



بررسی تغییرات کانی‌شناسی و ریزساختی گرانیت‌های چاه‌زرد (شرق جندق) طی میلونیت‌زایی براساس روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS)

آسیه فضیلت^۱، محمود صادقیان^{۲*}

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۱/۳۱، نسخه نهایی: ۹۸/۵/۷)

چکیده: توده گرانیتی چاه‌زرد با سن 535.4 ± 3.2 میلیون سال (تعیین شده به روش U-Pb بر روی زیرکن) به درون مجموعه دگرگونی جندق - عروسان نفوذ کرده و طی رخداد‌های بعدی به شدت میلونیتی شده است. این توده گرانیتی، برای نخستین بار براساس روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) بررسی شده است. مقدار میانگین پذیرفتاری مغناطیسی (Km) بیوتیت گرانیت‌ها (سازنده اصلی پیکره توده گرانیتی چاه‌زرد) $112 \mu SI$ است. بیوتیت مهمترین حامل مغناطیسی در بیوتیت گرانیت‌هاست. طی میلونیت‌زایی، حجم قابل توجهی از بیوتیت‌ها به مسکوویت تحول پیدا کرده و در نتیجه، مقادیر Km سنگ‌های دربرگیرنده آنها به شدت کاهش یافته است. خطواره‌ها و برگواره‌های مغناطیسی این توده گرانیتی به ترتیب، بیشتر دارای میل و شیب بسیار کمی هستند، شواهد صحرایی نیز این امر را تأیید می‌کند. خطواره‌های مغناطیسی، بیشتر به سمت شمال غرب آرایش یافته‌اند. از آن‌جا که شدت میلونیتی شدن بسیار زیاد است، ریزساخت‌های دستخوش تنش‌های زمین‌ساختی، بر ریزساخت‌های ماگمایی غلبه پیدا کرده و آن‌ها را به طور کامل مخدوش کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: گرانیت؛ ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی؛ میلونیت‌زایی؛ چاه‌زرد؛ جندق.

مقدمه

روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) از روش‌های نوین پژوهشی است که بر اساس اندازه‌گیری پارامترهای مغناطیسی یا تحلیل فابریک‌های مغناطیسی نمونه‌های سنگی استوار است [۲۰]. این روش در چند دهه اخیر در شاخه‌های مختلف علوم زمین، به‌ویژه سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی-ساختاری کاربرد بسیاری داشته است [۳-۱۳]. پژوهش‌های انجام شده در ایران در زمینه AMS تاکنون بیشتر پیرامون فابریک‌های سنگ‌های آذرین دگرشکل‌نشده یا کمتر دگرشکل شده متمرکز بوده است که گزیده‌ای از آنها در مراجع [۳۳-۱۴] همچنین [۳۷] فهرست شده‌اند. بر روی سنگ‌های متاپلیتی و آمفیبولیتی وابسته به مجموعه‌ی دگرگونی شترکوه با استفاده از روش (AMS) بررسی‌های جامعی صورت گرفته

است که علاقمندان می‌توانند جهت بررسی آنها به مراجع [۳۰-۳۳] رجوع کنند. در این پژوهش، روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) در مورد سنگ‌های آذرین به شدت دگرشکل‌شده و بررسی اثر دگرشکلی بر ریزساخت‌های ماگمایی و تغییر و تحولات کانی‌شناسی صورت گرفته طی دگرشکلی به کار رفته است.

روش بررسی ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS)، روشی بسیار آسان، دقیق، سریع و کم هزینه است. مزیت‌های این روش نسبت به دیگر روش‌های پتروفابریکی شفافیت بسیار بالا و سرعت عمل بالای آن است، همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است و از همه مهمتر آن‌که، در این روش می‌توان از کل رخنمون توده‌های سنگی به صورت منظم و اصولی نمونه‌برداری کرد [۲]. در این روش با

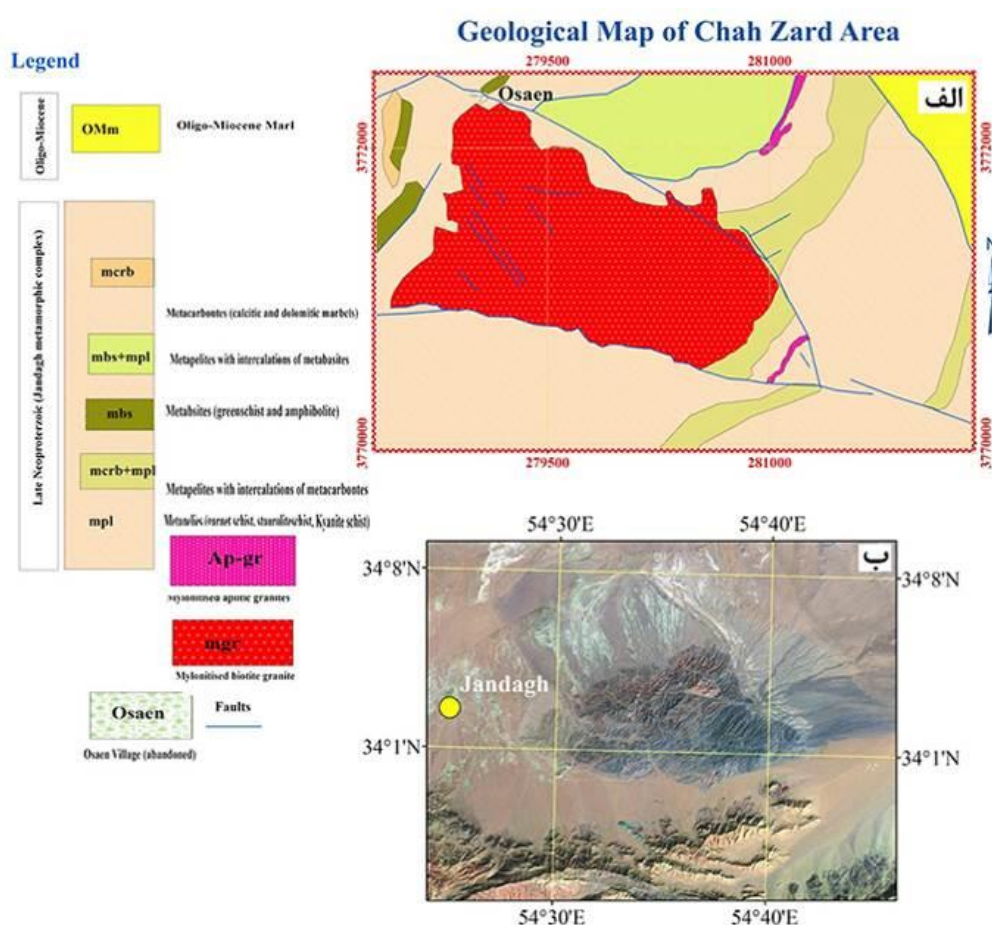
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۳۳۲۳۲۹۶۰۰۷، نمابر: ۰۲۳۳۲۳۲۹۶۰۰۷، پست الکترونیکی: sadeghian@shahroodut.ac.ir

ناهمشیب پوشانده‌اند. توده گرانیتهی چاه زرد (با وسعت تقریبی ۴ کیلومتر مربع) درون سنگ‌های دگرگونی مجموعه جندق - عروسان نفوذ کرده و در آن جای گرفته است. سنگ‌های دگرگونی منطقه چاه زرد به مجموعه پی‌سنگی جندق که از جمله مناطق پی‌سنگی ایران است تعلق دارند و با توجه به تعیین سن‌هایی که به تازگی به روش U-Pb بر روی برخی از واحدهای سنگی این مجموعه انجام شده‌است دارای سن نئوپروتروزوئیک پسین هستند (حدود ۵۴۰ میلیون سال). توده گرانیتهی چاه زرد دارای سن 535.4 ± 3.2 میلیون سال است [۳۴-۳۶]. سنگ‌های دگرگونی منطقه چاه زرد شامل طیف گسترده‌ای از ترکیبات مختلف چون متاپلیت (میکاشیست، گارنت شیست، استارولیت شیست، کیانیت شیست)، متاسندستون (میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی دگرگون‌شده)، متاکربنات (میان‌لایه‌های آهکی و دولومیتی دگرگون‌شده) و متابازیت (آمفیبولیت و گارنت آمفیبولیت) هستند.

اندازه‌گیری پارامترهای Kmin، Kint، Kmax می‌توان خطوارگی و برگوارگی مغناطیسی، مقدار ناهمسانگردی مغناطیسی، پارامتر شکل (shape parameter) و دیگر پارامترهای مغناطیسی را محاسبه کرد و در تفسیرهای زمین‌شناسی از آنها استفاده کرد. Kmax به عنوان خطوارگی مغناطیسی و Kmin به عنوان قطب برگوارگی شناخته می‌شود.

زمین‌شناسی عمومی و سنگ‌شناسی

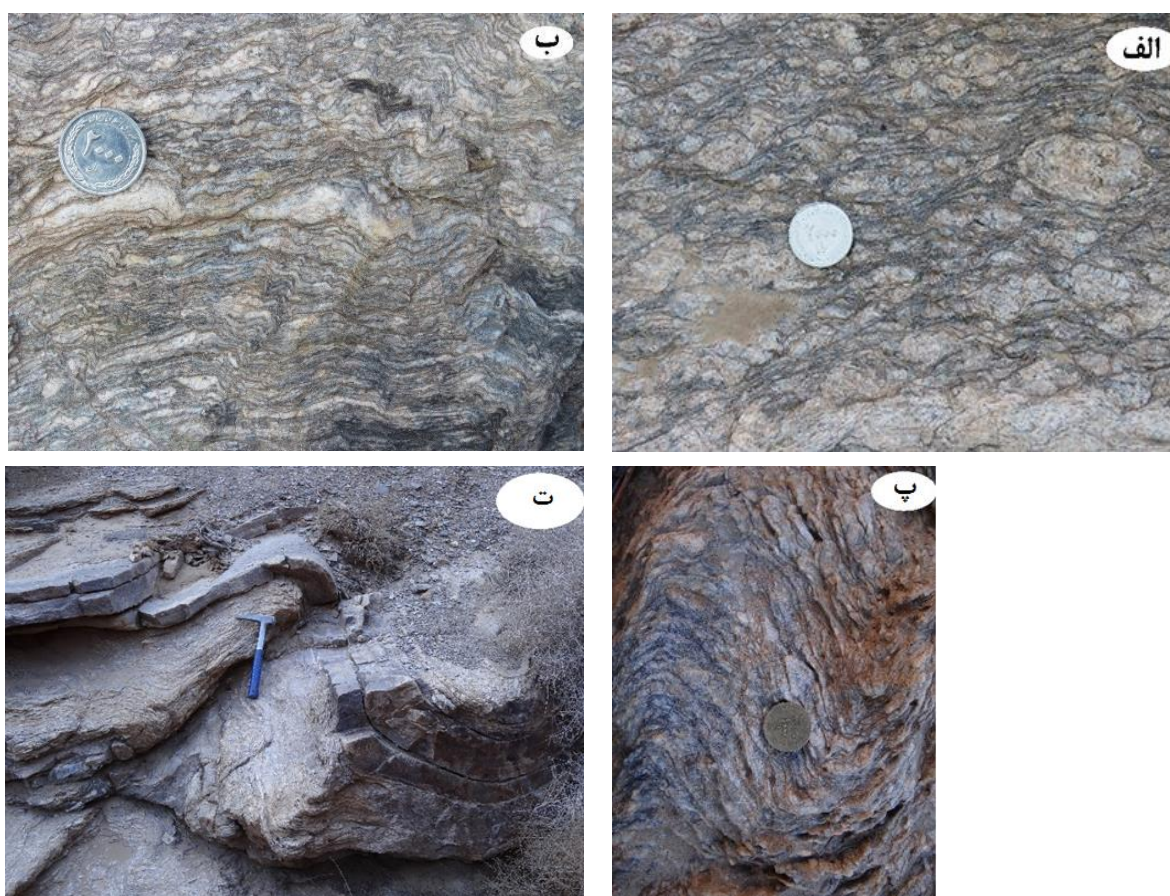
در منطقه چاه زرد، واحدهای سنگی دگرگونی - آذرین نئو- پروتروزوئیک پسین، سنگ‌های رسوبی مارنی - ماسه‌سنگی الیگومیوسن، نهشته‌های مخروط افکنه‌ای پلیوسن و رسوب‌های آبراهه‌ای کواترنری رخنمون دارند [۳۴] (شکل ۱). با توجه به هدف این پژوهش، تنها به واحدهای سنگی نئوپروتروزوئیک توجه شده است. سنگ‌ها و رسوب‌های جوانتر فقط بخش کمی از مجموعه سنگ‌های قدیمی‌تر را به صورت ناپیوسته و



شکل ۱ الف- نقشه زمین‌شناسی توده گرانیتهی چاه زرد و سنگ‌های میزبان آن. این نقشه بر اساس تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، مشاهدات صحرایی و سنگ‌نگاری تهیه و در محیط Arc map رسم شده است. تعیین شده است. ب - تصویر ماهواره‌ای منطقه چاه زرد (بطور عام: منطقه شرق - جنوب شرق جندق). محل شهر جندق بر روی این تصویر مشخص شده است.

