

سازوکار جایگیری توده گرانیوییدی گل‌زرد با استفاده از روش بررسی فابریک‌های مغناطیسی (AMS)

محمود صادقیان^۱، مریم شبی^۱ و سیمین بدلو^۲

^۱ استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۲۱

چکیده

توده گرانیوییدی گل‌زرد به سن تقریبی ۱۶۵±۵ میلیون سال، در شمال الیگودرز، از توابع استان لرستان قرار دارد و در پهنه سنندج - سیرجان رخنمون دارد. این توده درون سنگ‌های اسلیتی، فیلیتی و میکاشیستی (دگرگونی ناحیه‌ای) تریاس پایانی تا ژوراسیک آغازین نفوذ کرده است. گرانودیوریت‌ها بدنه اصلی این توده گرانیوییدی را تشکیل می‌دهند. گرانودیوریت‌ها توسط لوکوگرانیته‌ها، رگه‌ها و رگچه‌های آپلیتی، پگماتیتی و دایک‌های گابرویدیوریتی قطع شده‌اند. حضور آنکلاوهای متاپلیتی (سورمیکاسه و آندالوزیت - سیلیمانیت هورنفلسی)، آنکلاوهای سیلیسی و بیگانه‌بلورهای آندالوزیت و گارنت از نشانه‌های آشکار نوع S بودن این توده گرانیوییدی به‌شمار می‌رود. برای شناسایی سازوکار جایگیری توده گرانیوییدی گل‌زرد از روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) استفاده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و اندازه‌گیری ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی آنها نتایج زیر به‌دست آمده است. میانگین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km) اندازه‌گیری شده بر حسب μSI برای گرانودیوریت‌ها ۲۲۷، لوکوگرانیته‌ها ۵۷ و دایک‌های گابرویدیوریتی ۵۸۵ است. گرانودیوریت‌ها در مجموع به دلیل داشتن Km کمتر از $500 \mu\text{SI}$ به گرانیت‌های پارامگناطیس تعلق دارند و حامل اصلی خاصیت مغناطیسی در آنها، بیوتیت است. لوکوگرانیته‌ها دارای مقادیر K_{min} کمتری هستند که با کاهش قابل ملاحظه سهم کانی‌های پارامگناطیس به‌ویژه بیوتیت در آنها سازگار است. انواع ریزساخت‌های ساب ماگمایی، کمی دگرشکل‌شده و دگرشکلی حالت جامد دمای بالا در این توده دیده شده است و از این میان فابریک‌های ماگمایی چیره هستند. با توجه به روند خط‌واره‌ها و برگ‌واره‌های مغناطیسی و در نظر گرفتن دیگر متغیرهای مغناطیسی مانند (T, Km, $P_{\text{para}}\%$) و نشانه‌های صحرایی و ریزساختی می‌توان گفت این توده نفوذی از پهنه‌های تغذیه‌کننده‌ای بیرون آمده است که مرتبط با فضا‌های کششی و در ارتباط با عملکرد یک پهنه برشی امتدادلغز راست بر بوده است. توالی تزریق با گرانودیوریت‌ها در قالب یک ساختار دایکی شکل بزرگ آغاز شده و با توده‌های کوچک (آپوفیز) و رگه‌های لوکوگرانیته‌ای که گرانودیوریت‌ها را قطع کرده، ادامه یافته است. این توالی با جایگزینی دایک‌های ماگمیک - حد واسط در امتداد بازشدگی‌های ثانوی که پس از جایگیری توده نفوذی رخ داده، به پایان می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی، روش AMS، گرانیوییدی، گرانیته نوع S، گل‌زرد، الیگودرز، ایران

E-mail: m.sadeghian1392@yahoo.com

*نویسنده مسئول: محمود صادقیان

۱- پیش‌گفتار

پژوهش درباره گرانیته‌ها در چند دهه گذشته نشان داده است که اگر چه آنها بدون نشانه‌های روشن و مشخصی از تغییر شکل‌ها و سوهای جریان در مقیاس مزوسکوپی و صحرایی هستند، ولی با انجام روش AMS (ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی) می‌توان به این‌گونه اطلاعات دست یافت (Bouchez, 1997; Tarling & Hrouda, 1993; Bouchez et al., 1990; Rochette, 1987). AMS بر روی ویژگی‌ها و عوامل مؤثر در ایجاد فابریک‌های مغناطیسی سنگ‌ها معطوف شده است و می‌تواند به بیان سو و محور فابریک‌های ماگمایی در سنگ‌های مغناطیسی پردازد. فابریک‌های موجود در سنگ‌ها، اطلاعاتی را درباره تغییر شکل‌ها و سازوکارهای جایگیری توده‌های نفوذی آذرین فراهم می‌کند (Paterson & Vernon, 1995; Bouchez et al., 1990; Stephenson, 1994). مطالعات پتروفابریک سنگ‌های گرانیته بیشتر مربوط به سازوکار جایگیری ماگماها و ارتباط آنها با ساختارهای بزرگ مقیاس است (Neves et al., 1996, 1995; Rosenberg, 2004). در پژوهش حاضر برای بازسازی سازوکار جایگیری توده گرانیوییدی گل‌زرد (شمال الیگودرز)، از روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) استفاده شده است. در این پژوهش سعی شده است تا ضمن مروری کوتاه بر اصول و قواعد این روش، سازوکار جایگیری توده گرانیوییدی گل‌زرد با استفاده از داده‌های ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی و مطالعات ریزساختاری بررسی شود.

۲- زمین‌شناسی عمومی و سنگ‌شناسی توده گرانیوییدی گل‌زرد

منطقه مورد مطالعه در استان لرستان با مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 49'$ تا $42^{\circ} 49'$ طول‌خاوری و $33^{\circ} 23'$ تا $33^{\circ} 26'$ عرض شمالی و در حدود ۲ کیلومتری شمال الیگودرز قرار گرفته است. توده گرانیوییدی گل‌زرد در محدوده‌ای با گسترش تقریبی ۲۰ کیلومتر مربع رخنمون دارد. این توده نفوذی دارای روند کلی شمال باختری - جنوب خاوری است و بر پایه نقشه تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران در پهنه سنندج - سیرجان قرار دارد (شکل ۱).

توده نفوذی گل‌زرد در میان سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین (اسلیت، فیلیت و میکاشیست) با سن تریاس پسین - ژوراسیک پیشین جای گرفته است و هاله‌ای از سنگ‌های دگرگونی مجاورتی با درجه پایین تا متوسط (رخساره آلپیت - اپیدوت هورنفلس تا هورنبلند هورنفلس) را در پیرامون خود ایجاد کرده است (شکل ۱). به طور کلی، مهم‌ترین واحدهای سنگی دیده‌شده در محدوده مورد مطالعه بر پایه ترتیب سنی به قرار زیر است:

۱) سنگ‌های شیلی ماسه‌سنگی دگرگون‌شده در حد رخساره شیت‌سبز (تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین) (دگرگونی ناحیه‌ای)؛ ۲) توده نفوذی مورد مطالعه و سنگ‌های مرتبط با آن (ژوراسیک میانی) و ۳) سنگ‌های دگرگونی مجاورتی درجه پایین تا متوسط (حد اکثر کوردیریت هورنفلس). گفتنی است که فعالیت ماگمایی گسترده در بخش‌های مرکزی پهنه سنندج - سیرجان به صورت توده‌های گرانیوییدی مانند باتولیت الوند و نواحی مجاور آن چون دهنو، بروجرد، الیگودرز، ازنا و ... نمود

مغناطیسی را رسم کرد. نقشه‌های خطوطاره‌ها و برگ‌واره‌های مغناطیسی، در طی تعیین سازوکار صعود و جایگیری ماگما، اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهند.

۴- متغیرهای مورد استفاده در مطالعات فابریک مغناطیسی و پردازش آنها

موقعیت جغرافیایی و داده‌های توانایی مغناطیسی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های سنگی هر ایستگاه در جدول ۱ آورده شده است. $K1$ خطوطارگی مغناطیسی و $K3$ قطب برگ‌وارگی مغناطیسی نامیده می‌شوند. در جدول ۱ آزمون یا روند خطوطارگی ($K1$) و مقدار میل آن به ترتیب با $K1d$ و $K1i$ نشان داده شده‌اند. همچنین آزمون یا روند قطب برگ‌وارگی ($K3$) و مقدار میل آن به ترتیب با $K3d$ و $K3i$ نشان داده شده‌اند. همراه متغیرهایی مانند درصد ناهمسانگردی مغناطیسی ($Ppara$ %)، متغیر شکل (T) و توانایی پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km) نیز برای همه نمونه‌ها به دست آمده و در جدول آورده شده است.

۴-۱. توانایی پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km)

بزرگای توانایی پذیرفتاری مغناطیسی میانگین به صورت $Km = (K1 + K2 + K3) / 3$ به دست می‌آید؛ در نمونه‌های مورد مطالعه مقدار Km به دست آمده میان $40 \mu SI$ تا $600 \mu SI$ تغییر می‌کند (جدول ۱). میانگین مقادیر توانایی پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km) اندازه‌گیری شده بر حسب μSI در گرانودیوریت‌ها (با بیشترین فراوانی) 227 ، در لوکوگرانیت‌ها 58 و در دایک‌های گابرودیوریتی 585 است. چنین سنگ‌هایی که دارای توانایی پذیرفتاری مغناطیسی پایین و تقریباً بدون مگنتیت هستند به گرانیت‌های نوع ایلمنیت (Ishihara, 1997) تعلق دارند و به‌عنوان گرانیت‌های پارامغناطیس (با Km کمتر از $50 \mu SI$) (Bouchez, 1997) در نظر گرفته می‌شوند. در این گرانیت‌ها سهم کانی‌های فرومغناطیس بسیار ناچیز است و بیوتیت مهم‌ترین کانی آهن‌دار این مجموعه و در بردارنده توانایی پذیرفتاری مغناطیسی به‌شمار می‌رود. تورمالین نیز از کانی‌های پارامغناطیسی است که در این سنگ‌ها یافت می‌شود و در ایجاد خاصیت مغناطیسی در آنها سهم دارد. در این گرانیت‌ها انطباق خوبی میان توانایی پذیرفتاری مغناطیسی و نوع سنگ (مانند Gleizes et al., 1993) به‌ویژه مقدار بیوتیت وجود دارد. در شکل ۲- الف، ب میانگین Km در گروه‌های سنگی مورد مطالعه نشان داده شده است. با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که میان ترکیب سنگ‌شناسی و مقدار توانایی پذیرفتاری مغناطیسی میانگین ارتباط مستقیمی وجود دارد. مقادیر بالای توانایی پذیرفتاری مغناطیسی در دایک‌های گابرودیوریتی (Km میانگین برابر با $585 \mu SI$) با حضور گسترده هورنبلند سبز (به‌عنوان کانی مافییک چیره) و احتمالاً مقادیر کمی مگنتیت قابل توجیه است.

با به نمایش درآوردن تغییرات مقادیر توانایی پذیرفتاری مغناطیسی (Km) و دیگر متغیرهای مربوط مانند درصد ناهمسانگردی مغناطیسی ($Ppara$ %) و متغیر شکل (T) به‌صورت پهنه‌بندی، فهم تغییرات آنها و تعبیر و تفسیرشان بسیار آسان می‌شود (شکل ۳). همان‌گونه که در این نقشه تغییرات Km دیده می‌شود، بخش مرکزی نقشه (رنگ‌های سفید تا خاکستری روشن) و همچنین منتهی‌الیه شمال‌باختری آن، که با مقادیر توانایی پذیرفتاری مغناطیسی میانگین کم منطبق است، نشان‌دهنده محل حضور سنگ‌های گرانودیوریتی تفریق یافته‌تر و لوکوگرانیت‌ها هستند. با توجه به این شکل روشن می‌شود که در برخی نقاط مقدار توانایی پذیرفتاری مغناطیسی (میان $200 \mu SI$ تا 270)، در نقشه به رنگ خاکستری تیره است و با محل حضور سنگ‌های گرانودیوریتی غنی از بیوتیت همخوانی دارد.

