

ویژگی‌های مغناطیسی ماسه‌سنگ‌های گروه شمشک، در پاسخ به کاربرد روش‌های زمین مغناطیسی

زهیدا حمیدی بهشتی^۱، حبیب‌علیمحمدیان^۲، مرتضی طالبیان^۳، علیرضا شهیدی^۴، محمدرضا قاسمی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی‌ارشد، پژوهشکده علوم‌زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۲ دکترا، آزمایشگاه محیط و دیرین‌مغناطیس، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۳ استادیار، پژوهشکده علوم‌زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۴ دکترا، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۵ دانشیار، پژوهشکده علوم‌زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۰۳

چکیده

دانش زمین مغناطیس یکی از پرکاربردترین شاخه‌های دانش ژئوفیزیک به شمار می‌رود. این دانش امروزه گستره وسیعی از کاربردها، همانند مطالعات فابریک مغناطیسی، دیرینه‌مغناطیس و مغناطیس محیطی را در برمی‌گیرد که هر کدام از این روش‌های مغناطیسی، مناسب لیتولوژی‌های خاصی است. ماسه‌سنگ‌های گروه شمشک در خلال دو رویداد مهم زمین‌ساختی سیم‌رین پیشین و میانی تشکیل شده‌اند و نه تنها در منطقه مورد مطالعه، بلکه در گستره وسیعی از ایران نیز پوشش مناسبی دارند. از این رو، برای ارزیابی پتانسیل این واحد سنگی در پاسخ‌گویی به کاربرد روش‌های زمین مغناطیس، مورد مطالعه قرار گرفتند. از ۱۸ ایستگاه، ۱۳۵ نمونه مغزه جهت دار در این واحد، برداشت شد. در این مطالعه از تلفیق داده‌های حاصل از آزمایشات مغناطیسی و داده‌های سنگ‌نگاری استفاده شد. منحنی‌های ترومگنتیک حاصل از آزمایش کانی‌شناسی مغناطیسی همه نمونه‌ها از تمامی ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه‌های ۱۰ و ۱۵) نشان داد که از نوع برگشت‌ناپذیر بوده و کانی‌هایی مانند هماتیت و مگنتیت در اثر دگرسانی نمونه‌ها، در طی مرحله گرمادهی تولید شده‌اند. نتایج آزمایش مغناطیس‌زدایی حرارتی نشان داد که کانی‌های فری مغناطیس موجود در نمونه‌ها (به جز نمونه‌های ایستگاه‌های ۱۰، ۱۴ و ۱۵) پس از دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس باز مغناطیس شده‌اند که این مسئله به صورت زیگزاگی شدن یا افزایش غیر عادی پسماند مغناطیسی، در منحنی‌های پسماند مغناطیسی - دما در مرحله افزایش دما دیده می‌شود و بیانگر این است که این کانی‌ها از ترکیب شیمیایی کانی‌های مغناطیسی با دمای کوری پایین (حدود ۴۰۰ درجه سلسیوس) با اکسیژن و در اثر افزایش دما به وجود آمده‌اند. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی (K_{eff}) نشان داد که این مقدار برای بیشتر ایستگاه‌های منطقه در محدوده $10^3 \times 400 - 200$ می‌باشد که نشان از فراوانی کانی‌های پارامغناطیس در این واحد سنگی دارد. مطالعه سنگ‌نگاری مشخص کرد که تمامی ماسه‌سنگ‌های منطقه از دسته آرنایت‌ها بوده و در آنها نسبت کوارتز به قطعات سنگی و فلدسپار، نسبتاً پایین است که نشان‌دهنده بلوغ کانی‌شناسی پایین نمونه‌ها است. مقایسه داده‌های آزمایش کانی‌شناسی مغناطیسی با آزمایش مغناطیس‌زدایی حرارتی برای دو ایستگاه S10 و S15 نشان داد که بین میزان کانی‌های فری مغناطیس پایدار یک نمونه و میزان دگرسانی آن در طی مرحله گرمادهی، یک رابطه احتمالی عکس برقرار است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ماسه‌سنگ‌های شمشک به دلایلی مانند پایین بودن بلوغ کانی‌شناسی و عبور جریان آب از درون آنها که احتمال به دست آوردن پسماند مغناطیسی شیمیایی (CRM) را بالا می‌برد، سرعت رسوب‌گذاری بالا که احتمال افزایش خطای میل و انحراف مغناطیسی را تقویت می‌کند، پایین بودن کسر کانی‌های فری مغناطیس که عدم ثبت دقیق جهت‌های مغناطیسی را سبب می‌شود و حضور کانی‌های فری مغناطیس با دمای کوری پایین که توانایی ثبت و حفظ جهت‌های دیرینه‌مغناطیسی را ندارند، از اعتبار بسیار ضعیفی برای مطالعات دیرینه‌مغناطیس برخوردار هستند، با این حال فراوانی کانی‌های پارامغناطیس مانند بیوتیت در این رسوبات قابلیت کاربرد آنها را برای مطالعات فابریک مغناطیسی به اثبات می‌رساند.

کلیدواژه‌ها: روش‌های زمین مغناطیسی، گروه شمشک، ماسه‌سنگ، فری مغناطیس، پارامغناطیس، البرز، ایران.

*نویسنده مسئول: حبیب‌علیمحمدیان

E-mail: halimohammadian@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

نقش می‌کند و در ارتباط با دانش دیرینه‌مغناطیس، این علم در شاخه‌هایی مانند دیرینه‌جغرافیا (برای مثال Cocks & Torsvik, 2007)، چینه‌نگاری مغناطیسی (برای مثال Opdyke & Chanell, 1996) و زمین‌ساخت (برای مثال Maffione et al., 2010) کاربرد دارد.

هر یک از انواع لیتولوژی‌ها، ممکن است در روش خاصی از علم مغناطیس کاربرد داشته باشند. برای مثال لس‌ها، رسوبات دریاچه‌ای و دریایی برای مطالعات آب و هوای دیرینه مناسب‌ترند (Evans & Heller, 2003). در مطالعات دیرینه‌مغناطیسی، رسوبات قرمز به دلیل داشتن مقادیر فراوانی از کانی فری مغناطیس هماتیت، فراوانی در توالی‌های رسوبی بیشتر قاره‌ها و نیز شدت مغناطیس متناسب با کار دستگاه‌های دیرینه‌مغناطیسی از اهمیت زیادی برخوردارند (Butler, 2004). برای مثال Meijer et al. (2010) مطالعات دیرینه‌مغناطیسی خود را بر روی سنگ آهک‌های پلاژیک صورتی تا قرمز رنگ سازند کاپان‌بغازی کمر بند چین‌خورده پونتیدز در

دانش زمین مغناطیس امروزه یکی از پرکاربردترین شاخه‌های دانش ژئوفیزیک است. در پایان قرن شانزدهم ویلیام گیلبرت نشان داد که زمین یک آهنربای بزرگ و دارای میدان مغناطیسی است. در دهه ۱۸۳۰ کارل فردریک گوس، روشی را برای محاسبه کامل میدان مغناطیسی و تحلیل ویژگی‌های آن با استفاده از آنالیز هماهنگی کروی تعیین کرد (Lanza & Meloni, 2006). این علم امروزه در شاخه‌هایی مانند مغناطیس محیط زیستی، مطالعه فابریک مغناطیسی سنگ‌ها و دیرینه‌مغناطیس کاربرد دارد. در ارتباط با دانش مغناطیس محیطی کاربردهای علم مغناطیس شامل بازسازی آب و هوای دیرینه و تعیین منشأ آلودگی‌های فلزات سنگین می‌شود (Evans & Heller, 2003). در ارتباط با مطالعات فابریک مغناطیسی این دانش با به کارگیری روش AMS یا ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (Anisotropy of magnetic susceptibility) در بسیاری از شاخه‌های علوم زمین همچون زمین‌ساخت، سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی اقتصادی و زمین‌شناسی نفت ایفای

نایبوستگی مهم واقع شده است: نایبوستگی پایینی، گروه شمشک را از کربنات‌های تختگاهی (پلات فرمی) سازند الیکا جدا می‌کند و به وسیله نهشته‌های بوکسیت لائیتی و کارستی‌شدگی مشخص می‌شود؛ نایبوستگی بالایی یک تغییر مشخص را از سنگ‌های سیلیسی آواری به سنگ‌های سامانه حوضه تختگاه کربنات نشان می‌دهد که به وسیله سازند دلیچای با سن ژوراسیک میانی تا بالایی (باژوسین تا کالوین) نشان داده می‌شود (Fursich et al., 2009). این گروه یک تفاوت اساسی را بین زون‌های رخساره‌ای شمالی و جنوبی که موازی راستای کوه‌های البرز هستند نشان می‌دهد (Seyed-Emami, 2003).

گروه شمشک در طی یا بعد از کوهزایی سیمین پیشین در یک پیش‌بوم ترجیحی همزمان با کوهزایی شکل گرفت که به یک حوضه مولاسی پس از کوهزایی و سپس به یک حوضه دریای ژرف وابسته به کافت‌شدگی پشت کماتی مرتبط با بازشدگی دریای خزر، تکامل یافت (Wilmsen et al., 2009).