صحرايي و میکروسکپی قابل مشاهده است [۳۴-۳۸] (شکل-های ۲ تا ۴). شکل ۴ پاره چینی از تصاویر بیانگر ویژگی‌های ریزساختی بارز سنگ‌های بیوتیت گرانیتی به شدت دگرشکل شده وابسته به توده‌ی گرانیتی چاه زرد را نشان می‌دهد. در اثر میلونیتی‌شدن توده گرانیتی چاه زرد به یک مجموعه بسیار متورق از ورقه‌هایی با مقیاس میلی‌متری و حتی کمتر از میلیمتر (میکروسکپی) (شامل ارتوز، پلاژیوکلاز و بیوتیت‌های به شدت دگرشکل‌شده) تبدیل شده است. در مقیاس میکروسکوپی، تبدیل ارتوز به میکروکلین دیده می‌شود که بیانگر تنش وارد شده بر ارتوز و تحول سیستم بلوری آن از منوکلینیک به تری کلینیک است. برخی پژوهشگران [۳۹، ۴۰] معتقدند که این تغییر و تحول ناشی از تنزل سیستم بلوری ارتوز از رده مونوکلینیک (با درجه تقارن بیشتر) به میکروکلین از رده تری کلینیک (با درجه تقارن کمتر) است.

بیوتیت گرانیت‌های سازنده توده گرانیتی چاه زرد بیشتر به رنگ روشن تا خاکستری دیده می‌شوند و بیوتیت، ارتوز، پلاژیوکلاز و کوارتز در آن‌ها یافت می‌شود. زیرکن، اسفن و کانی‌های کدر (به احتمال زیاد ایلمنیت) از کانی‌های فرعی آن‌ها محسوب می‌شوند. کلریت، مسکویت، اپیدوت، آلانیت و اسفن ثانویه و همچنین اکسیدهای آهن چون هماتیت و لیمونیت از کانی‌های ثانوی این سنگ‌ها به حساب می‌آیند. از آنجا که این گرانیت‌ها پس از استقرار دچار میلونیت‌زایی شده‌اند، ریزساخت‌های میلونیتی از جمله ریزساخت پورفیروکلاستی بسیار زیبایی را نشان می‌دهند و دارای پورفیروکلاست‌های پتاسیم فلدسپار (ارتوز) و پلاژیوکلاز هستند. در بیوتیت گرانیت‌های دانه درشت میلونیتی شده نیز، چین خوردگی بزرگ مقیاس تا ریزمقیاس، ریزدانه شدن (خردشدن و تشکیل دانه‌های ریزتر) دانه‌های کوارتز و فلدسپار و سطوح برشی S، C و $\dot{C}$ آشکارا در مقیاس



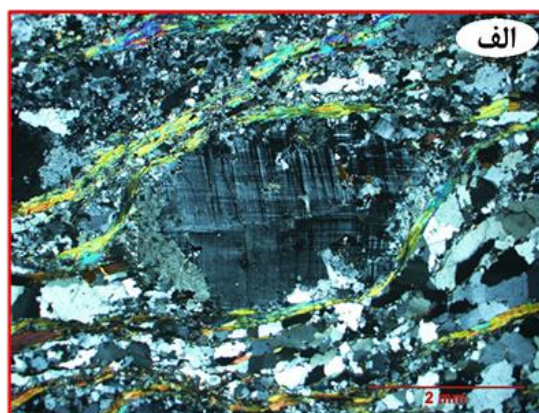
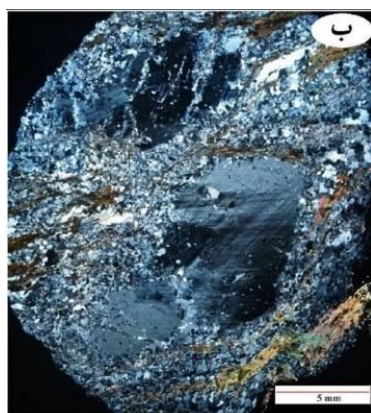
شکل ۲ تصاویری از نمای نزدیک گرانیت‌های میلونیتی و به شدت چین خورده چاه زرد: الف - پورفیروکلاست‌های ارتوز همراه با سطوح برشی S و C. ب و پ - چین خوردگی گرانیت‌های میلونیتی شده چاه زرد در مقیاس سانتیمتری تا میلیمتری و ت - چین خوردگی گرانیت‌ها و آپلیت‌های روشن میلونیتی چین خورده در منطقه جنوب غرب اوسائن. این تصاویر نشانگر دگرشکلی پلاستیک بسیار شدید تحمیل شده بر این سنگ‌هاست.

همچنین تبدیل بیوتیت به مسکوویت و ارتوز به مسکوویت آشکارا در مقیاس میکروسکوپی دیده می‌شود که نشانگر حضور سیال‌های سرشار از آب طی میلونیت‌زایی است (شکل ۳ الف). طی فرایند میلونیتی‌شدن و در حضور این سیال‌ها، بیوتیت آهن خود را از دست داده و با کسب مقداری آلومینیوم به مسکوویت (یا سریسیت) تبدیل شده است. از سوی دیگر، ارتوز یا میکروکلین نیز با دریافت مقداری آب به مسکوویت (یا سریسیت) تبدیل شده‌اند. در اثر تبدیل بیوتیت به مسکوویت و فراوانی قابل‌توجه مسکوویت‌های ثانویه یا نوظهور، رنگ سنگ‌های بیوتیت گرانیتی دگرشکل‌شده از حد معمول بیوتیت-گرانیت‌ها روشن‌تر است. یکی از کانی‌های فرعی بارز سرشار از عناصر خاکی‌نادر و وابسته به گروه اپیدوت موجود در گرانیت-های چاه زرد، آلانیت با فرمول شیمیایی $(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12})(\text{Al}, \text{Fe}^{+3}, \text{Fe}^{+2})(\text{Y}, \text{Th}, \text{Mn})$ است. حضور این کانی همراه با اسفن و زوئیزیت نشان می‌دهد که مجموعه‌ای از فرایندهای نقل و انتقال عناصر در تشکیل این کانی‌ها نقش داشته‌اند. عناصر لازم برای تشکیل این کانی‌ها از تخریب هم‌زمان بیوتیت و پلاژیوکلاز و مشارکت فاز سیال در جابجایی و انتقال آن‌ها فراهم شده است [۳۴]. ترو و همکاران [۴۰] میلونیت‌ها را در سه گروه درجه پایین، (با گستره دمایی تقریبی ۲۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، درجه متوسط (با گستره دمایی تقریبی ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) و درجه بالا (با دمای بیش از ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) تقسیم کرده‌اند. ویژگی اصلی تفکیک کننده میلونیت‌های درجه پایین از میلونیت‌های درجه متوسط، اندازه بلورهای کوارتز باز تبلور

یافته رشد کرده است. در میلونیت‌های درجه پایین اندازه کوارتز، کمتر از ۵۰ میکرومتر است، در حالی‌که، در میلونیت‌های درجه متوسط اندازه دانه‌های کوارتز، بیش از این مقدار است. اگرچه فلدسپار بیشتر از طریق خردشدگی دگرشکل شده است، با این وجود، پیامدهای دگرشکلی کریستال - پلاستیک توسط خاموشی موجی، تداخل و پیوستگی در دانه‌های ریز جدید، قابل استنباط است.

گستره دمایی تشکیل میلونیت‌های درجه متوسط حدود ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد است. در میلونیت‌های درجه متوسط، در اصل از طریق فرایند دانه‌ریز شدن همراه با چرخش دانه‌های جدید ایجاد شده، کوارتز به طور کامل دستخوش باز تبلور شده و همچنین دانه‌های ریز کوارتز تازه تشکیل تا حدی رشد می‌کنند که دانه‌های بدون واکنش، فابریک‌بلورین چندوجهی پیدا کرده و اندازه میانگین دانه‌ها از ۵۰ میکرومتر فراتر می‌رود.

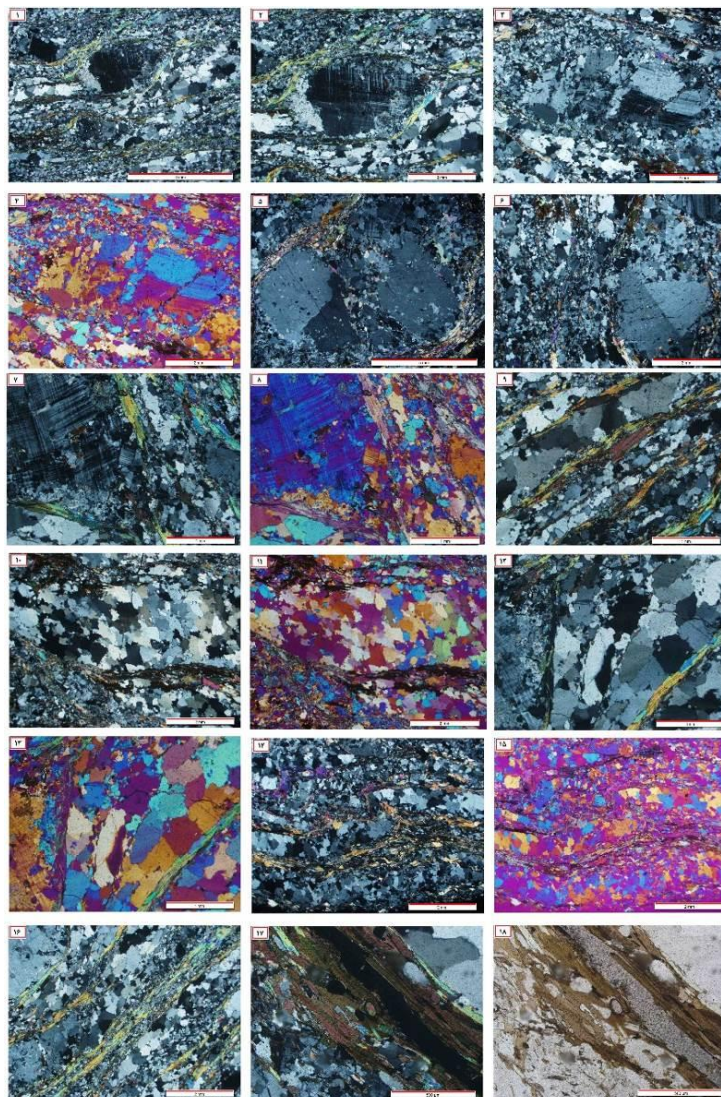
میلونیت‌های درجه بالا، در دماهای بیش از ۶۵۰ درجه سانتیگراد تشکیل می‌شوند. به احتمال زیاد، به علت این که بقای (محفوظ ماندن) این نوع میلونیت‌ها مسأله‌ساز است، آنها نسبتاً کمیاب هستند. بیشتر میلونیت‌های تشکیل شده در این شرایط، تمایل به باز تبلور کامل دارند، این امر باعث تخریب ساختار میلونیتی شده و یا آن را استتار می‌کنند. در صورتی که به هر طریقی از رشد بلور در سنگ جلوگیری شود (مثلاً به واسطه داشتن ماهیت چند بلوری آن)، ویژگی‌های میلونیتی حفظ می‌گردند. ایجاد کوارتزهای نواری شکل یکی از ویژگی‌های بارز میلونیت‌های درجه بالا است.



