



## زمین - دماسنجه دگرشكلي مرمرها بر اساس ماكل در شمال شرق معدن ڙان، پهنه‌ي سنندج - سيرجان، استان لرستان

آرزو مرادي<sup>\*</sup>، ناهيد شبانيان بروجني، عليرضا داوديان دهكردي

دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

(دریافت مقاله: ۹۲/۱۲/۲۵، نسخه نهایی: ۹۳/۳/۱۷)

**چکیده:** منطقه‌ی مورد بررسی به عنوان بخشی از ساختار سنندج - سيرجان در شمال شرق معدن سنگ تزئینی ڙان در شمال درود و در استان لرستان واقع شده است و بيشتر از سنگ‌های دگرگون دگرشكلي شده تشکيل شده است. اين سنگ‌های دگرگون شامل سنگ‌های مرمر دگرشكلي شده به همراه گرانیت گنایس میلیونیتی و آمفیبولیت است و بافت اصلی این مرمرها، لیپیدوگرانوبلاستیک است، کانی‌شناسی مرمرها به ترتیب فراوانی کانی‌ها از کلسیت و میزان اندازی کوارتز، موسکویت فنریتی، اپیدوت، اسفن، کانی‌های کدر، پلازیوکلاز (به مقدار خیلی کم) تشکیل شده است. دانه‌های کلسیت دارای جهت یافته‌گی ترجیحی هستند که علتی بر وجود تنش و تغییرشكلي پلاستیک است. بافت فلیز در عدی‌های کوارتز، وجود خاموشی موجی در کوارتز، ریز ساختار pinning بین دانه‌های کلسیت و کوارتز، تبلور مجدد دینامیکی به صورت انتقال مرز دانه‌ای بین دانه‌های کانی‌ای کلسیت و کوارتز و تجدید تبلور دینامیکی برآمده (BLG) در حاشیه‌ی دانه‌های کوارتز و در راستای سطوح شکستگی، چرخش ریز دانه (SGR) و نیز ماکل‌های دگرشكلي کانی‌های کلسیت نوع I و II دمای دگرشكلي این سنگ‌های مرمر را از ۱۵۰-۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** ماکل‌های کلسیت؛ دگرشكلي؛ زمین - دماسنجه؛ مرمر؛ معدن ڙان.

می‌توانند حين تبلور دوباره و هم در اثر دگرشكلي به وجود

آیند که نهایتاً باعنوان ماکل‌های دگرشكلي (e-twining) یا ماکل‌های مکانیکی خوانده می‌شوند [۱].

ماکل شدگی یک فرآیند غیر قابل برگشت است [۴].

ماکل‌های اصلی رشد یافته، مستقیم و نازک‌اند، ولی ماکل‌های دگرشكلي (e-twining) ضخامت متغيري دارند، در حال نازک شدن و منشعب شدن به سمت حاشیه‌ی بلور هستند و بيشتر به حالت خميده دیده می‌شوند. ماکل‌های دگرشكلي (e-twining) عموماً در كربنات‌ها و فلدسيپارها دیده می‌شوند و

ريخت شناسی ماکل‌ها به دما وابسته است [۳].

ماکل شدگی مکانیکی یا تغییرشكلي بلور احتمالاً در برش

**مقدمه**

شناخت دما و فشار حاکم بر فرآيندهایی که سنگ‌های دگرگون و دگرشكلي پشت سر گذاشته‌اند همواره يکی از اهداف سنگ-شناسی دگرگونی و ریز زمین ساخت بوده است که برای این منظور می‌توان از بافت این سنگ‌ها و کانی‌های متشكله آن‌ها که با بررسی مقاطع میکروسکوپی به دست می‌آید، استفاده کرد. در این راستا محققین بسیاری به بررسی این بافت‌ها پرداختند و این بخش از علوم زمین را گسترش داده‌اند [۳-۱].

بیشتر کانی‌ها در ساختارهایشان دارای سطوحی هستند که مستعد لغزش، و در نهایت ایجاد ماکل هستند. این ماکل‌ها هم

دماهی بالای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در دماهی بالاتر از ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تجدید تبلور دینامیکی به عنوان مهم‌ترین ساز و کار دگرشکلی در کلسیت به شمار می‌رود. بنابراین، شدت ماکل ( $\text{mm}/\text{تعداد ماکل‌ها}$ ) رابطه‌ی منفی با دما و اندازه‌ی ماکل (ضخامت) رابطه‌ی مستقیم با دما دارد.

در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از ریخت‌شناسی ماکل‌های کلسیت در بررسی‌های سنگنگاری و مقایسه آن با شواهد دگرشکلی کانی‌های موجود دیگر در مرمره‌ای مورد بررسی و نهایتاً دماهی دگرشکلی مرمرها را در منطقه شمال‌شرق معدن ژان به دست آوریم.

#### موقعیت زمین‌شناسی

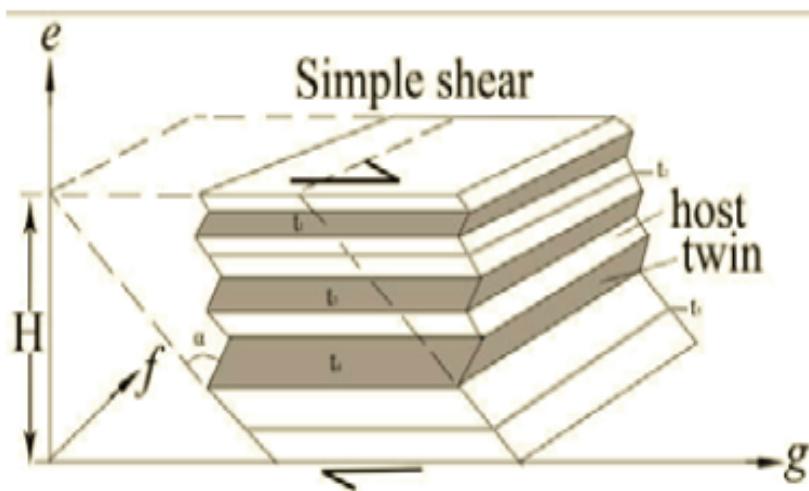
منطقه‌ی مورد بررسی در شمال‌غرب شهرستان ازنا و شمال‌شرق معدن ژان، در گستره‌ای به طول‌های جغرافیایی  $11^{\circ} 41' - 12^{\circ} 07'$  و عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ} 36' - 38^{\circ} 12'$  شرقی و  $33^{\circ} - 49^{\circ}$  شمالی و در نقشه‌ی چهارگوش شازند به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ واقع شده است [۱۳]. منطقه‌ی موردن بررسی در پهنه‌ی زمین ساختاری سنتنج - سیرجان شمار می‌رود و تا سنوزوئیک فازهای دگرگونی و مگماتیسم پهنه‌ی سنتنج - سیرجان فعل ترین پهنه‌ی ساختاری ایران به شمار می‌رود و تا سنوزوئیک فازهای دگرگونی و مگماتیسم مهمی را پشت سر گذاشته است [۱۶].