۳- روش‌شناسی

۳-۱. دید کلی

منطقه مورد مطالعه در محدوده طول جغرافیایی $30^{\circ} 50'$ تا $51^{\circ} 00'$ خاوری و عرض جغرافیایی $30^{\circ} 35'$ تا $37^{\circ} 00'$ شمالی انتخاب شد. برای شروع کار، ابتدا منطقه از لحاظ ساختارهای زمین‌ساختی مهم مانند راندگی‌ها مود مطالعه قرار گرفت. به دلیل امکان تأثیر زمین‌ساخت بر کانی‌های مغناطیسی، تغییر ترکیب شیمیایی یا چرخش آنها در مجاورت گسل‌ها انتخاب ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فاصله کمینه ۵ متر از گسل‌ها یا راندگی‌های اصلی صورت گرفت. پس از این مرحله، نمونه‌برداری آغاز شد و از ۱۸ ایستگاه (حدود ۶ تا ۹ مغزه از هر ایستگاه (جدول ۱)) توسط دستگاه مغزه گیر قابل حمل بنزینی نمونه‌گیری شد. در این پژوهش از دستگاه‌های مغناطیس سنج چرخان (Spinner magnetometer) مدل JR6 برای اندازه‌گیری پسماند مغناطیسی نمونه‌ها، از دستگاه مغناطیس‌زدای حرارتی (Thermal demagnetizer) مدل MMTD80 برای آزمایش مغناطیس‌زدایی برای جداسازی اجزای ثانویه NRM نمونه‌ها از اجزای اولیه NRM و تعیین جهات مغناطیسی نمونه‌ها در زمان تشکیل، از دستگاه کاپابریج (Kappabridge) مدل MFK1-A برای اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی کل نمونه‌ها و از دستگاه CS-3 که از ملحقات دستگاه کاپابریج است برای کانی‌شناسی مغناطیسی نمونه‌ها استفاده شد. افزون بر این، به منظور مطالعه سنگ‌نگاری نمونه‌ها، تعدادی مقطع نازک از نمونه‌های هر ایستگاه تهیه شد.

۳-۲. روش‌های آزمایش‌های مغناطیسی

نمودارهای حاصل از آزمایش کانی‌شناسی مغناطیسی (منحنی‌های ترمومگنتیک) دو منحنی را به ما نشان می‌دهند در آنها منحنی قرمز نشان‌دهنده تغییرات پذیرفتاری در مرحله گرم‌شدن و منحنی آبی نشان‌دهنده تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در مرحله سرد شدن است.

افت ناگهانی پذیرفتاری مغناطیسی در مرحله گرم‌شدن معادل دمای کوری کانی فری مغناطیس موجود در نمونه‌ها می‌باشد. در ارتباط با منحنی ترمومگنتیک دو واژه منحنی برگشت‌پذیر (Reversible curve) و منحنی برگشت‌ناپذیر (Irreversible curve) تعریف شده است. منحنی برگشت‌پذیر منحنی‌ای است که در آن منحنی‌های گرم و سردشدگی تا حد زیادی بر هم منطبق‌اند و منحنی برگشت‌ناپذیر منحنی‌ای است که در آن، این دو بر هم منطبق نیستند.

نمودار پسماند مغناطیسی- دما، به دست آمده از آزمایش مغناطیس‌زدایی حرارتی، در حالت عادی یک روند کاهشی، با تععر رو به پایین را نشان می‌دهد (شکل ۳). همزمان با تغییرات پسماند مغناطیسی روی این نمودار، جهت‌های مغناطیس‌شدگی روی طرح استریوگرافی از زمان حاضر تا زمان تشکیل سنگ تغییر موقعیت می‌دهند. روی این نمودار نیز در محلی که پسماند مغناطیسی دچار افت

شمال ترکیه، Weil et al. (2010) این مطالعات را بر روی ماسه‌سنگ‌های قرمز سازند آنکاره در برآمدگی وایومینگ کمربند راندگی سیور در آمریکا انجام دادند. با این حال مطالعات دیرینه مغناطیس‌بسیاری نیز بر روی انواع لیتولوژی‌های غیر قرمز دیگر همچون ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراها (برای مثال Maffione et al., 2010)، گل‌سنگ‌ها (برای مثال Cifelli et al., 2008) و سنگ‌های آتشفشانی مانند بازالت‌ها (برای مثال Rouse et al., 2002; Abrajevitch et al., 2007) صورت گرفته است.

در مورد مطالعات فابریک مغناطیسی، قابلیت کاربرد گل‌سنگ‌ها (برای مثال Pares et al., 1999)، ماسه‌سنگ‌ها (برای مثال Bakhtiari et al., 1998; Craddock et al., 2007; Humbert et al., 2012) و سنگ‌های آتشفشانی (برای مثال Ghalamghash et al., 2009; LaBerge et al., 2009) به اثبات رسیده است. در این مطالعات گل‌سنگ‌ها بیشتر به عنوان نشانگرهای حساس به دگرریختی در رژیم‌های زمین‌ساختی ضعیف مورد استفاده واقع می‌شوند، برای مثال Soto et al. (2009)، قابلیت اطمینان گل‌سنگ‌های دارای دگرریختی ضعیف را به عنوان نشانگرهای مرحله‌ای تنش دیرینه در رژیم‌های فشارشی به اثبات رساندند. در مورد ماسه‌سنگ‌ها نیز کاربردهای زمین‌ساختی و رسوب‌شناختی فابریک مغناطیسی به اثبات رسیده است، برای مثال Burmeister et al. (2009) نشان دادند که در ماسه‌سنگ‌های با کرنش بسیار پایین، آنالیز AMS، نشانگر کرنش حساس‌تر و سریع‌تری را نسبت به آنالیز بهنجار شده فرای فراهم می‌کند. (Baas et al., 2007) نیز کنترل رسوبی خطورگی مغناطیسی را برای رسوبات متوسط تا درشت‌دانه، در مواردی که اثر فرایندهای رسوب‌گذاری در مقیاس رخنمون آشکارتر از فرایندهای زمین‌ساختی است، پیشنهاد کردند.

در این پژوهش، ماسه‌سنگ‌های گروه شمشک، در محل رشته کوه البرز مرکزی به عنوان واحد سنگ‌شناختی اصلی، مورد آزمایش قرار گرفتند. کمربند کوهستانی البرز بین دریای خزر و ایران مرکزی واقع بوده و به عنوان بخشی از کمربند چین‌خورده آلپ-همیالیا در فصل مشترک دو قاره کهن اوراسیا و گندوانا قرار دارد (آقاباتی، ۱۳۸۹) (شکل ۱). این کمربند حاصل رویدادهای زمین‌ساختی مختلفی از کوهزایی سیمین، حاصل از برخورد صفحه ایران با اورسیا تا کوتاه‌شدگی کنونی حاصل از همگرایی صفحات عربستان و اوراسیا است (Allen et al., 2002; Guest et al., 2006; Jackson et al., 2002; Muttoni et al., 2009).

گروه شمشک که شکل‌گیری آن بین دو رویداد مهم زمین‌ساختی سیمین پیشین و میانی بوده (آقاباتی، ۱۳۸۹) و در محل برخورد دو قاره کهن قرار دارد، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای در مطالعات زمین‌شناختی برخوردار است. در ضمن این واحد در منطقه مورد مطالعه با یک گسترش سرتاسری خاوری-باختری از پوشش خوبی برخوردار است (شکل ۲). در همین ارتباط و با توجه به گسترش روز افزون کاربرد دانش زمین‌مغناطیس بر روی انواع لیتولوژی‌ها برای کاربردهای گوناگون این دانش، در این مقاله سعی بر آن شده تا با تلفیق داده‌های حاصل از آزمایشات مغناطیسی و داده‌های حاصل از مطالعه سنگ‌نگاری ماسه‌سنگ‌های گروه شمشک، پتانسیل این واحد سنگی از نظر پاسخگویی به انواع روش‌های مغناطیسی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- گروه شمشک

گروه شمشک (شکل ۲) یکی از گسترده‌ترین رسوباتی است که در گستره وسیعی از ایران رخنمون دارد و دارای سن تریاس پسین-ژوراسیک میانی است. گروه شمشک به طور کلی شامل ترادفی از ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ‌های سیلتی، سیلت‌سنگ و گل‌سنگ با تناوب‌هایی از لایه‌های زغالسنگی نازک است ولی در برش الگو به واحدهای چهارگانه ماسه‌سنگ پایینی، سری زغال‌دار پایینی، ماسه‌سنگ بالایی و سری زغال‌دار بالایی تقسیم می‌شود (آقاباتی، ۱۳۸۹). این گروه در بین دو

مغناطیس‌شدگی نه تنها به سمت صفر میل نکرده بلکه افزایش یافته است (شکل ۵-الف). این امر را می‌توان به واکنش بین کانی‌های مغناطیسی و به دنبال آن تشکیل کانی‌های با مغناطیس بالاتر نسبت داد. برای مثال مگمیت در دمای ۲۵۰ تا ۶۵۰ درجه سلسیوس به هماتیت تبدیل می‌شود (Tauxe, 2007). همچنین برای بیشتر ایستگاه‌ها (S2, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S11, S13, S15, S16 و S17) منحنی تغییرات مغناطیس‌شدگی با دما یک مسیر زیگزاگ را طی می‌کند (شکل ۵-ب) که نشان‌دهنده بازمغناطیس‌شدگی نمونه‌ها در طی مراحل متناوب است (افزایش پسماند مغناطیسی در یک مرحله و کاهش آن در مرحله بعدی). علت این امر را نیز می‌توان به واکنش‌های بین کانی‌های مغناطیسی، دانه‌ریز بودن احتمالی کانی‌های مغناطیسی که نسبت سطح به حجم را افزایش داده و احتمال تغییرات شیمیایی را بالا می‌برد و یا بازمغناطیس‌شدگی کانی‌های دارای دمای کوری پایین نسبت داد، چون کانی‌های دمای پایین بیشتر مستعد بازمغناطیس‌شدگی هستند. یک دلیل احتمالی دیگر نیز می‌تواند حضور کانی‌هایی مانند تیتانومگنتیت، هماتیت و پیرویت باشد که نوسانات میدان بسیار قوی‌ای را نشان می‌دهند (Hrouda et al., 2006) با توجه به همه این عوامل، جهت‌های مغناطیس‌شدگی روی طرح استریوگرافی مسیر درستی را دنبال نکرده و تمرکز صحیحی را نشان نمی‌دهند که وجود مقادیر بالای α_{95} و بیشینه زاویه انحراف (Maximum angular deviation, MAD) برای داده‌های اصلاح نشده نیز گواه دیگری بر این مدعا است.

