پاییز ۸۸، سال نوزدهم، شماره ۷۳، صفحه ۱۱ تا ۱۶

بررسی تغییرات شیمیایی و ساختاری و تعیین حرارت در یک دگرشکلی پیش‌رونده: شواهدی از پهنه برشی زرین، اردکان

فریبرز مسعودی[1*]، محمد محجل[2] و فرزانه شاکر اردکانی[1]
[1] دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
[2] گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۱۱/۱۰

چکیده

منطقه زرین در شمال اردکان واقع و بخشی از پهنه ایران مرکزی است. بخش‌های همگن و یکنواختی از توده گرانیتی زرین در پهنه برشی قرار گرفته و میلونیت‌ها و اولترامیلونیت‌ها تشکیل شده‌اند. شواهد ریزساختاری و بررسی دگرشکلی نشان می‌دهد که تغییرات شیمیایی و ساختاری به موازات پیشرفت دگرشکلی در میلونیت‌ها ایجاد شده است. بیشترین تغییرات شیمیایی متعلق به کاهش قابل توجه مقادیر Fe , Mg , Ti و P از میلونیت‌ها به اولترامیلونیت‌ها است. سیلیس همزمان با افزایش کوارتز مدال، یک افزایش کند در پهنه میلونیتی نشان می‌دهد؛ ولی میزان Al_2O_3 در طول میلونیتی شدن، کم و بیش ثابت است. مقدار K_2O در میلونیت‌ها نسبت به پروتومیلونیت‌ها به علت کاهش پورفیروکلاست‌های فلدسپار و فلدسپار قلیایی زمینه کاهش می‌یابد. اما با افزایش نسبی پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی و اپیدوت در زمینه، مقادیرNa ,Ca و K در اولترامیلونیت‌ها افزایش می‌یابد. در اثر تغییرات ساختاری، دانه‌های کوارتز در دگرشکلی ضعیف در پروتولیت و پروتومیلونیت‌ها تبلور مجدد و Sub grain و با پیشرفت دگرشکلی در میلونیت‌ها و اولترامیلونیت‌ها پدیده مهاجرت مرز دانه‌ای در تبلور مجدد را نشان می‌دهند. در طی دگرشکلی پیشرونده، در فلدسپارهای قلیایی شکستگی و پرتیتی شدن ظاهر می‌شود و ماکل‌های پلاژیوکلاز خمش نشان می دهند. با پیشرفت دگرشکلی پدیده تبلور مجدد در مرز دانه‌های فلدسپار قلیایی و دوقلویی در دانه‌های پلاژیوکلاز شکل می‌گیرند. با توجه به شواهد ساختاری، حرارت دگرشکلی در منطقه زرین به طور پیوسته از حدود ۴۰۰ °C در پروتولیت گرانیت و پروتومیلونیت‌ها تا ۵۰۰ °C یا بیشتر در میلونیت‌ها و اولترامیلونیت‌ها در شرایط مشابه رخساره شیست سبز افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: گرانیت زرین، اردکان، پهنه برشی، دگرشکلی

***نویسنده مسئول:** فریبرز مسعودی

۱- مقدمه

منطقه زرین در ۸۰ کیلومتری شمال خاور اردکان یزد واقع است. در این منطقه توده نفوذی زرین در میان مجموعه‌ای از شیل، ماسه‌سنگ‌های کوارتزیتی و آهک‌های پالئوزوییک نفوذ کرده است. اولین مطالعات زمین‌شناسی در منطقه زرین توسط حقی پور و همکاران (۱۹۷۲) صورت گرفته است. سنگ‌شناسی و ژئوشیمی سنگ‌های نفوذی منطقه را عمرانی (۱۳۷۱) بررسی و نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه توسط هوشمندزاده و نوگل سادات (۱۳۸۳) تهیه شده است. توده گرانیتی زرین در اطراف خود هاله دگرگونی بسیار ضعیفی پدید آورده است. اما مطالعه نمونه‌های میکروسکوپی نشان داده است که نفوذ توده همراه با شکل‌گیری مجموعه متنوعی از سنگ‌های میلونیتی بوده است که در یک پهنه برشی شکل گرفته‌اند (شاکر اردکانی، ۱۳۸۵). توده نفوذی زرین کم‌وبیش یک توده همگن است اما به نظر می‌رسد در امتداد پهنه برشی، در اثر گرشکلی به همراه پیشرفت میلونیتی‌شدن، سنگ‌های با دگرشکلی ضعیف تا اولترامیلونیت‌ها با تفاوت‌های ساختاری و شیمیایی به وجود آمده‌اند.

در این تحقیق ریزساختارها و سازوکارهای دگرشکلی توده گرانیتی واقع در پهنه برشی در طول پیشرفت میلونیتی شدن از سنگ‌های دگرشکل شده ضعیف تا اولترامیلونیت‌ها بررسی شده‌اند و بر اساس تغییرات و ویژگی‌های ساختاری، حرارت حاکم بر سنگ‌ها در هنگام وقوع دگرشکلی برآورد شده است. همچنین با تجزیه شیمیایی سنگ‌های گرانیتی با دگرشکلی ضعیف تا قوی سعی شده است تأثیر پهنه برشی بر تغییر ترکیب شیمیایی سنگ‌های با دگرشکلی متفاوت بررسی شود.

۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه زرین در شمال اردکان و در زون ایران مرکزی واقع‌شده و از نظر زمانی سنگ‌های پرکامبرین تا عهد حاضر در آن دیده می‌شود (شکل ۱). قدیمی ترین برونزدها متعلق به پرکامبرین پسین تا کامبرین پیشین و شامل شیل و ماسه سنگ‌هایی با قاعده نامشخص است که باگسلی راندە (تراستی) بر روی سازندهای جوان‌تر (با سن تریاس- ژوراسیک) قرار گرفته است (حقی پور و همکاران، ۱۹۷۲). برونزدهای کامبرین شامل دولومیت، مارن و تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ است. سنگ‌های دونین بیشتر در باختر و جنوب باختری منطقه دیده می‌شود و شامل ماسه‌سنگ‌های کوارتزیتی سفید رنگ با میان‌لایه‌های سیلتستون است. چند افق دولومیتی نیز مشاهده می‌شود. رخنمون‌های تریاس میانی در بخش‌های باختر و جنوب باختری و نیز بخش کوچکی در شمال منطقه برونزد دارند و شامل دولومیت‌های ریز دانه‌ای است که بر روی آن سنگ آهک‌های خاکستری تا سفید قرار گرفته‌اند. گسترده‌ترین برونزدها متعلق به شیل، ماسه‌سنگ و سیلتستون سازند شمشک است که در شمال، باختر و جنوب منطقه مشاهده می‌شود و توده گرانیتی زرین را در بر گرفته است. از لحاظ سنی این واحد از تریاس تا سرانجام ژوراسیک ادامه می‌یابد (هوشمندزاده و نوگل سادات، ۱۳۸۳).