ساده‌ی موازی با یک جهت خاص مثل جهت  $g$  در صفحه‌ی بلورشناسی روی می‌دهد (شکل ۱). بخش ماکل خورده حاوی جهت بلورشناسی آبینه‌ای نسبت به میزبان ماکل خورده در طول صفحه‌ی ماکل است [۳]. ماکل به وسیله میکروسکوپ قطبی پلاریزان به راحتی قابل شناسایی است که در شکل ۱ نشان داده شد [۵، ۶].

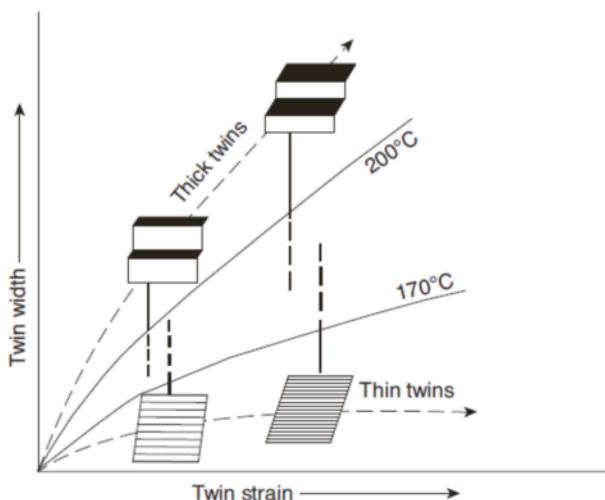
ماکل‌های دگرشکلی در کلسیت به طرز گستردگی برای تشخیص تاریخ دگرشکلی استفاده می‌شوند [۷]. این ماکل‌ها حاصل غلبه ساز و کار دگرشکلی بلور - پلاستیک در کلسیت‌هایی است که در دماهی کمتر از ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد دگرشکل شده‌اند [۱۲-۸].

ماکل کلسیت دگرشکل شده (e-twining) می‌تواند با افزایش تعداد ماکل‌ها (افزایش به معنای شدت ماکل ( $\text{mm}/\text{تعداد ماکل‌ها}$ )), افزایش در اندازه ماکل‌ها (افزایش به معنای ضخامت ماکل)، یا هر دو با هم نشان داده شود [۱۰].

ریخت‌شناسی ماکل کلسیت با دماهی دگرشکلی کلسیت درشت‌دانه دگرشکل شده همخوانی دارد [۱۲، ۱۱]. این بدان معناست که تعداد و اندازه‌ی ماکل در نتیجه‌ی تنفس اعمال شده و شرایط دگرشکلی می‌تواند اطلاعاتی در رابطه با دماهی دگرشکلی در اختیار قرار دهد. چنانکه در شکل ۲ نشان داده شد، ماکل‌های نازک بیان کننده‌ی گستره‌ی دماهی کمتر از ۱۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و ماکل‌های کمی ضخیم‌تر گستره‌ی



شکل ۱ هندسه‌ی ایجاد ماکل مکانیکی در برش ساده. محور  $f$  به سمت محور  $g$  (یک سمت خاص در صفحه‌ی بلورشناسی) منحرف شده است. خط‌های نقطه‌چین موجود در طرح، دانه‌های کلسیت بدون ماکل را نشان می‌دهند. مناطق سایه‌دار نشان‌دهنده‌ی تیغه‌های ماکل هستند و مناطق بدون سایه نشان‌دهنده‌ی بخش‌های میزبان را تشکیل می‌دهند. زاویه‌ی  $a$ ، زاویه‌ی چرخش لبه‌ی دانه از بخش میزبان تا تیغه‌ی ماکل است که معادل  $17^{\circ} 38'$  است.  $H$  ضخامت کل سنگ میزبان و ماکل‌ها و  $t$  شامل ضخامت ماکل را نشان می‌دهد [۴-۵].



شکل ۲ طرح نموداری نشان دهنده‌ی آن است که، درنتیجه‌ی تنش اعمال شده، شدت ماکل ( $\text{mm/mm}$ ) / تعداد ماکل‌ها) و اندازه‌ی ماکل (ضخامت)، متأثر از دمای دگرشكلي است (تصویر اصلاح شده [۲۷] [۱۰]).

ازنا، بسته به موقعیت قرارگیری در پهنه‌ی برشی، کم و بیش دگرشكلي شده‌اند و آثار میلونیتیزاسیون را نشان می‌دهند. همتافت ژان یک پهنه برشی بزرگ محسوب می‌شود. به اعتقاد [۲۰] این پهنه برشی از نوع راست‌گرد است.

سنگ‌های دگرگون و دگرشكلي شده‌ی رخنمون یافته در منطقه‌ی مورد بررسی را می‌توان براساس نوع سنگ مادر آن‌ها به دو دسته با خاستگاه آذرین و خاستگاه رسوبی تقسیم بندی کرد. سنگ‌های دگرگون با خاستگاه آذرین عبارتند از آمفیبولیت‌ها و گرانیت‌های سین زمین‌ساخت (گرانیت میلونیتی یا دیناموماگماتیک گنایس‌ها [۲۱] و سنگ‌های دگرگون و دگرشكلي شده‌ی منطقه با خاستگاه رسوبی شامل شیست‌ها و مرمرها.