افزون بر این، برای برخی از ایستگاه‌ها (S10, S14 و S15) که منحنی مغناطیس‌شدگی - دما مسیر درستی را نشان می‌دهد، نقاط داده روی طرح استریوگرافی دارای پراکندگی بوده و تمرکز اندکی را از خود نشان می‌دهند (شکل ۵-پ). که بر طبق نظر Butler (2004) این امر را می‌توان به سرعت رسوب‌گذاری بالای گروه شمشک در هنگام ته‌نشست نسبت داد که باعث شده کانی‌های مغناطیسی فرصت کافی برای جهت‌گیری به سمت میدان زمین مغناطیسی را نداشته باشند. باید توجه داشت که ایستگاه‌های S10 و S15 همان ایستگاه‌هایی بودند که پاسخ نسبتاً مناسبی را به آزمایش‌کنانی‌شناسی مغناطیسی دادند. یکی دیگر از دلایل مهم عدم هماهنگی بین کاهش پسماند مغناطیسی و جهت‌های مرتبط با آن، می‌تواند وجود منافذ خالی در بین ذرات ماسه‌سنگ‌ها باشد. از آنجا که آب به راحتی از درون ماسه‌سنگ‌ها عبور می‌کند می‌تواند در طی زمان، موجب حل شدن شیمیایی برخی از کانی‌های مغناطیسی موجود در ماسه‌سنگ‌ها شده و رسوب دوباره این کانی‌های مغناطیسی در ماسه‌سنگ، موجب اختلال در ثبت جهت‌های مغناطیسی در ماسه‌سنگ‌ها می‌شود (پسماند مغناطیسی شیمیایی یا CRM).

۴-۳. داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی

مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش به شدت متنوع بوده و برای بیشتر نمونه‌ها مقدار پذیرفتاری میانگین (Km) در محدوده $SI \times 10^{-6}$ ۲۰۰-۴۰۰ می‌باشد (شکل ۶). این مقادیر مشخصه رسوبات با غلظت کانی‌های فری مغناطیس پایین بوده که پذیرفتاری و فابریک مغناطیسی‌شان تقریباً به وسیله کانی‌های پارامغناطیس مانند فلدسپارها، مسکوویت و بیوتیت تعیین می‌شود.

برخی نمونه‌ها دارای پذیرفتاری‌های مغناطیسی بالایی بوده ($SI \times 10^{-6}$ ۱۲۳۰) که همراهی کانی‌های فری مغناطیس را با پارامغناطیس (و دیامغناطیس) نشان می‌دهد. مقادیر خیلی پایین پذیرفتاری در ایستگاه S19 با مقدار $SI \times 10^{-6}$ ۵۹ محاسبه شد (جدول ۱) (مطالعات AMS روی ماسه‌سنگ‌های گروه شمشک که نشان‌دهنده شکل‌گیری فابریک مغناطیسی تحت تأثیر زمین‌ساخت منطقه بوده در مقاله‌ای دیگر (Alimohammadian et al., 2013) به چاپ رسیده است).

۴-۴. داده‌های سنگ‌نگاری

از نظر بلوغ بافتی، تمامی ماسه‌سنگ‌های منطقه با خمیره (ماتریکس) ۹ تا ۱۲ درصد خمیره بر اساس طبقه‌بندی پتی‌جان از دسته آرنایت‌ها (ماتریکس کمتر از ۱۵ درصد)

ناگهانی می‌شود، معادل دمای کوری کانی فری مغناطیس موجود در نمونه‌ها می‌باشد (AGICO, 2007).

در ارتباط با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها (داده‌های حاصل از دستگاه کاپابریج)، پذیرفتاری مغناطیسی کل (K_{bulk}) برای ارزیابی نسبی مقدار کانی‌های مغناطیسی موجود در نمونه‌ها استفاده می‌شود، چون در سنگ‌های مغناطیسی قوی با پذیرفتاری حجمی بیشتر از $SI \times 10^{-6}$ ۵۰۰ تأثیر کانی‌های پارامغناطیس قابل چشم‌پوشی بوده و وسیله کسر فری مغناطیس کنترل می‌شود. در سنگ‌های مغناطیسی ضعیف با پذیرفتاری کمتر از $SI \times 10^{-6}$ ۵۰۰ محتوای کانی‌های فری مغناطیس آن قدر اندک است که AMS به وسیله کسر پارامغناطیس کنترل می‌شود و اگر پذیرفتاری حجمی کمتر از $SI \times 10^{-6}$ ۵۰۰ باشد، حتی تأثیر کسر دیامغناطیس نیز قابل چشم‌پوشی نیست. در سنگ‌های با پذیرفتاری بین $SI \times 10^{-6}$ ۵۰۰ تا $SI \times 10^{-6}$ ۵۰۰۰، AMS به طور کلی به وسیله هر دو کانی‌های فری مغناطیس و پارامغناطیس کنترل می‌شود (Hrouda, 2010).

۴- نتایج داده‌ها

۴-۱. داده‌های کانی‌شناسی مغناطیسی

در آزمایشات کانی‌شناسی مغناطیسی انجام شده در این مطالعه، برای تمام اندازه‌گیری‌های ترمومگنتیک (K-T) منحنی‌ها از نوع برگشت ناپذیر بوده و برای بیشتر آنها مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در منحنی سردشدگی نسبت به منحنی گرم‌شدگی به طور قابل توجهی بالاتر است (شکل ۴-الف). این مسئله نشان می‌دهد که فازهای فری مغناطیس جدید (عمدتاً مگنتیت، مگمیت و به مقدار کمتر هماتیت و تیتانومگنتیت) حتی با وجود قرار داشتن نمونه‌ها در محیط گاز آرگون در طی مرحله گرم‌مادهی، شکل گرفته‌اند. این فازهای مغناطیسی جدید به فازهای مغناطیسی قبلی افزوده می‌شوند، بنابراین نمی‌توان به درستی دمای کوری کانی‌های فری مغناطیس اصلی موجود در سنگ اولیه را تعیین کرد، زیرا در صورتی که منحنی سردشدگی، پذیرفتاری‌های بسیار بالاتر از منحنی‌های گرم‌شدگی نشان دهد، شدیداً احتمال می‌رود که کانی فری مغناطیس مشاهده شده، به وسیله گرما در طی آزمایش تولید شده باشد و در سنگ اولیه غایب بوده، یا مقادیر بسیار پایینی داشته‌اند (Hrouda et al., 2009). تنها در مورد دو ایستگاه S10 و S15 (شکل ۴-ب و پ) افزایش قابل ملاحظه‌ای در منحنی سردشدگی نسبت به منحنی گرم‌شدگی ملاحظه نشد. در این موارد منحنی گرم‌شدگی یک افت ناگهانی پذیرفتاری را در حدود دمای کوری مگنتیت نشان می‌دهد. این مسئله حضور مگنتیت را به عنوان حامل فری مغناطیس اصلی سنگ پیشنهاد می‌کند.

همچنین به استثنای ایستگاه S7 (شکل ۴-ت)، برای سایر ایستگاه‌ها منحنی سردشدگی تقریباً مسیری مشابه منحنی گرم‌شدگی را طی می‌کند. برای S7 نمی‌توان به درستی تعیین کرد که آیا رخداد دگرسانی در طی گرم‌مادهی، مگنتیت مشاهده شده را تولید کرده یا اینکه مگنتیت جزو اصلی سنگ بوده است. این پدیده بیشتر در سنگ‌های دارای آمفیبول و مگنتیت رخ می‌دهد.

۴-۲. داده‌های مغناطیس‌زدایی حرارتی

آزمایش مغناطیس‌زدایی حرارتی، افت ناگهانی دما را در منحنی‌های مغناطیس‌شدگی - دما، برای همه نمونه‌ها در حدود ۴۰۰ درجه سلسیوس نشان داد. این امر بیانگر آن است که کانی‌های فری مغناطیس موجود در نمونه‌ها، دمای کوری پایینی دارند و در این حالت توانایی ثبت و حفظ جهت‌های دیرینه مغناطیسی را نداشتند و همانطور که قبلاً نیز اشاره شد اگر کانی فری مغناطیس مانند مگنتیت هم وجود داشته باشد در اثر اعمال حرارت و تبدیل شدن کانی‌های با دمای کوری پایین به مگنتیت به وجود آمده است.

برای برخی ایستگاه‌ها (S1, S3, S7, S12, S16 و S18) با افزایش حرارت،

با سایر ایستگاه‌ها داشتند (حضور فعال‌تر کانی‌های فری مغناطیس)، جهت‌های مغناطیسی روی طرح استریوگرافی تمرکز صحیحی را نشان نمی‌دهند. این امر را می‌توان بر پایه نظر Butler (2004) به سرعت بالای رسوب‌گذاری، در هنگام ته‌نشست گروه شمشک نسبت داد. حضور نسبتاً بالای قطعات سنگی و کانی‌های ناپایداری مانند اپیدوت و اسفن، که نشان‌دهنده بلوغ کانی‌شناسی پایین و بنابراین سرعت رسوب‌گذاری بالا است، نیز می‌تواند شاهدهی بر این مدعا باشد.

نکته قابل ذکر دیگر اینکه ایستگاه‌های S10 و S15 که دگرسانی اندکی را در طی مرحله گرم‌شدگی آزمایش CS-3 نشان دادند، یک روند کاهشی قابل قبول را نیز در مسیر منحنی‌های مغناطیس‌شدگی - دما نشان دادند. این روند کاهشی می‌رساند که کانی‌های دمابالا سهم نسبتاً بالایی را در پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های این دو ایستگاه دارند. همان‌طور که قبلاً بحث شد، هرچه سهم کانی‌های فری مغناطیس دمابالای پایدار در یک نمونه بیشتر باشد، آن نمونه برای مطالعات دیرینه مغناطیس مناسب‌تر است. از این مسئله می‌توان استنباط کرد که بین میزان دگرسانی یک نمونه در طی مرحله گرم‌شدگی و میزان کانی‌های فری مغناطیس دمای بالای پایدار آن یک رابطه احتمالی عکس برقرار است.

