

# تعیین شرایط دگرشکلی پهنه گسل مشا با استفاده از داده‌های ریزساختاری و میانبرهای سیال

محسن احتشامی معین‌آبادی<sup>۱</sup> و علی یساقی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۱

## چکیده

با مطالعه ریزساختار و ترمومتری میانبرهای سیال در رگه‌های کلسیتی از پهنه گسل مشا شرایط دگرشکلی این پهنه گسلی به‌ویژه طی میوسن میانی - پایانی بررسی شده است. بر پایه دگرشکلی درون بلوری دانه‌های کوارتز، ماکل مکانیکی کلسیت و اطلاعات حاصل از ترمومتری میانبرهای سیال اولیه در رگه‌های کلسیتی موجود در پهنه گسل مشا، بیشینه دمای دگرریختی پهنه گسل طی تشریری ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود. برآورد فشار با استفاده از داده‌های میانبر سیال به‌دست آمده از رگه‌های کلسیتی در پهنه گسل با توجه به تشکیل رگه‌ها در مراحل آخر دگرریختی برآوردهای کمتر از واقع به‌دست می‌دهد. با فرض گرادیان زمین‌گرمایی بین ۲۵-۳۵ درجه بر کیلومتر با توجه به شرایط زمین‌ساختی جنوب البرز مرکزی بین ائوسن تا میوسن پایانی، در شرایط آدیاباتیک بیشینه دمای ۳۵۰ درجه دگرریختی نماینده ژرفایی بین ۱۰ تا ۱۴ کیلومتر و فشاری بین ۲/۵ تا ۴ کیلو بار برای پهنه تشریری گسل مشا بوده که این برآورد با داده‌های اخیر لرزه‌ای از گسل مشا که بیشترین فعالیت گسل را در ژرفای ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر نشان می‌دهند، همخوانی دارد.

**کلیدواژه‌ها:** گسل مشا، دگرشکلی، میانبر سیال، دما و فشار، تشریری جنوب البرز مرکزی.

\*نویسنده مسئول: علی یساقی

E-mail: Yassaghi@modares.ac.ir

## ۱- پیش‌گفتار

گسل مشا از گسل‌های اساسی در جنوب البرز مرکزی است که در طول آن سنگ‌های پرکامبرین تا سنوزویک از شمال بر روی سازند کرج به سن ائوسن در جنوب رانده شده است (بربریان و همکاران، ۱۳۶۴). این گسل توسط Dellenbach (1964) برای اولین بار شناسایی و نقشه‌برداری شد. تاکنون مطالعاتی درباره لرزه‌زمین‌ساخت گسل مشا (بربریان و همکاران، ۱۳۶۴؛ سلیمانی و همکاران، ۱۳۸۲؛ Berberian & Yeats, 1999) و هندسه و تحول جنبشی گسل (Ehteshami-Moinabadi & Yassaghi, 2007; Yassaghi & Madanipour, 2008) انجام شده است. با این حال داده‌های کمی درباره شرایط دگرشکلی پهنه گسلی مشا در دسترس نیست. گرچه Ehteshami-Moinabadi & Yassaghi (2007) با بررسی مقاطع میکروسکوپی چند نمونه از پهنه گسل مشا در دو برش شرایط دگرشکلی را به صورت کیفی نیمه‌شکنا برآورد کرده‌اند.

برای تعیین شرایط دگرشکلی پهنه‌های گسلی از روش‌های مختلف زمین‌گرما- فشارسنجی همچون تحلیل ریزساختارهای دگرشکلی پویای کوارتز، ماکل‌های دگرشکلی کلسیت و تعادل ترمودینامیکی کانی‌های دگرگونی و میانبرهای سیال می‌توان استفاده کرد (Hollister et al., 1979; Yonkee et al., 1989; O'Hara & Haak, 1992; Burkhard, 1993; Pryer, 1993; Shigematsu & Yamagishi, 2002; Yassaghi et al., 2004; Ferrill et al., 2004; Toy et al., 2010).

در این نوشتار با بررسی ریزساختارهای میکروسکوپی سنگ‌های پهنه گسل، ساختارهای ماکل کلسیت در متن سنگ‌های پهنه و داده‌های ترمومتری میانبرهای سیال از رگه‌های پهنه گسل مشا، شرایط دگرشکلی در این پهنه در طی تشریری به ویژه میوسن مورد بحث قرار گرفته است. اما از آنجا که گسل مشا، گسلی وارون‌شده با تاریخچه پیچیده طی مزوزویک (Ehteshami-Moinabadi et al., 2012) و سنوزویک (Ehteshami-Moinabadi & Yassaghi, 2007) و سنوزویک (Yassaghi & Madanipour, 2008) است، بر اثر وارون‌شدگی هندسه پیچیده و شاخه‌های فرودپورهای و فرادیواره‌ای متعددی یافته است که بحث آن بیرون از هدف این نوشتار است (Ehteshami-Moinabadi & Yassaghi, 2007; Yassaghi & Madanipour, 2008; Ehteshami-Moinabadi et al., 2012).

## ۲- داده‌های ریزساختار

در میان کانی‌های موجود در طبیعت کوارتز یکی از رایج‌ترین کانی‌ها در سنگ‌ها است که بلورهای آن در طی دگرریختی، تغییرشکل می‌یابد و بنابراین به عنوان یک کانی شاخص برای بررسی شرایط دگرشکلی به کار می‌رود (Vernon, 1999; Stipp et al., 2002; Passchier & Trouw, 2005). در دماهای بسیار پایین (کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، دگرریختی کوارتز به صورت شکستگی، انتقال محلول (solution transfer) و انحلال فشاری بروز می‌کند. این شرایط در دماهای بالاتر (بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه) یا دگرگونی درجه پایین با تشکیل ساختارهای خاموشی موحی و لامل‌های دگرریختی غالب هستند. فرایندهای تبلور مجدد، بازایی و کشیدگی دانه‌ها در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه شاخص می‌شوند (Grosong, 1988; Passchier & Trouw, 2005).

در بررسی ریزساختارهای پهنه گسلی، بیش از ۱۰ (۸ برش با مثلث در شکل ۱ نشان داده شده‌اند) برش مختلف از پهنه گسل مشا مورد مطالعه قرار گرفتند که از کوه‌های طالقان در باختر تا دره هراز در خاور توزیع شده‌اند. برای مطالعه ریزساختارهای پهنه گسل نمونه‌هایی جهت‌یافته در راستای صفحه XZ تهیه شده است. در این راستا صفحه XZ با توجه به داده‌های موجود از راستای جابه‌جایی گسل‌ها عمود بر سطح برگرارگی مرتبط با گسل خوردگی مشخص شده است. برش نازک در راستای صفحه XZ بیضوی کرنش و عمود بر برگرارگی در پهنه گسلی تهیه شد و بسته به اینکه در نمونه‌ها کانی چیره کوارتز (نمونه‌های آواری) یا کلسیت (کربناتی) باشد، ریزساختارهای آنها مطالعه و بررسی شده است. نمونه‌های مورد مطالعه از پهنه‌های گسلی تشریری گسل مشا برداشت شده‌اند. جایی که این پهنه‌های

در پهنه گسل مشا در دره دربند (نمونه ریزساختار شماره ۲ در شکل ۱) که از روستای تکیه سپهسالار در جاده کرج - چالوس قابل دسترسی است، راندگی واحدهای پرکامبرین - پالئوزویک بر روی کرج رخ داده است. نمونه‌های فرودواره گسل از سازند کرج ساختارهای ماکل کلسیت تپ ۲ در رگه‌های کلسیتی (شکل ۱۷) را منعکس کردند.

در برش روستای همه‌جا (نمونه ریزساختار شماره ۳ در شکل ۱) بر پهنه گسل مشا جایی که گسل بیش از ۴۵ درجه به سمت شمال شیب دارد، واحدهای پالئوزویک از شمال بر روی سازند کرج رانده شده است. وجه شاخص پهنه گسل مشا در برش همه‌جا تشکیل ماکل کلسیت تپ ۲ براساس معیار Ferrill et al. (2004) در رگه‌های کلسیتی فرادواره گسل مشا است (شکل ۸). برخی از ماکل‌های کلسیت در شکل ۸ بیش از ۱۵ میکرون ستبر دارند، در حالیکه حد اولیه ماکل تپ ۲، ۱ میکرون است (Ferrill et al., 2004). این ماکل‌ها نشان‌دهنده تحمل دمایی بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه توسط رگه‌ها است که با توجه به بزرگی ماکل‌ها به حد بالای این بازه نزدیک‌تر است.