در منطقه‌ی مورد بررسی توده‌ی گرانیت‌وئیدی بزرگی وجود دارد که تحت تأثیر یک رژیم دگرشكلي دینامیکی تشکیل شده است [۱۸]. پهنه‌ی برشی همتافت ژان، عامل انتقال سنگ‌هایی با خاستگاه عمیق (نظیر سنگ‌های دگرگون با فشار بالا، گرانیت‌ها و آمفیبولیت‌های منطقه) به سمت عمق کم است [۲۲]. توده‌ی گرانیت‌وئیدی میلونیتی منطقه مورد بررسی فاقد آثار چشمگیری از دگرگونی مجاورتی است که این نیز یکی از شواهد وابسته به توده‌های نفوذی همزمان با زمین‌ساخت است [۱۵]. این توده‌ی نفوذی به وسیله‌ی سنگ‌های دگرگون ناحیه‌ای همچون شیست، آمفیبولیت، کوارتزیت و مرمرها دربرگرفته شده است. آمفیبولیت‌ها، شیست‌ها و مرمرها سقف توده‌ی گرانیت میلونیتی را تشکیل داده‌اند.

پهنه‌ی سندنج – سیرجان را می‌توان از ناحیه‌ی گلپایگان به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم کرد [۱۷]. طبق این تقسیم‌بندی منطقه‌ی ازنا در بخش شمالی یا بخش همدان – ارومیه واقع شده است که در کرتاسه پایانی دگرشكلي شده و شامل سنگ‌های آذرین فلزیک (مثل پلوتون‌های الوند، بروجرد و ملایر)، شیست‌ها و مرمرهایی است که تأثیر فازهای کوه‌زایی سیمیرین و کرتاسه پایانی را در خود ثبت کرده است.

[۱۸] به بررسی محیط ژئودینامیکی منطقه ازنا پرداخته و دو حادثه را در دگرشكلي این ناحیه مؤثر می‌داند. حادثه‌ی اول با فروزانش پوسته‌ی اقیانوسی نئوتیس و ایجاد کمربند آتشفسانی با سن ژوراسیک پسین – کرتاسه آغازین همرا به بود که شیستوزیته، چین‌خوردگی و دگرگونی در حد رخساره‌ی شیست سبز تا آمفیبولیت را موجب شده است، دگرگونی (قهقارایی) در حد رخساره‌ی شیست سبز (دگرگونی قهقارایی)، برگوارگی میلونیتی و سرانجام نفوذ توده‌های گرانیتی همزمان با دگرشكلي در جریان حادثه‌ی دوم رخ داده‌اند. بافت‌های ایجاد شده در اثر دگرشكلي در توده‌ی گرانیتی نیز حاکی از دگرشكلي در حد رخساره‌ی شیست‌سبز است [۱۹]. به نظر می‌رسد که ماکل‌های دگرشكلي کلسیت در مرمرهای منطقه‌ی مورد بررسی طی حادثه دوم ایجاد شده است.

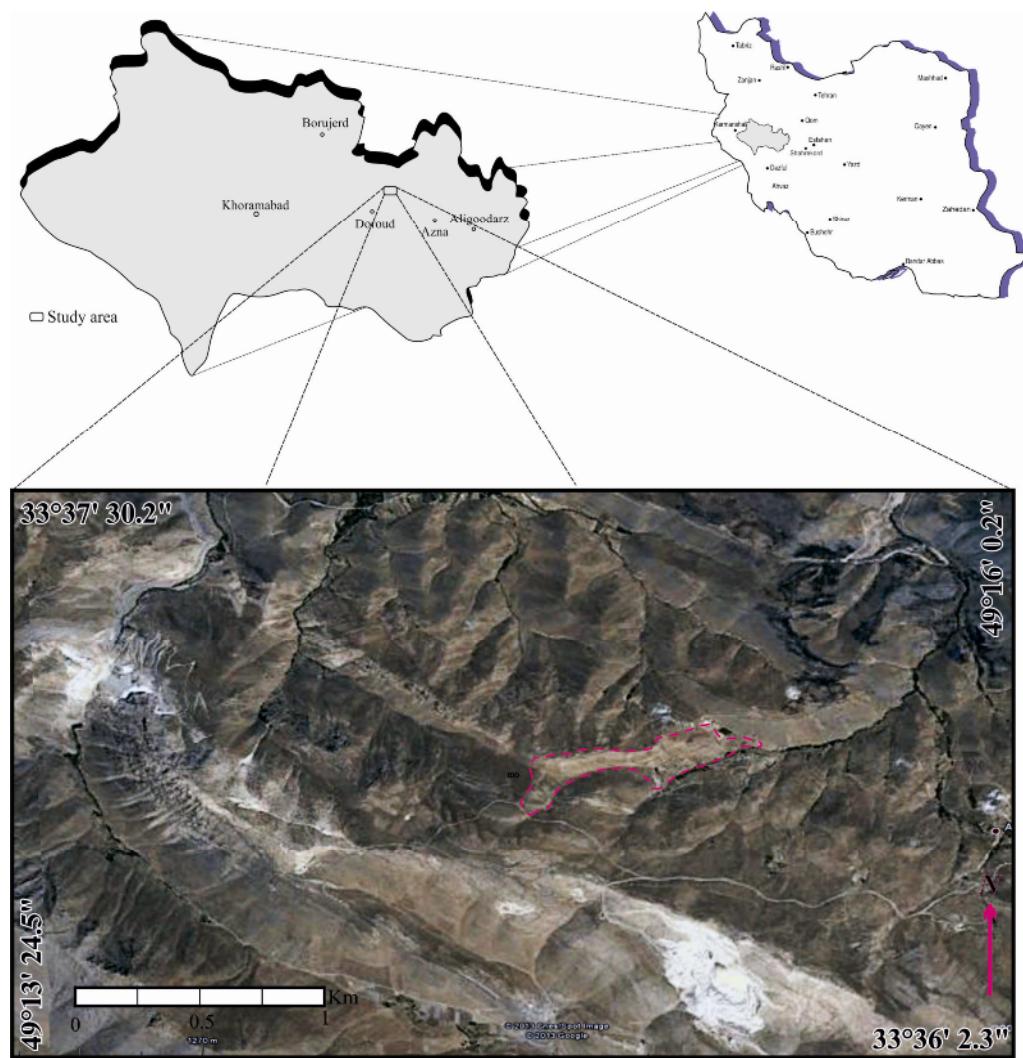
[۱۸] معتقد است که با توجه به شواهد موجود، همزمان با دگرگونی ناحیه‌ای، منطقه‌ی ازنا تحت تأثیر یک زون برشی قرار گرفته است و سنگ‌های دگرگون و آذرین در پهنه‌ی برشی، خرد شده و یا تغییر شکل یافته‌اند. بیشتر سنگ‌های دگرگون