۴-۲. متغیر ($Ppara$ %) یا درصد ناهمسانگردی مغناطیسی

متغیر P که به‌صورت درصد بیان می‌شود بیانگر رابطه میان مقدار بیشینه و کمینه توانایی پذیرفتاری مغناطیسی و یکی دیگر از متغیرهای لازم برای تفسیر فابریک‌های مغناطیسی است. از آنجایی که سنگ‌های مورد مطالعه توانایی پذیرفتاری مغناطیسی

یافته است. تعیین سن‌های جدید صورت گرفته بر روی توده‌های گرانیتویدی الوند و بروجرد و ... در محدوده سنی 163 تا 187 میلیون سال پیش (ژوراسیک میانی) پیشنهاد شده است (Masoudi et al., 2002; Shahbazi et al., 2010). نتایج حاصل از تعیین سن زیرکن به روش U-Pb بر روی انواع سنگ‌های گرانیتویدی منطقه بروجرد (Ahmadi Khalaji et al., 2007)، نشان از یک فاز ماگمایی گسترده ولی کوتاه‌مدت در محدوده سنی 171 تا 175 میلیون سال پیش (ژوراسیک میانی) در این بخش از پهنه سنج - سیرجان است. همچنین (Esna-Ashari et al., 2011a). سن 168 میلیون سال پیش (معادل ژوراسیک میانی) را برای توده گرانیتویدی الیگودرز اعلام کرده‌اند. تعیین سن بر روی زیرکن‌ها و به روش U-Pb انجام شده است.

بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری که بر روی توده گرانیتویدی یاد شده صورت گرفته است مشخص شد که توده نفوذی گل‌زرد از گرانودیوریت و لوکوگرانیت تشکیل شده است و در ضمن تعدادی دایک گابرو-دیوریتی آن را قطع کرده‌اند. گرانودیوریت‌ها بدنه اصلی این توده گرانیتویدی را تشکیل می‌دهند و تقریباً در سراسر توده نفوذی مورد مطالعه رخنمون دارند. گرانودیوریت‌ها توسط لوکوگرانیت‌ها، رگه‌ها و رگچه‌های آپلیتی، پگماتی و دایک‌های گابرودیوریتی قطع شده‌اند. کانی‌های اصلی موجود در گرانودیوریت‌ها شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت، ارتوکلاز و میکروکلین هستند. آندالوزیت، تورمالین، گارنت، اسفن، زیرکن، آپاتیت و مسکوویت از کانی‌های فرعی این سنگ‌ها به‌شمار می‌روند. لوکوگرانیت‌ها از مشتقات تفریق یافته این توده نفوذی هستند و در مقایسه با گرانودیوریت‌ها گسترش کمتری دارند. کانی‌های اصلی آنها شامل پلاژیوکلاز، فلدسپارپتاسیم، کوارتز و مقداری تورمالین (به‌صورت رگه‌ای یا گرهکی) هستند. حضور آنکلاوهای متاپلیتی (سورمیکاسه و آندالوزیت - سیلیمانیت هورنفلسی)، آنکلاوهای سیلیسی و بیگانه بلورهای آندالوزیت و گارنت از نشانه‌های آشکار نوع S بودن این توده گرانیتویدی به‌شمار می‌روند.

۳- نمونه‌برداری و اندازه‌گیری داده‌های مغناطیسی

معمولاً تعداد و چگونگی پراکندگی ایستگاه‌های نمونه‌برداری در محدوده مورد مطالعه در قالب یک شبکه منظم طراحی و با فاصله 1 تا 2 کیلومتر از هم انتخاب شده‌اند. هرچه تراکم ایستگاه‌های نمونه‌برداری بیشتر باشد، تجزیه و تحلیل‌های به‌دست آمده آسان‌تر و دقیق‌تر خواهد بود. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی توده گرانیتویدی گل‌زرد و وضعیت پراکندگی موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده بر روی آن به نمایش گذاشته شده است. نتیجه این نمونه‌برداری‌ها 217 مغزه جهت‌دار از 75 ایستگاه در محدوده‌ای با گسترش 20 کیلومتر مربع از واحدهای سنگی مختلف توده گرانیتویدی گل‌زرد است. خلاصه‌ای از روش صحیح نمونه‌برداری در پیوست آورده شده است. توانایی پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش در آزمایشگاه ژئومغناطیس دانشگاه صنعتی شاهرود توسط دستگاه اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی مدل MFk1-FA ساخت شرکت آجیکو (AGECO) از کشور چک اندازه‌گیری شد.

پس از اندازه‌گیری بر روی همه نمونه‌ها، داده‌های حاصل از خروجی دستگاه شامل متغیرهایی است که مهم‌ترین آنها $K1, K2, K3$ و Km هستند. $K1$ بیانگر توانایی پذیرفتاری مغناطیسی بیشینه، $K2$ بیانگر توانایی پذیرفتاری مغناطیسی حدواسط و $K3$ توانایی پذیرفتاری مغناطیسی کمینه است. متغیر Km توانایی پذیرفتاری مغناطیسی میانگین است و یکی از مهم‌ترین متغیرهایی است که نتایج مهم و ارزشمندی درباره ماهیت گرانیت‌های مورد اندازه‌گیری از دید پارامغناطیس یا فرومغناطیس بودن ارائه می‌دهد. متغیر $K1$ ، متناسب با خطوطاره مغناطیسی (Lineation) است و به‌وسیله آن می‌توان نقشه خطوطاره‌های مغناطیسی را رسم کرد. متغیر $K3$ ، متناسب قطب با برگ‌وارگی مغناطیسی (Foliation) است و به کمک آن می‌توان نقشه برگ‌واره‌های

۵- ریزساخت‌ها

سنگ‌های گرانیتی و به‌طور کلی توده‌های نفوذی در طی جایگیری و پس از آن، به‌طور متفاوتی دگرشکل می‌شوند، بنابراین مطالعه ریزساخت‌های این توده‌ها برای شناخت و درک وضعیت فیزیکی ماگما در زمان شکل‌گیری فابریک‌های آنها و تعیین دگرشکلی ناحیه‌ای منطقه، ابزار مهم و سودمندی به‌شمار می‌رود (Brun & Pon, 1981; Blumenfeld & Bouchez, 1988). الگوی فابریک مغناطیسی و ریزساختی سنگ‌های گرانیتی نشانه‌های خوبی از تغییر شکل ناشی از تزریق توده نفوذی را ارائه می‌دهند.

با بررسی ریزساخت‌ها و فابریک‌های ماگمایی موجود در مقاطع نازک توده گرانیتوبیدی گل‌زرد و نشانه‌هایی که این توده در خود ثبت کرده است، ریزساخت‌های آن را می‌توان به انواع ماگمایی و ساب‌سولیدوس حالت جامد دمای بالا تقسیم کرد. این ریزساخت‌ها بر پایه چگونگی عملکرد کرنش بر کانی‌های کوارتز، بیوتیت و پلاژیو کلاز و آلکالی فلدسپار به دو نوع قابل تقسیم هستند:

۵-۱. ریزساخت‌های ماگمایی

این ریزساخت‌ها که ابتدایی‌ترین فابریک‌های منطقه را در خود حفظ کرده‌اند درشت تا متوسط‌دانه هستند. این نوع ریزساخت‌ها با نشانه‌هایی چون بلورهای تخته‌ای و اولیه پلاژیو کلاز شکل دار و دارای پهنه‌بندی ترکیبی، بیوتیت بدون هرگونه دگرشکلی و کوارتز و فلدسپارپتاسیم بی‌شکل که در میان کانی‌های پلاژیو کلاز و بیوتیت قرار گرفته‌اند، مشخص می‌شوند (شکل ۸-الف). تنها دانه‌های کوارتز کمی خاموشی موجی نشان می‌دهند (شکل ۸-ب) و در این حالت هیچ اثری از دگرشکلی پلاستیکی و خردشدگی بلوری در آنها دیده نمی‌شود (Paterson et al., 1989). الگوی صفحه شطرنجی در دانه‌های بزرگ کوارتز نشان‌دهنده مقدار کمی تغییر شکل در حالت جامد، در دمایی نزدیک به دمای سولیدوس گرانیت است (Mainprice et al., 1986; Kruhl, 1996). فابریک‌های ماگمایی در حضور فاز مذاب باقی‌مانده تشکیل شده‌اند. همچنین در مواردی رشد میرمیکت در حاشیه بلورهای پلاژیو کلاز، یعنی در زمینه‌ای از فلدسپارها دیده می‌شود، این امر نشان‌دهنده درجه حرارت به‌نسبت بالای رخداد این فرایندها (در دمایی بالاتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) است (شکل ۸-ج) (Tribe & D' Lemos, 1996). این نوع ویژگی نیز در توده گرانیتوبیدی گل‌زرد دیده می‌شود. بیشتر ریزساخت‌های موجود در توده گرانیتوبیدی گل‌زرد به‌طور عمده به این گروه تعلق دارند (شکل ۹).

۵-۲. ریزساخت‌های حالت جامد دمای بالا

این ریزساخت‌ها با نشانه‌هایی چون الگوی صفحه شطرنجی کمی در دانه‌های کوارتز بزرگ و گاهی تبلور دوباره به دانه‌های کوچک‌تر و جدید (شکل ۸-ب) و پلاژیو کلازهای کشیده و خمیده با ماکل مکانیکی (شکل ۸-د) شناسایی می‌شوند. همچنین در اثر دگرشکلی و تحمل تنش‌های زمین‌ساختی برخی از دانه‌های ارتوز به میکروکلین تبدیل شده‌اند (شکل ۸-ه)؛ چرا که با تحمیل تنش سامانه بلورشناسی بلورهای ارتوز تغییر می‌کنند و به بلورهای با تقارن کمتر تبدیل می‌شوند. ارتوز از سامانه منوکلینیک به سامانه تری‌کلینیک تحول پیدا می‌کند و به میکروکلین تبدیل می‌شود (Vernon, 2004). بیوتیت‌ها تاب خورده و خمیده هستند (۸-و). کوارتزها خاموشی موجی و صفحه شطرنجی نشان می‌دهند که این ویژگی نشانه‌ای از تحول دگرشکلی ماگمایی به حالت جامد است (Paterson et al., 1998). سنگ‌های موجود در بخش جنوب‌باختری (ایستگاه شماره ۸) توده گرانیتوبیدی گل‌زرد به این گروه تعلق دارند. پراکندگی این ریزساخت‌ها و نوع آنها در توده مورد مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است.

۶- الگوی فابریک

همان‌گونه که در ابتدا گفته شد، شیب و امتداد K1 نشان‌دهنده خط‌وارگی مغناطیسی

کمی دارند، در محاسبه درصد انیزوتروپی باید سهم کانی‌های دیامغناطیس که به‌طور متوسط $D \approx -14 \mu\text{SI}$ در نظر گرفته شده است (Bouchez, 1997) از مقادیر K1 و K3 کسر شود. به این ترتیب فرمول انیزوتروپی کل برای گرانیت‌های پارامغناطیس مانند توده گرانیتوبیدی گل‌زرد بدین صورت به‌دست می‌آید:

$$P_{\text{para}} \% = 100 \times [((K1-D)/(K3-D)) - 1]$$

مقادیر K1 و K3 با چگونگی پراکندگی کانی‌های پارامگنتیک و فرومگنتیک و چگونگی آرایش آنها در ارتباط است (Hargraves et al., 1991; Gregoire et al., 1995). دگرشکلی‌های زمین‌ساختی یا ثانویه می‌توانند بر روی چگونگی پراکندگی، آرایش و اندازه دانه‌های مگنتیت تأثیر بگذارند. مقادیر P (بر حسب درصد) در جدول ۱ نشان داده شده است و با توجه به این جدول، دامنه تغییرات P میان ۱/۰۲ تا ۹/۵۲ درصد تغییر می‌کند. اگر نقشه مقادیر درصد ناهمسانگردی بر پایه این دامنه تغییرات رسم شود، نقشه پهنه‌بندی تغییرات درصدی P به‌دست می‌آید (شکل ۴). بیشترین مقادیر P در بخش‌های میانی توده گرانیتوبیدی دیده می‌شود و با محل حضور ترکیبات سنگی لوکوگرانیتی همخوانی دارد.

