

مجموعه کانیايي و دگرشکلي متاسديمنت‌ها و متابازيت‌هاي مجموعه توتک، جنوب شرق بوانات، استان فارس

اسماعيل مراديان تشنيزي^۱، ناهيد شبانيان بروجنی^{۱*}، عليرضا داوديان دهکردی^۱، حسين عزيزی^۲

۱- دانشکده منابع طبيعي و علوم زمين، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ايران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ايران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۶/۱۵)

چکیده: مجموعه ماگمایی- دگرگونی توتک بعنوان بخشی از کمربند بوانات در کمربند دگرگونی فشار بالا- دما پایین پهنا سنندج- سیرجان واقع است. مجموعه توتک از شیست‌ها، مرمها، گنیس گرانیتی، متاگرانیتوئید، متاآپلیت-گرانیت، آمفیبولیت‌ها و متادولریت با سن‌ها و درجه‌های دگرگونی و دگرشکلی متفاوت تشکیل شده است. با توجه به شواهد صحرایی، سنگ‌ها در سراسر مجموعه توزیع و پراکندگی یکنواختی ندارند و می‌توان مجموعه توتک را به دو زیرپهنا مرکزی و لبه‌ای تقسیم کرد. در زیرپهنا مرکزی، متاسدیمنت‌ها بیشتر بصورت شیست آهکی، میکاشیست، گارنت مسکویت-شیست، کوارتز-فلدسپات-شیست و انواع متابازیت‌ها شامل آمفیبولیت و گارنت-آمفیبولیت هستند. این در حالی است که در زیرپهنا لبه‌ای، متاسدیمنت‌ها بیشتر بصورت بیوتیت-اپیدوت-شیست و متابازیت‌ها شامل آمفیبول-شیست و آمفیبولیت هستند. ترکیب شواهد صحرایی و ریزساختاری در متاسدیمنت‌ها و متابازیت‌های هر دو زیرپهنا بیانگر رخداد دگرشکلی متناسب با دگرگونی در حد رخساره آمفیبولیت تا شیست‌سبز در زیرپهنا مرکزی و رخداد دگرشکلی متناسب با رخساره دگرگونی شیست‌سبز در زیرپهنا لبه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: مجموعه کانیايي، شیست و آمفیبولیت؛ دگرشکلی؛ مجموعه توتک؛ سنندج- سیرجان.

مقدمه

کمک بسزایی به درک فرایندهای دگرشکلی می‌کند [۲-۴]. البته فراگیرترین بافت در مقیاس دانه‌ای می‌تواند بیانگر درجه باز تبلوری باشد که از یک مرحله بحرانی فراتر رفته است [۲]. بنابراین، در مناطق با دگرگونی و دگرشکلی چندمرحله‌ای، بطور معمول شیب‌های بافت با شیب‌های باز تعادل دگرگونی همپوشی بالایی دارند؛ به بیان دیگر، دگرگونی غالب در مقیاس منطقه‌ای با فراگیرترین بافت در مقیاس دانه‌ای متناظر است [۲] و [۵]. از این‌رو، ترکیب شواهد صحرایی و رفتار بلورها در سنگ‌ها طی رخداد‌های دگرگونی و دگرشکلی نقش قابل توجهی در ارزیابی ریزساختارهای مختلف در سنگ‌ها و سرانجام بازسازی تاریخیچه دگرشکلی سنگ‌ها در یک منطقه دارد [۶].

در پهناهای برشی بعنوان جایگاه گسل عمیق، فرایند دگرشکلی بطور یکنواخت عمل نمی‌کند و ممکن است از بخشی به بخش دیگر با ظهور بافت‌های متفاوت در سنگ‌ها نمایان شود [۱]. تفکیک مناطق با فرایندهای دگرشکلی متفاوت ولی همزمان می‌تواند ابزار کلیدی برای فهم تکامل زمین‌ساختی-گرمایی مجموعه‌های دگرگونی که دستخوش چند فاز دگرشکلی و دگرگونی شده‌اند باشد [۲]. ارزیابی تغییر شکل در مقیاس دانه‌ای و یا عبارتی تشخیص جایگاه‌های ریزساختاری کانی‌ها از قبیل مکان‌های هسته‌زایی و رشد فازهای کانیايي جدید، بقایای کانی‌های حفظ شده و یا مکان‌هایی که در آن‌ها انحلال و مومسانی بین بلوری رخ می‌دهد

مجموعه‌های ماگمایی-دگرگونی توتک و سوریان در پهنه زمین‌ساختاری سنندج-سیرجان در چند کیلومتری شمال روراندگی اصلی زاگرس [۷]، دربردارنده انواع سنگ‌های رسوبی و ماگمایی هستند که در معرض فازهای دگرگونی بعدی بوده‌اند (شکل ۱). گسل مزایجان در جنوب و گسل سوریان در شمال با روندهای شما غرب-جنوب شرق (NW-SE) با سازوکار معکوس و مؤلفه راستا لغز راست‌بر مجموعه‌های توتک و سوریان را دربرگرفته‌اند [۸] (شکل‌های ۱ ب و پ). از پیامدهای عملکرد این پهنه‌های برشی می‌توان به ظهور چند نسل برگوارگی و خطوارگی بر سطح سنگ‌های رخنمون یافته در هر دو مجموعه اشاره کرد [۹، ۸]. احمدی و همکاران [۹] بر این باور هستند که وجود برخی بافت‌های دگرشکلی در میکاشیست‌ها همراه با برگوارگی غالب بر سطح آن‌ها، چون نوارهای S-C و چرخش زیگمایی برخی از پورفیری‌آواری‌ها نشان می‌دهد که این برگوارگی در طی اعمال یک فاز دگرشکلی برشی شکل‌پذیر بر هر دو مجموعه تشکیل شده‌است. از آنجا که ریزساختارهای دگرشکلی در متاسدیمنت‌ها و متابازیت‌ها مجموعه توتک تاکنون به دقت بررسی نشده‌اند، در این پژوهش با بررسی شواهد صحرایی، ترکیب کانیایی و ارزیابی رفتار کانی‌شناسی شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها در آزمایش‌های سنگ‌نگاری و مقایسه آن‌ها با هم، سرانجام شرایط دگرشکلی این سنگ‌ها در مجموعه توتک تعیین شده‌است.

موقعیت زمین‌شناسی

منطقه مورد بررسی در استان فارس، در غرب روستای توتک از توابع شهر سوریان و در ۳۰ کیلومتری شرق بوانات و شمال شرق روستای مزایجان با عرض جغرافیایی $30^{\circ} 10'$ تا $30^{\circ} 35'$ شمالی و طول جغرافیایی $53^{\circ} 20'$ تا $54^{\circ} 00'$ شرقی، واقع است (شکل ۱ ب). مجموعه ماگمایی-دگرگونی توتک بعنوان بخشی از کمربند بوانات در لبه شمال شرقی بخش جنوبی کمربند دگرگونی فشار بالا-دما پایین پهنه سنندج-سیرجان قرار دارد [۷] (شکل ۱ الف). پهنه سنندج-سیرجان با روند NW-SE در کمربند کوهزایی زاگرس از ناآرام‌ترین و به بیانی فعال‌ترین پهنه‌های زمین‌ساختاری ایران است که از پرکامبرین تا سنوزوئیک فازهای مختلف ماگمایی، دگرگونی و دگرشکلی را پشت سر گذاشته است [۱۰، ۱۱]. بیشتر رخدادهای دگرگونی در این پهنه را به فرورانش و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس مربوط دانسته و آن‌ها را به مزوزوئیک نسبت داده‌اند [۱۲]. در

