= alkali feldspar, Mag= magnetite, Ms= muscovite, Qz= quartz)



شکل 3. A: بلورهای دانه‌درشت کوارتز در واحد گرانیت میلونیتی. گسترش برگ‌وارگی میلونیتی در تصویر مشخص است. B: بلور درشت فلدسپات آلکالن با بافت پرتیتی در واحد گرانیت میلونیتی. توسعه برگ‌وارگی میلونیتی و دور زدن آن، اطراف پورفیروکلاست‌های فلدسپات و کوارتز نیز در تصویر دیده می‌شود. C: بافت میکروگرانولار در واحد میکرودیوریتی. تصویرهای میکروسکپی در نور دوبار پلاریزه انکساری گرفته شده‌اند. (Kfs: فلدسپات آلکالن، Mag: مگنتیت، Ms: مسکویت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز)

Fig. 3. A: Coarse-grained quartz crystals in mylonitic granite. Development of mylonitic foliation is also observed, B: Coarse-grained alkali feldspar crystal with perthitic texture in mylonitic granite. Development of mylonitic foliation surrounding the feldspar and quartz porphyroclasts are also observed, C: Microgranular texture in microdiorite unit. Photomicrographs are taken in transmitted light, XPL. (Kfs= alkali feldspar, Mag= magnetite, Ms= muscovite, Pl= plagioclase, Qz= quartz)

با توجه به دگرشکلیهای شدید موجود در منطقه، تشخیص لایه‌بندی چینه‌شناسی اولیه (S_0) در واحدهایی که بیشتر تحت‌تأثیر دگرریختی بوده‌اند، به سختی امکان‌پذیر است. دگرشکلی، لایه‌بندی اولیه (S_0) را تغییر داده و یک لایه‌بندی ترکیبی (S_1) به‌وجود آورده است (Platt, 1984; Mohajjel, 1997). عوامل ساختاری که نشان از تشکیل و گسترش این نوع دگرشکلی در منطقه دارند؛ تحت تأثیر دگرشکلیهای بعدی دچار تغییراتی شده‌اند و به‌سختی قابل تشخیص هستند. با وجود این، آثار آنها به‌صورت باندهای تفریقی، تبلور دوباره و رشد درشت‌بلورهای کوارتز و فلدسپات در سنگهای منطقه دیده می‌شوند.

برگ‌وارگی غالب (میلونیتی) منطقه (S_2) طی دگرشکلی مرحله دوم (D_2) ایجاد شده است. امتداد برگ‌وارگی میلونیتی N-85-W با شیب نزدیک به قائم به سمت شمال‌خاور و یا جنوب‌باختر است. دگرشکلی مرحله دوم، با ایجاد چینهایی با محور خاوری- باختری و میل 20 درجه به سمت خاور همراه است. این چینها که از چین‌خوردن لایه‌بندی ترکیبی مرحله

اول به‌وجود آمده، سبب گسترش رخ کنگره‌ای (Platt, 1984) در سنگهای منطقه شده‌اند (شکل 4- A).

دیگر تغییرات ساختاری ایجاد شده در سنگها طی دگرشکلی مرحله دوم شامل ریزساختارهای میکا ماهی، پدیده رشد در سایه فشار و یا سایه واتنشی، پورفیروکلاست‌های پوششی نوع سیگما، خاموشی موجی، تبلور دوباره دینامیکی، دور زدن بلورهای میکا در حاشیه پورفیروکلاست‌ها، ساختار بودین‌شدگی، بافتهای مکانیکی و ساروجی و ریزدانه‌شدگی هستند. پدیده رشد در سایه واتنشی (Passchier and Trouw, 1997) در نمونه‌های منطقه لولک‌آباد، از رشد بلورهای کوارتز در اطراف پورفیروکلاست‌های مگنتیت و فلدسپات آلکالن در راستای عمود بر جهت بیشترین میزان فشار تشکیل شده و هم‌روند با برگ‌وارگی غالب سنگ هستند (شکل 4- B و C). پورفیروکلاست‌های پوششی نوع سیگما (Barker, 1990)، ناشی از تغییرشکل پورفیروکلاست‌های فلدسپات و یا کوارتز در زمینه‌ای از جنس کوارتز، فلدسپات و میکا هستند که در اثر بُرش ایجاد می‌شوند (Passchier and Simpson, 1986). این پورفیروکلاست‌ها، دنباله‌هایی از جنس خود پورفیروکلاست دارند؛ که برای تعیین جهت سوی بُرش استفاده می‌شود. در واحدهای سنگی منطقه لولک‌آباد این نوع پورفیروکلاست‌ها به‌خوبی شکل گرفته و دارای هسته‌ای از جنس فلدسپات، رگه‌های کوارتزی و یا مگنتیت با دنباله‌هایی از جنس کوارتز بوده و بیانگر حرکت بُرشی راست‌بر هستند (شکل 4- D، E و F).

بودین‌شدگی کانیهای کوارتز و فلدسپات در راستای عمود بر جهت فشار (شکل 5- A)، ایجاد ماکل مکانیکی در بلورهای فلدسپات آلکالن در اثر فشار مکانیکی (شکل 5- B) و بافت ساروجی (شکل 5- C) شامل ریزدانه‌ها در حاشیه‌ها همراه با جهت‌یافتگی کم تا متوسط و قرار گرفتن دانه‌های خردشده و ریز در بین و داخل پورفیروکلاست‌ها (Zhou and Wang, 1999)، از دیگر ریزساختارهای رایج در واحدهای سنگی منطقه است.

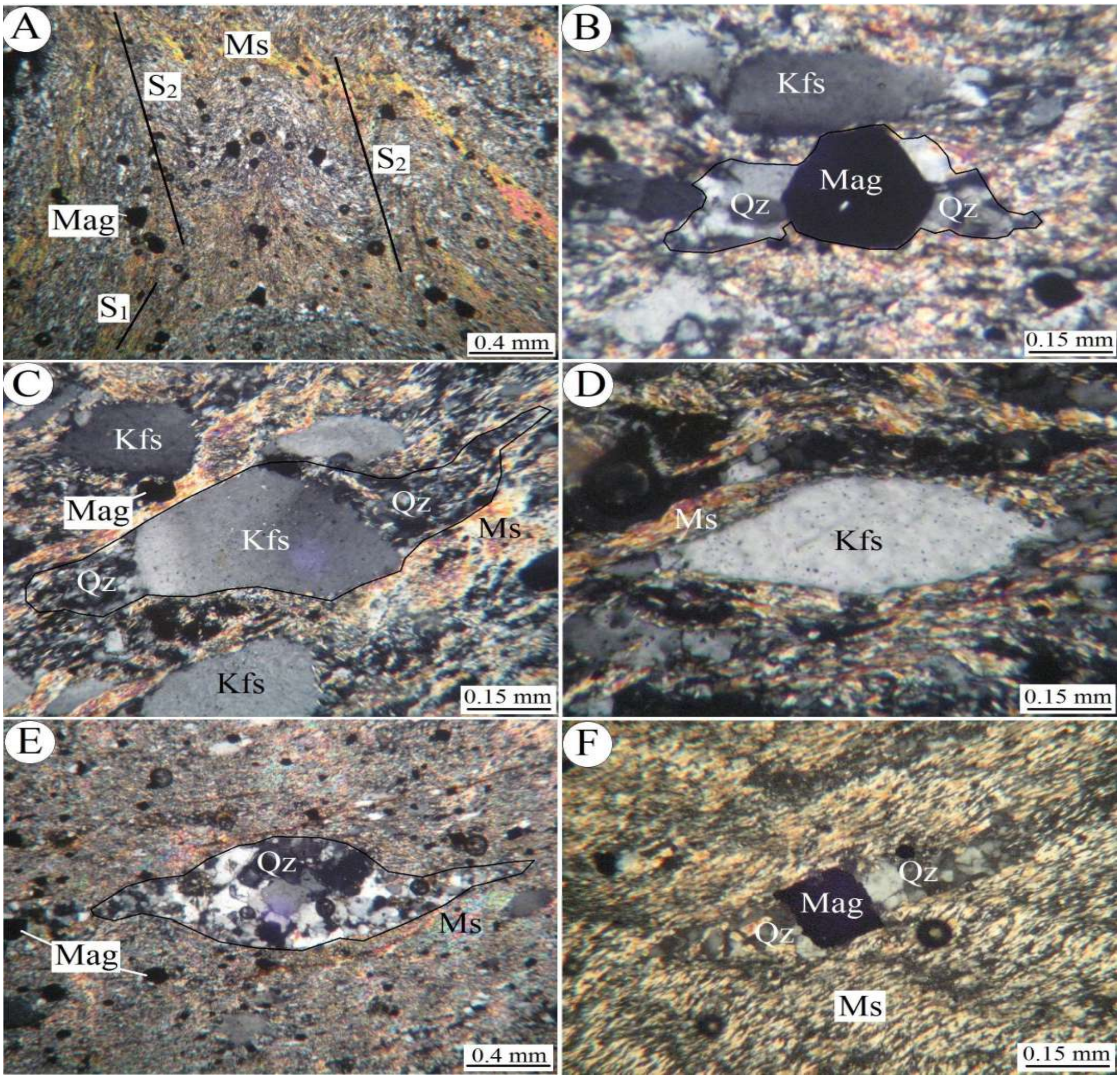
دگرشکلی شکنا، جوانترین دگریختی موجود در منطقه لولک‌آباد است؛ که ساختارهای حاصل از آن، بیشتر در مقیاس رخنمون دیده می‌شوند. عملکرد این دگرشکلی بیشتر به‌صورت درزه‌ها و شکستگیهاست و باعث تشکیل ریزشکستگیهای زیادی می‌شود. این درزه‌ها در واحدهای متاولکانیکی و گرانیت میلونیتی به‌خوبی توسعه یافته‌اند. تمرکز سیالات کانه‌ساز در امتداد این شکستگیها، سبب کانه‌زایی آهن در منطقه شده است.

کانه‌زایی

بر اساس بررسیهای صحرایی و میکروسکپی، کانه‌زایی آهن در رخداد معدنی لولک‌آباد، به‌صورت رگه‌ای، رگه‌چه‌ای و عدسی‌شکل رخ داده است (شکل 6- A، B و C). رگه اصلی کانه‌دار با امتداد شمال‌خاور- جنوب‌باختر و شیب به سمت جنوب‌خاور، حدود 100 متر درازا و 6 متر پهنا دارد و سنگ میزبان خود (واحدهای شیستی و متاولکانیک میلونیتی) را قطع کرده است. بر اساس مشاهدات صحرایی، بخش رگه-رگه‌چه‌ای در سنگهای متاولکانیک میلونیتی و گرانیت میلونیتی، میزبان شده است (شکل 6- B). ضخامت رگه-رگه‌چه‌های کانه‌دار از چند میلی‌متر تا حداکثر 5 سانتی‌متر متغیر است. کانه‌زایی عدسی‌شکل بیشتر درون واحدهای متاولکانیک میلونیتی دیده می‌شود. عموماً، عدسیهای کانه‌دار 10 سانتی‌متر درازا و 5 سانتی‌متر پهنا دارد و هم‌روند با برگ‌وارگی واحدهای میزبان هستند. آثار دگرشکلی به‌صورت بودین‌شدگی و تغییر ضخامت در عدسیهای کانه‌دار دیده می‌شود (شکل 6- C).

