



## کاربرد روش ناهمسانگردی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) جهت ارزیابی درجه و نوع دگرسانی در توده گرانیتوئیدی چالو (جنوب دامغان)

مریم شیبی<sup>۱\*</sup> و پروین مجیدی<sup>۲</sup>

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۴

\* نویسنده مسئول مکاتبات: sheibi58@gmail.com

### چکیده

توده گرانیتوئیدی چالو، در جنوب شرق شهرستان دامغان و در شمالی ترین بخش پهنه ساختاری ایران مرکزی واقع شده است. تزریق این توده نفوذی به درون سنگ های آتش فشانی و آتش فشانی- رسوبی و سیال های گرمایی حاصل از آن ها، باعث ایجاد فرایندهای دگرسانی و کانه زایی شده است. در مجموع دو فاز دگرسانی پروپلیتی و آرژیلیتی در این توده قابل شناسایی است. قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (Km) در نمونه های سالم و انواع دگرسان شده توده گرانیتوئیدی چالو با استفاده از روش فابریک مغناطیسی اندازه گیری شده است. پذیرفتاری مغناطیسی میانگین اندازه گیری شده برای مونزودیوریت ها و کوارتز دیوریت های سالم، به ترتیب  $3410 \pm 28872 \mu SI$  و  $3916 \pm 21487 \mu SI$  است. گردش سیالات گرمایی از میان توده نفوذی باعث ایجاد تغییرات مهم کانی شناسی شده و خواص مغناطیسی اصلی توده را تغییر داده است؛ به گونه ای که میانگین پذیرفتاری مغناطیسی (Km) در نمونه های دارای دگرسانی پروپلیتی و آرژیلیتی در دو واحد سنگی سازنده این توده به ترتیب  $988 \pm 25117 \mu SI$  و  $1577 \pm 6262 \mu SI$  کاهش یافته است. ماهیت انواع کانی های کدر موجود در این توده نفوذی نیز بر اساس منحنی های ترمومغناطیسی (تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی با دما) تعیین شده است. این یافته ها نشان می دهند که چگونه میزان بزرگای پذیرفتاری مغناطیسی، همگام با پیشرفت مراحل مختلف دگرسانی گرمایی به علت حذف یا کاهش در اندازه منیتیت و یا تبدیل آن به کانی های مغناطیسی دیگر نظیر هماتیت (فرومغناطیس) و یا پیریت (پارامغناطیس) کاهش می یابد؛ بنابراین به نظر می رسد روش ناهمسانگردی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) علاوه بر آشکارسازی الگوی درونی توده های نفوذی و پی بردن به ساز و کار جای گیری آن ها می تواند موجب به کمیت در آوردن شدت و نوع دگرسانی های مختلف در داخل آن ها شده و الگوی مناسبی برای اکتشاف و شناسایی مسیر سیالات گرمایی شود.

### واژگان کلیدی

قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی  
دگرسانی گرمایی  
گرانیتوئید  
چالو  
دامغان

## ۱- مقدمه

برای پی بردن به منشأ و چگونگی تشکیل کانسارهای حاصل از توده‌های نفوذی، بررسی وضعیت هندسی و نوع ماده معدنی، سنگ‌های آذرین همراه و دگرسانی (های) مرتبط با کانه‌زایی در آنها ضروری به نظر می‌رسد. فرایندهای زمین‌شناسی به ویژه دگرسانی گرمایی، ماهیت مغناطیسی بسیاری از کانی‌ها را تغییر می‌دهند. برخی از این واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده شامل نهشت یا انحلال عناصر متحرک، آبیگری یا آب‌زدایی کانی‌ها و فرایندهای اکسیداسیون یا احیا است. به عنوان مثال کانی فرومغناطیسی نظیر منیتیت که در طی فرایند دگرسانی پتاسیک به وجود می‌آید؛ در طی دگرسانی سدی-کلسیک تخریب و یا به طور کامل حذف شده و یا در حین دگرسانی پروپیلیتی، به کانی دیگری نظیر پیریت تبدیل می‌شود؛ بنابراین یافتن روشی سریع برای ارزیابی شدت و نوع دگرسانی سودمند است. در این پژوهش از روش ناهمسانگردی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) که تا پیش از این صرفاً به منظور تعیین ساز و کار جای‌گیری توده‌های نفوذی انجام می‌شد، استفاده شده است. مطالعاتی از این قبیل در سایر نقاط دنیا مرسوم بوده و همچنان رو به پیشرفت است. اولین بار Jerome (1966) و Brant (1966) تلاش کردند تا با بررسی الگوهای مغناطیسی در ۳۴ نهشته مس و مولیبدن پورفیری در جنوب غرب آمریکا مدلی اکتشافی برای این نوع کانسارها ارائه نمایند. Clark (2014) تأثیرات دگرسانی گرمایی بر روی کانی منیتیت در سیستم‌های مس پورفیری و سیستم‌های طلا-مس و اکسید آهن (IOCG) را با استفاده از روش‌های پالئومغناطیسی و تغییرات میدان مغناطیسی با دما مرور کرده و با استفاده از این روش‌ها، مدل‌های اکتشافی مغناطیسی را برای یافتن این دو نوع نهشته پیشنهاد می‌نماید. ایشان در این راستا از تلفیق اصول پترولوژی و داده‌های پتروفیزیکی و همچنین مدل‌سازی ماهیت مغناطیسی مشاهده شده در این کانسارها استفاده نموده است.

قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (K) میزان مغناطیسی شدن مواد (کانی‌ها) در میدان القایی ضعیفی مشابه با میدان مغناطیسی زمین است؛ که به صورت نسبت مغناطیس شدگی القایی (M) به میدان مغناطیسی به کار رفته (H) تعریف می‌شود ( $K=H/M$ ). کانی‌های مختلف در میدان مغناطیسی، رفتار مغناطیسی مختلفی نشان می‌دهند و بر اساس میزان پذیرفتاری مغناطیسی به سه گروه عمده دیامغناطیس (کوارتز، فلدسپار)، پارامغناطیس (نظیر بیوتیت و آمفیبول) و فرومغناطیس (منیتیت و گاهی پیروتیت) طبقه‌بندی می‌شوند. در این پژوهش نشان داده می‌شود که چگونه می‌توان با تلفیق مطالعات دقیق صحرایی، شواهد پتروگرافی و فابریک‌های مغناطیسی در سنگ‌های نفوذی چالو (جنوب دامغان)، کانی‌های

فرومغناطیسی اولیه و ثانویه که در طی دگرسانی‌های مختلف توده نفوذی تشکیل و یا محو می‌شوند؛ را تشخیص داده و از بزرگای پذیرفتاری مغناطیسی به دست آمده در شناسایی پهنه‌های دگرسانی و تشخیص محل مساعد یا جایگاه بدنه اصلی ذخایر معدنی کمک گرفت. همچنین ماهیت دقیق کانی‌های مغناطیسی در سنگ‌ها با استفاده از منحنی‌های ترمومغناطیسی (تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی با دما) آن‌ها تعیین شده است.

## ۲- روش تحقیق

به منظور بررسی کاربرد روش فابریک مغناطیسی در شناسایی پهنه‌های دگرسانی و تشخیص محل ذخایر معدنی، از نتایج حاصل از مطالعه AMS در توده گرانیتوئیدی چالو کمک گرفته شده است. برای نیل به این اهداف، کل توده گرانیتوئیدی چالو مورد پیمایش صحرایی قرار گرفته و بر اساس نمونه‌برداری سیستماتیک در ۳۲ ایستگاه، از سنگ‌های سالم و انواع دگرسان شده، حفاری انجام شد و در مجموع ۹۶ مغزه (به طور متوسط ۳ مغزه از هر ایستگاه) در جهت‌های مشخص برداشت شده است. پس از برش مغزه‌ها به تعداد چهار زیر نمونه از هر مغزه، ۳۸۴ نمونه قابل آزمایش در اندازه‌های ۲۲ میلی‌متری تهیه شده است. بزرگای ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی هرکدام از آن‌ها در سه جهت خاص با دستگاه حساسیت‌سنج مغناطیسی مدل MFK1-FA ساخت شرکت آجیکو (AGICO) در آزمایشگاه ژئومغناطیس دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از این مطالعات در جدول ۱ آمده است.