گرانیت زرین در گستره‌ای به وسعت بیش از ۱۰۰ کیلومتر مربع و در سه بخش جدا از هم رخنمون دارد که شامل دو بخش طویل و بزرگ تر با روند شمالی- جنوبی است و یک بخش کوچک‌تر در شمالی‌ترین قسمت واقع است. سن گرانیت زرین توسط هوشمندزاده و نوگل سادات (۱۳۸۳) پس از ژوراسیک و پیش از کرتاسه برآورد شده است. این توده بر اساس ترکیب شیمیایی به گرانیت، لوکوگرانیت و بیوتیت گرانیت تقسیم می‌شود. گرانیت زرین یک گرانیت قلیایی و پرآلومین است. مشاهدات صحرایی و سنگ‌شناسی و نیز داده‌های حاصل از تجزیه شیمیایی دلالت بر این دارند که گرانیت زرین از نوع S است (عمرانی، ۱۳۷۱). جایگزینی گرانیت همزمان تا پس از کوهزایی و از نوع درون ورقی است (شاکر اردکانی، ۱۳۸۵).

۳- دگرگونی و سنگ‌های دگرگونی

دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه زرین در حد رخساره شیست سبز و زون بیوتیت گسترش دارد. مهم‌ترین سنگ‌های دگرگونی در منطقه شامل اسلیت و فیلیت‌ها در بخش جنوب و جنوب خاوری، متابازیت‌ها در شمال، میکاشیست‌ها در بخش شمال تا شمال خاوری، کوارتزیت‌ها در شمال و سرانجام مرمرها در باختر و جنوب باختری منطقه است. با توجه به حضور شواهد ساختاری، سن این سنگ‌های دگرگونی پیش از نفوذ توده گرانیتی زرین در شیل‌های ژوراسیک برآورد می‌شود. دگرگونی مجاورتی از گسترش بسیار کمی برخوردار است و آثار آن به میزان کمی در شیل‌های ژوراسیک و ماسه‌سنگ‌های کوارتزیتی و آهک‌های پالئوزوییک که در تماس با توده نفوذی هستند، دیده می‌شود.

جایگیری توده باعث ایجاد تغییرات ساختاری آشکاری در سنگ‌ها شده است. مطالعات میکروسکوپی بر روی نمونه‌های منطقه نشان می‌دهد که انواع مختلفی از میلونیت‌ها در منطقه زرین به وجود آمده است. کربنات میلونیت، ماسه‌سنگ میلونیتی، گرانیت میلونیت، گرانیت اولترامیلونیت و میکاشیست میلونیتی مهم‌ترین انواع میلونیت هستند. علاوه بر میلونیت‌ها، کوارتزیت‌ها و مرمرها سنگ‌هایی هستند که در داخل پهنه برشی در مناطق کم‌کرنش واقع شده‌اند و شواهد دگرشکلی را به خوبی نشان می‌دهند. کوارتزیت‌ها با کانی‌های اصلی کوارتز با جهت‌یافتگی ترجیحی شبکه (Lattice preferred orientation) و مسکوویت و کانی فرعی زیرکن در بخش شمال خاوری منطقه گسترش دارند. مرمرها در باختر و جنوب باختری منطقه گسترش دارند و علاوه بر کانی اصلی کلسیت دارای مسکوویت و کانی‌های کدر (اپک) هستند.

۴- پهنه بُرشی

ساختارهای دگرشکلی در مقیاس میکروسکوپی مانند نوارهای بُرشی، میکاماهی و پورفیروکلاست‌های پوششی که در سنگ‌های میلونیتی منطقه زرین دیده می‌شوند، حضور یک پهنه برشی شکل پذیر را آشکار می‌سازند (شکل ۱). حضور شیب زیاد برگوارگی میلونیتی و هم‌راستا بودن خطوارگی کششی با امتداد آن در مجموعه میلونیت‌ها یک حرکت برشی راست‌بر را در این پهنه برشی امتداد لغز نشان می‌دهد. پهنه برشی شکل‌پذیر در منطقه دارای عرض حدود ۱/۵ کیلومتر و طول ۲۰ کیلومتر است که در باختر منطقه دارای یک چرخش است و با همان سازوکار امتداد لغز امتداد می‌یابد (شاکر اردکانی، ۱۳۸۵).

۵- شیمی سنگ کل در دگرشکلی پیش‌رونده گرانیت

علاوه بر بررسی ویژگی‌های ساختاری در پروتو تا اولترامیلونیت‌های گرانیتی، تغییرات شیمیایی ایجاد شده در این سنگ‌ها در طول دگرشکلی به‌وسیله تجزیه شیمی عناصر اصلی در نمونه‌های برداشت شده مطالعه شد. به این منظور۴ نمونه از گرانیت با دگرشکلی ضعیف، پروتومیلونیت، میلونیت و اولترامیلونیت انتخاب و به روش XRF در دانشگاه تربیت معلم تجزیه شد. نتایج حاصل بر حسب درصد در جدول ۱ آمده است. برای تجزیه سنگ سعی شده است بخش همگنی از توده گرانیتی انتخاب شود که از ماگمای گرانیتی واحدی متبلور شده و تغییرات سنگ‌شناسی آنها در اثر دگرشکلی به وجود آمده است.

۶- ساختارهای گرانیت در دگرشکلی پیش‌رونده

در پهنه بُرشی سه مرحله اصلی دگرشکلی در گرانیت‌ها اثر کرده و پروتومیلونیت، میلونیت و اولترامیلونیت به وجود آمده‌اند. پروتومیلونیت‌ها و میلونیت‌ها سنگ‌های شاخص با گسترش قابل ملاحظه‌ای هستند و اولترامیلونیت‌ها بخش‌های کم عرضی را در زون برشی تشکیل می‌دهند. مرز بین سنگ‌های یادشده تدریجی است. مهم‌ترین عنصر ساختاری مزوسکوپی در سنگ‌های دگرشکل شده برگوارگی میلونیتی (mylonitic foliation) است که صفحه حرکتی را نشان می‌دهد. در گستره مورد بررسی، نمونه‌های برداشت شده از پهنه برشی دارای امتداد شمال- جنوب با شیب تند به سمت باختر بوده و همگی دارای سازوکار امتدادلغز هستند. از شواهد دیگر پهنه برشی خطوارگی کششی (Streching lineation) است. خطوارگی کششی بیشتر در سنگ‌های میلونیتی و اولترامیلونیت‌ها مشاهده می‌شود. ریزساختارها و سازوکارهای دگرشکلی در گرانیت‌های دگر شکل شده متفاوت و به شرح زیر است.