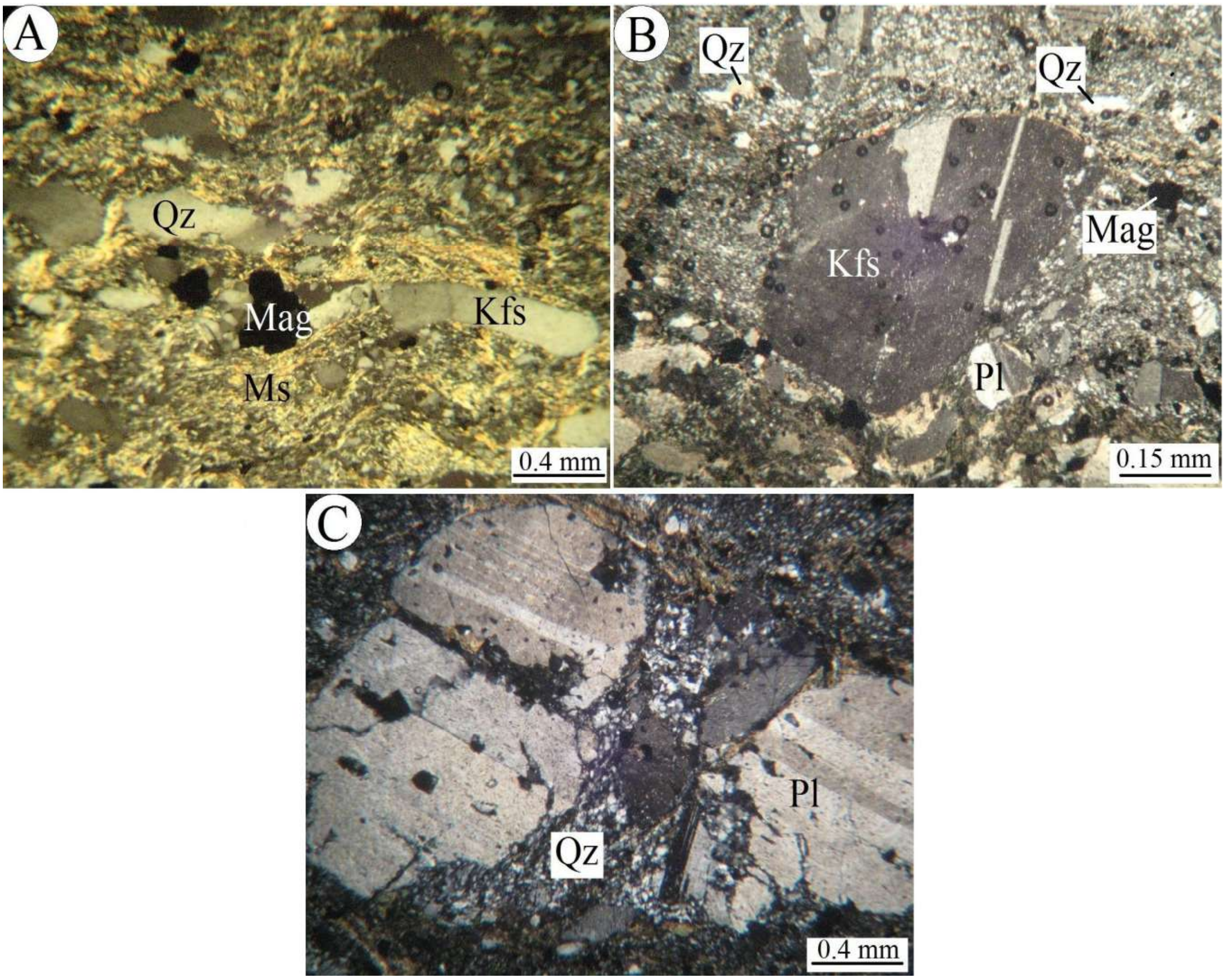
بر اساس بررسیهای صحرایی و میکروسکپی انجام‌شده، دو مرحله کانه‌زایی در رخداد معدنی لولک‌آباد قابل تفکیک است. کانه‌زایی مرحله اول قبل از رخدادهای دگرگونی و دگرشکلی و هم‌زمان با تشکیل واحدهای آتشفشانی- رسوبی میزبان رخ داده است. این مرحله از کانه‌زایی به‌صورت دانه‌پراکنده و عدسیهای چینه‌سان و چینه‌کران هم‌روند با برگ‌وارگی در واحدهای شیستی و متاولکانیکی میلونیتی دیده می‌شود. مگنتیت، کانی‌شناسی اصلی این مرحله را تشکیل می‌دهد. مگنتیت‌ها به‌صورت بلورهای درشت نیمه‌خودشکل و خودشکل در اندازه‌هایی تا یک میلی‌متر دیده می شود و غالباً به موازات برگ‌وارگی سنگ هستند. این بلورها، فرآیندهای دگرشکلی، مانند بودین‌شدگی، سایه واتنشی و دور زدن برگ‌وارگی را در اطراف خود نشان می‌دهند (شکل 7- A و B) که بیانگر حضور آنها در سنگ میزبان قبل از فرآیندهای دگرگونی و دگرشکلی است. مرحله دوم کانه‌زایی، اصلی‌ترین مرحله کانه‌زایی در رخداد معدنی لولک‌آباد است. این مرحله از

کانی‌زایی به‌صورت رگه و رگه‌چه‌ای و پس از فرآیندهای دگرگونی و دگرشکلی منطقه تشکیل شده و برگ‌وارگی میلونیتی واحدهای میزبان را قطع کرده است (شکل 7- C و D). این مرحله از کانه‌زایی، با فراوانی اولیژیست به‌همراه میزان کمی پیریت مشخص می‌شود. اولیژیست، معمولاً به‌صورت بلورهای درشت خودشکل تا نیمه‌خودشکل در اندازه تا یک سانتی‌متر دیده می‌شود.



شکل 4. A: گسترش رخ کنگره‌ای و ایجاد برگ‌وارگی میلونیتی (S_2) در واحدهای شیستی منطقه که در اثر چین‌خوردن لایه‌بندی ترکیبی مرحله اول (S_1) حاصل شده است. B و C: پدیده سایه واتنشی به‌صورت رشد بلورهای کوارتز در اطراف مگنتیت (B) و فلدسپات آلکالن (C)، D، E و F: پورفیروکلاست‌های پوششی نوع سیگما از جنس فلدسپات آلکالن (D)، رگه‌های کوارتزی (E) و مگنتیت (F). دورزدن برگ‌وارگی میلونیتی در اطراف پورفیروکلاست‌ها در تصویرهای D و E مشخص است. (Kfs: فلدسپات آلکالن، Mag: مگنتیت، Ms: مسکویت، Qz: کوارتز، S_1: برگ‌وارگی مرحله اول، S_2: برگ‌وارگی مرحله دوم)

Fig. 4. A: Development of crenulation cleavage in schist units along with mylonitic foliation (S_2) that formed from folding of compositional layering of stage-1 (S_1), B and C: Magnetite (B) and alkali feldspar (C) aggregates with quartz strain shadows, D-F: Σ-type feldspar (D), quartz veins (E) and magnetite (F) porphyroclasts. In D and E, mylonitic foliation surrounding the porphyroclasts, All photomicrographs are taken in transmitted light, XPL. (Kfs= alkali feldspar, Mag= magnetite, Ms= muscovite, Qz= quartz, S_1= stage-1 foliation, S_2= stage-2 foliation)



شکل 5. A: بودین‌شدگی در بلورهای کوارتز و فلدسپات. B: بلور فلدسپات آلکالن با ماکل مکانیکی. C: پورفیروکلاست پلاژیوکلاز با بافت ساروجی. همه تصویرها در نور دوبار پلاریزه انکساری گرفته شده‌اند. (Kfs: فلدسپات آلکالن، Mag: مگنتیت، Ms: مسکویت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز)

Fig. 5. A: Boudinage of quartz and feldspar crystals, B: Alkali feldspar with mechanical twining, C: Plagioclase porphyroclast with mortar texture. All photomicrographs are taken in transmitted light, XPL. (Kfs= alkali feldspar, Mag= magnetite, Ms= muscovite, Pl= plagioclase, Qz= quartz)

کانی‌شناسی و ساخت و بافت مواد معدنی و باطله

بررسیهای کانه‌نگاری نشان‌دهنده کانی‌شناسی ساده ماده معدنی در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد است. بر اساس این پژوهشها، اولیژیست و به مقدار کمتر مگنتیت و پیریت کانی‌شناسی اصلی ماده معدنی را تشکیل می‌دهند. گوتیت در اثر پدیده‌های هوازدگی و سوپرژن تشکیل شده است. بررسیهای میکروسکپی انجام شده، نشان می‌دهد که بافت ماده معدنی به‌صورت دانه‌پراکنده، رگه- رگه‌چه‌ای (شکل 8- A، B و C)، برشی (شکل 8- D و E) و پُرکننده فضای خالی (شکل 8- F) است.

اولیژیست

اولیژیست فراوانترین ماده معدنی در لولک‌آباد است. بر اساس بررسیهای میکروسکپی، اولیژیست‌های موجود در بخشهای کانه‌دار به دو شکل دانه‌پراکنده و رگه‌چه‌ای دیده می شود. اولیژیست‌های دانه‌پراکنده به‌صورت بلورهای ناخودشکل تا نیمه‌خودشکل در اندازه‌های 0/2 تا 1 میلی‌متر هستند (شکل 9- A). رگه و رگه‌چه‌های اولیژیستی دارای بلورهای درشت خودشکل تا نیمه‌خودشکل اولیژیست تا اندازه یک سانتی‌متر است و در رگه‌چه‌های اولیژیستی- کلسیتی و یا اولیژیستی-

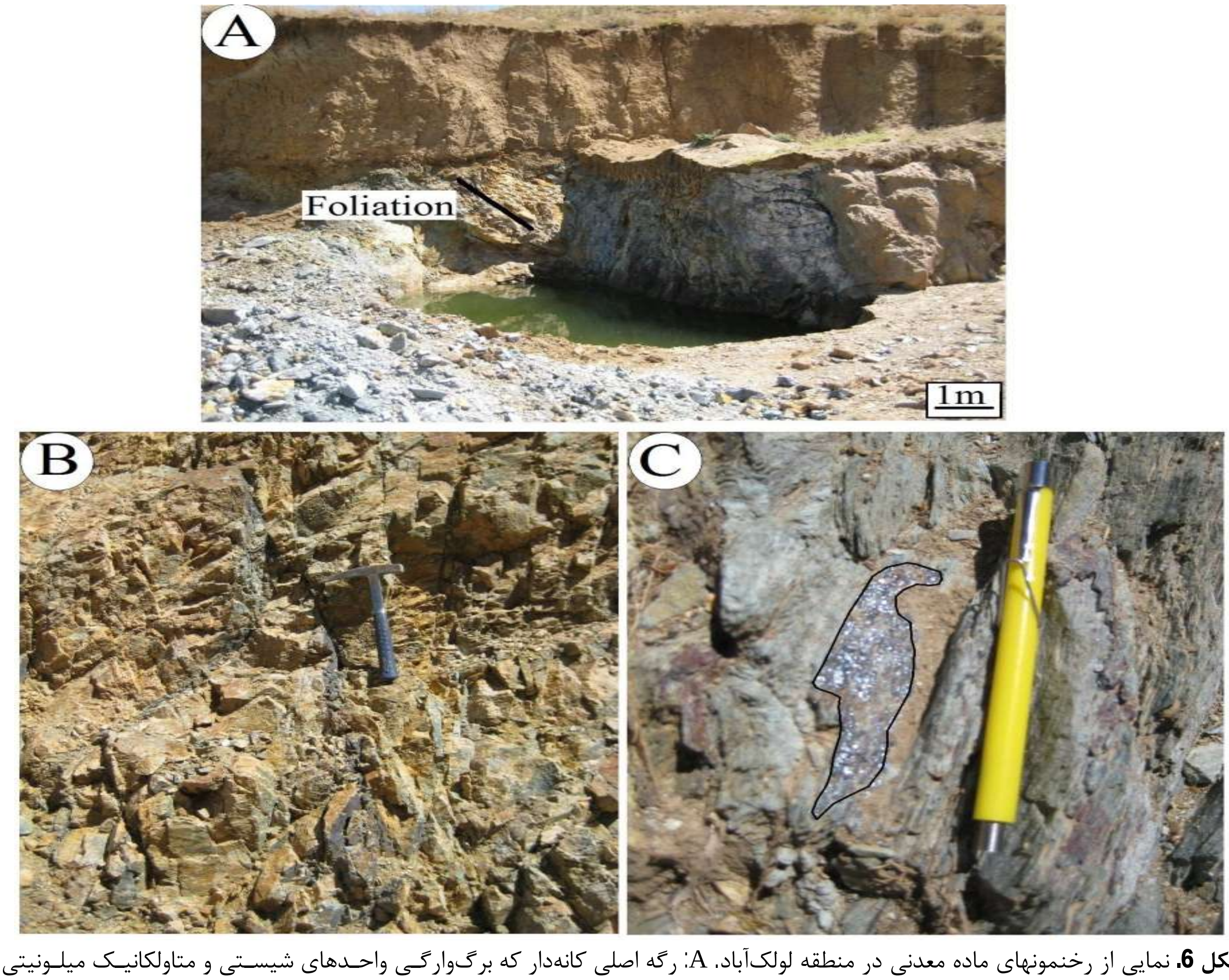
پیریتی دیده می‌شوند (شکل 9- B). رگه‌چه‌های اولیژیستی برگ‌وارگی سنگ را قطع می‌کنند (شکل 7- D).