به منظور مطالعات پتروگرافی، ۳۲ مقطع نازک از ایستگاه‌های مختلف تهیه شده است. همچنین برای تشخیص کانی‌های دارای قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی و بررسی تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی کانی‌ها با دما، تعدادی از نمونه‌های مورد مطالعه با هاون سنگی پودر شده و در کوره CS-2 که به دستگاه کاپابریج متصل است، بین ۲۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس سرد شده است. تعداد ۱۱ نمونه در آزمایشگاه دیرینه مغناطیسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به این روش آنالیز شده‌اند. نرخ گرم شدن در این آزمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه بوده است. به دلیل ثبت تعداد بالای مقادیر K اندازه‌گیری شده در دماهای متفاوت، داده‌های حاصل به صورت نمودارهای ترمومغناطیسی ترسیم شده و از ارائه جدول پرهیز شده است. در ادامه به بحث و بررسی و نتایج حاصل از پردازش آن‌ها خواهیم پرداخت.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۱، ۱۳۹۶.

جدول ۱: داده‌های حاصل از مطالعات فابریک مغناطیسی در توده گرانیتوئیدی چالو؛ شماره ایستگاه‌ها بر حسب نوع واحد سنگی و همچنین میزان دگرسانی مرتب شده است.

Km	Y	X	Sample*	Site
<b>Monzodiorites</b>				
58970	3916304	280790	F	Chp17
45919	3917008	280708	F	Chp9
42030	3916535	281069	F	Chp6
36668	3916230	280899	F	Chp16
35610	3916115	281140	F	Chp4
33272	3916598	280939	F	Chp12
31864	3916858	280999	PA	Chp10
29639	3915473	281753	PA	Chp1
28129	3916716	281092	PA	Chp7
28129	3915760	281517	PA	Chp2
27292	3916152	281081	PA	Chp13
26900	3916003	281279	PA	Chp3
24643	3916129	281029	PA	Chp14
23108	3916903	280816	PA	Chp8
11255	3916309	281149	A	Chp5
7082	3916156	280923	A	Chp15
325	3917249	280992	A	Chp11
<b>Quartz diorites</b>				
45437	3915670	280862	F	Chp19
41055	3915777	281042	F	Chp18
38866	3915729	280527	F	Chp22
36802	3915963	280333	F	Chp24
35797	3915689	280909	F	Chp20
18200	3915527	280416	F	Chp27
24037	3915664	280667	PA	Chp21
23677	3915759	280098	PA	Chp30
20603	3915905	280160	PA	Chp23
13012	3915563	280679	A	Chp25
11394	3915999	280251	A	Chp31
4797	3915643	280129	A	Chp29
4292	3915536	280162	A	Chp28
4018	3915669	280516	A	Chp26
318	3915677	280644	A	Chp32

(X و Y): طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها؛ (Km): پذیرفتاری مغناطیسی میانگین بر حسب  $\mu\text{SI}$ .

\* (A و PA, F): به ترتیب معرف نمونه‌های سالم، سنگ‌های حاصل از دگرسانی پروپلیتی و آرزیلیتی است.

### ۳- اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

توده گرانیتوئیدی چالو در شمالی‌ترین بخش پهنه ایران مرکزی (آقناباتی، ۱۳۸۳) و در محدوده نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان واقع شده است. این توده نفوذی از دو واحد مونزودیوریت و کوارتزودیوریت تشکیل شده که به درون سنگ‌های آتشفشانی ائوسن تزریق شده است (شکل ۱). این سنگ‌ها در صحرا دارای بافت‌های پورفیروئیدی و

تراکیتوئیدی بوده و از کانی‌های پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، بیوتیت، آمفیبول و پیروکسن تشکیل شده است. همچنین از نظر ژئوشیمیایی از نوع کالک‌آلکان بوده و دارای ماهیت متالومین متعلق به گرانیتوئیدهای نوع I قوس‌های آتشفشانی است (خواجehزاده، ۱۳۸۸). ساز و کار جای‌گیری این توده با استفاده از روش ناهمگنی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) مورد مطالعه قرار گرفته است (شیمی

جنوب شرق واحد مونزودیوریتی مشاهده شده و در مجاورت با سنگ‌های داسیتی و آندزیت‌ها به حداکثر می‌رسد (شکل ۱، ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳). این سنگ‌ها در نمونه دستی سبز رنگ بوده و رگه و رگچه‌های کربناته در آن نمایان است. اپیدوت که مهم‌ترین کانی مشخصه در سنگ‌های دگرسان شده پروپیلیتی است یا جانشین بلورهای پلاژیوکلاز و بیوتیت شده و یا به صورت تجمعات بزرگ در زمینه سنگ پراکنده است.

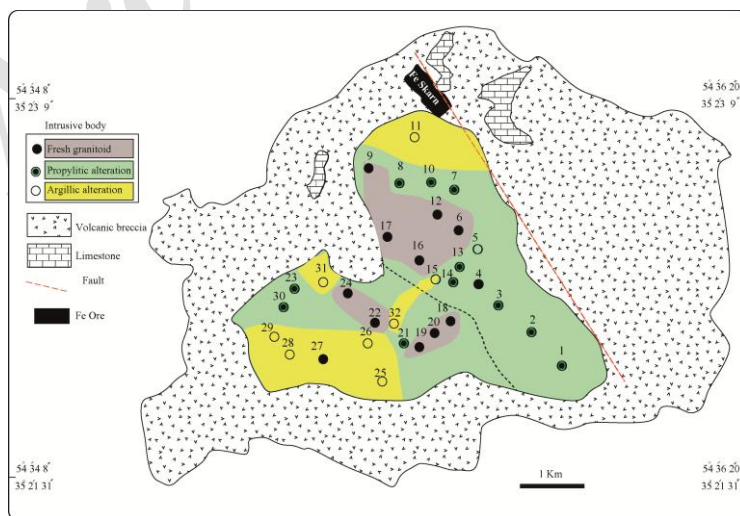
همچنین برخی از بیوتیت‌ها به کلریت (شکل ۲-ب) و پیروکسن‌ها نیز به اکتینولیت تبدیل شده و پدیده اورالیتی شدن را به نمایش می‌گذارند (شکل ۲-پ). منیتیت در نمونه‌های سالم این واحد به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده و در داخل کانی‌های مافیک و یا زمینه اصلی سنگ پراکنده است؛ در حالی که در نمونه‌های حاصل از این دگرسانی به طور کامل یا بخشی جانشین کانی‌های فرومنیزیمی از قبل موجود نظیر پیروکسن، آمفیبول و بیوتیت شده است.

فاز دوم دگرسانی، به صورت محلی و در حضور پهنه‌های گسلی به صورت دگرسانی نوع آرژیلیکی مشاهده می‌شود. بیشتر فلدسپارها در اثر این نوع دگرسانی به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (شکل ۲-ت). از نظر شیمیایی، این نوع دگرسانی که در شرایط اسیدیته نسبتاً بالا و وجود حجم زیادی از آب در محیط تشکیل می‌شود (Titley and Beane, 1981) در بعضی مقاطع بسیار شدید و با حذف منیتیت همراه بوده است (شکل ۲-ث). همچنین در زیر میکروسکوپ، اکسیداسیون منیتیت به همتایت به صورت جانشینی منطقه‌ای با هسته‌هایی از منیتیت باقیمانده قابل مشاهده است (شکل ۲-ج). در شکل ۱ ایستگاه‌های سالم و دگرسان شده (انواع پروپیلیتی و آرژیلیکی) با علائم مشخص و پهنه‌بندی ناشی از دگرسانی با رنگ‌های متفاوتی از یکدیگر متمایز شده‌اند.