۶- ۱. گرانیت‌ها با دگرشکلی ضعیف

گرانیت‌های با دگرشکلی کم از فلدسپار قلیایی (۳۵%)، کوارتز (۳۰%)، پلاژیوکلاز (۱۵%)، بیوتیت (۱۰%) و کانی‌های فرعی زیرکن و کدر (اپک)تشکیل شده‌اند. فلدسپار قلیایی به طور عمده از نوع ارتوز با ماکل دوتایی(کارلسباد) است و بلورها پرتیتی شده‌اند. در اثر دگرشکلی ضعیف، این سنگ‌ها تنها برخی از شواهد دگرشکلی را نشان می‌دهند. دانه‌های کوارتز بیشتر خاموشی موجی داشته و تعدادی از دانه‌های کوارتز کشیده شده و تبلور مجدد در حاشیه آنها دیده می‌شود. عمده دانه‌های کوارتز در اثر حضور تنش زیاد مرزهای مضرس و نامنظم دارند و به ندرت مرزهای نامنظم، زاویه‌دار و یکنواخت دیده می‌شود (شکل ۲). پلاژیوکلازها به طور عمده ماکل دوتایی و پلی‌سنتتیک را به خوبی نشان می‌دهند.

۶-۲. پروتومیلونیت‌ها

پروتومیلونیت‌ها از فلدسپار قلیایی و پلاژیوکلاز (۵۰%)، کوارتز، بیوتیت و مسکوویت (۳۰%) و یک زمینه (ماتریکس) با دانه‌بندی خوب (۲۰%) تشکیل شده‌اند. دانه‌های فلدسپار قلیایی پورفیروکلاست‌ها را شکل می‌دهند و به طور عمده پرتیتی هستند. امتداد شعله‌های پرتیت در جهت عمود بر نیروی تنش حاکم بر منطقه است (شکل ۳). دانه‌های کوارتز خاموشی‌موجی، Sub grain و New grain را نشان‌می‌دهند. در دانه‌های پلاژیوکلاز ماکل‌ها در اثر تنش دچار خمش شده‌اند. بیوتیت شواهدی از دگرشکلی پلاستیک، مانند خاموشی موجی و خمش در ماکل (kinking) را نشان می‌دهد و بیشتر به کلریت و مسکوویت تجزیه شده است.

۶-۳. میلونیت‌ها

میلونیت‌های گرانیتی یک برگ وارگی (فولیاسیون) پیشرفته نشان می‌دهند و حاوی فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز، بیوتیت، مسکوویت، زیرکن و پورفیروکلاست‌های کوارتز هستند. سیمان آنها خوب دانه‌بندی شده و از فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز با ماکل‌های دگرشکلی، کوارتز، پرتیت‌های شعله‌ای، بیوتیت و مسکوویت تشکیل شده است. فلدسپار در میلونیت‌ها، دگرشکلی بین بلوری نشان می‌دهند که همراه یا بدون شواهد شکستگی هستند. فلدسپار قلیایی‌ها اغلب پرتیتی و پرتیت‌ها از نوع شعله‌ای هستند. پلاژیوکلازها به سریسیت تجزیه شده‌اند. ماکل‌ها در دانه‌های پلاژیوکلاز دچار خمش شده‌اند که این پدیده ناشی از تنش است (شکل ۴). پدیده شکستگی در دانه‌های پلاژیوکلاز دیده می‌شود. کوارتز به شدت تبلور دوباره یافته است و دانه‌های به شدت کشیده و بزرگ به صورت نوارهای چندبلورین دیده می‌شوند. نوارها به صورت چند کانی و تک کانی هستند. بیوتیت‌ها اغلب به کلریت و مسکوویت تجزیه شده‌اند و رفتار شکل‌پذیر دارند و خمش در ماکل‌های بیوتیت دیده می‌شود (شکل ۵).

۶-۴. اولترا میلونیت

اولترامیلونیت‌های گرانیتی سنگ‌های خوب دانه‌بندی شده هستند و فابریک صفحه ای خوبی را نشان می‌دهند. این سنگ‌ها با پورفیروکلاست‌های کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی، دارای بیش از ۹۰ درصد ماتریکس هستند. پورفیروکلاست‌های فلدسپار قلیایی پرتیتی و بسیار خرد شده‌اند و به موازات فولیاسیون در حاشیه تبلور دوباره پیدا

کرده‌اند. مرز دانه‌های کوارتز به طور کامل مضرس است و کلیه شواهد دگرشکلی از جمله Sub grain، New grain، خاموشی موجی، خاموشی جارویی و مهاجرت مرز دانه‌ای در تبلور مجدد را نشان می‌دهند (شکل ۶). پدیده دوقلویی در دانه‌های پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود که با شکل سوزنی مشخص می‌شوند و نوک سوزن‌ها به طرف درون بلور است (شکل ۷). این دوقلویی ناشی از تنش حاکم بر منطقه است و با دوقلویی ناشی از رشد متفاوت است (Passchier & Troaw, 1996; Arancibia, 2004; Mamtani & Greiling, 2005; Galadi-Enriquez et al., 2006). خمش در ماکل پلاژیوکلاز دیده می‌شود. دانه‌های کوارتز و فلدسپار در اثر دگرشکلی پراکنده شده‌اند. پورفیروکلاست‌ها به‌دلیل تبلور دوباره، گردشدگی نشان می‌دهند (Passchier & Troaw, 1996).