مگنتیت

مگنتیت‌ها، معمولاً به‌صورت پورفیروکلاست‌های دانه‌پراکنده نیمه‌خودشکل تا خودشکل در اندازه‌های 1 میکرون تا 0/2 میلی‌متر دیده می‌شود و اغلب در امتداد برگ‌وارگی واحدهای دگرگونی دگرشکل‌شده قرار دارند (شکل 9- C). رشد سایه واتنشی بلورهای کوارتز و دور زدن برگ‌وارگی در اطراف این بلورها نشان می‌دهد که آنها قبل از دگرگونی و دگرشکلی در سنگهای میزبان خود حضور داشته‌اند (Spry, 1969; Passchier and Trouw, 1997; Horst et al., 2001; Kontny et al., 2012).

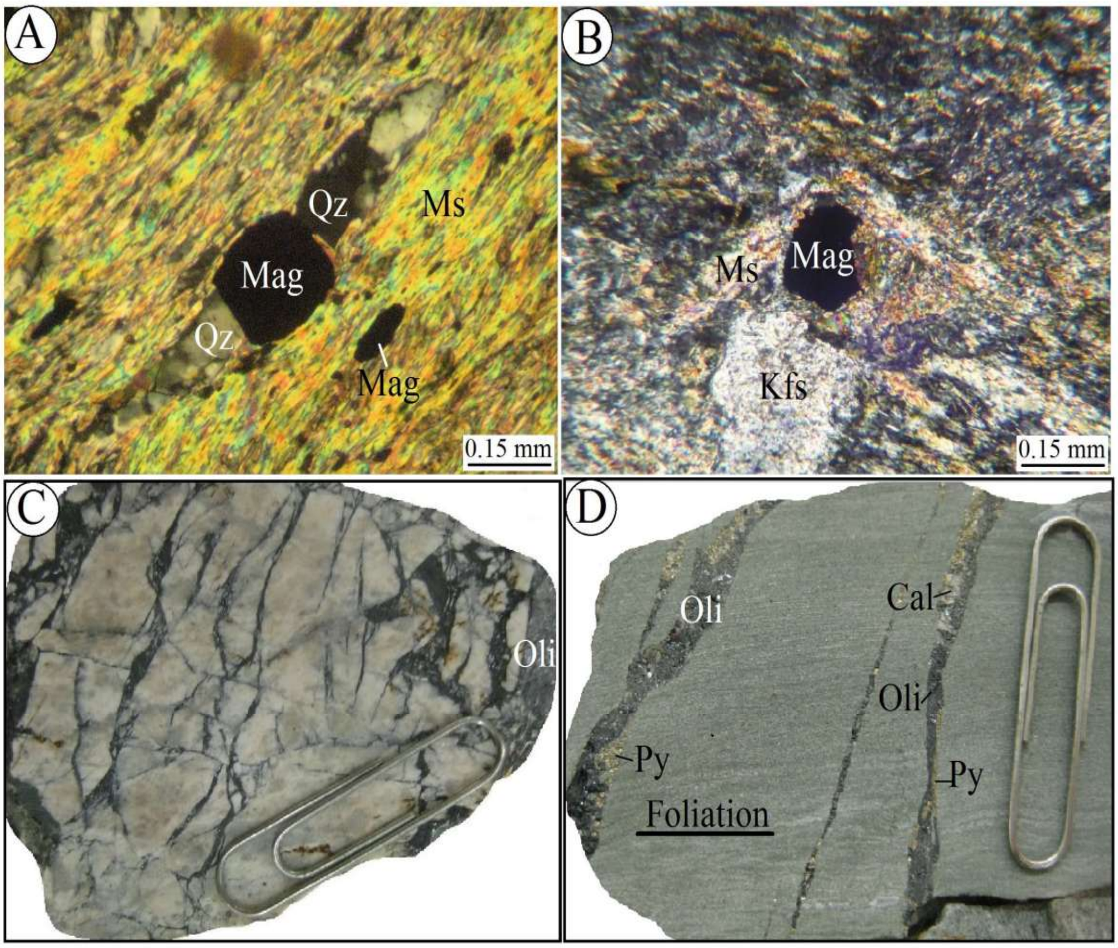
پیریت

پیریت تنها کانی سولفیدی موجود در پهنه‌های کانه‌دار رخداد معدنی لولک‌آباد است. این کانی معمولاً همراه با اولیژیست‌های رگه‌چه‌ای دیده می‌شود و شکل رگه و رگه‌چه‌ای دارند (شکل 9- D و شکلهای 7- D و 8- C). ستبرای رگه‌چه‌های پیریتی از کمتر از 1 میلی‌متر تا نزدیک به 1 سانتی‌متر متغیر است.



شکل 6. نمایی از رخنمونهای ماده معدنی در منطقه لولک‌آباد. A: رگه اصلی کانه‌دار که برگ‌وارگی واحدهای شیستی و متاولکانیک میلونیتی میزبان را قطع کرده است. بخش فوقانی رگه توسط رسوبات عهد حاضر پوشیده شده است (دید به سمت شمال). B: رگه و رگه‌چه‌های اولیژیستی در گرانیت میلونیتی. C: عدسی اولیژیستی به موازات برگ‌وارگی واحدهای متاولکانیکی میلونیتی. عدسی به‌شدت بودین‌شدگی نشان می‌دهد.

Fig. 6. Views of orebody outcropped at the Lulak Abad area. A: The main ore-bearing vein crosscutting the foliation of schist and mylonitic metavolcanic host units. The upper part of the vein is covered by recent alluviums (view to the north), B: Veins and veinlets of oligist in the mylonitic granite, C: Lens-shaped oligist parallel to the mylonitic foliation in mylonitic metavolcanic units. The lens is intensively boudinage.



شکل 7. مراحل کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد. A و B: مرحله اول کانه‌زایی به‌صورت مگنتیت‌های درشت دانه‌پراکنده در راستای برگ‌وارگی میلونیتی. رشد در سایه فشار بلورهای کوارتز در اطراف پورفیروکلاست مگنتیت و ایجاد ساختار سیگما در تصویر A و دور زدن برگ‌وارگی اطراف بلور مگنتیت در تصویر B مشخص است. C و D: مرحله دوم کانه‌زایی به‌صورت رگه- رگه‌چه‌های اولیژیستی در واحد گرانیت میلونیتی (C) و رگه- رگه‌چه‌های اولیژیستی- پیریتی- کلسیتی قطع‌کننده برگ‌وارگی در واحدهای متاولکانیک میلونیتی (D). تصویرهای میکروسکپی در نور دوبار پلاریزه انکساری گرفته شده‌اند. (Cal: کلسیت، Kfs: فلدسپات آلکالن، Mag: مگنتیت، Ms: مسکویت، Oli: اولیژیست، Py: پیریت، Qz: کوارتز)

Fig. 7. Mineralization stages at the Lulak Abad iron occurrence. A and B: Stage-1 mineralization as disseminated coarse-grained magnetites parallel to the mylonitic foliation. In A, the magnetite porphyroclast has quartz pressure shadow creating Σ-type structure, and in B, foliation surrounding the magnetite crystal, C and D: Stage-2 mineralization as oligist vein-veinlets in the mylonitic granite (C) and oligist-pyrite-calcite vein-veinlets crosscutting the foliation in the mylonitic metavolcanic (D). Photomicrographs are taken in transmitted light, XPL. (Cal= calcite, Kfs= alkali feldspar, Mag= magnetite, Ms= muscovite, Oli= oligist, Py= pyrite, Qz= quartz)

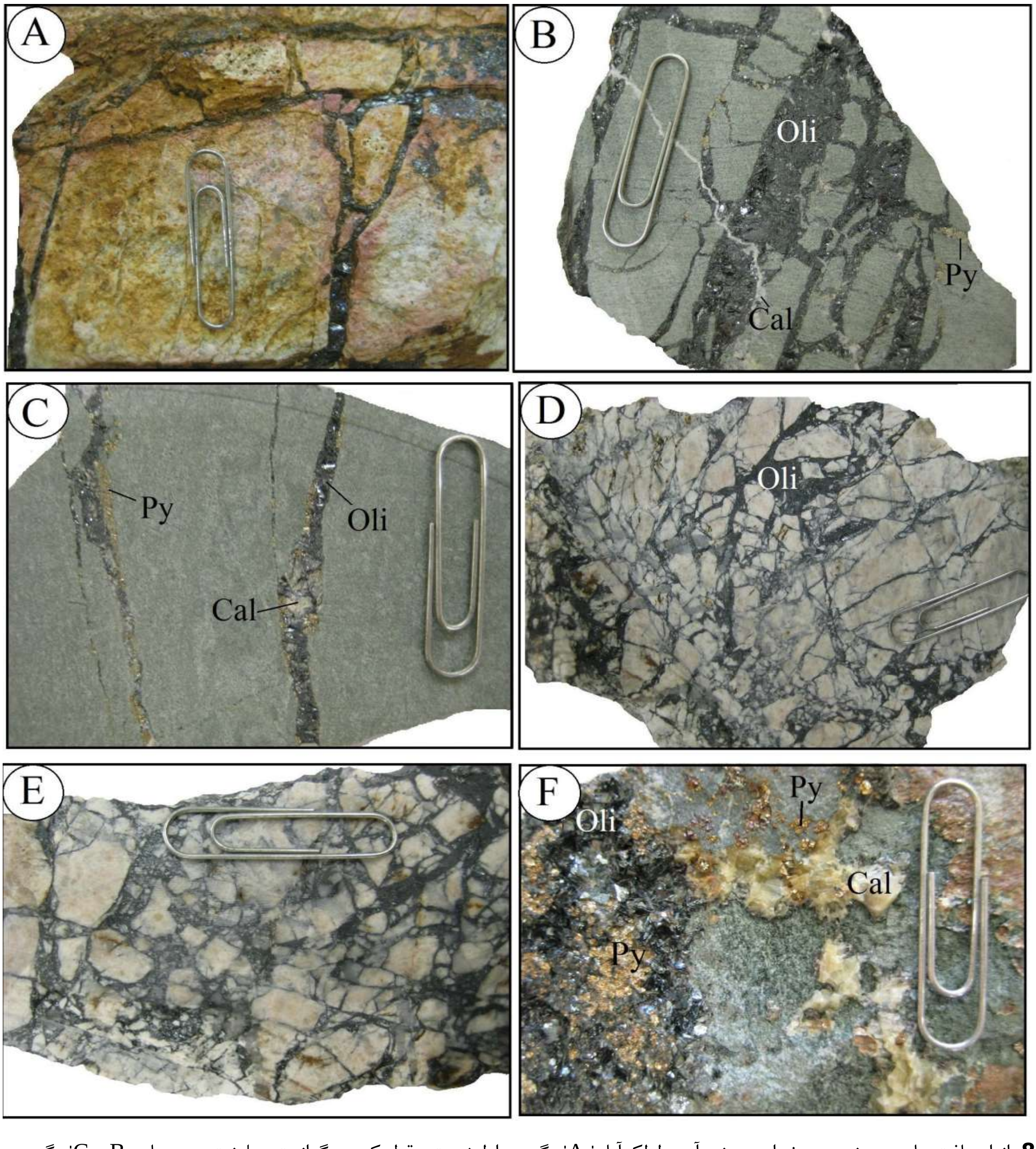
گوتیت

گوتیت حاصل فرآیندهای دگرسانی و سوپرژن کانیهای اولیژیست و پیریت است. این کانی معمولاً در شکستگیهای سنگ دیده می‌شود.