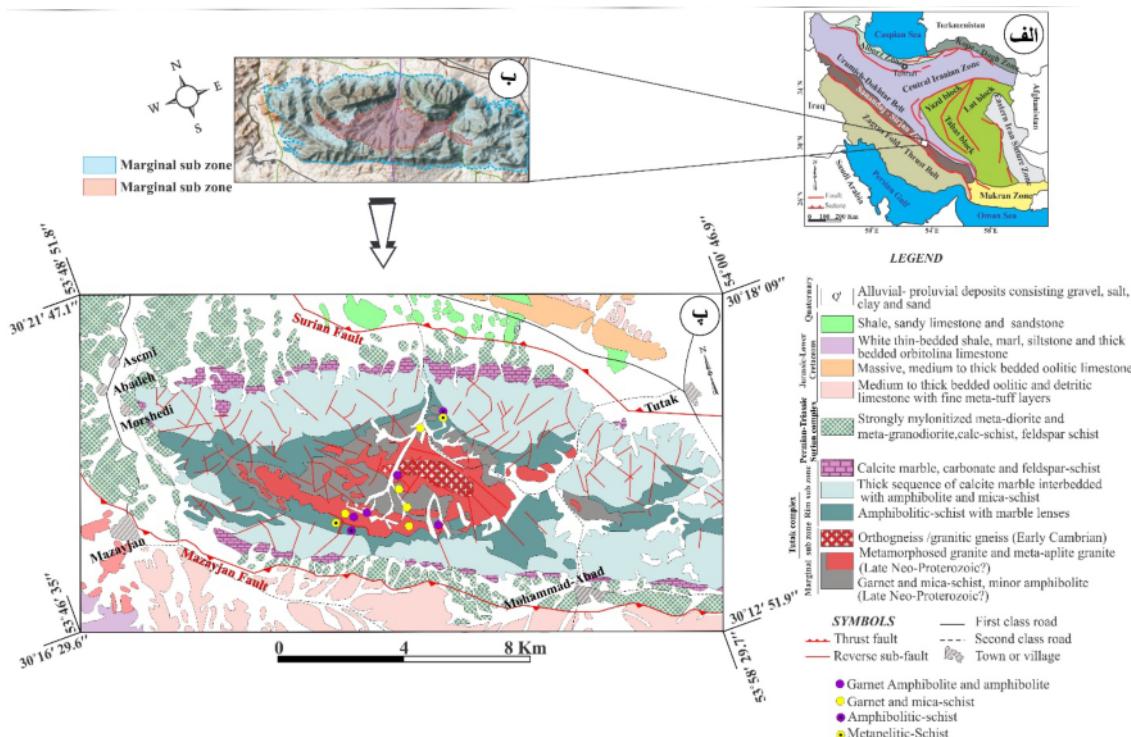
این راستا، آخرین فاز ماگمایی-دگرگونی در پهنه سنندج-سیرجان را به برخورد بین صفحه‌های عربی و اوراسیا نسبت می‌دهند [۱۳-۱۵]. سنگ‌های دگرگونی چون انواع گنیس‌ها، شیست‌ها، مرمرها و متاسامیت‌های برآمده از سنگ‌های مادر آتشفشانی، رسوبی و آذرین نفوذی در سراسر این پهنه زمین-ساختاری، اغلب دستخوش فازهای دگرگونی مهم در حد رخساره‌های شیست سبز تا آمفیبولیت [۱۶] و حتی رخساره اکلویت [۱۱، ۱۷] و رخساره دگرگونی شیست آبی با شواهدی از دگرگونی قهقرایی در حد رخساره شیست سبز [۱۸] شده‌اند. مجموعه‌های ماگمایی-دگرگونی توتک و سوریان بعنوان بخشی از این پهنه زمین‌ساختاری انواع واحدهای سنگی دگرگونی با سن اواخر نئوپروتروزوئیک تا تریاس را دربرمی‌گیرند (شکل ۱). دگرگونی و دگرشکلی سنگ‌های رخنمون یافته در مجموعه توتک نیز طی همگرایی بین قاره افریقا-عربی با خردقاره ایران رخ داده است و برونزد این سنگ‌ها یک پنجره ساختاری در کمربند کوهزایی زاگرس را به نمایش می‌گذارند [۱۹]. انواع سنگ‌های دگرگون و دگرشکل شدهی رخنمون یافته در مجموعه توتک را می‌توان بر اساس نوع سنگ مادر به دو دسته با خاستگاه آذرین و رسوبی تقسیم نمود. در این تقسیم‌بندی، گنیس گرانیتی (ارتوگنیس)، متاگرانیتوئید و متاآپلیت-گرانیت-ها، متادلریت‌ها و آمفیبولیت‌ها سنگ‌های دگرگون و دگرشکل شده با خاستگاه آذرین فلسیک و بازیگ و شیست‌ها و مرمرها از سنگ‌های دگرگون و دگرشکل شده با خاستگاه رسوبی محسوب می‌شوند. بر اساس نظر هوشمندزاده و همکاران [۲۰]، مجموعه توتک در معرض دو فاز دگرگونی نوع باروین (فشار متوسط) دربرگیرنده دگرگونی رخساره آمفیبولیت در ارتباط با رخدادهای کوهزایی سیمین پیشین (تریاس میانی-پسین) و دگرگونی رخساره شیست سبز مربوط با کوهزایی سیمین پسین بوده است. این درحالی است که نتایج سن‌سنجی آرگون-آرگون انجام شده بر کانی مسکویت سن دگرگونی ژوراسیک (۱۸۰ میلیون سال) را برای مجموعه توتک ارائه می‌دهد [۷]. احمدی و همکاران [۹] بر این باور هستند که نتایج دما-فشارسنجی مجموعه‌های کانیایی گارنت-بیوتیت و مسکویت در شیست‌های مجموعه توتک گویای آغاز دگرگونی در دمای ۴۲۳ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۶ کیلوبار (رخساره دگرگونی شیست‌سبز) و رخداد اوج دگرگونی در دمای ۷۰۸ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵/۹ کیلوبار (رخساره دگرگونی

زیرپهنه مرکزی، گنیس‌های گرانیتی اوائل کامبرین [۲۱]، متاگرانیتوئیدها و متاآپلیت-گرانیت‌ها همراه با میکاشیست‌های دربردارنده میان‌لایه‌های آمفیبولیت دیده می‌شوند (شکل‌های ۲ الف و ب). در پاره‌ای از رخنمون‌ها، آمفیبولیت‌ها و شیست‌ها با گنیس‌های گرانیتی دربرگرفته شده‌اند، درحالی‌که مرز مشخصی بین آن‌ها وجود ندارد (شکل ۲ ب و پ). در سنگ‌های این زیرپهنه بطور محلی شبه دایک‌های متادلریتی با طول و ضخامت متغیر نفوذ کرده‌اند که می‌تواند بیانگر سن جوان‌تر متادلریت‌ها نسبت به سایر سنگ‌ها باشد. اغلب سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه (از جمله میکاشیست‌ها، آمفیبولیت‌ها و گنیس‌ها) در اثر عوامل دگرشکلی و زمین‌ساخت دارای برگواره هستند و چین‌خورده‌اند (شکل‌های ۲ ت و ث). در این زیرپهنه، شدت تنش بیشتر بوده و این امر منجر به جدایش دگرگونی افزون بر برگوارگی، و شکل‌گیری نوارهای تیره و روشن (ساخت گنیسی) در گنیس‌های گرانیتی شده است. گارنت-میکاشیست‌ها نسبت به سایر شیست‌ها در این زیرپهنه فراوانی کمتری دارند (شکل ۲ ج).

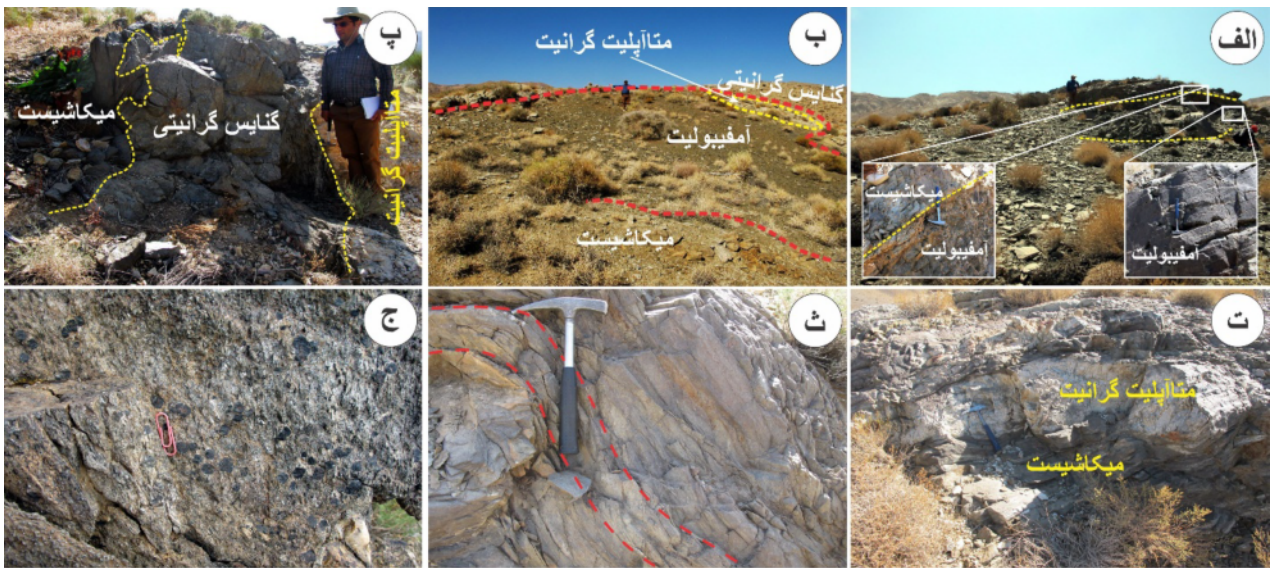
آمفیبولیت) روی شیست‌ها در این مجموعه هستند. به تازگی پژوهش بندخت و همکاران [۲۱] پیرامون فعالیت ماگمایی مجموعه توتک بر اساس سن‌سنجی به روش U/Pb کانی زیرکن بر گنیس‌های گرانیتی (ارتوگنیس) این مجموعه بیانگر سن 4 ± 535 میلیون سال برای تبلور سنگ آنهاست که آن‌ها را به فعالیت ماگمایی نوع-کمان کادومین در کرانه شمالی گندوانا در طول ادیاکاران نسبت داده‌اند. آن‌ها بر این باورند که با توجه به شدت اثر مراحل دگرشکلی بعدی، شواهد زمین‌ساختی مربوط به فاز کوهزایی کادومین در این سنگ‌ها از بین رفته است و به احتمال بسیار طی فازهای کوهزایی در ارتباط با دگرگونی نتوتیس دچار دگرگونی شده و به گنیس‌گرانیتی تغییر یافته‌اند [۲۱].

روابط صحرایی و سنگ‌شناسی

با در نظر گرفتن روابط سنگ‌ها و تفاوت سنگ‌شناسی واحدهای سنگی از نظر درجه دگرگونی و دگرشکلی و تفاوت سن سنگ مادر در سنگ‌های تشکیل دهنده مجموعه توتک می‌توان مجموعه توتک را به دو زیرپهنه مرکزی و لبه‌ای تقسیم کرد (شکل‌های ۱ ب و پ) که در ادامه توضیح داده می‌شوند. در



شکل ۱ الف) موقعیت منطقه مورد بررسی بر نقشه زمین‌ساختاری ایران برگرفته از مرجع [۲۲]. ب) تصویر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) از موقعیت زیرپهنه مرکزی و زیرپهنه لبه‌ای در مجموعه توتک. پ) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه [۲۳] برگرفته از مرجع با تغییرات. موقعیت متاسدیمنت‌های مورد بررسی با دایره‌های زرد رنگ و موقعیت متابازیت‌های مورد بررسی با دایره‌های بنفش رنگ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲. رخنمون آمفیبولیت و میکاشیست در زیرپهنه مرکزی: الف) میان‌لایه آمفیبولیت در میکاشیست‌ها، ب) گنیس‌گرانیته و متاآپلیت-گرانیت در همبری با آمفیبولیت و میکاشیست، پ) همبری متاآپلیت-گرانیت، گنیس‌گرانیته و میکاشیست، ت) میکاشیست و نفوذ متاآپلیت-گرانیت در آن، ث) چین‌خوردگی و برگوارگی در میکاشیست و ج) درشت بلورهای گارنت در گارنت-میکاشیست.