۶- بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گروه شمشک در منطقه مورد مطالعه، برای انجام مطالعات دیرینه مغناطیسی از قابلیت کمی برخوردار است، زیرا اصولاً پیش شرط هر گونه مطالعه دیرینه مغناطیسی، داشتن کانی‌های مغناطیسی مناسب است که بتوانند جهت و شدت میدان مغناطیسی زمین را در هنگام تشکیل در خود ثبت کنند و همان گونه که مشاهده شد به دلیل پایین بودن فراوانی حجمی کانی‌های فری مغناطیس، پایین بودن بلوغ کانی‌شناسی، حضور کانی‌های با دمای کوری پایین و سرعت بالای رسوب‌گذاری در هنگام ته‌نشست رسوبات و عبور جریان آب از داخل ماسه‌سنگ‌ها، این امکان از ماسه‌سنگ‌های گروه شمشک گرفته شده است. با این حال، مطالعه بر روی واحدهای با محتوای فری مغناطیس بالاتر، به ویژه رسوبات قرمز رنگ (برای مثال سازند قرمز بالایی) می‌تواند احتمال موفقیت آمیز بودن این گونه مطالعات را شدت بخشد.

افزون بر این، همان‌طور که مشاهده شد، برای نمونه‌های مورد مطالعه در منطقه، کسر پارامغناطیس از مقدار بالایی برخوردار است که این مقدار بالا، به دلیل آنکه نشان‌دهنده یک کسر حجمی بزرگ‌تر نسبت به کانی‌های فری مغناطیس است، می‌تواند اطلاعات فابریک قابل اعتمادتری را به دست دهد (Martin-Hernandez & Ferre, 2007). به عبارتی برای بیشتر سنگ‌ها، کانی‌های پارامغناطیس برای روش AMS مناسب‌ترند. به علاوه در روش AMS، جهت‌گیری محور طولی کانی‌های مغناطیسی، تحت تأثیر حرکت‌های زمین‌ساختی یا فرایندهای مربوط به جهت‌گیری جریان دیرینه رخ می‌دهد نه میدان زمین مغناطیسی؛ بنابراین حضور چشمگیر کانی‌های فری مغناطیس در این گونه مطالعات نقش تعیین‌کننده‌ای ندارد.

۷- نتیجه‌گیری

نمودارهای ترمومگنتیک برای تمامی نمونه‌ها از نوع برگشت‌ناپذیر بوده و کانی‌های مگنتیت، مگهمیت و به مقدار کمتر هماتیت و تیتانومگنتیت، به‌رغم قرار داشتن در محیط گاز آرگون، در طی مرحله گرمادهی تولید شده‌اند.

با توجه به اختلاف ارتفاع اندک دو منحنی گرم و سرد شدگی برای دو ایستگاه S10 و S15 می‌توان مگنتیت را به عنوان حامل فری مغناطیس اصلی (قابل اعتماد) برای این دو ایستگاه در نظر گرفت.

بوده و نیمه‌بالغ تا بالغ به شمار می‌روند (شکل ۷). این درجه از بلوغ بافتی نماینده رسوبات ساحلی و دلتایی است.

اندازه ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در منطقه، عمدتاً ریز تا متوسط‌دانه بوده (شکل ۸، جدول ۲) و از این رو به طور پیش فرض می‌توان پاسخ مناسبی را در ارتباط با مطالعات دیرینه مغناطیس از آن‌ها انتظار داشت، زیرا بر اساس نظر Butler (2004) در رسوبات دانه‌ریز و زیست‌آشفته بر خلاف رسوبات دانه‌درشت، جهت‌یافتگی پس از رسوب‌گذاری بیشتر بوده و این امر باعث کاهش خطای زاویه میل یا انحراف مغناطیسی می‌شود. البته سرعت رسوب‌گذاری بالا ممکن است این اثر را کاهش دهد، اما از سویی نیز به دلیل آنکه در رسوبات ریزدانه نسبت سطح به حجم بیشتر است، احتمال تغییرات شیمیایی نیز بیشتر خواهد بود. دیازنرزی و سیمانی شدن در رسوبات ریزدانه خیلی سریع‌تر رخ می‌دهد، بنابراین CRM در رسوبات سیمانی ریزدانه ممکن است خیلی سریع‌تر به دست بیاید تا رسوبات درشت‌دانه (Butler, 2004).

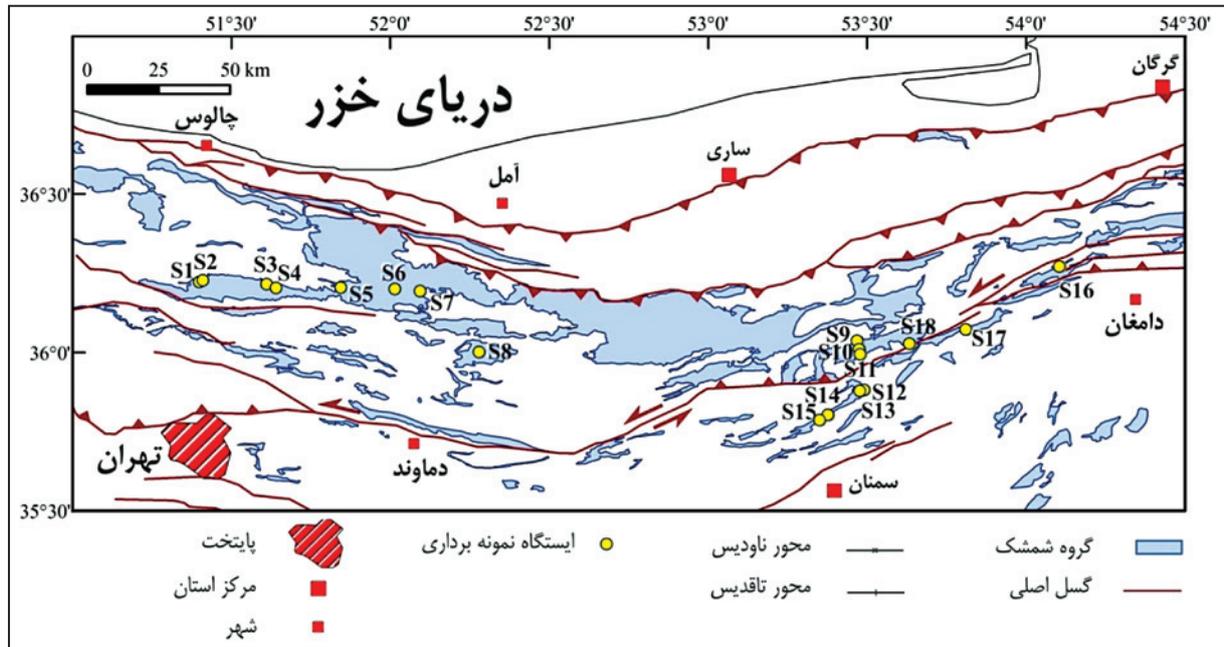
درصد پایین کوارتز در مقایسه با درصد نسبتاً بالای قطعات سنگی (شکل ۷ و ۹) و وجود برخی کانی‌های فرعی حمل شده ناپایدار مانند اپیدوت، زیرکن و اسفن (به صورت متامورفیک لیتیک آرنایت) که در برخی ایستگاه‌ها قابل مشاهده است، نشان‌دهنده بلوغ کانی‌شناسی پایین در محیط رسوب‌گذاری است. پایین بودن بلوغ کانی‌شناسی به نوبه خود می‌تواند نشان‌دهنده سرعت رسوب‌گذاری بالا هنگام ته‌نشست گروه شمشک باشد و همین امر می‌تواند باعث افزایش خطای میل مغناطیسی شود. افزون بر این، رسوبات نابالغ دارای کانی‌های با سطح اکسایش پایین، ممکن است اکسایش سریع‌تری را تجربه کرده و CRM زیادی را به سرعت کسب کنند. از این رو هرچه بلوغ کانی‌شناسی پایین‌تر باشد، به زمان کمتری برای واکنش‌های شیمیایی پس از رسوب‌گذاری نیاز بوده و CRM سریع‌تری کسب می‌شود (Butler, 2004).

تمایل رسوبات نابالغ به کسب سریع‌تر CRM به صورت حدواسط شبیهی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. اندازه دانه ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در منطقه، عمدتاً ریز تا متوسط‌دانه به ندرت درشت‌دانه بوده (شکل ۸) و از این حضور اکسیدهای آهن کدر به ویژه مگنتیت نیز تأییدکننده آزمایشات کانی‌شناسی مغناطیسی است که مگنتیت را به عنوان کانی فری مغناطیس غالب در نظر می‌گیرد، با این حال، این کانی‌ها بیشتر به صورت سیمان سنگ مشاهده شده و ثانویه محسوب می‌شوند.