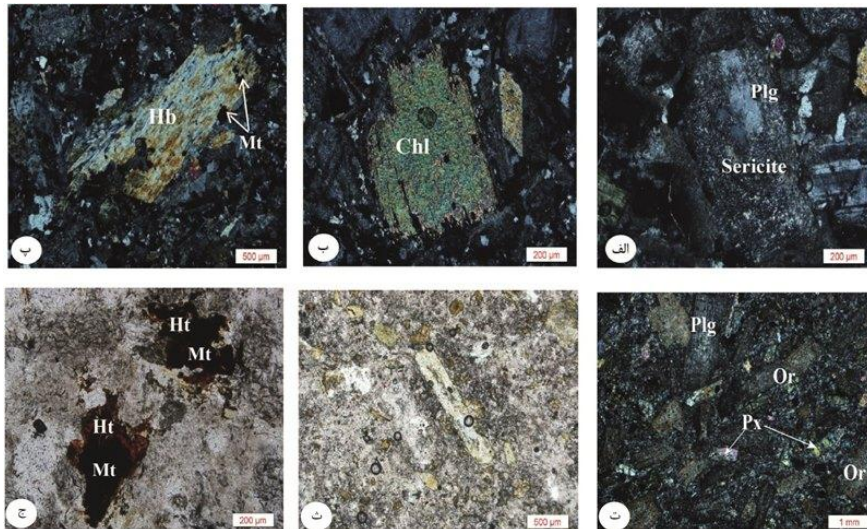
و مجیدی، ۱۳۹۴). بر اساس این مطالعه مشخص شد که واحد مونزودیوریتی با بافت غالب پورفیروئیدی و الگوهای خطوارگی و برگوارگی شمالی-جنوبی موازی با حاشیه توده در امتداد بازشدگی‌های کششی یک زون برشی راست‌الغز جای‌گیری و واحد کوارتزدیوریتی همزمان یا اندکی بعد از واحد مونزودیوریتی به صورت دایک جای‌گیری نموده است. سهیلی و همکاران (۱۳۷۹) اظهار می‌دارند که کانسار همراه با این توده‌ها دارای رگه‌های سیلیسی-گرمایی طلادار همراه با کانی‌سازی مس بوده و نهشت این رگه‌ها از روند شکستگی‌های اصلی موجود (شرقی-غربی) تبعیت نموده است.

همچنین در امتداد گسل شرقی-غربی چالو که نهشته‌های دگرگونی پالئوزوئیک را از واحدهای سنگی ائوسن جدا می‌کند، کانی‌سازی آهن به صورت اسکارن تشکیل شده است (کی‌نژاد، ۱۳۸۷). شیبی (۱۳۹۵) کانی‌زایی و سنگ‌زایی اسکارن آهن چالو را مطالعه نموده است. کانی‌زایی آهن موجود در همبری توده‌های نفوذی منطقه و در امتداد یک گسل شمال غربی-جنوب شرقی به صورت عدسی‌های جداگانه‌ای از همتایت و اولیژیست به همراه مقادیر اندکی مس پدیدار شده است (شکل ۱).

شواهد پتروگرافی و صحرایی نشان می‌دهد که محلول‌های گرمایی از طریق درز و شکاف‌های فراوانی که به واسطه تکتونیک شدید در منطقه حادث گردیده، باعث دگرسانی سنگ‌های نفوذی موجود شده است. به طور کلی در توده گرانیتوئیدی چالو، دو فاز دگرسانی گرمایی متفاوت رخ داده است؛ که با مجموعه کانی‌شناسی خاص خود از یکدیگر متمایز می‌شوند. دگرسانی پروپیلیتی که فاز اول دگرسانی شناخته شده در این توده نفوذی است؛ با مجموعه کانی‌های اپیدوت، کلریت و به مقدار کمتر سرسیت (شکل ۲-الف) و کربنات شناسایی می‌شود. این دگرسانی غالباً در بخش‌های شرقی و



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده تهیه شده از توده گرانیتوئیدی چالو و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده (در مجموع ۳۲ ایستگاه) برای مطالعات فابریک مغناطیسی. محدوده تقریبی ایستگاه‌های سالم و انواع دگرسان شده با رنگ‌های مختلف از یکدیگر متمایز شده‌اند.



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های دگرسان شده در توده گرانیتوئیدی چالو. الف، ب و پ) به ترتیب سرسیتی شدن پلاژیوکلاز، کلریتی شدن بیوتیت و اورالیتی شدن پیروکسن را در دگرسانی نوع پروپیلیتی نشان می‌دهند. (ت) نمایی از تبدیل پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی؛ (ث) عدم حضور منیتیت در دگرسانی نوع آرژیلیتی؛ (ج) اکسیداسیون منیتیت به همتایت به صورت جانشینی منطقه‌ای. هسته‌هایی از منیتیت باقیمانده است.

شدت و نوع دگرسانی، در توده چالو با جزئیات بیشتری بررسی می‌شود. این مطالعات شامل ویژگی‌های کانی‌شناسی و ماهیت پذیرفتاری مغناطیسی کانی‌های کدر در نمونه‌های سنگی سالم و همچنین نمونه‌های متأثر از دگرسانی‌های پروپیلیتی و آرژیلیکی می‌باشند.

#### الف) نمونه‌های سالم

از دیدگاه فابریک مغناطیسی سنگ‌هایی که از دسترس سیالات دگرسانی به دور مانده و یا علی‌رغم حضور دگرسانی در توده نفوذی، هیچ تغییری در خواص مغناطیسی آن‌ها ایجاد نشده باشد را نمونه‌های سالم می‌خوانند (Traineau and Genter, 1991). در چنین نمونه‌هایی هیچ شاهدهی از اکسیداسیون منیتیت مشاهده نشده و این کانی معمولاً همراه با بیوتیت یافت می‌شود (شکل‌های ۳-الف تا ۱-۴). محتوای منیتیت اولیه به وسیله فاکتورهای متفاوتی از جمله، مقدار آهن، تیتانیم، منیزیم و مقدار فوگاسیته اکسیژن در طی سرد شدن ماگما کنترل می‌شود (Frost, 1991; Grant, 1985). کانی منیتیت در نمونه‌های سالم، به صورت همگن، خود شکل یا نیمه شکل‌دار حضور داشته و در اندازه‌های ۱۰ تا ۸۰ میکرومتر و یکسری ذرات کوچک با اندازه ۵ میکرومتر مشاهده می‌شوند. در برخی از مقاطع حضور منیتیت به صورت تجمعات خوشه‌ای (چند حوزه) (شکل ۳-الف) باعث افزایش در مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی شده است (ایستگاه ۱۷ و ۹). میانگین پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده در سیستم استاندارد SI برای کل مونوزودیوریت‌ها  $21487 \pm 3916 \times 10^{-6}$  و کوارتزیدیوریت‌ها  $28872 \pm 3410 \times 10^{-6}$  است. میانگین پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های سالم در کل توده (حاوی منیتیت اولیه ماگمایی)  $SI \times 10^{-6} \pm 2750 \pm 39052$  است