۴-۳. T یا متغیر شکل

T که به آن متغیر شکل نیز گفته می‌شود، بر پایه معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$T = \ln [K2 / (K1 \times K3)] / \ln (K1 / K3)$$

این متغیر شکل بیضوی مغناطیسی را توصیف می‌کند. شکل بیضوی مغناطیسی، با جهت‌گیری و نظمی که بلورهای فرومغناطیس در هنگام جایگیری یک توده ماگمایی به خود می‌گیرند، همخوانی دارد و یا رشد بلورها و آرایش دوباره آنها را در یک میدان تحت تنش بازتاب می‌نماید (Ellwood, 1978). مقدار متغیر شکل همواره میان +۱ تا -۱ در تغییر است. اگر مقدار T کمتر از صفر و منفی باشد، بیضوی مغناطیسی شکل دوکی و یا خطی (Prolate) و در صورتی که T بزرگ‌تر از صفر و مثبت باشد، بیضوی مغناطیسی شکل کلوچه‌ای یا صفحه‌ای شکل (Oblate) خواهد داشت. دامنه تغییرات T با توجه به جدول ۱ در منطقه گل‌زرد از ۱/۰۳ تا -۰/۴۳- متغیر است. تغییرات متغیر T به‌صورت پهنه‌بندی‌شده در شکل ۵ نشان داده شده است. با وجود پراکندگی‌هایی که این عامل به نمایش می‌گذارد، در نقشه تغییرات T، محدوده‌هایی با ترکیب گرانیتی-گرانودیوریتی (به‌ویژه در جنوب خاور منطقه) دیده می‌شود که مقدار T مثبت به نسبت بالایی دارند. اگرچه تغییرات موضعی در روند آنها دیده می‌شود، این ویژگی، نفوذ ماگما را به‌صورت دایک در این نواحی تأیید می‌کند. در دیگر مناطق توده نفوذی گل‌زرد، به‌ویژه در بخش‌های حاشیه‌ای آن، مقدار T منفی است. این امر نشان می‌دهد که شدت دگرشکلی در حاشیه‌ها بیشتر بوده و بیانگر بیضوی‌های مغناطیسی دوکی شکل یا کشیده برای این مناطق است. مناطق دارای بیضوی‌های دوکی شکل با پهنه‌های تغذیه‌کننده ماگمایی همخوانی دارد. نمودارهای P و T برای ۳ گروه سنگی موجود در توده گرانیتوبیدی گل‌زرد در شکل ۶ نشان داده شده است. در نمودار T بیضوی‌های کلوچه‌ای (Oblate) نسبت به انواع دوکی شکل (Prolate) فراوانی بیشتری دارند.

نمودار تغییرات لگاریتمی Km در برابر T (شکل ۷) که برای نمونه‌های گرانودیوریتی و لوکوگرانیتی رسم شده است نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها مقادیر T مثبت دارند و بیضوی مغناطیسی آنها کلوچه‌ای شکل است. شمار کمی از ایستگاه‌های متعلق به سنگ‌های گرانودیوریتی که T منفی (-۰/۴۳- تا -۰/۰۳-) دارند، متعلق به ایستگاه‌هایی هستند که بیشتر در حاشیه توده قرار گرفته‌اند و تأثیرات حاشیه‌ای مرز تماس آنها با سنگ‌های میزبان سبب شده است تا دگرشکلی (Deformation) در آنها زیاده‌تر شود و آرایش بلورها را به هم بزند و بیضوی‌های مغناطیسی کشیده‌تر باشند (T منفی‌تر). با توجه به مقاطع نازک تهیه شده از این نمونه‌ها، آرایش یافتگی بیوتیت‌ها در راستای خاص در مقیاس میکروسکوپی گویای این مطلب است.

می توان توده گرانیتوئیدی گل زرد را به دو قلمرو اصلی A و B جدا کرد که به ترتیب با نیمه شمال باختری و نیمه جنوب خاوری یا به بیان ساده تر با نیمه شمالی و نیمه جنوبی توده همخوانی دارند (شکل ۱۲). در قلمرو A بیشتر خطواره های مغناطیسی روند خاوری - باختری دارند، در حالی که در قلمرو B بیشتر خطواره ها دارای روند شمال خاوری - جنوب باختری هستند. در قلمرو A ترکیب بیشتر گرانودیوریتی است و واحدهای سنگی تفریق یافته مانند گرانیت ها رخنمون محدودتری دارند، در حالی که در قلمرو B و با دست کم در مرز میان دو قلمرو ترکیبات تفریق یافته تر همچون گرانیت های دانه ریز تورمالین دار و به طور محلی پگماتیت های تورمالین دار دیده می شوند. رگه ها و رگچه های تورمالین دار (در شمال سد حوضیان)، گرهک های تورمالین دار در بخش های میانی توده گرانیتوئیدی نشان دهنده این موضوع است.

قلمرو A در بردارنده نیمه شمالی توده گرانیتوئیدی گل زرد (با ۴۸ ایستگاه نمونه برداری) است و با توجه به روند خطواره ها و برگ های مغناطیسی و دیگر متغیرهای مغناطیسی به ۳ زیر قلمرو تقسیم می شود که با نام های A1، A2 و A3 مشخص شده اند. بیشتر سنگ های دیده شده در این قلمرو گرانودیوریتی هستند ولی لوکوگرانیت ها تنها در بخش های مرکزی توده نفوذی گل زرد و در چند ایستگاه نمونه برداری رخنمون داشته اند (در مناطقی از زیر قلمرو A3). مشاهدات صحرایی در این قلمرو نشان می دهد که تعدادی دایک گابرو دیوریتی در ایستگاه های ۶، ۳۸، ۴۰ و ۵۹ گرانودیوریت ها را قطع کرده اند. توانایی پذیرفتاری مغناطیسی قلمرو A به طور میانگین $229 \mu\text{SI}$ است. مناطق A1 و A2 به ترتیب در دو انتهای باختری و خاوری این قلمرو قرار می گیرند. در قلمرو A1، روند میانگین بیشتر خطواره های مغناطیسی به سوی باختر و شمال باختر است و به طور میانگین ویژگی های $280^\circ/51^\circ$ دارد. در برابر آن قلمرو A2 دارای خطواره های مغناطیسی است که بیشتر به سوی خاور آرایش پیدا کرده اند و به طور میانگین ویژگی های $87^\circ/51^\circ$ دارند. قلمرو A3 یک حالت انتقالی یا حد واسط میان این دو قلمرو است به گونه ای که خطواره ها سوی مشخصی را نشان نمی دهند و بیشتر در یک راستای دو سویه خاوری - باختری دو جانبه پراکنده شده اند. اگر این ۳ قلمرو به طور یک جا با هم در نظر گرفته شوند به راحتی دریافت می شود که قلمروهای A1 و A2 از دید وضعیت جریان یافتگی ماگما، رفتاری کاملاً متضاد نشان می دهند. خطواره های مغناطیسی در این قلمرو A3 بیشتر روند خاوری - باختری و به طور میانگین ویژگی های $261^\circ/51^\circ$ دارند. مختصات بهترین قطب برگ واره های مغناطیسی در این قلمرو برابر با $187^\circ/11^\circ$ است. شیب کم قطب برگ واره های مغناطیسی نشان دهنده نفوذ ماگما به صورت ورقه های پر شیب و دایکی شکل در این قلمرو از توده گرانیتوئیدی است.

قلمرو B نیمه جنوبی توده گرانیتوئیدی گل زرد را در بر می گیرد و با توجه به روند خطواره های مغناطیسی به ۲ زیر قلمرو تقسیم می شود که با نام های B1 و B2 مشخص شده اند. در این بخش از توده گرانیتوئیدی گل زرد روند بیشتر خطواره های مغناطیسی در بخش شمالی این بخش به سوی شمال خاوری و در بخش پایانی این بخش از توده، به سوی جنوب باختری متمایل شده اند و به طور میانگین ویژگی های $199^\circ/85^\circ$ دارند. مختصات بهترین قطب برگ واره های مغناطیسی در این قلمرو برابر با $325^\circ/4^\circ$ است. شیب کم قطب برگ واره های مغناطیسی نشان دهنده نفوذ ماگما به صورت دایکی شکل در این قلمرو است.

با توجه به وضعیت خطواره های مغناطیسی در زیر قلمروهای A1، A2 و B2 می توان آنها را پهنه های تغذیه کننده ماگما در این توده در نظر گرفت. در شکل ۱۲ افزون بر نقشه خطواره های مغناطیسی، استریوگرام های نشان دهنده خطواره ها و قطب برگ واره های مغناطیسی هر زیر قلمرو نشان داده شده است. شکل ۱۳ زبان تصویری مطالبی است که تاکنون ارائه شده است.

بررسی روند پراکنده گی دایک های گابرو - دیوریتی قطع کننده توده گرانیتوئیدی گل زرد نشان می دهد که آنها بیشتر امتداد شمالی - جنوبی دارند و

است و از ویژگی های آن در رسم نقشه های خطواره های مغناطیسی استفاده می شود. این نقشه، با قرار گرفتن خطواره مغناطیسی (با علامت فلش \uparrow) بر روی موقعیت هر ایستگاه به دست می آید. خطواره های مغناطیسی توده گرانیتوئیدی گل زرد برحسب مقدار میل آنها با ۳ نوع فلش نمایش داده شده اند (فلش کوتاه معرف میل های ۶۰ تا ۹۰ درجه، فلش متوسط نشان دهنده میل های ۳۰ تا ۵۹ درجه و فلش بلند نشان دهنده میل های ۰ تا ۲۹ درجه است). مقدار میل خطواره ها در کنار فلش ها نشان داده شده است. در پایان و با رعایت اصول یاد شده و به کمک نرم افزار Arc GIS 9.3 نقشه خطواره های مغناطیسی توده گل زرد تهیه و رسم شده است (شکل ۱۰).

با توجه به نقشه وضعیت خطواره های مغناطیسی، مقدار میل آنها و پهنه بندی بر پایه میل خطواره ها می توان توده گرانیتوئیدی را به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم کرد. در نیمه شمالی توده گرانیتوئیدی گل زرد و در بخش های خاوری و باختری آن خطواره های مغناطیسی دارای میل زیاد هستند و در خلاف جهت یکدیگر جهت یابی پیدا کرده اند. در بخش میانی این دو منطقه خطواره های مغناطیسی میل کمی دارند و بیشتر روند شمال خاوری - جنوب باختری نشان می دهند. در نیمه جنوبی این توده نفوذی، بیشتر خطواره های مغناطیسی با روند خاوری - باختری از بخش شمال خاور شروع می شوند و با روند جنوب باختر در جنوب خاور توده پایان می یابند. در توده نفوذی مورد مطالعه مناطق دارای خطواره های مغناطیسی با میل زیاد به احتمال قوی بر محل های حضور پهنه های تغذیه کننده منطبق هستند.

نقشه برگ وارگی مغناطیسی بر پایه تعبیر و تفسیر آزمون و میزان میل K3 که به عنوان قطب برگ وارگی مغناطیسی به شمار می آید، رسم شده است (شکل ۱۱). برای رسم صفحه های برگ وارگی مغناطیسی، همانند خطوارگی از نماد \perp استفاده و برحسب میزان برگ وارگی به صورت زیر دسته بندی شده است (علامت کوتاه نشان دهنده شیب های ۶۰ تا ۹۰ درجه، علامت متوسط نشان دهنده شیب های ۳۰ تا ۵۹ درجه و علامت بلند نشان دهنده شیب های ۰ تا ۲۹ درجه است). خط بلندتر نماد امتداد و خط کوچک تر سوی شیب را نشان می دهد. برای نشان دادن میزان شیب، مقدار آن در کنار نماد برگ وارگی درج می شود. نگاهی به نقشه برگ واره های مغناطیسی در شکل ۱۱ نشان می دهد که در نیمه شمالی توده بیشتر برگ واره های مغناطیسی دارای امتداد شمال باختری - جنوب خاوری و در نیمه جنوبی توده بیشتر دارای امتداد خاوری - باختری هستند. همچنین در مناطق حاشیه ای، برگ واره ها شیب بسیار بالا و نزدیک به قائم دارند. در بخش هایی که لوکوگرانیت ها رخنمون دارند (در مرکز نیمه شمالی توده)، برگ واره های مغناطیسی دارای شیب کمتر از ۶۰ درجه هستند ولی در خاور و باختر این بخش برگ واره های مغناطیسی شیب زیاد و نزدیک به قائم دارند (۷۵ تا ۹۰ درجه). در حاشیه شمال باختری توده امتداد برگ واره ها به موازات حاشیه است و دگرگونی مجاورتی در سنگ های میزبان گسترش یافته است. موازی بودن امتداد خطواره ها و برگ واره ها با حاشیه توده نفوذی و همچنین گستره حضور سنگ های دگرگونی مجاورتی نشان می دهد که در هنگام تزریق، سنگ های میزبان به عنوان یک سد رفتار کرده اند و ماگمای گرانودیوریتی به موازات سنگ های میزبان خود جای گرفته است. در حاشیه های باختری و شمال باختری، امتداد برگ واره ها و خطواره های مغناطیسی با شیب زیادی حاشیه را قطع می کند. وضعیت برگ واره های مغناطیسی در بخش جنوبی توده گل زرد به صورتی است که در حواشی این بخش از توده برگ واره ها دارای شیب زیاد و در بخش های میانی آن که لوکوگرانیت ها حضور یافته اند دارای شیب کمتر از ۶۰ درجه هستند.