۷- بحث

۷-۱. دگرشکلی و تغییرات شیمیایی

Frisicale et al. (2005) در بررسی فرایند دگرشکلی پیش‌رونده نشان دادند که روندی از تغییرات شیمیایی در مجموعه گرانیت‌های ضعیف دگرشکل شده، پروتومیلونیت، میلونیت و اولترامیلونیت دیده می‌شود. در این تحقیق تغییرات شیمیایی گرانیت‌ها با درجه دگرشکلی متفاوت بررسی شد. به این منظور تجزیه شیمیایی انجام شده (جدول ۱)، نسبت به سنگ اصلی دگرشکل نشده، بر اساس روش پیشنهادی Hippertt & Hongn (1998) بهنجار شد. نمودارهای مقایسه‌ای بر اساس داده‌های حاصل از تجزیه شیمیایی (جدول ۱)، در سنگ‌های با درجات متفاوت دگرشکلی، در شکل ۸ آمده‌اند. بیشترین تغییرات متعلق به کاهش قابل توجه مقادیر Ti، Mg، Fe و P از میلونیت‌ها به اولترامیلونیت‌ها است. مقادیر اکسیدهای عناصر Ti، Fe و Mg از پروتومیلونیت به میلونیت افزایش چشمگیری دارد. مطالعه میکروسکوپی سنگ‌ها نشان می‌دهد که غنی‌شدگی عناصر یاد شده در میلونیت‌ها با افزایش محتوای بیوتیت در سنگ‌ها منطبق است. مقدار K_2O از ۴/۴۱ درصد در پروتولیت به ۱/۴۱ در میلونیت کاهش بسیاری را نشان می‌دهد. اما مقدار آن در اولترامیلونیت‌ها بار دیگر افزایش و به ۲/۷۳ درصد می‌رسد. کاهش K_2O در میلونیت‌ها به علت کاهش پورفیروکلاست‌های فلدسپار و دانه‌های فلدسپار زمینه است. از دیدگاه Frisicale et al. (2005) افزایش این عنصر نیز در اولترامیلونیت‌ها می‌تواند همزمان با شکل‌گیری فلدسپار پرتیتی به وجود آید.

Ca و Na مشابه K از پروتومیلونیت به میلونیت کاهش نشان می‌دهد اما از آنجا به سوی اولترامیلونیت افزایش قابل توجهی دارند (شکل ۸). تهی‌شدگی پیش‌رونده در مقدار Ca و Na نسبت به پروتومیلونیت در سنگ‌های میلونیتی با شروع تجزیه پلاژیوکلاز در مقاطع مطالعه شده منطبق است. با توجه به شواهد کانی‌شناسی، افزایش تند در نسبت مقدار Ca و افزایش کند در Na و K در اولترامیلونیت‌ها می‌تواند به علت افزایش نسبی پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی و اپیدوت در زمینه سنگ ایجاد شده باشد. سیلیس (SiO_2) یک افزایش کند در پهنه میلونیتی نشان می‌دهد. این افزایش می‌تواند در اثر مقداری سیلیسی شدن، که همزمان با افزایش پیش‌رونده در کوارتز مدال است، به وجود آید. مقدار Al_2O_3 در گذر از پروتولیت به پروتومیلونیت از ۱۱/۲۲ درصد به ۱۲/۳۳ درصد اندکی افزایش می‌یابد (جدول ۱)، اما در میلونیت‌ها ناگهان به ۷/۴۳ درصد کاهش می‌یابد که گویای مهاجرت زیاد این عنصر در طول میلونیتی شدن است. در اولترامیلونیت‌ها درصد این اکسید با یک افزایش نسبی به ۹/۲۱ درصد می‌رسد. مطالعه نمونه‌های محدود در پهنه برشی زرین نشان می‌دهد که افزایش دگرشکلی در گرانیت‌ها با تغییرات شیمیایی در آنها همراه است. این تغییرات در موارد بسیاری به صورت تغییر میزان کانی‌های سنگ ظاهر می‌شوند. بدیهی است که یافتن روابط مشخص بین میزان دگرشکلی، درصد عناصر و مقدار کانی‌ها با مطالعه نمونه‌های بیشتری ممکن خواهد بود.

۷-۲. تغییرات ساختاری با افزایش درجه دگرشکلی

دگرشکلی در زون برشی زرین، یکنواخت نبوده و تفاوت‌های ساختاری مشاهده شده، گویای افزایش تدریجی درجه دگرشکلی در گرانیت‌ها است. از این رو، این امکان به وجود آمده است تا تغییرات ساختاری گرانیت‌ها، با افزایش دگرشکلی، در یک زون برشی معرفی شود. در شرایط دگرشکلی ضعیف، دانه‌های کوارتز بیشتر خاموشی موجی نشان می‌دهند. تعدادی از دانه‌های کوارتز کشیده شده و تبلور مجدد در حاشیه آنها دیده می‌شود. دانه‌های کوارتز با پیشرفت دگرشکلی، علاوه بر پدیده‌های خاموشی موجی، خاموشی جارویی، Sub grain، New grain، مهاجرت مرز دانه‌ای در تبلور مجدد را نیز نشان می‌دهند (Hirth and Tullis, 1992). در سنگ‌های منطقه مورد بررسی، با افزایش شدت دگرشکلی، پدیده‌های Sub grain و سپس New grain درکوارتز شکل می‌گیرد. در میلونیت‌ها و اولترامیلونیت‌ها کوارتز به شدت تبلور می‌یابد و پدیده مهاجرت مرز دانه‌ای (GBM) در تبلور مجدد به وجود می‌آید. در دانه‌های به شدت کشیده و درشت کوارتز نوارهای چند بلورین ظاهر می‌شود.

کانی ارتوز پرتیتی است و ماکل دوتایی (کارلسباد) در آن مشاهده می‌شود. با افزایش دگرشکلی، پورفیروکلاست‌های فلدسپار قلیایی به موازات برگ وارگی در حاشیه، تبلور دوباره پیدا می‌نمایند. دانه‌های پلاژیوکلاز ماکل دوتایی و پلی سنتتیک نشان می‌دهند که با پیشرفت دگرشکلی ماکل‌ها دچار خمش می‌شوند. در ادامه، پدیده دوقلویی در دانه‌های پلاژیوکلاز دیده می‌شود که با شکل سوزنی مشخص می‌شوند. بیوتیت نیز شواهدی از دگرشکلی پلاستیک مانند خاموشی موجی و خمش در ماکل‌ها را در دگرشکلی پیشرفته نشان می‌دهد.

۷-۳. برآورد حرارت و فشار میلونیتی شدن

روش‌های معمول در پترولوژی سنگ‌های آذرین، برای برآورد حرارت و فشار و تشکیل سنگ‌های دگرگونی، بر اساس تغییرات شیمیایی سنگ استوار است. اما به تازگی مطالعات نشان داده‌اند که تعیین شرایط حاکم بر دگرشکلی‌هایی که بیشتر به صورت تغییرات فیزیکی در سنگ ظاهر شده‌اند نیز توسط بررسی شواهد ساختاری سنگ ممکن است (Boullier & Bouchez, 1978; Fitz Gerald & stunitz, 1993; Passchier & Troaw, 1996; Srivastava & Mitra, 1996; Frisicale & Martinez, 2005). تغییرات ساختاری موجود در زون دگرشکلی پیش‌رونده، در منطقه زرین، این امکان را به وجود آورده است که بتوان با استفاده از شواهد ساختاری، در کانی‌هایی چون کوارتز، فلدسپار و بیوتیت، حرارت حاکم در زمان دگرشکلی را برآورد کرد.