### ۳- مطالعه میانبرهای سیال

مطالعه میانبرهای سیال بر روی نمونه‌هایی از رگه‌های موجود در پهنه گسلی مشا صورت گرفته است. بیش از ۹ (نمونه‌های میانبر شماره ۱ تا ۹ با علامت ستاره سیاه رنگ در شکل ۱) نمونه از رگه‌های موجود در پهنه بررسی شدند که به‌جز یک رگه باریت که فاقد میانبر بود، همه نمونه‌ها از نوع کلسیتی بوده و همه آنها ستبرایی بین ۱ تا ۳ سانتی‌متر دارند (شکل ۹). رگه‌های سیلیسی در منطقه کم و یا از ستبرای لازم برای تهیه نمونه مورد مطالعه میانبر سیال برخوردار نبودند. در ابتدا نمونه‌ها با توزیع در واحدهای سنی مختلف برداشت شدند اما پس از تهیه برش‌های لازم، مطالعه میکروسکوپی نشان داد که در بین ۸ نمونه باقیمانده نیز، بیشتر آنها حاوی ماکل کلسیت و یا شکستگی‌هایی هستند و بیشتر زمینه نمونه از کانی‌های نیمه‌شفاف پر شده است. این وضعیت سبب ناکارآمدی ۴ نمونه دیگر شد به گونه‌ای که به دلیل حضور ماکل‌ها و شکستگی‌ها، واجد میانبرهای مناسب برای مطالعه نبودند و یا به دلیل کدوری نمونه، امکان مطالعه میانبرهای آنها نبوده است. در نهایت ۴ نمونه دارای میانبرهای قابل مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند که سه مورد از آنها مربوط به رگه‌های کلسیتی درون سازند کرج در پهنه گسل مشا بوده‌اند (شکل ۱).

اندازه‌گیری پارامترهای دمایی به کمک استیج گرم‌کننده و منجمدکننده Linkam THMS600 که بر روی میکروسکوپ زایس نصب شده، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی صورت گرفت. دامنه حرارتی دستگاه - ۱۹۶ تا +۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. مطالعات سنگ‌شناسی با توجه به ابعاد ریز میانبرها با بزرگنمایی‌های ۸۰۰ و ۱۲۵۰ برابر انجام گرفته است. در مطالعه سنگ‌شناسی، مشخصات نوری مانند شکل و اندازه میانبرها، رده‌بندی ژنتیکی (اولیه، ثانویه، ثانویه کاذب)، محتویات میانبرهای سیال (L+V+S) نسبت V/L، نوع کانی‌های دختر (با توجه به شکل کریستالی و شکل ظاهری)، پدیده‌هایی مانند نشت (Leakage) و دم‌بریدگی (Necking down) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰). از آنجا که پدیده‌های نشت و دم‌بریدگی سبب می‌شوند تا داده‌ها و نتایج میانبرهای سیال قابل اعتماد نشود، بنابراین از مطالعه حرارت‌سنجی این نوع میانبرها صرف‌نظر شده است. به‌طور کلی از دید شکل ظاهری، سیالات درگیر در نمونه‌ها را می‌توان به ترتیب فراوانی به سیالات درگیر دارای اشکال نامنظم و کروی، کشیده و اشکال چهاروجهی تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱۰). از میان نمونه‌های تهیه شده تنها ۴ نمونه دارای میانبر بودند که با توجه به ماهیت نمونه‌ها، میانبرهای موجود به مقدار محدود و پراکنده و تقریباً مات دیده می‌شدند. میانبرهای اولیه مناسب برای مطالعات حرارت‌سنجی کم و به سختی در نمونه‌ها قابل شناسایی بودند و به‌ویژه انجام عملیات انجماد و ثبت اولین دمایی ذوب یخ (Te) به سختی امکان‌پذیر شد. به همین دلیل تعداد میانبرهای اولیه مطالعه شده

گسلی حاصل توسعه راندگی در واحدهای ائوسن تا میوسن یا در توده‌های آذرین نفوذی درون سازند کرج است.

### ۲-۱- ریزساخت کوارتز

مطالعه میکروسکوپی سه نمونه از سازند کرج در راستای صفحه XZ بیضوی کرنش و عمود بر برگوارگی، از پهنه گسل مشا در دره دربند در شمال روستای تکیه سپهسالار (نمونه ریزساختار شماره ۱ در شکل ۱)، نشان داد نمونه‌ها که بیشتر از نوع آواری هستند و از کوارتز و اندکی کلسیت و پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند. مطالعه میکروسکوپی برش‌های تهیه شده از نمونه‌ها نشان داد که ساختارهای عمده دانه‌های کوارتز خاموشی موجی و انحلال فشاری در مرز دانه است که در شکل ۲، این ساختارها در دو نمونه دوم و سوم از این برش با P برای انحلال فشاری و U برای خاموشی موجی نشان داده شده‌اند. در شکل ۲-الف، یک مورد از تشکیل زیردانه با علامت S نیز نشان داده شده است.

در نمونه‌های مطالعه شده از سنگ‌های آذر- آواری متعلق به سازند کرج در پهنه گسل مشا در کسپل (نمونه ریزساختار شماره ۴ در شکل ۱)، دگرریختی دانه‌های کوارتز به طور بارز به صورت تشکیل خاموشی موجی گسترده و زیردانه‌ها در دانه‌ها به چشم می‌خورد (شکل ۳). بررسی‌ها نشان می‌دهد تبلور دوباره به صورت مشخص و برجسته در نمونه‌ها رخ نداده است و در نتیجه شرایط دگرریختی نمونه‌ها نمی‌تواند در بازه دمایی بالا (<۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) فرض شود.

### ۲-۲- ریزساخت کلسیت

از مطالعه ماکل‌های دینامیکی کلسیت برای بررسی دمایی دگرریختی توسط Ferrill (1991); Groshong (1988); Jamison & Spang (1976) و Burkhard (1993) استفاده شده و سپس Ferrill et al. (2004) این مطالعات را سامان دادند. اساس این معیار که از آن به عنوان معیار Ferrill et al. (2004) یاد می‌شود اینست که دگرشکلی کلسیت در دمایی زیر ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد از طریق ماکل‌شدگی مکانیکی صورت می‌گیرد (Groshong, 1988). از هندسه این ماکل‌ها به عنوان میزانی از دمایی دگرشکلی استفاده می‌شود (Jamison & Spang, 1976; Ferrill et al., 2004; Ferrill, 1991; Burkhard, 1993). در این راستا، ماکل‌ها ستبرای کمتر از ۱ میکرومتر به نام تپ یک و نشان‌دهنده دمایی کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (Burkhard, 1993)، ماکل‌های ستبرتر از ۱ میکرومتر نشان‌دهنده دمایی بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه (تپ ۲) (Ferrill, 1991; Ferrill et al., 2004) و ماکل‌های ستبر با هندسه خمیده تپ ۳ نام‌گذاری می‌شوند (Burkhard, 1993). ماکل تپ ۳ دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه را نشان می‌دهد. در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه، به دلیل تبلور دوباره دانه‌های کلسیت مرز ماکل‌ها دندانه‌دار و منقطع می‌شود که به عنوان ماکل تپ ۴ در نظر گرفته می‌شوند (Ferrill et al., 2004).

ماکل کلسیت در برش‌های نازک تهیه شده از پهنه گسل مشا در چند برش وجود داشته‌اند که بارزترین آنها در برش‌های دره فشم، دره دربند و دره همه‌جا بوده‌اند (شکل ۱). در برش دره فشم، پهنه گسل مشا واحدهای پالئوزویک بیشتر متشکل از سازند کامبرین باروت را بر روی نهشته‌های توفی سازند کرج از شمال به جنوب رانده است. برش نازک تهیه شده از یک سنگ‌آهک با برگوارگی استیلولیتی است که در آن ماکل‌شدگی کلسیت نیز توسعه یافته است (شکل ۴). بر پایه معیار Ferrill et al. (2004) این ماکل‌ها با قطر بیش از ۵ میکرومتر تپ ۲ هستند. در نمونه دیگری از برش فشم، ماکل کلسیت درون دانه‌های کلسیتی توسعه یافته است و شکستگی‌های بعدی دانه را تحت تأثیر قرار داده است. شدت ماکل‌شدگی کلسیت در این بیشتر از نمونه شکل ۴ بوده به گونه‌ای که افزون بر ماکل تپ ۲ (شکل ۵) در برخی بخش‌ها ماکل تپ ۳ با ستبرای بیش از ۲۰ میکرومتر و هندسه مقاطع و لبه دندانه‌دار به چشم می‌خورد (شکل ۶) که بر پایه معیار Ferrill et al. (2004)، دمایی بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

چگالی محلول نمک به صورت تابعی از فشار و دما در محدوده شوری‌های محاسبه شده برای ۴ نمونه که به صورت ۵٪، ۱۷٪، ۲۱٪ و ۲۳٪ گرد شده‌اند، به دست آمده و به صورت ایزوکورهایی روی نمودار دما-فشار نشان داده شدند (Shepherd et al., 1985; Roedder & Bondar, 1980) (شکل ۱۲). برای رسم ایزوکور هر نمونه دست کم از دو میانبار استفاده شده است. در مورد نمونه ۷ که در مقدار شوری محاسبه شده برای میانبارهای متعدد اختلاف وجود دارد، میانبارهای با شوری ۲۳٪ به دلیل کاهش عدم قطعیت کنار گذاشته شده و از میانبارهای با شوری حدود ۱۷٪ استفاده شده است (جدول ۱).