بر اساس بررسیهای میکروسکپی، کوارتز، کلسیت و کلریت مهمترین کانیهای باطله را در رخداد معدنی لولک‌آباد تشکیل می‌دهند. کوارتز معمولاً به‌صورت بلورهای نیمه‌خودشکل تا ناخودشکل با اندازه‌های مختلف در رگه‌های سیلیسی و سیمان بِرش‌ها وجود دارد. کلسیت به‌صورت بلورهای خودشکل تا نیمه‌خودشکل با اندازه‌های مختلف در رگه‌های کلسیتی، سیمان بِرش‌ها و حفرات قابل مشاهده است. گاه رگه‌چه‌های کلسیت، رگه‌چه‌های اولیژیستی- پیریتی موجود را قطع

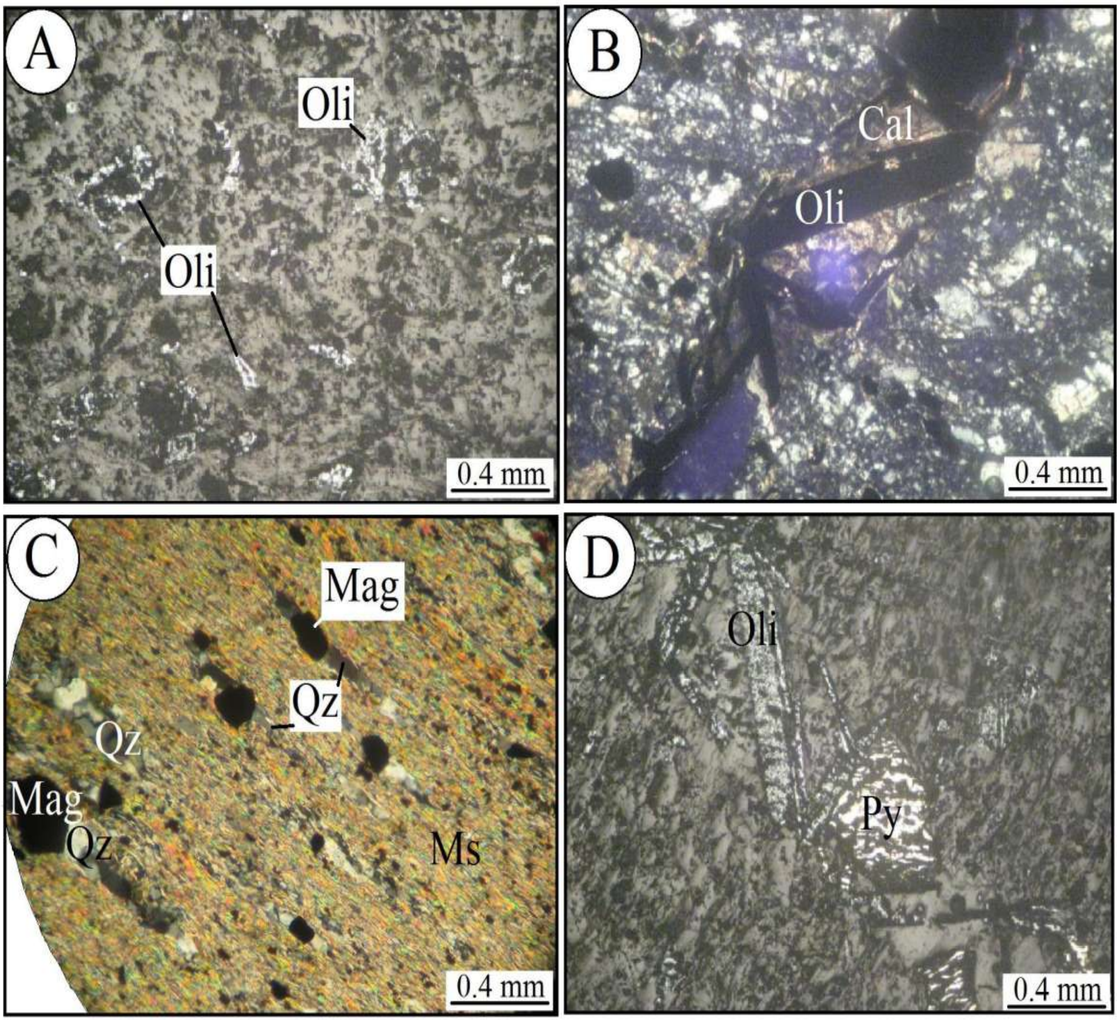
می‌کنند، کلریت به رنگ سبز و قهوه‌ای تیره و با بافت اسفرولیتی در رگه‌چه‌ها و یا حفرات دیده می‌شود.

توالی هم‌یافت کانیها در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد به دو مرحله قابل تقسیم است (شکل 10). مرحله اول با حضور کانی مگنتیت مشخص می‌شود درحالی‌که در مرحله دوم اولیژیست و پیریت تشکیل شده‌اند. گوتیت در مرحله سوپرژن تشکیل شده است.



شکل 8. انواع بافت ماده معدنی در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد: A: رگه‌چه اولیژیستی قطع‌کننده گرانیت میلونیتی میزبان، B و C: رگه‌چه‌های اولیژیستی- پیریتی- کلسیتی در واحدهای متاولکانیکی میلونیتی، D و E: بافت بِرشی و رگه‌چه‌ای ماده معدنی، F: بافت پُرکننده فضای خالی ماده معدنی. (Cal: کلسیت، Oli: اولیژیست، Py: پیریت)

Fig. 8. Types of ore textures at the Lulak Abad iron occurrence. A: Oligist veinlet crosscutting the host mylonitic granite, B and C: Oligist-pyrite-calcite veinlets in the mylonitic metavolcanic units, D and E: Breccia and veinlet textures of ore mineral, F: Open space filling texture of ore mineral. (Cal= calcite, Oli= oligist, Py= pyrite)



شکل 9. انواع ماده معدنی در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد: A: اولیژیست دانه‌پراکنده، B: رگه‌چه اولیژیستی- کلسیتی، C: قرارگیری مگنتیت‌های دانه‌پراکنده در امتداد برگ‌وارگی واحدهای شیستی میزبان. بلورهای مگنتیت دارای رشد سایه واتنشی کوارتزی هستند. D: رگه‌چه‌های اولیژیستی- پیریتی. تصویرهای A و D در نور یک‌بار پلاریزه انعکاسی و تصویرهای B و C در نور دوبار پلاریزه انکساری گرفته شده‌اند. (Cal: کلسیت، Mag: مگنتیت، Ms: مسکویت، Oli: اولیژیست، Py: پیریت، Qz: کوارتز)

Fig. 9. Types of ore minerals at the Lulak Abad iron occurrence. A: Disseminated oligist, B: Oligist-calcite veinlet, C: Disseminated magnetite parallel to the foliation in the host schist units. Magnetite crystals have quartz strain shadow, D: Oligist-pyrite veinlets. A and D are taken in reflected light, PPL, and B and C are taken in transmitted light, XPL. (Cal= calcite, Mag= magnetite, Ms= muscovite, Oli= oligist, Py= pyrite, Qz= quartz)

دگرسانی

دگرسانی گرمابی در رخداد معدنی لولک‌آباد دارای وسعت چندانی نیست و به مناطق سیلیسی، کربناتی (کلسیتی) و کلریتی بخشهای کانه‌دار محدود می‌شود. دگرسانی سیلیسی، به‌صورت رگه‌چه‌ای و درون واحدهای متاولکانیک و گرانیت میلونیتی و یا سیمان بِرشها رخ داده است (شکل 11- A و B). ستبرای رگه‌چه‌های کوارتزی حداکثر به یک سانتی‌متر می‌رسد. در مقطع نازک، بلورهای کوارتز در این رگه‌چه‌ها به‌صورت نیمه‌خودشکل تا ناخودشکل با اندازه‌های مختلف دیده می‌شوند. دگرسانی کربناتی، به‌صورت بلورهای خودشکل تا نیمه‌خودشکل کلسیت با اندازه‌های مختلف در رگه‌های کلسیتی، سیمان بِرش‌ها و حفرات دیده می‌شود (شکل 11- C و D). دگرسانی کلریتی، به‌صورت رگه‌چه‌ای و یا پرکننده حفره‌ها در واحدهای گرانیت میلونیتی و متاولکانیکی رخ داده است. در مقاطع نازک، کلریت به رنگ سبز و قهوه‌ای تیره و با بافت اسفرولیتی دیده می‌شود (شکل 11- E و F).

Mineralogy \ Stages		Stage 1	Stage 2	Supergene
Ore	Magnetite	—		
	Oligist		▬	
	Pyrite		▬	
	Goethite			—
Gangue	Quartz		—	
	Calcite		—	
	Chlorite		—	
Textures	Disseminated	—		
	Lens-shaped	—		
	Brecciated		▬	
	Vein –Veinlet		▬	
	Open space filling		▬	

شکل 10. توالی پاراژنتیک، فراوانی نسبی و ساخت و بافت کانیها برای مواد معدنی و باطله در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد

Fig. 10. Paragenetic scheme showing the relative abundance, structure and texture of gangues and ore minerals at the Lulak Abad iron occurrence

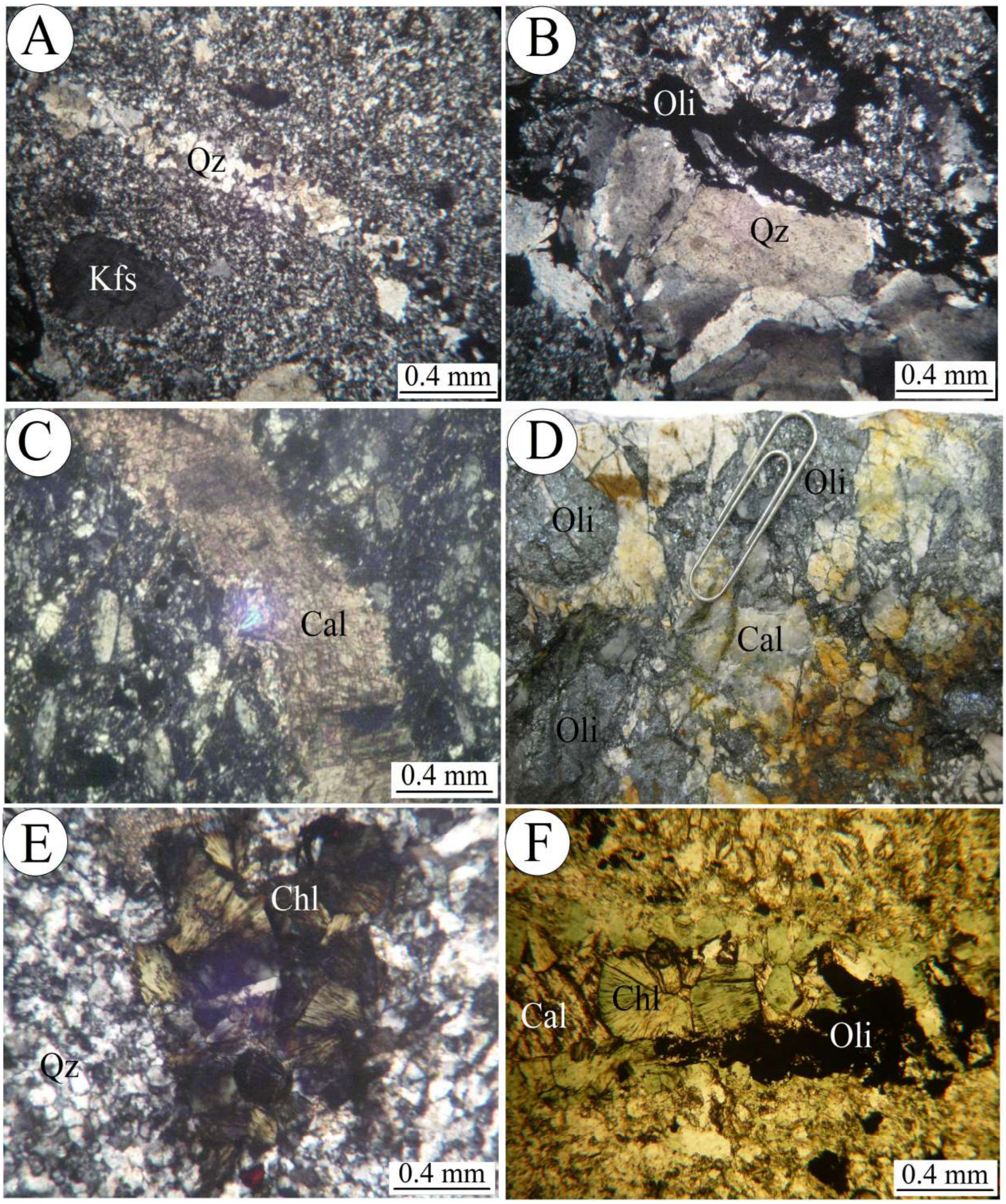
داده‌های زمین‌شیمیایی سنگهای میزبان و زون‌های کانه‌دار