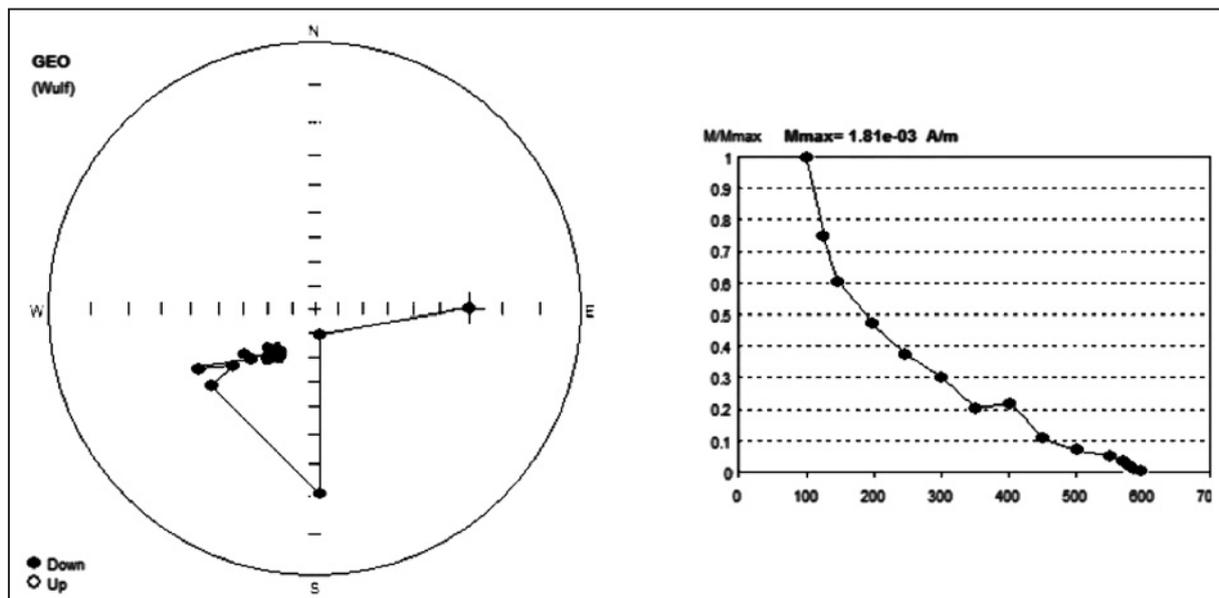
۵- تلفیق داده‌ها

بر پایه نظر Hrouda (2010) در سنگ‌های با مگنتیت اندک و پذیرفتاری پایین‌تر از $500 \mu\text{SI}$ ، محتوای کانی‌های فری مغناطیس اندک بوده و پذیرفتاری مغناطیسی توسط فراوانی کانی‌های پارامغناطیس کنترل می‌شود و نشان‌دهنده برتری کانی‌های پارامغناطیس مانند فلدسپارها و ناچیز بودن مقدار کانی‌های فری مغناطیس است. این مقدار اندک بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش CS-3، برای دو ایستگاه S10 و S15 که دگرسانی اندکی نشان داده و نتیجه قابل قبول‌تری را در تعیین کانی‌های فری مغناطیس ارائه می‌دهند، به وسیله کانی مگنتیت کنترل می‌شود، این در حالیست که بر اساس نتایج حاصل از مقاطع نازک، مگنتیت بیشتر به صورت سیمان سنگ مشاهده شده است، یعنی حتی اگر مقدار آن ناچیز نبود، باز هم احتمالاً نقش قابل قبولی در تعیین جهت‌های دیرینه مغناطیسی نداشت، زیرا به عنوان سیمان سنگ، می‌تواند یک CRM ثانویه باشد. این مسئله را رسوبات دانه‌ریز و دارای بلوغ کانی‌شناسی پایین منطقه که در آنها احتمال واکنش‌های شیمیایی پس از رسوب‌گذاری و اکتساب سریع‌تر CRM، بیشتر است نیز تأیید می‌کنند.

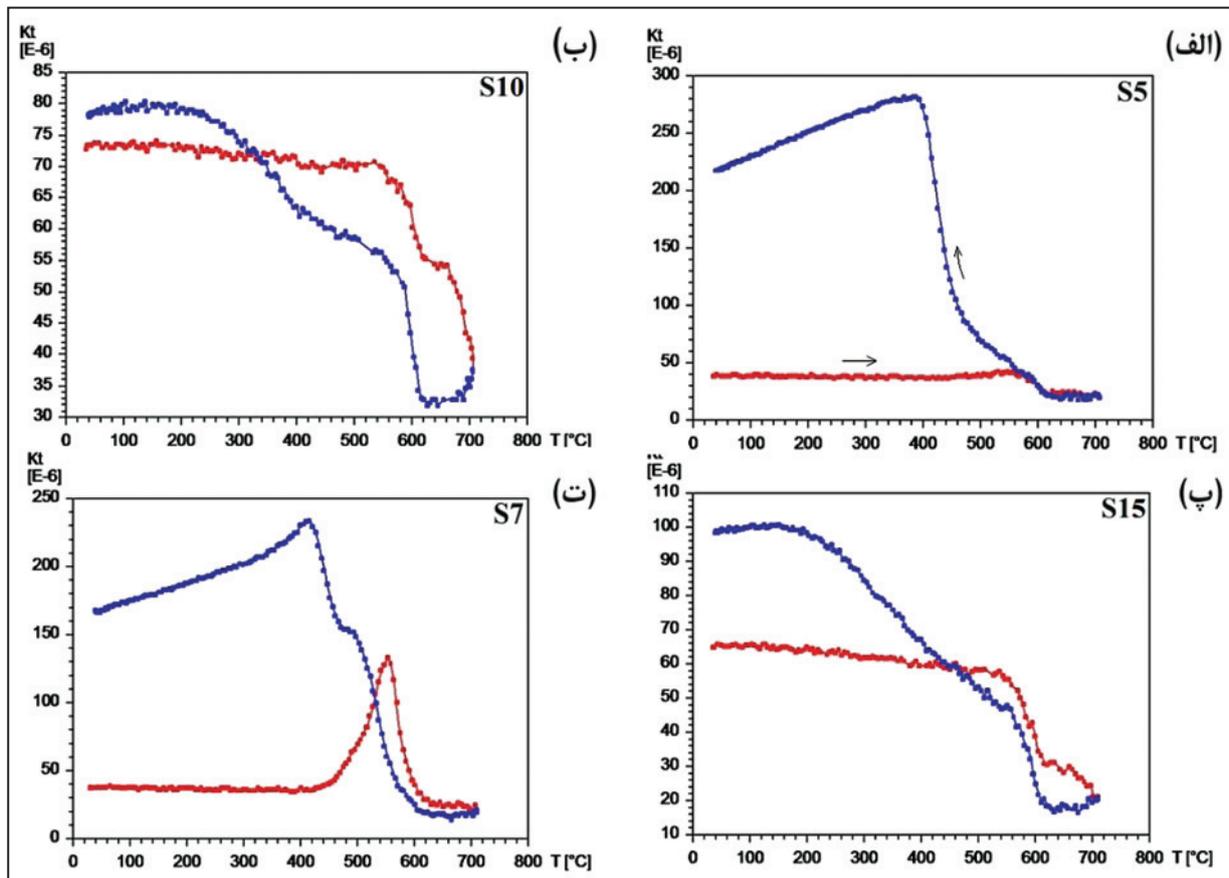
در مورد ایستگاه‌های S10، S14 و S15 نیز که در آنها منحنی مغناطیس‌شدگی - دما مسیر نسبتاً صحیحی را طی کرده و K_m نسبتاً بالاتری ($> 250 \mu\text{SI}$) در مقایسه



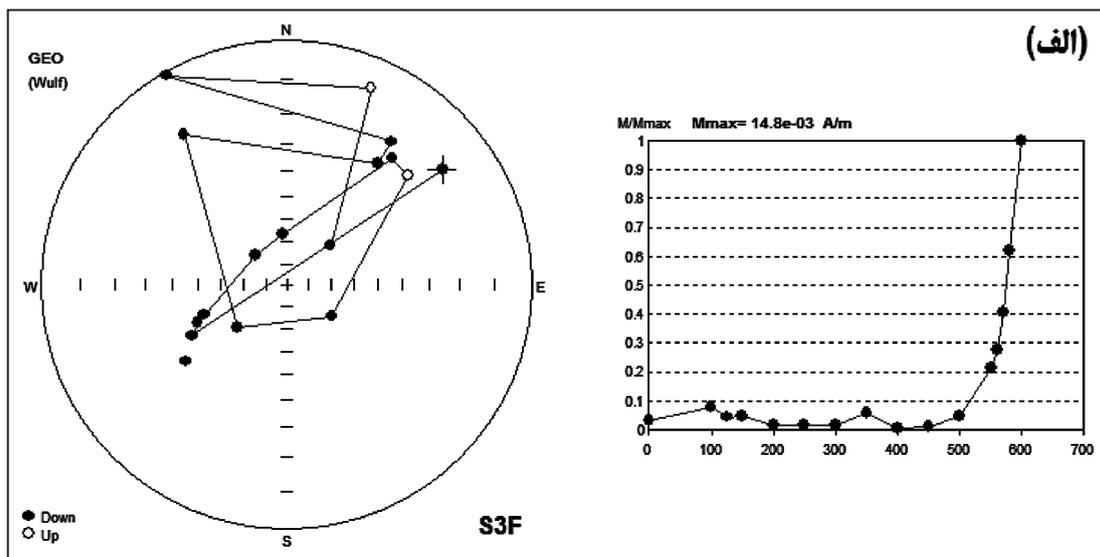
شکل ۲- پراکنده‌گی ایستگاه‌های نمونه‌برداری، رخمون‌های گروه شمشک و ساختارهای اصلی در منطقه مورد مطالعه.