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش، براساس نتایج مطالعات ریزساختاری و میانبارهای سیال در سنگ‌های ترشیری در پهنه گسلی مشا شرایط دما و فشار دگرریختی این پهنه مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نظر دمایی، بیشینه دمایی که میانبارهای سیال در رگه‌های کلسیتی درون پهنه نشان می‌دهند، دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد است که با توجه به نبود شواهد جوشش در نمونه‌ها، این کمترین دمایی است که برای تشکیل این کانی‌ها در رگه‌ها می‌توان در نظر گرفت (Shepherd et al., 1985). ساختارهای ماکل کلسیت موجود در پهنه دمایی بالاتر از ۲۰۰ درجه را نشان می‌دهند که با توجه به فراوانی ماکل‌های تپ ۲ براساس معیار Ferrill et al. (2004)، قطر ماکل، خمیدگی ماکل‌ها و دندانه‌دار شدن مواردی که مشکوک به تپ ۳ هستند، دمای حداکثر ۳۰۰ درجه را می‌توان برای این سنگ‌ها در نظر گرفت. همچنین با توجه به وجود ساختارهای خاموشی موجی و زیردانه بلورهای کوارتز، دمای این پهنه‌ها در حدود ۳۰۰ درجه است (Passchier & Trouw, 2005). براساس مطالعات اشرفیان‌فر (۱۳۸۴)، شناسایی کانی‌های پاراژنز دگرگونی رخساره پرنیت - پومپلیت در توف‌های کرج در منطقه توجال در شمال تهران نشان می‌دهد این توف‌ها بیشینه دما و فشار ۳۵۰ درجه و ۵ کیلو بار را تحمل کرده‌اند. بنابراین با در نظر گرفتن داده‌های ریزساختار دانه‌های کوارتز و کلسیت و همچنین داده‌های اشرفیان‌فر (۱۳۸۴) و نبود ساختار تبلور دوباره گسترده در نمونه‌های کوارتز، بیشینه دمای دگرریختی در پهنه ترشیری گسل مشا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.

با در نظر گرفتن بیشینه دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان ژئوترموتر مستقل در نمودار دما - فشار میانبارهای سیال (شکل ۱۲)، ایزوکورهایی نمونه‌های مطالعه شده به ترتیب در مقادیر ۱۲۴۰ و ۵۰۰ بار برای برش کله‌ها، ۴۸۰ بار برای برش تکیه سپهسالار و ۷۲۰ بار برای برش گرمابدر قطع می‌شوند. به منظور تعمیم شرایط فشار به ژرفای دگرشکلی در برش‌های یادشده باید به شرایط زمین‌شناسی نمونه‌های گرفته و جایگاه آنها توجه شود. نکته مهم اینست که تفسیر داده‌های فشار برای ژرفا به انتخاب شرایط لیتواستاتیک یا هیدرواستاتیک بستگی دارد که این نیازمند داشتن اطلاعات از شرایط تشکیل رگه‌های مطالعه شده است. مقادیر فشار به دست آمده از نمونه‌های برش کله‌ها نشان می‌دهد که نمونه ۴ (شکل ۱) که فشار ۱۲۴۰ بار را به دست می‌دهد، در ژرفاهای بیشتری نسبت به نمونه ۲ تشکیل شده است. این مسئله با توجه به جایگاه فرادیواره‌ای آن در گسل مشا که جابه‌جایی معکوس را در طی ترشیری نسبت به فرودیواره تحمل کرده است معنی‌دار است، در حالیکه نمونه ۲ که بیشتر به فرودیواره گسل نزدیک‌تر است، جابه‌جایی کمتری داشته است.

نمونه ۵ که از برش تکیه سپهسالار (شکل ۱) گرفته شده است، متعلق به رگه‌های کلسیتی در سازند کرج در پهنه گسل مشا است که در مراحل نهایی دگرشکلی تشکیل شده است، شاهد این ادعا بررسی میکروسکوپی سنگ‌های پهنه است که نشان می‌دهد رگه‌های کلسیتی مطالعه شده، رگه‌های سیلیسی کهن‌تری را قطع می‌کنند (شکل ۱۳).

نمونه ۷ که از منطقه گرمابدر در دره کرج تهیه شده است، در واقع متعلق به یکی

۳۰ نمونه بوده است که ویژگی‌ها و مقادیر محاسبه شده برای آنها در جدول ۱ آمده است. اندازه میانبارها در نمونه‌ها از زیر ۳ میکرون و به ندرت تا حدود ۲۰ میکرون قابل مشاهده بودند (شکل ۱۰). میانگین اندازه ذرات در حدود ۷ میکرون است.

میانبارهای موجود از نوع دو فاز؛ مایع آبگین + حباب گاز (LV) بوده که حباب گاز حجمی معادل ۱۵ الی ۳۵ درصد را تشکیل می‌دهد. به عبارت دیگر درجه پرشدگی معادل ۰/۸۵ الی ۰/۹۵ درصد بوده که از رابطه Shepherd et al. (1985) به دست می‌آید. در میانبارهایی با نسبت VL، حباب گاز در حدود ۸۵ الی ۹۵ درصد حجم میانبار را تشکیل داده است (شکل ۱۰).

مطالعات حرارت‌سنجی بر روی میانبارهای اولیه دوفازی (مایع + گاز) صورت گرفت که شامل عملیات سرمایش (Freezing) و سپس گرمایش (Heating) بود. محاسبه پارامترها براساس نرم‌افزار Loner38 (Bakker, 2003) انجام گرفت. ترکیب میانبارها، با توجه به دماهای اندازه‌گیری شده یوتکتیک و ذوب یخ از نوع میانبارهای سیال بسیار شور با ترکیب  $\text{NaCl-KCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  تشخیص داده شد (L. Diamond, 2011; Personal Communication) و بنابراین محاسبه فشار همگن شدن و حجم مولار براساس Zhang & Frantz (1987) انجام شده است (جدول ۱). در تمامی میانبارها، همگن شدن فاز بخار به فاز مایع رخ داد.

برای تحلیل داده‌های میانبارهای سیال پیش از استفاده از آنها برای ترمومتری و بارومتری، یکی از روش‌ها بررسی روند نمونه‌ها در رسم مقدار شوری - دمای همگن شدن برای میانبارهای اندازه‌گیری شده است (شکل ۱۱). با بررسی شکل ۱۱ درمی‌یابیم که میانبارهای اندازه‌گیری شده برای نمونه شماره ۴ (شکل ۱)، همگی از شوری کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر برخوردار بوده و تقریباً حالت تجمعی دارند. اما قرارگیری میانبارهای نمونه‌های شماره ۲ و ۵ (شکل ۱) در یک روند خطی عمود بر محور شوری می‌تواند نشان‌دهنده سرد شدن ساده محلول باشد که در بسیاری از محیط‌های زمین‌شناسی قابل انتظار است و یا متأثر از دم‌بریدگی احتمالی میانبارها که در نبود شواهد مستدل تفکیک مسیره‌های مربوط به سرد شدن ساده و دم‌بریدگی از هم غیرقابل تشخیص هستند (Shepherd et al., 1985). از آنجا که در بررسی هندسی این میانبارها اثری از دم‌بریدگی آنها دیده نشده است و مقدار شوری میانبارهای هر یک از نمونه‌های ۲ و ۵ در یک رنج قرار دارند، از داده‌های این میانبارها نیز با احتیاط استفاده خواهد شد. در نهایت میانبارهای مربوط به نمونه ۷، به جز یک میانبار، بقیه میانبارها در یک منطقه تجمع یافته‌اند. از آنجا که در اندازه‌گیری‌های انجام شده، هیچ یک از نمونه‌ها روندی به سمت منحنی اشباع‌شدگی هالیت همراه با سرد شدن را نشان نمی‌دهند، جوشش در هیچ یک از نمونه‌ها رخ نداده است (Shepherd et al., 1985)، بنابراین دمای همگن شدن معرف حداقل دمای تشکیل میانبار با دمای کانی است. بیشترین دمای ثبت شده در نمونه‌های میانبار ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد است که با دمای ماکل‌های کلسیت تپ ۲ در منطقه مطالعه همخوانی دارد.