چگونگی توزیع و پراکندگی عناصر مختلف در واحدهای سنگی هر منطقه و ارتباط این عناصر با یکدیگر، یکی از مهمترین جنبه‌هایی است که معمولاً در بررسیهای زمین‌شیمیایی مدنظر قرار می‌گیرد. با استفاده از این روابط، می‌توان به ویژگیهای محیط تشکیل و فرآیندهای مؤثر در شکل‌گیری کانسار پی برد. در این بخش، ویژگیهای ژئوشیمیایی سنگهای میزبان رخداد معدنی آهن لولک‌آباد و بخشهای کانه‌دار آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. هدف از این پژوهشها، تعیین غنی‌شدگی و تهی‌شدگیهای عنصری مرتبط با دگرسانیهای گرمابی در سنگهای میزبان و بخشهای کانه‌دار است. نتایج تجزیه‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های منطقه لولک‌آباد، در جدول 1 آمده است.

ویژگیهای زمین‌شیمیایی سنگهای میزبان

الگوی عناصر نادر خاکی برای یک نمونه از سنگ گرانیتی فاقد کانه‌زایی و یک نمونه از سنگ گرانیتی حاوی رگه و رگه‌چه‌های اولیژیستی در شکل 12- A نشان داده شده است. الگوی این عناصر در دو نمونه مزبور، روندی نسبتاً مشابه دارند. احتمالاً این شباهت مربوط به ماهیت لیتولوژی سنگ گرانیتی است. با وجود این، نمونه گرانیتی شامل رگه و رگه‌چه‌های اولیژیستی، از برخی عناصر نادر خاکی متوسط و عناصر نادر خاکی سنگین (به‌جز Eu، Dy و Er که تهی شده‌اند و Yb که مقدارش تغییر نکرده است)، غنی شده است. چنین رفتاری را می‌توان به فرآیندهای دگرسانی و کانه‌زایی نسبت داد (Lottermoser, 1992; Liegeois et al., 2003). نکته حایز اهمیت در مورد نمونه‌های گرانیتی، میزان نسبتاً پایین محتوای عناصر نادر خاکی آنهاست. میزان پایین محتوای نادر خاکی در گرانیت نشان می‌دهد این گرانیت از یک منشأ با محتوای نادر خاکی پایین حاصل شده است (Wilson, 1989).

الگوی عناصر نادر خاکی در 2 نمونه از واحدهای متاولکانیکی میلونیتی شامل رگه و رگه‌چه‌های اولیژیستی و اولیژیست دانه‌پراکنده در شکل 12- B نشان داده شده است. الگوی عناصر نادر خاکی برای نمونه‌های متاولکانیکی میلونیتی نسبتاً مسطح است. در هر دو نمونه فراوانی عناصر نادر خاکی سبک (به جز La و Nd) تقریباً مشابه است؛ ولی میزان عناصر نادر خاکی سنگین در نمونه حاوی رگه و رگه‌چه‌های اولیژیستی نسبت به نمونه حاوی اولیژیست دانه‌پراکنده، افزایش نشان می‌دهند.



شکل 11. انواع دگرسانی گرمابی در رخداد معدنی لولک‌آباد. A و B: دگرسانی سیلیسی به‌صورت رگه‌چه‌ای (A) و سیمانی شدن گرمابی بِرش‌ها (B) در واحد گرانیت میلونیتی، C و D: دگرسانی کلسیتی به‌صورت رگه‌چه‌ای در واحد متاولکانیک میلونیتی (C) و سیمانی شدن گرمابی بِرش‌ها (D)، E و F: دگرسانی کلریتی به‌صورت پرکننده حفرات (E) و رگه‌چه‌ای (F). تصویرهای A, B, C و E در نور دوبار پلاریزه و تصویر F در نور یک‌بار پلاریزه انکساری گرفته شده‌اند. (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Kfs: فلدسپات آلکالن، Oli: اولیژیست، Qz: کوارتز)

Fig. 11. Types of hydrothermal alteration at the Lulak Abad iron occurrence. A and B: Silica alteration as veinlet (A) and hydrothermally cementation of breccia (B) in the host mylonitic granite, C and D: Calcite alteration as veinlet in the mylonitic metavolcanic unit (C) and hydrothermally cementation of breccia (D), E and F: Chlorite alteration as vug infill (E) and veinlet (F). A, B, C and E are taken in transmitted light, XPL, and F is taken in reflected light, PPL. (Cal= calcite, Chl= chlorite, Kfs=alkali feldspar, Oli= oligist, Qz= quartz)

جدول 1. نتایج آنالیزهای شیمیایی برای واحدهای میکرودیوریتی (نمونه L-01)، متاولکانیک میلونیتی (نمونه‌های L-24 و L-39)، گرانیت میلونیتی (نمونه‌های L-22 و L-40) و بخشهای کانه‌دار (نمونه‌های L-03 و L-43-2) در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد. تمامی داده‌ها بر حسب گرم در تن می‌باشند.

Table 1. Geochemical data of microdiorite (sample L-01), mylonitic metavolcanic (samples L-24 and L-39), mylonitic granite (samples L-22 and L-40) units and ore zones (samples L-03 and L-43-2) from the Lulak Abad iron occurrence. All data in ppm.

Element	As	Ba	Be	Bi	Co	Cr	Rb	Sb	Sr	Ta	Te
L-01	7.3	135.7	1.7	87.4	8.5	68.5	18	22.8	55.9	1.1	1.7
L-03	0.1	18.4	0.2	471.3	131.6	195.6	5.3	39.5	5.2	10.2	9.1
L-22	2.8	327.9	1.1	7.7	1.2	368.9	95.6	15.7	42.9	1.1	0.2
L-24	2.4	40.7	40.7	351.9	21.5	63.6	28.4	25.5	22.1	3.7	6.4
L-39	4.1	134.2	1.4	95.1	11.6	104.8	20.3	19.6	47.2	1.5	1.8
L-40	5.2	48.5	1	219.1	10.6	301.6	16.6	28.4	29.9	3.2	4.4
L-43-2	9.8	23.5	0.4	428.7	204.6	1.5	3.5	38	43.3	5.1	8.1

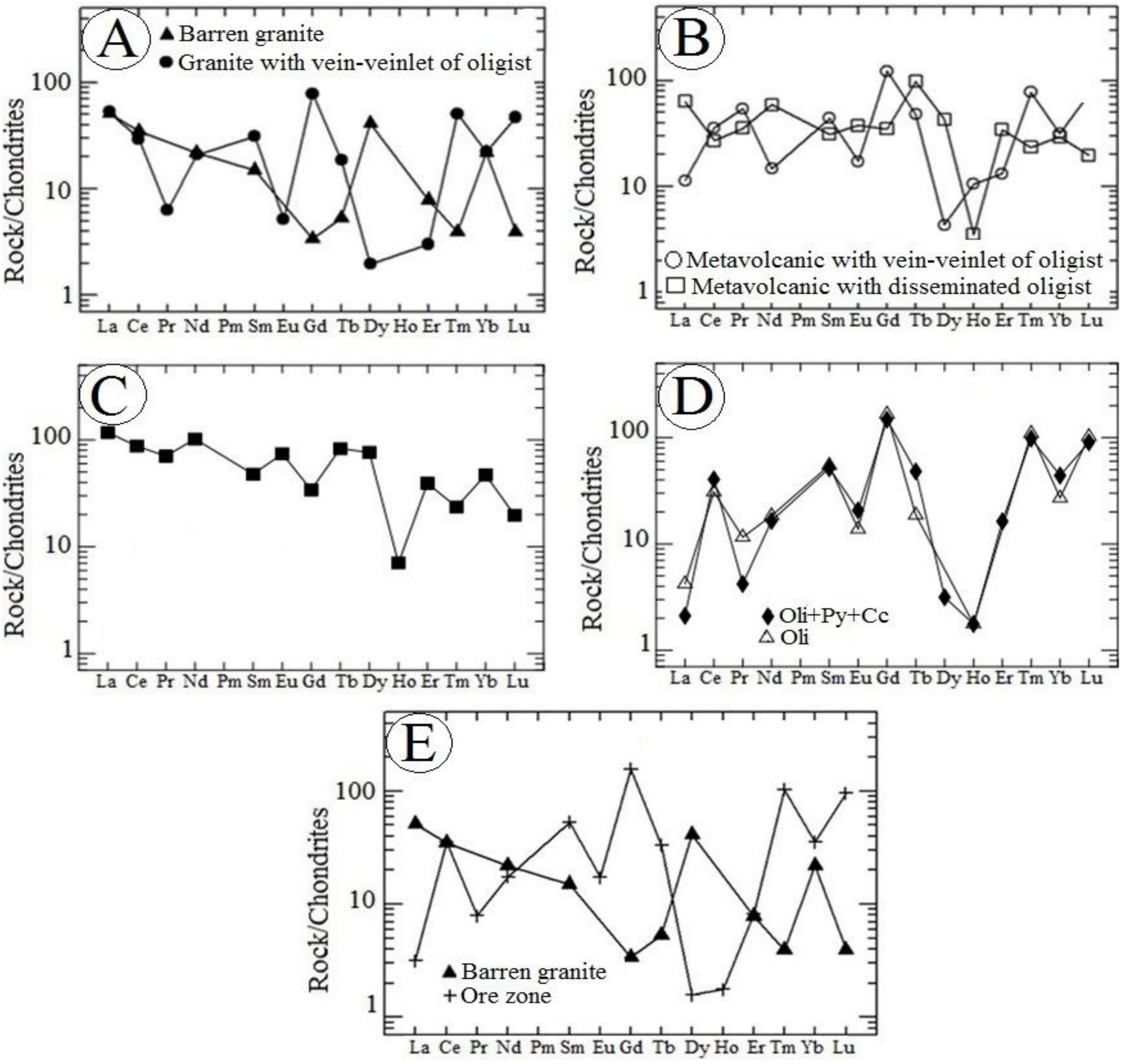
	Ti	Li	Mn	Nb	Ni	P	Pb	Cs	Cu	Ga	Ge
L-01	12235.9	19.1	888.8	7.2	7.2	2297.3	46.1	25.3	2.6	25	3
L-03	103	1.4	166.6	9.5	31.7	139.1	93.4	129.1	3.1	70.5	6.8
L-22	406.2	3.1	50.4	8.6	7.5	52.9	21.1	2.5	4.1	9.2	1.9
L-24	4925.5	8	1774.3	13.1	12.3	1278.7	53.9	93.4	0.9	52.3	7
L-39	14825.2	17.2	521.3	16.1	8.7	4132.6	28.4	25.5	1.6	24.5	1.4
L-40	1222.4	3.9	124.6	30.1	10	115.7	35.1	60.4	3	39.5	3.3
L-43-2	5029.4	3	6652.8	12.3	21/3	211	75.1	117.8	3.6	61.8	12.6