۷- پهنه بندی توده گرانیتوئیدی بر پایه وضعیت خطواره ها و برگ واره های مغناطیسی و دیگر نشانه های زمین شناسی

با توجه به روند خطواره ها و برگ واره های مغناطیسی و در نظر گرفتن دیگر متغیرها مانند نشانه های صحرایی، سنگ نگاری و ریزساختاری و ترکیب سنگ شناسی،

تاکنون به دست آمده است می‌توان گفت توده گرانیتوبیدی گل‌زرد در یک فضای کشتی همانند حالت ۱ و ۲ نشان داده شده در شکل ۱۳ و با ساختار دایکی شکل جای گرفته است. در واقع ماگمای سازنده توده گرانیتوبیدی گل‌زرد در راستای یک فضای کشتی بزرگ مقیاس با راستای NW-SE به ترازهای بالاتر انتقال یافته و درون سنگ‌های متاپلیتی جای گرفته است (شکل ۱۵). فازهای تفریق یافته تر این توده نفوذی یعنی گرانیت‌ها و لوکوگرانیت‌ها نیز در همین راستا بالا آمده‌اند. نشانه‌های صحرایی نشان می‌دهد که گرانودیوریت‌ها توسط گرانیت‌ها و لوکوگرانیت‌ها قطع شده‌اند. در واقع فازهای تفریق یافته از سطوح ضعف پیشین استفاده کرده، خود را به ترازهای بالاتر رسانده و سپس متبلور شده‌اند. دانه‌ریز تر بودن آنها نشان‌دهنده این امر است. در پایان نیز طی یک فاز کشتی کمی تأخیری تر، ماگمای حدواسط تا بازی از راه شکاف‌ها و شکستگی‌های ایجاد شده بالا آمده و دایک‌های گابرو دیوریتی را به وجود آورده است.

۹- نتیجه‌گیری

اگرچه با در نظر گرفتن روند خط‌واره‌ها و برگ‌واره‌های مغناطیسی و دیگر متغیرهای مغناطیسی مانند T, Km, Ppara, % نشان‌های صحرایی و مطالعات ریزساختی دو قلمرو ساختاری اصلی در توده گرانیتوبیدی گل‌زرد شناخته شده است، ولی فابریک‌های به‌نسبت هماهنگی که در کل توده دیده می‌شود و نشان از عملکرد یک پالس ماگمایی از پهنه‌های تغذیه‌کننده دارد، با گذشت زمان تفریق یافته تر شده است. سازوکار جایگیری این توده مرتبط با یک بازشدگی کشتی در پوسته میانی تا بالایی و عملکرد یک پهنه برشی امتدادلغز راست‌بر است. توالی تزریق با گرانودیوریت‌ها در قالب یک ساختار دایکی شکل بزرگ شروع شده است و سپس با توده‌های کوچک (آپوفیز) و رگه‌های لوکوگرانیتی که گرانودیوریت‌ها را قطع کرده، ادامه یافته است. این توالی با جایگزینی دایک‌های مافیک - حدواسط در امتداد بازشدگی‌های ثانوی که پس از جایگیری توده نفوذی رخ داده است، به پایان رسیده است.

پیوست؛ روش نمونه‌برداری و اندازه‌گیری توانایی پذیرفتاری مغناطیسی

نمونه‌برداری توسط دستگاه حفاری قابل حمل که مجهز به سر مته الماسه است و با بنزین کار می‌کند انجام گرفت. اولین مرحله برای برداشت نمونه‌ها پیدا کردن محلی مناسب برای نمونه‌برداری است. محل نمونه‌برداری باید از رخنمون‌های سخت و تا حد امکان به دور از درزه و بخش‌های تجزیه شده باشد. پس از پیدا کردن محل مناسب، بر روی محلی که حفاری باید بر روی آن انجام شود، با مازیک ضد آب خطی رسم می‌شود (شکل ۱- الف پیوست). برای تهیه هر مغزه حدوداً تا ژرفای ۸ تا ۱۲ سانتی‌متری سنگ، حفاری صورت می‌گیرد. پیش از برداشت مغزه از محل خود، با استفاده از کمپاس، میل و آزیموت محور مغزه اندازه‌گیری و به عبارتی نمونه جهت‌یابی می‌شود و جهتی که نسبت به آن آزیموت مغزه اندازه‌گیری شده است روی سنگ و مغزه علامت‌گذاری می‌شود. برای این کار باید از یک وسیله ویژه به نام تراز یاب استفاده کرد (شکل ۱- ب پیوست). پس از قرار دادن تراز یاب، در محلی که حفاری شده است، میل و سوی میل مغزه با قرار دادن کمپاس در کنار صفحه تراز خوانده شده و در دفترچه صحرایی یادداشت می‌شود (شکل ۱- ج، د پیوست). سوی میل در محدوده ۰ تا ۳۶۰ درجه و مقدار میل میان ۰ تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند. پس از بیرون آوردن مغزه و تمیز کردن گل و لای حفاری، به کمک نیم‌لوله پلاستیکی دو انتهای فلش به صورت دو خط مستقیم بر روی بدنه مغزه رسم می‌شود. خطی که از بخش سر فلش منشعب می‌شود با هاشورهایی به سوی انتهای مغزه زده شده که زاویه حاده این هاشورها بالای مغزه و زاویه منفرجه آنها، پایین مغزه را نشان می‌دهد (شکل ۱- و، ز پیوست). سپس بر روی مغزه نام، شماره ایستگاه و دیگر ویژگی‌های آن به کمک مازیک ضد آب درج می‌شود

میانگین شیب آنها حدود ۸۰ درجه است. این دایک‌ها در مراحل پایانی جایگیری این توده نفوذی و در اثر حاکم شدن یک رژیم زمین‌ساختی کشتی بر منطقه مورد مطالعه به وجود آمده‌اند. استریوگرام و نمودار گل‌سرخ‌ی ارائه شده در شکل ۱۴- الف و ب نشان‌دهنده راستای کلی دایک‌های گابرو دیوریتی است که به ترتیب بر پایه فابریک‌های مغناطیسی به‌ویژه برگ‌واره‌های مغناطیسی و اندازه‌گیری‌های صحرایی انجام شده، به دست آمده است. توجه شود که راستای کلی به دست آمده از هر دو نمودار همانند است و روند شمالی - جنوبی با شیب زیاد را نشان می‌دهد.

۸- مدل جایگیری توده گرانیتوبیدی گل‌زرد

توده‌های نفوذی می‌توانند در اثر سازوکارهای متفاوتی جایگزین شوند. چند مدل از مهم‌ترین ایده‌هایی که تاکنون برای هندسه جایگیری توده‌های نفوذی بیان شده است؛ به این قرار است: مدل تزریق به‌صورت دی‌پیریم (Cruden, 1988)، مدل دایکی شکل (Clemens & Mawer, 1992) و مدل جایگزینی همراه با دگرشکلی (Hutton et al., 1990; Castro, 1985; Hutton, 1982) را عرضه کرده‌اند. Tikoff & Teyssier (1994) نیز مدل زمین‌ساختی ترافشارشی را برای پهنه‌های همگرا پیشنهاد کرده‌اند. این گونه تقسیم‌بندی‌ها به جایگیری توده‌های نفوذی در ترازهای مختلف پوسته و موقعیت زمین‌ساختی آنها وابسته است.

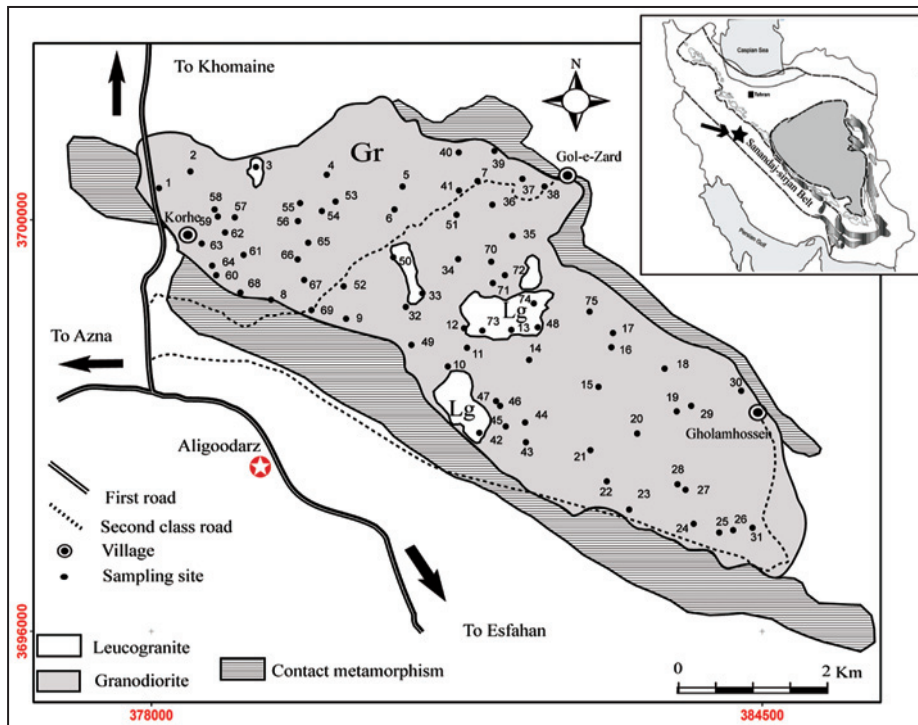
توده گرانیتوبیدی گل‌زرد با سن ژوراسیک میانی در میان سنگ‌های متاپلیتی تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین پهنه سنندج - سیرجان رخنمون یافته است که با رویدادهای زمین‌شناسی و شرایط زمین‌ساختی حاکم بر این پهنه در آن زمان همخوانی دارد. (Tikoff & Teyssier, 1994)، مدل زمین‌ساختی ترافشارشی را برای توجیه پهنه‌های ساختاری کنونی مرتبط با صفحات همگرای مورب ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که در برخی از محیط‌های ترافشارشی مانند سوماترا، تنش برشی و در برخی دیگر مانند کالیفرنیا برش ساده چیره است. ویژگی یک محیط ترافشارشی آن است که دگرشکلی درون قلمروها پراکنده می‌شود و در برخی از آنها تنش برشی محض و در برخی دیگر تنش برشی ساده چیره است. در ضمن می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط Mohajjel & Fergusson (2000) در منطقه ژان (June) در پهنه سنندج - سیرجان نیز اشاره کرد. ایشان به دگرشکلی‌های صورت گرفته در شیب‌های منطقه یادشده پرداخته و آنها را به رویداد ترافشارشی راست‌بری نسبت داده‌اند که در زمان کرتاسه پیشین در اثر برخورد دو قاره عربی - آفریقایی به خرده‌قاره ایران صورت گرفته است.

چنین به نظر می‌رسد که توده گرانیتوبیدی گل‌زرد به موازات پهنه ساختاری سنندج - سیرجان و در امتداد بازشدگی‌هایی با روند شمال باختری - جنوب خاوری (موازی با روند کلی پهنه سنندج - سیرجان) به سوی بالا حرکت کرده است. همان گونه که پیش‌تر در مباحث مربوط به ریزساخت‌های توده نفوذی گل‌زرد اشاره شد، فابریک‌های دیده شده در توده نفوذی گل‌زرد بیشتر ماگمایی هستند و دچار تنش کمتری شده‌اند. نشانه‌های دگرشکلی به نسبت ضعیف دیده شده، خاموشی موجی یا صفحه شطرنجی در کوارتز و به ندرت کینک‌باند در بیوتیت است. با توجه به این مطالب، این‌طور دریافت می‌شود که نفوذ و جایگیری این توده نفوذی در میان شکاف‌ها و شکستگی‌های مرتبط با کنش یا واکنش تنش‌های اعمال شده بر پهنه برشی امتدادلغز راست‌بر حاکم بر منطقه صورت گرفته است. سازوکاری که می‌تواند برای جایگیری این توده گرانیتوبیدی پیشنهاد کرد، مدل زمین‌ساختی ترافشارشی مرتبط با یک سامانه برش امتدادلغز در پهنه همگرای سنندج - سیرجان است.