#### ۳-۱- پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km)

این پارامتر از کاربردی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای مغناطیسی است و مبین وجود درصد فراوانی کانی‌های دارای خواص مغناطیسی است. واحد اندازه‌گیری آن SI یا  $\mu SI$  است و در حین اندازه‌گیری پارامترهای فابریک مغناطیسی به دست می‌آید  $(Km = (K_1 + K_2 + K_3) / 3)$ . چگونگی پاسخ مغناطیسی یا پذیرفتاری مغناطیسی، به عوامل متفاوتی از جمله تمرکز و غلظت کانی‌های مغناطیسی، اندازه کانی‌ها، ترکیب شیمیایی و نیز ساختارهای ویژه‌ای مانند تنش‌های داخلی و نقص در شبکه بلوری بستگی دارد (Dunlop and Ozdemir, 1997). بررسی‌ها نشان می‌دهد بافت و اندازه هر یک از ذرات مغناطیسی در مقادیر پذیرفتاری مؤثر است. به طوری که ذرات مغناطیسی به صورت تجمعات بزرگ و خوشه مانند (چند حوزه) در صورت جهت‌یابی مطلوب و یکنواخت هر یک از ذرات مغناطیسی در حوزه‌های مغناطیسی، پذیرفتاری مغناطیسی بالاتری از ذرات منفرد (تک حوزه، قطر کمتر از  $10^{-5}$  تا  $10^{-6}$  سانتی‌متر) دارند (Kittel, 1983)؛ زیرا خاصیت مغناطیسی آن‌ها به وسیله مجموعه‌ای از دامنه‌های مغناطیسی کنترل می‌شود. این تغییرات منعکس‌کننده شرایط فیزیکی تحمیل شده بر رشد منیتیت در اواخر سرد شدن ماگما است (Almqvist, 2012)؛ اما هنگامی که جهت‌گیری هر یک از ذرات مغناطیسی در داخل حوزه‌ها، متفاوت باشد پذیرفتاری مغناطیسی با تقسیم حوزه‌ها که در جهت‌های مخالف مغناطیسی شده‌اند؛ تقسیم شده و مقدار آن کاهش خواهد یافت (Kittel, 1983).

در ادامه با توجه به اهمیت کانی‌های کدر در مطالعات فابریک مغناطیسی، تغییرات کانی منیتیت (حامل مغناطیسی) بر اساس

شیبی و مجیدی، کاربرد روش ناهمسانگردی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) جهت ارزیابی درجه و نوع دگرسانی در توده گرانیتوئیدی چالو ...، صفحات ۶۳-۵۱.

مقاطع بسیار شدید و با حذف منیتیت همراه بوده است. به صورتی که مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی آن‌ها در حد کانی‌های پارامغناطیسی است (ایستگاه‌های ۱۱ و ۳۲). اکسیداسیون منیتیت به هماتیت در زیر میکروسکوپ به صورت جانیشینی منطقه‌ای با هسته‌هایی از منیتیت باقیمانده قابل مشاهده است. در نمونه‌هایی که در آن هماتیت کاملاً جایگزین منیتیت شده است؛ ساختار داخلی منیتیت با رخ‌های اکتائوری حفظ شده است. در مقاطع میکروسکوپی، کانی هماتیت به صورت غیرهمگن و با هاله قرمز به صورت لکه‌ای درشت در زمینه یا به صورت بلورهای ریز بی‌شکل بر سطح پلاژیوکلازها مشاهده می‌شوند.

میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌های دارای دگرسانی آرژیلیتی در توده چالو،  $SI \times 10^{-6} = 1577 \pm 6262$  است؛ که کمترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی را دارا می‌باشند (جدول ۲)، (شکل‌های ۳-۱ تا ۴). اعداد به دست آمده از بزرگای Km برای نمونه‌های سالم و انواع دگرسان شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که دگرسانی آرژیلیتی تأثیر منفی زیادی روی مغناطیس‌پذیری داشته و باعث کاهش شدید قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی شده است. در شکل ۴ نمودار انواع ترکیبات سنگی سازنده توده گرانیتوئیدی چالو به همراه نمونه‌های سالم تا حدودی دگرسان شده و کاملاً دگرسان شده را در مقابل مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی میانگین آن‌ها به صورت نمودار ستونی (هیستوگرام) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر Km برحسب نوع و شدت دگرسانی در مقایسه با نمونه‌های سالم به شدت تغییر می‌یابد و یافته‌های جدول ۲ را تأیید می‌کند.

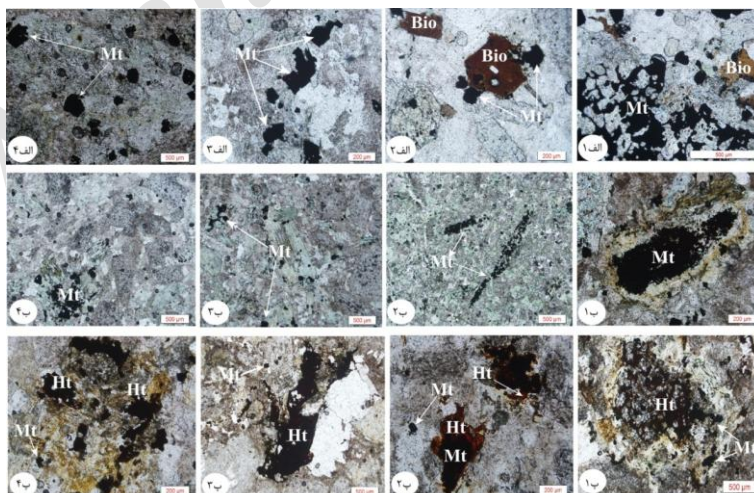
### ب) سنگ‌های حاصل از دگرسانی پروپیلیتی

این دگرسانی علاوه بر کاهش در اندازه منیتیت ماگمایی، باعث تشکیل منیتیت‌های ثانویه در اثر جانیشینی بخشی یا کامل کانی‌های فرومنیزین از قبل موجود (پیروکسن و آمفیبول) شده است (شکل‌های ۳-۱ تا ۴). این منیتیت‌ها به صورت بافت اسکلتی و دانه‌ریز در زمینه سنگ دیده می‌شود. علاوه بر آن در تعداد اندکی از ایستگاه‌ها در اثر اکسیداسیون منیتیت، هماتیت به صورت بلورهای ریز در امتداد رخ‌های بیوتیت تشکیل شده است. اکسیداسیون منیتیت در این مرحله از دگرسانی می‌تواند در ارتباط با ریزش‌کستگی‌های ایجاد شده در هنگام سرد شدن توده نفوذی باشد. میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌های دارای دگرسانی پروپیلیتی در دو واحد سنگی سازنده این توده  $SI \times 10^{-6} = 988 \pm 25117$  است (جدول ۲).

با توجه به گسترش دگرسانی پروپیلیتی و حضور کانی اپیدوت، به منظور تأثیر این کانی و بر روی خواص مغناطیسی سنگ‌ها و تعیین میزان پذیرفتاری مغناطیسی آن، سه نمونه سنگ اپیدوت تقریباً خالص با وزن مشخص (۶۰، ۷۰ و ۱۵ گرم) انتخاب و قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی آن‌ها با استفاده از دستگاه حساسیت‌سنج مغناطیسی (MFK1-FA) اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده، میانگین پذیرفتاری مغناطیسی اپیدوت تنها  $36 \mu SI$  است؛ که می‌توان گفت تأثیر چندانی بر روی پذیرفتاری مغناطیسی کل این سنگ‌ها نداشته است.