	Hf	Th	Tl	U	Y	V	Zn	Zr	La	Ce	Pr
L-01	13.2	20.5	2.7	2	71	307	78.5	212.4	27.8	53.6	6.7
L-03	2.4	87.1	1.5	0.4	2.2	17.2	199.6	25.7	1	18.9	1.1
L-22	0.1	10.8	2.4	0.1	34.1	4.2	6.3	205.3	12.1	21.5	<0.1
L-24	4.4	60.5	1.3	2.9	18.8	220.6	156.1	79.3	2.7	22	5.2
L-39	12.4	18.9	2.5	0.9	39.2	259.1	106.5	111.6	15.2	16.6	3.4
L-40	0.7	44.7	1.3	<0.1	7.7	324	99	87.7	12.6	12.6	0.6
L-43-2	8.8	75.9	1.9	0.2	23.3	277.8	216.4	23.7	0.5	24.8	0.4

	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
L-01	47.6	7.3	4.3	7	3.1	19.4	0.4	6.5	0.6	8	0.5
L-03	8.6	8.4	0.8	34.2	0.7	<0.5	0.1	<0.1	2.8	4.6	2.6
L-22	10.2	2.3	<0.1	0.7	0.2	10.5	<0.1	1.3	0.1	3.7	0.1
L-24	6.9	6.8	1	25.3	1.8	1.1	0.6	2.2	2	5.4	1.9
L-39	27.6	4.8	2.2	7.2	3.7	11	0.2	5.7	0.6	5	0.5
L-40	9.8	4.8	0.3	16.2	0.7	0.5	<0.1	0.5	1.3	3.8	1.2
L-43-2	7.7	7.9	1.2	30.4	1.8	0.8	0.1	2.7	2.5	7.5	2.3

معمولاً در مراحل اولیه دگرسانی، لانتانیدهای سبک مانند La و Nd آنومالی مثبتی را نشان می‌دهند اما با پیشرفت دگرسانی و کانه‌زایی، مقدار این عناصر کاهش یافته و آنومالی منفی، نشان می‌دهند. عناصر نادر خاکی سبک در مراحل اولیه

دگرسانی و تشکیل اولیژیست دانه‌پراکنده در نمونه متاولکانیک میلونیتی نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین، غنی‌شدگی نشان می‌دهند؛ ولی با پیشرفت دگرسانی و تشکیل رگه و رگچه‌های اولیژیستی، عناصر نادر خاکی سبک توسط سیالات گرمابی از محیط شسته شده و عناصر نادر خاکی سنگین در این نمونه غنی شده‌اند. غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سنگین در نمونه شامل رگه و رگچه‌های اولیژیستی می‌تواند در ارتباط با مقدار بالای Mn و Ti در نمونه مزبور باشد. معمولاً با پیشرفت دگرسانی و کانه‌زایی، عناصر نادر خاکی سبک توسط محلولهای گرمابی از محیط خارج می‌شوند و این امر سبب غنی‌شدگی سنگها از عناصر نادر خاکی سنگین می‌شود (Lottermoser, 1992). بنابراین غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سنگین در نمونه شامل رگه و رگچه‌های اولیژیستی را می‌توان به دگرسانی سیلیسی بخشهای کانه‌دار ارتباط داد. به عقیده تراکادو و فوجیتانی (Terakado and Fujitani, 1998) در سیالات گرمابی، لانتانیدهای سنگین با سیلیکات ترکیب شده و به شدت در بخشهای سیلیسی حفظ می‌شوند.



شکل 12. الگوهای عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) برای گرانیت میلونیتی (A و C)، متاولکانیک‌های میلونیتی (B)، میکرودیوریت (C) و ماده معدنی (D و E) در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد

Fig. 12. Chondrite–normalized REE patterns (Sun and McDonough, 1989) for the mylonitic granite (A and C), mylonitic metavolcanics (B), microdiorite (C) and ore mineral (D and E) at the Lulak Abad iron occurrence

آنومـالی منفـی Eu در نمونـه حـاوی رگـه و رگـه‌چـه‌های اولیژیستی، نقش فرآیندهای دگرسانی گرمابی و خـروج Eu از محیط، توسط کمپلکس‌ها و شرایط اکسیدان سیال کانه‌سـاز را نشـان می‌دهـد (Parak, 1985; Whitford et al., 1988; Dokuz et al., 2005; Wang et al., 2006). در واقع، درجه آنومالی منفی Eu بـا پیشـرفت دگرسـانی بـه تـدریج افـزایش می‌یابد (Kikawada et al., 2001). این امـر سـبب آنومـالی منفی Eu در نمونه حاوی رگه و رگه‌چه‌های اولیژیسـتی شـده است.

ویژگیهای زمین‌شیمیایی واحد میکرودیوریتی

الگوی عناصر نادر خاکی برای واحد میکرودیـوریتی منطقـه در شکل 12- C نشان داده شده است. الگوی این عناصر در واحد میکرودیوریت، دارای شیب منفی ملایـم و غنی‌شـدگی عناصـر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین اسـت. بـا توجـه بـه ایـن‌کـه واحـد میکرودیـوریتی، بعـد از رخدادهـای دگرگونی و دگرشکلی در منطقه نفوذ کرده است؛ بدین‌وسـیله می‌توان گفت الگوی عناصر نادر خـاکی در ایـن واحـد، همـان الگوی مربوط به ترکیب اولیه عناصر نادر خاکی در ایـن سـنگ است. بنـابراین آنومـالی مثبـت ضـعیف Eu مشـاهده شـده در نمونـه میکرودیـوریتی را می‌تـوان بـه فروانـی نسـبتاً بـالای پلاژیوکلاز در این سنگ و تجمـع Eu در پلاژیوکلازهـا نسـبت داد (Rollinson, 1993). با توجه به الگوی عناصر نادر خـاکی در میکرودیوریـت مـی‌تـوان گفـت کـه مـذاب اولیـه‌ای کـه میکرودیوریت از آن تشکیل شـده اسـت، تحـت‌تـأثیر سـیالات گرمابی بعدی که عناصر نـادر خـاکی کمتـری داشـته‌اند، قـرار نگرفته است.

ویژگیهای زمین‌شیمیایی بخشهای کانه‌دار

الگوی عناصر نادر خـاکی بـرای 2 نمونـه از بخشـهای کانـه‌دار شامل اولیژیست خالص و رگه اولیژیستی- پیریتـی- کلسـیتی در شکل 12- D نشان داده شده است. بـر اسـاس ایـن شـکل، نمودار هر دو نمونه، تقریباً رونـد مشـابهی دارد و دارای شـیب مثبت و غنی‌شدگی عناصر نادر خـاکی سـنگین (بـه‌جـز Dy و Ho) نسبت به عناصر نادر خاکی سبک است. چنین رفتاری در الگوی عناصر نادر خـاکی مـی‌توانـد در ارتبـاط بـا فرآینـدهای دگرسـانی و کانـه‌زایی درنظـر گرفتـه شـود (Lottermoser, 1992; Liegeois et al., 2003). معمولاً عناصر نـادر خـاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین، بیشـتر بـا سـیالات گرمـابی شسـته می‌شـوند (Kikawada et al., 2001). غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سنگین نسـبت بـه عناصـر نـادر خاکی سبک در نمونه حـاوی اولیژیسـت خـالص، می‌توانـد در ارتباط با مقدار بالای Ti و Mn در ایـن نمونـه باشـد؛ ولـی بـا پیشرفت دگرسانی که با تشکیل رگه‌چه‌های پیریتی- کلسیتی همراه است، عناصر نادر خاکی سبک از محیط شسته می‌شـود و نسـبت بـه عناصـر نـادر خـاکی سـنگین تهی‌شـدگی نشـان می‌دهند. در هر دو نمونه کانـه‌دار، عنصـر Ce آنومـالی مثبـت نشان می‌دهد. سریم علاوه‌بر ظرفیت 3، می‌تواند دارای ظرفیت 4 نیز باشد. Ce^{+3} در محیطهای اکسـیدی بـه‌راحتی بـه Ce^{4+} اکسید و از طریق جذب سطحی توسط هیـدرولیزات‌ها و ذرات معلق در محیط ته‌نشسـت مـی‌شـود (Spangenberg et al., 1999). آنومالی‌های مثبت سریم در بخشهای کانـه‌دار منطقـه احتمالاً مرتبط با فرآیندهای دگرسانی گرمابی است (Appel, 1983; Bau, 1991; Lottermoser, 1992). آنومالی منفـی Euنیز تـأثیر فرآینـدهـای دگرسـانی گرمـابی و خـروج آن از محیط توسط کمپلکس‌ها و شرایط اکسیدان سیال کانه‌سـاز را نشـان می‌دهـد (Parak, 1985; Whitford et al., 1988; Dokuz et al., 2005; Wang et al., 2006).

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در زون‌های کانه‌دار

برای بررسی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر طی کانه‌زایـی در رخداد معدنی لولک‌آباد، میانگین داده‌های مربوط به نمونه‌هـای کانه‌دار بر داده‌های مربوط به نمونه گرانیتـی فاقـد کانـه‌زایـی، به‌هنجار شد تا عناصـر اضـافه و یـا کـم‌شـده بـه سـنگ طـی کانه‌زایی مشخص شود. لازم به ذکر است که ایـن روش کیفـی بوده و برای تعیـین میـزان کمـی تهـی‌شـدگی و غنـی‌شـدگی عناصر، نیاز به محاسبات موازنه جرم است که در ایـن پـژوهش انجام نشده است. بررسی الگوی عناصر نادر خاکی در بخشهای کانه‌دار که نسبت به گرانیت فاقد کانه‌زایی به‌هنجـار شـده‌انـد، نشان می‌دهد که اغلب عناصر نادر خاکی سبک (بـه‌جـز Pr) و برخی از عناصـر نـادر خـاکی سـنگین (ماننـد Dy, Ho, Er و Yb) در بخشهای کانه‌دار نسبت به گرانیت فاقد کانه‌زایی تهی شده‌اند. در مقایسه با نمونه گرانیتی فاقد کانه‌زایـی، بخشـهای کانه‌دار از عناصر Eu, Gd, Tm و Lu غنی شده‌اند.

مقایسه الگوی عناصر نادر خاکی در گرانیت فاقد کانه‌زایی و بخشهای کانه‌دار که نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) به‌هنجار شده‌اند (شکل 12- E) نشان می‌دهد که بخشهای کانه‌دار در مقایسه با گرانیت فاقد کانه‌زایی، از عناصر نادر خاکی سبک (به جز Sm) تهی شده‌اند. با وجود این، هیچ‌گونه تفاوتی در میزان Ce برای این بخشها و گرانیت میزبان فاقد کانه‌زایی دیده نمی‌شود. بر پایه این الگوها مقدار اغلب عناصر نادر خاکی سنگین (به‌جز Dy و Ho که تهی شده‌اند و Er که مقدارش تغییر نکرده است) در بخشهای کانه‌دار افزایش یافته است. کاهش در مقدار عناصر نادر خاکی سبک، در بخشهای کانه‌دار در رخداد معدنی لولک‌آباد نشان می‌دهد که حجم و یا ژئوشیمی سیالات گرمابی برای تحرک این عناصر کافی و مناسب بوده و بیانگر میزان بالای واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ میزبان است.

تیپ و خاستگاه کانه‌زایی آهن در رخداد معدنی لولک‌آباد

بررسیهای انجام‌شده در این پژوهش و همچنین مقایسه ویژگیهای زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی در رخداد معدنی لولک‌آباد با نوعهای مختلف کانسارهای آهن نشان می‌دهد؛ که کانه‌زایی آهن در رخداد معدنی لولک‌آباد در ابتدا به‌صورت آتشفشانی- رسوبی تشکیل شده و سپس به‌صورت رگه‌ای (Tong et al., 2009; Rostami Paydar et al., 2010; Rajabzadeh and Asadi, 2010; Rajabzadeh et al., 2012; Karami et al., 2012; Karami et al., 2013) تمرکز دوباره یافته است.

بر اساس بررسیهای صحرایی، میکروسکپی و زمین‌شیمیایی، مراحل تکوین و تکامل این رخداد معدنی را می‌توان در 5 مرحله به شرح زیر خلاصه کرد (شکل 13):

مرحله اول: این مرحله با تشکیل توالیهای آتشفشانی- رسوبی منطقه همراه است (شکل 13- A). در این مرحله کانه‌زایی آهن به‌عنوان یک پتانسیل اولیه و به‌صورت مگنتیت‌های دانه‌پراکنده و عدسی‌شکل چینه‌سان و چینه‌کران از نوع آتشفشانی- برون‌دمی هم‌زمان با توالیهای سنگی میزبان تشکیل شده است.

مرحله دوم: در این مرحله، مجموعه‌های سنگی منطقه تحت‌تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای قرار گرفته و در حد رخساره شیست سبز دگرگون شده‌اند (شکل 13- B). دور زدن کانیهای میکایی در اطراف بلورهای مگنتیت دانه‌پراکنده نشان می‌دهد؛ که این مگنتیت‌ها قبل از دگرگونی در واحدهای میزبان خود وجود داشته‌اند. در پایان این مرحله، ماگمای گرانیتی داخل واحدهای دگرگون‌شده منطقه، نفوذ کرده است (شکل 13- C). عدم دگرگونی سنگهای گرانیتی تأیید کننده این مطلب است.

مرحله سوم: در این مرحله، واحدهای دگرگونی و توده گرانیتی منطقه تحت‌تأثیر فرآیندهای دگرشکلی (دگرشکلی شکل‌پذیر) در حد پروتومیلونیت و میلونیت دگرشکل شده و ساختارها و فابریک‌های متفاوتی در آنها تشکیل شده است (شکل 13- D). وجود شواهدی از قبیل فابریک‌های C/S، پورفیروکلاست پوششی نوع سیگما، رشد در سایه واتنشی، ساختار بودین‌شدگی و ... در مواد معدنی و کانیهای سنگ‌ساز این مطلب را تأیید می‌کند.

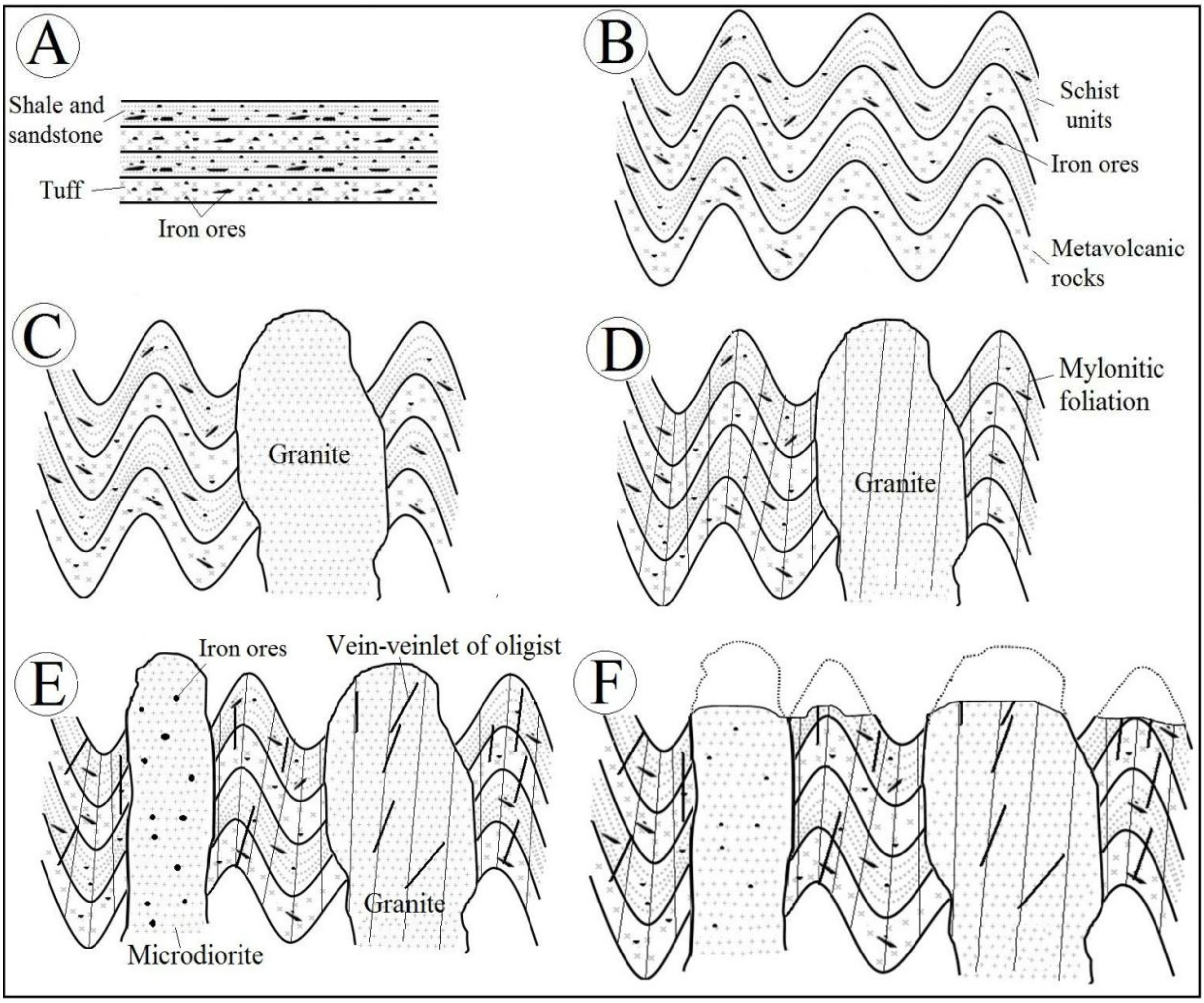
مرحله چهارم: این مرحله با بالاآمدگی ناحیه‌ای و تبدیل دگرشکلی شکل‌پذیر به دگرشکلی شکنا و نفوذ ماگمای میکرودیوریتی درون واحدهای سنگی منطقه همراه است (شکل 13- E). نبود آثار دگرشکلی و دگرگونی در واحد میکرودیوریتی، بیانگر نفوذ آن پس از فرآیندهای دگرگونی و دگرشکلی (دگرشکلی شکل‌پذیر) در منطقه است. ماگمای ایجادکننده میکرودیوریت به‌عنوان یک موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش آبهای جوی در منطقه شده است. این آبها علاوه‌بر توسعه زون‌های دگرسانی در منطقه، سبب شسته‌شدن ماده معدنی از سنگهای مسیر و تمرکز مجدد آنها به‌صورت رگه و رگه‌چه‌ای در واحدهای دگرگونی و دگرشکلی شده است. رگه و رگه‌چه‌های مزبور، برگوارگی میلونیتی سنگهای میزبان خود را قطع کرده‌اند. وجود مگنتیت‌های دانه‌پراکنده در سنگهای میکرودیوریتی نشان می‌دهد که بخشی از ماده معدنی و احتمالاً بخشی از سیالات گرمابی از ماگمای ایجادکننده این سنگها منشأ گرفته است.

مرحله پنجم: این مرحله با بالاآمدگی ناحیه و توسعه فرآیندهای هوازدگی و فرسایش همراه است (شکل 13- F).

نتیجه‌گیری

شواهدی مانند مشاهدات صحرایی، ساخت و بافت، سنگ میزبان، هم‌یافت، زمین‌شیمی و دگرسانیهای تشکیل‌شده در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد، نشان می‌دهد که این رخداد معدنی از نوع کانسارهای آهن تیپ آتشفشانی- رسوبی

دگرگون و دگرشکل‌شده است. بررسیهای انجام‌شده طی سالهای گذشته در منطقه شمال‌باختر کشور به شناسایی کانه‌زاییها و آنومالی‌های بسیاری از کانسارهای آهن با منشأ آتشفشانی- رسوبی در این منطقه از ایران منجر شده است. از آن‌جایی‌که اغلب این کانه‌زاییها در واحدهای آتشفشانی- رسوبی دگرگون شده (معادل سازند کهر) قرار دارند، به‌نظر می‌رسد این مجموعه‌های سنگی از نظر اکتشاف آهن دارای اهمیت بالایی هستند. بررسی این واحدهای سنگی در منطقه و تعمیم شواهد به‌دست آمده از آنها به مناطق مشابه در زون ایران مرکزی، می‌تواند به شناسایی این نوع از کانسارهای آهن منجر شود.



شکل 13. نمایی شماتیک از مراحل تکامل کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن لولک‌آباد. A: کانه‌زایی آهن به‌صورت دانه‌پراکنده و عدسی‌شکل از نوع آتشفشانی- برون‌دمی هم‌زمان با تشکیل واحدهای میزبان. B: دگرگون‌شدن واحدهای میزبان و کانه‌زایی همراه آن تا حد رخساره شیست سبز. C: پس از دگرگونی، ماگمای گرانیتی داخل واحدهای دگرگون‌شده نفوذ کرده است. D: دگرشکلی شکل‌پذیر و گسترش برگ‌وارگی میلونیتی در واحدهای سنگی. E: نفوذ توده میکرودیوریتی هم‌زمان با رخدادهای دگرشکلی شکنا. این امر سبب چرخش آبهای جوی و تشکیل کانه‌زایی آهن به‌صورت رگه و رگه‌چه‌های قطع‌کننده برگ‌وارگی میلونیتی در واحدهای میزبان شده است. F: بالاآمدگی ناحیه و توسعه فرآیندهای هوازدگی و فرسایش

Fig. 13. Schematic representation of mineralization evolution stages at the Lulak Abad iron occurrence. A: Volcano-exhalative disseminated and lens-shaped iron mineralization coeval with the host units, B: The host units and accompanied mineralization were metamorphosed to green-schist facies, C: Post metamorphism granitic magma intruded into the metamorphosed units, D: Ductile deformation and development of mylonitic foliation in the rock units, E: Intrusion of microdioritic body coeval with brittle deformation events. This event caused circulation of meteoric waters and formation of iron mineralization as veins and veinlets crosscutting the mylonitic foliation of host units, F: Regional exhumation and development of weathering and erosion processes

قدردانی

نویسندگان، از حمایتهای مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و همچنین از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی اقتصادی، برای راهنماییهای علمی که به غنای بیشتر این پژوهش منجر شد، سپاس‌گزاری می‌کنند.

References

Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnant in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103(8): 983–992.

Appel, P.W.U., 1983. Rare earth element in the early Archaean Isua iron-formation, west Greenland. Precambrian Research, 20(2–4): 243–258.

Babakhani, A. and Sadeghi, A., 2004. Geological map of Zanjan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.

Barker, A.J., 1990. An introduction to metamorphic textures and microstructures. Oxford University press, London, 209 pp.

Bau, M., 1991. Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. Chemical Geology, 93(3): 219–230.

Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S. and Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. Chemical Geology, 281(3–4): 253–269.

Daliran, F., 1990. The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, east-central Iran, An alkali rhyolite hosted, "Kiruna type" occurrence in the Infracambrian Bafg Metallotect (Mineralogic, petrographic and geochemical study of the ores and the host rocks). Ph.D. Thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 248 pp.

Daliran, F., 2002. Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatitites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites. In: T.M. Porter (Editor), Hydrothermal Iron oxide copper-gold and related deposits, a global perspective. Porter GeoConsultancy publishing, Adelaide, Australia, pp. 303–320.

Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P. 2007. Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and “apatitites” of the Bafq district, central-east Iran. Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting, Trinity College, Dublin, Ireland.

Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P., 2009. A review of the early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apatite deposits (IOA) of the Bafq district, Iran. Proceedings of the 10th Biennial SGA Meeting, James Cook University, Townsville, Australia.

Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P., 2010. Lower Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran. In: L. Corriveau and A.H. Mumin (Editors), Exploring for iron oxide copper-gold deposits. Geological Association of Canada, Toronto, pp. 143–155.

Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996. Structural geology of rocks and regions. John Wiley & Sons, New York, 776 pp.

Dokuz, A., Tanyolu, E. and Genc, S., 2005. A mantle and a lower crust derived bimodal suite in the Yusufeli Artvin area, NE Turkey: Trace element and REE evidence for subduction–related rift origin of early Jurasic Demirkent intrusive complex. International Journal of Earth Sciences, 95(3): 370–394.

Ghorbani, M., 2007. Economic geology, mineral deposit and natural resources of Iran. Arian Zamin, Tehran, 492 pp (in Persian).

Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Gary, J., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A.K. and Walker, J.D., 2008. U–Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement. Tectonophysics, 451(1–4): 71–96.

Horst, Q., Rosiere, C.A., Heinrich, S., Brokmeier, H.G. and Janson, E.M., 2001. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. Journal of Structural Geology, 23(9): 1429–1440.

Jami, M., 2006. Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq area, Central Iran. Ph.D. Thesis,

University of New South Wales, New South Wales, Australia, 355 pp.

Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran. Economic Geology, 102(6): 1111–1128.

Karami, M., Ebrahimi, M. and Kouhestani, H., 2012. Geological and mineralization characteristics of Lulak Abad iron occurrence, east of Mahneshan. 31th Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian with English abstract).

Karami, M., Kouhestani, H. and Ebrahimi, M., 2013. Mineralogy, structure, texture and type of iron mineralization in Lulak Abad occurrence, east of Mahneshan. 1st International Conference on Mining, Mineral Processing, Metallurgical and Environmental Engineering. University of Zanjan, Zanjan, Iran (in Persian with English abstract).

Kikawada, Y., Ossaka, T., Oi, T. and Honda, T., 2001. Experimental studies on the mobility of lanthanides accompanying alteration of andesite by acidic hot spring water. Chemical Geology, 176(1–4): 137–149.

Kontny, A., Engelmann, R., Grimmer, J.C., Greiling, R.O. and Hirt, A., 2012. Magnetic fabric development in a highly anisotropic magnetite-bearing ductile shear zone (Seve Nappe Complex, Scandinavian Caledonides). International Journal of Earth Sciences, 101(3): 671–692.

Liegeois, J.P., Latouche, L., Boughrara, M., Navez, J. and Guiraud, M., 2003. The Latea metacraton (Central Hoggar, Tuareg shield, Algeria): behaviour of an old passive margin during the Pan-African orogeny. Journal of African Earth Sciences, 37(3–4): 161–190.

Lotfi, M., 2001. Geological map of Mahneshan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.

Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. Ore Geology Reviews, 7(1): 25–41.

Mohajjel, M., 1997. Structure and tectonic evolution of Paleozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia. 230 pp.

Moore, F. and Modabberi, S., 2003. Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran: new isotopic and geochemical evidence. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 14(3): 259–269.

Parak, T., 1985. Phosphorus in different type of ore, sulfides in the iron deposits, and the type and origin of ores at Kiruna. Economic Geology, 80(3): 646–665.

Passchier, C.W. and Simpson, C., 1986. Porphyroclast systems as kinematic indicators. Journal of Structural Geology, 8(8): 831–844.

Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1997. Micro-tectonics. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 289.

Platt, J.P., 1984. Secondary cleavages in ductile shear zones. Journal of Structural Geology, 6(6): 439– 442.

Rajabzadeh, M.A. and Asadi, S., 2010. Mineralization study on iron ores from Qatruyeh area, northeast Neyriz, Sanandaj-Sirjan zone: using hydrothermal alteration evidences and fluid inclusion studies. Journal of Petrology, 1(1): 67–86 (in Persian with English abstract).

Rajabzadeh, M.A, Parvin, S., Moosavi Nasab, Z. and Shamsipour Dehkordi, R., 2012. Investigation of the origin of Heneshk hematitic iron deposit, Fars province: using petrological, mineralogical and geochemical data. Journal of Petrology, 3(11): 19–38 (in Persian with English abstract).

Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, London, 352 pp.

Rostami Paydar, G., Amiri, A., Lotfi, M. and Ghaderi, M., 2010. Geochemical investigation and origin of Gelali iron deposit (west of Hamadan, Iran). 1st Symposium of Iranian society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (in Persian with English abstract).

Spangenberg, J.E., Lavric, J.V., Alcala, C., Gosar, M., Dold, B. and Pfeifer, H.P., 1999. Inorganic and organic geochemical patterns of waste material from the Idrija mercury mine (Slovenia): tracers of natural and anthropogenic chemicals. Proceedings of the 5th Biennial SGA Meeting and 10th Quadrennial IAGOD Symposium, Balkema, London, England.

Spry, A., 1969. Metamorphic textures. Pergamon Press, London, 350 pp.

Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry

(Editors), Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London, London, pp. 313–345.

Terakado, Y. and Fujitani, T., 1998. Behavior of the rare earth elements and other trace elements during interactions between acidic hydrothermal solutions and silicic volcanic rocks, southwestern Japan. Geochimica et Cosmochimica Acta, 62(11): 1903–1917.

Tong, H., Zhaochong, Z., Yangsong, D. and Shunting, L., 2009. Geology of the Gushan iron oxide deposit associated with dioritic porphyries, eastern Yangtze Craton, SE China. International Geology Reviews, 51(6): 520–541.

Torab, F.M. and Lehmann, B., 2006. Iron oxide-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: an overview from geology to mining. World of Mining-Surface and Underground, 58(6): 355–362.

Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F, Zhao, Z.H., Jian, P., Xiong, X.L., Bao, Z.W., Li, C.F. and Bai, Z.H., 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. Lithos, 89(3–4): 424–446.

Whitford, D.J., Korsch, M.J., Porritt, P.M. and Craven, S.J., 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. Chemical Geology, 68(1–2): 105–119.

Wilson, M., 1989. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach. Unwin Hyman, London, 446 pp.

Zamin Gostar Company, 2007. Primary iron exploration project at Lulak Abad area, Industry, Mine and Trade Organization, Zanjan, 32 pp.

Zhou, Y. and Wang, Z., 1999. Altered ductile shear zone host type of gold deposits from south China: a case study. Journal of Geosciences of China, 1(1): 23–38.

Journal of Economic Geology
Vol. 8, No. 1 (2016)
ISSN 2008-7306

مجله زمین‌شناسی اقتصادی
جلد 8، شماره 1 (سال 1395)
صفحات 11 و 12

Lulak Abad Iron Occurrence, Northwest of Zanjan: Metamorphosed and Deformed Volcano-Sedimentary Type of Mineralization in Central Iran

Mehri Karami, Mohammad Ebrahimi and Hossein Kouhestani*

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Submitted: May 22, 2014
Accepted: Apr. 8, 2015

Keywords: *Iron mineralization, hydrothermal vein, alteration, Lulak Abad, Zanjan, Central Iran*

Introduction

The Lulak Abad iron occurrence is located in the northwestern part of the Central Iran, 55 km west of Zanjan. Mineralization at the Lulak Abad area was originally identified by Zamin Gostar Company (2007), during a geophysical exploration. The present paper provides an overview of the geological framework, the mineralization characteristics, and the results of a geochemical study of the Lulak Abad iron occurrence with an application to the ore genesis. Identification of these characteristics can be used as a model for exploration of this type of iron mineralization in the Central Iran and elsewhere.

Materials and methods

Detailed field work was carried out at different scales (give scales in parentheses) in the Lulak Abad area. About 16 polished thin and thin sections from host rocks and mineralized and altered zones were studied by conventional petrographic and mineralogical methods at the Department of Geology, University of Zanjan. In addition, a total of 7 samples from ore zones at the Lulak Abad occurrence were analyzed by ICP-OES for minor and trace elements and REE compositions at Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.

Result

Rock units exposed in the Lulak Abad area consist of schists and metavolcanic units the Kahar Formation; Lotfi, 2001) that were intruded by granite and microdiorite bodies. The schist units consist of chlorite-biotite-muscovite schist and muscovite schist that show granolepidoblastic texture with foliation-parallel disseminated magnetite. The metavolcanic units consist of metadacite, rhyolitic metatuff and meta-andesite with porphyritic textures. They are marked by dominant mylonitic foliation surrounding feldspar and quartz porphyroclasts. Alkali feldspar and quartz are the principal minerals of the granite. The intrusion is characterized by intense deformation features and is highly mylonitized. Based on field and microscopic studies, the microdiorite postdated metamorphic and deformation events and shows neither schistosity nor mylonitic foliation. It is composed principally of plagioclase with minor disseminated magnetite and a microgranular texture. Two deformation events are recognized at the Lulak Abad area, one principally ductile, the other brittle.

Iron mineralization at Lulak Abad occurs as veins, veinlets and lens-shaped bodies in schist units, mylonitic metavolvanic rocks and mylonitic granite. The main ore vein extends up to 100 m in length and averages 3 m in width, reaching a maximum of 6 m. It trends NE, dipping steeply SE. The ore lenses are parallel to the mylonitic foliation and variably boudinaged, about 10 m in length and vary in thickness up to 5 cm. Two stages of mineralization can be distinguished at Lulak Abad. Stage 1 mineralization is recognized as stratiform and stratabound lenses, laminated and disseminated crystals of magnetite in volcano-sedimentary host rocks. Stage 2 is characterized as hematite-pyrite-calcite veins and veinlets cutting the mylonitic foliation of the host rocks. Hydrothermal alteration is restricted to

*Corresponding authors Email: kouhestani@znu.ac.ir

silicified, calcitic and chloritic altered parts of the ore zones.

The ore minerals at Lulak Abad formed as vein and hydrothermal breccia cements, and show vein-veinlet, brecciated, disseminated and open space filling vein and veinlet textures. Hematite is the main ore mineral, accompanied by minor magnetite and pyrite. Goethite occurs as a supergene mineral. Quartz, calcite and chlorite are present in the gangue minerals that represent vein-veinlet and vug filling textures.

The Lulak Abad mineralized veins and breccias show lower concentrations of LREE and HREE (i.e., Pr, Er, Ho, Dy and Yb) relative to barren granitic host rocks but higher Tm, Gd, Eu and Lu concentrations. Chondrite-normalized REE patterns (Sun and McDonough, 1989) of host barren granite and the mineralized samples at Lulak Abad indicate that mineralized samples are depleted in LREE (except Ce) but enriched in most HREE (beside depletion in Dy and Ho). These signatures indicate high wall rock interaction (e.g., Lottermoser, 1992; Liegeois et al., 2003).

Comparison of the geological, mineralogical, geochemical, textural and structural characteristics of the Lulak Abad occurrence with different types of iron deposits reveals that iron mineralization at Lulak Abad was originally formed as volcano-sedimentary, and then reconcentrated as vein mineralization (Karami et al., 2012; Karami et al., 2013).

Acknowledgements

The authors are grateful to the University of Zanjan Grant Commission for research funding. Journal of Economic Geology reviewers and editor are also thanked for their constructive suggestions on alterations to the manuscript.

References

Karami, M., Ebrahimi, M. and Kouhestani, H., 2012. Geological and mineralization characteristics of Lulak Abad iron occurrence, east of Mahneshan. 31th Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian with English abstract).

Karami, M., Kouhestani, H. and Ebrahimi, M., 2013. Mineralogy, structure, texture and type of iron mineralization in Lulak Abad occurrence, east of Mahneshan. 1st International Conference on Mining, Mineral Processing, Metallurgical and Environmental Engineering. University of Zanjan, Zanjan, Iran (in Persian with English abstract).

Liegeois, J.P., Latouche, L., Boughrara, M., Navez, J. and Guiraud, M., 2003. The Latea metacraton (Central Hoggar, Tuareg shield, Algeria): behaviour of an old passive margin during the Pan-African orogeny. Journal of African Earth Sciences, 37(3–4): 161–190.

Lotfi, M., 2001. Geological map of Mahneshan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.

Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. Ore Geology Reviews, 7(1): 25–41.

Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London, London, pp. 313–345.

Zamin Gostar Company, 2007. Primary iron exploration project at Lulak Abad area, Industry, Mine and Trade Organization, Zanjan, 32 pp.