شکل ۳ الف- تبدیل‌شدگی بیوتیت به مسکوویت و تبدیل ارتوز به میکروکلین (XPL). ب- پورفیروکلاست‌های ارتوز در زمینه‌ای بسیار دانه‌ریز (subgraining) شامل دانه‌های خرد شده کوارتز، فلدسپار پتاسیم و بیوتیت. بخشی از این پورفیروکلاست‌های ارتوز به میکروکلین نیز تبدیل شده‌اند.

درجه بالا در منطقه مورد بررسی به ندرت دیده شده‌اند. در شکل‌های ۲ تا ۴ ویژگی‌های میکروسکوپی بارز گرانیت‌های میلونیتی شده توده گرانیتوئیدی چاه زرد نشان داده شده است.

بر اساس مبانی بررسی میلونیت‌ها، توده گرانیتوئیدی چاه زرد و همچنین سنگ‌های میزبان آن شواهد بارزی از میلونیت‌های درجه پایین تا درجه متوسط نشان می‌دهند. میلونیت‌های



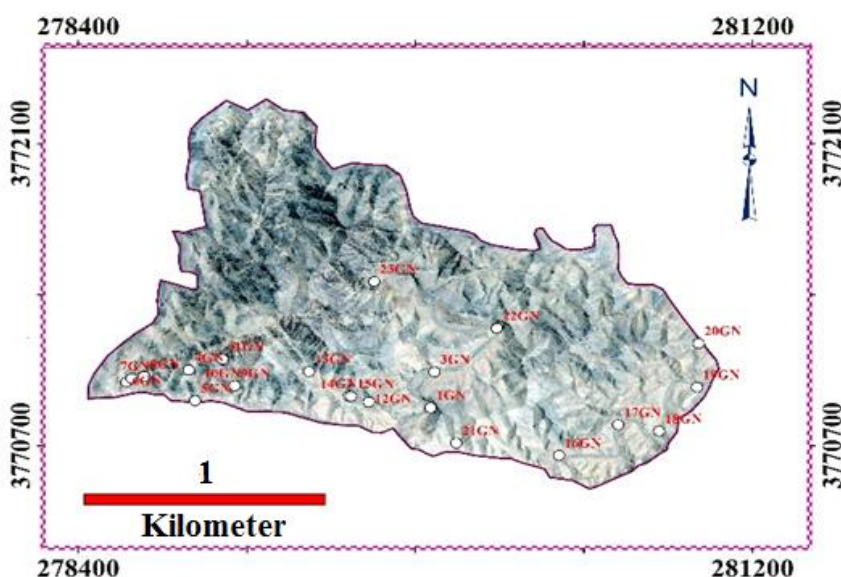
شکل ۴ پاره چین یا تابلویی از ویژگی‌های ریزساختاری بارز سنگ‌های بیوتیت‌گرانیتی به شدت دگرشکل شده وابسته به توده گرانیتی میلونیتی شده چاه زرد. تصاویر ۱ تا ۸ نشانگر بافت پورفیروکلاستی و دانه‌ریز شدن ارتوز کلاز (به صورت پورفیروکلاست) و همچنین دانه‌ریز شدن سایر کانیه‌ها از جمله کوارتز، پلاژیوکلاز و بیوتیت هستند. همچنین تبدیل‌شدگی ارتوز به میکروکلین (ناشی از تنش‌های وارد شده و تغییر و تحول شبکه ساختاری آنها) در این سنگ‌ها پدیده‌ای متداول و فراگیر است. تصویر ۹ تبدیل‌شدگی بیوتیت به مسکوویت، دانه‌ریز شدن کوارتز و دانه‌های کوارتز با خاموشی موجی و مرزهای دنداندار را نشان می‌دهد. تصاویر ۱۰ و ۱۱ نشان‌دهنده فابریک آرایش‌یافتگی مورب در کوارتزهای دانه‌ریز شده هستند. تصاویر ۱۲ و ۱۳ دانه‌ریز شدن کوارتز و مهاجرت مرزدانه‌ها را نشان می‌دهند. تصاویر ۱۴ و ۱۵ چین‌خوردگی در مقیاس میکروسکوپی و دانه‌ریز شدن در نوارهای کوارتزی را نشان می‌دهند. تصویر ۱۶ پهنه‌های برشی با مقیاس میکروسکوپی و تبدیل‌شدگی بیوتیت به مسکوویت را نشان می‌دهد. تصاویر ۱۷ و ۱۸ تبدیل‌شدگی بیوتیت به مسکوویت و حضور زیرکن به صورت اذخال (میانبار) در بیوتیت ((دانه منشوری شکل کوچک با تنوع رنگی رنگین‌کمانی در نور پلاریزه متقاطع و برجستگی بالا در نور قطبیده عادی (در بخش میانی این تصاویر)) را نشان می‌دهند. توجه شود که تصاویر دارای رنگ‌های (با تُن رنگی) آبی، زرد و نارنجی (چون تصاویر ۴، ۸، ۱۱، ۱۳ و ۱۵) به کمک تیغه‌کمی‌رئیس گرفته شده‌اند تا برخی از ویژگی‌های آنها به ویژه دانه‌ریز شدن، چرخش و لغزش دانه‌های ریز ایجاد شده، بهتر نشان داده شوند. جز تصویر ۱۸، سایر تصاویر در نور پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. به علت کوچک بودن تصاویر، گفتنی است که شماره‌ی تصاویر، از بالا سمت چپ به سوی سمت راست و از بالا به پایین به صورت پیوسته است.

۱۵۰ و قطر ۲۵ میلیمتر هستند که به وسیله یک موتور مغزه‌گیر بنزینی قابل‌حمل برداشت شده و سپس به قطعات کوچکتر و در حد استاندارد به طول ۲۲ میلیمتر برش داده شدند. برای دستیابی به توضیحات بیشتر درباره روش نمونه‌برداری و رعایت نکات مهم در حین برداشت مغزه‌ها به مراجعی از قبیل [۲۳-۱۴] مراجعه کنید. در مراجع ذکر شده و مراجع زیاد دیگری از این قبیل، می‌توان به شناخت پارامترهای مغناطیسی و نحوه تحلیل آنها دسترسی پیدا کرد، از این رو، از بیان مبانی روش AMS صرف‌نظر کرده و به تحلیل نتایج بدست آمده می‌پردازیم. نمونه‌برداری (به‌صورت مغزه‌گیری و در صورت لزوم برداشت نمونه‌های سنگی‌دستی) طی چند مورد بازدید صحرایی از ۲۳ ایستگاه انجام شد و تعداد ۱۱۴ مغزه تهیه گردید (شکل ۵). پس از برش مغزه‌ها، ۶۰۸ قطعه‌مغزه به طول ۲۲ میلی‌متر (اندازه استاندارد قابل استفاده برای کار با دستگاه مغناطیس‌سنج یا دستگاه سنجش پذیرفتاری مغناطیسی)، تهیه شد. پارامترهای مغناطیسی این نمونه‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی از نوع کاپاریچ مدل MFK1-FA موجود در آزمایشگاه ژئومغناطیس دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه‌گیری گردید. در شکل ۶، عمده وسایل مورد نیاز برای مغزه‌گیری، نمونه‌برداری صحرایی و عدد مغزه تهیه و نامگذاری شده، نشان داده شده‌اند.

توده‌های گرانیتی دیگری چون توده گرانیتی چاه قنبر در جنوب‌شرق روستای مصر و توده گرانیتی آیراکان به درون مجموعه دگرگونی جندق نفوذ کرده‌اند که دارای ویژگی‌های سنگ‌شناسی بسیار مشابهی هستند. تحولات سنگ‌شناسی این توده‌های گرانیتی و همچنین سن آنها مشابه است [۳۴-۳۶]. با توجه به شواهد صحرایی و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای به نظر می‌رسد که مجموعه دگرگونی جندق و به ویژه مجموعه سنگ‌های دگرگونی منطقه چاه‌زرد، بُرش‌های زمین‌ساختی (Slices) هستند که به صورت آمیزه‌های زمین‌ساختی کنار هم قرار دارند و مجموعه سنگ‌هایی با درجه‌های دگرگونی بسیار ضعیف تا بسیار بالا با مرزهای گسلی و به طور نامنظم، کنار هم قرار گرفته‌اند. توده گرانیتی چاه‌زرد نیز در یک بُرش زمین‌ساختی با درجه دگرگونی متوسط تا بالا تزریق شده و سپس در اثر تنش‌های زمین‌ساختی بعدی به شدت دگرشکل شده است.

روش کار

ابتدا بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی موجود (نقشه‌های ۲۵۰۰۰ : ۱ خور و ۱۰۰۰۰۰ : ۱ مصر)، تصاویر ماهواره‌ای و بازبدهای صحرایی، تنوع سنگ‌شناسی منطقه مشخص شد و با استفاده از نرم افزار Arc GIS 9.3 الگوی نمونه‌برداری اولیه طراحی گردید. در این الگو در هر یک کیلومتر مربع، حدود ۵ تا ۶ ایستگاه مغزه‌گیری انتخاب شد. مغزه‌های سنگی در روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS)، به طول ۱۰۰ تا



شکل ۵ تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث نشان‌دهنده توده موقعیت جغرافیایی گرانیتی چاه‌زرد (واقع در شرق جندق) و پراکنش ایستگاه‌های نمونه‌برداری جهت مغزه‌گیری.



شکل ۶ الف) مجموعه وسایل مورد نیاز برای نمونه برداری (به روش مغزه‌گیری)، و ب) تصویری از چند عدد مغزه گرفته‌شده از گرانیتهای به‌شدت دگرشکل‌شده جاه‌زد (سمت چپ).