### پ) سنگ‌های تحت تأثیر دگرسانی آرژیلیتی

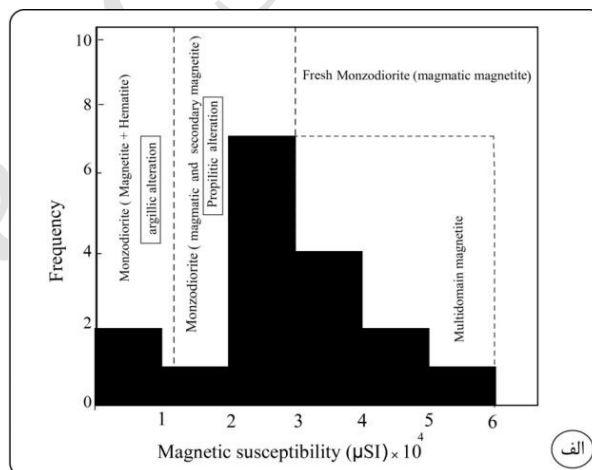
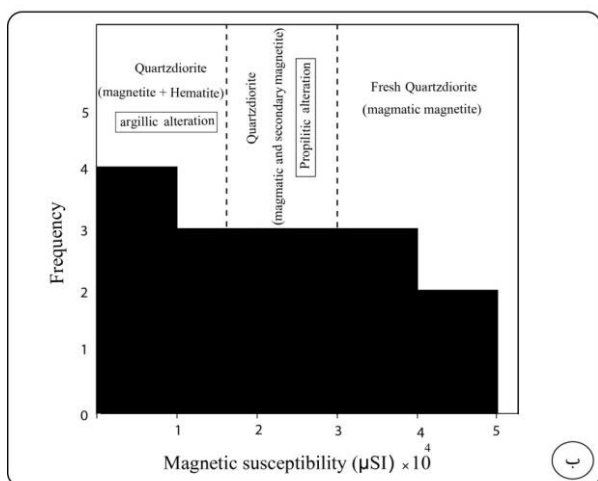
این نمونه‌ها با کاهش شدید در اندازه و مقدار منیتیت و هماتیتی شدن آن‌ها تشخیص داده می‌شوند. این نوع دگرسانی در بعضی



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپی از انواع کانی‌های ایک شناسایی شده در توده گرانیتوئیدی چالو. الف ۱ تا ۴) اشکال مختلفی از منیتیت ماگمایی، تجمعات خوشه‌ای (الف ۱)، خود شکل در بیوتیت (الف ۲)، در زمینه سنگ (الف ۳) یا در پیروکسن (الف ۴). ب) منیتیت‌های ثانویه در سنگ‌های حاصل از دگرسانی نوع پروپیلیتی: اشکال دروغین جانشین کانی‌های فرومنیزین از جمله پیروکسن (ب ۱)، هورنبلند (ب ۲) و بیوتیت (ب ۳ و ۴). پ) تصاویری از بقایای اکسید آهن و تبدیل آن به هماتیت (پ ۱، ۲، ۳ و ۴) که بیشتر به صورت جانیشینی منطقه‌ای با هسته‌هایی از منیتیت باقیمانده (پ ۲) قابل مشاهده است.

جدول ۲: تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در گروه‌های مختلف سنگی و انواع نمونه‌های سالم و دگرسان شده توده گرانیتوئیدی چالو.

لیتولوژی	Min	Max	Average
مونزودیوریت	۳۲۵	۵۸۹۷۰	۲۸۸۷۲
کوارتز دیوریت	۳۱۸	۴۵۴۳۷	۲۱۴۸۷
مونزودیوریت+کوارتز دیوریت	۳۱۸	۵۸۹۷۰	۲۵۴۳۵
گرانیتوئید سالم	Min	Max	Average
مونزودیوریت	۳۳۲۷۲	۵۸۹۷۰	۴۲۰۷۸
کوارتز دیوریت	۱۸۲۰۰	۴۵۴۳۷	۳۶۰۲۶
مونزودیوریت+کوارتز دیوریت	۱۸۲۰۰	۵۸۹۷۰	۳۹۰۵۲
دگرسانی پروپلیتی	Min	Max	Average
مونزودیوریت	۲۳۱۰۸	۳۱۸۶۴	۲۷۴۶۳
کوارتز دیوریت	۲۰۶۹۳	۲۴۰۳۷	۲۲۷۷۲
مونزودیوریت+کوارتز دیوریت	۲۰۶۰۳	۳۱۸۶۴	۲۵۱۱۷
دگرسانی آرژیلیتی	Min	Max	Average
مونزودیوریت	۳۲۵	۱۱۲۵۵	۶۲۲۰
کوارتز دیوریت	۳۱۸	۱۳۰۱۲	۶۳۰۵
مونزودیوریت+کوارتز دیوریت	۳۱۸	۱۳۰۱۲	۶۲۶۲



شکل ۴: الف) نمودار ستونی درصد فراوانی بزرگای پذیرفتاری مغناطیسی برای واحد سنگی مونزودیوریت. درصد فراوانی دگرسانی پروپلیتی در این واحد بیشتر و پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌های سالم آن بیشتر است. ب) نمودار ستونی درصد فراوانی بزرگای پذیرفتاری مغناطیسی برای واحد سنگی کوارتز دیوریت. نمونه‌های تحت تأثیر دگرسانی آرژیلیتی در واحد سنگی کوارتز دیوریت دارای کمترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی می‌باشند.

آسانی محقق می‌گردد. به این ترتیب که تغییر و تحولات کانی‌شناسی (همانند تبدیل منیتیت به هماتیت) را می‌توان با تغییر خاصیت مغناطیسی در حین گرم کردن یا سرد کردن نمونه و از روی دماهای کوری متفاوت (I<sub>c</sub>) تشخیص داد. در علم فابریک مغناطیسی، بررسی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌ها نسبت به تغییرات دما اصطلاحاً به آزمایش ترمومغناطیسی معروف بوده و در تشخیص این‌که نمونه مربوطه به طور کامل فرومغناطیس، پارامغناطیس، دیامغناطیس و یا ترکیبی از آن‌هاست، سودمند است. داده‌های حاصل از این آزمایش (منحنی‌های ترمومغناطیسی) از دو نمودار گرم

### ۲-۲- بررسی منحنی‌های ترمومغناطیسی جهت تشخیص کانی‌ها

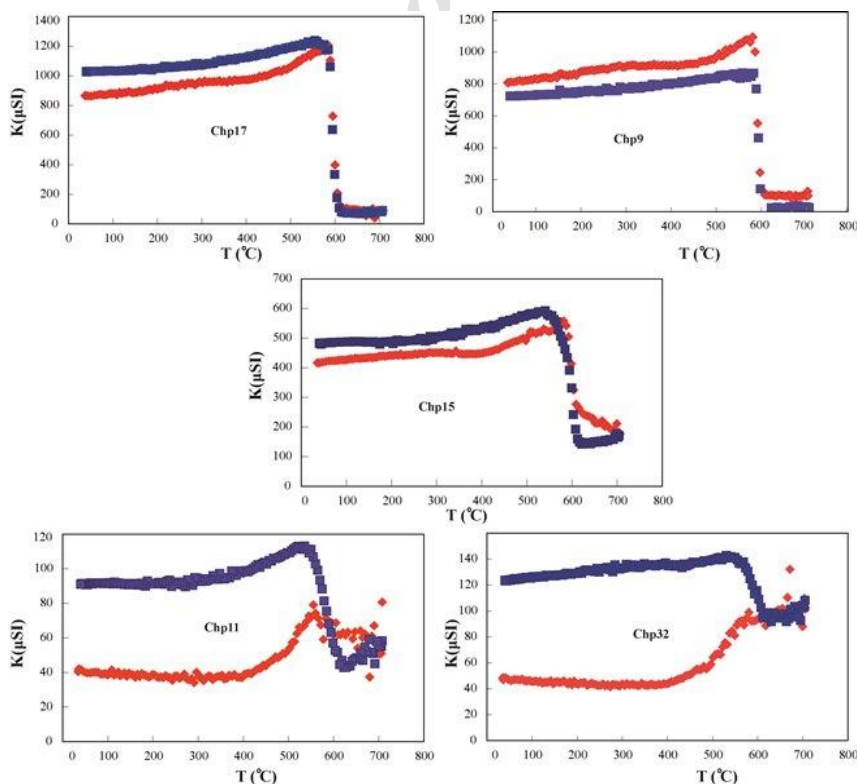
اگرچه کانی‌های فرومغناطیس همانند منیتیت، اغلب به صورت کانی‌های فرعی در سنگ‌های آذرین حضور دارند؛ اما نقش بسزایی در درک فرآیندهای زمین‌شناسی و شرایط تشکیل آن‌ها ایفا می‌نمایند. تشخیص کانی‌های فرومغناطیسی و دمای اولیه تشکیل آن‌ها، از دیگر فازهای مغناطیسی که در طی دگرسانی تشکیل می‌شوند، اهمیت زیادی دارد. امروزه این امر با استفاده از روش فابریک مغناطیسی به

شیبی و مجیدی، کاربرد روش ناهمسانگردی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) جهت ارزیابی درجه و نوع دگرسانی در توده گرانیتوئیدی چالو ...، صفحات ۶۳-۵۱.