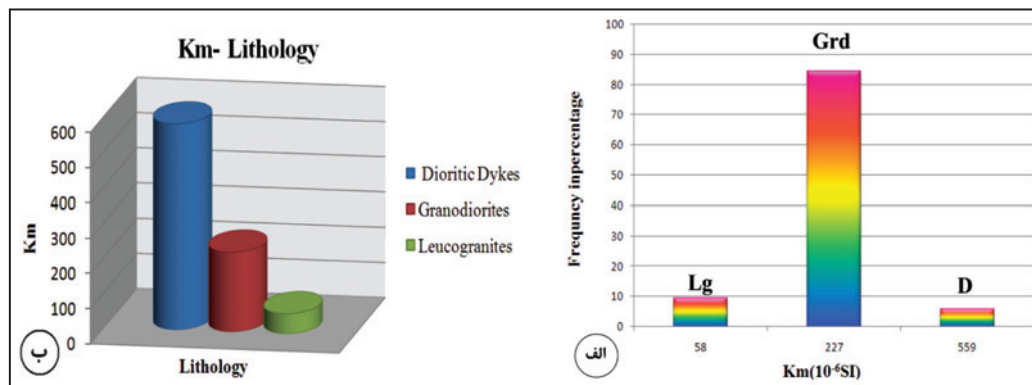
شیب به‌نسبت زیاد خط‌واره‌ها و برگ‌واره‌های مغناطیسی و روند به‌نسبت یکسان آنها در کل توده (هر دو قلمرو A و B) نشان می‌دهد که ماگما به صورت یک ساختار دایکی شکل تقریباً خاوری - باختری تزریق شده است. با توجه به نتایجی که

پژوهش در حدود ۸۶۸ نمونه به دست آمد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۱- پیوست خلاصه‌ای از مراحل توصیف شده را نشان می‌دهد. توانایی پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش توسط دستگاه اندازه‌گیری توانایی پذیرفتاری مغناطیسی مدل MFK1-FA ساخت شرکت آجیکو (AGECO) از کشور چک در آزمایشگاه ژئومغناطیس دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه‌گیری شد (شکل ۲- پیوست). در طی اندازه‌گیری متغیرهای مغناطیسی شدت میدان مغناطیسی دستگاه اندازه‌گیری برابر ۲۰۰ میلی تسلا (T) است و ثابت می‌ماند. این دستگاه می‌تواند توانایی پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها را تا دقت 10^{-8} SI اندازه‌گیری کند. دقت بسیار زیاد دستگاه Kappabridge برای مطالعه ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی پایین مانند گرانیت‌های پارامغناطیس مناسب است (Bouchez, 1997).

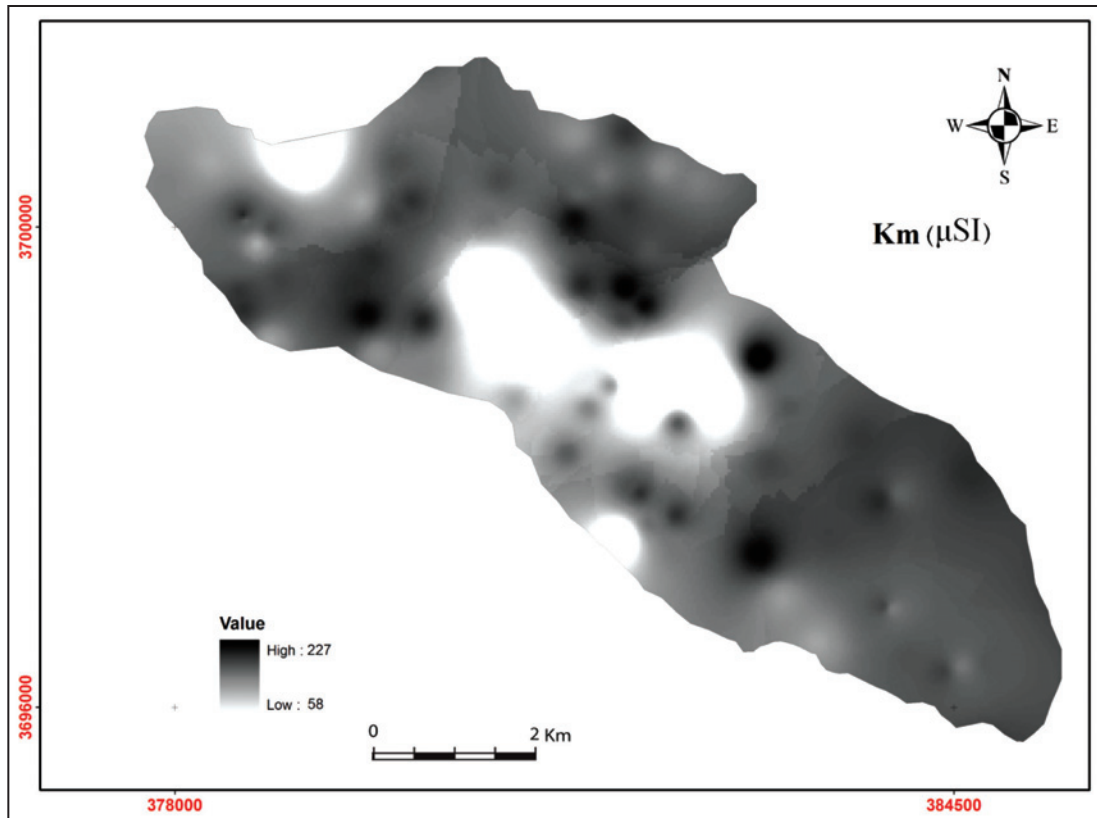
(شکل ۱- ح پیوست). مغزه‌های جهت‌دار به دست آمده، برای برش به کارگاه تهیه مقاطع برده و برش داده می‌شود. از هر مغزه دست کم ۳ نمونه استوانه‌ای جهت‌دار تهیه می‌شود و دست کم ۶ نمونه در هر ایستگاه برای اندازه‌گیری در آزمایشگاه بررسی فابریک‌های مغناطیسی فراهم می‌شود. از ۳ تا ۴ قطعه اول هر مغزه برای مطالعه AMS و از قطعه آخر برای تهیه مقطع نازک در مطالعات سنگ‌نگاری و ریزساختی استفاده می‌شود. پس از برش مغزه‌ها، برای زدودن کلیه ذرات آهن‌داری که احتمالاً در هنگام حفر مغزه توسط مغزه‌گیر بر روی نمونه‌ها برجای مانده است، نمونه‌ها در اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال، به مدت ۲ ساعت نگهداری و اسیدشویی می‌شوند (Bouchez, 1997). نمونه‌ها پس از خشک شدن، آماده اندازه‌گیری توانایی پذیرفتاری مغناطیسی با دستگاه مغناطیس‌سنج می‌شوند (شکل ۱- ط پیوست). در این



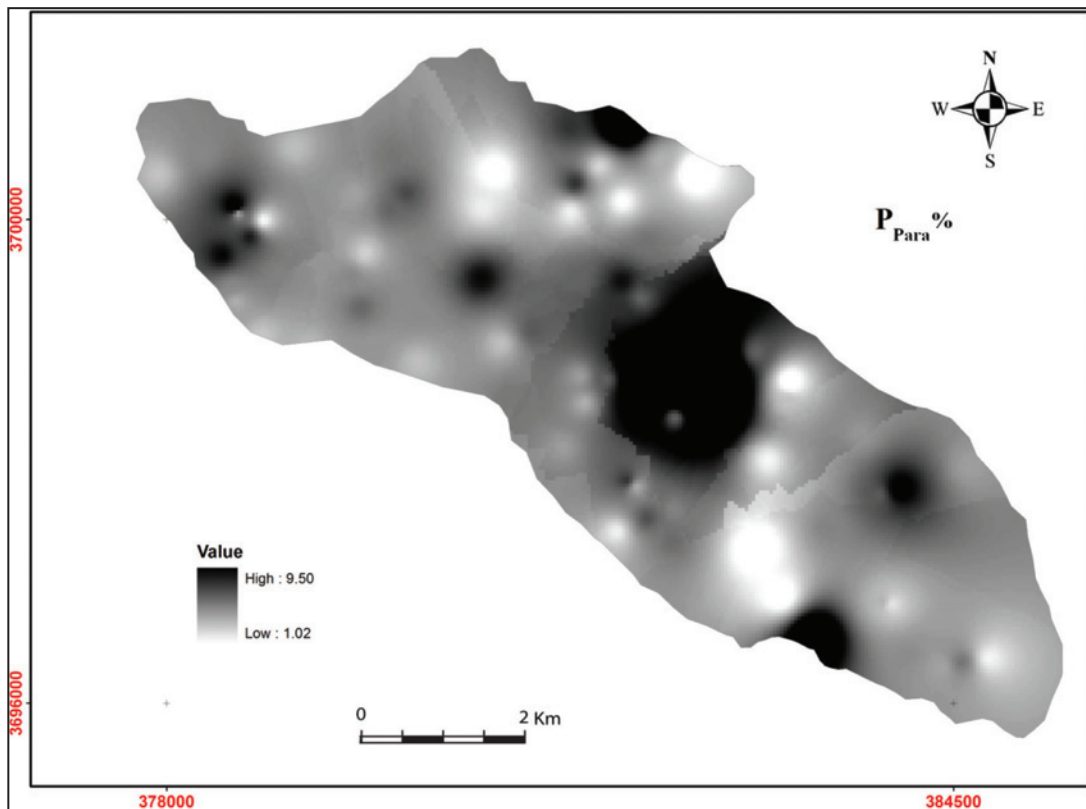
شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه ساده شده پهنه‌های ساختاری ایران (Alavi, 1994); ب) نقشه زمین‌شناسی توده گرانیتویدی گل زرد و هاله دگرگونی مجاورتی پیرامون آن. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری (در مجموع ۷۵ ایستگاه) برای مطالعه فابریک مغناطیسی و ریزساخت‌ها بر روی نقشه نشان داده شده‌اند.



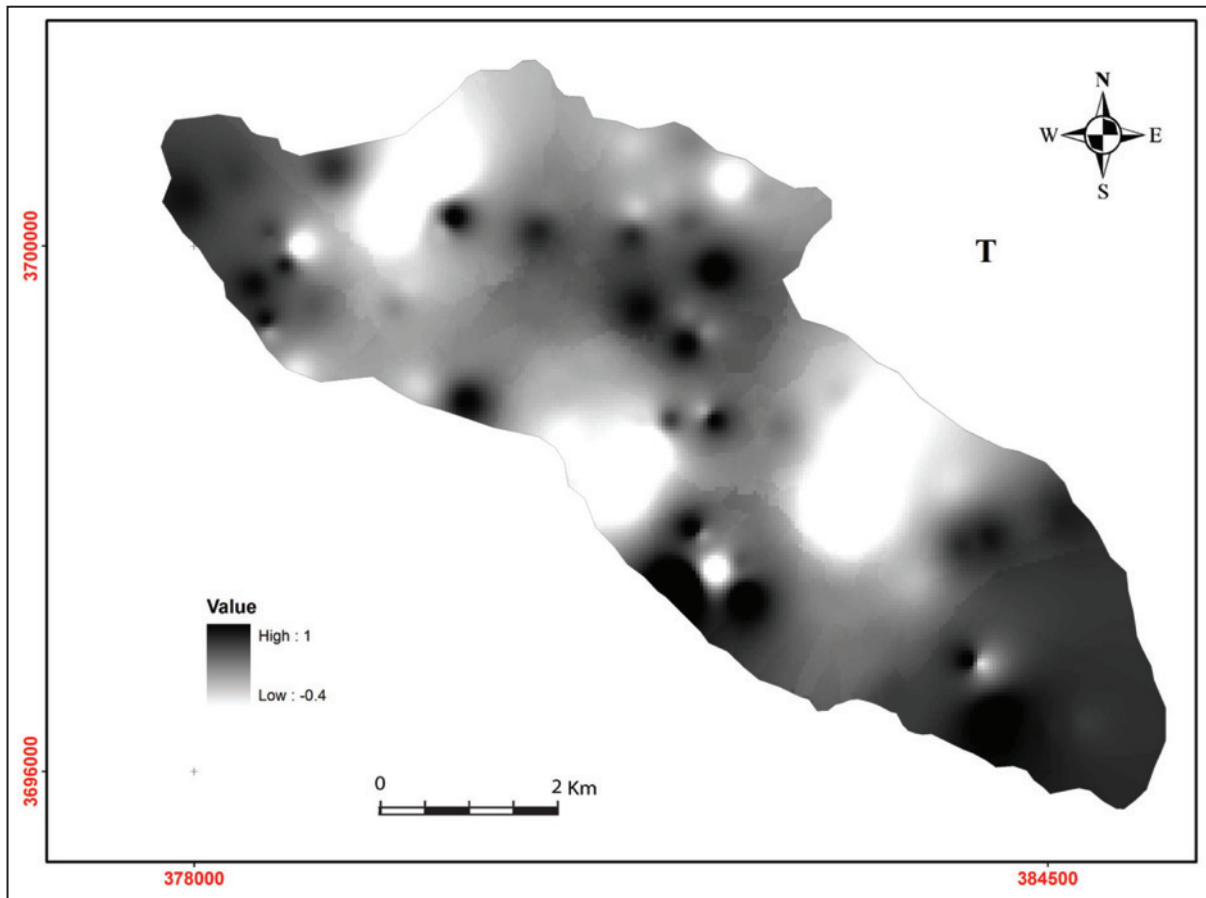
شکل ۲- الف) نمودار فراوانی ترکیبات سنگی سازنده توده گرانیتویدی گل زرد در برابر مقادیر میانگین پذیرفتاری مغناطیسی توانایی مغناطیسی میانگین آنها، Lg: لوکوگرانیت‌ها، Grd: گرانودیوریت‌ها، D: دایک‌های گابرویدیوریتی، ب) نمودار ستونی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در برابر ترکیبات سنگ‌شناسی توده گرانیتویدی گل زرد.



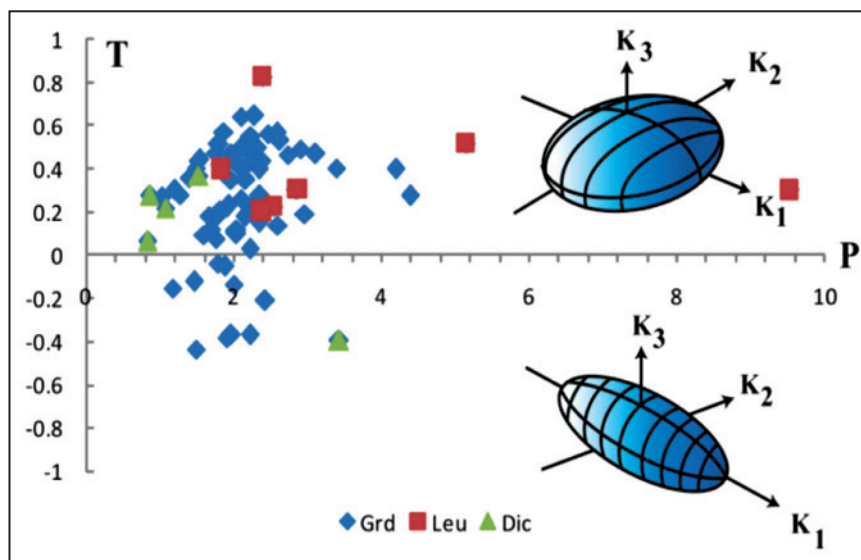
شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (متغیر Km) در توده گرانیتویدی گل‌زرد.



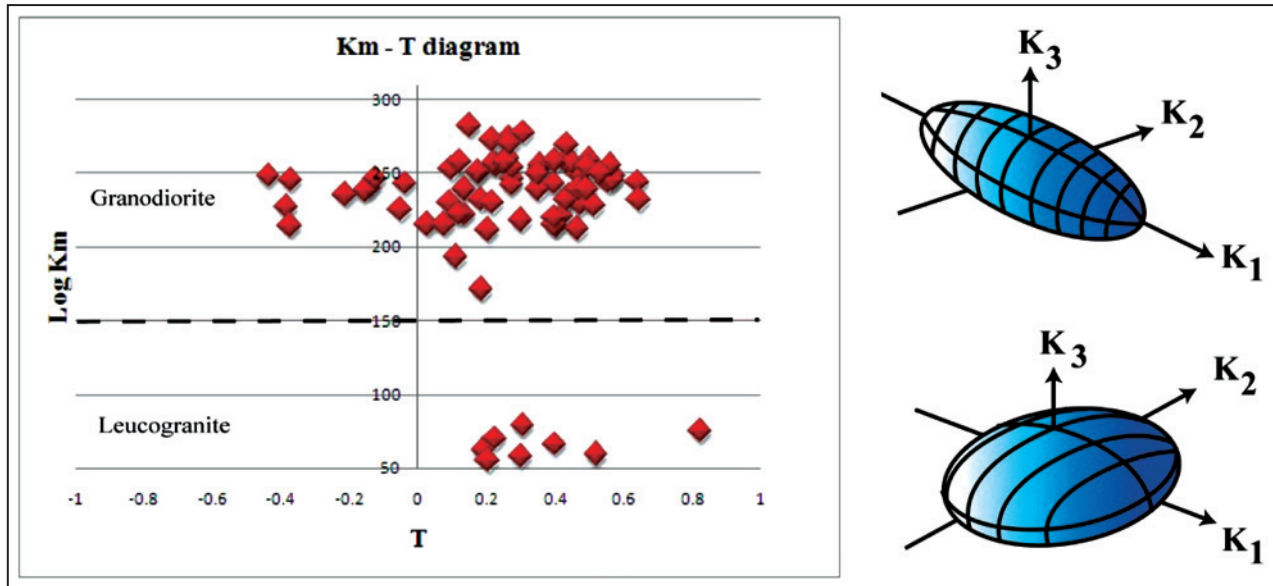
شکل ۴- نقشه تغییرات ناهمسانگردی مغناطیسی در توده گرانیتویدی گل‌زرد.



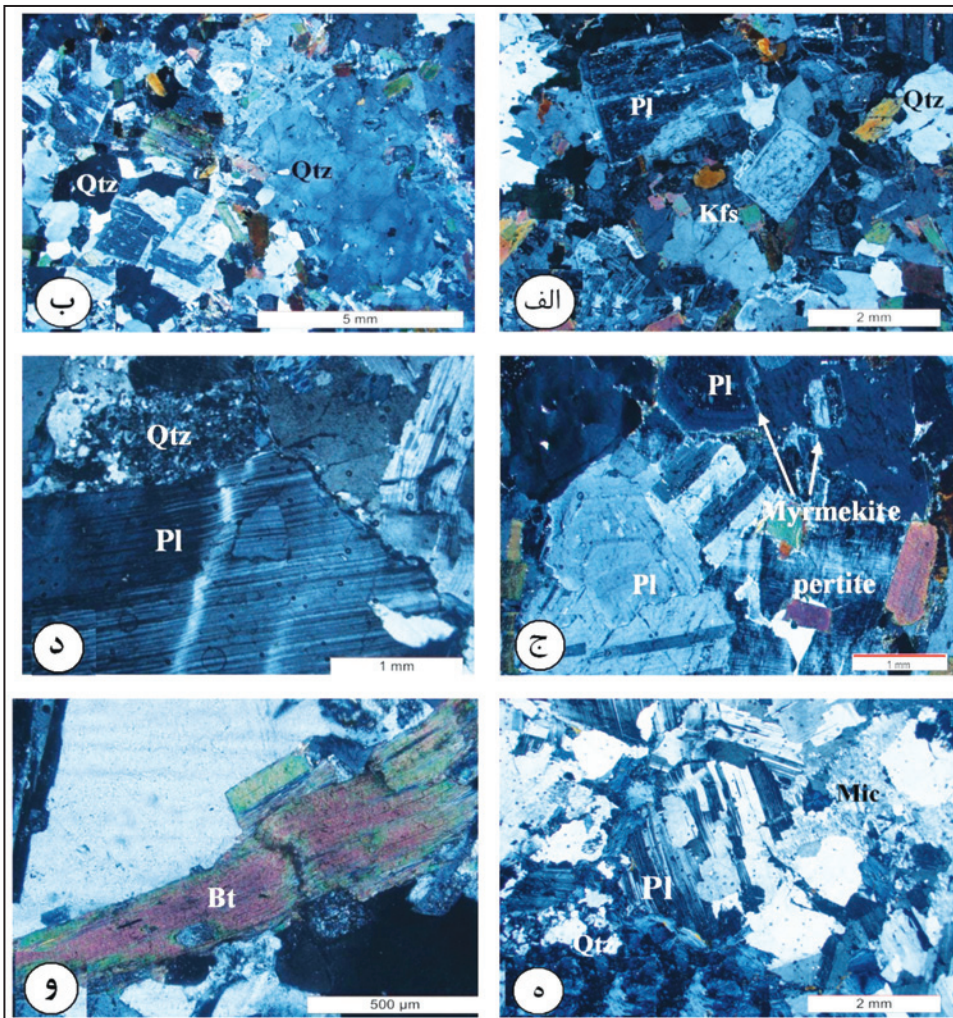
شکل ۵- نقشه تغییرات متغیر شکل T در توده گرانیتوییدی گل‌زرد.



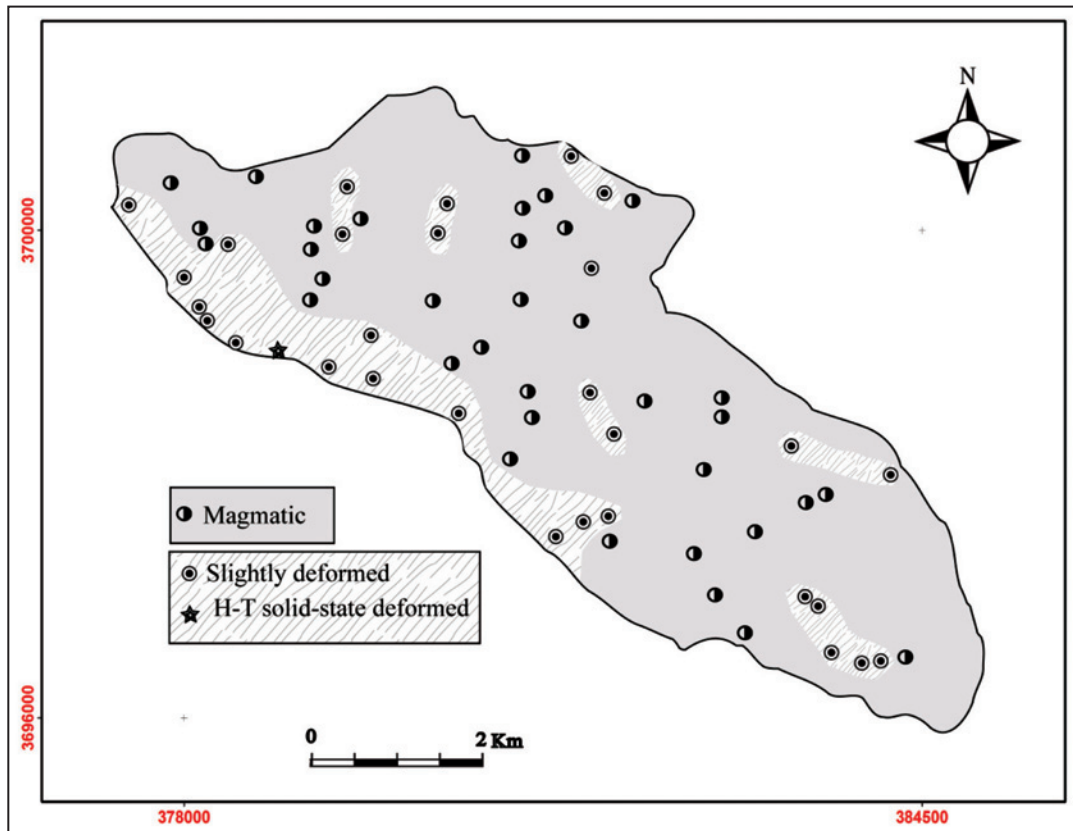
شکل ۶- نمودار درصد ناهمسانگردی مغناطیسی (P) در برابر متغیر شکل (T) برای همه نمونه‌های توده گرانیتوییدی گل‌زرد که نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر بیضوی‌های کلوچه‌ای (Oblate) است، بیضوی‌های دوکی شکل فراوانی کمتری دارند.



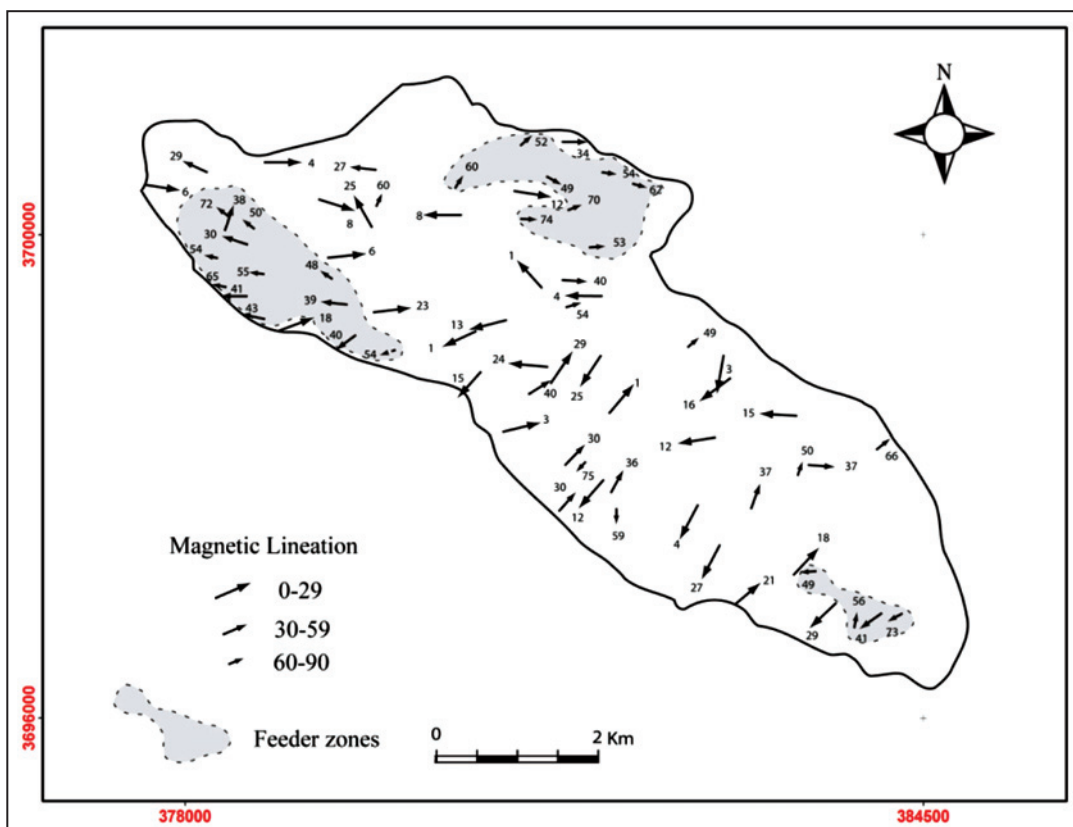
شکل ۷- نمودار تغییرات مقادیر لگاریتمی Km در برابر T. به مرز خط چین جدا کننده گرانودیوریت‌ها از لوکوگرانیت‌ها توجه شود.



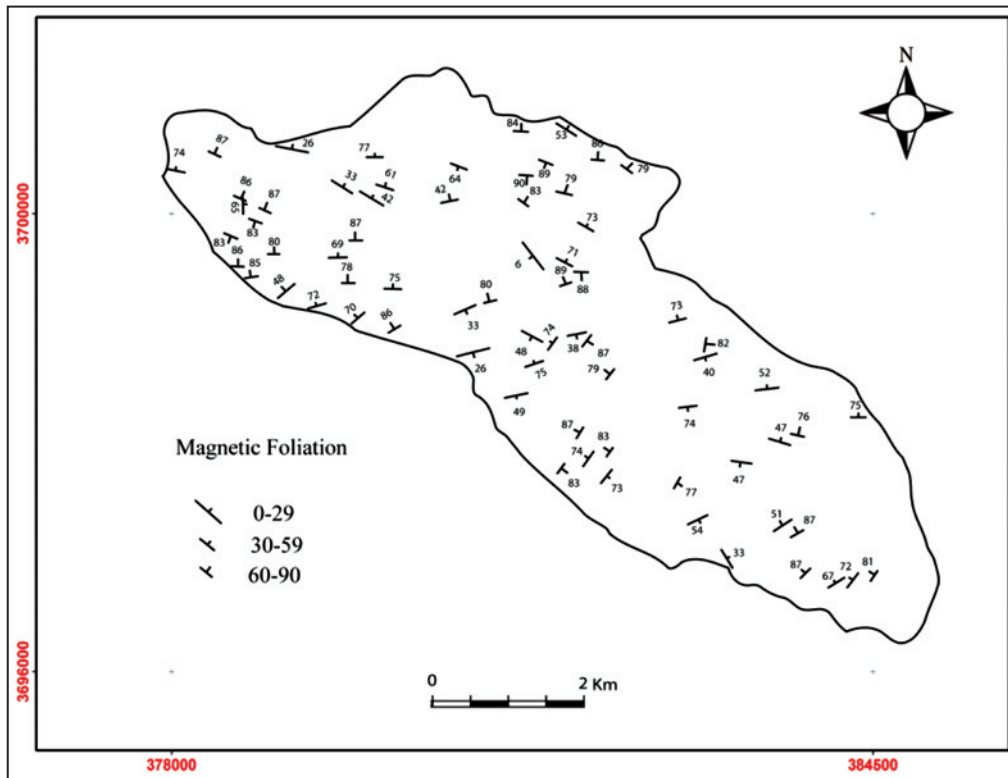
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده ریزساخت‌های دیده‌شده در نقاط مختلف توده گرانیتیویدی گل‌زرد؛ الف) بلورهای تخته‌ای و بدون دگرشکلی پلاژیوکلاز که نشان‌دهنده فابریک ماگمایی هستند؛ ب) کوارتز با خاموشی موحی ضعیف و الگوی صفحه شطرنجی که نشان‌دهنده شروع دگرشکلی حالت جامد در دمای بالاست؛ ج) میرمکیت تولیدشده در حاشیه بلورهای پلاژیوکلاز؛ د) بلور پیچ‌وتاب خورده پلاژیوکلاز با ماکل مکانیکی به همراه تبدیل بلورهای کوارتز به دانه‌های ریزتر (Subgraining)؛ ه) پلاژیوکلازهای کشیده و خمیده با ماکل مکانیکی و تبدیل ارتوز به میکروکلین در اثر تنش‌های تحمیل‌شده بر آن؛ و) بیوتیت پیچ‌وتاب خورده و خمیده (Kininking) که ناشی از دگرشکلی دمای بالاست.



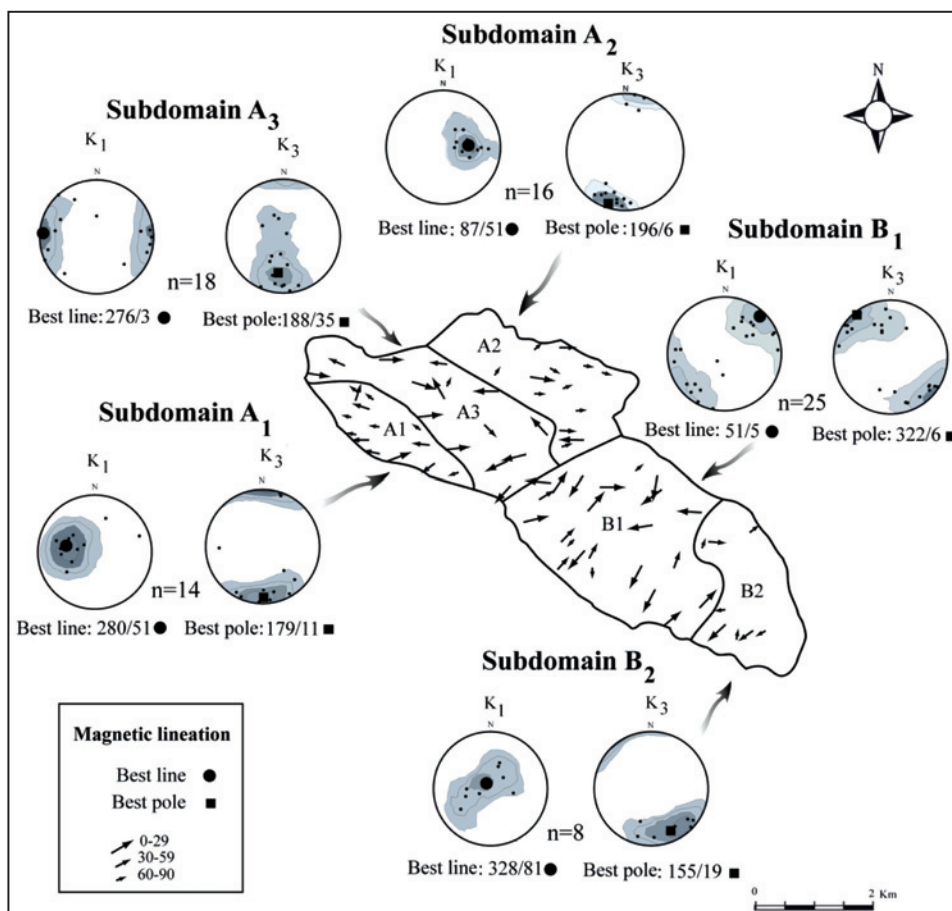
شکل ۹- نقشه پراکنندگی انواع ریزساخت‌های ماگمایی، کمی دگرشکل شده و حالت جامد دمای بالا در توده گرانیتوییدی گل‌زرد



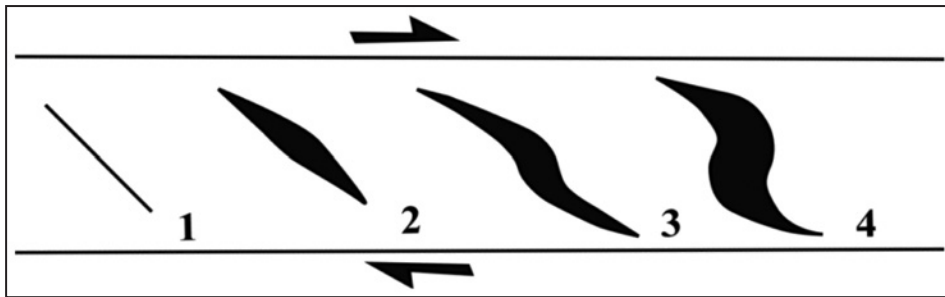
شکل ۱۰- نقشه نشان‌دهنده تغییرات آزموت و میل خطواره‌های مغناطیسی در توده گرانیتوییدی گل‌زرد، محل پهنه‌های تغذیه‌کننده ماگما به صورت خط چین و با رنگ تیره‌تر نشان داده شده است.



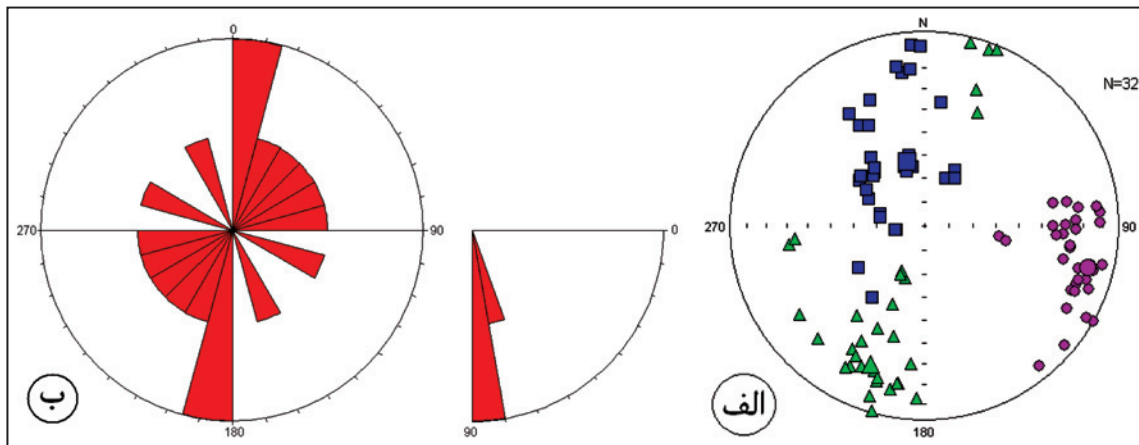
شکل ۱۱- نقشه نشان‌دهنده وضعیت برگ‌واره‌های مغناطیسی در توده گرانیتیوی گل‌زرد.



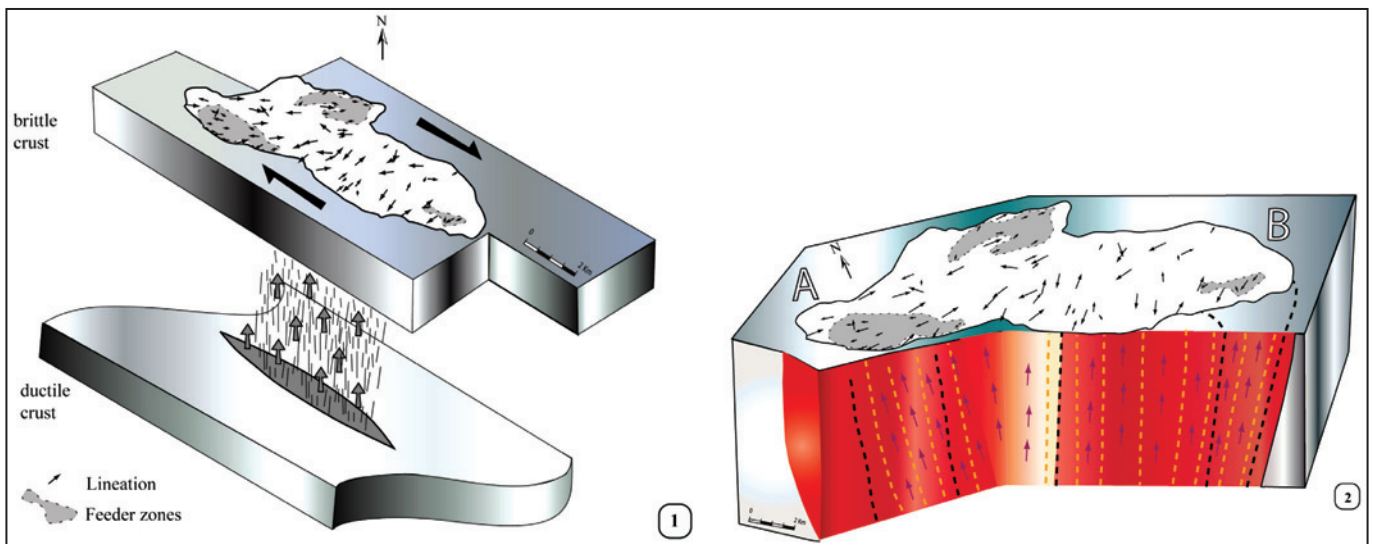
شکل ۱۲- نقشه قلمروها و زیرقلمروهای مغناطیسی توده گرانیتیوی گل‌زرد که بر پایه تفسیر متغیرهای مغناطیسی اندازه‌گیری شده و همچنین با در نظر گرفتن ویژگی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی سنگ‌های سازنده توده نفوذی مورد مطالعه رسم شده است؛ در استریوگرام‌های نشان‌دهنده خط‌واره‌های مغناطیسی (K₁)، موقعیت بهترین میانگین آنها با نشانه مربع نشان داده شده است. در استریوگرام‌های قطب برگ‌واره‌های مغناطیسی (K₃)، موقعیت بهترین میانگین قطب برگ‌واره‌های مغناطیسی با نشانه دایره نشان داده شده است. n تعداد ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در هر قلمرو را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- طرح نمادین و پلکانی از شکاف‌های کششی در پهنه‌های برشی؛ شماره‌های ۱ تا ۴ مراحل پیشرفت این شکاف‌های کششی در پهنه برشی راست‌گرد مورد نظر را نشان می‌دهند (Mohajjel & Fergusson, 2000).



شکل ۱۴- الف) استریوگرام نشان‌دهنده وضعیت K1، K2 و K3 در دایک‌های گابرودیوریتی که بر پایه اندازه‌گیری‌های فابریک مغناطیسی مبتنی است. میانگین خط‌واره‌های مغناطیسی و قطب برگ‌واره‌های مغناطیسی نیز روی این استریوگرام نشان داده شده است. ب) نمودار گل‌سرخ نشان‌دهنده راستای کلی این دایک‌ها که بر پایه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های صحرائی رسم شده است.



شکل ۱۵- مدل نمادین نشان‌دهنده چگونگی جایگیری توده گرانیتوییدی گل‌زرد، تصویر شماره ۱ نمای کلی از نفوذ ماگما در راستای یک فضای کششی و تصویر شماره ۲ نفوذ و جایگیری ماگمای سازنده توده گرانیتوییدی گل‌زرد را در یک فضا یا ساختار دایکی شکل به نمایش می‌گذارد (بدلو، ۱۳۹۰).



شکل ۱- تصاویری از مراحل مختلف برداشت نمونه (مغزه) برای مطالعات AMS و ریزساخت‌ها



شکل ۲- تصویری از بخش‌های مختلف دستگاه Kappabridge و متعلقات همراه آن.

کتابنگاری

بدلو، س.، ۱۳۹۰- بررسی مکانیسم جایگیری توده گرانیتویدی گل زرد (شمال الیگودرز) به وسیله روش AMS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شاهرود، دانشکده علوم زمین، ۱۹۰ صفحه.

References

- Ahmadi Khalaji, A., Esmaily, D., Valizadeh, M. V. & Rahimpour, H., 2007- Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 29: 859-877.
- Alavi, M., 1994- Tectonics of Zagros Orogenic belt of Iran, new data and interpretation. *Tectonophysics* 10:229, p. 211–238.
- Alavi, M., 1994 - “Tectonics of Zagros Orogenic belt of Iran, new data and interpretation”. *Tectonophysics* 10:229, p. 211–238.
- Berberian, M. & King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Can J Earth Sci* 8:210–265.
- Blumenfeld, P. & Bouchez, J. L., 1988- Shear criteria in granite and migmatite deformed in magmatic and solid states. *Journal of Structural Geology* 10: 361–372.
- Bouchez, J. L., 1997- Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies in granitic rocks. In: Bouchez, J. L., Hutton, D.H.W., Stephens, W.E. (Eds.), *Granite: from Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*. Kluwer, Dordrecht, p. 95–112.
- Bouchez, J. L., Gleizes, G., Djouadi, T. & Rochette, P., 1990- Microstructure and magnetic susceptibility applied to emplacement kinematics of granites: the example of the Foix pluton (French Pyrenees). *Tectonophysics*:10, 184, p.157–171.

- Brun, J. P. & Pon, J. P., 1981- Strain patterns of pluton emplacement in crust undergoing non-coaxial deformation”, Sierra Morena, southern Spain. *Journal of Structural Geology* 3:219-229.
- Castro, A., 1985- The Central Extremadura batholith: geotectonic implications (European Hercynian belt). An outline. *Tectonophysics* 120: 57–68.
- Clemens, J. D. & Mawer, C. K., 1992- Granitic magma transport by fracture propagation”. *Tectonophysics* 204: 339–360.
- Cruden, A. R., 1988- Deformation around a rising diapir modeled by creeping flow past a sphere. *Tectonics* 7: 1091–1101.
- Ellwood, B. B., 1978- Flow and emplacement direction determined for selected basaltic bodies using magnetic susceptibility anisotropy measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 41: 254–264.
- Esna-Ashari, A., Tiepolo, M., Valizadeh, M. V., Hassanzadeh, J. & Sepahi, A. A., 2011-a- Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of Aligoodarz granitoid complex Sanandaj-Sirjan Zone, Iran, *Journal of Asian Earth Sciences* 43:11–2.
- Gleizes, G., Nédélec, A., Bouchez, J. L., Autran, A. & Rochette, P., 1993- Magnetic susceptibility of the Mont-Louis-Andorra ilmenite-type granite (Pyrenees): a new tool for the petrographic characterization and regional mapping of zoned granite plutons. *Journal of Geophysics Research* 98: 4317-4331.
- Gregoire, V., de Saint- Blanquat, M., Nedelec, A. & Bouchez, J. L., 1995- Shape anisotropy versus magnetic interactions of magnetite grains: experiments and application to AMS in granitic rocks. *Geophysical Research Letters* 22: 2765-2768.
- Hargraves, R. B., Johnson, D. & Chan, C. Y., 1991- “Distribution anisotropy: the cause of AMS in igneous rocks”, *Geophys, Res, Lett*, 18, 2193-2196.
- Hutton, D. H. W., 1982- A tectonic model for the emplacement of the main Donegal granite, NW Ireland. *Journal of the Geological Society London* 139: 615–631.
- Hutton, D. H. W., Dempster, T. J., Brown, P. E. & Decker, S. D., 1990- “A new mechanism of granite emplacement: intrusion in active extensional shear zones”. *Nature* 343, 452–455.
- Ishihara, S., 1997- The magnetite-series and ilmenite-series granitic rock. *Mining Geology* 27: 293-305.
- Kruhl, J. H., 1996- Prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *Journal of Metamorphic Geology* 14: 581–589.
- Mainprice, D., Bouchez, J. L., Blumenfeld, P. & Tubia, J. M., 1986- Dominant c-slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic plastic softening at high temperatures. *Geology* 14: 819–822.
- Masoudi, F., Yardley, B. W. D. & Cliff, R. A., 2002- Rb-Sr geochronology of pegmatites, plutonic rocks and a hornfels in the region southwest of Arak, Iran. *Islamic Republic of Iran Journal of Sciences* 13, 3, 249-254.
- Mohajjel, M. & Fergusson, L. C., 2000- Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Structural Geology* 22: 1125-1139
- Neves, S. P., Vauchez, A. & Archanjo, C. J., 1995 & 1996- Shear zone controlled magma emplacement or magma-assisted nucleation of shear zones? Insights from northeast Brazil. *Tectonophysics* 262: 349–365.
- Paterson, S. R. & Vernon, R. H., -1995- “Bursting the bubble of ballooning plutons: a return to nested diapirs emplaced by multiple processes”. *Geological Society of American Bulletin* 107, 1356–1380.
- Paterson, S. R., Fowler, J. T. K., Schmidt, K. L., Yoshinobu, A. S., Yuan, E. S. & Miller, R. B., 1998- “Interpreting magmatic fabric patterns in plutons”. *Lithos* 44: 53–82.
- Paterson, S. R., Vernon, R. H. & Toshiba, O. T., 1989- “A review for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids”, *J. of Structural Geology* II(3), pp. 349- 363.
- Rochette, P., 1987- Magnetic susceptibility of the rock matrix related to magnetic fabric studies. *Journal of Structural Geology* 9: 1015-1020.
- Rosenberg, C. L., 2004- Shear zones and magma ascent: a model based on a review of the Tertiary magmatism in the Alps. *Tectonics* 23, TC3002. doi:10.1029/2003TC001526, 2004.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A. A., Shang, C. K. & Vousoghi Abedini, M., 2010- Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): New evidence for Jurassic magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences* 39: 668-683.
- Stephenson, A., 1994- Distribution Anisotropy: two simple for magnetic lineation and foliation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 82: 49-53.
- Tarling, D. H. & Hrouda, F., 1993- The magnetic Anisotropy of rocks. Chapman & Hall, London. pp.217.
- Tikoff, B. & Teyssier, C., 1994- Strain modelling of displacement-field partitioning in transpressional orogens. *Journal of Structural Geology* 16: 1575-1588.
- Tribe, I. R. & D’Lemos, R. S., 1996- Significance of a hiatus in down-temperature fabric development within syntectonic quartz diorite complexes, Channel Islands, UK. *Journal of the Geological Society (London)* 153, 1: 127–138.
- Vernon, R. H., 2004- A practical guide to Rock Microstructure, Cambridge University Press, 594 P.

The Emplacement Mechanism of the Gol-e-Zard Granodiorite Pluton, North of Aligoudarz, West of Iran, by Using of AMS Method

M. Sadeghian ^{1*}, M. Sheibi ¹ & S. Badallo ²

¹ Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² M. Sc., Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2012 January 30

Accepted: 2012 September 11

Abstract

The Gol-e-Zard granitoidic pluton with an age of $\sim 165 \pm 5$ Ma is located in the north of Aligoudarz city, Lorestan province, in the Sanandaj-Sirjan structural zone. The pluton intruded into the late Triassic-early Jurassic slates, phyllites and micaschists. The granodiorites, dominant rock types of the pluton, are cut by the leucogranites, aplitic veins, pegmatites and gabbro-dioritic dykes. The S-type nature of the Gol-e-Zard granite is evidenced by the presence of metaplitic enclaves (surmicaceous and andalusite-sillimanite hornfels), silica enclaves, andalusite and garnet xenocrysts and silica veins relicts. The anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) method was used to investigate the mode of emplacement. The total numbers of 868 oriented core samples were analyzed for magnetic susceptibility. The obtained mean susceptibility (K_m) in μSI was 227, 57 and 585 for granodiorites, leucogranites and gabbrodiorite dykes, respectively. The low K_m values ($< 500 \mu SI$) is characteristics of biotite bearing granites (paramagnetic granite), which biotite is the main carrier of magnetic property of the rock. The leucogranites have the lowest K_m due to the low concentration of biotites in these rocks. The main identified microstructural types of the studied pluton are magmatic, moderately deformed, and solid-state deformed at high temperature, which among magmatic type is predominant. The various magnetic data (magnetic lineation and foliation maps, K_m , $P\%$ and T parameters) complemented by the field and microstructural observations revealed that the pluton originated from the identified feeder zones in an extensional space related to the dextral shear zone. We assumed that the succession of intrusion began with the granodiorites as a large dyke structure, succeeded by the leucogranites as small body (apophyse) and cutting veins. The intrusion ended by mafic to intermediate dykes along the secondary fracturing occurred after the pluton emplacement.

Keywords: Anisotropy of Magnetic Susceptibility, AMS Method, Granitoidic pluton, S- Type Granite, Gol-e-Zard, Aligoudarz, Iran
For Persian Version see pages 129 to 142

*Corresponding author: M. Sadeghian; E-mail: m.sadeghian1386@yahoo.com