بحث و بررسی

به منظور تفسیر فابریک‌های مغناطیسی توده گرانیتهی چاه زرد، تعداد ۱۴ مغزه جهت‌دار برداشت شد (از بیوتیت‌گرانیت‌ها، ۱۰۱ مغزه، لوکوگرانیت‌ها، ۴ مغزه و آنکلاوهای (برونبوم‌های) میکاشیستی و گارنت‌میکاشیستی سورمیکاسه در مجموع ۶ مغزه). مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه پذیرفتاری مغناطیسی (بر حسب μSI) یا پارامتر Km اندازه‌گیری‌شده در گروه‌های سنگی یاد شده در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به مقادیر به‌دست آمده، میکاشیست‌ها دارای بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی و آپلیت‌های لوکوگرانیتی دارای کمترین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی هستند. بیوتیت هنوز مهمترین و فراوان‌ترین حامل مغناطیسی موجود در سنگ‌های مورد بررسی است. اگرچه پذیرفتاری مغناطیسی ایلمنیت از بیوتیت بیشتر است، ولی از آنجا که فراوانی ایلمنیت بسیار کم است، بیوتیت مهمترین حامل کنترل‌کننده رفتار مغناطیسی یا به عبارت ساده‌تر حامل مغناطیسی موجود در نمونه‌های مورد بررسی است. شکل ۷ نشان می‌دهد که میکاشیست‌ها و گارنت میکاشیست‌های میلونیتی‌شده اغلب دارای مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی بسیار بیشتری نسبت به گرانیت‌های میلونیتی‌شده مورد بررسی هستند (به مراجع [۳۸، ۴۱] رجوع شود).

بالاترین مقدار Km در گرانیت‌ها مربوط به نمونه FJ-1F بوده و مقدار آن $489.01 \mu\text{SI}$ است. این نمونه گرانیتی درشت‌دانه و دارای بلورهای درشت بیوتیت است و دلیل اصلی بالا بودن پذیرفتاری مغناطیسی آن با حضور مقادیر قابل توجه بیوتیت و به احتمال دانه‌های ریز اکسیدهای آهن به ویژه مگنتیت قابل توجه است. بیوتیت به واسطه داشتن آهن در

ترکیب شیمیایی خود، دارای مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی قابل توجه حدود ۸۰ تا ۳۰۰ μSI است. مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی سنگ کل می تواند وابسته به فراوانی بیوتیت باشد. مقادیر مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی (Km) بیوتیت و مسکوویت جهت مقایسه در ادامه ارائه شده است.

نام کانی	فرمول شیمیایی	پذیرفتاری مغناطیسی (MSI)
بیوتیت	$K(Mg,Fe^{2+})_3 [Al Si_3O_{10}](OH)_2$	→ 800-3000
مسکویت	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	→ 140 to 110

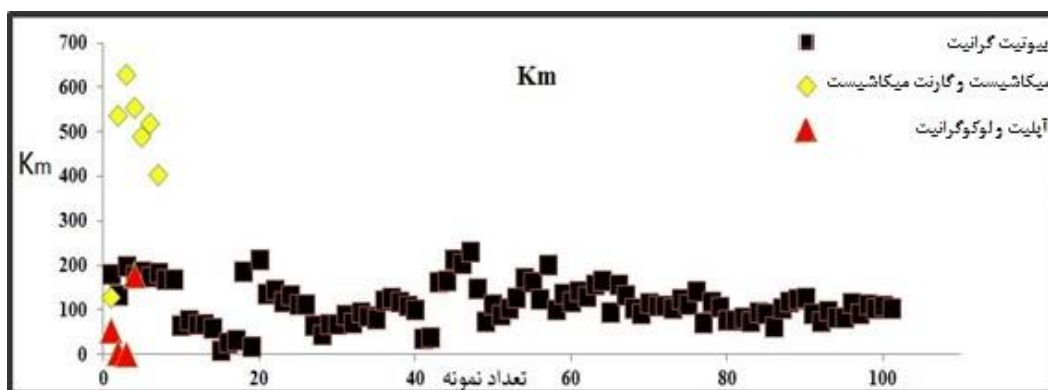
کم‌ترین مقدار Km مربوط به مغزه FJ-5E با μSI ۱۹/۶ است. اغلب مقدار پذیرفتاری مغناطیسی برای گرانیت‌های نوع S حدود μSI ۲۰۰ تا μSI ۲۳۰ است، در صورتی که طی میلونیت-زایی در حضور سیال‌ها (که با تغییر کانی‌شناسی تبدیل بیوتیت به مسکوویت یا بیوتیت به اکسیدهای آهن همراه است و همچنین با حضور اپیدوت و آلانیت مشخص می‌شود)، مقادیر Km حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میکرو اس‌آی (μSI) کاهش می‌یابد. در واقع، کاهش مقدار پذیرفتاری مغناطیسی، بازتابی از تغییر و تحولات کانی‌شناسی گرانیت‌ها در مرحله میلونیت‌زایی و میگماتیت‌زایی در سنگ‌های دگرگونی است. مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی (Km) گرانیت‌های میلونیتی چاه‌زد نسبت به سنگ‌های میکاشیستی و گارنت‌میکاشیستی همراه یا میزبان آن‌ها، به کمتر از نصف کاهش یافته است، زیرا بخش عمده‌ای از بیوتیت‌های گرانیت‌ها، به مسکوویت تبدیل شده‌اند. پذیرفتاری مغناطیسی میانگین از پارامترهای مهم در بررسی فابریک‌های مغناطیسی است. از این پارامتر در تفسیر ویژگی‌های مختلف از جمله تغییرات فراوانی کانی‌های مغناطیسی و شناخت احتمالی

فهم تغییرات K_m به مراتب آسان‌تر است (شکل ۸). مناطق دارای K_m بیشتر از نظر سنگ‌شناسی با فراوانی بیشتر بیوتیت و حضور فازهای آهن‌دار و کدر چون ایلمنیت در درجه اول و کانی‌های حاصل از هوازدگی آن‌ها سازگار هستند. افزون بر این، مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های سنگی مورد بررسی بیانگر نبود مگنتیت در آنهاست. از این رو، بین این پارامتر و ترکیب سنگ‌شناسی سنگ‌های مورد بررسی رابطه روشنی وجود دارد.

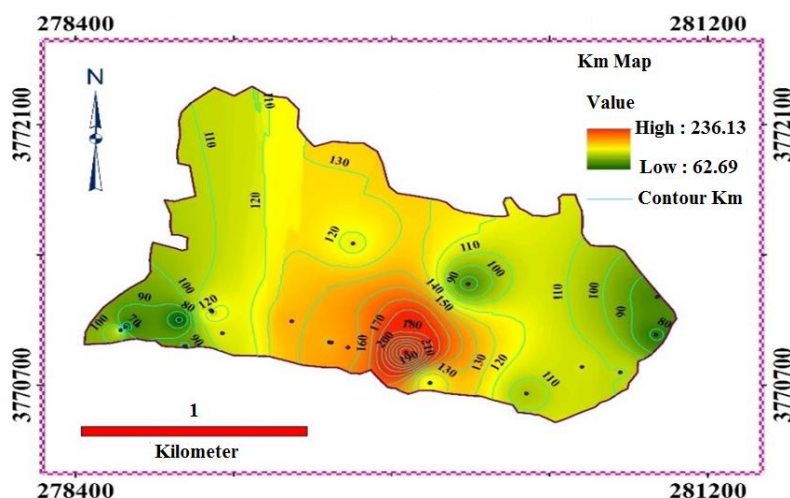
انواع کانی‌ها استفاده می‌شود. مقادیر K_m در کرانه غربی و شرقی توده گرانیتی چاه‌زرد اغلب پایین و حدود ۶۰ تا $100 \mu SI$ است. در بخش جنوبی پیرامون ایستگاه اول، مقدار K_m بیشترین فراوانی را نشان داده و به $236 \mu SI$ می‌رسد. با توجه به مشاهدات صحرایی و سنگ‌نگاری، سنگ‌های گرانیتی دگرشکل‌شده پیرامون این ایستگاه دارای کمترین دگرسانی هستند. در سایر بخش‌های توده گرانیتی چاه زرد، مقدار K_m بین $120 \mu SI$ تا $160 \mu SI$ متغیر است. با رسم نقشه پهنه‌بندی K_m .

جدول ۱ مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه پذیرفتاری مغناطیسی (بر حسب μSI) در گروه‌های سنگی مورد بررسی.

ترکیب سنگ‌شناسی	کمینه	میانگین	بیشینه
بیوتیت گرانیت‌ها	۱۱	۱۱۲	۴۸۹
آپلیت‌های لوکوگرانیتی	۲	۶۰	۱۷۸
میکاشیست‌ها و گارنت میکاشیست‌ها	۱۳۰	۴۶۱	۶۲۹



شکل ۷ تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی برای همه ترکیب‌های سنگی گرانیت‌های چاه زرد و سایر سنگ‌های همراه آنها.



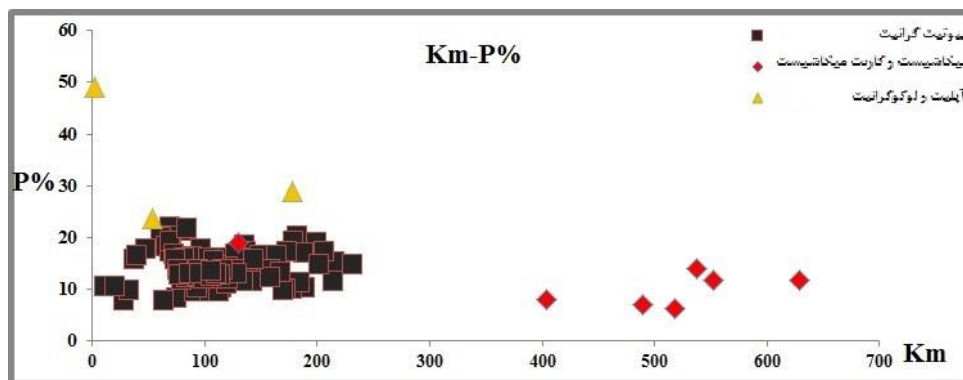
شکل ۸ نقشه نشان‌دهنده تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (K_m) در گرانیت‌های میلونیتی‌شده چاه زرد (به صورت طیف‌رنگی و منحنی میزان).

به طور موردی، مقدار P به ۵۰ درصد نیز می‌رسد. بررسی دقیق مقاطع میکروسکوپی این نمونه‌های لوکوگرانیتی میلونیتی‌شده نشان داد که شدت دگرشکلی در این نمونه‌ها بسیار است. قطعه‌قطعه‌شدن پورفیروکلاست‌های ارتوز و پرشدن فضای بین قطعه‌های شکسته‌شده توسط رگه‌های باریک کوارتزی از ویژگی‌های بارز این نمونه‌هاست. در شکل ۱۰، تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های سنگی دارای ناهمسانگردی مغناطیسی بالا نشان داده شده است. درصد ناهمسانگردی مغناطیسی بیوتیت گرانیت‌های جندق بین ۰/۲ تا ۵۰ درصد متغیر است. با این وجود، مقدار $P\%$ نمونه‌های سنگی مورد بررسی اغلب بین ۱۰ تا ۲۰ درصد در نوسان است. نقشه نشان دهنده تغییرات این پارامتر به صورت پهنه‌بندی و منحنی تراز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از این نقشه به راحتی می‌توان دریافت که در بخش‌های جنوب‌شرقی توده گرانیتی چاه زرد درصد ناهمسانگردی مغناطیسی بالاتر است. بررسی میکروسکوپی نمونه‌های سنگی این منطقه نیز بیانگر دگرشکلی و دانه‌ریز شدن شدید آنهاست. با توجه به نمودار توزیع کلی پارامتر درصد ناهمسانگردی برای واحدهای سنگی در هر ایستگاه، درمی‌یابیم که کمترین مقدار P (۰/۲ درصد) در ایستگاه ۲۰ مربوط به- گرانیت‌های میلونیتی‌شده و بیشترین مقدار P (۵۰ درصد) در ایستگاه ۳ مربوط به آپلیت‌ها یا لوکوگرانیت‌های میلونیتی‌شده است.

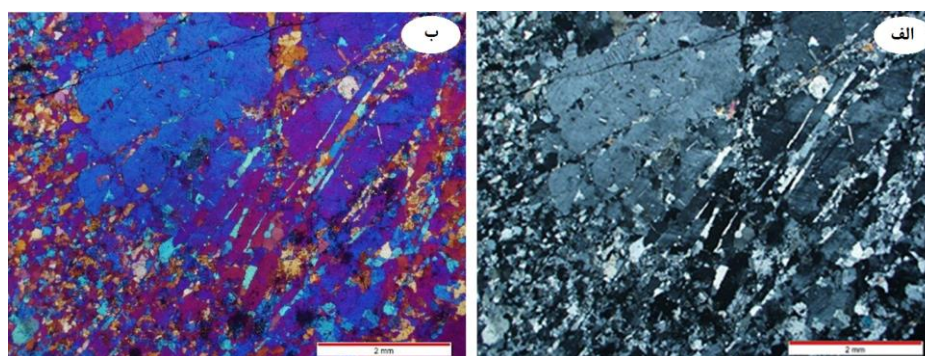
درصد ناهمسانگردی مغناطیسی ($P\%$) دومین پارامتری است که در بررسی فابریک‌های مغناطیسی استفاده می‌شود این پارامتر از نسبت مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در راستای بزرگترین محور بیضوی مغناطیسی (K_1) و در راستای کوچکترین محور بیضوی مغناطیسی (K_3)، و از رابطه: K_1/K_3 به دست می‌آید. درصد ناهمسانگردی مغناطیسی کمینه، میانگین و بیشینه در گروه‌های سنگی مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی رابطه بین درصد ناهمسانگردی مغناطیسی و میزان پذیرفتاری مغناطیسی (شکل ۹) نشان می‌دهد که تعداد کمی از نمونه‌های سنگی دارای پذیرفتاری- مغناطیسی بالا نسبت به سایر نمونه‌های سنگی هستند. این دسته، در واقع میکاشیست‌ها و گارنت‌میکاشیست‌های میلونیتی‌شده هستند. این دسته همچنین دارای ناهمسانگردی مغناطیسی کمتر از ۱۰ درصد هستند. در گرانیت‌های میلونیتی‌شده، مقدار ناهمسانگردی مغناطیسی بین ۵ تا ۳۰ درصد متغیر است و روند افزایشی تقریباً محسوسی بین پارامترهای P و K_m دیده می‌شود؛ اگرچه تعدادی از نمونه‌ها نیز از این امر پیروی نمی‌کنند. به نظر می‌رسد که افزون بر پذیرفتاری مغناطیسی، میزان دگرشکلی نیز بر رفتار متقابل P و K_m اثر گذار است. برای مثال، تعدادی از نمونه‌های گرانیتی میلونیتی‌شده با پذیرفتاری مغناطیسی کمتر (حدود ۷۰ تا $100 \mu SI$)، از درصد ناهمسانگردی مغناطیسی بیشتری برخوردار هستند. در برخی از نمونه‌های آپلیتی یا لوکوگرانیتی،

جدول ۲ مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه درصد ناهمسانگردی مغناطیسی در گروه‌های سنگی مورد بررسی.

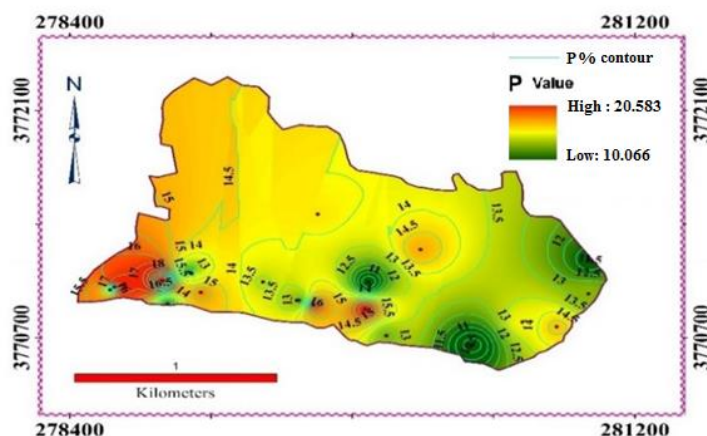
ترکیب سنگ‌شناسی	کمینه	میانگین	بیشینه
بیوتیت‌گرانیت‌ها	۶/۹	۱۴/۲۵	۲۲/۲
آپلیت‌های لوکوگرانیتی	۲۳/۷	۱۳/۳۳	۴۹/۱
میکاشیست‌ها و گارنت‌میکاشیست‌ها	۶/۳	۱۱/۴۵	۱۹



شکل ۹ تغییرات پارامتر P برحسب درصد نسبت به K_m برای همه نمونه‌های سنگی مورد بررسی.



شکل ۱۰ تصاویری از پدیده‌های توصیف‌شده در ارتباط با نمونه‌های سنگی دارای ناهمسانگردی مغناطیسی بالا (XPL). به تشکیل رگه‌های کوارتزی در راستای شکستگی‌ها و دانه‌ریزدن پورفایروکلاست ارتوز و دانه‌های کواتز و همچنین خاموشی موجی در پایین سمت راست تصویر (الف) توجه نمایید. تصویر (ب) همین بخش را به کمک تیغه کمکی ژپیس نشان می‌دهد. در این گونه تصاویر پدیده دانه‌ریز شدن (ساب‌گرین‌شدن) و تشکیل پورفایروکلاست‌ها بسیار آسان‌تر قابل درک و مشاهده است.



شکل ۱۱ نقشه تغییرات درصد انیزوتروپی ناهمسانگردی مغناطیسی (به صورت طیف رنگی و منحنی تراز).

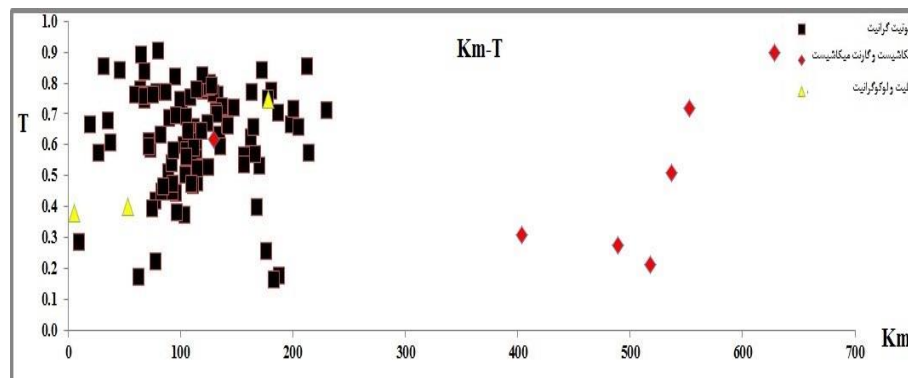
گرانیته، رابطه بین تغییرات T و Km تا حدی تغییر کرده است. مقادیر پارامتر شکل گرانیته‌های چاه زرد بین ۰.۲ تا ۰.۹۰ متغیر است.

نقشه تغییرات پارامتر T به صورت طیف رنگی و منحنی تراز در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نمونه‌های سنگی بخش غربی توده گرانیته‌ی چاه‌زرد دارای مقادیر T مثبت بالایی هستند؛ این امر نشان می‌دهد که شدت دگرشکلی بر این بخش از توده گرانیته‌ی چاه زرد بیشتر است. همچنین، سمت شرق و جنوب‌شرق توده گرانیته‌ی چاه‌زرد دارای درصد ناهمسانگردی مغناطیسی کمتر و نیز شدت دگرشکلی کمتر است. شواهد صحرایی و میکروسکوپی این موضوع را تأیید می‌کند. از دیگر راه‌های تجزیه و تحلیل پارامترهای مغناطیسی، استفاده از استریوگرام‌هایی است که جایگاه مکانی یا برداری محورها K_1 ، K_2 و K_3 بر آن‌ها نشان داده شده است. بررسی و تفسیر خطوط‌ها و برگواره‌های مغناطیسی بر اساس این استریوگرام‌ها انجام می‌شود.

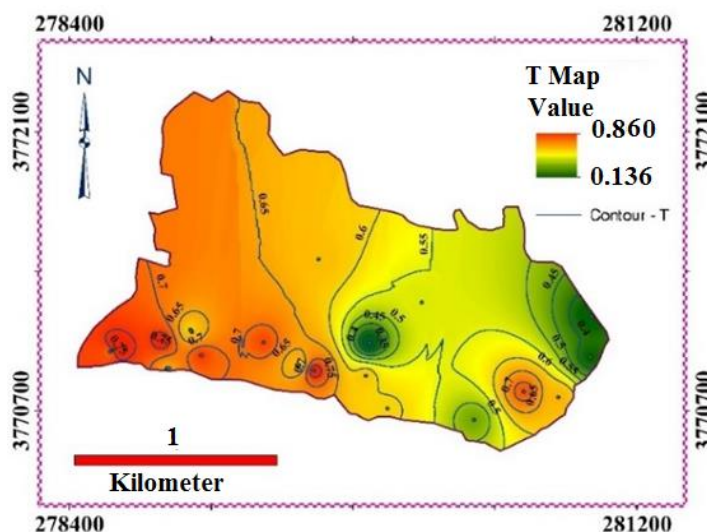
پارامتر شکل (T) که بر اساس رابطه $T = 2 \times (\ln K_2 - \ln K_3) / (\ln K_1 - \ln K_3) - 1$ تعریف می‌شود، بیانگر شکل بیضوی مغناطیسی است. مقدار این پارامتر همیشه بین +۱ تا -۱ متغیر است. مقدار T کمتر از صفر نشانگر بیضوی مغناطیسی سیگاری، دوکی شکل یا خطی (Prolate) شکل و مقدار T مثبت یا بیشتر از صفر بیانگر شکل بیضوی مغناطیسی کلوچه‌ای یا صفحه‌ای (Oblate) است. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین پارامتر شکل (T) برای نمونه‌های سنگی مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. نمودار تغییرات پارامتر شکل نسبت به تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی (Km) برای همه نمونه‌های سنگی نیز در شکل ۱۲ آورده شده است. دیده می‌شود که در نمونه‌های میکاشیستی، رابطه صعودی ملموسی بین T و Km وجود دارد. با افزایش مقادیر Km ، مقدار T نیز افزایش می‌یابد، ولی در نمونه‌های گرانیته، رابطه چندان نمایانی بین T و Km دیده نمی‌شود. به احتمال زیاد، بر اثر دگرشکلی و همچنین دگرسانی تحمیل‌شده بر سنگ‌های

جدول ۳ مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه مقادیر پارامتر شکل در گروه‌های سنگی مورد بررسی

ترکیب سنگ‌شناسی	حداقل	میانگین	حداکثر
بیوتیت گرانیت‌ها	۰/۱۷	۰/۹	۰/۶۳
آپلیت‌های لوکوگرانیتی	۰/۳۸	۰/۷۵	۰/۳۸
میکاشیست‌ها و گارنت میکاشیست‌ها	۰/۲۲	۰/۹۰	۰/۵۳



شکل ۱۲ تغییرات T نسبت به Km برای نمونه‌های سنگی مورد بررسی.