رخنمون‌های سنگی مناسب انتخاب شدند و نمونه‌های جهت‌دار برداشت شده از این مناطق به دقت از نظر صحرایی توصیف و اطلاعات به دست آمده ثبت و ضبط شده‌اند. بین نمونه‌های شاخص برداشت شده، مقطع نازک تهیه شد. مقاطع با استفاده از میکروسکوپ قطبشی (Olympus) مورد بررسی قرار گرفتند. این بررسی‌ها شامل بررسی ویژگی‌های بافتی، کانی‌شناسی، خصوصیات سنگ‌شناسی و ریزساختارها، بررسی ماکل‌های کلسیت و تعیین دمای دگرشکلی و بررسی شواهد دگرشکلی کانی کوارتز در این مجموعه‌هاست. طی این بررسی‌ها از پدیده‌های جالب ساختاری، بافتی و کانی‌شناسی، تعدادی عکس در نور طبیعی و قطبیده تهیه شدند.

در منطقه‌ی مورد بررسی، مرمرها رخنمون‌های محدود و پراکنده‌ای دارند (شکل-۳) که در نقشه‌ی زمین‌شناسی به عنوان واحد مستقل مشخص نشده‌اند و اغلب تحت تأثیر دگرگونی و دگرشکلی منطقه قرار گرفته‌اند. این مرمرها به همراه کوارتزیت‌ها، شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها به عنوان همبافت ژان معرفی شده‌اند [۱۸]. در این مرمرها، علاوه بر خمش، ماکل‌های دگرشکلی چشمگیری در کانی کلسیت مشاهده می‌شود که طی حادثه دوم دگرگونی و دگرشکلی ایجاد شده‌اند.

#### روش بررسی

به منظور زمین دما‌سنجی مرمرها بر اساس ریخت‌شناسی ماکل، در مرحله نخست به هنگام عملیات صحرایی



شکل ۳ موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی در کشور و در استان لرستان و تصویر ماهواره‌ای Google Earths منطقه‌ی مورد بررسی. گستره‌ی مرمرهای دگرشکل شده با خط‌چین قرمز مشخص شده است.

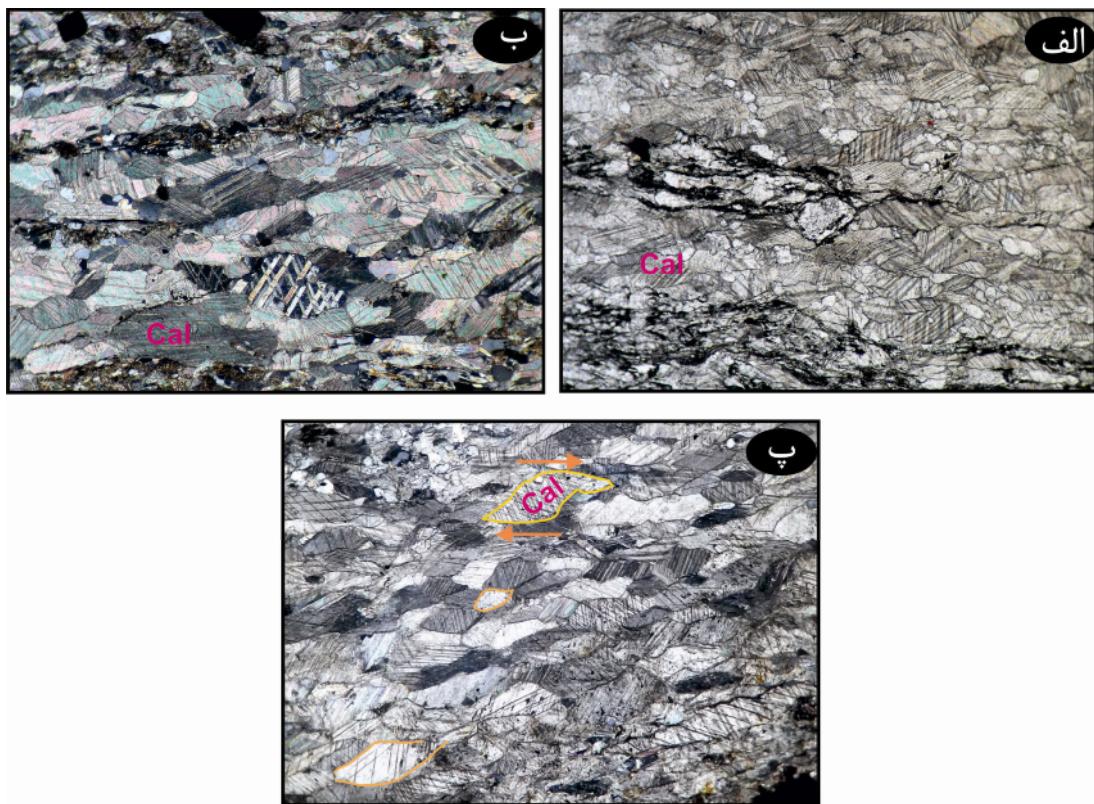
فراوانی کانی‌ها شامل: کلسیت، کوارتز، موسکوویت فنزیتی، اپیدوت، اسفن، کانی‌های کدر، پلازیوکلاز (به مقدار خیلی کم) هستند.

دانه‌های کلسیت دارای سمت یافته‌گی ترجیحی هستند. وجود این سمت یافته‌گی در کلسیت امری طبیعی و دال بر وجود تنش و تغییر شکل پلاستیک است. روابط بین گستره‌های رخ موازی، آناستاموزینگ و زاویه‌دار است که از تغییر شکل پلاستیک حاصل می‌شوند [۲] (شکل-۴-الف).

در مرمرها، کانی‌های کلسیت به صورت شکل‌دار تا بی‌شكل در اندازه‌ی بزرگ تا متوسط در راستای برگوارگی میلیونیتی آرایش یافته‌اند، خمیدگی و ماکل‌های نوع I و II در آن‌ها مشاهده می‌شود (شکل-۴-ب)، برخی به صورت بی‌شكل (طویل شده) در راستای برگوارگی میلیونیتی و به صورت کلسیت‌های ماهی‌گون مشاهده می‌شوند (شکل-۴-پ).

### بحث و بررسی

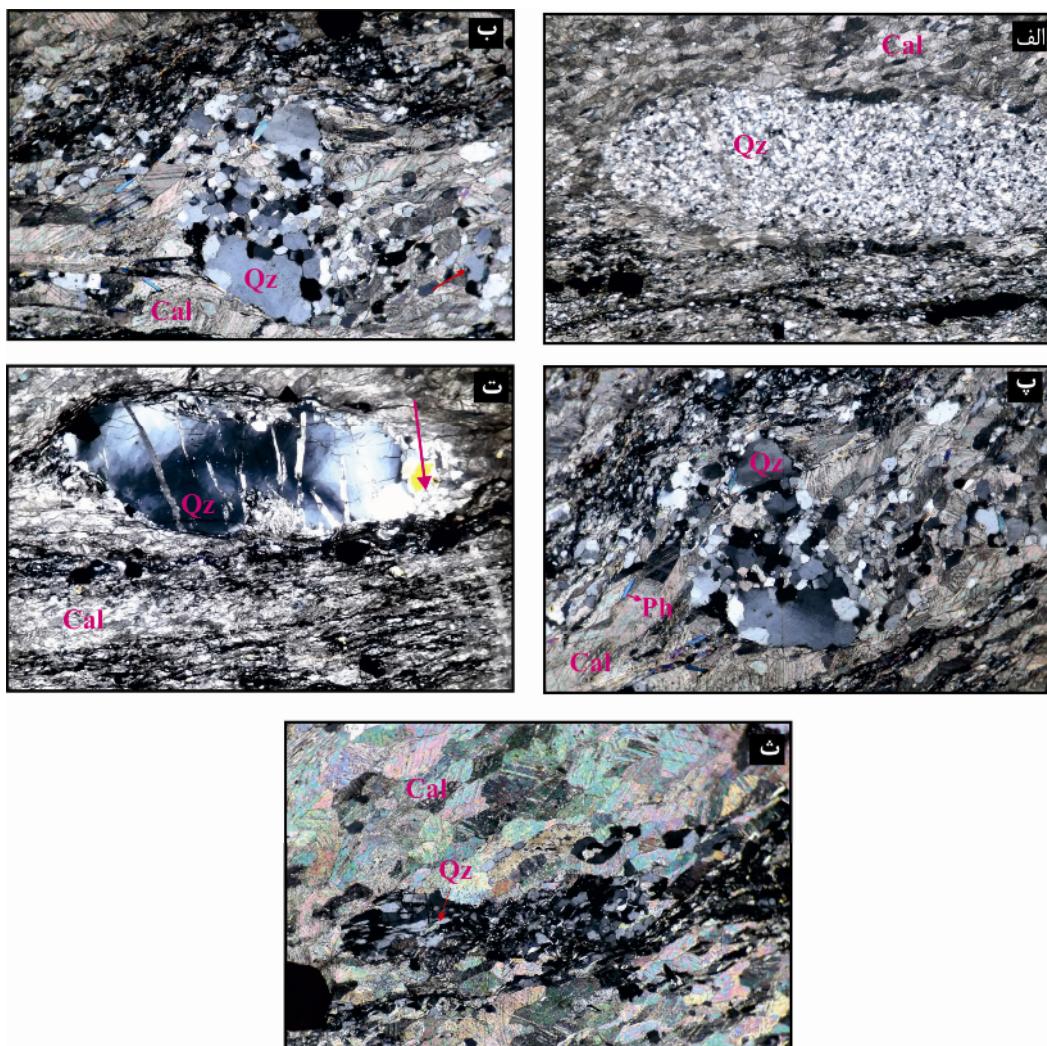
بر اساس مشاهدات صحرایی منطقه‌ی مورد بررسی، مرمرها به صورت بین لایه‌ای با دیگر سنگ‌های دگرگون منطقه به ویژه شیسته‌ها و آمفیبولیت‌ها رخمنون دارند و در بعضی مناطق داخل منطقه‌ی برشی از گسترش و فراوانی برخوردارند، ولی این حالت بین لایه‌ای با گرانیت گنایس میلیونیتی مشاهده نمی‌شود این سنگ‌ها غالباً دارای آثار چین خوردگی بوده و نسبت به سایر سنگ‌ها چین خوردگی را بهتر نمایان می‌سازند. خطوط از کانی‌ای دارای همان راستای فاز اصلی دگرشكلي بوده که با خطوط از اصلی شیسته‌ها و سنگ‌های همیافت دیگر موازی است. براساس مشاهدات میکروسکوپی، بافت زمینه مرمرها لیپیدوگرانوبلاستیک است. دانه‌ها بیشتر ریزدانه و خرد شده‌اند و از هم بعد تا کمی هم بعد و چندضلعی – بین زبانه‌ای تغییر می‌کنند. شکل و اندازه‌ی دانه بستگی به میزان تنش‌های وارد و دما دارد. از نظر کانی‌شناسی مرمرهای مورد بررسی به ترتیب