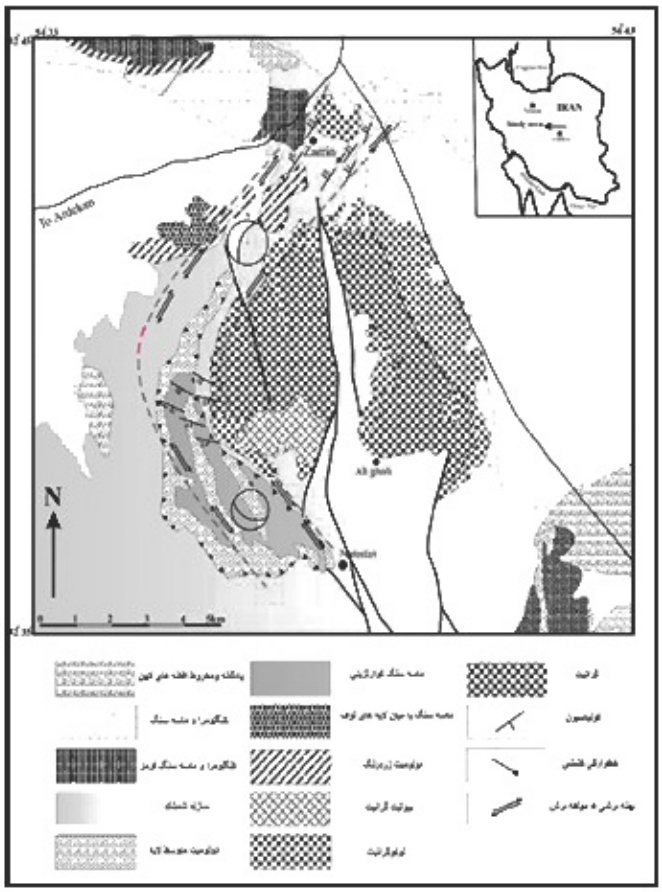
مطالعات Passchier and Trouw (1996) نشان داده است که با افزایش حرارت در شرایط متوسط تا بالا (۷۰۰ °C - ۴۰۰) سازوکارهای تبلور مجدد کوارتز از Sub grain, New grain تا Sub grain rotation و با پیشرفت دگرشکلی مهاجرت مرز دانه‌ای در تبلور دوباره تغییر می‌کند. همچنین در این شرایط، دانه‌های کوارتز به شدت کشیده و بزرگ به صورت نوارهای چندبلورین دیده می‌شود (Boullier and Bouchez, 1978). نوارهای کوارتز در میلونیت‌ها از دیدگاه Simpson (1985) در شرایط مشابه رخساره متوسط تا بالای شیست سبز شکل می‌گیرند. ریزساختارهای کوارتز نشان می‌دهند که تبلور مجدد دینامیک در سنگ‌های دگرشکل شده منطقه عمل کرده است. ریزساختارهای یاد شده در دانه‌های کوارتز میلونیت‌های منطقه مشاهده شده‌اند، به طوری‌که، نوارها کاملاً تبلور دوباره یافته که پیشنهاد کننده ترکیبی از مهاجرت مرز دانه‌ای و فرایند Sub grain rotation است.

فلدسپارهای قلیایی اغلب پرتیتی شده‌اند. با افزایش دگرشکلی، پورفیروکلاست‌های فلدسپار قلیایی به موازات برگ‌وارگی در حاشیه تبلور دوباره پیدا کرده‌اند که این پدیده حرارت‌های حدود ۶۰۰-۵۰۰ °C را پیشنهاد می‌کند (Srivastava and Mitra, 1996).

Fitz Gerald and Stunitz (1993) بر این باورند که حضور شکستگی‌ها در فلدسپار نشان دهنده دگرشکلی در شرایط معادل دگرگونی رخساره متوسط شیست سبز است. دانه‌های پلاژیوکلاز ماکل دوتایی و پلی سنتتیک نشان می‌دهند که با پیشرفت دگرشکلی ماکل‌ها دچار خمش شده‌اند. Srivastava and Mitra (1996) حرارت زیر ۵۰۰ °C و وقوع دگرشکلی در شرایط مشابه رخساره شیست سبز را برای این خمش تعیین کرده‌اند. Pryer (1993) تشکیل ریزساختارهایی مانند ماکل‌های دگرشکلی، پرتیت‌های شعله‌ای، دوقلویی در پلاژیوکلاز تشکیل شده در فلدسپارهای موجود در پروتومیلونیت‌ها، میلونیت‌ها و اولترامیلونیت‌ها را به حرارت‌های ۵۰۰-۴۵۰ °C در شرایط معادل رخساره بالای شیست سبز نسبت می‌دهد. سنگ‌های با دگرشکلی کمتر، مانند گرانیت‌های ضعیف دگرشکل شده، با فلدسپارهای شکسته و کوارتز با خاموشی موجی و شکل‌گیری Sub grain نشان می‌کند که این سنگ‌ها در طول دگرشکلی به حرارت‌های حدود ۴۰۰ °C رسیده‌اند (Passchier and Trouw, 1996). همچنین Srivastava and Mitra (1996) حضور بیوتیت‌های شکل گرفته جدید در سنگ‌های دگرشکل شده را در حرارت‌های تقریبی ۴۰۰ °C یا بالاتر می‌دانند. با توجه به شواهد ساختاری، حرارت دگرشکلی در منطقه زرین به طور پیوسته از حدود ۴۰۰ °C در پروتونیت گرانیت و پروتومیلونیت‌ها تا ۵۰۰ °C یا بیشتر در میلونیت‌ها و اولترامیلونیت‌ها در شرایطی مشابه رخساره شیست سبز افزایش می‌یابد.

۸- نتیجه‌گیری

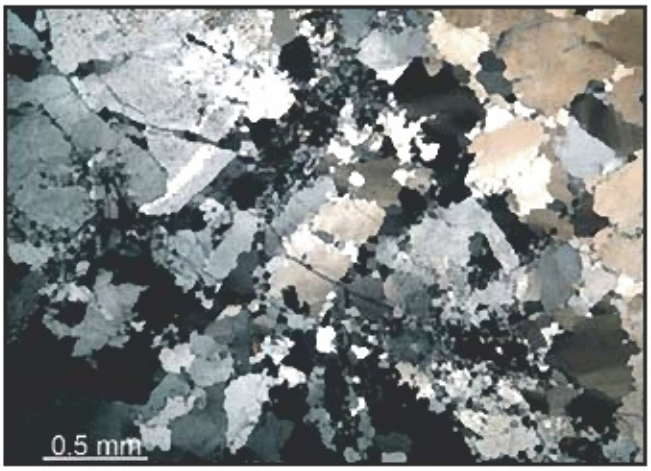
بخش‌هایی از توده گرانیتی زرین، که در پهنه برشی قرار گرفته است، ترکیب اولیه همگن و یکنواخت داشته است اما شواهد ریزساختاری و بررسی دگرشکلی نشان می‌دهد که تغییرات شیمیایی و ساختاری به موازات پیشرفت دگرشکلی در میلونیت‌ها رخ داده است. در منطقه زرین دگرشکلی به شدت ناهمگن است و همزمان با افزایش دگرشکلی پروتومیلونیت‌ها، میلونیت‌ها و پهنه‌های کم عرض اولترامیلونیت شکل گرفته‌اند. در طی دگرشکلی پیش‌رونده، مقدار برخی عناصر مانند Ti، Mg، Fe و F تغییرات زیادی را نشان می‌دهند و بیشترین مقدار این عناصر در میلونیت‌ها وجود دارد. این غنی‌شدگی به موازات افزایش محتوای بیوتیت در این سنگ‌ها است. میزان عنصر Al با مهاجرت در طول میلونیتی شدن از پروتومیلونیت به میلونیت تغییرات محسوسی نشان می‌دهد. سیلیس نیز بدون وابستگی به عناصر دیگر یک روند افزایشی را دارا است. میزان عناصر Na،Ca و K در سنگ‌ها وابسته به مقدار و نوع فلدسپار سنگ است. دگرشکلی کوارتز در پروتومیلونیت‌ها، میلونیت‌ها و اولترامیلونیت‌ها توسط سازوکار بلور-پلاستیک، که به طور عمده شامل تبلور مجدد دینامیک است، به وسیله rotation Sub grain و مهاجرت مرز دانه‌ای (GBM) دنبال می‌شود. دگرشکلی فلدسپار در این سنگ‌ها به احتمال در منطقه انتقالی بین رفتار شکننده و پلاستیک اتفاق می‌افتد که شامل شکستگی و خم‌شدگی در ماکل‌هاست. پورفیروکلاست‌های فلدسپار برای چرخش آزاد هستند. اندازه پورفیروکلاست‌های فلدسپار به وسیله تبلور مجدد دینامیک کاهش می‌یابد. با توجه به ویژگی‌های ساختاری مشاهده شده در کانی‌های کوارتز، فلدسپار و بیوتیت، دگرشکلی در شرایط معادل رخساره شیست سبز و در محدوده حرارتی حدود ۴۰۰ °C در پروتونیت گرانیت و پروتومیلونیت‌ها تا ۵۰۰ °C در اولترامیلونیت‌ها به‌وجود آمده است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه زرین (واحدهای زمین شناسی برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زرین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور است).

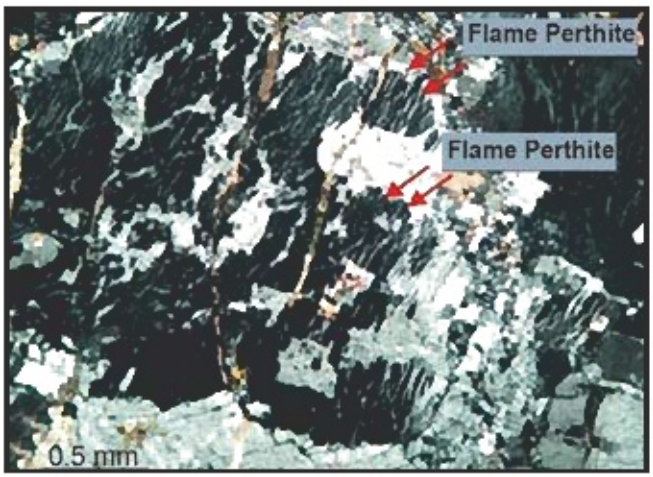
جدول ۱- تجزیه شیمیایی عناصر اصلی به روش XRF پروتونیت، پروتومیلونیت، میلونیت و اولترامیلونیت در یکه زون پیش‌رونده دگرشکلی گرانیت‌ها، مقادیر بر حسب درصد است.

	پروتونیت	پروتومیلونیت	میلونیت	اولترامیلونیت
SiO_2	۷۵/۰۴	۷۵/۷۴	۸۰/۰۴	۷۹/۸۱
TiO_2	۰/۱۷	۰/۲	۰/۴۷	۰/۱۲
Al_2O_3	۱۱/۲۲	۱۲/۴۳	۷/۴۳	۹/۲۱
Fe_2O_3	۱/۱۲	۲/۴۷	۳/۶۵	۲/۱۵
MnO	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۷
MgO	۰/۴	۰/۸۹	۱/۱۸	۰/۵۵
CaO	۱/۰۷	۰/۶۹	۰/۴۹	۲/۱۳
Na_2O	۳/۸۱	۳/۲۲	۱/۴۳	۲/۷۱
K_2O	۴/۴۱	۲/۸۱	۱/۴۱	۲/۸۳
P_2O_5	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۲

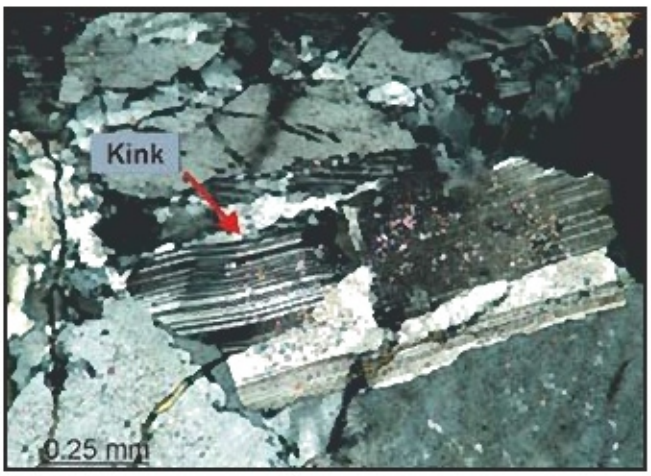


شکل ۲- مرزهای مضرسی و نامنظم و پدیده خاموشی موجی در دانه‌های کوارتز به علت شرایط تنش حاکم بر منطقه در گرانیت با دگرشکلی ضعیف (PPL).

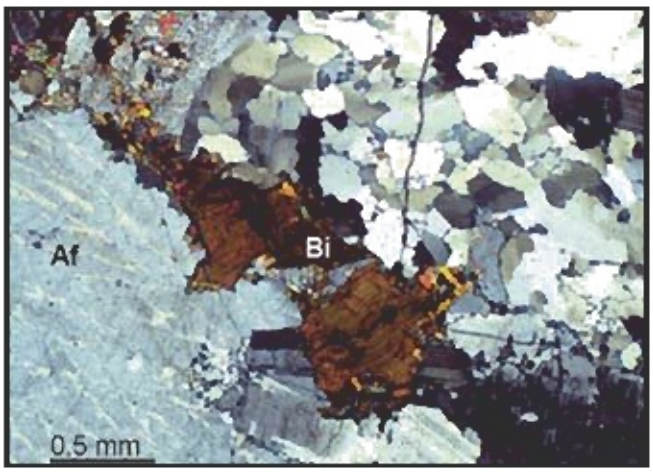
(Qtz: کوارتز، Af: فلدسپار قلیایی، Bi: بیوتیت و GBM: مهاجرت مرز دانه‌ای)



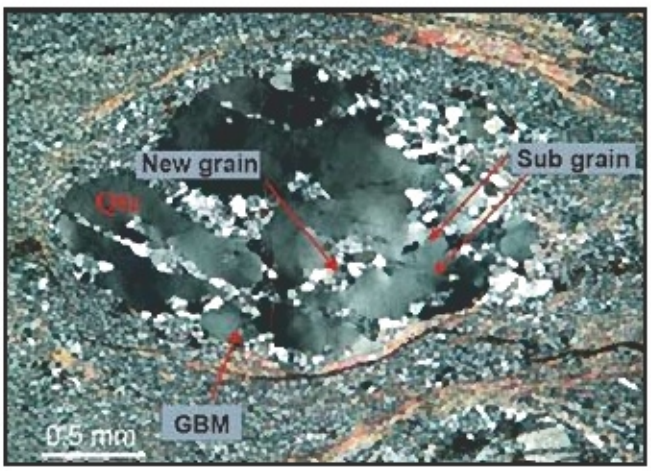
شکل ۳- رشد ضعف‌های جهت‌یافته در نقاط تنش بالا در امتداد مرز دانه‌ها در گرانیت دگرشکل شده (PPL).



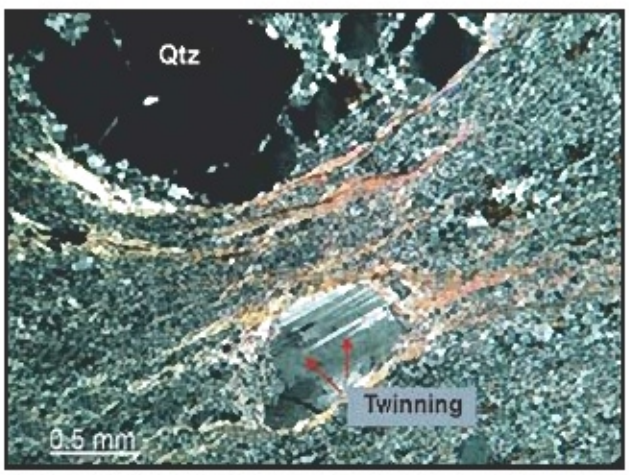
شکل ۴- پدیده خمش در ماکل رشد دانه‌های پلاژیوکلاز که ناشی از تنش حاکم بر منطقه است (PPL).



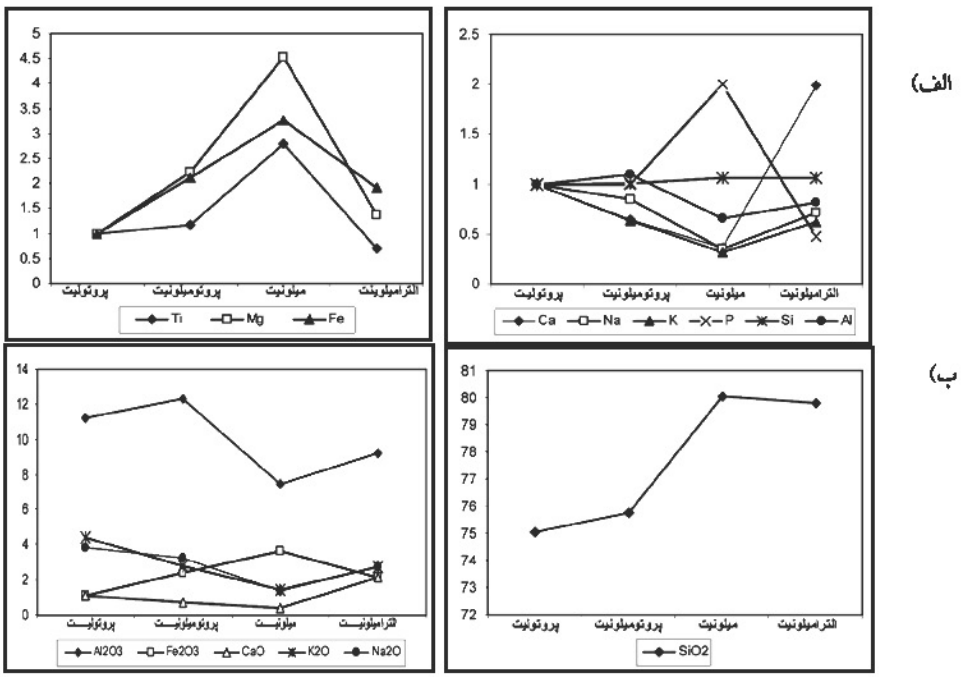
شکل ۵- خمش در بیوتیت‌ها در گرانیت‌های واقع در پهنه برشی که از شواهد دگرشکلی است (PPL).



شکل ۶- شواهد دگرشکلی از جمله Sub grain, New grain و پدیده مهاجرت مرز دانه‌ای در دانه‌های کوارتز در گرانیت اوآفرا میلونیت دیده می‌شود (PPL).



شکل ۷- پدیده دوقلویی دانه‌های پلاژیوکلاز در گرانیت اوآفرامیلونیت با شکل موزایی که ترک موزه‌ها به طرف درون بلور است (PPL).



شکل ۸- الف) نمودارهای نشان دهنده محتوای عناصر اصلی پروتولیت، پروتومیلونیت، میلونیت، بهنجارشده با ترکیب پروتولیت. ب) نمودارهای نشان دهنده نسبت‌های مولکولی ترکیبات مختلف پروتولیت، پروتومیلونیت، میلونیت و اولترامیلونیت‌ها.

کتابنگاری

حقی پور، ع.، واله، ن.، پلیسر، ج.، داوودزاده، م.، ۱۹۷۲- شرح نقشه زمین‌شناسی چهارگوش برگه ۱:۲۵۰۰۰۰ اردکان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

شاکر اردکانی، ف.، ۱۳۸۵- پترولوژی و بررسی فابریک سنگ‌های دگرگونی منطقه زرین، اردکان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران.

عمرانی، ج.، ۱۳۷۱- پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های نفوذی ناحیه زرین (اردکان یزد)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

هوشمندزاده، ع.ر.، نوگل سادات، ع.ا.، ۱۳۸۳- شرح نقشه زمین‌شناسی چهارگوش برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردکان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

Arancibia, C., 2004 - Mid-cretaceous crustal shortening: evidence from a regional-scale ductile shear zone in the Coastal Range of Central Chile (32° S), Journal of South American Earth Sciences 17, 209-226.

Boullier, A.M., Bouchez, J.L., 1978 - Le Qurtz en rubans les mylonites, Bulletin of Geological Society 20, 253-262.

Fitz Gerald, J.D., Stunitz, H., 1993 - Deformation of granitoids at low metamorphic grade. I: reactions and grain size reduction, Tectonophysics 221, 269-297.

Frisicale, M.C., Martinez, F.J., Dimieri, L.V., Dristas, J.A., 2005 - Micro structural analysis and P-T conditions of the Azul megashear Zone, Tandilia, Bunos Aires Province, Argentina, Journal of South American Earth Sciences 19, 433-444.

Galadi-Enriquez, E., Zulauf, G., Heidelbach, F., Rohrmuller, J., 2006 - Insights into the post-emplacement history of the Saustein granitic dyke showing heterogeneous deformation and inconsistent shear-sense indicators (Bavarian Forest, Germany), Journal of structural geology XX, 1-17.

Hippertt, J.F., Hongn, F.D., 1998 - Deformation mechanisms in the mylonite/ultramylonite transition, Journal of Structural Geology 20 (11), 1435-1448.

Hirth, G., Tullis, J., 1992 - Dislocation creep regimes in quartz aggregates, Journal of Structural Geology 8 (8), 831-843.

Mamtani, M. A., Greiling, R. O., 2005 - Granite emplacement and its relation with regional deformation in the Aravalli Mountain Belt (India) – infrances from magnetic fabric. Journal of Structural Geology 27, 2008-2029.

Passchier, C.W., Troaw, R.A.J., 1996 – Micro tectonic, Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 289 p.

Pryer, L., 1993, Microstructures in feldspar from a major crustal thrust zone: the Grenville front, Ontario, Canada, Journal of Structural Geology 15 (1), 21-36.

Simpson, C., 1985 - Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. Journal of Structural Geology 7 (5), 503-511.

Srivastava, P., Mitra, G., 1996 - Deformation mechanisms and inverted thermal profile in the North Almora Thrust mylonite zone, Kumaon Lesser Hymalaya, India. Journal of Structural Geology 18 (1), 27-39.

Interpretation and Exploratory Application of Enzyme Leach^{SM} Data Analysis at AyQalesi Polymetal Deposit, Southeast of Takab

By: M. Shirkhani[1], M. Ghaderi[1*], N. Rashidnejad-Omran[1] & R. Mohammadi-Niaei[2]

[1] Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[2] Exploration Department, Madankaran Angouran Company, Zanjan, Iran

Received: 2007 June 25 Accepted: 2008 July 01

Abstract

AyQalesi polymetal deposit is located 30 km southeast of Takab in Orumieh-Dokhtar structural zone. For Enzyme Leach^{SM} analysis at the deposit, 723 samples were collected from B-horizon soils. Based on the analytical results and data interpretation, six oxidation anomalies, A through F, have been defined. Five of these are recommended as drill targets while one, anomaly C, is not recommended for drilling because it appears to represent a buried intrusion without significant Zn enrichment. Anomalies B, D and E have very high Zn values. For anomaly D, this is because of outcropping Zn mineralization and the presence of mine waste at surface. Anomalies B and E may occur above shallowly buried mineralized zones. Anomalies A, C and F contain much less Zn. Anomaly A may overlie a concealed zone of Zn mineralization that could be buried to a substantial depth. Anomaly F is not recommended for drilling because it appears to be a quite narrow mineralized zone.

Keywords: Enzyme Leach, Oxidation anomaly, AyQalesi, Takab.

For Persian Version see pages 3 to 10

*Corresponding author: M. Ghaderi; E- mail: mghaderi@modares.ac.ir

Study of Chemical and Structural Changes and Determination of Temperature in a Progressive Deformation: Evidences from Zarrin Shear Zone, Ardekan

F. Masoudi[1*], M. Mohajjel[2] & F. Shaker Ardekani[1]

[1]Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

[2]Department of Geology, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

Received: 2007 July 22 Accepted: 2008 January 30

Abstract

The Zarrin area in the north of Ardekan is the part of Central Iran Zone. Some homogenous parts of Zarrin granite located in the shear zone changed to mylonites and ultramylonites. Microstructural evidence and deformation investigation show that chemical and structural changes occurred during the progressive deformation in mylonites. The most obvious chemical change is the noticeable decrease on Ti, Mg, Fe and P from mylonites to ultramylonites. Silica shows a slight increase in the mylonitic zone with progressive increase in modal quartz, but Al_2O_3 is nearly constant during the mylonitization. Because of decrease on feldspar porphyroclasts and feldspar grains in the matrix, compare to protomylonites, K_2O decreases in mylonites. However, with relative increase on plagioclase, K-feldspar and epidote in the matrix, Ca, Na and K increase in ultramylonites. As a result of structural changes, quartz grains in weakly deformed protolith and protomylonite show recrystallization and sub grain. In a progressive deformation process, quartz in mylonites and ultramylonites reveals grain boundary migration in recrystallization. During the progressive deformation, K-feldspars become perthitic with fractures and plagioclases show kinking in their twins. With progress in deformation, recrystallization on K-felspar's margins and twins in plagioclase grains are formed. Based on structural evidence, temperature of 400ºC has been estimated for deformation in Zarrin area in protogranites and protomylonites. The temperature continuously increases up to 500ºC or more in green schist facies in the mylonites and ultramylonites.

Kay words: Zarrin Granite, Ardekan, Shear Zone, Deformation

For Persian Version see pages 11 to 16

*Corresponding author: F. Masoudi; E_ mail: f_masoudi@sbu.ac.ir