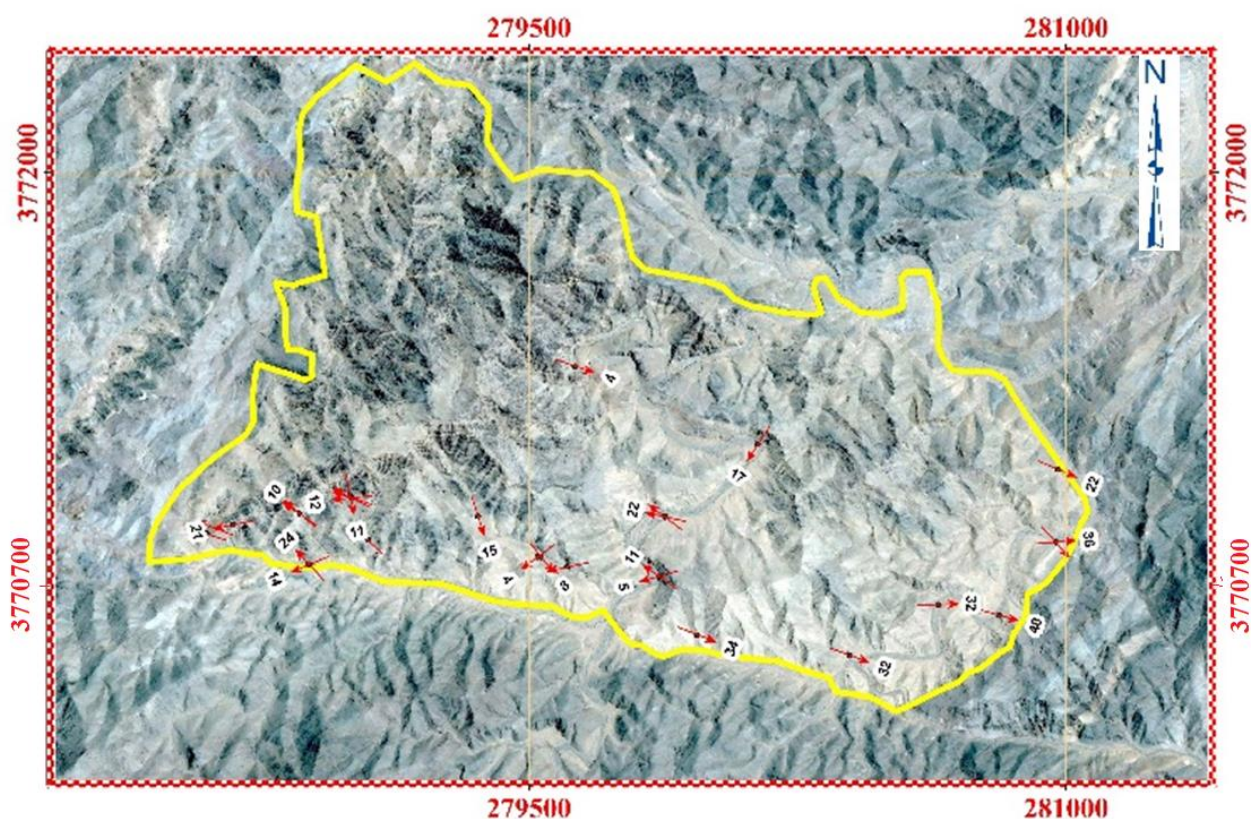


شکل ۱۳ نقشه تغییرات مقدار پارامتر شکل (T) (به صورت طیف رنگی و منحنی تراز).

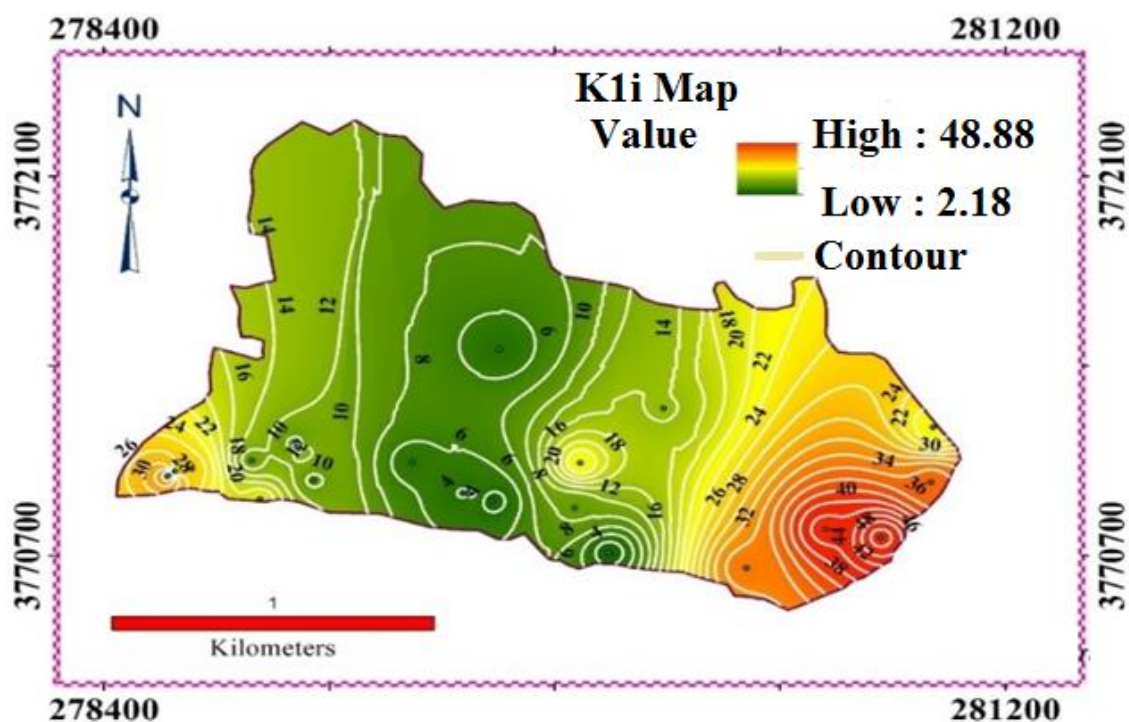
خطواره‌های مغناطیسی

نقشه خطواره‌های مغناطیسی بر اساس ویژگی‌های بُرداری بزرگترین محور بیضوی مغناطیسی یا K_1 رسم می‌شود. در نقشه خطواره‌های مغناطیسی، K_1 با نماد پیکان ($\uparrow$) نمایش داده می‌شود. نقشه تغییرات مقدار میل خطواره‌های مغناطیسی با توجه به مقادیر سمت (آزیموت) میل و مقدار میل این خطواره-ها، رسم شده‌است. همچنین، خطواره‌های مغناطیسی به صورت پیکان بر روی این نقشه نشان داده شده‌اند و مقادیر میل آنها نیز در کنار آنها آورده شده است (شکل ۱۴). با رسم نقشه پهنه‌بندی و منحنی تراز میل خطواره‌های مغناطیسی، می‌توان

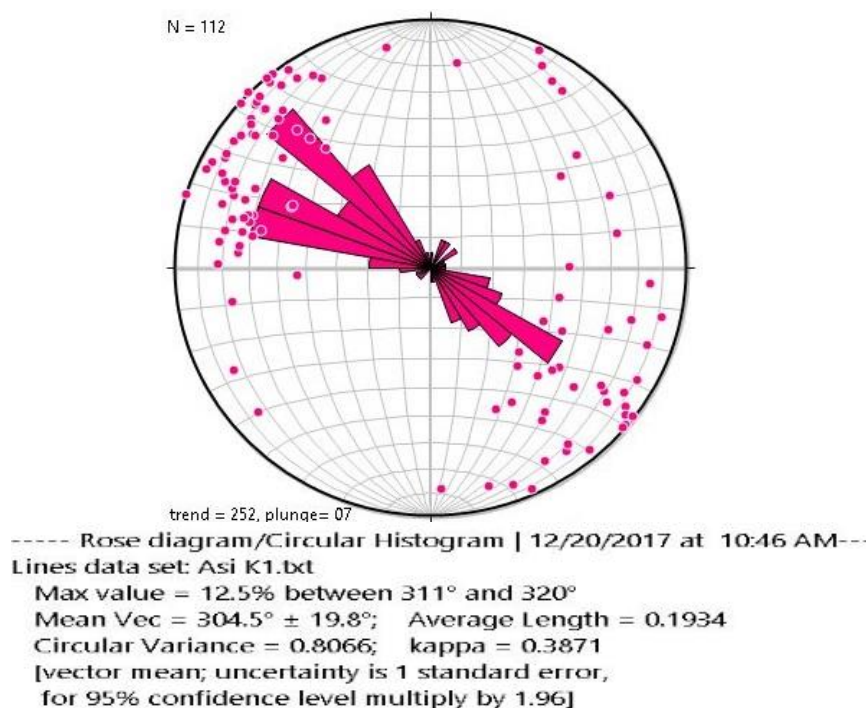
تغییرات میل آنها را آسان‌تر تجسم کرد (شکل ۱۵). بر اساس نقشه خطواره‌های مغناطیسی و همچنین نمودار گل‌سرخ‌ی یا خطواره‌های مغناطیسی، جهت میل بیشتر خطواره‌ها به سمت شمال‌غرب است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶) و افزون بر این، دارای مقدار میل کمی هستند. تعداد کمی از آنها نیز به سمت جنوب و جنوب‌شرق آرایش یافته‌اند (حدود ۱۰ درصد). این امر با بررسی‌های صحرایی و اندازه‌گیری میل و جهت میل خطواره‌ها در مقیاس صحرایی در برخی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری نیز تأیید می‌شود.



شکل ۱۴ نقشه خطواره‌های مغناطیسی گرانیت‌های میلونیتی شده چاه زرد.



شکل ۱۵ نقشه تغییرات مقدار میل خطواره‌های مغناطیسی (به صورت طیف رنگی و منحنی تراز). طیف تغییرات رنگی از سبز به سمت قرمز، نشانگر مقدار کم تا زیاد میل خطواره‌های مغناطیسی است.



شکل ۱۶ نمودار گل سرخی خطواره‌های مغناطیسی که نشان دهنده وجود روند غالب شمال غرب - جنوب شرق، خطواره‌های مغناطیسی گرانیت‌های میلونیتی شده چاه زرد است.

برگواره‌های مغناطیسی

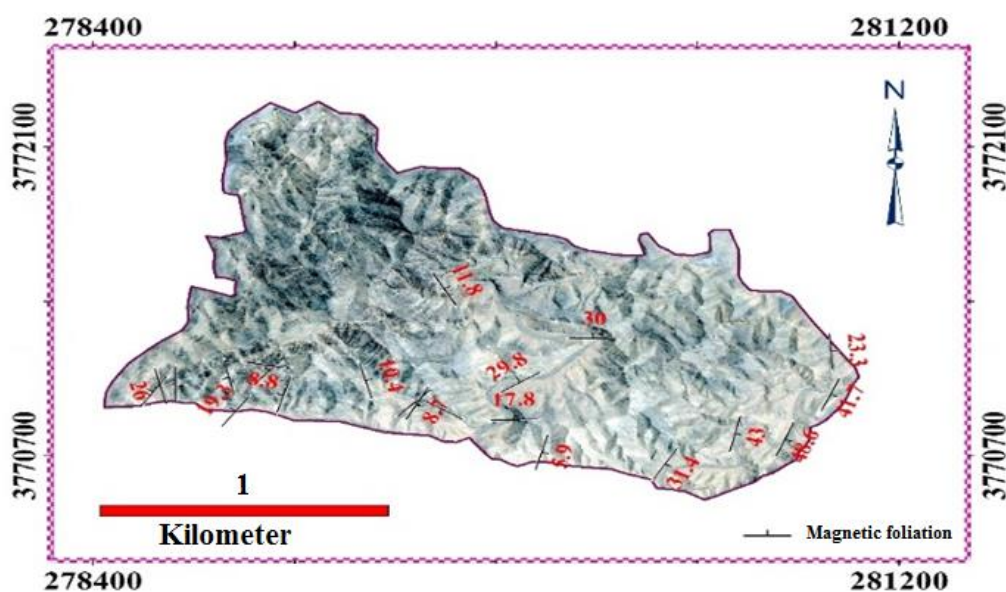
به طور معمول ویژگی‌های بُرداری K_3 به عنوان قطب برگوارگی مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود [۴۲]. نقشه برگواره‌های مغناطیسی که بر اساس مشخصه‌های K_3 و تبدیل آن به صفحه برگوارگی تهیه و رسم شده، در شکل ۱۷ نشان داده شده‌است. مقدار شیب برگواره‌های مغناطیسی در هر ایستگاه به صورت یک عدد در کنار نماد برگوارگی (ـ) درج شده است. این شکل نشان می‌دهد که در لبه جنوب شرقی توده گرانیتی چاه زرد، برگواره‌های مغناطیسی شیب بیشتری دارند (۳۰ تا ۴۰ درجه) و بیشینه شیب آن‌ها به ۴۸ درجه می‌رسد. به سمت غرب و شمال غرب، مقدار شیب برگواره‌های مغناطیسی کاهش می‌یابد و مقدار آن بین ۱۰ تا ۲۰ درجه متغیر است. استریوگرام نشانگر قطب برگواره‌های مغناطیسی و صفحه‌های برگواره‌های مغناطیسی در شکل ۱۸ الف نشان داده شده‌است. این شکل به روشنی نشان می‌دهد که برگواره‌های مغناطیسی دارای شیب بسیار کم و نزدیک به افقی هستند. شکل ۱۸- ب استریوگرام نشانگر قطب برگواره‌های قابل مشاهده در مقیاس صحرایی است که بر پایه اندازه‌گیری عناصر ساختاری روی زمین استوار است و همچنین نشان می‌دهد که این برگواره‌ها نیز همانند برگواره‌های مغناطیسی دارای شیب کم تا بسیار کم هستند.

استریوگرام نشان دهنده جایگاه محورهای مغناطیسی همه نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. این نمودار نخست نشان می‌دهد که جایگاه محورهای K_1 ، K_2 و K_3 از تمرکز خوبی برخوردار هستند. جایگاه محور K_3 بیشتر پیرامون مرکز استریوگرام واقع بوده و بیانگر شیب بسیار قطب - برگواره‌های مغناطیسی است. به عبارت دیگر، برگواره‌های مغناطیسی دارای شیب کم یا به نسبت کم هستند. از سوی دیگر، جایگاه محورهای K_1 که با مربع آبی نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که بیشتر خطواره‌های مغناطیسی مورد بررسی در ربع شمال غرب استریوگرام واقع بوده و دارای شیب کم تا به نسبت کم هستند. همچنین، جایگاه محورهای K_2 پیرامون لبه استریوگرام واقع بوده و بیانگر شیب کم بردار حدواسط بیضوی مغناطیسی یا K_2 هستند. در مجموع، این نمودار نشان می‌دهد که نمونه‌های سنگی مورد بررسی رفتار به نسبت همگنی دارند. برگواره‌های مغناطیسی دارای شیب کمی هستند و خطواره‌های مغناطیسی نیز بیشتر به سمت شمال-غرب یا جنوب شرق آرایش یافته‌اند.

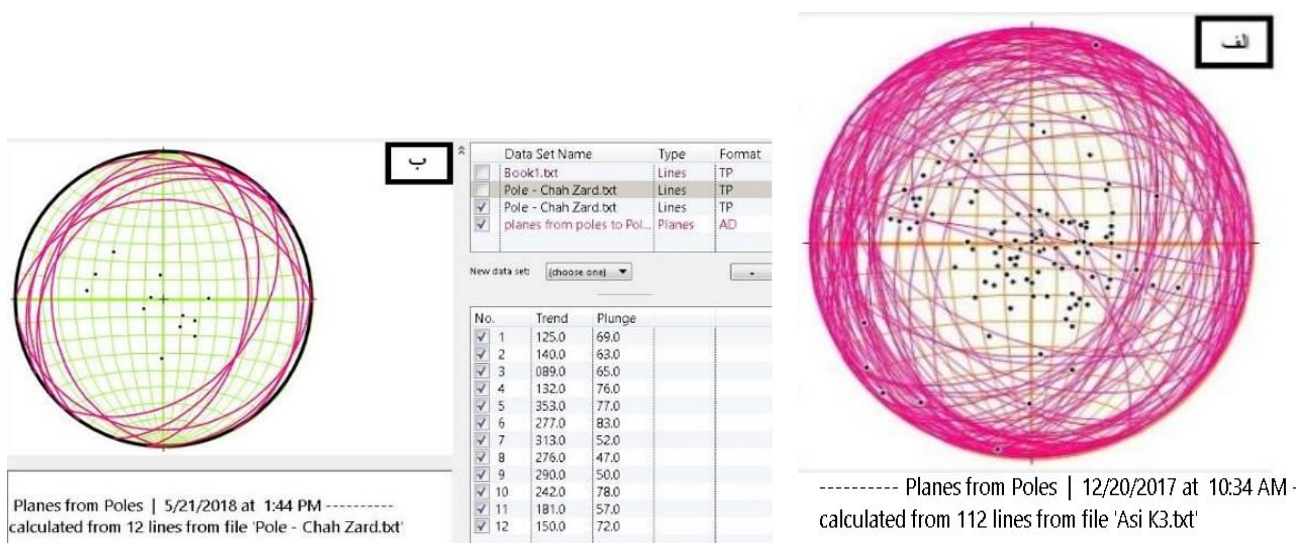
در پایان، توجه به چند نکته ضروری است که عبارتند از: ۱- جایگاه سنی فرایند میلونیتی‌شدن هنوز دقیق مشخص نیست و نیازمند بررسی‌های بیشتر است. ۲- نتایج به دست آمده

یا معکوس با شیب زیاد صورت گرفته‌اند [۳۴]. ۴- بیشتر حرکت‌های راندگی بزرگ مقیاس نیز به سمت جنوب انجام شده است. ۵- در واقع، خطواره‌های مغناطیسی و برگواره‌های مغناطیسی می‌توانند برای تعیین سوی برش یا جهت تعیین سمت راندگی‌های بزرگ مقیاس مفید باشند (البته به شرط در نظر گرفتن احتیاط‌های لازم، داشتن ایستگاه‌های اطلاعاتی کافی و دانش کافی و آگاهانه).

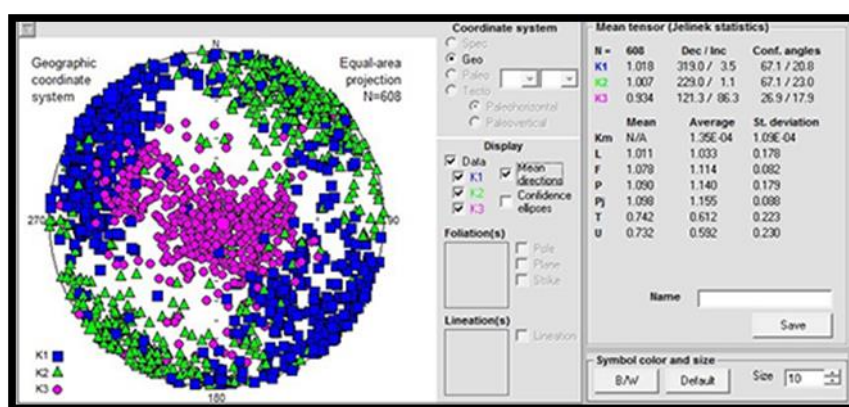
از مقایسه عناصر ساختاری اندازه‌گیری شده در صحرا، خطواره‌ها و برگواره‌های مغناطیسی برپایه تفسیر پارامترهای مغناطیسی در تأیید هم هستند و می‌توانند برای افزایش دقت بررسی ریزساخت‌های سنگ‌های دگرشکل‌شده از جمله میلونیت‌ها مفید و مؤثر باشند. ۳- بر اساس تفسیرهای انجام‌شده تا کنون [۳۴-۳۶]، به نظر می‌رسد که این تغییرات در راستای ایجاد پهنه‌های برشی و در راستای عملکرد گسل‌هایی از نوع راندگی



شکل ۱۷ نقشه برگواره‌های مغناطیسی توده گرانیتی چاه زرد.



شکل ۱۸ الف- استریوگرام نشان‌دهنده قطب برگواره‌های مغناطیسی و صفحه‌های برگواره‌های مغناطیسی که بیانگر شیب بسیار کم برگواره‌های مغناطیسی چاه زرد می‌باشد. ب - استریوگرام نشان‌دهنده صفحه‌های برگواره‌های گرانیت‌های میلونیتی‌شده که روی زمین به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شده است. به شیب کم برگواره‌ها توجه شود. قطب برگواره‌های مغناطیسی نیز نمایش داده شده‌است



شکل ۱۹ استریوگرام رسم‌شده برپایه پارامترهای مغناطیسی اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار Anisoft 4.2 برای گرانیت‌های میلونیتی‌شده، آپلیت‌های میلونیتی‌شده و آنکلاوهای میکاشیستی (سورمیکاسه) همراه آن‌ها در منطقه چاه زرد.

برداشت

چگونگی تزریق ماگمای سازنده این توده گرانیتی استفاده کرد. این پژوهش نشان می‌دهد که دگرشکلی به ویژه از نوع شدید آن، می‌تواند فابریک‌های ماگمایی را مخدوش کرده و باعث شود تا در این نوع توده‌های نفوذی نتوان از روش AMS برای تعیین چگونگی توزیع ماگما استفاده کرد. افزون بر این، از آنجا که ریزساخت‌های ماگمایی توده گرانیتی چاه زرد به شدت به هم ریخته و ریزساخت‌های زمین‌ساختی بر آنها غلبه کرده‌اند، نتایج به دست آمده از بررسی بافت‌های مغناطیسی نمی‌توانند برای شناخت محل تزریق ماگما و یا چگونگی توزیع و جایگیری آن کاربرد داشته باشند.

قدردانی

بر خود واجب می‌دانیم از آقای مهندس حسین یغمایی مسؤول پیشین اداره راه جندق و سایر پرسنل این اداره، صمیانه تشکر و قدردانی کنیم؛ نامبردگان ما را در زمینه اسکان، پذیرایی و فراهم کردن نیازهای مرتبط با کارهای صحرایی یاری رساندند. از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود که بخشی از هزینه‌های این پژوهش را متقبل شده‌اند نیز سپاسگزاری می‌کنیم.

مراجع

- [1] Hrouda F., "Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics". *Geophys. Surveys*, (1982) 5, 37-82.
- [2] Tarling D.H., Hrouda F., "The magnetic Anisotropy of rocks", (1993) Chapman & Hall, London.

این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار پذیرفتاری مغناطیسی میانگین توده گرانیتی چاه زرد از مقدار میانگین پذیرفتاری معمول برای بیوتیت گرانیت‌ها به مقدار قابل ملاحظه ۱۰۰ تا ۱۵۰ SI μ کمتر است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که عامل کاهش پذیرفتاری مغناطیسی تبدیل بیوتیت به مسکوویت در اثر واکنش با سیال‌های گرم سرشار از آب طی میلونیت‌زایی است. با توجه به شواهد صحرایی و سنگ‌نگاری، توده گرانیتی چاه زرد اغلب دستخوش میلونیت‌زایی درجه پایین تا متوسط شده است. دانه‌ریز شدن (ساب گرین‌شدن)، شکن شدگی (کینک‌باند)، چین‌خوردگی ریزمقیاس و له‌شدگی بیوتیت‌ها از شواهد بارز میلونیتی‌شدن هستند. بر اساس تفسیر تمرکز و فراوانی خطواره‌ها و برگواره‌های مغناطیسی، می‌توان گفت که بیشتر خطواره‌های مغناطیسی دارای میل بسیار کمی هستند و به سمت شمال غرب آرایش یافته‌اند. برگواره‌های مغناطیسی نیز دارای شیب بسیار کم و نزدیک به افقی هستند. شواهد صحرایی و یافته‌های برپایه تفسیر پارامترهای مغناطیسی، هم را تأیید می‌کنند. این امر نشان می‌دهد که پارامترهای مغناطیسی می‌توانند در شناخت و تفسیر پارامترهای ساختاری چون برگوارگی، خطوارگی و چین‌خوردگی مفید باشند. با توجه به شواهد صحرایی و میکروسکوپی، دگرشکلی سنگ‌های سازنده توده گرانیتی چاه زرد، چنان شدید است که ساخت‌های ماگمایی اولیه تقریباً مخدوش‌شده‌اند و نمی‌توان از آنها در تعیین محل تزریق یا

obtained from magnetic fabrics in the Parry Sound shear zone, Ontario Grenville Province", *Journal of Structural Geology* (1995) 17(2):265-278. DOI: 10.1016/0191-8141(94) E0045-Z.

[13] Viegas L. G. F., Archanjo C. J., Helena M., Hollanda B. M., Alain Vauchez A., "Microfabrics and zircon U-Pb (SHRIMP) chronology of mylonites from the Patos shear zone (Boroborema Province, NE Brazil)", *Precambrian Research*, Elsevier, 2014, 243, pp.1-17. (10.1016/j.precamres.2013.12.020). (hal-01053497).

[14] Ghalamghash J., "Petrology and emplacement of intrusive rocks of Urumieh-Oshnavieh area, Ph.D. thesis, Earth science faculty, Shahid Behshti University (Tehran-Iran)", (2002) 210 pp.

[15] Sadeghian M., "Magmatism, metallogeny and emplacement mechanism of the Zahedan granitoidic pluton", Ph.D. thesis, Tehran University (2004), 520 pages.

[16] Rasouli J., *Investigation of magnetic susceptibility of Boroujerd granitoidic pluton*, M.Sc. thesis, Tehran University, Department of sciences, Faculty of earth sciences, 2008, 128 p.

[17] Sheibi M., "Petrology, geochemistry and emplacement mechanism of the Shir Kuh granitoidic pluton (SW of Yazd)", Ph.D. thesis, Science department, Tehran University (2009), 180 p.

[18] Ahad Nezhad V., "Investigation of petrology, geodynamic and emplacement mechanism of the Malayer granitoidic complex (west of Iran) by using AMS Method", Ph.D. thesis, Tehran University (2010), 293 p.

[19] Gavanji N., *Magnetic susceptibility of south of Zafarghand granitoidic pluton (Ardestan)*, M.Sc. thesis, Faculty of earth sciences, Shahrood University of Technology, (2011) 221 pages.

[20] Shekari S., "Investigation of the emplacement mechanism of Darreh Bagh granitoidic pluton (NW Aligoudarz) by using anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) method", M.Sc. thesis, Faculty of earth sciences, Shahrood University of Technology, (2012) 209 pages.

[21] Badlou S., "Investigation of the emplacement mechanism of the Gol-e-Zard granitoidic pluton (North of Aligoudarz) by AMS method", M.Sc. thesis, Faculty of earth sciences, Shahrood University of Technology, (2012) 191 pages.

[22] Chekani Moghaddam M., "The study of melt distribution in mafic dikes, cutting Delbar

[3] Neves S. P., Araujo M. B., Correia P. B., Mariano G., "Magnetic fabrics in the Cabanas Granite (NE Brazil): interplay between emplacement and regional fabrics in a dextral transpressive regime", *Journal of Structural Geology*, ., (2003) 25, 441- 453.

[4] Aydin A., Ferre E. C., Aslan, Z., "The magnetic susceptibility of granitic rocks as a proxy for geochemical composition: Example from the Saruhan granitoids. NE Turkey", *Tectonophysics*, (2007) 441, 85- 95.

[5] Trubac j., Zak j., Chlupacova M., Janousek V., "Magnetic fabric of the Ricany granite, Bohemian massif: A record of helical magma flow?" *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, (2009)181, 25- 34

[6] Majumder S., Mamtani M. A., "Magnetic fabric in the Malanjkhanda Granite (Central India) Implications for regional tectonics and Proterozoic suturing of the Indian shield", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, (2009) 172, 310- 323.

[7] Skytta P., Hermansson T., Elming S. A., Bauer T., "Magnetic fabrics as constraints on the kinematic history of a pre-tectonic granitoid intrusion", Kristineberg, northern Sweden, *Journal of Structural Geology*, (2010) 32, 1125- 1136.

[8] Borradaile G. J., Jakson, M., "Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM)", *Journal of Structural Geology*, (2010) 32, 1519- 1551.

[9] Zak J., Verner K., Finger F., Faryad Sh., Chlupacova, M., Veselovsky F., "The generation of voluminous S-Type granites in the Moldanubian unit, Bohemian massif, by rapid isothermal exhumation of the metapelitic Middle crust", *Lithos*, (2011) 121, 25- 4.

[10] Borradaile G. J., Geneviciene I., Charpentier L., "Magnetic fabrics in Archean granitoids, Northwestern Ontario: isolation of accessory and matrix contributions by inspection of AMS data", *Tectonophysics*, (2012) 514- 517, 115- 122.

[11] Bascou J., Henry B., Ménot R. P., Funaki M., Guilhem Barrauol G., "Contribution of AMS measurements in understanding the migmatitic terrains of Pointe Géologie, Terre Adélie (East-Antarctica)". *Tectonophysics*, Elsevier, (2013) 603, pp.123-135. 10.1016/j.tecto.2013.05.021. (hal-01304296).

[12] Housen B., Pluijm V. D. B., Essene E. J., "Plastic behavior of magnetite and high strains

crystallography and 9th national symposium of Payam Noor university, Zanjan, Iran (2017), 546-552.

[31] Mohammadi M., "Investigation of the variations of magnetic parameters during migmatization and granitization of the high grade metapelitic rocks of Shotor Kuh igneous - metamorphic complex, in interval of Gorgabi-Jamil (SE Shahrood) (2017), M.Sc., thesis, Faculty of earth sciences, Shahrood University of Technology.

[32] Mohammadi M., Sadeghian M., Sheibi M., Shekari S. "Application of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) method in the interpretation of evolutions of the high grade metapelitic rocks of Shotor Kuh metamorphic complex (With late Neoproterozoic age) (2018), Journal of Kharazmi Earth Sciences (2018), 4th volume, No 1, 33-52.

[33] Mohammadi M., Sadeghian M., Sheibi M., Shekari S. "Recognition and analyzing of magnetic parameters in folded amphibolites of NW of the Shotor Kuh igneous and metamorphic complex (SE Shahrood), 24th symposium of crystallography and mineralogy of Iran, Shahrood, Iran (2018), 342-349.

[34] Balouchi S., "Petrology, geochemistry and isotope geochemistry of the Jandagh metamorphic-igneous complex (2018a), Ph.D. thesis, 391 P.

[35] Balouchi S., Sadeghian M., Ghasemi H., Zhai M., Quili L., Yanbin Z., "Mineral chemistry, geochronology and Sr-Nd isotope geochemistry of Ayrakan granites, Journal of Kharazmi Earth Sciences (2018b), 3th volume, No 2, 139-160.

[36] Balouchi S., Sadeghian M., Ghasemi H., Mingguo Z., Li C., Yanbin Z., "Mineral chemistry, geochemistry and isotope geochronology of Kalateh region (NW of Khur), implication for the Late Triassic magmatism of central Iran zone, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 26 (4) (2018c) 827-844.

[37] Fazilat, A., Sadeghian, M. "Magnetic susceptibility variations during mylonitization of Chah Zard gneisses (NE Jandagh), 25th symposium of crystallography and mineralogy of Iran, Yazd, Iran (2018b), 693-700.

[38] Fazilat, A., "Measuring, evaluation and interpretation of magnetic parameters in mylonitized granites of igneous and metamorphic complex of Jandagh (Northeast of Chah zard village) in the light of anisotropy of magnetic

metamorphic-igneous complex (east of Biarjomand) by using AMS method and determination of their paleomagnetic position", M.Sc. thesis, Faculty of earth sciences, Shahrood University of Technology, (2013) 226 pages.

[23] Saki S., "Investigation of emplacement mechanism of the Bouin - Miandasht granitoidic pluton using anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) method", M.Sc. thesis, Faculty of earth sciences, Shahrood University of Technology, (2014) 215 pages.

[24] Aslani A., Alimohammadian, H., Ghalamghash J., Nazari H. "Microstructural investigation of southern Alvand batholith using anisotropy of magnetic susceptibility", Scientific Quarterly Journal, Geosciences, (2015) 24 (94) 137-146.

[25] Sadeghian M., Bouchez J.L., Nedelec A., Siqueira R., Valizadeh, M. V., "The granite pluton of Zahedan (SE Iran): a Petrological and magnetic fabric study of a syntectonic sill emplaced in a transtensional setting", Journal of Asian Earth Sciences, (2005) 25, 301- 327.

[26] Esmaeily D., Bouchez J.L., Siqueira R., "Magnetic fabrics and microstructures of Jurassic Shah- Kuh granite pluton (Lut Block, Eastern Iran) and geodynamic inference", Tectonophysics, (2007) 439, 149- 170.

[27] Ghalamghash J., Bouchez J.L., Vosoughi - Abedini M., Nedelec A., "The Urumieh plutonic complex (NW Iran): Record of the geodynamic evolution of the Sanandaj - Sirjan zone during Cretaceous times - part II: magnetic fabrics and plate tectonic reconstruction", Journal of Asian Earth Sciences, (2009) 36, 303- 317.

[28] Rasouli J., Ahad Nejad V. & Esmaeily D., "A preliminary Study of the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of Boroujerd granitoids, Sanandaj- Sirjan zone, west Iran", Natural Science, (2012), 4, 91-105.

[29] Sheibi M., Bouchez J.L., Esmaeily D., Siqueira R., "The Shir- Kuh pluton (central Iran): Magnetic fabric evidences for the coalescence of magma batches during emplacement", Journal of Asian Earth Sciences, (2012) 46, 39-51.

[30] Mohammadi M., Sadeghian M., Sheibi M., Shekari S. "Recognition and analyzing of structural parameters in shear zones by using magnetic parameters (in the light of AMS method), 19th symposium of geological society of Iran and

[41] Fazilat, A., Sadeghian, M. “*Evaluation of magnetic parameter variations in Chah Zard gneisses (NE Jandagh, NE of Isfahan province)*”, 24th symposium of crystallography and mineralogy of Iran, Shahroud, Iran (2018a), 965-973.

[42] Bouchez J.L., “*Granite is never isotropic: An introduction to AMS studies in granitic rocks*”, In Bouchez J.L., Hutton D.H.W. and Stephens W.E. (Eds), *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics*”, Kluwer, Dordrecht, pp. (1997) 95-112.

susceptibility (AMS) method”. M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Faculty of earth Sciences, (2018c), 136 P.

[39] Vernon R.H., “*A practical guide to rock microstructure*”. Cambrige University press, (2004) 594 Pages.

[40] Trouw R. A. J., Paschier C. W., Wiersma, D. J., “*Atlas of Mylonites and microstructures*”, (2010) Springer Verlag, Berlin Hidelberg in Germany.