می‌دهد. مطابق این نمودارها می‌توان گفت که در نمونه‌های سالم، (شکل ۵، Chp17 و Chp9) مقدار قابلیت پذیرفتاری به طور مشخصی تا دمای تقریباً  $400^{\circ}\text{C}$  نسبتاً ثابت می‌ماند. در این دو نمونه مقدار K در دمای کمتر از  $300^{\circ}\text{C}$  (یعنی دمای اتاق) بالا بوده و در  $590^{\circ}\text{C}$  که با دمای کوری منیتیت ( $578^{\circ}\text{C}$ ) مطابقت می‌نماید به شدت کاهش می‌یابد؛ بنابراین منحنی ترمومغناطیسی این دو نمونه به وضوح بیانگر کانی منیتیت به عنوان فاز فرومغناطیس است. برخلاف عملکرد دگرسانی پروپیلیتی در نمونه Chp15 که با کاهش در اندازه دانه‌های منیتیت همراه بوده؛ اما باز هم حضور این کانی به دلیل افت ناگهانی  $K_m$  در دمای  $578^{\circ}\text{C}$ ، مشخص می‌شود (شکل ۵). در مقابل، منحنی‌های ترمومغناطیسی نمونه‌های Chp11 و Chp32 دارای مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی پایین‌تر از  $400 \mu\text{SI}$  در دمای اتاق هستند (جدول ۱)؛ که با حضور منیتیت مغایرت دارد. همچنین از دمای  $400$  تا نزدیک  $600$  میزان K افزایش ناگهانی دارد؛ که نشانه تبدیل همتایت به منیتیت در حین گرم کردن نمونه است. افت مشخص K در دمای  $680^{\circ}\text{C}$  با دمای کوری همتایت مطابقت دارد (شکل ۵) که شواهد مبرهنی از دگرسانی آرژیلیتی است. همچنین منحنی سردشدگی این دو نمونه یک معکوس شدگی مثبت نشان می‌دهند که نشانه تشکیل مجدد منیتیت در طی گرم کردن نمونه است.

شدگی (heating) و سردشدگی (cooling) تشکیل می‌شود (شکل ۵). این نمودارها به ترتیب از ثبت مقادیر عددی تغییرات K به ازای گرم کردن نمونه از دمای اتاق تا دمای بیش از  $800^{\circ}\text{C}$  و سپس سرد کردن آن تا دمای اتاق به دست می‌آید. مرحله گرم کردن معمولاً مخرب بوده و ممکن است تغییراتی همچون اکسیداسیون، آبزدایی یا سایر تحولات کانی‌شناسی غیر قابل بازگشت را موجب گردد. مرحله سرد کردن که غالباً به کمک گازهای خنک‌کننده‌ای همانند نیتروژن یا هلیوم صورت می‌پذیرد؛ موجب تغییر خاصی در نمونه نمی‌گردد. به علاوه، چنانچه منحنی سردشدگی به طور محسوسی شبیه به منحنی گرم شدگی باشد؛ یعنی تغییر فاز کانی خاصی اتفاق نیفتاده است. استفاده از این روش به ویژه در تعیین ترکیب شیمیایی تیتانومنیتیت‌ها (محلول‌های جامد بین منیتیت،  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و الواسپینل،  $\text{FeTiO}_4$ ) بسیار کارآمد است؛ زیرا در بسیاری از سنگ‌ها، بلورها بسیار کوچک و یا اسکلتی بوده و حتی گاهی حاوی تیغه‌هایی از ایلمنیت یا سایر فازهای اسپینل هستند؛ که به راحتی با استفاده از پروب نمی‌توان ترکیب دقیق آن‌ها را تعیین نمود (Lattard et al., 2006).

آزمایش گرمایشی و سرمایشی روی چند نمونه سالم و دگرسان شده انجام و نتیجه حاصل روی نمودارهای ترمومغناطیسی ترسیم شده است (شکل ۵). در این نمودارها دو منحنی قرمز و آبی رنگ وجود دارد؛ که به ترتیب مسیر گرم و سرد شدن نمونه‌ها را نشان



شکل ۵: نمودارهای تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی عادی سازی شده نسبت به نمونه‌های سالم و انواع دگرسان شده در توده گرانیتوئیدی چالو. منحنی‌های قرمز و آبی به ترتیب نمودارهای گرم شدگی و سردشدگی را نشان می‌دهند. Chp9 و Chp17 دو نمونه مونوزودپوریتی سالم؛ Chp15 یک نمونه مونوزودپوریت با دگرسانی پروپیلیتی؛ Chp11 و Chp32 دو نمونه از سنگ‌های حاصل از دگرسانی آرژیلیتی.



#### ۴- بحث

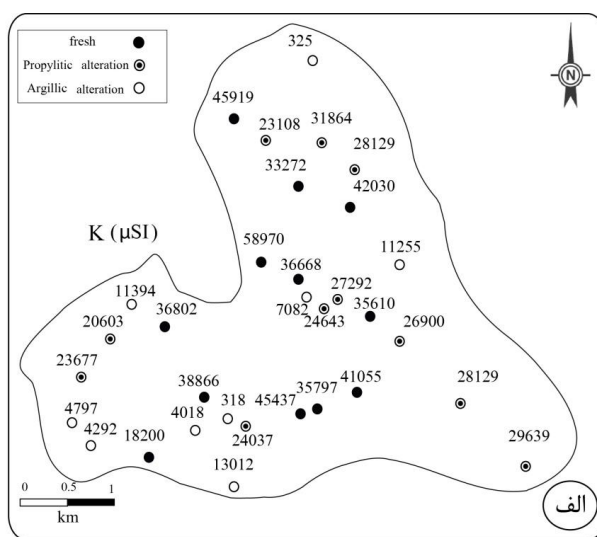
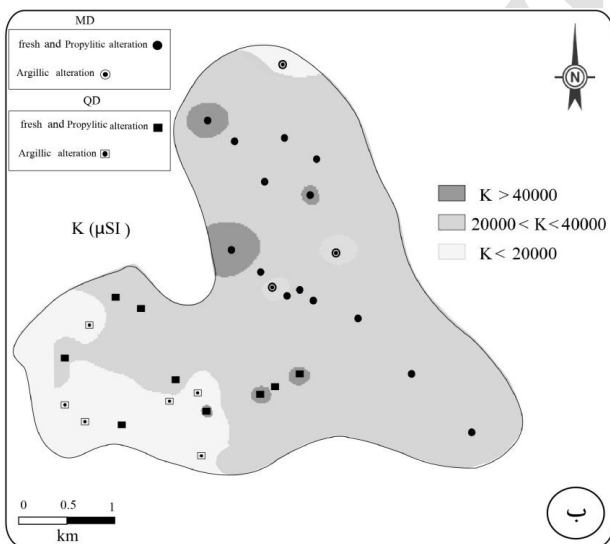
کانی‌های مختلف در میدان مغناطیسی، رفتار مغناطیسی متفاوتی از خود نشان می‌دهند؛ که به شکل دانه و درجه نظم بلوری آن‌ها برمی‌گردد (Evans et al., 2003). قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی خاصیتی متأثر از فراوانی، اندازه و ترکیب اکسیدهای آهن است. نتایج حاصل از AMS می‌تواند مراحل تحول پیشرونده از فابریک کاملاً ماگمایی تا فابریک حاصل دگرسانی گرمایی را نشان دهد. نتایج بررسی‌های Kontny و همکاران (2000)، نشان می‌دهد فرایندهای هوازدگی و دگرسانی بر روی ماهیت مغناطیسی سنگ تأثیر می‌گذارد و در نتیجه باعث تغییر در الگوی فابریک مغناطیسی و حتی بزرگای Km می‌شود. به هر حال ترکیب سنگ و درجه دگرگونی و دگرسانی بر روی ناهمسانگردی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی و Km آن نمونه تأثیر می‌گذارد (Nakamura and Borradaile, 2004) به طوری که حتی Lapointe و همکاران (1986) میزان پذیرفتاری مغناطیسی (Km) را مبنایی برای تعیین درجه دگرسانی در سنگ‌ها در نظر گرفته‌اند. نتایج حاصل از مطالعات فابریک مغناطیسی توده نفوذی چالو نشان می‌دهد که ترکیب سنگی و محتوای کانی‌شناسی آن (شکل ۱) با تغییرات بزرگای پذیرفتاری مغناطیسی (شکل ۶ الف و ب) ایستگاه‌های برداشت شده انطباق خوبی با یکدیگر داشته و در مجموع دگرسانی، مقدار Km کل سنگ را کنترل نموده است. هر چند دگرسانی در بخش‌های مختلف توده نفوذی چالو به صورت ناهمگن توزیع شده است، اما مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده کانه‌زایی و همچنین تغییر در ماهیت مغناطیسی اولیه توده نفوذی

#### نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۱، ۱۳۹۶.

مزبور است. در این میان می‌توان به انطباق کامل بین ایستگاه‌های دگرسان شده در توده نفوذی و مناطق کانه‌زایی شده اطراف آن اشاره نمود؛ که در آن مقدار Km متناسب با نوع و شدت دگرسانی‌ها تغییر یافته است. به عنوان مثال در مجاورت بلافاصل توده نفوذی با اسکارن آهن چالو (ایستگاه ۱۱) شواهد مبرهنی از دگرسانی آرژیلیک (شکل ۷) مشاهده می‌شود؛ که در آن بزرگای قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی به شدت کاهش یافته است (جدول ۱، Km=325μSI).

پایین آمدن پذیرفتاری مغناطیسی در نتیجه اکسیداسیون منیتیت به هماتیت است. این بخش از توده نفوذی به سمت مرکز توده با یک زون به شدت پروپیلیتی (شکل ۸) شده احاطه شده است (ایستگاه‌های ۷، ۸ و ۱۰) که در آن منیتیت تخریب شده؛ اما پیریت فراوان است.

کاهش در اندازه و تعداد دانه‌های منیتیت و تشکیل کانی‌های کمتر مغناطیس یا غیر مغناطیس مهم‌ترین عامل کاهش Km نسبت به نمونه‌های فاقد دگرسانی است. همچنین در حاشیه جنوبی توده نفوذی مذکور (ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در شکل ۱) با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی، شواهدی از دگرسانی پروپیلیتی مشاهده می‌شود؛ که با روند رگه‌های سیلیسی گرمابی طلادار همراه با مس پراکنده در اطراف توده نفوذی به خوبی تطابق دارد. در این محدوده حداقل ۱۲ رگه سیلیسی با درازای ۴۰ تا ۵۰۰ متر و ضخامت ۰/۲ تا ۴ متر گزارش شده است؛ که همگی در امتداد شکستگی‌های نوع P جای گیر شده‌اند (کی‌نژاد، ۱۳۸۷).



شکل ۶: الف و ب) به ترتیب نقشه‌های مقادیر عددی و هم میزان بزرگای پذیرفتاری مغناطیسی (Km) در توده گرانیتوئیدی چالو.



شکل ۷: تصویر صحرایی از گسترش دگرسانی آرژیلیک در مجاورت بلافصل اسکارن آهن در توده گرانیتوئیدی چالو.



شکل ۸: تصویر صحرایی از دگرسانی پروپیلیتی در توده گرانیتوئیدی چالو.

## ۵- نتیجه گیری

بزرگای قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی به دست آمده از نمونه‌های سالم و دگرسان شده با موقعیت پهنه‌های دگرسانی موجود در توده نفوذی چالو به خوبی مطابقت می‌نماید. کانسار آهن موجود در محل تماس سنگ‌های آهکی کرتاسه و بخشی از توده نفوذی با ترکیب مونزودوریت به وجود آمده است (شیبی، ۱۳۹۵). در این بخش از توده یک زون به شدت آرژیلیتی شده حضور دارد؛ که در آن منیتیت ناپایدار است. این پهنه به سمت داخل توده نفوذی با چندین ایستگاه دارای شواهدی از دگرسانی پروپیلیتی ادامه می‌یابد؛ که در آن منیتیت تخریب شده، اما پیریت فراوان است. در واقع مطالعه ماهیت مغناطیسی نمونه‌های سنگی مختلف شاخص مهمی از ماهیت شیمی و ترکیب کانی‌شناسی آن است و تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌های گرانیتوئیدی با دگرسانی‌های مشاهده شده در این سنگ‌ها انطباق دارد. بزرگای Km متناسب با شدت و نوع دگرسانی تغییر می‌کند؛ زیرا سنگ‌های حاوی کانی‌های گروه اپیدوت، کلریت، هیدروکسیدهای آهن، رس‌ها و کربنات‌ها هر کدام ماهیت مغناطیسی

مشخصی دارند. اگرچه تاکنون مدل‌های زمین‌شناسی شناخته شده‌ای برای اکتشاف نهشته‌های اپی‌ترمال به کار گرفته شده است؛ اما اکتشاف بیشتر این نهشته‌ها به دلایلی از قبیل چرخش و به هم ریختگی تکتونیکی بعد از جای‌گیری توده نفوذی و همچنین منطقه‌بندی دگرسانی نامتقارن ناشی از جایگزینی در میان انواع سنگ‌های میزبان متفاوت، با یک مدل ایده آل همخوانی ندارد. با توجه به رابطه تنگاتنگی که بین بزرگای Km و نوع، اندازه و شکل کانی‌های مغناطیسی وجود دارد؛ به نظر می‌رسد یافتن این ارتباط با استفاده از روش‌های رایج مطالعات زمین‌شناسی و به خصوص تغییرات ناشی از بزرگای پذیرفتاری مغناطیسی کانی‌ها و سنگ‌ها (به ویژه منیتیت) بتواند راهگشای شناسایی و تفکیک انواع پهنه‌های دگرسانی، شدت و نوع دگرسانی و به خصوص مسیرهای عبور سیالات گرمایی باشد.