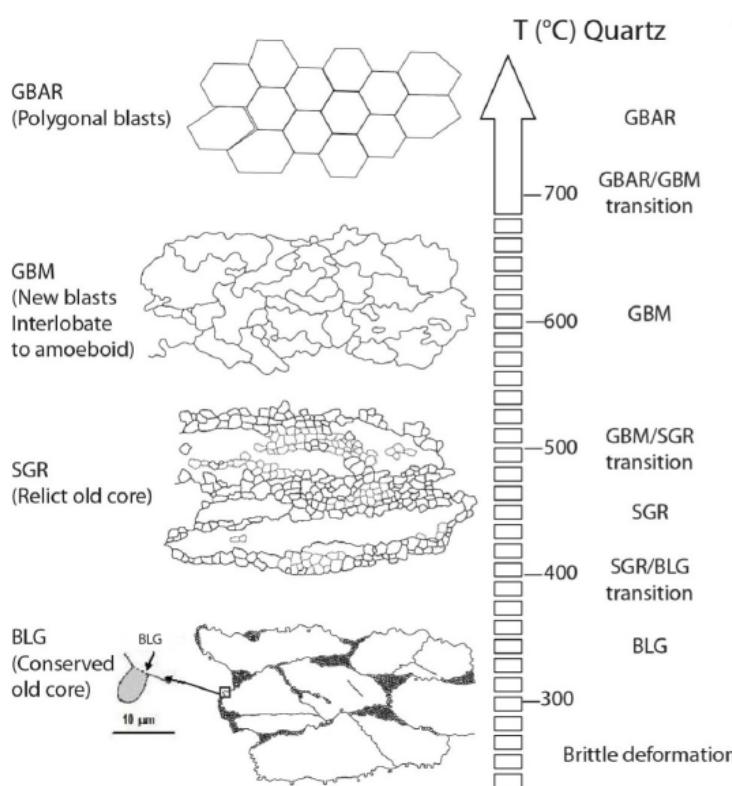
شکل ۴ (الف) نمایش جهت یافته‌گی ترجیحی دانه‌های کلسیت، روابط بین گستره‌های رخ موازی، آناستاموزینگ است که از تنش و تغییر شکل پلاستیک حاصل می‌شوند، نور XPL پهنانی دید ۴۶ میلیمتر. (ب) دانه‌های کلسیت به صورت شکل‌دار تا بی‌شكل با اندازه‌ی بزرگ تا متوسط و دارای ماکل در راستای برگوارگی میلیونیتی آرایش یافته‌اند، نور XPL پهنانی دید ۱/۸ میلیمتر (پ) کلسیت‌های ماهی‌گون که حرکت راستبر را نشان دهد، نور PPL پهنانی دید ۱/۸ میلیمتر.

که به عنوان انتقال مرز دانه‌ای معروف است [۲] (شکل-۵-ب). ریز ساختارهای موجود در کوارتز در مرمهرهای مورد بررسی بیانگر تغییرات ساختاری پلاستیک در شبکه کانی‌ها نظیر گسترش و تشکیل ریزدانه‌ها (شکل-۵-پ)، خاموشی موجی و تجدید تبلور دینامیکی به شکل برآمده (BLG) Bulging (BLG) Subgrain Rotation (SGR) است. وجود چرخش ریزدانه در کوارتز براساس طرح نموداری ارائه شده برای انباشت‌های چند بلوری [۲۶-۲۴] در حالت انتقال BLG به SGR است که تقریباً در دمای کمتر از ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حاصل می‌شود (شکل-۶).

از نشانه‌های دیگر وجود تنش در این سنگ‌ها، عدسی‌های کوارتزی با بافت فلیزr Flyser است (شکل-۵-الف)، این بافت در سنگ‌های مشاهده می‌شود که تحت تأثیر دگرگونی دینامیک (مکانیکی) قرار گرفته باشند که توده‌های عدسی شکل مواد درشت دانه یا خرد نشده به وسیله توده‌های موجی از مواد ریزدانه و بریدگی دار از هم جدا شده‌اند [۲۳]. مرز بین دانه‌های کوارتز و کلسیت در محل فلیزرهای pinning با چگالی جابه‌ریز ساختارهای pinning است، دانه‌های کلسیت با چگالی جابه‌جایی پایین با هجوم به داخل دانه‌های کانی کوارتز با چگالی جابه‌جایی بالا سبب کاهش انرژی آزاد درونی انباشت‌های می‌شوند.



شکل ۵ (الف) نمایش لنز کوارتزی با بافت فلیزr Flyser، که تحت تأثیر دگرگونی دینامیکی (مکانیکی) شکل گرفته است، نور XPL با پهنه‌ای دید ۴/۶ میلی‌متر. (ب) میکروساختارهای pinning در مرز بین دانه‌های کوارتز و کلسیت نور XPL تا پهنه‌ای دید ۱/۸ میلی‌متر. (پ) گسترش و تشکیل ریزدانه از طریق مهاجرت مرز دانه‌ها در کانی کوارتز، که تقریباً در دمای کمتر از ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حاصل می‌شود، نور XPL با پهنه‌ای دید ۱/۸ میلی‌متر. (ت) دانه‌های تجدید تبلور یافته آنقدر گسترش نداشته اند که ساختار هسته و پوشش خوبی را نشان دهد، نور XPL با پهنه‌ای دید ۱/۸ میلی‌متر. (ث) تجدید تبلور دینامیکی BLG در حاشیه‌ی دانه‌های کوارتز و در راستای سطوح شکستگی، نور XPL با پهنه‌ای دید ۴/۶ میلی‌متر.



شکل ۶ طرح نموداری چهار نوع اصلی تجدید تبلور دینامیکی در انباشت پلی کریستالین کوارتز در گستره‌ی دمایی نشان داده شده [۲۶-۲۴].

سانتی‌گراد ایجاد می‌شوند و نشان‌دهنده‌ی عملکرد دگرشكلي حین دگرگونی است.

- ماکل‌های نوع IV ظاهراً ضخیم‌تر و با خطهایی به صورت لخته‌ای با مرزهای دندانه‌دار دیده می‌شوند که در نتیجه مهاجرت، شکل‌ها ایجاد شده‌اند و مشخص کننده‌ی دمای بالای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و تجدید تبلور دینامیکی هستند [۷-۹].

ماکل‌های نوع I و II در دمای کمتر، احتمالاً در عمق کمتر تشکیل می‌شوند و متأثر از مراحل نهایی دگرگونی هستند و ماکل‌های نوع III و IV در دمای بالا، احتمالاً در عمق بیش‌تر و در مراحل دگرشكلي حین دگرگونی و یا تجدید تبلور دینامیکی شکل می‌گیرند [۹-۷].

در بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده از منطقه در نتیجه تنش‌های اعمال شده، علاوه بر خمش و کشیدگی (شکل ۷-ب)، شاهد ماکل‌های دگرشكلي شده نوع I و II هستیم. بر مبنای رده‌بندی [۹]، ماکل‌های دگرشكلي نوع II فراوانی بیشتری دارند، که نشان‌دهنده تشکیل بلورهای کلسیت دوقولو شده در شرایط عمق و دمای کم است.

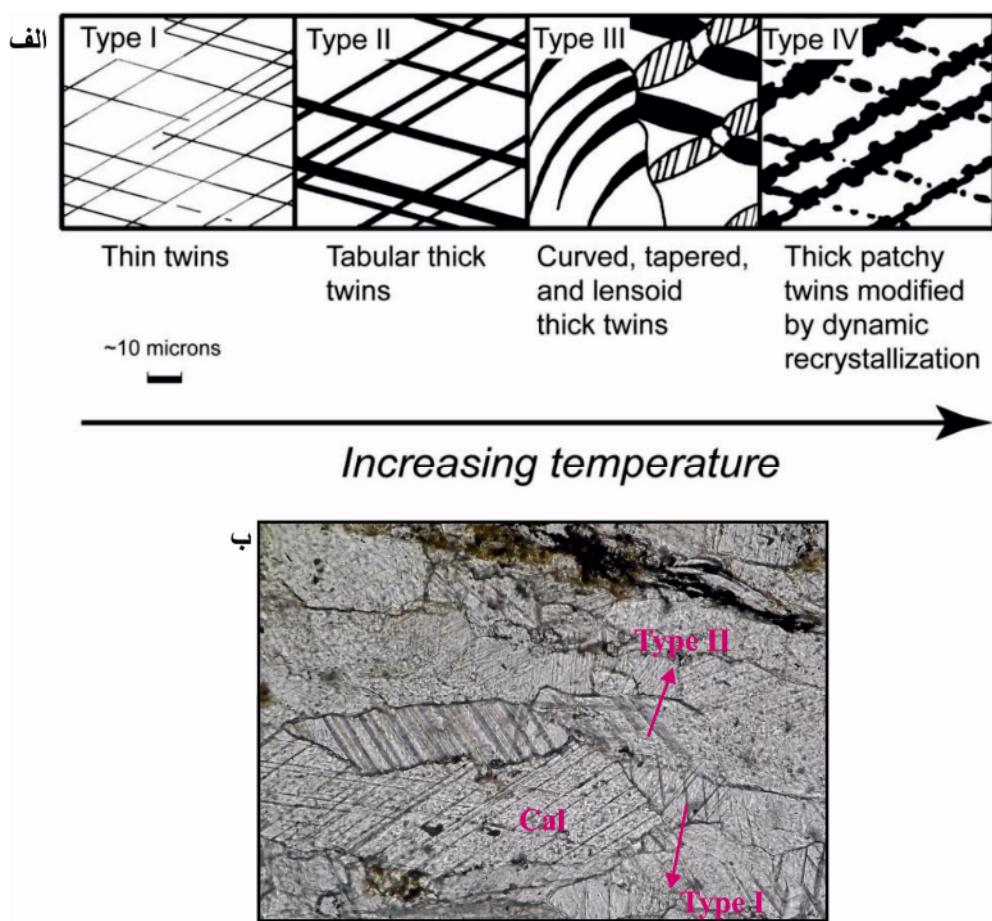
گسترش دانه‌های تجدید تبلور یافته آنقدر نیست که ساختار هسته و پوشش را به خوبی نشان دهد [۲۶] (شکل ۵-۵). در دمای پایین تجدید تبلور دینامیکی برآمده BLG در حاشیه‌ی دانه‌های کوارتز و در راستای سطوح شکستگی ایجاد می‌شود [۲] (شکل ۵-۵-ث).

[۹] با مشاهده‌ی دگرشكلي در کربنات‌های موجود در سفره‌های رورانده nappes در راستای منطقه‌ی سوئیس انواع ماکل‌ها را به منظور برآورد دمای سازند می‌توان به چهار دسته رده‌بندی کرد [۷]، (شکل ۷-الف):

ماکل‌های نوع I دارای باریکه‌های مستقیم بوده و ضخامتی کمتر از ۱ میکرومتر دارند و در دمای ۱۷۰-۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ایجاد می‌شوند.

ماکل‌های نوع II عریض‌تر و با ضخامت ۱-۵ میکرومتر و در دمای ۱۵۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌شوند، این نوع ماکل‌ها به رخدادهای نهایی متامورفیسم وابسته‌اند [۷، ۸، ۹].

ماکل‌های نوع III عریض، خمیده، کمی باریکاند که خمیدگی ماکل‌ها می‌تواند ناشی از فعالیت لغزشی روی سطح f, باشد [۹]. این نوع ماکل‌ها در دمای بالای ۲۰۰ درجه‌ی



شکل ۷ (الف) طرح نموداری از انواع ماکلهای کلسیت ناشی از تأثیر دما [۹,۸].  
ب) ماکلهای دگرشکل شده نوع I، II و کشیدگی در کانی کلسیت با نور XPL پهنه‌ای دید ۱/۸ میلی‌متر.

- وجود خاموشی موجی که نمایانگر دگرشکلی بین بلور (حرکت نقایص شبکه‌ای در یک بلور) است.  
- وجود ریز ساختار pinning که نمایانگر تبلور دوباره‌ی دینامیکی است.  
- تبلور دوباره‌ی دینامیکی به صورت انتقال مرز دانه‌ای بین دانه‌های کانیایی کلسیت و کوارتز.  
- شواهد ساختاری که دمای تشکیل از  $300-150$  درجه‌ی سانتی گراد را برای دگرشکلی مرمرها نشان می‌دهد عبارتند از:  
- ماکلهای دگرشکلی کانی کلسیت نوع I و II.  
- دگرشکلی کانی کوارتز نظیر گسترش و تشکیل ریزدانه‌ها، خاموشی موجی، ماکلهای دگرشکلی و تجدید تبلور دینامیکی به شکل (BLG) (در حاشیه‌ی دانه‌های کوارتز و در Subgrain Rotation (SGR) (گسترش دانه‌های تجدید تبلور یافته آنقدر نیست که ساختار هسته و پوشش خوبی را نشان دهد).

برداشت  
منطقه‌ی مورد بررسی از نظر زمین ساختی فعال بوده و حوادث دگرگونی و دگرشکلی متفاوتی را پشت سر گذاشته است [۲۲,۱۸]. در مرمرهای مورد بررسی طی حادثه دوم دگرگونی (دگرگونی قهقهای) و دگرشکلی که در حد رخساره‌ی دگرگونی شیست سبز بوده، ماکلهای دگرشکلی تشکیل شده است. شواهد ساختاری مرمرها وجود پهنه‌ی برشی و دمای تشکیل از  $300-150$  درجه‌ی سانتی گراد را برای دگرشکلی مرمرهای منطقه‌ی مورد بررسی نشان می‌دهد.  
شواهد ساختاری که حاکی از وجود پهنه‌ی برشی در این منطقه است عبارتند از:  
- سمتگیری ترجیحی شکلی دانه‌های کلسیت در اثر تغییر شکل پلاستیک.  
- ایجاد بافت فلیزیز در عدسی‌های کوارتزی که متأثر از دگرگونی دینامیک است.

## مراجع

- [13] Sahandi M., Hosseinidoust S. G., Radfar G., Mohajjal M., "Geological map of shazand area (Sanandaj- Sirjan, Iran)", Scale 1:100000, No. 5852, Geological Survey of Iran, Tehran (2006).
- [14] Stocklin J., "Structural history and tectonic of Iran, a review", American Association of Petroleum Geologists Bulletin (AAPG), 52 (7) (1968) 1229-1258.
- [15] Mohajjal M., Fergusson C. L., Sahandi M. R., "Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran", Journal of Asian Earth Sciences 21 (2003) 397-412.
- [16] درویش زاده ع، "زمین شناسی ایران (چینه شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماقاماتیسم)"، انتشارات امیرکبیر، تهران (۱۳۸۹) ص. ۴۲۵-۱.
- [17] افتخارنژاد ج، "تقسیم تکتونیک ایران بر اساس حوضه های رسوی"، مجله انجمن نفت ایران، شماره ۸۲ (۱۳۵۹) ص. ۱۹-۲۸.
- [18] Mohajjal M., "Structure and tectonic evolution of Palaeozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj – Sirjan Zone, western Iran", PhD Thesis, University of Wollongong, Australia (1997).
- [19] شبانیان بروجنی ن، داودیان دهکردی ع.ر، خلیلی م، خدامی م، "شواهد بافتی وجود شرایط دینامیکی در حین و پس از تبلور گنایس‌های دیناموماگماتیک قلعه‌دژ، ازنا"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۹) ص ۴۷۲-۴۶۳.
- [20] Mohajjal M., Fergosen C. L., "Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj - Sirjan zone, Western Iran", Journal of Structural Geology 22(8) (2000) 1125-1139.
- [21] Shabanian N., Khalili M., Davoudian A. R., "Petrography and geochemistry of mylonitic granite of Ghaleh - Dezh, NW Azna, Sanandaj - Sirjan zone, Iran", Neues Jahrbuch Fur Mineralogie - Abhandlungen 185(3) (2009) 233-248.
- [22] شبانیان ن، "پترولوجی و محیط تکتونیکی توده‌های گرانیتیوئیدی منطقه ازنا (پهنه سنندج-سیرجان، ایران)"، پایان نامه دکتری، دانشکده علوم گروه زمین‌شناسی، اصفهان، (۱۳۸۸).
- [23] سرابی ف، "سنگ‌های دگرگونی"، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران (۱۳۷۳).
- [1] Twiss R. J., Moores E. M., "Structural geology", Freeman, New York (1992).
- [2] Passchier C. W., Trouw R. A. J., "Microtectonics", 2nd edition, Springer, Verlag, Berlin (2005)
- [3] Blenkinsop T., "Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks", Kluwer Academic Publishers, New York (2002).
- [4] Lacombe O., Laurent P., "Determination of principal stress magnitudes using calcite twins and rock mechanics data", Tectonophysics 202 (1990) 83-93.
- [5] Jamison W. R., Spang J. H., "Use of calcite twin lamellae to infer differential stress", Geological Society of America Bulletin 87 (1976) 868-872.
- [6] Chen K., Kunz M., Tamura M., Wenk H. R., "Deformation twinning and residual stress in calcite studied with synchrotron polychromatic X-ray microdiffraction", PhysChem Minerals 38 (2011) 491-500.
- [7] Rybacki E., Evans B., Janssen A., Wirth R., Dresen G., "Influence of stress, temperature, and strain on calcite twins constrained by deformation experiments", Journal tectonophysics 21(4) (2013) 17.
- [8] Ferrill D. A., "Calcite twin widths and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone", Journal of Structural Geology 13 (1991) 667-675.
- [9] Burkhard M., "Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review", Journal of Structural Geology 15 (1993) 351-368.
- [10] Ferrill D. A., Morris A. P., Evans M. A., Burkhard M., Jr G., Onasch C. M., "Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer", Journal of Structural Geology 26 (2004) 1521-1529.
- [11] Lacombe O., "Calcite twins, a tool for tectonic studies in Thrust Belts and Stable Orogenic Forelands", Oil and Gas Science and Technology 65 (6) (2010) 809-838.
- [12] Turner F. J., "Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles", American Journal Science 251 (1953) 276-298.

quartz over a temperature range from 250 to 700°C", Journal of Structural Geology 24(3) (2002) 1861-1884.

[26] Passchier C. W., Trouw R. A. J., "Atlas of Mylonites - and related microstructures", 2nd edition, Springer, Verlag. Berlin (2010).

[24] Kurse R., Stünitz H., Kunze K., "Dynamic recrystallization processes in plagioclase porphyroclasts", Journal of Structural Geology 23 (2001) 1781-1802.

[25] Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., Schmid S. M., "The eastern Tonale fault zone: a 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of