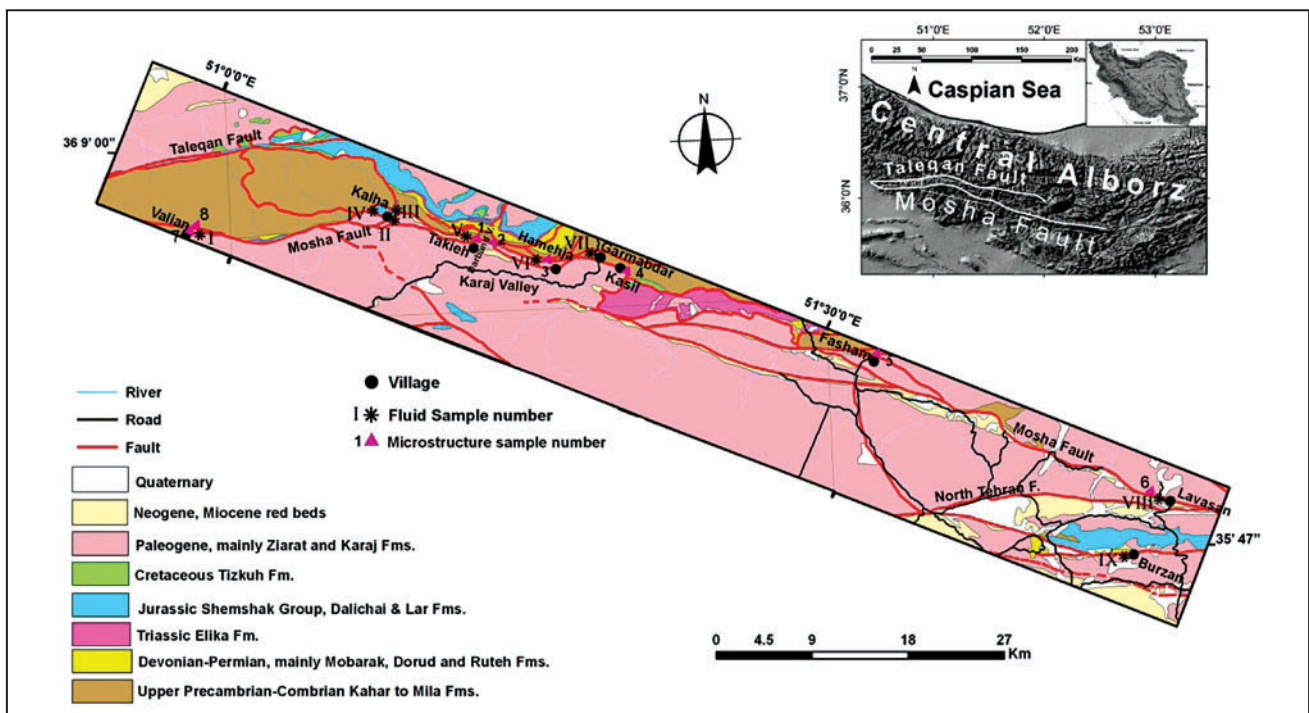
به منظور استفاده از داده‌های میانبار سیال برای برآورد فشار، با توجه به اینکه جوشش در میانبارها رخ نداده است، از فشار بخار سیال در دمای همگن شدن که بر روی سیستم  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  مدل‌سازی می‌شود، می‌توان به عنوان کمترین فشار موجود استفاده کرد که البته به دلیل نجوشیدن، فشار واقعی بیشتر از این مقدار خواهد بود (Roedder & Bondar, 1980; Shepherd et al., 1985).

روش مورد استفاده در این مطالعه بدین شرح است. نخست شوری سیال برای میانبارهای مطالعه شده براساس دمای ذوب یخ (Tm) براساس سیستم  $\text{NaCl-KCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  و همچنین چگالی آنها با استفاده از نرم‌افزار Bakker (2003) محاسبه شد (جدول ۱). به منظور رسم ایزوکورها، از آنجا که ترکیب یادشده پیچیده است، باید بر روی سیستم  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  مدل‌سازی شود. بنابراین یکی از بهترین داده‌های موجود برای  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  که بیشتر پژوهشگران از آن استفاده می‌کنند، داده‌های Potter & Brown (1977) است که بدین وسیله

از شاخه‌های فرعی گسل مشا است که فشار حدود ۷۲۰ بار را نشان می‌دهد. چنانچه شرایط حاکم بر این نمونه لیتواستاتیک فرض شود، ژرفای دگرشکلی در حدود ۲۸۰۰ متر برای این نمونه به دست می‌آید. بیشترین فشار به دست آمده برای نمونه گرفته شده از منطقه کلها، نمونه ۴، ۱۲۴۰ بار است که با فرض شرایط لیتواستاتیک و چگالی متوسط ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب از سنگ‌های قاره‌ای، ژرفایی در حدود ۵ کیلومتر را به دست می‌دهد. داده‌های میانبر سیال از رگه‌های پهنه گسلی مشا یک ژرفای دست کم ۵ کیلومتر را برای بخش‌های دگرریخت رخنمون یافته از پهنه ترشیری گسل مشا در کلها نشان می‌دهد. اما با توجه به سن جوان‌تر رگه‌های کلسیتی نسبت به دگرشکلی زمینه سنگ (مانند شکل ۱۳) و به ویژه بیشینه دمای دگرریختی ۳۵۰ درجه براساس داده‌های ریزساختار، برآورد واقعی ژرفای گسلش باید با استفاده از داده‌های ریزساختار و با در نظر گرفتن شرایط آدیاباتیک صورت گیرد.

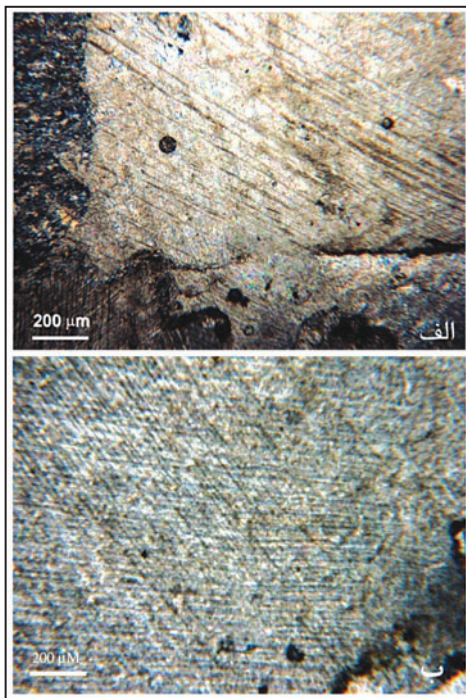
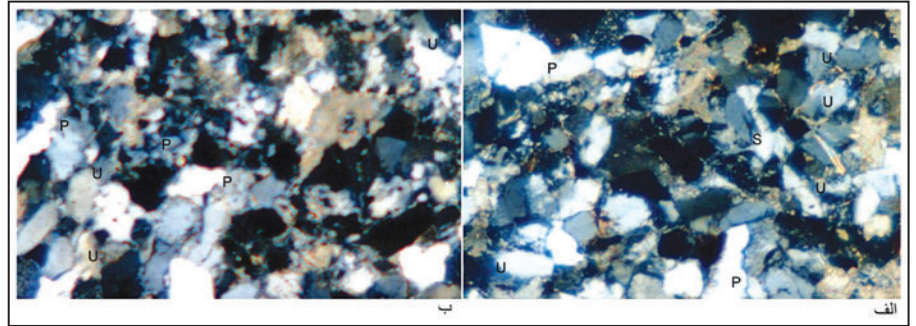
داده‌های اخیر لرزه‌ای نشان می‌دهند پهنه گسلی مشا تا ژرفای ۲۰ کیلومتری نیز فعالیت لرزه‌ای دارد، اما بیشتر فعالیت بین ژرفای ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر متمرکز شده است (Tatar et al., 2012). چنانچه گرادیان زمین‌گرایی در منطقه مشخص باشد، برازش داده‌های به دست آمده از شرایط دمای دگرریختی (۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) می‌تواند برآورد واقعی تری درباره ژرفای دگرریختی در اختیار بگذارد. Axen et al. (2001) گرادیان زمین‌گرایی برای منطقه علم‌کوه را در میوسن پایانی ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر برآورد کرده‌اند. بسیاری از کمان‌های ماگمایی و حوضه‌های درون‌قاره‌ای گرادیان‌های زمین‌گرایی بالایی را ثبت کرده‌اند که بین ۲۵ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر نوسان داشته‌اند (Rothstein & Manning, 2003). در نبود داده‌های گرادیان زمین‌گرایی و با توجه به شرایط زمین‌ساختی ترشیری جنوب البرز مرکزی که با ماگماتیسیم به ویژه در ائوسن - الیگوسن (Berberian, 1983) مربوط به میوسن میانی - پایانی است که انتظار می‌رود در نتیجه گسل مشا در این دوره با نرخ بیشتری نسبت به الیگوسن فعال بوده باشد.

زمان دقیق آغاز کوتاه‌شدگی و تشکیل حوضه‌های همراه آن در رشته‌کوه‌های البرز نامعین بوده است (Allen et al., 2003)، اما اخیراً براساس داده‌های به دست آمده از مطالعات ژئوکرونولوژی، مگنتواستراتیگرافی، چینه‌شناسی و رسوب‌شناسی بر روی نهشته‌های سازند کند و نهشته‌های الیگو - میوسن سازندهای قرمز زیرین، قم و قرمز در منطقه ایوانکی، Ballato et al. (2011) مدلی ارائه کرده‌اند که براساس آن رخداد ترفشارشی در البرز مرکزی با نرخ کم از ۳۶ میلیون سال پیش آغاز شده است و سپس در ۱۷ میلیون سال پیش این نرخ افزایش یافته است. داده‌های ترموکرونولوژی از فلدسپارهای پتاسیم به دست آمده از چهار توده نفوذی در البرز مرکزی، زمان آغاز برخاستگی سریع را بین ۱۲ میلیون سال و  $2 \pm 5$  میلیون سال برآورد می‌کنند (Axen et al., 2001; Guest et al., 2006) که البته با مطالعات اخیر و داده‌های سن‌سنجی نمونه‌ها از نهشته‌های محدود الیگوسن و میوسن در منطقه طالقان همخوانی دارد (Guest et al., 2007). بنابراین غالب دگرریختی فشارشی در ترشیری مربوط به میوسن میانی - پایانی است که انتظار می‌رود در نتیجه گسل مشا در این دوره با نرخ بیشتری نسبت به الیگوسن فعال بوده باشد.

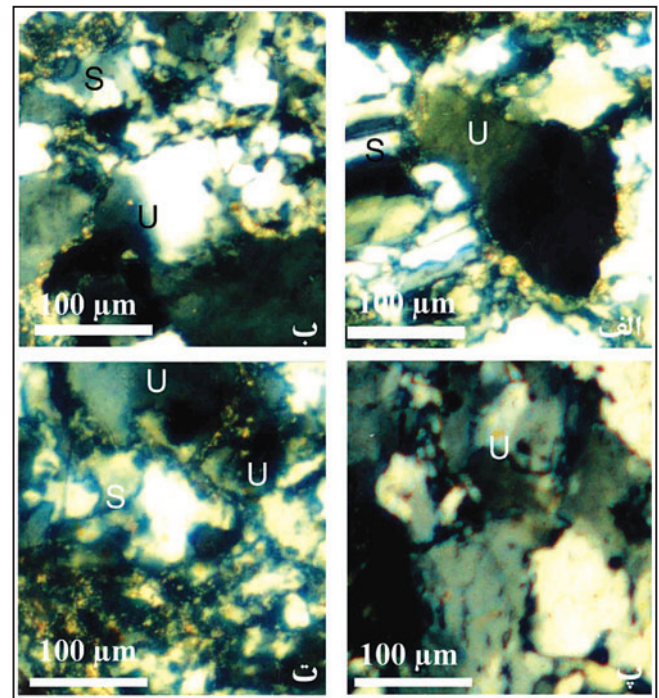


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ساده شده پهنه گسل مشا در البرز مرکزی بر اساس حقی‌پور و همکاران (۱۳۶۵) و وحدتی دانشمند (۱۳۷۰) که موقعیت نمونه‌های تهیه شده برای مطالعه ریزساخت و میانبر با شماره در آن نشان داده شده است. موقعیت نقشه در نقشه ضمیمه با کادر سفید مشخص شده است. نام برش‌ها براساس شماره به ترتیب نمونه‌های میانبر سیال: ۱: ولیان، ۲: کلها، ۳: آویز، ۴: تکیه، ۵: تکیه سپهسالار، ۶: همه‌جا، ۷: گرمابدر، ۸: لواسان، ۹: بورزن. نمونه‌های ریزساختار: ۱: ولیان، ۲: کلها، ۳: تکیه، ۴: کسبیل، ۵: تکیه، ۶: همه‌جا، ۷: گرمابدر، ۸: لواسان، ۹: بورزن.

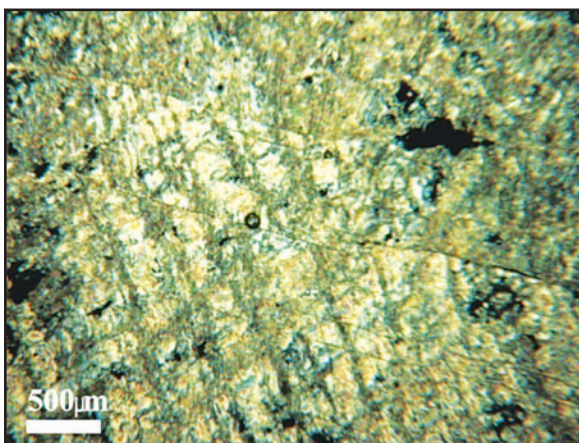
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نور پلاریزه از نمونه‌های آواری سازند کرج از پهنه گسل مشا در دره دربند (نمونه ریزساختار شماره ۱ در شکل ۱) به موازات صفحه XZ کرنش، عمود بر برگوارگی. به خاموشی موجی (U) و انحلال فشاری (P) در مرز دانه‌های کوارتز توجه کنید. تنها در یک دانه در شکل الف، تشکیل زیردانه (S) محتمل است.



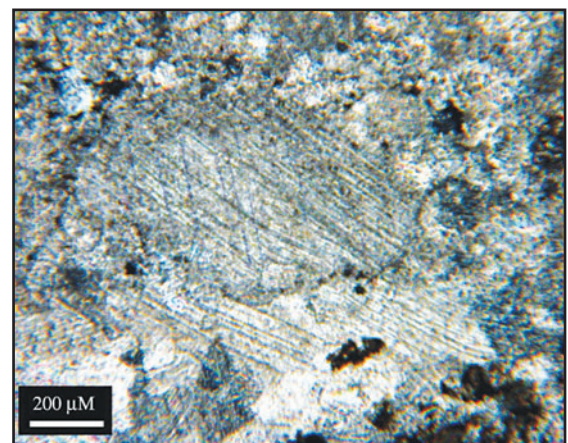
شکل ۴- الف) برگوارگی استیلوبیتی در سنگ‌های کربناتی کامبرین باروت (نمونه ریزساختار شماره ۵ در شکل ۱) که در پهنه گسل مشا در برش فشم بر روی سازند کرج رانده شده‌اند؛ ب) ماکل کلسیت تیپ ۲ در پهنه گسل مشا در فشم.



شکل ۳- الف تا ت) ساختارهای میکروسکوپی از دانه‌های کوارتز دگرریخت شده در سنگ‌های آذر-آواری سازند کرج در پهنه گسل مشا در کسبل (نمونه ریزساختار شماره ۴ در شکل ۱)، (U: خاموشی موجی، S: تشکیل زیردانه‌گی)، خاموشی موجی در دانه کوارتز غالب بوده و زیردانه در برخی دانه‌ها شکل گرفته‌اند. برای مشاهده محل نمونه به شکل ۱ مراجعه شود.

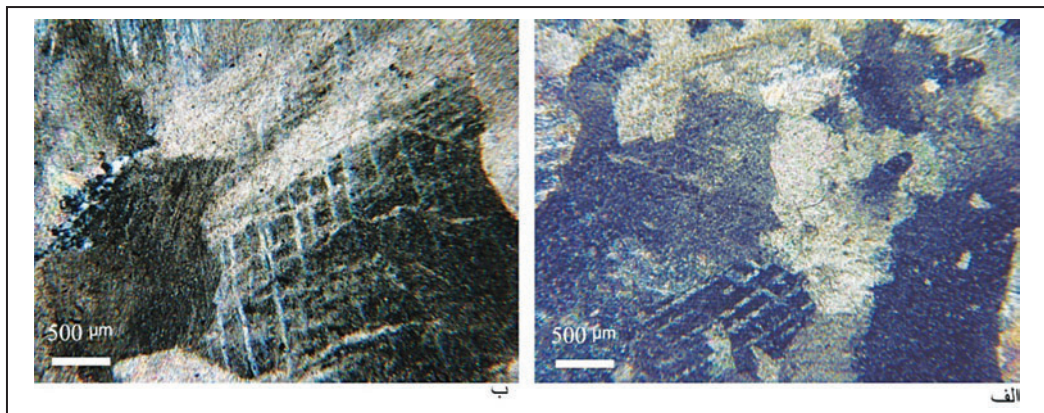
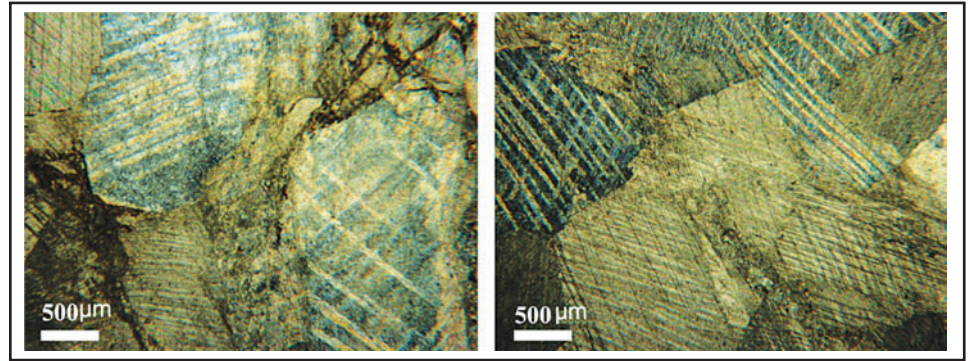


شکل ۶- ماکل کلسیت تیپ ۳ (Ferrill et al., 2004) در نمونه‌های تهیه شده از پهنه گسل مشا در برش فشم.

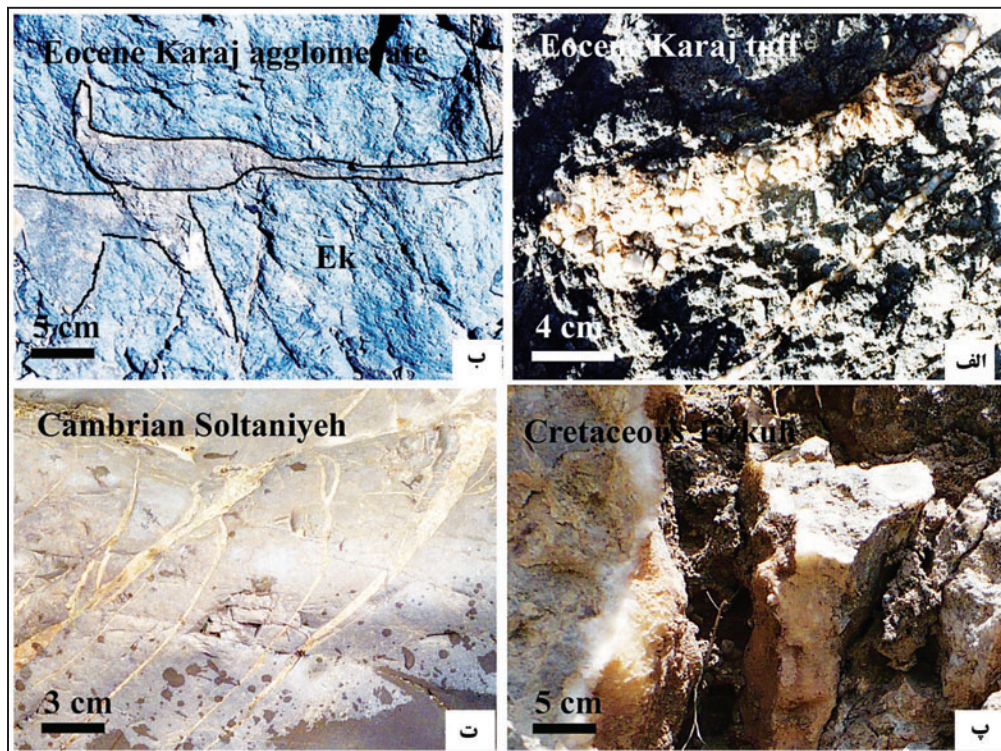


شکل ۵- ماکل کلسیت در دانه‌های کلسیت در برش فشم، شکستگی در مرز و درون دانه توسعه یافته است.

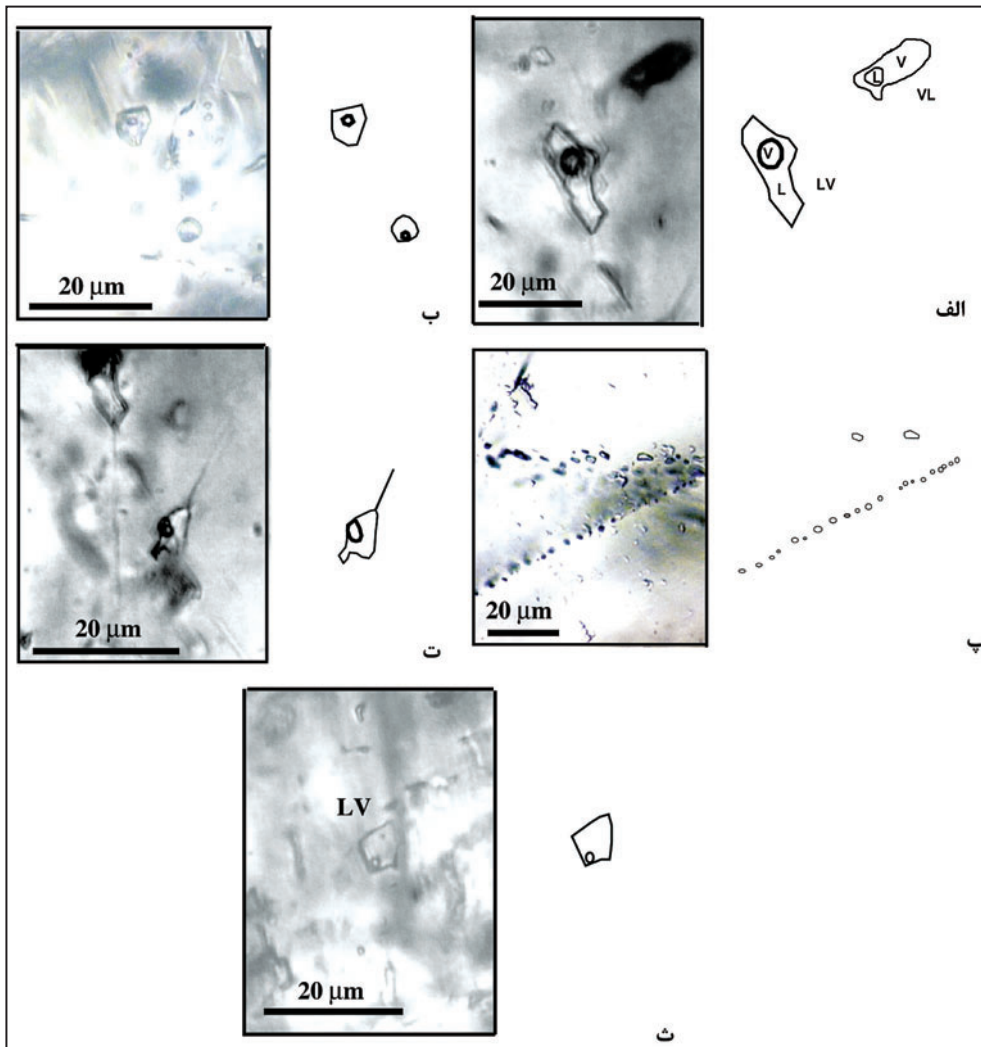
شکل ۷- دو نمونه از ماکل کلسیت تیپ ۲ براساس معیار Ferrill et al. (2004) در پهنه گسل مشا در دره دربند، تکیه سپهسالار.



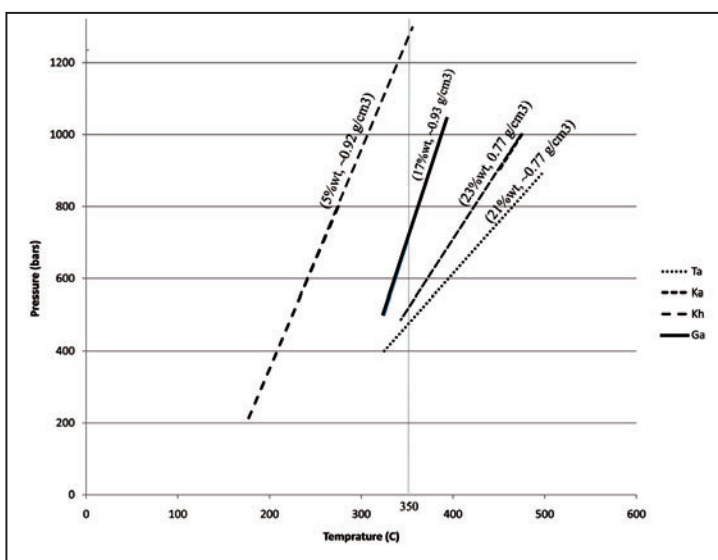
شکل ۸- الف و ب) دو نمونه از ایجاد ماکل‌های کلسیت تیپ دو ( Ferrill et al., 2004) در رگه‌های کلسیتی، فرادیواره گسل مشا در برش همه‌جا. پهنای برخی از ماکل‌ها به بیش از ۱۵ میکرون می‌رسد.



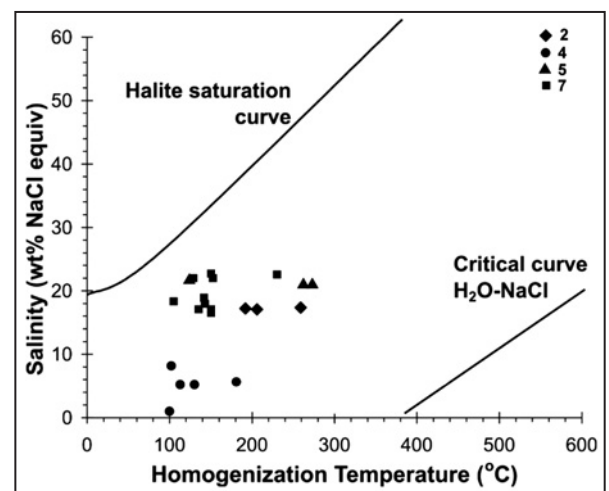
شکل ۹- نمایی از رگه‌های منتخب برای تهیه نمونه‌های مطالعاتی میانبرهای سیال از پهنه گسل مشا در مناطق مختلف الف) کلها (فرادیواره مجاور پهنه گسلی مشا)؛ ب) کلها، رگه کلسیتی درون آگلومرا (درون پهنه گسلی مشا)؛ پ) بورزن رگه کلسیتی در سنگ آهک تیزکوه؛ ت) همه جا، رگه کلسیتی درون سازند سلطانیه فرادیواره گسل مشا. برای مشاهده موقعیت مناطق به شکل ۱ مراجعه شود.



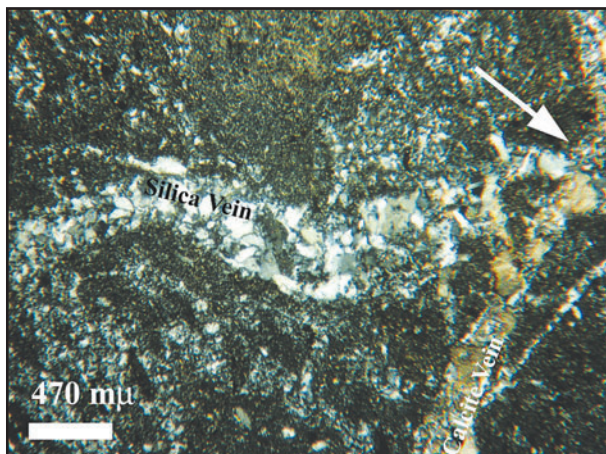
شکل ۱۰- وضعیت هندسی میانبراهای سیال در نمونه‌های مطالعه شده؛ الف) میانبر اولیه با شکل نامنظم از نوع آبگین + گاز (LV) در مرکز عکس به همراه میانبر دوفازی گاز + آبگین (VL) در گوشه سمت راست بالا؛ ب) میانبرهای اولیه آبگین + گاز کروی و مستطیلی شکل؛ پ) میانبرهای ثانویه به صورت خطی؛ ت) میانبر آبگین + گاز دگرشکل شده به صورت دم‌بریدگی در بخش بالایی؛ ث) میانبر اولیه آبگین + گاز به صورت تقریباً مربع شکل با مقدار گاز اندک.



شکل ۱۲- ایزوکوره‌های به‌دست آمده برای نمونه‌های میانبرهای سیال (Ga=نمونه ۷ گرمابدر)، (Ta=نمونه ۵، تکیه سپهسالار)، (Ka=نمونه ۲، کلها)، (Kh=نمونه ۴ کلها، فرادیواره مشا)، درصد وزنی NaCl و چگالی بر روی ایزوکورها نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار دمای همگن شدن در میانبرهای اولیه در برابر درصد وزنی NaCl.



شکل ۱۳- عکس میکروسکوپی از نمونه شماره ۵ که قطع شدگی رگه سیلیسی توسط رگه کلسیتی (پیکان) را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش میانبرهای سیال در پهنه گسل مشا، برای مشاهده محل نمونه‌ها به شکل ۱ مراجعه شود (nv: غیرقابل مشاهده).

| شماره نمونه رگه | اندازه (μm) | متشأ  | نوع | دمای اولین ذوب شدگی (C) | دمای ذوب (C) | دمای همگن شدن (C) | شوری، درصد وزنی NaCl (Oakes et al., 1990) | چگالی (gr/cm <sup>3</sup> ) (Zhang and Frantz, 1987) | حجم مولار (cc/mol) | فشار همگن شدن (Mpa) |
|-----------------|-------------|-------|-----|-------------------------|--------------|-------------------|---|--|--------------------|---------------------|
| ۷               | ۵           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۲۰          | ۱۴۸               | ۲۲/۳۵                                     | ۰/۹۲۲۵   | ۱۹/۵۲۷۲            | ۰/۴۸۲۳۰۲            |
| ۷               | ۷           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۵          | ۱۴۵               | ۱۸/۶۴                                     | ۰/۹۲۵۰۲  | ۱۹/۴۷۵۶            | ۰/۴۷۰۷۰۳            |
| ۷               | ۶           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۳          | ۱۳۷               | ۱۶/۹۳                                     | ۰/۹۳۱۳۰۹   | ۱۹/۳۴۴             | ۰/۴۵۲۰۶۴            |
| ۷               | ۷           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۲۰          | ۱۲۵               | ۲۲/۳۵                                     | ۰/۹۴۰۱۴۲   | ۱۹/۱۶۲۳            | ۰/۴۵۲۱۷۳            |
| ۷               | ۸           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۵          | ۱۰۵               | ۱۸/۶۴                                     | ۰/۹۵۳۴۶۸   | ۱۸/۸۹۴۵            | ۰/۵۰۱۸۸۲            |
| ۷               | ۶           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۲۰          | ۱۵۰               | ۲۲/۳۵                                     | ۰/۹۲۰۹۱۲   | ۱۹/۵۶۲۴            | ۰/۴۹۱۵۶             |
| ۷               | ۶           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۴          | ۱۵۰               | ۱۷/۸۱                                     | ۰/۹۲۰۹۱۲   | ۱۹/۵۶۲۴            | ۰/۴۹۴۵۶             |
| ۷               | ۸           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۴          | ۱۴۹               | ۱۷/۸۱                                     | ۰/۹۲۱۷۴۵   | ۱۹/۵۴۴۸            | ۰/۴۸۶۷۷۴            |
| ۷               | ۲۰          | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۴/۶        | ۱۴۰               | ۱۸/۳۱                                     | ۰/۹۲۸۹۹  | ۱۹/۳۹۲۳            | ۰/۴۵۷۰۷۷            |
| ۷               | ۲۰          | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۲۰          | ۲۳۰               | ۲۲/۳۵                                     | ۰/۸۳۱۶۲۹   | ۲۱/۶۶۲۶            | ۲/۴۱۳۸۹             |
| ۴               | ۵           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۵/۱         | ۱۰۰               | ۸/۰۱                                      | ۰/۹۵۶۵۶۴   | ۱۸/۸۳۳۳            | ۰/۵۱۹۴۱             |
| ۴               | ۶           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۳           | ۱۲۷               | ۴/۹۴                                      | ۰/۹۳۸۷۱  | ۱۹/۱۹۱۴            | ۰/۴۵۰۱۷۲            |
| ۴               | ۵           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۰/۳         | ۱۰۰               | ۰/۵۳                                      | ۰/۹۵۶۵۶۴   | ۱۸/۸۳۳۳            | ۰/۵۱۹۴۱             |
| ۴               | ۶           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۳           | ۱۱۲               | ۴/۹۴                                      | ۰/۹۴۸۹۸۴   | ۱۸/۹۸۳۸            | ۰/۴۷۹۶۹۱            |
| ۴               | ۷           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۲           | ۱۳۰               | ۳/۳۷                                      | ۰/۹۳۶۵۴۵   | ۱۹/۲۳۵۹            | ۰/۴۴۸۵۵۴            |
| ۴               | ۸           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۳/۵         | ۱۸۰               | ۵/۷                                       | ۰/۸۹۳۰۵۷   | ۲۰/۱۷۲۶            | ۰/۸۱۰۰۹۲            |
| ۵               | ۶           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۸/۳        | ۱۲۵               | ۲۱/۱۶                                     | ۰/۹۴۰۱۴  | ۱۹/۱۶۲             | ۰/۴۵۲۱۷۳            |
| ۵               | ۵           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۸          | ۲۶۳               | ۲۰/۹۴                                     | ۰/۷۷۸۳   | ۲۳/۱۴۷             | ۴/۵۱۳۱۱             |
| ۵               | ۵           | اولیه | LV  | -۳۷                     | -۱۸          | ۲۷۰               | ۲۰/۹۴                                     | ۰/۷۶۵  | ۲۳/۵۳۴             | ۵/۰۸۹۷۱             |
| ۲               | ۷           | اولیه | LV  | nv                      | -۱۲/۵        | ۱۸۹               | ۱۶/۴۷                                     | ۰/۸۸۳۵   | ۲۰/۳۹۰۸            | ۰/۹۸۵۵۶             |
| ۲               | ۵           | اولیه | LV  | nv                      | -۱۳          | ۲۵۹               | ۱۶/۹۳                                     | ۰/۷۸۵۳۸  | ۲۲/۹۳۸۳            | ۴/۲۰۵۵۲             |
| ۲               | ۵           | اولیه | LV  | nv                      | -۱۲/۵        | ۲۰۴               | ۱۶/۴۷                                     | ۰/۸۶۶۱۸  | ۲۰/۷۹۸             | ۱/۳۷۹۲۲             |
| ۲               | ۶           | اولیه | LV  | nv                      | nv           | ۲۲۱               | ....                                      | ۰/۸۴۴۲۸۳   | ۲۱/۳۳۸             | ۲/۰۰۰۳۲             |
| ۲               | ۵           | اولیه | LV  | nv                      | nv           | ۱۷۵               | ....                                      | ۰/۸۹۸۱۱۲   | ۲۰/۰۵۹۱            | ۰/۷۳۰۲۷۲            |
| ۲               | ۶           | اولیه | LV  | nv                      | nv           | ۱۸۹               | ....                                      | ۰/۸۸۳۵   | ۲۰/۳۹۰۸            | ۰/۹۸۵۵۶۹            |



**کتابخانه**

اشرفیان فر، ن.، ۱۳۸۴- پترولوژی دگرگونی درجه خفیف قسمتی از سازند کرج واقع در شمال برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران (مقطع توچال - ولنچک)، مجموعه مقالات بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

بربریان، م.، قرشی، م.، ارزنگاروش، ب. و مهاجر اشجعی، ا.، ۱۳۶۴- پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون، سازمان زمین شناسی کشور، گزارش ۵۶، ۳۱۶ برگ.

حقی پور، ع.، تراز، ه. و وحدتی دانشمند، ف.، ۱۳۶۵- نقشه زمین شناسی چهارگوش تهران (۱:۲۵۰۰۰۰)، سازمان زمین شناسی کشور.

سلیمانی، ش.، فقهی، خ.، شبانیان، ا.، عباسی، م. ر. و یتس، ف.، ۱۳۸۲- بررسی های دیرینه لرزه شناسی مقدماتی بر روی گسل مشا در دره مشا، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۹۶ برگ.

وحدتی دانشمند، ف.، ۱۳۷۰- نقشه زمین شناسی چهارگوش آمل (۱:۲۵۰۰۰۰). سازمان زمین شناسی کشور.

**References**

- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M. & Qorashi, M., 2003- Accommodation of Late Cenozoic oblique shortening in the Alborz Range, Northern Iran. *Journal of Structural Geology* 25(5): 659–672.
- Axen, G. J., Lam, P. S., Grove, M., Stockli, D. F. & Hassanzadeh, J., 2001- Exhumation of the West-Central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence and collision-related tectonics. *Geology* 29(6): 559–562.
- Bakker, R. J., 2003- Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology* 194: 3-23.
- Ballato, P., Uba, C. E., Landgraf, A., Strecker, M. R., Sudo, M., Stockli, D. F., Friedrich, A. & Tabatabaei, S. H., 2011- Arabia-Eurasia continental collision: Insights from late Tertiary foreland-basin evolution in the Alborz mountains, northern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 123(1-2): 106-131.
- Berberian, M. & Yeats, R. S., 1999- Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America* 89: 120–139.
- Berberian, M., 1983- The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 163–183.
- Burkhard, M., 1993- Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Journal Structural Geology* 15: 351–368.
- Dellenbach, J., 1964- Contribution à l'étude géologique de la région située à l'est de Tehran (Iran). Faculty of Science, University of Strasbourg (France), 117 p.
- Ehteshami-Moinabadi, M. & Yassaghi, A., 2007- Geometry and kinematics of the Mosha Fault, south central Alborz Range, Iran: An example of basement involved thrusting. *Journal of Asian Earth Sciences* 29: 928-938.
- Ehteshami-Moinabadi, M., Yassaghi, A. & Amini, A., 2012- Mesozoic basin inversion in Central Alborz, evidence from the evolution of Taleqan-Gajereh-Lar paleograbens. *Journal of Geopersia* 2(2): 43-63.
- Ferrill, D. A., 1991- Calcite twin widths and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone, *Journal of Structural Geology* 13: 667–676.
- Ferrill, D. A., 1998- Calcite twin width and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone. *Journal of Structural Geology* 13: 667–675.
- Ferrill, D. A., Morris, P. A., Evans, M. A., Burkhard, M., Groshong, J. R. H. & Onasch, C. M., 2004- Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer. *Journal of Structural Geology* 26: 1521-1529.
- Groshong, R. H., 1988- Low temperature deformation mechanisms and their interpretation. *Geological Society of America Bulletin* 100: 1329-1360.
- Guest, B., Horton, B., Axen, G. J., Hassanzadeh, J. & McIntosh, W., 2007- Middle to late Cenozoic basin evolution in the western Alborz Mountains: Implications for the onset of collisional deformation in northern Iran. *Tectonics* 26: TC6011. doi:10.1029/2006TC002091.
- Guest, B., Stockli, D. F., Grove, M., Axen, G. J., Lam, P. S. & Hassanzadeh, J., 2006- Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 118: 1507 – 1521.
- Hassanzadeh, J., Ghazi, A. M., Axen, G. & Guest, B., 2002- Oligo-Miocene mafic alkaline magmatism in north and northwest of Iran: Evidence for the separation of the Alborz from the Urumieh-Dokhtar magmatic arc: *Geological Society of America Abstracts with Programs* 34(6): 331.
- Hollister, L. S., Burruss, R. C., Henry, D. L. & Hendel, E. M., 1979- Physical conditions during uplift of metamorphic terranes as recorded by fluid inclusions. *Bulletin Societe France, Mineralogie Crystallographie* 102: 555-561.

- Jamison, W. R. & Spang, J. H., 1976- Use of calcite twin lamellae to infer differential stress, *Geological Society of America Bulletin* 87: 868-872.
- Oakes, C. S., Bondar, R. J. & Simonson, J. M., 1990- The system NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: the ice liquidus at 1 atm total pressure. *Geochimica, Cosmochimica Acta* 54: 603-610.
- O'Hara, K. D. & Haak, A., 1992- A fluid inclusion study of fluid pressure and salinity variations in the footwall of the Rector Branch thrust, North Carolina, U.S.A. *Journal of Structural Geology* 14: 579-589.
- Passchier, C. W. & Trouw, R. A. J., 2005- *Microtectonics*. Springer. 366 pp.
- Potter, H. R. W. & Brown, D. L., 1977- The volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0 °C to 500 °C at pressures up to 2000 bars based on a regression of available data in the literature. *USGS Bulletin*: 1421-C.
- Pryer, L. L., 1993- Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: The Grenville Front, Ontario, Canada. *Journal of Structural Geology* 15(1): 21-36.
- Roedder, E. & Bondar, R. J., 1980- Geologic pressure determination from fluid inclusion studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 8: 263-301.
- Rothstein, D. A. & Manning, C. E., 2003- Geothermal gradients in continental magmatic arcs: constraints from the eastern Peninsula Range Batholith, Baja California, Mexico, in Johnson, S. E., Paterson, S. R., Fletcher, J. M., Girty, G. H., Kimbrough, D. L., & Martin-Barajas, A., (Eds.) *Tectonic Evolution of North-Western Mexico and the southwestern USA*: Boulder. Geological Society of America Special Paper 374: 337-354.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. & Alderton, D. H. M., 1985- A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow. 239 pp.
- Shigematsu, N. & Yamagishi, H., 2002- Quartz microstructures and deformation conditions in the Hatagawa shear zone, north-eastern Japan. *Island Arc* 11: 45-60.
- Stipp, M., Stunitz, H., Heilbronner, R. & Schmid, S. M., 2002- 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: 1861-1884.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Abbassi, A. & Yamini Fard, F., 2012- Microseismicity and seismotectonics around the Mosha fault (Central Alborz, Iran). *Tectonophysics* 544-545: 50-59.
- Toy, V. G., Craw, D., Cooper, A. F. & Norris, R. J., 2010- Thermal regime in the central Alpine Fault zone, New Zealand: Constraints from microstructures, biotite chemistry and fluid inclusion data. *Tectonophysics* 485(1-4): 178-192.
- Vernon, R. H., 1999- Quartz and feldspar microstructures in metamorphic rocks. *Canadian Mineralogist* 37: 513-524.
- Yassaghi, A. & Madanipour, S., 2008- Influence of a transverse basement fault on along-strike variations in the geometry of an inverted normal fault: Case study of the Mosha Fault, Central Alborz Range, Iran. *Journal of Structural Geology* 30(12): 1507-1519.
- Yassaghi, A., James, P. R., Flöttmann, T. & Winsor, C. N., 2004- P-T conditions and kinematics of shear zones from the southern Adelaide Fold-Thrust Belt, South Australia: insights into the dynamics of a deeply eroded orogenic wedge. *Australian Journal of Earth Sciences* 51: 301-317.
- Yonkee, W. A., Parry, W. T., Bruhn, R. L. & Cashman, P. C., 1989- Thermal models of thrust faulting: Constraints from fluid inclusion observations, Willard thrust sheet, Idaho-Utah-Wyoming thrust belt. *Geological Society of America Bulletin* 101: 303-314.
- Zhang, Y. G. & Frantz, J. D., 1987- Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology* 64: 335-350.

## Determining the Deformation Condition of the Mosha Fault Using Microstructure and Fluid Inclusion Data

M. Ehteshami-Moinabadi<sup>1</sup> & A. Yassaghi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2012 August 15

Accepted: 2012 December 31

### Abstract

The assessment of deformation condition of the Mosha Fault during Middle-Late Miocene carried out using microstructure and thermometry of fluid inclusions within calcite veins in the fault zone. Based on intra-crystalline deformation of quartz grains, calcite twin, and thermometry of primary fluid inclusions in the calcite veins inside the Mosha fault zone, the maximum estimated deformation temperature of the Mosha fault is 350°C during Tertiary. Calculated pressure of the fault zone using fluid inclusion data is an underestimation of real pressure because the calcite veins formed in the last stages of deformation. Considering the tectonic setting of South Central Alborz and assuming a geothermal gradient ranging between 25-35°C/Km for the region from Eocene to the late Miocene, the maximum temperature of 350°C represents the depth between 10 to 14 Km in adiabatic condition. This depth range means a fault zone pressure between 2.5 to 4 kbar for the Mosha Fault zone during Tertiary, which is in correlation to recent seismic data that confirmed maximum fault activity in the depth between 10 to 15 Km.

**Keywords:** Mosha Fault, Deformation, Fluid Inclusion, P-T, Tertiary of South Central Alborz.

For Persian Version see pages 87 to 96

\*Corresponding author: A. Yassaghi; E-mail: Yassaghi@modares.ac.ir