## ۶- سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از زحمات دکتر محمود صادقیان و مهندس

- Evans, M.A., Lewchuk, M.T. and Elmore, R.D., 2003, Strain partitioning of deformation mechanism in limestones: Examining the relationship of strain and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), *Journal of Structural Geology*, 25, 1525-1549.
- Frost, B.R., 1991, Stability of oxide minerals in metamorphic rocks, in D.H. Lindsley (ed.), *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*, *Reviews in Mineralogy*, 25, 469-487.
- Grant, F.S., 1985, *Aeromagnetism, geology and ore environments*, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: An overview, *Geoexploration*, 23, 303-333.
- Jerome, S.E., 1966, Some features pertinent in exploration of porphyry copper deposits. In: S.R. Titley and C.L. Hicks (Eds), *Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*, University of Arizona Press, Tucson.
- Kittel, C., 1983, *Introduction to Solid State Physics*, Wiley Eastern Limited, 719 P.
- Kontny, A., de. Wall, H., Sharp, T.G. and Pósfai, M., 2000, Mineralogy and magnetic behavior of pyrrhotite from a 260\_C section at the KTB drilling site, Germany, *American Mineralogist*, 85, 1416-1427.
- Lapointe, P., Morris, W.A. and Harding, K.L., 1986, Interpretation of magnetic susceptibility: a new approach 10 geophysical evaluation of the degree of rock alteration, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23, 393-401
- Lattard, D., Engelmann, R., Kontny, A. and Sauerzapf, U., 2006, Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe-Ti-O system: Effects of composition, crystal chemistry, and thermomagnetic methods, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B12.
- Nakamura, N. and Borradaile, G.J., 2004, Metamorphic control of magnetic susceptibility and magnetic fabric: a 3-D projection, *Journal of Geological Society of London*, 238, 61-68.
- Titley, S.R. and Beane, R.E., 1981, Porphyry copper deposits, *Economic Geology* 75<sup>th</sup> Ann., pp. 214-269.
- Traineau, H. and Genter, A., 1991, Petrography of the granite massif from drill cutting analysis and well log interpretation in the geothermal HRD borehole GPK1 (Sultz, Alsace, France), *Geothermal Science Technology*, 3, 1-29.
- محسن حمیدی که با صبر و حوصله، نویسندگان را در برداشت صحرائی یاری نمودند، کمال تشکر و امتنان را دارند.
- ### ۷- منابع
- آقاباتی، س. ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- خواج‌زاده، ح.، ۱۳۸۸، پترولوژی و ژئوشیمی توده‌های آذرین نفوذی شمال معلمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- سهیلی، م.، کوثری، س. و عابدیان، ن.، ۱۳۷۹، پروژه اکتشاف مقدماتی معادن شهرستان دامغان، سازمان صنایع و معادن استان سمنان.
- شیبی، م. و مجیدی، پ.، ۱۳۹۴، ساز و کار جای‌گیری توده گرانیتوئیدی چالو با استفاده از روش فابریک مغناطیسی، فصلنامه علوم زمین، ۲۴ (۹۵)، ۸۷-۹۵.
- شیبی، م.، ۱۳۸۸، پترولوژی، ژئوشیمی و ساز و کار جای‌گیری باتولیت گرانیتوئیدی شیرکوه (جنوب غرب یزد)، رساله دکتری، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم دانشگاه تهران.
- شیبی، م.، ۱۳۹۵، کانی‌زایی و سنگ‌زایی اسکارن آهن چالو (جنوب شرق دامغان)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۴ (۳)، ۴۶۰-۴۴۹.
- کی‌نژاد، آ.، ۱۳۸۷، تحلیل دینامیکی شکستگی‌های شمال منطقه ترو-د معلمان، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- Almqvist, B.S.G., 2012, Internal flow structures in columnar jointed basalt from Hrepphólar, Iceland: II. Magnetic anisotropy and rock magnetic properties, *Bulletin of Volcanology*, 74, 1667-1681.
- Brant, A.A., 1966, Geophysics in the exploration for Arizona porphyry coppers. In: S.R. Titley and C.L. Hicks (Eds), *Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*, University of Arizona Press, Tucson.
- Clark, D.A., 2014, Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review, *Tectonophysics*, 624-625, 46-65.
- Dunlop, D.J. and Ozdemir, O., 1997, *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*, Cambridge University Press, New York.



## Application of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) method in evaluation of the degree and style of alteration at Challu granitoidic pluton (South of Damghan)

Maryam Sheibi<sup>1\*</sup> and Parvin Majidi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, School of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- MS.c. Graduated, School of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 14 November 2016; Accepted: 14 March 2017

Corresponding author: sheibi58@gmail.com

### Keywords

Magnetic Susceptibility  
Hydrothermal Alteration  
Granitoid  
Challu  
Damghan

### Extended Abstract

#### Summary

Challu granitoid pluton is located in southeast of Damghan and northern part of central Iranian structural zone. Intrusion of the pluton into volcanic and volcanic-sedimentary rocks and the resultant hydrothermal fluids has caused alteration and Fe mineralization. Generally, two different phases of propylitic and argillic alterations are identified in the studied pluton. Magnetic susceptibility of fresh and altered rocks at the Challu granitoidic pluton is

measured by magnetic fabric technique. The average measured magnetic susceptibility has been obtained about  $28872 \pm 3410 \mu\text{SI}$  for monzodiorite and  $21487 \pm 3916 \mu\text{SI}$  for quartzdiorite. Circulation of hydrothermal fluids throughout the intrusive body has caused the main mineral compositions variation and changed the magnetic properties of minerals as the average measured magnetic susceptibility for the above rocks has, respectively, been reduced to  $25117 \pm 988 \mu\text{SI}$  and  $6262 \pm 1577 \mu\text{SI}$ , due to propylitic and argillic alteration. Different kinds of opaque minerals in the pluton have also been identified by thermomagnetic curves as magnetic susceptibility changes with temperature. These results show how magnitude of magnetic susceptibility decreases during alteration due to removal or reducing in the size of magnetite or its conversion to hematite.

### Introduction

This research investigates changes in the magnetic fabrics of the samples taken from the Challu granitoidic pluton that have been affected by hydrothermal alteration during iron mineralization. Magnetic nature of different kinds of opaque minerals in the pluton has also been investigated via thermomagnetic curves as magnetic susceptibility changes with temperature.

### Methodology and Approaches

Three oriented hand samples were collected at each of the 32 sites located on a 0.5-1 kilometer grid pattern with good coverage across the Challu granitoidic pluton. The specimens were measured for their magnetic fabric using a Kappabridge MFK1-FA susceptometer (AGICO) at the Geomagnetic Laboratory, Shahrood University of Technology, Iran. The instrument is operated at low field ( $4 \times 10^{-4}\text{T}$ ; 920 Hz) during measurements. The orientations and magnitudes of the three principal axes of the AMS ellipsoids ( $K_1 \geq K_2 \geq K_3$ ) were obtained for each sampling station through the tensor average of four individual AMS measurements. Moreover, 32 thin sections were prepared, and then, they were petrographically studied.

Basic magnetic mineralogy, aimed at identifying the minerals responsible for the magnetic susceptibility of the samples, was performed using the CS-2 furnace (AGICO) coupled to a KLY-2 susceptometer, located at the Paleomagnetism laboratory of Geological Survey of Iran. As a result, the variation of the susceptibility with temperature from  $20^\circ\text{C}$  to  $700^\circ\text{C}$  was obtained.

### Results and Conclusions

Investigation of magnetic fabric results in relation with the alteration and mineralogy of the rock samples taken from the Challu intrusive body reveal the following conclusions: 1) The rocks belongs to the I-type granite and have high magnetic susceptibility ( $K_m > 400 \mu\text{SI}$ ). 2) Regular variations of magnetic fabric on fresh and altered rocks of Challu

**JRAG, 2017, VOL 3, NO 1.**

granitoid show how behavior and character of minerals and rocks changes progressively with alteration. In fact, the magnitude of magnetic susceptibility is controlled by concentration of magnetic minerals (like magnetite), removal or re-deposition of it during the alteration of the intrusive body. 3) magnetic fabric studies can help us for finding internal fabric and emplacement mechanism of the intrusive body as well as identifying alteration zones and suitable pattern for exploration of mineralization passage. 4) Investigation of magnetic susceptibility changes with temperature in the mentioned granite indicates exact evidences of opaque mineral chemistry and magnetic carriers phases. The most important results of present research is that magnetic fabric changes of intrusive bodies not only provide precise information on internal structural and magnetic mineralogical nature, but also indicate geochemical variations and processes such as crystal fractionation and alteration in granites.

Consequently, it seems that the AMS method not only can help us for finding internal fabric and emplacement mechanism of intrusive bodies but also for quantifying alteration types and intensity, and providing convenient model for exploration and hydrothermal fluid passages.

---

Archive of SID