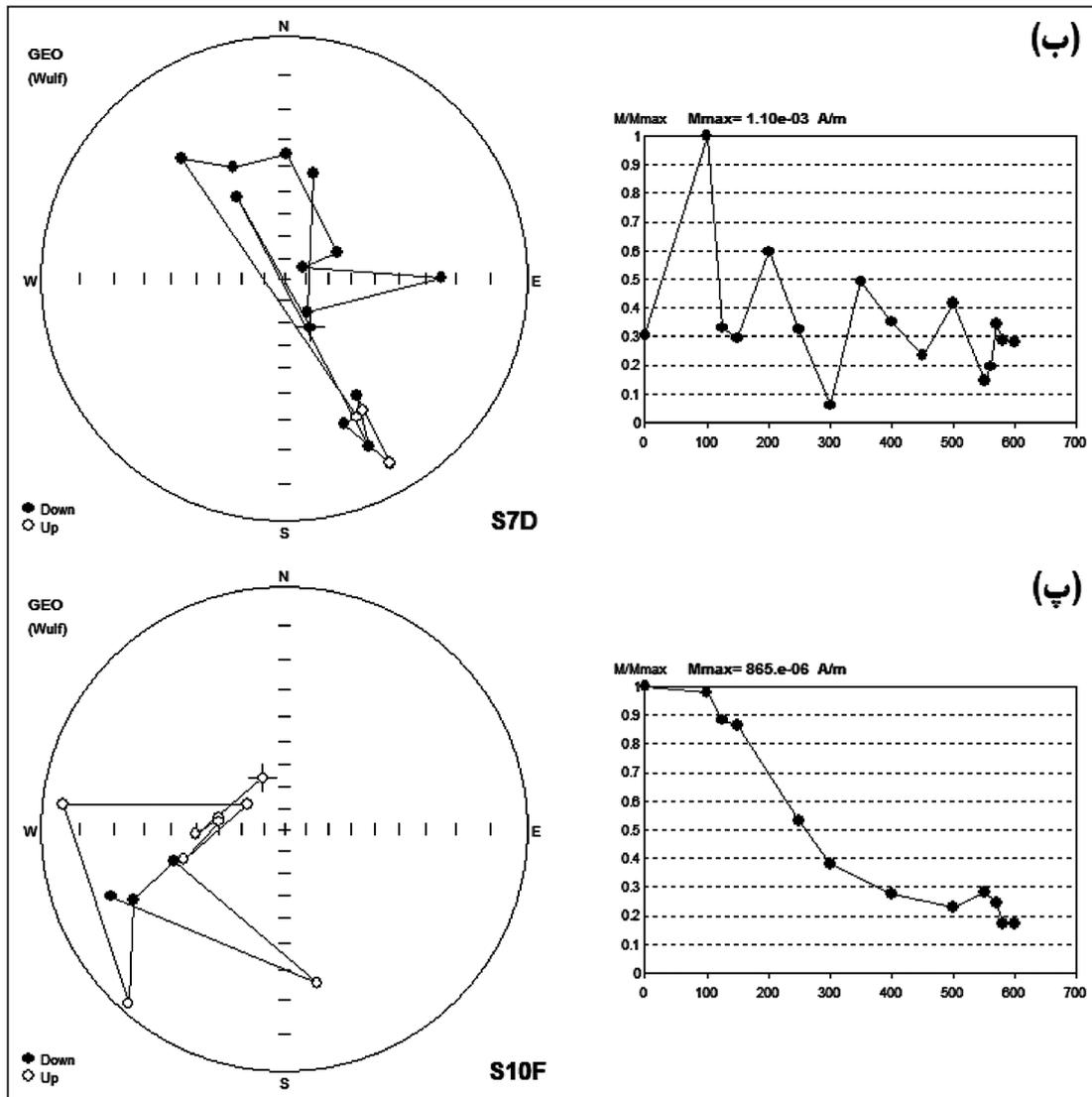
شکل ۳- نمایش روند کاهشی عادی نمودار پسماند مغناطیسی-دما (شکل سمت راست) و طرح استریوگرافی وابسته به آن (شکل سمت چپ). همزمان با کاهش مغناطیس‌شدگی در شکل سمت چپ، جهت‌های مغناطیسی در شکل سمت راست متمرکزتر می‌شوند؛ علامت + نقطه شروع را در طرح استریوگرافی نشان می‌دهد؛ (ترسیم مجدد از: AGICO, 2007).



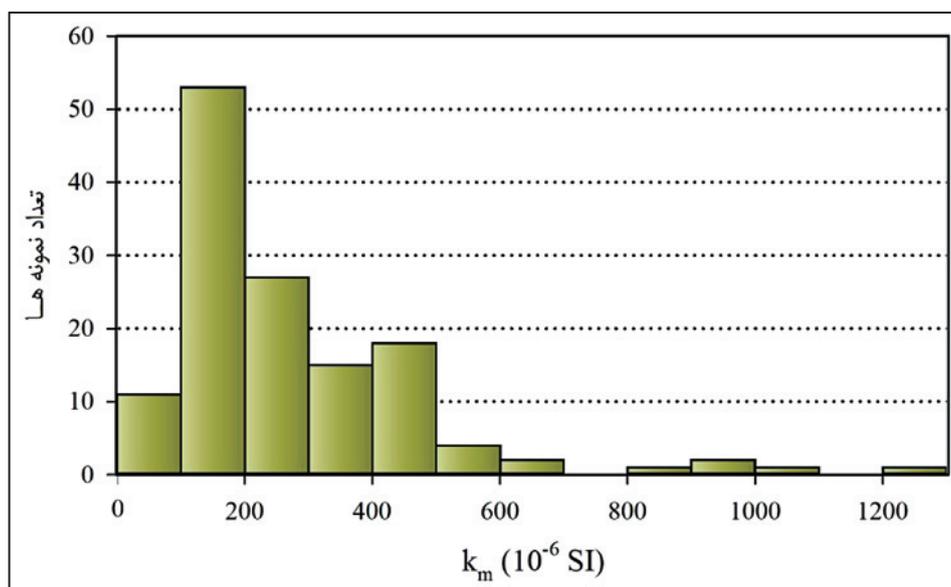
شکل ۴- نمایش منحنی ترمومگنتیک برای چهار ایستگاه (S15, S10, S7, S5) از منطقه مورد مطالعه. منحنی قرمز رنگ، مسیر افزایش دما و منحنی آبی رنگ، مسیر کاهش دما را نشان می‌دهند. در شکل الف، منحنی پذیرفتاری مغناطیسی در مرحله کاهش دما، بعد از شکل‌گیری دوباره مگنتیت، افزایش شدیدی را نشان می‌دهد که بیانگر رخداد تغییرات شیمیایی در مرحله افزایش دما و در زیر ۵۵۰ درجه می‌باشد. این تغییر پذیرفتاری مغناطیسی در مرحله کاهش دما در شکل‌های ب و پ به ترتیب در دمای ۳۴۰ و ۴۵۰ اتفاق افتاده است. در شکل ت، در مرحله افزایش دما، شاهد تغییر شیمیایی در نمونه مورد آزمایش هستیم که باعث افزایش پذیرفتاری مغناطیسی از دمای ۴۵۰ شده و شکل‌گیری کانی مگنتیت را نشان می‌دهد که به محض رسیدن به دمای کوری مگنتیت (۵۸۰-۶۰۰)، دچار افت شدیدی می‌شود. در مرحله کاهش دما نیز، شاهد افزایش پذیرفتاری مغناطیسی بعد از شکل‌گیری مگنتیت در دمای ۵۶۰ هستیم.



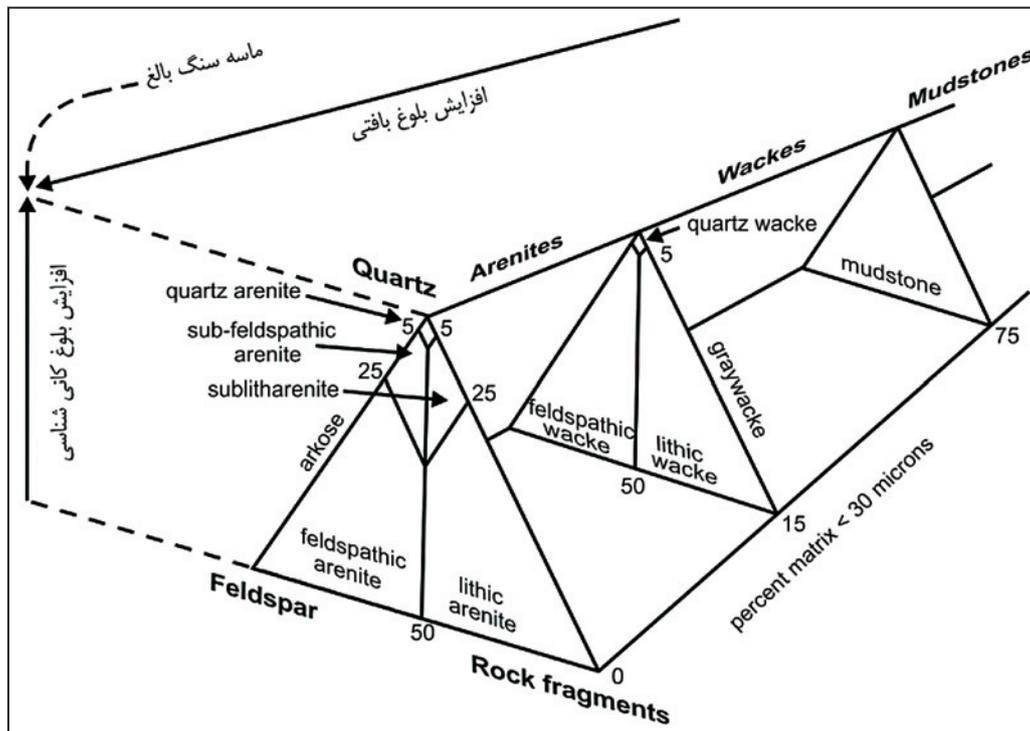
شکل ۵- نمایش سه نوع نمودار و طرح استریوگرافی برای منطقه مورد مطالعه. در شکل الف همزمان با افزایش دما، پسماند مغناطیسی روی محور قائم یک روند افزایشی را طی می‌کند.



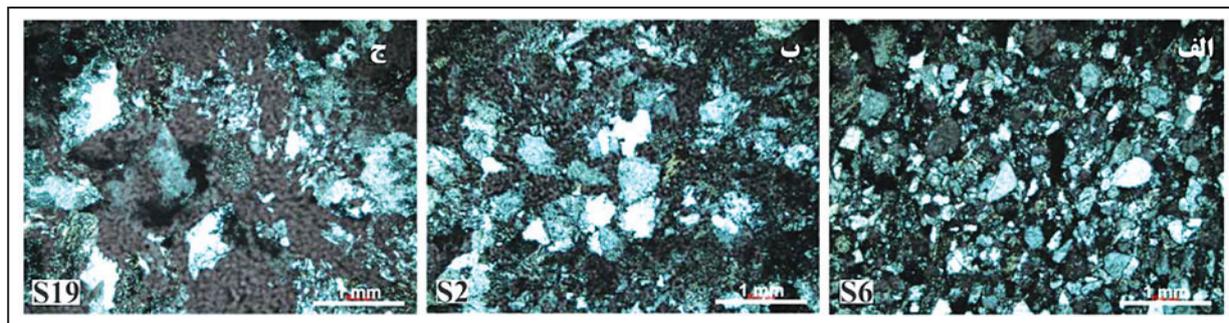
شکل ۵- نمایش سه نوع نمودار و طرح استریوگرافی برای منطقه مورد مطالعه. در شکل ب نمودار پسماند مغناطیسی - دما دارای یک روند زیگزاگ بوده و در شکل پ این نمودار یک روند کاهشی را طی می‌کنند؛ در هر سه حالت، پسماند مغناطیسی روی طرح استریوگرافی تمرکز صحیحی را نشان نمی‌دهد.



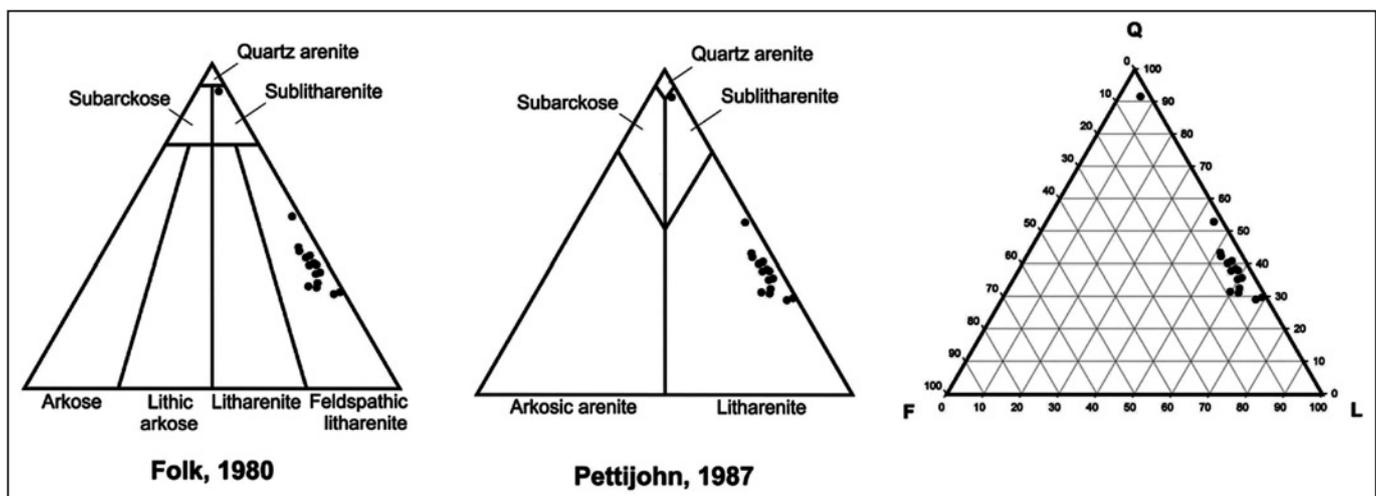
شکل ۶- نمودار فراوانی مقادیر پذیرفتاری میانگین مغناطیسی برای همه نمونه‌های منطقه.



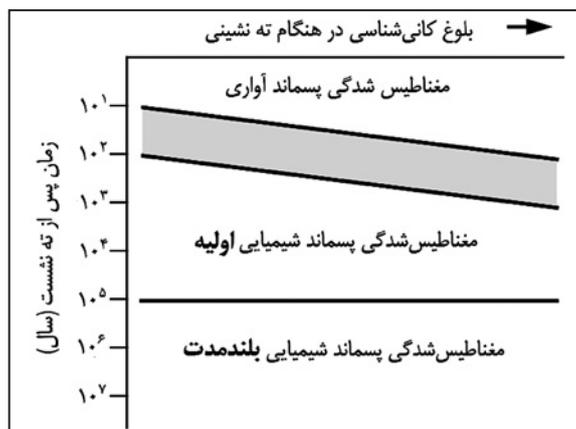
شکل ۷- طبقه بندی Pettijohn et al. (1987) برای ماسه سنگ ها.



شکل ۸- بافت و ترکیب ماسه سنگ های منطقه مورد مطالعه، برای سه دسته ماسه سنگ ریزدانه (الف)، متوسط دانه (ب) و درشت دانه (ج).



شکل ۹- موقعیت ترکیبی نمونه های منطقه مورد مطالعه روی نمودارهای Pettijohn et al. (1987) و Folk (1987). اختصارها: Q: Quartz, F: Feldspath, L: Lithic fragment.



شکل ۱۰- ساز و کار مغناطیس‌شدگی در رسوبات. مرز بین میدان‌های مختلف سازوکارهای مغناطیس‌شدگی، کاملاً غیر واقعی و طرح‌وار است (Butler, 2004).

جدول ۱- داده‌های حاصل از آزمایشات مغناطیسی انجام شده بر روی منطقه مورد مطالعه.

K_m (10^{-6} SI)	دما در پایین‌ترین نقطه منحنی مغناطیس-دما* ($^{\circ}$ C)	کانی فری مغناطیس برآورد شده از منحنی ترموگنتیک	T_c به دست آمده از منحنی ترموگنتیک ($^{\circ}$ C)	تعداد نمونه‌ها	موقعیت لایه‌بندی (آزیموت شیب و مقدار شیب)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ایستگاه
۲۷۴	۲۰۰-۴۰۰	مگهمیت	۶۰۰	۷	۰۶۴/۳۸	۵۱° ۲۳' ۵۸"	۳۶° ۱۳' ۲۰"	S1
۱۶۱	۲۰۰-۵۵۰	مگنتیت	۵۸۰	۸	۱۰۷/۴۸	۵۱° ۲۴' ۳۷"	۳۶° ۱۳' ۳۹"	S2
۱۷۰	۲۰۰-۵۸۰	مگنتیت	۵۸۰	۷	۱۱۵/۴۰	۵۱° ۳۶' ۴۲"	۳۶° ۱۲' ۵۴"	S3
۱۱۵	۴۰۰-۵۸۰	تیتانومگنتیت و مگهمیت	۶۰۰ و ۴۸۰	۷	۱۱۹/۱۷	۵۱° ۳۸' ۲۷"	۳۶° ۱۲' ۱۳"	S4
۲۰۶	۱۰۰-۵۵۰	مگهمیت	۶۰۰	۸	۱۲۷/۰۷	۵۱° ۵۰' ۴۲"	۳۶° ۱۲' ۱۵"	S5
۱۸۱	۳۰۰-۵۸۰	مگهمیت	۶۰۰	۸	۰۵۴/۱۳	۵۲° ۰۰' ۵۷"	۳۶° ۱۱' ۵۸"	S6
۳۶۲	۳۰۰-۵۰۰	مگنتیت	۵۹۰	۹	۱۵۷/۵۳	۵۲° ۰۵' ۴۸"	۳۶° ۱۱' ۳۵"	S7
۱۹۴	۱۵۰-۵۶۰	مگنتیت	۵۹۰	۷	۰۹۴/۷۱	۵۲° ۱۶' ۵۳"	۳۵° ۵۹' ۶۰"	S8
۱۰۷	۴۰۰-۶۰۰	مگهمیت و هماتیت	۶۷۵ و ۶۰۰	۶	۰۳۸/۵۵	۵۳° ۲۸' ۲۴"	۳۶° ۰۲' ۰۳"	S9
۲۹۶	۵۶۰-۵۷۰	مگنتیت و هماتیت؟	۶۷۵ و ۵۹۰	۹	۰۳۲/۴۷	۵۳° ۲۸' ۴۵"	۳۶° ۰۰' ۳۳"	S10
۱۸۴	۴۰۰-۵۷۰	مگنتیت و مگهمیت	۶۰۰ و ۵۸۰	۸	۰۶۳/۴۷	۵۳° ۲۸' ۵۷"	۳۵° ۵۹' ۳۷"	S11
۵۱۱	۱۰۰-۴۰۰	تیتانومگنتیت و مگهمیت	۶۱۰ و ۵۰۰	۸	۰۳۹/۴۴	۵۳° ۲۹' ۳۹"	۳۵° ۵۲' ۴۹"	S12
۸۳۳	۳۵۰-۵۷۰	تیتانومگنتیت و مگهمیت	۶۰۰ و ۵۴۵	۸	۱۶۱/۳۴	۵۳° ۲۸' ۵۲"	۳۵° ۵۲' ۳۸"	S13
۴۴۳	۴۰۰-۵۸۰	مگنتیت	۵۹۰	۶	غیر قابل مشاهده	۵۳° ۲۲' ۵۳"	۳۶° ۴۸' ۰۷"	S14
۴۱۴	۱۵۰-۵۸۰	مگنتیت	۵۹۰	۸	غیر قابل مشاهده	۵۳° ۲۱' ۱۸"	۳۵° ۴۷' ۰۹"	S15
۱۹۸	۱۰۰-۵۰۰	مگنتیت و مگهمیت	۶۱۰ و ۵۸۰	۷	۰۱۰/۱۰	۵۴° ۰۶' ۴۰"	۳۶° ۱۶' ۱۸"	S16
۷۶	۵۰۰-۵۶۰	غیر قابل تشخیص	غیر قابل تشخیص	۷	۰۷۸/۷۶	۵۳° ۴۸' ۵۸"	۳۶° ۰۴' ۱۸"	S17
۲۰۴	۱۰۰-۳۵۰	تیتانومگنتیت و مگنتیت	۵۹۰ و ۴۰۰، ۲۶۵	۷	۱۴۴/۳۷	۵۳° ۳۸' ۱۶"	۳۶° ۰۱' ۳۵"	S18

*دمایی که پس از آن نمونه‌ها دچار باز مغناطیس‌شدگی می‌شوند.

جدول ۲- اطلاعات سنگ‌نگاری به دست آمده از مقاطع نازک، برای منطقه مورد مطالعه.

ایستگاه	نام سنگ	بافت سنگ	زمینه (ماتریکس) سنگ (۹-۱۲٪)	سیمان سنگ
S1	تراکی بازالت حفره دار کرنائی-کلریتی شده (سنگ اسپیلیتی شده)	جریانی و در بخش‌هایی ساب افکتیک (اینترسرتال)	-----	-----
S2	ماسه سنگ متوسط دانه نیمه بالغ آهن دار لیتیک آرنایت	متوسط دانه و نیمه بالغ	سیلیس نهان بلورین به همراه تیغه‌های فیلسیلیکاته	بدون سیمان یا در بخش‌هایی آهن دار
S3	ماسه سنگ ریز دانه بالغ آهن دار فلدسپاتیک لیتیک آرنایت	ریز- متوسط دانه و بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار
S4	ماسه سنگ ریز دانه بالغ آهن دار فلدسپاتیک لیتیک آرنایت آهکی	ریز- متوسط دانه و بالغ	کمیاب و در صورت وجود سیلیس نهان بلورین و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار و آهکی
S5	ماسه سنگ ریز- متوسط دانه نیمه بالغ آهن دار فلدسپاتیک لیتیک آرنایت	ریز- متوسط دانه و نیمه بالغ	سیلیس نهان بلورین و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته و کانی اپیک	آهن دار
S6	ماسه ریز دانه نیمه بالغ- بالغ آهن دار فلدسپاتیک لیتیک آرنایت	ریز دانه و نیمه بالغ- بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار
S7	ماسه سنگ متوسط دانه بالغ آهن دار متامورفیک لیتیک آرنایت	متوسط- درشت بلور و بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار
S8	ماسه سنگ ریز- متوسط دانه نیمه بالغ آهن دار متامورفیک لیتیک آرنایت- ساب لیتیک آرنایت	ریز- متوسط دانه و نیمه بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار
S9	ماسه سنگ آهکی ریز دانه بالغ آهن دار کوارتز آرنایت ناخالص	ریز دانه و بالغ (گرد و جور شدگی)	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	کلسیتی (آغشته به اکسیدهای کدر آهن)
S10	ماسه سنگ ریز دانه بالغ آهن دار فلدسپاتیک متامورفیک لیتیک آرنایت- ساب فلدسپاتیک لیتیک آرنایت	ریز دانه و بالغ	به طور کمیاب در بخش‌هایی شامل تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته و سیلیس خیلی ریز دانه	آهن دار و در بخش‌هایی آهکی (ندرتا آثار فسیلی)
S11	ماسه سنگ متوسط دانه نیمه بالغ تا بالغ آهن دار متامورفیک لیتیک آرنایت	متوسط دانه و نیمه بالغ- بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	به طور کمیاب در بخش‌هایی آهن دار
S12	ماسه سنگ ریز دانه بالغ آهن دار متامورفیک لیتیک آرنایت	ریز دانه و نیمه بالغ	سیلیس ریز دانه و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهکی و آهن دار
S13	ماسه سنگ ریز دانه نیمه بالغ آهن دار متامورفیک لیتیک آرنایت	ریز دانه و نیمه بالغ	مجموعه‌ای از سیلیس ریز دانه و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار و در بخش‌هایی آهکی
S14	ماسه سنگ ریز دانه نیمه بالغ آهن دار متامورفیک لیتیک آرنایت	ریز دانه و نیمه بالغ	مجموعه‌ای از سیلیس ریز دانه و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار (در بخش‌هایی بدون سیمان)
S15	ماسه سنگ ریز دانه بالغ آهن دار لیتیک آرنایت	ریز دانه و بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار همراه با حفرات فراوان
S16	ماسه سنگ آهنی ریز- متوسط دانه نیمه بالغ آهن دار (کالک لیتیک آرنایت)	ریز- متوسط دانه و نیمه بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهکی و آهن دار
S17	ماسه سنگ متوسط- درشت دانه نیمه بالغ آهن دار لیتیک آرنایت	متوسط- درشت دانه و نیمه بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	بدون سیمان
S18	ماسه سنگ ریز دانه نیمه بالغ تا بالغ آهن دار لیتیک آرنایت	ریز دانه و نیمه بالغ- بالغ	سیلیس خیلی ریز و تیغه‌های ریز فیلسیلیکاته	آهن دار و گاهی آهکی

کتابنگاری

آقاباتی، س. ع.، ۱۳۸۹- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.

References

- Abrajevitch, A., Van der Voo, R., Levashov, N. M. & Bazhenov, M. L., 2007- Paleomagnetic constraints on the paleogeography and oroclinal bending of the Devonian volcanic arc in Kazakhstan. *Tectonophysics*, v. 441, p. 67-84.
- AGICO, 2007- Remasoft 3.0: AGICO, user manuel (www.agico.com).
- Alimohammadian, H., Hamidi, Z., Aslani, A., Shahidi, A., Cifelli, F. & Mattei, M., 2013- A tectonic origin of magnetic fabric in the Shemshak Group from Alborz Mts. (northern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 73, p. 419-428.
- Allen, M. B., Jones, S., Ismail Zadeh, A., Simmons, M. & Anderson, L., 2002- Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene Quaternary subsidence in the South Caspian basin. *Geology*, v. 30, p. 775-778.
- Baas, J. H., Hailwood, E. A., McCaffrey, W. D., Kay, M. & Jones, R., 2007- Directional petrological characterisation of deep-marine sandstones using grain fabric and permeability anisotropy. *Methodologies, theory, application and suggestions for integration. Earth Science Reviews* v. 82, p. 101-142.
- Bakhtari, H. R., Frizon de Lamotte, D., Aubourg, C., Hassanzadeh, J., 1998- Magnetic fabrics of Tertiary sandstones from the Arc of Fars (Eastern Zagros, Iran). *Tectonophysics*, v. 284, p. 299-316.
- Burmeister, K. C., Harrison, M. J., Marshak, S., Ferre, E. C., Bannister, R. A. & Kodama, K. P., 2009- Comparison of Fry strain ellipse and AMS ellipsoid trends to tectonic fabric trends in very low-strain sandstone of the Appalachian fold-thrust belt. *Journal of Structural Geology*, v. 31, p. 1028-1038.
- Butler, R. F., 2004- Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Electronic Edition, 238 p.

- Cifelli, F., Mattei, M. & Della Seta, M., 2008- Calabrian Arc oroclinal bending: The role of subduction. *Tectonics*, v. 27, TC5001.
- Cocks, L. R. M. & Torsvik, T. H., 2007- Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic. *Earth-Science Reviews*, v. 82, p. 29–74.
- Craddock, J. P., Anziano, J., Wirth, K., Vervoort, J. D., Singer, B. & Zhang, X., 2007- Structure, geochemistry and geochronology of a Penokean Lamprophyre Dike Swarm, Archean Wawa Terrane, Little Presque Isle, Michigan, USA. *Precambrian Research* v. 157, p. 50–70.
- Evans, M. E. & Heller, F., 2003- *Environmental Magnetism*. Academic Press, An Imprint of Elsevier Science, 297 p.
- Folk, R. L., 1987- *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, 182 p.
- Fürsich, F. T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K. & Majidifard, M. R., 2009- Lithostratigraphy of the Upper Triassic Middle Jurassic Shemshak Group of Northern Iran. *Geological Society, London, Special Publication*, v. 312, p. 129-160.
- Ghalamghash, J., Bouchez, J. L., Vosoughi-Abedini, M. & Nédélec, A., 2009- 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*, v. 36, p. 303–317.
- Guest, B., Stockli, D. F., Grove, M., Axen, G. J., Lam, P.S. & Hassanzadeh, J., 2006- Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, v. 118, p.1507–1521.
- Hrouda, F., Chlupáčová, M. & Mrázová, Š., 2006- Low-field variation of magnetic susceptibility as a tool for magnetic mineralogy of rocks. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* v. 154, p. 323–336.
- Hrouda, F., Faryad, S. W., Chlupáčová, M., Jeřábek, P., Kratinová, Z., 2009- Determination of field-independent and field-dependent components of anisotropy of susceptibility through standard AMS measurement in variable low fields II: An example from the ultramafic body and host granulitic rocks at Bory in the Moldanubian Zone of Western Moravia, Czech Republic. *Tectonophysics*, v. 466, p. 123–134.
- Hrouda, F., 2010- Modeling relationship between bulk susceptibility and AMS in rock consisting of two magnetic fractions represented by ferromagnetic and paramagnetic minerals: Implication for understanding magnetic fabric in deformed rocks. *Journal of geological society of India*, v. 75, p. 254-266.
- Humbert, F., Robion, P., Louis, L., Bartier, D., Ledéser, B. & Song, S. R., 2012- Magnetic inference of in situ open microcracks in sandstone samples from the Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project (TCDP). *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 45, p. 179–189.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M.B., Berberian, M., 2002- Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*, v. 48, p. 214-245.
- LaBerge, R.D., