



شواهد فرورانش تا برخورد قاره ای مرتبط با بسته شدن پالئوتتیس در شمال بلوک یزد بر پایه پتروگرافی متاگرانیت چاه زرد در شرق جندق

مهدی الهیاری ابهری^۱، نرگس شیردشت زاده^۲، محمدرضا قربانی^۳

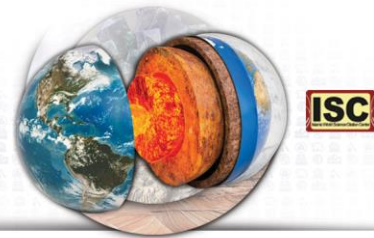
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، Mahdi_Allahyari@modares.ac.ir
^۲ استادیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، nshirdasht@modares.ac.ir
^۳ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ghorbani@modares.ac.ir

چکیده

هدف این پژوهش بررسی زمین شناسی و پترولوژی گرانیت خاور منطقه جندق، (خاور استان اصفهان) از دیدگاه مطالعات پتروگرافی و ایزوتوپی پایدار است. در تقسیمات زمین شناسی ایران، این منطقه به پهنه ایران مرکزی تعلق دارد که در آن سه فاز گرانیتوئیدی با سن ژوراسیک میانی، افیولیت جندق و سنگهای دگرگونی منطقه را قطع نموده است. مطالعات صحرایی و پتروگرافی دقیق و تحلیل های پتروگرافی در نمونه های متاگرانیت جندق نشان می دهد فرایندهای دگرگونی در ارتباط با فرایند بسته شدن پالئوتتیس و شرایط ترمودینامیکی (برآورد شرایط دما و فشار حاکم) موجب دست کم دو فاز دگرگونی ناحیه ای در منطقه شده است که یکی از آنها در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی پالئوتتیس در کربونیفر و پیش از نفوذ گرانیت چاه زرد رخ داده است (دگرگونی M1) و دیگری پس از برخورد قاره ای در اوایل ژوراسیک بالایی و نفوذ گرانیت چاه زرد به درون دگرگونه ها رخ داده است که آن را به متاگرانیت تبدیل کرده است (دگرریختی/دگرگونی M2). از شواهد این فاز دگرریختی/دگرگونی تشکیل زیردانه و باز تبلور GBM در کوارتزها، تشکیل میرمکیت، پرتیت شعله ای و بالجینگ در حاشیه فلدسپارها و تبلور گارنت های دگرگونی فشار بالا و سین تکتونیک است که با رخداد یک دگرریختی در شرایط فشار بالا و دمای نزدیک به ۶۰۰ درجه سانتیگراد همخوانی دارد و گویای شرایط دگرگونی ناحیه ای در مناطق برخوردی و بسته شدن پوسته اقیانوسی پالئوتتیس در شمال بلوک یزد است.

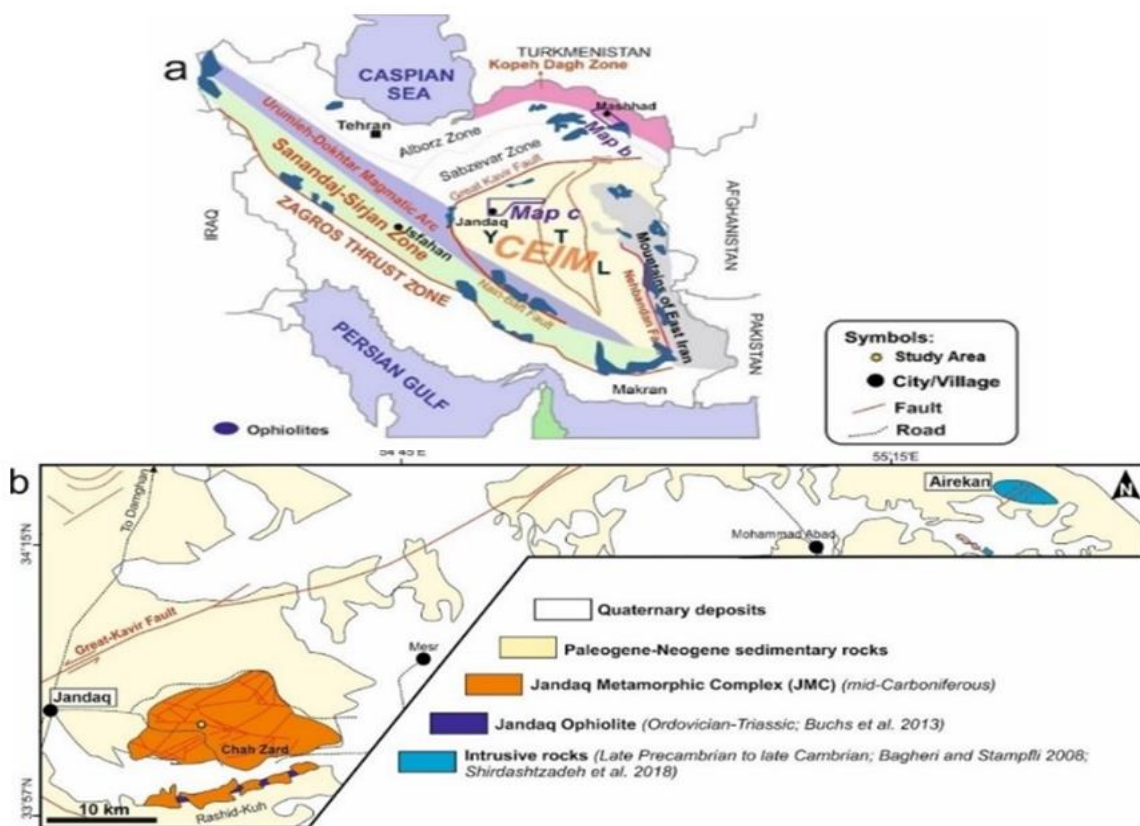
واژه های کلیدی

پالئوتتیس، دگرگونی ناحیه ای، شمال بلوک یزد، متاگرانیت، چاه زرد



۱. مقدمه

کمپلکس دگرگونی جندق بخشی از بلوک یزد در پهنه ساختاری ایران مرکزی در شرق شهر جندق و شمال غربی خور است (شکل ۱). این کمپلکس دگرگونی شامل سنگ‌های دگرگونی و آذرین به سن اواخر پرمین تا اوایل ژوراسیک شامل متاپریدوتیت‌ها، شیسست‌ها، آمفیبولیت‌ها و میگماتیت‌ها، گرانیت‌ها، پگماتیت‌ها، دایک‌ها و استوک‌های پگماتیته است [6]–[2]. مطالعات دما-فشارسنجی [1] نشان داد یک دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره آمفیبولیت به گرانولیت در گستره دمایی ۶۴۲ تا ۶۹۲ درجه سانتیگراد (آمفیبولیت‌ها) و ۶۸۸ تا ۷۱۲ درجه سانتیگراد (گرنیت آمفیبولیت‌ها) و گستره فشاری ۸ تا ۱۱ کیلو بار این کمپلکس دگرگونی را تحت تأثیر قرار داده است. [1] این بازه دما و فشار را به دگرگونی باروین P/T متوسط طی ضخیم شدگی پوسته‌ای در مناطق فرورانش و یا برخورد قاره‌ای نسبت داده است. در این مقاله، متاگرانیت واقع در کمپلکس دگرگونی جندق در شمال بلوک یزد از نظر شرایط دگرگونی که پس از تشکیل تحمل کرده است بررسی می‌شود. در زمین‌شناسی، بررسی گرانیتوئیدها برای درک فرایندهای ماگمایی و دگرگونی پوسته قاره‌ای و بازسازی شرایط تکتونوماگمایی گذشته زمین اهمیت بالایی دارد. پیدایش گرانیتوئیدها به مناطق کوهزایی و تکتونیک همگرایی متنوعی شامل مراحل فرورانش، برخورد قاره‌ای، و مرحله پس از برخورد نسبت داده می‌شود [7]–[14]. تداوم شرایط پرتنش یا رخداد فازهای دگرگونی جوان‌تر در پهنه‌های کوهزایی در هنگام یا پس از انجماد و جایگیری توده‌های گرانیتی، آنها را دچار دگرگونی/دگرریختی کند [15]. این متاگرانیت‌ها ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی متفاوتی نسبت به گرانیت‌های نادگرگون دارند. از این‌رو، بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی متاگرانیت‌ها پنجره‌ای رو به شناخت بهتر رویدادهای زمین‌ساختی و شرایط دما-فشار دگرگونی به‌شمار می‌رود.



شکل ۱. نقشه پهنه‌های ساختاری ایران و موقعیت منطقه مورد مطالعه در آن، به همراه نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده شرق جندق و موقعیت گرانیت مورد مطالعه در شمال چاه یزد [16].



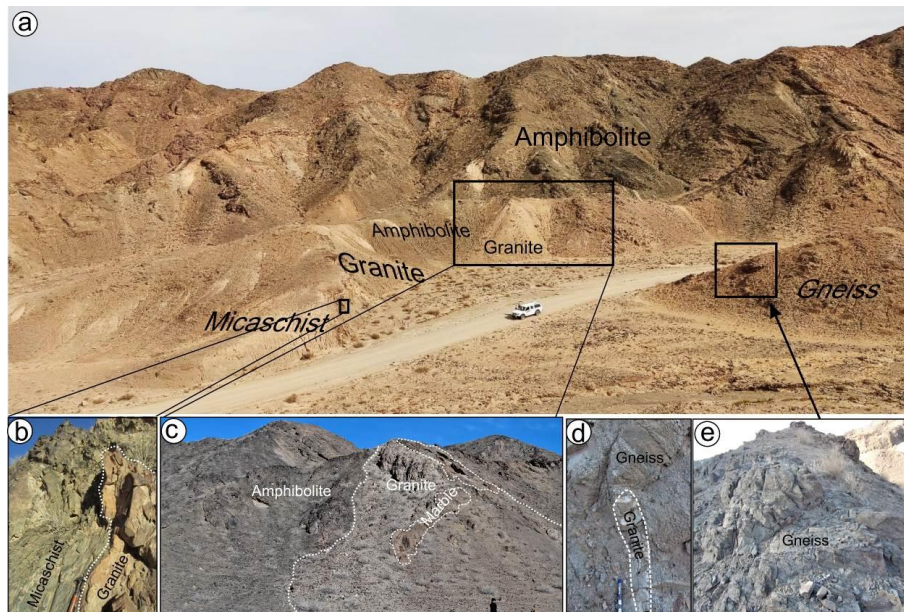
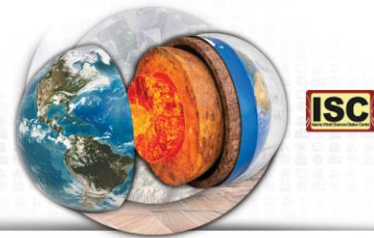
رخنمون‌هایی از گرانیتویدی دگرگون‌شده در بخش‌هایی از ایران مرکزی و در بلوک یزد یافت می‌شوند که ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی آنها نشان می‌دهد این گرانیت‌ها پس از تبلور از ماگما دچار فرایندهای دگرگونی شده و دگرگون/دگرریخت شده‌اند (مانند گرانیت شیرکوه [17])، گرانیتوید آیرکان در شمال خور [15] و گرانیتوید امیرآباد در شمال نایین [16]، با بررسی شواهد صحرایی، نمونه‌برداری دقیق، و پتروگرافی فازهای کانی‌شناسی و فرایندهای دگرگونی بازایی و بازتبلور در گرانیت دگرگون‌شده قدیمی شرق چاه زرد در کمپلکس دگرگونی جندق می‌توان اطلاعات ارزشمندی درباره فرایندهای دگرگونی و حوادث زمین‌ساختی پالئوزوییک در بخش شمالی خردقاره شرق-ایران مرکزی به دست آورد که در تعیین ماهیت دگرگونی در این منطقه و ارتباط آن با وقایع تکتونیکی مرتبط با فرورانش و بسته‌شدن اقیانوس پالئوتتیس در این منطقه اهمیت بالایی دارد.

به همین دلیل هدف این پژوهش بررسی گرانیت دگرگون خاور منطقه جندق (خاور استان اصفهان) از دیدگاه مطالعات پتروگرافی است. در این پژوهش، با انجام مطالعات صحرایی و پتروگرافی دقیق به بررسی شرایط دمایی دگرگونی در هنگام دگرریختی پرداخته می‌شود تا به کمک آن فرایندهای دگرگونی بعدی و شرایط ترمودینامیکی (برآورد شرایط دما و فشار حاکم) که در هنگام جایگیری این توده آن را تحت تاثیر قرار داده و دگرگون کرده‌اند بررسی و تعیین شود.

۲. زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در خاور جندق (شمال خاوری اصفهان) قرار دارد که در تقسیمات زمین‌شناسی ایران بخشی از پهنه ایران مرکزی به‌شمار می‌رود (شکل ۱a). کمپلکس دگرگونی جندق یک مجموعه زمین‌شناسی در مرکز ایران و در خردقاره شرق-ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۱a). مطالعه کمپلکس دگرگونی جندق در زمین‌شناسی ایران اهمیت دارد زیرا تاریخچه زمین‌شناسی و تکامل تکتونیکی منطقه‌ای را نشان می‌دهد. در این منطقه، مجموعه‌ای از فازهای سنگی با ترکیبات مختلف مشاهده می‌شود که به نام کمپلکس دگرگونی جندق (Jandaq Metamorphic Complex) شناخته می‌شود و فرایندهای پیچیده‌ای از تغییرات دگرگونی و پلوتونیزم در طول زمان را نمایان می‌سازد. به همین دلیل کمپلکس دگرگونی جندق، از نظر سنگ‌شناسی دارای تنوع فراوانی است. مطالعات و تحقیقات گذشته در این منطقه به درک بهتری از تاریخچه و تکامل کمپلکس دگرگونی جندق کمک کرده است و تحقیقات متعددی در زمینه‌های گوناگون از سنگ‌شناسی تا ژئوکرونولوژی و پتروژنز، به شناخت متنوعی از کمپلکس دگرگونی جندق ارائه شده است. [4] سنگ‌های دگرگونی جندق را به سن پروتروزوییک فوقانی تا پالئوزوییک زیرین می‌داند. [18] به پلی‌متامورفسم دگرگونی‌های جندق اشاره کرده است. همچنین، تحقیقات [19] روی آمفیبولیت‌های شمال چاه زرد نشان داد که تفاوت‌های فشار و دما بین این مناطق وجود دارد. دیگر مطالعات ([20], [3]) که به بررسی زمین‌شناسی ناحیه انارک، جندق و پشت بادام پرداخته‌اند نشان دادند نهشته‌های دریایی این ناحیه به رانش اقیانوس پالئو-تتیس در شمال بلوک‌های طبس، یزد و البرز مرتبط هستند. در واقع بررسی فازهای مختلف کانی‌شناسی گرانیت‌ها، آمفیبولیت‌ها، شیست‌ها و متابازیت‌ها به درک عمیق‌تری از ماهیت دگرگونی در منطقه کمک کرده و به تبیین رویدادها و اتفاقات تکتونیکی مرتبط با فرورانش و بسته‌شدن اقیانوس تتیس در منطقه پرداخته است.

رخداد فرورانش پالئوتتیس و بسته‌شدن حوضه اقیانوسی آن در منطقه جندق (خاور اصفهان) نقش مهمی در تشکیل و شکل‌گیری واحدهای سنگی آذرین و دگرگونی آنها ایفا کرده است ([20]-[24]). لذا در این منطقه، پدیده‌های دگرگونی با اهمیتی به چشم می‌خورند. رخداد این دگرگونی‌ها به پرمین-ژوراسیک (۲۷۰-۱۸۳ میلیون سال پیش؛ [4]) و کربونیفر (۳۳۳ میلیون سال پیش؛ [20]) نسبت داده شده است. درون این سنگ‌های دگرگون در برخی نقاط آثاری از توده‌های گرانیتی دیده می‌شود که یکی از این رخنمون‌ها درون آمفیبولیت و شیست‌های منطقه چاه زرد دیده می‌شود (شکل ۱b). در این کمپلکس دگرگونی شواهد صحرایی اولیه گویای نفوذ گرانیت یادشده درون سنگ‌های دگرگونی مختلف (میکاشیست، آمفیبولیت و گنایس) هستند (شکل ۲).



شکل ۲. تصاویر صحرایی از نفوذ متاگرانیت درون سنگ‌های دگرگونی مختلف شمال منطقه چاه زرد در کمپلکس دگرگونی جندق

سن‌سنجی اورانیوم-سرب زیرکن توسط [3] سن گرانیت چاه‌زرد را ۲۱۵ میلیون سال پیش نشان می‌دهد که می‌تواند به سن نفوذ این گرانیت در دگرگونه‌ها نزدیک باشد. همچنین، [3] بر اساس داده‌های سن‌سنجی هورنبلندها در آمفیبولیت‌ها به روش Ar-Ar به سن ۱۵۷ میلیون سال پیش اشاره کرده است که می‌تواند گویای سن دگرگونی باشد که در نهایت همه این سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار داده است و گرانیت چاه‌زرد را به متاگرانیت تبدیل کرده است. زیرا بر اساس شواهد صحرایی رخداد یک فاز دگرگونی پس از نفوذ گرانیت موجب دگرگونی و دگرشکلی همه این سنگ‌ها و تشکیل ریزساختارهایی در ابعاد میکروسکوپی منطقه شده است. بررسی و مطالعه ویژگی‌های فابریکی و پتروگرافی این ریزساختارها در تحلیل شرایط دمایی رخداد دگرگونی موثر بر دگرگون شدن گرانیت چاه‌زرد بسیار اهمیت دارد. لذا یکی از اهداف این مطالعه پتروگرافی این سنگ‌ها به منظور برآورد شرایط دمایی دگرگونی است.

۳. روش انجام پژوهش

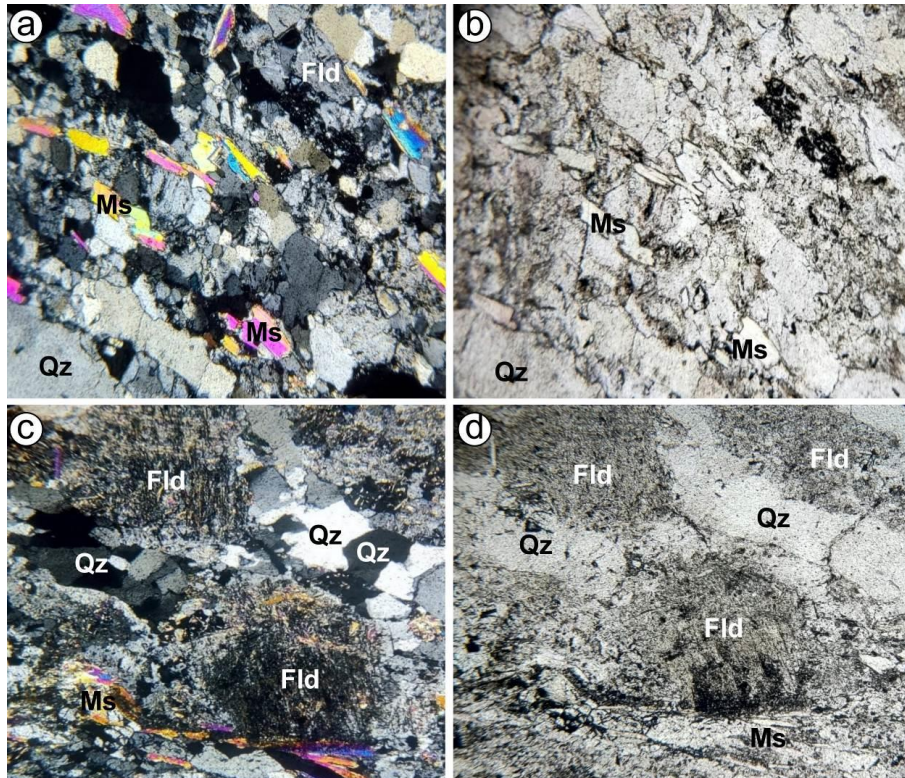
پس از بررسی پیشینه مطالعاتی منطقه، بازدید و بررسی‌های میدانی انجام شدند. در بازدید میدانی از رخنمون توده گرانیتی دگرگون چاه زرد در شمال جاده منتهی به معدن نمونه‌برداری‌های لازم انجام شد. از نمونه‌های سالم و با کمترین دگرسانی مقطع نازک در آزمایشگاه مقطع‌گیری دانشگاه تربیت مدرس مقطع نازک پتروگرافی تهیه شد. تلاش شد برش مقاطع به صورت عمود بر برگواری و موازی خطوارگی سنگ‌ها باشد تا بتوان در بررسی بافت‌های دگرریختی از آنها استفاده کرد. بررسی‌های سنگ‌نگاری و عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان در آزمایشگاه سنگ‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. نام اختصاری به کار رفته برای کانی‌ها از [25] برگرفته شده است. از نرم‌افزار CorelDraw برای پردازش و آماده‌سازی تصویرها استفاده شد.

۴. سنگ‌نگاری

کانی‌شناسی متاگرانیت‌های مورد مطالعه شامل کانی‌های اصلی کوارتز، فلدسپار و میکای سفید (مسکوویت) است (شکل‌های a^۳ و b^۳). البته در برخی نمونه‌ها بلورهایی از گارنت به عنوان کانی فرعی نیز دیده می‌شود. بافت این سنگ‌ها تحت‌تأثیر دگرشکلی، دچار جهت‌یافتگی شده است؛ به گونه‌ای که بلورهای کانی ورقه‌ای مسکوویت جهت‌یافته شده‌اند (شکل‌های a^۳ تا d^۳). مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهند کوارتز موجود در این سنگ‌ها دارای لبه‌های آمیبی و مضرس است و دارای خاموشی موجی می‌باشد (شکل‌های ۳ و ۴). شواهدی از رخداد مهاجرت مرز بلوری (GBM: Grain boundary migration) در حاشیه برخی از آنها دیده



می‌شود (شکل a۴). همچنین، در برخی کوارتزها تشکیل زیردانه (subgrain) در کوارتزها به‌خوبی دیده می‌شود (شکل a۳). همچنین، نوارهایی از تجمعات بلورهای کوارتزهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با جهت‌یافتگی ترجیحی و خاموشی موجی در آنها دیده می‌شود که گویای تغییر شکل انعطاف‌پذیر در این متاگرانیت‌هاست و جهت‌یافتگی ترجیحی شکل بلورهای کوارتز (SPO) با جهت‌یافتگی مسکوویت‌ها هم راستا است (شکل ۳).

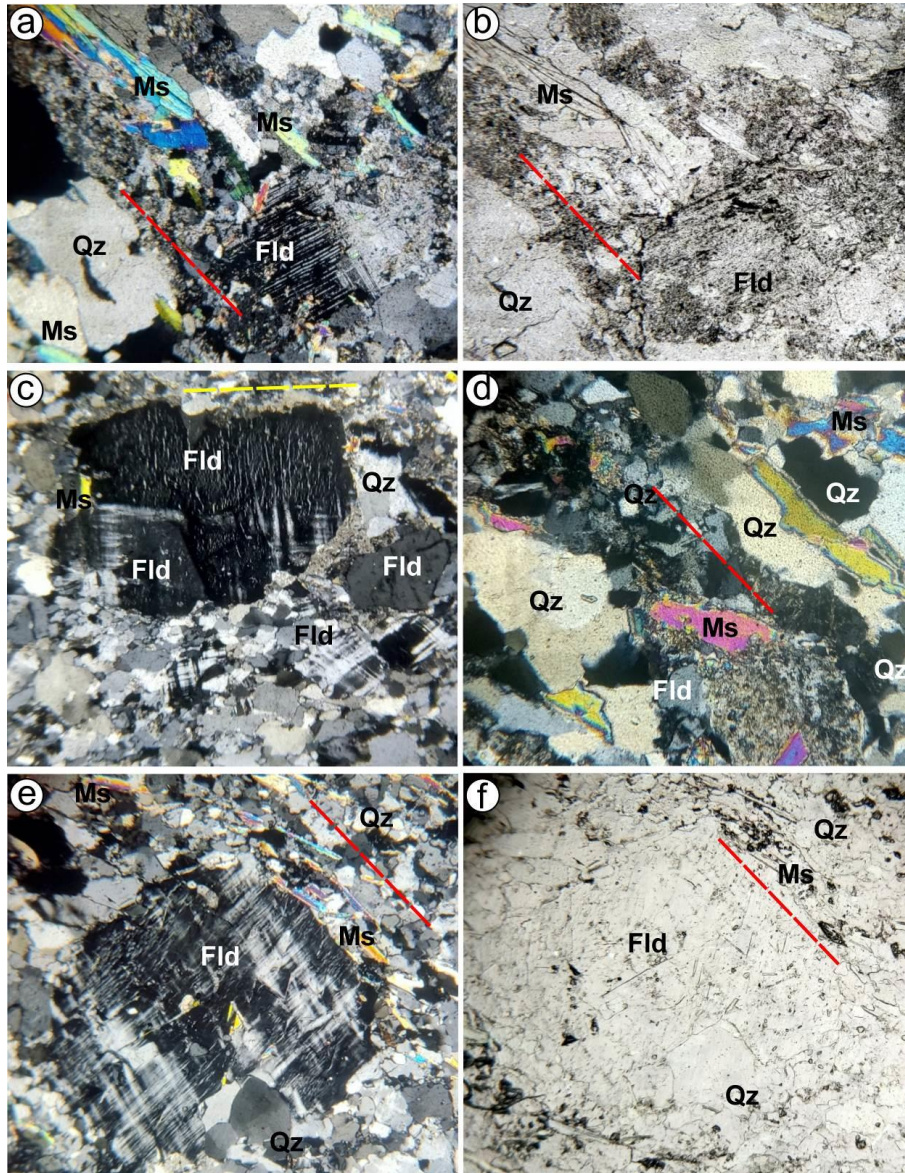


شکل ۳. (a و b) کانی‌شناسی و بافت جهت‌یافته با شیستوزیته ممتد در متاگرانیت چهارزد، (c و d) سریسیتی شدن فلدسپارها و جهت‌یافتگی تجمعات بلورهای کوارتز در امتداد جهت‌یافتگی مسکوویت‌ها (تصویر a و c در XPL و تصویر b و d در PPL)

فلدسپارها غالباً از نوع اورتوز هستند اما گاه فلدسپارهایی با ماکل پلی‌سینتتیک (پلاژیوکلاز) نیز در این سنگ‌ها دیده می‌شود. البته در مواردی ماکل درون این فلدسپارها به صورت ماکل پلی‌سینتتیک ناقص نوک تیز تا بخش‌های داخلی بلور امتداد یافته است که در این حالت ماکل آنها را ماکل دگرریختی می‌نامند (شکل a۴). فلدسپارها گاه شواهدی از دگرسانی به کانی‌های رسی و ادخال‌هایی از سریسیت نشان می‌دهند که به‌همین دلیل به‌خوبی از بلورهای کوارتزها قابل تشخیص هستند (شکل‌های c۳ و d۳). در لبه‌های بلورهای فلدسپارها آثار تشکیل بلورهای ریز به‌صورت پدیده BLG (bulging) دیده می‌شود (شکل ۴). علاوه بر این در برخی از آنها ماکل تارتان (شکل e۴ و f۴) در حال شکل‌گیری است و در بسیاری از آنها پرتیت شعله‌ای تشکیل شده است (شکل c۴) که جهت تیغه‌های آن عمود بر جهت‌یافتگی سنگ است و جهت بزرگ‌ترین تنش وارد بر سنگ را نشان می‌دهد. تشکیل میرمکیت به‌موازات جهت‌یافتگی سنگ و در حاشیه اورتوز جایی که بزرگ‌ترین تنش σ_1 وارد می‌شود نیز از دیگر ویژگی‌های بافتی این سنگ‌هاست (شکل ۵).



جهت‌یافتگی کانی ورقه‌ای و رابطه منقطع آن که موجب پیوستگی بلورهای کوارتز و فلدسپار در سنگ شده است مسکوویت موجب تشکیل برگواگی از نوع شیستوزیته ممتد (شکل ۳a) در سنگ شده است. در اطراف بلورهای مسکوویت‌های جهت‌یافته نیز تا حدودی بالجینگ (BLG) رخ داده است. برخی مسکوویت‌ها نیز ثانویه بوده و به‌علت دگرسانی فلدسپارها تشکیل شده‌اند.

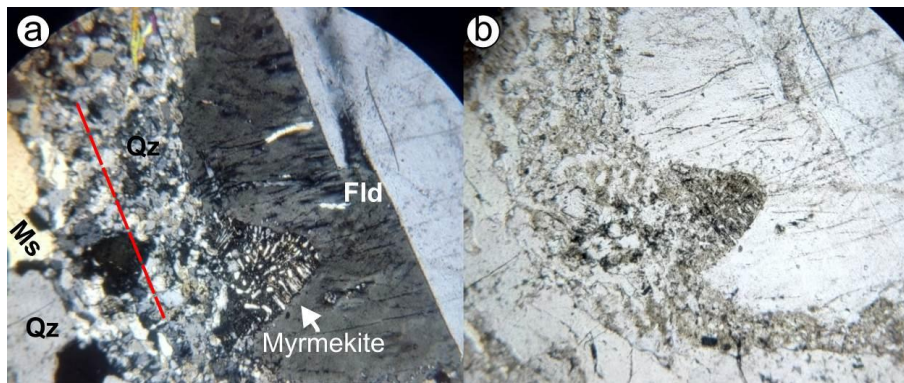


شکل ۴. a, b) بلورهای جهت‌یافته مسکوویت در زمینه‌ای از فلدسپارهای اورتوز سرسیستی شده و درشت‌بلور پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سینتتیک ناقص دگرریختی و کوارتزهای با مرز مضرس و آمیبی، c) فلدسپار با پرتیت شعله‌ای با تیغه‌های عمود بر جهت‌یافتگی سنگ و تشکیل میکروکلین با ماکل تارتان، d) بالجینگ (BLG) در اطراف بلورهای مسکوویت‌های جهت‌یافته و تشکیل زیردانه و حاشیه مضرس و آمیبی به‌علت GBM در کوارتزها، e) و f) تشکیل ماکل تارتان در فلدسپار (شکل b و f در PPL و بقیه در شکل XPL است)

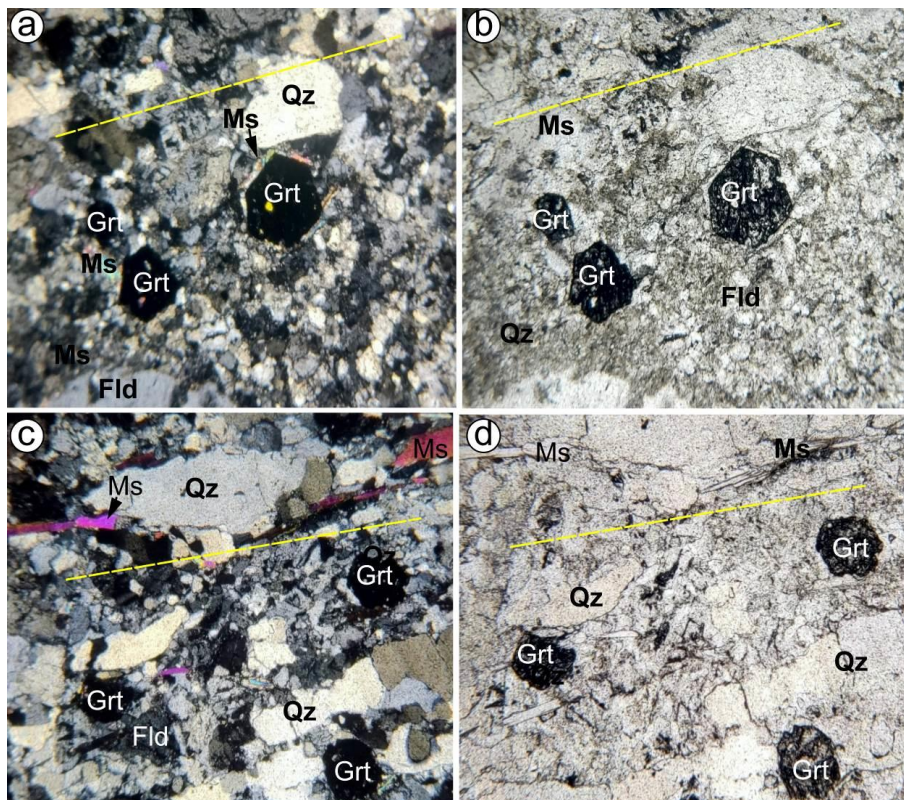
گارنت به‌عنوان یک کانی فرعی در برخی از نمونه‌ها یافت می‌شود. بر اساس شواهد پتروگرافی دانه‌های ریز گارنت‌ها را می‌توان به دو گروه اولیه ماگمایی و ثانویه دگرگونی تقسیم کرد. گروه اول که شکل‌دار اولیه و ماگمایی هستند اندکی سایه‌فشاری نشان می‌دهند و کانی‌های



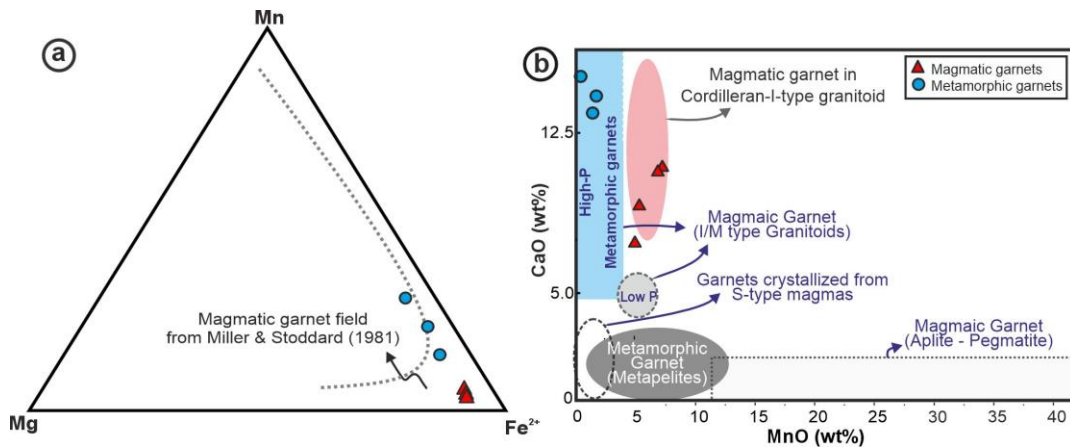
میکایی در اطراف آنها خمیده شده‌اند که نشان می‌دهد قبل از اینکه دگرشکلی و اعمال تنش رخ دهد و سنگ دچار جهت‌یافتگی شود این گارنت‌ها وجود داشته‌اند (شکل‌های a6 و b6). البته داده‌های میکروپروب این گارنت‌ها که قبلاً توسط [26] به دست آورده شده است نیز نشان می‌دهد این گارنت‌ها به گارنت درون گرانیت‌های نوع I شباهت بالایی دارند (شکل a7). در کنار این گارنت‌ها، گارنت‌های ثانویه نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با ادخال‌های از کانی‌های سازندهٔ زمینه و بدون سایه فشاری دیده می‌شوند که نشان می‌دهد این گارنت‌ها در هنگام یا پس از دگرریختی شکل گرفته‌اند لذا وضعیت و شکل کانی‌های دیگر به خصوص میکاها را تحت تاثیر قرار نداده‌اند (شکل‌های c6 و d6). بررسی داده‌های میکروپروب این گارنت‌ها که قبلاً توسط [26] به دست آورده شده است روی نمودار سه‌تایی $Mg-Mn-Fe^{2+}$ [27] نیز نشان می‌دهد این گارنت‌ها به گارنت‌های سنگ‌های دگرگونی فشار بالا (در حد رخساره آمفیبولیت) شباهت بالایی دارند (شکل b7).



شکل ۶: تشکیل میرمکیت در حاشیه اورتوز در بخش عمود بر بزرگ‌ترین تنش σ_1 و موازی جهت‌یافتگی سنگ



شکل ۶: (a و b) گارنت شکل‌دار اولیه و ماگمایی با سایه‌فشاری در کنار گارنت ثانویه نیمه‌شکل‌دار، (c و d) گارنت‌های دگرگونی و ثانویه بی‌شکل با ادخال‌های از زمینه و بدون سایه فشاری (تصویر a و c در XPL و تصویر b و d در PPL).



شکل ۷. ترکیب شیمیایی گارنت‌های درون متاگرانیت جندق (بر اساس داده‌های میکروپروپ به دست آمده برای گارنت توسط [26]) در (a) نمودار سه‌تایی $Mg-Mn-Fe^{2+}$ (در [27]) نمودار (b) در برابر CaO در برابر MnO [28].

۵. بحث

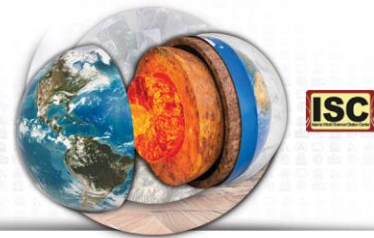
۱.۵. شرایط دما و فشار دگرریختی/دگرگونی

بر اساس مطالعات [29]، ویژگی‌های سنگ‌نگاری (مانند جهت یافتگی ترجیحی شکلی بلورها در مسکوویت و تجمعات کوارتز، ایجاد زیردانه و مهاجرت مرز دانه‌ها در کوارتز، میرمکتیزیشن عمود بر شیسستوسیت، پرتیت شعله‌ای در ارتوکلاز موازی با تنش اصلی نشان‌دهنده تأثیر دگرگونی و دگرریختی روی گرانیت مورد مطالعه است. به‌گونه‌ای که کانی‌های اولیه گرانیت مورد مطالعه تحت تأثیر میلیون‌ها سال نزدیک به زون‌های برشی مجاور قرار گرفته‌اند و به سنگ‌های پروتومیلونیتی تغییر شکل یافته و دگرگون شده شده‌اند که با بافت منسجم مشخص می‌شوند و از ماتریس کمتر از ۵۰ درصد حجم تشکیل شده‌اند.

جهت‌یافتگی ترجیحی، خاموشی موجی تشکیل مرزهای آمیبی و مضرس به‌علت مهاجرت مرزی دانه (GBM) و تشکیل زیردانه در بلورهای کوارتز (شکل ۴)، نشان می‌دهد کوارتزها در دمای نزدیک به ۵۵۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد دچار باز تبلور شده‌اند [29]. از سوی دیگر، پیدایش پرتیت شعله‌ای (شکل ۴a)، ماکل تارتان و تشکیل میرمکت در حاشیه اورتوزها (شکل ۵) که همی در ارتباط با دگرریختی و جهت‌یافتگی این سنگ‌ها هستند و همچنین حاشیه‌های دارای بالچینگ در فلدسپارها و حتی بالچینگ در حاشیه (شکل ۴d) مسکوویت گویای دمای دگرریختی/دگرگونی نزدیک به ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد است [30]، [29]. مرز همپوشانی این دو بازه دمایی دماهای نزدیک به ۶۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. علاوه بر این دما، نیز تشکیل گارنت‌های سین تکتونیک دگرگونی (شکل ۶) و ثانویه در دگرگونی فشار بالاست (شکل ۷).

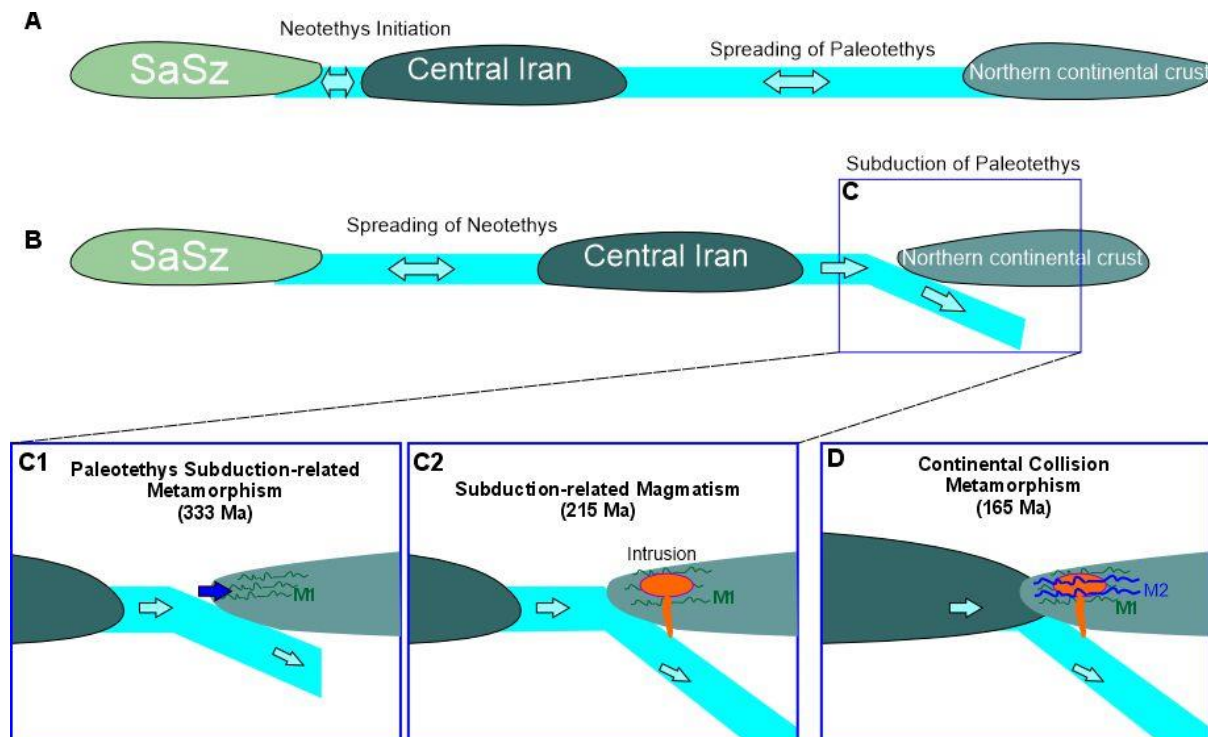
۲.۵. فرورانش پالئوتیس و رخداد دگرگونی ناحیه‌ای در شمال بلوک یزد

شواهد صحرایی و مطالعات پیشین نشان دادند که پیش از تشکیل گرانیت چاه‌زرد وقوع یک دگرگونی درجه بالا موجب تشکیل سنگ‌های دگرگونی (M1) در حد رخساره آمفیبولیت در کربونifer (۳۳۳ میلیون سال پیش؛ [31]) در این منطقه شده است [1]. این حادثه با باز شدن نئوتیس بین بلوک سنندج-سیرجان و ایران مرکزی تشدید شده است (شکل ۸a و ۸b). دماهایی که قبلاً توسط پژوهشگران دیگر برای دگرگونی سنگ‌های دگرگونی مجموعه سنگی جندق پیشنهاد شده است شرایط رخساره آمفیبولیت بالایی را نشان می‌دهند (مثل آمفیبولیت: حدود ۶۲۰-۶۷۰ درجه سانتیگراد / حدود ۸.۵-۱۱ کیلوبار [1]، [19]؛ متاپلیت: حدود ۴۰۰-۶۷۰ درجه سانتیگراد / حدود ۲-۶.۵ کیلوبار؛ [32]) که با روند دگرگونی باروین P/T متوسط و شیب زمین گرمایی $30^{\circ}C/km$ و ضخیم شدگی پوسته‌ای در مناطق فرورانش در ارتباط دانسته شده است [1] و احتمالاً به دگرگونی ناشی از آغاز فرایند فرورانش و آغاز بسته شدن پوسته اقیانوسی تیس مرتبط است (شکل ۸-۱c). در مطالعات [24] کنگلومرای چاه‌پلنگ (ژوراسیک بالایی - کرتاسه زیرین) در شرایط ناهم‌شیب روی همهٔ نفوذی‌ها و واحدهای دگرگونی قرار گرفته است.



پس از دگرگونی M1، یک واقعه ماگمایی در ۲۱۵ میلیون سال پیش [3] رخ داده و در نتیجه گرانیتهای چاهزرد به درون این دگرگونهها (M1) نفوذ کرده است (شکل ۸-۲) که شواهد آن در مطالعات صحرایی به خوبی مشاهده شد (شکل ۲). منشا و علت تشکیل این گرانیتهای هنوز مشخص نیست و در حال حاضر نویسندگان این مقاله در حال بررسی آن هستند.

سپس رخداد یک دگرریختی/دگرگونی (M2) دیگر همه این واحدها را دوباره دچار یک دگرگونی شدید کرده است (شکل ۸-۳). شرایط دما/فشار به دست آمده از بررسی متاگرانیتهای چاهزرد در این مطالعه نشان می‌دهد دگرریختی این گرانیتهای در شرایط دگرگونی باروین (در حد رخساره آمفیبولیت تا نزدیک به شیسیت آبی و چه بسا اکلوزیت) اتفاق افتاده است و با مناطق برخورد قاره‌ای تطابق دارد. بر اساس داده‌های سن‌سنجی $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ توسط [33]، زمان احتمالی وقوع این دگرریختی/دگرگونی جوان‌تر که گرانیتهای جندق را تحت‌تاثیر قرار داده است احتمالاً اوایل ژوراسیک بالایی (۱۶۳-۱۵۶ میلیون سال پیش) بوده است. بنابراین دما/فشار به دست آمده از مطالعه پتروگرافی متاگرانیتهای چاهزرد و نیز مطالعات پیشین [1] نشان می‌دهند در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی پالئوتتیس و سپس برخورد قاره‌ای در شمال بلوک یزد دست کم دو فاز دگرگونی ناحیه‌ای مهم در کربونیفر و اوایل ژوراسیک بالایی رخ داده است.



شکل ۸. مدل شماتیک از شکل‌گیری تا بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس بر اساس شواهد به دست آمده از مطالعه گرانیتهای چاهزرد و گمپلکس دگرگونی جندق

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحقیقات پیشین و بازبینی و بررسی‌های میدانی در منطقه، تحلیل پتروگرافی و میکروسکوپی نمونه‌های گرانیتهای چاهزرد توده گرانیتهای دگرگون چاه زرد انجام شد.

بر این اساس، ترکیب کانی‌شناسی اصلی این گرانیتهای شامل کوارتز، فلدسپار و میکاهای سفید (مسکوویت) است، اما در برخی نمونه‌ها گارنت‌های شکل‌دار نیز به عنوان یک کانی فرعی در آن شناسایی شد. بجز گارنت‌های ماگمایی شکل‌دار، گارنت‌های دگرگونی نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل در این سنگ‌ها دیده می‌شود که گویای شرایط دگرگونی فشار بالا هستند. در واقع شواهد میکروسکوپی نشان می‌دهد این گرانیتهای دچار دگرگونی/دگرریختی شده و به متاگرانیتهای تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که جهت‌یافتگی بلورهای کانی ورقه‌ای مسکوویت موجب پیدایش برگواری شیسیتوزیته ممتد در این گرانیتهای شده است. رخداد بازتبلور کوارتزها به صورت مهاجرت مرز بلوری



(GBM) و ایجاد لبه‌های آمیبی و مضرس، همچنین خاموشی موجی و تشکیل زيردانه در کوارتزها، تشکیل میرمکیت، پرتیت شعله‌ای و بالچینگ در حاشیه فلدسپارها و نیز بالچینگ در اطراف مسکوویت‌های گویای رخداد دگرریختی در دمای نزدیک به ۶۰۰ درجه سانتیگراد است.

تلفیق نتایج به‌دست آمده از این مطالعه با مطالعات قبلی نشان می‌دهد در طی فرورانش پالئوتتیس نخست یک فاز دگرگونی دما-فشار متوسط باروین در حد رخساره آمفیبولیت در حاشیه فعال قاره‌ای در کربونیفر رخ داده است. سپس ماگماتیسیم حاصل از این وقایع موجب تشکیل گرانیته چاه زرد در تریاس بالایی در میان این دگرگونه‌ها شده است. پس از آن برخورد قاره‌ای موجب یک دگرریختی/دگرگونی دما-فشار بالا شده است که گرانیته چاه‌زرد را به متاگرانیته تبدیل کرده است. بر اساس داده‌های سن‌سنجی موجود، زمان احتمالی این رویداد را می‌توان به ژوراسیک میانی نسبت داد.

این مطالعه نشان داد مطالعات میکروسکوپی و تفکیک و تفسیر رویدادهای دگرریختی/دگرگونی با ارائه اطلاعات ارزشمندی درباره گذشته زمین، می‌تواند به درک بهتر عملکرد زمین‌شناسی و ژئودینامیک منطقه کمک کند.

منابع

[۱] حیدریان منش، ع.، طباطبایی منش، س. م.، شیردشت زاده، ن.، سنگ‌نگاری و کاربرد شیمی کانی در دما-فشارسنجی آمفیبولیت‌های کمپلکس دگرگونی جندق: شاهدهی بر رویدادهای دیرینه‌زمین‌ساختی در ایران مرکزی، فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۲(۴)، ۱۱۹-۱۴۲. doi: 10.22071/gsj.2022.329201.1981.۱۱۹-۱۴۲

[2] Tabatabaeimanesh, S. M., Sharifi, M. 2011. Evaluation of thermodynamic condition (P-T) in formation of Jandaq metapelitic schists (North East of Isfahan province), *Petrol. J.*, 2, 81–92, doi: 10.1134/S0869591110030069.

[3] Bagheri, S., 2007. The exotic Paleo-Tethys terrane in Central Iran: new geological data from Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam areas, University of Leusanne, Switzerland.

[4] Romanko, E., Kokorin, Y., Krivyakin, B., Susov, M., Morozov, I., Sharkovski, M., Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran), Technoexport Report No. 19, Geological Survey of Iran, Tehran.

[5] Jamshidzaei, A., Torabi, G., Morishita, T., Tamura, A., 2021. Eocene dike swarm and felsic stock in Central Iran: Roles of metasomatized mantle wedge and Neo-Tethyan slab,” *J. Geodyn.*, 145, 101844, doi: 10.1016/j.jog.2021.101844.

[6] Muttoni, G. et al., 2015. The drift history of Iran from the Ordovician to the Triassic,” pp. 7–29.

[7] Castro, A., De Rosa, J. D., 1991. H-type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature, 31, 237–253.

[8] Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I- and S- type granites in the Lachlan Fold belt, *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 83, 1–26.

[9] ASTM, 2009. Standard Test Methods for Measurement of Gloss of High-Gloss Surfaces by Abridged Goniophotometry 1, 1–6, doi: 10.1520/E0430-11.2.

[10] Clemens, J. D., 2003. S-type granitic magmas — petrogenetic issues, models and evidence, *Earth-Science Rev.*, 61, 1–18.

[11] Chappell, B. W., White, A. J. R., Williams, I. S., Wyborn, D., 2004. Low- and high-temperature granites,” *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, 95(1–2), 125–140, doi: 10.1017/s0263593300000973.

[12] Chappell, B., 2010. Causes of variation in granite suites. 27-34. Abstract from *Magma to Minerlisation: The Ishihara Symposium*, Sydney.



- [13] Moyen J. F. et al., 2017. Collision vs. subduction-related magmatism: Two contrasting ways of granite formation and implications for crustal growth, *Lithos*, 277, 154–177, doi: 10.1016/j.lithos.2016.09.018.
- [14] Pearce, J. A. N. Harris, B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks, *J. Petrol.*, 25(4), 956–983, doi: 10.1093/petrology/25.4.956.
- [15] شیردشت‌زاده، ن.، ۱۳۹۶. پترولوژی و ژئوشیمی توده گرانیتوئیدی نوع S منطقه آیرکان (شمال خور، ایران مرکزی) و نقش آن در تشکیل کانسار رادیواکتیو چشمه شتری، اصفهان.
- [16] Samadi, R., Torabi, G., Dantas, E. L., Morishita, T., Kawabata, H., 2022. Ordovician crustal thickening and syn-collisional magmatism of Iran: Gondwanan basement along the north of the Yazd Block (Central Iran),” *Int. Geol. Rev.*, 64(15) 2151–2165, doi: 10.1080/00206814.2021.1972352.
- [17] Jazi, M. A. Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., 2012. Overview of the geochemistry and Rb/Sr, Sm/Nd isotopes of Middle Jurassic and Tertiary granitoid intrusions: a new insight on tectono-magmatism and mineralization of this period in Iran,” *J. Econ. Geol.*, 4(2), 171–198, doi: 10.22067/econg.v4i2.16489.
- [18] هاتف، م.، ۱۳۷۴. زمین شناسی و پترولوژی سنگهای آذرین و دگرگونی منطقه خور- جندق (ایران مرکزی)، دانشگاه اصفهان.
- [19] ترابی، ق.، ۱۳۸۶. تعیین شرایط فشار و دمای تشکیل آمفیبولیت‌های افیولیت جندق (شمال شرق استان)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۵(۱)، ۱۱۷–۱۳۴.
- [20] Bagheri, S., Stampfli, G. M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications,” *Tectonophysics*, 451(1–4), 123–155, doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.047.
- [21] Muttoni, G. et al., 2009. Opening of the Neo-Tethys Ocean and the Pangea B to Pangea A transformation during the Permian, 4, 17–48.
- [22] M. Mattei et al., “Neogene block rotation in central Iran: Evidence from paleomagnetic data Neogene block rotation in central Iran: Evidence from paleomagnetic data,” no. January, 2012, doi: 10.1130/B30479.1.
- [23] Berra, F. Zanchi, A. Malaspina, N. Javadi, H. R. Koohpeyma, M., 2014. Evidence for an Upper Palaeozoic North-Palaeotethyan succession in Central Iran: The Siah Godar Complex of Jandaq, 16, 0–1.
- [24] S. Zanchetta, A. Zanchi, F. Berra, and H. R. Javadi, “The Jandaq Complex in Central Iran: new insights on a Middle Jurassic orogenic event,” vol. 21, p. 15497, 2019.
- [25] Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, *Am. Mineral.*, 95, 1, 185–187, doi: 10.2138/am.2010.3371.
- [26] طباحیان، ف.، ۱۳۹۶. پترولوژی گرانیتوئیدهای کمپلکس دگرگونی جندق (ایران مرکزی، شمال شرق استان اصفهان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.
- [27] Miller, C., E. Stoddard, 1981. The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet: an example from the Old Woman Piute Range, California, *J. Geol.*, 89, 233–246.
- [28] Harangi, S. Z. et al., 2001. Almandine garnet in calc-alkaline volcanic rocks of the Northern Pannonian Basin (Eastern-Central Europe): geochemistry, petrogenesis and geodynamic implications, *J. Petrol.*, 42, 10, 1813–1843.



- [29] Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. Microtectonics. doi: 10.1007/3-540-29359-0.
- [30] Vernon, R. H., 2004, A Practical Guide to Rock Microstructure, doi: 10.1017/cbo9780511807206.
- [31] Bagheri, S., Stampfli, G. M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications, Tectonophysics, 451, 123–155, doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.047.
- [32] Tabatabaei Manesh, S. M., Sharifi, M., Romanko, A. 2010. P T Conditions of The Jandagh Metapelitic Schists, Northeastern Isfahan Province, Iran, Petrology, 18(3), 328–336.
- [33] Bagheri, S., Stampfli, G. M., 2003. The Paleotethys suture in Central Iran the Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications, doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.047.