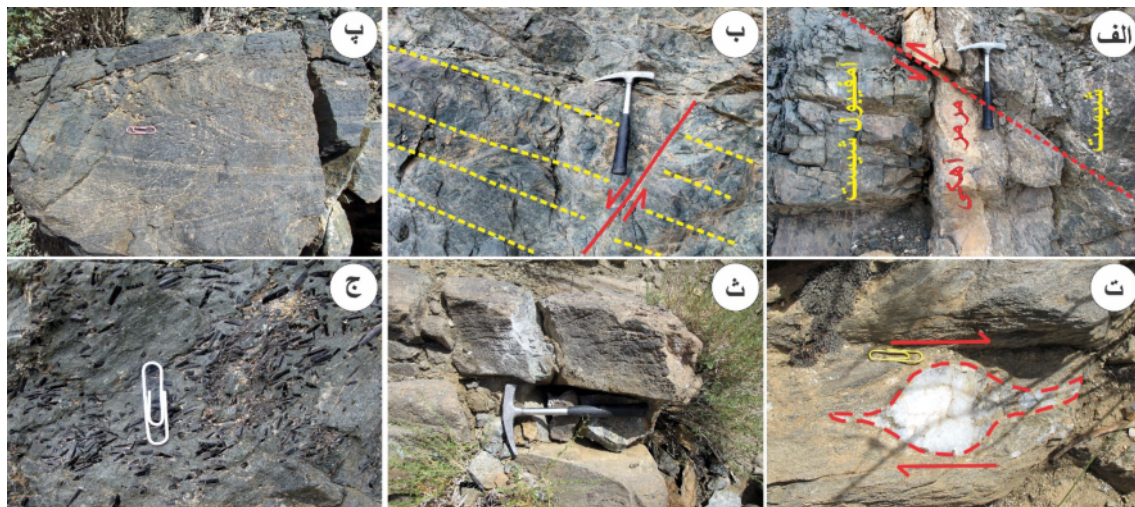
از گارنت دیده می‌شوند (شکل ۳ ج). این در حالی است که در بیشتر زیرپهنه لبه‌ای، شیست‌های خاکستری ریزدانه‌ای قابل تشخیص هستند که بصورت بین‌لایه‌ای و متناوب با مرمرا، آمفیبول-شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها رخنمون یافته‌اند (شکل‌های ۳ الف و ث).

متابازیت‌ها (آمفیبولیت‌ها) نسبت به سایر سنگ‌های دگرگونه با خاستگاه آذرین در مجموعه پراکندگی محدودتری دارند و با توجه به شواهد صحرایی، به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول شامل آمفیبولیت‌ها و گارنت-آمفیبولیت‌های متوسط تا ریزدانه با رنگ سبز تا سبز-خاکستری هستند که اغلب بصورت برگواره‌دار در زیرپهنه مرکزی رخنمون یافته‌اند. این دسته از آمفیبولیت‌ها همراه با میکاشیست‌ها در همبری با گنیس‌های گرانیته و متاآپلیت-گرانیت‌ها قرار دارند (شکل ۲ ب). دسته دوم شامل آمفیبول-شیست‌ها و بندرت آمفیبولیت‌های بسیار ریز تا ریزدانه با رنگ سبز هستند که بصورت بین‌لایه‌ای با مرمرا و شیست‌های ریزدانه با برگواره ضعیف‌تر نسبت به شیست‌ها در زیرپهنه مرکزی، در بخش‌های بالایی زیرپهنه لبه‌ای و در گوشه شمال‌غربی مجموعه رخنمون دارند (شکل‌های ۳ الف و ب). کانه‌زایی تورمالین بصورت منشوری-شکل، درشت‌بلور و سیاه‌رنگ به مقدار کم در آمفیبول-شیست‌ها دیده می‌شود (شکل ۳ ج).

در زیرپهنه لبه‌ای، تناوبی از میکاشیست و شیست ریزدانه همراه با میان‌لایه‌هایی از آمفیبولیت، آمفیبول-شیست و مرمراهای آهکی دیده می‌شود که این تناوب بتدریج به سمت بالا به مرمراهای ضخیم‌لایه دربردارنده سنگواره‌های دونین تا اوائل کربونیفر می‌رسد [۲۴] (شکل ۳ الف). مانند سایر سنگ‌ها در مجموعه توتک، شواهد ساختاری چون برگوارگی، خطواره-گی، چین‌خوردگی، گسل‌خوردگی و بندرت پورفیری آواری‌های سیلیسی جهت‌یافته متأثر از فازهای دگرگونی و دگرشکلی منطقه کم و بیش بر سطح سنگ‌های رخنمون یافته در این زیرپهنه نمایان هستند (شکل‌های ۳ ب-ت). در ادامه شواهد دگرگونی و دگرشکلی سنگ‌های رخنمون‌یافته در مجموعه توتک متأثر از این فازها با تمرکز بر شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها بررسی می‌شود.

شواهد صحرایی شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها

متاسدیمنت‌ها (شیست‌ها) نسبت به سایر سنگ‌های موجود در مجموعه گسترش و فراوانی بیشتری داشته، و از نظر حجم، گستردگی و پراکنش بیشترین مقدار را دارند. در زیرپهنه مرکزی، اغلب شیست‌ها بصورت شیست آهکی، میکاشیست، گارنت-مسکویت-شیست و کوارتز-فلدسپاتی-شیست هستند. در نمونه دستی، این دسته از شیست‌ها بصورت ریز تا متوسط-دانه، به رنگ خاکستری مایل به قهوه‌ای همراه با آثاری پراکنده



شکل ۳ رخنمون شیست‌های ریزدانه، آمفیبولیت و آمفیبول-شیست‌ها در زیرپهنه لیه‌ای (الف) تناوبی از مرمر آهکی، شیست ریزدانه و آمفیبول-شیست که دستخوش گسلش معکوس شده، (ب) برگواره در سطح رخنمون آمفیبولیت ریزدانه، (پ) ریزچین در آمفیبول-شیست‌ها، (ت) پورفیری آواری سیلیسی جهت‌یافته با حرکت راست‌بر در شیست، (ث) نمای نزدیک از شیست‌های ریزدانه و (ج) درشت بلورهای تورمالین در آمفیبول-شیست.

روش بررسی

بمنظور مطالعات سنگ‌شناسی، طی پیمایش‌های صحرایی، واحدهای سنگی رخنمون یافته از نظر روابط و شواهد صحرایی بررسی شدند و تعداد ۸۰ نمونه از سنگ‌های دگرگونی شیست و آمفیبولیت موجود در هر دو زیرپهنه برداشت گردید. سپس از بین نمونه سنگ‌های برداشت شده با کمترین میزان هوازدگی و دگرسانی تعداد ۶۰ مقطع نازک برای بررسی دقیق‌تر و سنگ نگاری تهیه شد.

سنگ نگاری

الف- شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها در زیرپهنه مرکزی

شیست‌ها اغلب از یک زمینه ورقه شکفتی تا ورقه دانه شکفتی تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵). کانی‌های اصلی این سنگ کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی، بیوتیت، مسکویت فنزیتی و گارنت هستند و کانی‌های فرعی از تیتانیت، کلریت، اپیدوت (کلینوزویت)، روتیل و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. کانی‌های بیوتیت و مسکویت برگوارگی اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. گستره برگوارگی (حوزه M) از کانی‌های میکا (بیوتیت و مسکویت) و گستره میکرولیتون (حوزه Q) از کانی‌های کوارتز، فلدسپار قلیایی و پلاژیوکلاز تشکیل شده است. در برخی مقاطع، برگوارگی اصلی سنگ بصورت تقریباً موازی و در برخی دیگر، از نوع فاصله‌دار با شکل ناهموار و شاخه‌ای (شکل‌های ۴ الف- پ). در این راستا، برگوارگی شکنجی و بافت دگرشکلی S-C نیز دیده می‌شود (شکل ۴ پ).

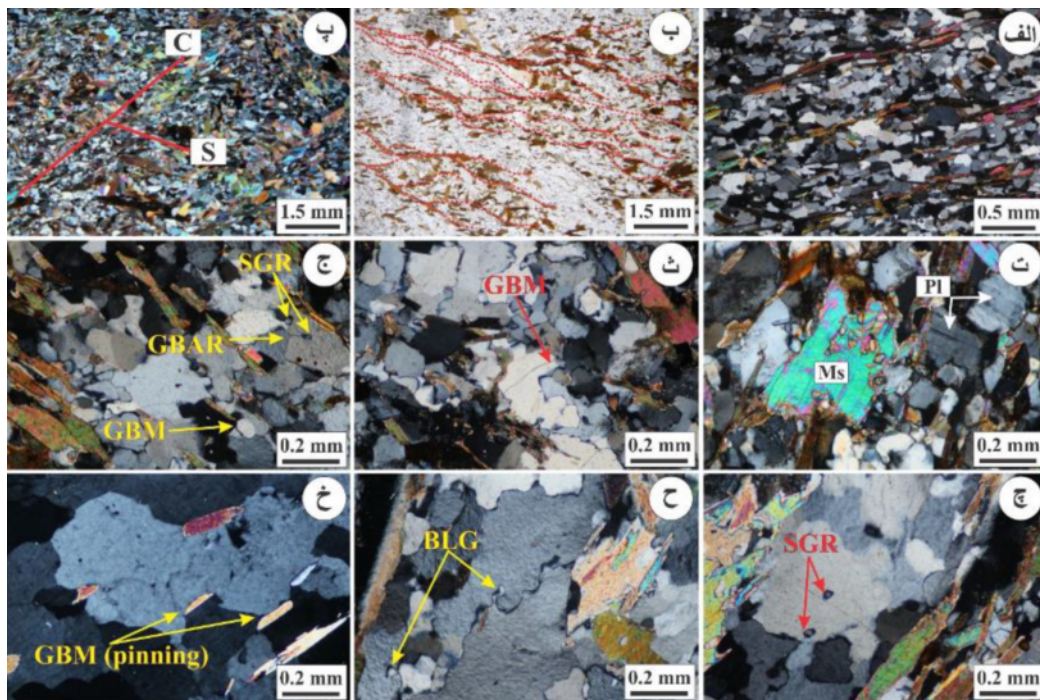
بلورهای کوارتز بصورت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار اغلب با مرزهای آمیبی و بندرت چندگوشی در اندازه متغیر از ریز تا متوسط بلور از فراوان‌ترین بلورهای تشکیل دهنده زمینه هستند. در دانه‌های کوارتز، خاموشی موجی (undulose extinction) و باز تبلور پویا به شکل برآمده (BLG)، چرخش ریزدانه (SGR)، مهاجرت مرز دانه‌ای (GBM) دیده می‌شود (شکل‌های ۴ ت-خ). ریزساختار مهاجرت مرز دانه سنجاق شده (pinning) در مرز بلورهای فلدسپار گاهی به چشم می‌خورد (شکل ۴ خ). بلورهای فلدسپار (پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی) بصورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل در اندازه ریز تا متوسط بلور هستند که در بین کوارتزهای باز تبلور یافته در زمینه دیده می‌شوند، در حالی که اغلب به سرسیت تجزیه شده‌اند (شکل ۴ ت). مهاجرت مرز دانه پنجره‌ای به سمت کانی میکا با مقاومت کمتر از شواهد دگرشکلی در فلدسپارهاست (شکل ۵ الف). از بافت‌های دگرشکلی موجود در پلاژیوکلازها می‌توان به ماکل-های چندریخت خمیده و نوک تیز، نوارهای دگرشکلی پیچ-خورده و خاموشی موجی اشاره کرد (شکل‌های ۵ ب- ت) همچنین در برخی کانی‌ها چون کلریت، شواهد خمیدگی و پیچ‌خوردگی نیز دیده می‌شود (شکل ۵ ث). کانی بیوتیت اغلب به شکل ورقه‌ای در اندازه ریز تا متوسط بلور به چشم می‌خورد و فراوانی کمی در زمینه دارد (شکل ۵ ج). این کانی اغلب دارای یک دسته رخ خوب با چند رنگی قهوه‌ای روشن تا قهوه-ای تیره موازی با برگوارگی اصلی سنگ است. در برخی نمونه‌ها، بیوتیت‌ها دارای سوزن‌های متقاطع روتیل با زاویه حدود ۶۰

شدن هستند. اپیدوت به دو صورت اپیدوت و کلینوزوئیت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل با فراوانی بسیار کم بصورت پراکنده در زمینه سنگ و همچنین پیرامون بلورهای گارنت دیده می‌شود (شکل‌های ۵ ح و خ).

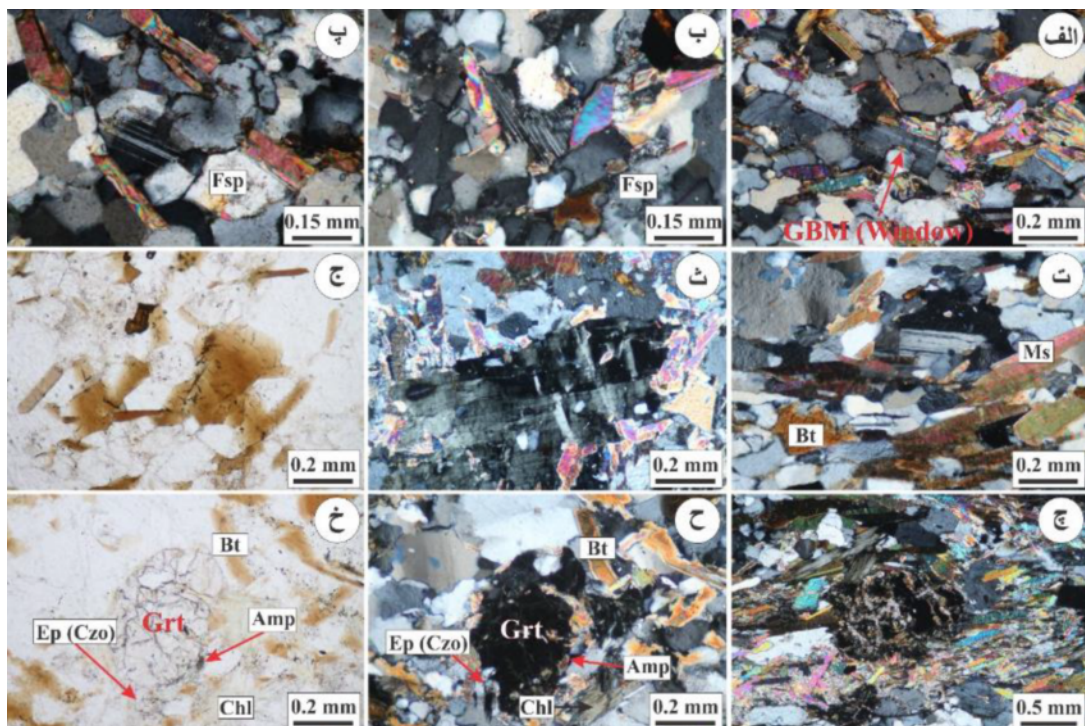
در برخی شیست‌ها، بلورهای گارنت شکل‌دار تا نیمه‌شکل-دار در اندازه متوسط تا درشت بلور با فراوانی بسیار کم و دارای شکستگی بصورت متقاطع و گاه کششی و عمود بر برگواره دیده می‌شوند. بیشتر شکستگی‌ها با کانی‌های بیوتیت و کلسیت پر شده‌اند (شکل ۵ چ). این گروه از شکستگی‌ها می‌توانند برآمده از یک سازوکار خارجی به احتمال بسیار کشش افقی ناشی از بالا آمدن و سرد شدن سرزمین دگرگونی باشند [۲۷]. همچنین در بخش‌هایی، تجزیه کانی گارنت به آمفیبول و اپیدوت از درون به سمت لبه دیده می‌شود (شکل‌های ۵ ح و خ). کلریت بصورت انبوه‌های سبز تا خاکستری رنگ، رشته‌ای و گاه شعاعی درون شکستگی‌های کانی گارنت و روی کانی بیوتیت دیده می‌شود که می‌تواند بیانگر عملکرد دگرگونی پس‌رونده بر سنگ‌های مورد بررسی باشد.

درجه در سطح خود هستند که به اصطلاح ایجاد بافت سازنیتی کرده‌اند (شکل ۵ ج). این بیوتیت‌ها به نسبت سالم و بدون خاموشی موجی هستند. به باور شاو و همکاران [۲۵]، تشکیل میانبارها یا سوزن‌های روتیل در بیوتیت سازنیتی می‌تواند در اثر یک فاز دگرگونی جدیدتر باشد. بیوتیت سازنیتی طی فرایند شکست یک بیوتیت غنی از تیتانیوم و کلسیم (بیوتیت تشکیل شده در شرایط دما بالا) و تبدیل آن به بیوتیت تهی از عناصر تیتانیوم و کلسیم طی دگرگونی جایی که بیوتیت غنی از عناصر تیتانیوم و کلسیم دیگر پایدار شکل می‌گیرد، نیست.

مسکویت فنزیتی بصورت ورقه‌ای در اندازه ریز تا متوسط-بلور با فراوانی کم دیده می‌شود (شکل‌های ۵ ت، ث و چ)، درحالی‌که در بخش‌هایی از لبه در حال جایگزین شدن با بیوتیت است. در این راستا، بقایایی از آن نیز در درشت بلورهای بیوتیت دیده می‌شود. از شواهد دگرشکلی در بیوتیت‌ها و مسکویت‌ها می‌توان به خاموشی موجی، خمیدگی و شکنجی اشاره نمود. بلورهای سوزنی شکل روتیل در اندازه ریز کمابیش در شیست‌ها دیده می‌شوند که اغلب از لبه در حال ایلمنیتی



شکل ۴ الف) بافت ورقه شکفتی تا ورقه دانه شکفتی و برگواره موازی در شیست‌ها (در نور قطبیده متقاطع، XPL). ب) برگواره شاخه‌ای (در نور قطبیده صفحه‌ای، PPL). پ) بافت دگرشکلی S-C (XPL). ت) حضور کانی‌های کوارتز باز تبلور یافته و سرسیتی شدن در راستای ماکل‌های پلاژیوکلاز (XPL). ث) مهاجرت مرزدانه‌های دانه‌های کوارتز (XPL). ج) مهاجرت مرزدانه‌های و چرخش ریزدانه و مرزهای چندگوشی (XPL). چ) ریزساختار چرخش ریزدانه (XPL). ح) ریزساختار برآمدگی مرز دانه‌ها (XPL). خ) ریزساختار مهاجرت مرزدانه سنجاق شده (XPL). همه نشانه‌های اختصاری بکار رفته برای کانی‌ها براساس مرجع [۲۶] هستند. Ms: مسکویت و PI: پلاژیوکلاز.



شکل ۵ الف) مهاجرت مرز دانه‌های (GBM) در کانی پلاژیوکلاز (XPL). ب و پ) ماکل دگرشکلی نوک تیز شده در کانی پلاژیوکلاز و حضور فلدسپات‌های سریسیتی شده (XPL). ت) ماکل‌های دگرشکلی و خاموشی موجی در کانی پلاژیوکلاز (XPL). ث) نوارهای دگرشکلی پیچ‌خورده در کانی کلریت (XPL). ج) بافت ساژنیتی دربردارنده سوزن‌های روتیل در کانی بیوتیت (PPL). چ) حضور مسکویت فنژیتی و گارنت دارای شکستگی‌های متقاطع و کششی عمود بر برگواره (XPL). ح و خ) کانی گارنت در حال تجزیه به آمفیبول و اپیدوت بترتیب در XPL و PPL. (Fsp = فلدسپار، Ms = مسکویت، Bt = بیوتیت، Grt = گارنت، Amp = آمفیبول، Ep = اپیدوت، Czo = کلینوزوئیزیت، Chl = کلریت).

حالت موج‌دار هستند که از نظر ریخت شناسی ماکل از نوع مکانیکی محسوب می‌شوند [۲۸] (شکل‌های ۶ پ و ت). افزون بر سریسیتی‌شدن، میانبارهایی از اپیدوت و زوئیزیت نیز در آن‌ها دیده می‌شود.

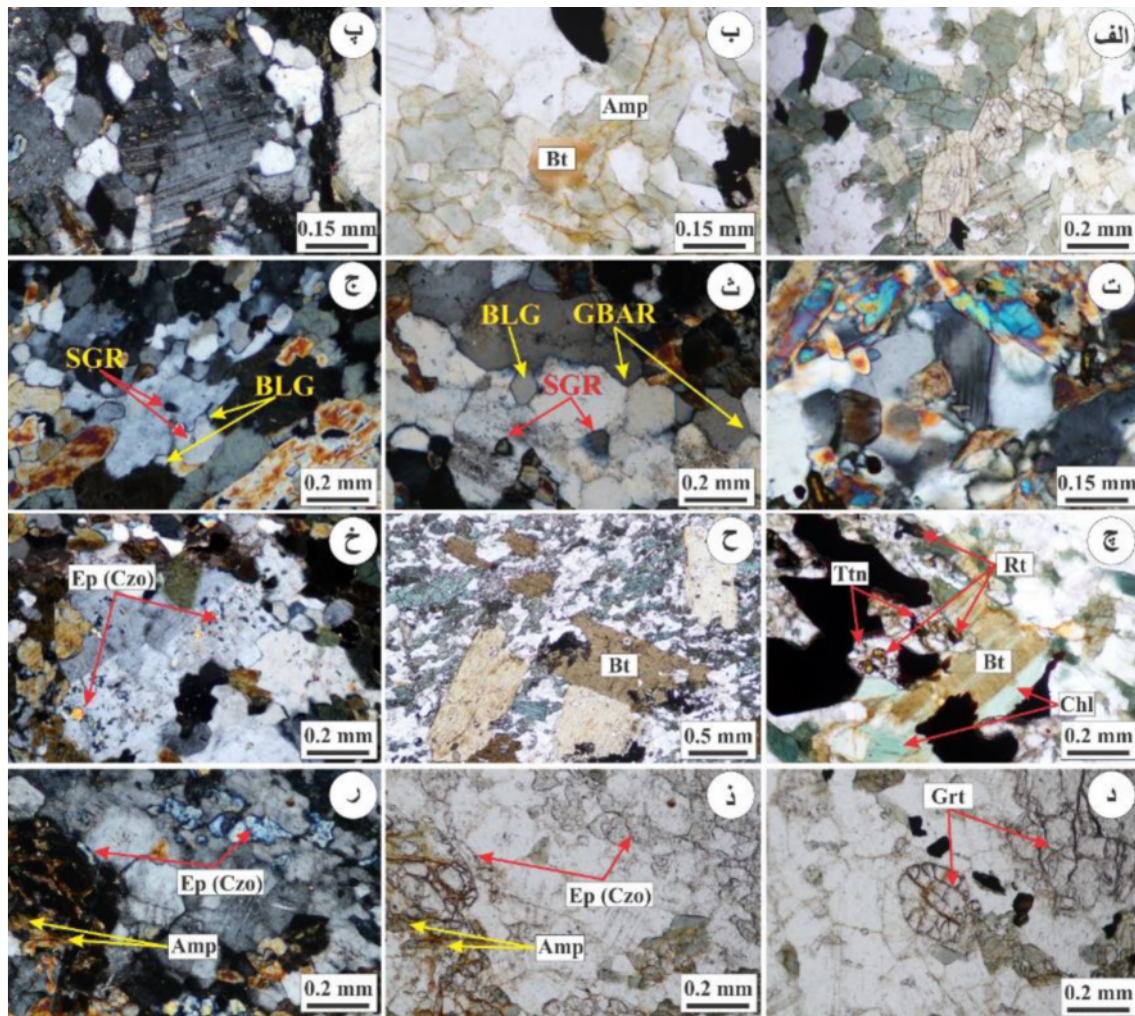
بلورهای کوارتز شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و متوسط‌بلور هستند و گاهی خاموشی موجی نشان می‌دهند. از ریز ساختارهای دیده شده در بلورهای کوارتز می‌توان به باز تبلور پویا از نوع برآمدگی مرزهای دانه (BLG)، چرخش ریز دانه (SGR)، مهاجرت مرز دانه‌های (GBM)، ایجاد زیردانه و نودانه و سرانجام ایجاد چندگوشی‌های با زاویه 120° (GBAR) اشاره نمود (شکل‌های ۶ ث و ج). بلورهای تیتانیت به دو شکل دیده می‌شوند: برخی بلورهای بی‌شکل تیتانیت پیرامون و کنار بلورهای دارای تیتانیم چون روتیل و ایلمنیت واقع بوده و برآمده از دگرگونی پسروده هستند (شکل ۶ چ) و در بخش‌هایی دیگر، تیتانیت بصورت بلورهای خودشکل لوزی رخ دیده می‌شود که به احتمال بسیار ناشی از باز تبلور بلورهای تیتانیت

آمفیبولیت‌ها بیشتر دارای بافت دانه شکفتی تا ورقه دانه شکفتی هستند و از نظر کانی‌شناسی، آمفیبول، پلاژیوکلاز و کوارتز در مجموع بیش از ۸۵٪ کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ را شامل می‌شوند. کانی‌های فرعی شامل تیتانیت، روتیل، اپیدوت (زوئیزیت و کلینوزوئیزیت)، اکسیدهای آهن-تیتان و کمی بیوتیت و کلریت هستند. کانی آمفیبول بعنوان سازنده اصلی این گروه از سنگ‌ها اغلب به حالت کشیده با طول بیش از یک سانتی‌متر و جهت‌یافته در راستای برگوارگی اصلی سنگ با چندرنگی سبز روشن-سبز قهوه‌ای به چشم می‌خورد. آمفیبول‌ها در مقاطع طولی اغلب با یک دسته رخ و در مقاطع عرضی با دو دسته رخ نمایان شده‌اند (شکل ۶ الف). در بخش‌هایی در معرض سیر دگرگونی قهقرایی، آمفیبولیت‌ها در لبه‌ها و در سطح خود به بیوتیت تبدیل شده‌اند (شکل ۶ ب).

بلورهای پلاژیوکلاز شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار بوده و ریزدانه تا متوسط‌دانه هستند. بلورهای پلاژیوکلاز بیشتر دارای ماکل چندریخت با انتهای نوک تیز (مخروطی) یا حالت خمیدگی و

کانی‌های گروه اپیدوت بصورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار ریز تا متوسط‌بلور بوده و شامل زوئیزیت، اپیدوت و کلینوزوئیزیت هستند. در برخی مقاطع، بلورهای اپیدوت و کلینوزوئیزیت بصورت میانبار در کانی پلاژیوکلاز دیده می‌شوند (شکل ۶ خ). کلریت بصورت انبوه‌های بی‌شکل با رنگ سبز کم رنگ دیده می‌شود که بنظر می‌رسد که ناشی از دگرسانی بیوتیت و آمفیبول باشد (شکل ۶ چ).

قدیمی‌تر است. بلورهای روتیل بصورت منشوری شکل، بسیار ریز تا ریزبلور هستند و با ایلمنیت و بندرت تیتانیت دربرگرفته شده‌اند (شکل ۶ ج). بیوتیت به دو صورت دیده می‌شود: بیوتیت متوسط‌بلور و دارای چندرنگی زرد-قهوه‌ای که در ظاهر بصورت برهم‌نهی روی بلورهای آمفیبول نمایان شده‌اند (شکل‌های ۶ ب و ۶ چ) و درشت بلورهای بیوتیت با چندرنگی قهوه‌ای که از جهت‌یافتگی متفاوت از جهت‌یافتگی اصلی سنگ (شکل ۶ ح).



شکل ۶ الف) بلورهای آمفیبول در مقطع عرضی با دو دسته رخ متقاطع (PPL). ب) بیوتیت در حال نقش بستن بر بلورهای آمفیبول (PPL). پ) پلاژیوکلاز با ماکل دگرشکلی خمیده و نوک تیز و سرسپیتی شدن در راستای ماکل‌ها (XPL). ت) ماکل دگرشکلی نوک تیز شده در پلاژیوکلاز (XPL). ث) بافت دگرشکلی برآمدگی مرز دانه، چرخش ریزدانه و مرزهای چندگوشی با زاویه ۱۲۰° برای کانی کوارتز و فلدسپات‌های سرسپیتی شده (XPL). ج) بافت دگرشکلی برآمدگی مرز دانه و چرخش ریزدانه در کانی کوارتز (XPL). چ) بلورهای روتیل درحال تجزیه به ایلمنیت و تیتانیت و کانی بیوتیت درحال کلریتی شدن (XPL). ح) درشت بلور بیوتیت که از جهت‌یافتگی اصلی سنگ پیروی نمی‌کند (XPL). خ) حضور کلینوزوئیزیت بصورت میانبار در پلاژیوکلاز (XPL). د) بلور گارنت دارای شکستگی‌های متقاطع و عمود بر برگواره (PPL). ذ و ز) درشت بلور گارنت درحال تجزیه به اپیدوت (کلینوزوئیزیت) و آمفیبول به ترتیب در PPL و XPL. Amp: آمفیبول، Bt: بیوتیت، Rt: روتیل، Ttn: تیتانیت، Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Czo: کلینوزوئیزیت، Grt: گارنت.

مجموعه کانیايي اغلب بصورت بسیار ریز تا ریزبلور در سنگ نمایان هستند. در این سنگ‌ها، ریز بلورهای اکتینولیت در حال بیوتیتی شدن هستند (شکل‌های ۸ پ و ت). کانی تورمالین بصورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در اندازه درشت به رنگ سبز زیتونی تا سبز و قهوه‌ای روشن دیده می‌شود. روتیل، زوئیزیت، کلینوزوئیزیت، اکتینولیت و سایر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ بصورت میانبراهای ریز موازی با برگواره اصلی سنگ در درشت بلورهای تورمالین آرایش یافته‌اند که می‌تواند بیانگر پسازمین ساخت بودن کانی‌های تورمالین باشد (شکل‌های ۸ ث-ج). در بخش‌هایی، رگه‌ها و حفره‌ها با کانی‌های ثانویه چون پرهنیت، کلسیت و کلریت پر شده‌اند (شکل ۸ ح).

آمفیبولیت‌ها دارای ترکیب کانی‌شناسی نزدیک به آمفیبول-شیست‌ها هستند، با این تفاوت که کانی تورمالین ندارند و افزون بر بلورهای اکتینولیت، با فراوانی کمتر دارای آمفیبول به احتمال بسیار هورنبلند نیز هستند (شکل ۸ خ). کانی آمفیبول در این سنگ‌ها در حال بیوتیتی شدن بصورت برهم نهی یا تحمیلی (overprint) است که می‌تواند بیانگر رخداد دگرگونی قهقرایی در حد رخساره شیست سبز در آن‌ها باشد، همچنین در آن‌ها، میانبراهایی از کلینوزوئیزیت نیز دیده می‌شود (شکل‌های ۸ د و ذ). بلورهای تیتانیت به دو صورت بی‌شکل و شکل‌دار وجود دارند (شکل‌های ۸ د و ذ) کانی کوارتز در این سنگ‌ها تنها دارای ریزساختار دگرشکلی برآمدگی مرز دانه (BLG) است (شکل ۸ ر).

بحث و بررسی

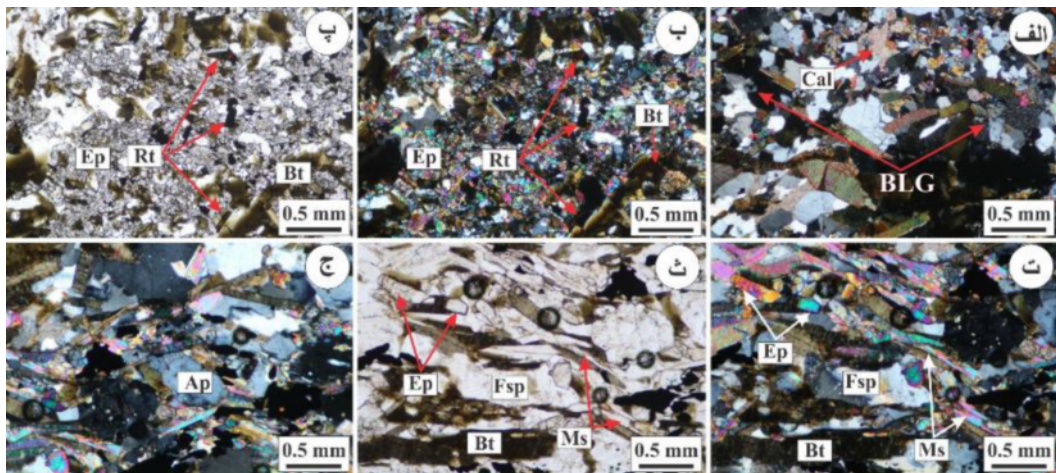
بافت‌های دگرشکلی چون برگوارگی شاخه‌ای، برگوارگی شکنجی و برگوارگی نوار برشی (بافت‌های S-C) در همه شیست‌ها و آمفیبولیت‌های مجموعه توتک کم و بیش دیده می‌شوند که می‌تواند بیانگر تغییر شکل ناکشسان اعمال شده در منطقه باشد [۲۹]. در شیست‌ها و آمفیبولیت‌های زیرپهنه مرکزی، بررسی ریز ساختارهای موجود در کانی کوارتز بیانگر گسترش فرآیند بازتبلور برگشت پذیر یا پویا بصورت تشکیل زیردانه، نودانه، بازتبلورهای پویای برآمده (BLG)، چرخش ریزدانه (SGR)، مهاجرت مرز دانه‌ای (GBM)، ایجاد چند گوشه‌های با زاویه 120° (GBAR) و خاموشی‌های موجی است (شکل‌های ۴ ث-خ و ت و ج). نودانه‌ها اغلب درون و پیرامون دانه‌های اولیه بزرگ‌تر در سنگ‌های با کرنش متوسط تا بالا رایج هستند. آن‌ها جهت‌یافتگی و اندازه شبیه زیردانه‌های کناری دارند که این ویژگی مشخصه‌ای از بازتبلور پویا یا بازتبلور رخ داده همزمان با زمین ساخت است [۳۰].

گارت-آمفیبولیت‌ها از آمفیبول، گارت، پلاژیوکلاز، کوارتز و تیتانیت بعنوان کانی‌های اصلی و کلریت، بیوتیت، روتیل و اکسیدهای آهن-تیتان بعنوان کانی‌های فرعی تشکیل شده‌اند. بلورهای گارت به دو صورت نیمه‌شکل‌دار تا گرد شده، ریز تا متوسط‌بلور و دارای شکستگی و گاهی بصورت درشت‌بلور شکل‌دار و بدون شکستگی دیده می‌شوند. در بلورهای دارای شکستگی، شکستگی‌ها اغلب منظم و به شکل متقاطع هستند و بیشتر با کلسیت و بیوتیت پر شده‌اند (شکل ۶ د). درشت بلورهای گارت بدون شکستگی دارای میانبراهایی از کلینوزوئیزیت و بندرت روتیل هستند. همچنین در برخی بلور-های گارت، شواهدی از تبدیل شدن بلورهای گارت به اپیدوت+کلینوزوئیزیت و آمفیبول دیده می‌شود (شکل‌های ۶ ذ و ر).

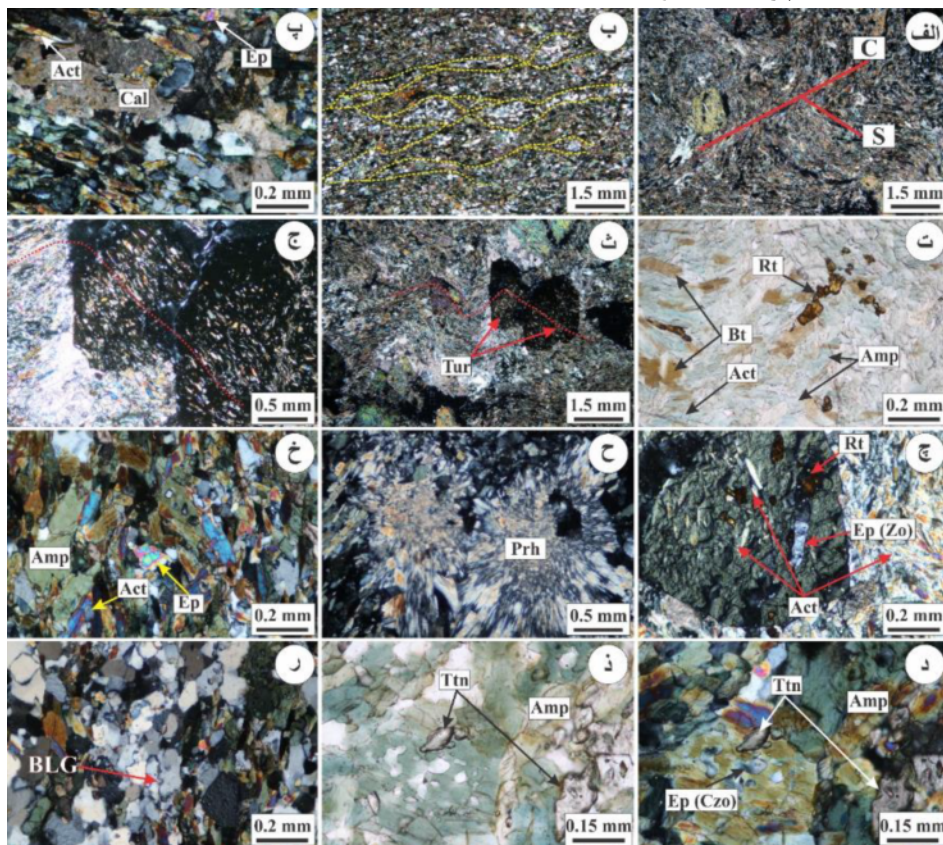
شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها در زیرپهنه لبه‌ای

شیست‌های ریزدانه دارای بافت ورقه شکفتی تا ورقه‌دانه‌شکفتی بسیار ریز تا ریزبلور بوده و بترتیب فراوانی شامل اپیدوت، کوارتز، بیوتیت، فلدسپات، کلسیت، کلینوزوئیزیت، روتیل، ایلمنیت و آپاتیت اغلب در اندازه ریز تا بسیار ریز هستند (شکل ۷). کانی اپیدوت با فراوانی بیش از ۵۰٪ بصورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با رنگ تداخلی درجه بالا در سنگ دیده می‌شود (شکل‌های ۷ ب-ث). بندرت کلینوزوئیزیت نیز به چشم می‌خورد. بلورهای کوارتز شواهد دگرشکلی بازتبلور پویا از نوع برآمده (BLG) را نشان می‌دهند (شکل ۷ الف). ایلمنیت از نظر خاستگاه، به احتمال بسیار ناشی از دگرگونی دانه‌های روتیل بسیار ریز به این کانی است (شکل‌های ۷ ب و پ). کانی‌های فلدسپار (پلاژیوکلاز و فلدسپارقلیایی) گاهی سریسیتی و رسی شده‌اند، همچنین کمابیش تیغه‌های کانی مسکویت دیده می‌شوند که بنظر می‌رسد که بهمراه بیوتیت و همزمان با آن شکل گرفته‌اند (شکل‌های ۷ ت و ث). بلور آپاتیت گاهی در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۷ ج). با توجه به فراوانی کانی‌ها، این سنگ را می‌توان شیست ریزدانه (بیوتیت-اپیدوت-شیست) نامید.

آمفیبول-شیست‌ها دارای بافت ورقه شکفتی بسیار ریزبلور هستند. در این سنگ‌ها، بافت دگرشکلی بصورت برگواره شاخه-ای و بافت S-C دیده می‌شود (شکل‌های ۸ الف و ب). این سنگ‌ها از آمفیبول (اکتینولیت)، کوارتز و پلاژیوکلاز بعنوان کانی‌های اصلی، تورمالین، روتیل و اکسیدهای آهن-تیتان بعنوان کانی‌های فرعی و کانی‌های ثانویه بیوتیت، تیتانیت، کلسیت، کلریت، اپیدوت و پرهنیت تشکیل شده‌اند. این



شکل ۷ الف) کانی کوارتز با ریزساختار برآمدگی مرزهای دانه و حضور کانی کلسیت (XPL). ب و پ) کانی‌های فراوان اپیدوت در متن سنگ و بلورهای روتیل در حال تجزیه به ایلمنیت (بترتیب در XPL و PPL). ت و ث) کانی اپیدوت در متن سنگ و وجود همزمان مسکویت و بیوتیت در کنار هم و حضور فلدسپارهای در حال سرسیتی شدن (بترتیب در XPL و PPL). ج) بلور آپاتیت (XPL). Cal: کلسیت، Bt: بیوتیت، Rt: روتیل، Ep: اپیدوت، Ms: مسکویت، Fsp: فلدسپار، Ms: مسکویت.



شکل ۸ الف) بافت‌های ورقه شکستی و دگرشکلی S-C در آمفیبول-شیست (XPL). ب) برگواره شاخه‌ای در آمفیبول-شیست‌ها (XPL). پ) کانی‌های اپیدوت، کلسیت و اکتینولیت در آمفیبول-شیست (XPL). ت) بلورهای آمفیبول و اکتینولیت در حال بیوتیتی شدن (PPL). ث و ج) درشت‌بلور تورمالین دارای میانبراهایی هم راستا با برگواره آمفیبول-شیست‌ها (XPL). چ) میانبراهای زوئیزیت، روتیل و اکتینولیت در درشت‌بلور تورمالین. ح) بلورهای پرنهیت پرکننده حفره‌ها و شکستگی‌ها (XPL). خ) بلورهای اپیدوت، اکتینولیت و آمفیبول در آمفیبولیت (XPL). د و ذ) بلورهای لوزی رخ تیتانیت و آمفیبول‌های در حال بیوتیتی شدن در آمفیبولیت‌ها (بترتیب در XPL و PPL). ر) ریزساختار دگرشکلی برآمدگی مرز دانه در کانی کوارتز (XPL). Cal = کلسیت، Ep = اپیدوت، Act = اکتینولیت، Bt = بیوتیت، Amp = آمفیبول، Tur = تورمالین، Rt = روتیل، Czo = کلینوزوئیزیت، Prh = پرنهیت، Ttn = تیتانیت.

نمود کرنش در نودانه‌ها نشان می‌دهد که آن‌ها در مرحله پیشرفته‌ای از بازیابی هستند. در شرایط رخساره شیست سبز، در دمای ۲۵۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و در تنش بالا، مرزهای دانه‌ای برآمده کوارتز از دانه اصلی قدیمی‌تر جدا شده و دانه‌های به نسبت کوچک بازتبلور یافته شکل می‌گیرند که بازتبلور پویای برآمده (BLG) نامیده می‌شود [۳۱]. به باور استیپ و همکاران [۳۱]، بازتبلورهای پویای مهاجرت مرز دانه‌ای (GBM) و چرخش ریزدانه (SGR) بیانگر دگرشکلی بترتیب در دماهای ۲۸۰-۴۰۰ و ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند که معادل با رخساره دگرگونی ناحیه‌ای شیست سبز است. با افزایش دما در حدود ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد معادل با رخساره دگرگونی آمفیبولیت، تنظیم مرزهای دانه در شرایط ایستا منجر به چند ضلعی‌های شکل‌دار بلورهای کوارتز (GBAR) با زاویه 120° می‌شود که بیانگر تعادل مرز دانه‌ای و رشد دانه‌ها در اثر کاهش انرژی مرز دانه‌ای و ایجاد شکل‌های چندگوشی در شرایط دگرگونی درجه متوسط است [۳۲]. بعضی از این دانه‌ها خاموشی موحی نشان می‌دهند که بیانگر مرحله اولیه تشکیل ریزدانه و ادامه دگرشکلی پس از تشکیل آن‌هاست [۳۰]. این یافته‌ها با ریز ساختارهای ناشی از دگرشکلی شکل‌پذیر در گنیس‌های گرانیتهی رخنمون یافته در زیرپهنه مرکزی همخوانی دارند [۳۳].

از دیگر ریز ساختارهای مهاجرت مرز دانه‌ای (GBM) می‌توان به ساختارهای سنجاغ شده و پنجره‌ای در پلاژیوکلاز اشاره کرد (شکل‌های ۴ خ و ۵ الف). از این ریزساختار می‌توان برای تشخیص مهاجرت مرز دانه‌ها و تعیین راستای آن استفاده کرد [۳۴]. در این ریزساختار، وجود کانی دوم چون میکا مانع از مهاجرت مرز دانه می‌شود [۳۰]. حضور ماکل چندریخت با انتهای نوک تیز (مخروطی) یا حالت خمیدگی، حالت موج‌دار و نوارهای شکنجی و خاموشی موحی در کانی پلاژیوکلاز و همچنین کلریت نمایان است که می‌تواند دلیلی بر وجود دگرشکلی پویا در حالت جامد در حد شرایط رخساره شیست سبز باشد [۳۵ و ۳۶] (شکل‌های ۵ ب-ث و ۶ پ و ت). در این سنگ‌ها تشکیل سوزن‌های روتیل در بیوتیت سازنیتهی به احتمال بسیار طی دگرگونی درحد رخساره آمفیبولیت و یا پس از آن در دگرگونی پسرونده در دمایی حدود رخساره شیست سبز رخ داده است [۲۵، ۳۷].

در شیست‌ها و گارنت-آمفیبولیت‌های زیرپهنه مرکزی، شواهدی از تبدیل شدن بلورهای گارنت به اپیدوت+کلینوزوئیزیت و آمفیبول به چشم می‌خورد (شکل‌های ۵ ح و ۶ ذ و ر). فرایند تبدیل گارنت به کانی‌های اپیدوت و آمفیبول می‌تواند در نتیجه عملکرد دگرگونی قهقرایی از رخساره آمفیبولیت به رخساره شیست سبز طی سربرآوری (exhumation) باشد. در واقع، کانی‌های اپیدوت و آمفیبول در نخستین مرحله از سیر قهقرایی در رخساره اپیدوت-آمفیبولیت یا رخساره آمفیبولیت در عمق کمتر از ۳۵ کیلومتر طی بالا آمدن روی رخساره پیشین شکل می‌گیرند [۳۸].

در شیست‌های ریزدانه و آمفیبول-شیست‌های متناوب با مرمرهای زیرپهنه لبه‌ای، بررسی ریزساختارهای موجود در کانی کوارتز بسیار ریز تا ریزدانه بیانگر گسترش فرایند بازتبلور تنها بصورت بازتبلورهای پویای برآمده (BLG) با فراوانی بسیار کم است. ترکیب کانیايي آلبيت+اپیدوت (زوئیزیت)+ اکتینولیت+ کلریت+ بیوتیت در این سنگ‌ها گویای رخساره شیست سبز در دمای ۴۰۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴-۵ کیلو بار است [۲۹]. در نمونه‌های آمفیبول-شیست، شواهدی از حضور کانی‌های بیانگر رخساره شیست سبز بصورت میانبارهای آرایش یافته موازی با برگواره اصلی سنگ در درشت بلورهای کانی تورمالین نیز دیده می‌شود. حضور کانی‌های آلبيت، کلسیت و پرنهیت در بیشتر رگه‌ها و حفره‌ها می‌تواند بیانگر تشکیل این رگه‌ها همزمان با دگرگونی رخساره شیست سبز پایینی در این سنگ‌ها طی آخرین مراحل بالا آمدن و سرد شدن باشد [۲۹]. بیوتیتی‌شدن آمفیبول‌ها در سنگ‌های آمفیبولیتی می‌تواند تأییدی بر رخداد دگرگونی قهقرایی در حد رخساره شیست سبز باشد. در دمای ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد، شیست‌ها با مقدار مناسب هممه می‌توانند شامل بیوتیت-مسکویت یا بیوتیت مسکویت و کلریت باشند که این دما نیز معادل رخساره شیست سبز است [۲۹].

در سنگ‌های مورد بررسی در هر دو پهنه، میانبارهای سریسیت در راستای ماکل‌های پلاژیوکلاز دیده می‌شوند که می‌تواند ناشی از دگرسانی باشد. افزون بر این، در بیشتر نمونه‌های آمفیبولیت و کمابیش در نمونه‌های شیست، تبدیل روتیل به ایلمنیت و تیتانیت دیده می‌شود که از شواهد سیر دگرگونی

است که این امر را می‌توان به قرارگیری احتمالی زیرپهنه لبه‌ای در بخش بیرونی تر پهنه برشی توتک و شکل‌گیری آن در اعماق کمتری از پوسته قاره‌ای مربوط دانست.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد در به ثمر رساندن این پژوهش قدردانی می‌کنند.

مراجع

- [1] Owona S., Ondo J.M., Ekodeck G.E., "Evidence of quartz, feldspar and amphibole crystal plastic deformations in the paleoproterozoic Nyong Complex Shear Zones under Amphibolite to Granulite conditions (west Central African Fold Belt, SW Cameroon)", *Journal of Geography and Geology* 5(3) (2013) 186.
- [2] Spalla M.I., Zucali M., "Deformation vs. metamorphic re-equilibration heterogeneities in polymetamorphic rocks: A key to infer quality PTdt path", *Rivista Italiana di Mineralogia e Petrologia* 73. 249 (2004) 227-247.
- [3] Bell T.H., Rubenach M.J., "Sequential porphyroblast growth and crenulation cleavage development during progressive deformation", *Tectonophysics* 92(1-3) (1983) 171-194.
- [4] Bell T.H., Hayward N., "Episodic metamorphic reactions during orogenesis: the control of deformation partitioning on reaction sites and reaction duration", *Journal of Metamorphic Geology* 9(5) (1991) 619-640.
- [5] Spalla M.I., Siletto G.B., di Paola S., Gosso G., "The role of structural and metamorphic memory in the distinction of tectono-metamorphic units: the basement of the Comolake in the Southern Alps", *Journal of Geodynamics* 30(1-2) (2000) 191-204.
- [6] Passchier C.W., Myers J.S., Kröner A., "Field geology of high-grade gneiss terrains", Springer Science & Business Media (2012).
- [7] Alizadeh A., Martinez M.L., Sarkarinejad K., "⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology in a gneiss dome within the Zagros Orogenic Belt", *Comptes Rendus Geoscience* 342(11) (2010) 837-846.
- [8] Sarkarinejad K., Alizadeh A., "Dynamic model for the exhumation of the Tutak gneiss dome within

قهقراپی هستند. تیتانیت در سیر قهقراپی درجه متوسط و پایین دیده می‌شود و ماهیت دگرگونی دارد [۳۹].

برداشت

مجموعه دگرگونی توتک بعنوان بخشی از کمربند بوانات در کرانه شمال شرقی بخش جنوبی پهنه سندانج-سیرجان دارای تنوع سنگی، دگرگونی و دگرشکلی شبیه سایر مجموعه‌های دگرگونی این پهنه است.

اثر دگرگونی و دگرشکلی بر متاسدیمنت‌ها (شیست‌ها) و متابازیت‌های (آمفیبولیت‌های) مجموعه دگرگونی توتک یکنواخت نبوده است و از درجه رخساره دگرگونی آمفیبولیت تا شیست سبز در زیرپهنه مرکزی و رخساره دگرگونی شیست سبز در زیرپهنه لبه‌ای تغییر می‌کند.

- شواهد برآمده از بررسی ریزساختارهای کوارتز در شیست‌ها (شیست آهکی، میکاشیست، گارنت-مسکویت-شیست و کوارتز-فلدسپاتی-شیست) و آمفیبولیت‌ها (آمفیبولیت و گارنت-آمفیبولیت) در زیرپهنه مرکزی بیانگر عملکرد دگرشکلی پویا در شرایط حالت جامد و در گستره دمایی بیش از ۴۰۰ تا ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در این سنگ‌هاست. همچنین شواهد بافتی نشانگر رخداد دگرگونی قهقراپی در حد رخساره شیست سبز طی سر برآوری و پس از عملکرد دگرگونی پویا در این سنگ‌هاست.

زیرپهنه لبه‌ای از شیست‌های ریزدانه (بیوتیت-اپیدوت-شیست) و آمفیبولیت (آمفیبول-شیست و آمفیبولیت‌های) ریزدانه‌تری نسبت به زیرپهنه مرکزی تشکیل شده است که ریز ساختارهای کوارتز در این سنگ‌ها گستره دمایی رخساره شیست سبز (با دمای حدود ۴۰۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴-۵ کیلوبار) را نشان می‌دهد.

به طور کلی، قرارگیری زیرپهنه مرکزی در بخش میانی پهنه برشی توتک و تحمل تنش بیشتر که شواهد آن بصورت ریزساختارهای دگرشکلی متناسب با رخساره آمفیبولیت و بافت گنیسی در گنیس‌های گرانیتی دیده می‌شود، به احتمال بسیار می‌تواند بیانگر شکل‌گیری این بخش از پهنه برشی در عمق بیشتری از پوسته قاره‌ای باشد. این در حالی است که عملکرد تنش کمتر در زیرپهنه لبه‌ای منجر به ریزساختارهای دگرشکلی کمتر و در پی آن دگرگونی قهقراپی بیشتر شده

- [18] Agard P., Monié P., Gerber W., Omrani J., Molinaro M., Meyer B., Yamato P., "Transient, synobduction exhumation of Zagros blueschists inferred from P-T, deformation, time, and kinematic constraints: Implications for Neotethyan wedge dynamics", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111 no B11 (2006).
- [19] Alizadeh A., Sarkarinejad K., Sattarzadeh Y., "Kinematic vorticity analysis within the Zagros hinterland involved-basement window, Tutak gneiss dome, southwestern Iran", *Journal of Tethys* 1(4) (2013) 282-290. (in Persian)
- [20] Houshmand-Zadeh A., Sheile M., Hamdi B., "Explanatory text of the Eqlid Quadrangle map, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Ministry of Mines and Metals", Geological quadrangle No. G 10 (1990) scale 1: 25000.
- [21] Bendokht M., Shabanian N., Davoudian A.R., Dong Y., Cottle J.M., Johnson T.A., "Geochronology and geochemistry of Cadomian basement orthogneisses from the Tutak metamorphic Complex, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran", *Precambrian Research* 362 (2021) 106288.
- [22] Stocklin J., Nabavi M.H., "1: 2,500,000 Sheet, Tectonic Map of Iran. Geological Survey of Iran" Tehran, Iran (1973).
- [23] Oveisi B., "Geological map of Surian, scale 1: 100,000", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, map 6750 (2001).
- [24] Nuri K., "Investigation of the genesis of Bendenow granite-gneiss with Tutak metamorphic complex, Eastern Bavanat", Ph. D thesis, Azad University of Iran (2005).
- [25] Shau Y.H., Yang H.Y., Peacor D.R., "On oriented titanite and rutile inclusions in sagenitic biotite", *American Mineralogist* 76(7-8) (1991) 1205-1217.
- [26] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95 (2010) 185-187. doi:10.2138/am.2010.3371.
- [27] Ji S., Zhao P., Saruwatari K., "Fracturing of garnet crystals in anisotropic metamorphic rocks during uplift", *Journal of Structural Geology* 19(5) (1997) 603-620.
- [28] Ten Grotenhuis S.M., Trouw R.A.J., Passchier C.W., "Evolution of mica fish in mylonitic rocks", *Tectonophysics* 372(1-2) (2003) 1-21.
- [29] Passchier C.W., Trouw R.A., "Microtectonics", Springer-Verlag Berlin
- a bivergent wedge in the Zagros Thrust System of Iran*", *Journal of Geodynamics* 47(4) (2009) 201-209.
- [9] Ahmadi A., Hosseini B., Ahmadi P., "The investigation of thermodynamic conditions in the formation of regional metamorphic rocks of the Tutak complex (southeast of Bavanat)", *Petrology*, 6(22) (2015) 25-49. (in Persian)
- [10] Mohajjel M., Fergusson C.L., Sahandi M.R., "Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 21(4) (2003) 397-412.
- [11] Davoudian A.R., Shabanian N., Genser J., Neubauer F., "⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran: Implications for the tectonic evolution of Zagros orogen", *Gondwana Research* 37 (2016) 216-240.
- [12] Sheikholeslami M.R., Pique A., Mobayen P., Sabzehei M., Bellon H., Emami M.H., "Tectono-metamorphic evolution of the Neyriz metamorphic complex, Quri-kor-e-sefid area (Sanandaj-Sirjan Zone, SW Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences* 31(4-6) (2008) 504-521.
- [13] Alavi M., "Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations", *Tectonophysics* 229(3-4) (1994) 211-238.
- [14] Badr A., Davoudian A.R., Shabanian N., Azizi H., Asahara Y., Neubauer F., Dong Y., Yamamoto K., "A- and I-type metagranites from the North Shahrekord Metamorphic Complex, Iran: Evidence for Early Paleozoic post-collisional magmatism", *Lithos* 300 (2018) 86-104.
- [15] Riyahi Samani F., Shabanian N., Davoudian A.R., "Geochemistry and tectonic setting of granite-gneisses from Abadchi, north of Shahrekord", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 26(1) (2018) 195-208. (in Persian)
- [16] Alirezai S., Hassanzadeh J., "Geochemistry and zircon geochronology of the Permian A-type Hasanrobat granite, Sanandaj-Sirjan belt: A new record of the Gondwana break-up in Iran", *Lithos* 151 (2012) 122-134.
- [17] Davoudian A.R., Genser J., Dachs E., Shabanian N., "Petrology of eclogites from north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan zone, Iran", *Mineralogy and Petrology* 92(3) (2008) 393-413.

- [35] Smith J.V., William L.B., "Intergrowths of Feldspars with Other Minerals", In Feldspar Minerals (1988) 626-646. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [36] Pryer L.L., "Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: The Grenville Front, Ontario, Canada", Journal of Structural Geology 15(1) (1993) 21-36.
- [37] Yui T.F., Shen P., Liu H.H., "Titanite inclusions in altered biotite from granitoids of Taiwan: Microstructures and origins", Journal of Asian Earth Sciences 19(1-2) (2001) 165-175.
- [38] Enami M., Liou J.G., Mattinson C.G., "Epidote minerals in high P/T metamorphic terranes: Subduction zone and high-to ultrahighpressure metamorphism", Reviews in Mineralogy and Geochemistry 56(1) (2004) 347-398.
- [39] Hibelot T., "Relationships between metamorphism and deformation in the Nordmannvik nappe, south of Lyngseidet: A focus on high grade relics", Master's thesis, Universitetet i Tromsø (2013).
- Heidelberg, Germany (2005). doi: 10.1007/3-540-29359-0 .
- [30] Blenkinsop T., "Deformation microstructures and mechanisms in minerals and rocks", Kluwer Academic Publishers, New York (2002) 150p.
- [31] Stipp M., Stübenitz H., Heilbronner R., Schmid S.M., "The eastern Tonale fault zone: A 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 C", Journal of Structural Geology 24(12) (2002) 1861-1884.
- [32] Trouw R.A., Passchier C.W., Wiersma D.J., "Atlas of Mylonites and related microstructures", Springer Science & Business Media (2009).
- [33] Bendokht M., Shabanian N., Davoudian A.R., Azizi H., Karimi M., "Dynamic deformation micro-structures in the minerals from augen gneiss of Tutak region, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran", Tectonics 3(10) (2019) 41-57.
- [34] Jessell M.W., "Grain-boundary migration microstructures in a naturally deformed quartzite", Journal of Structural Geology 9(8) (1987) 1007-1014.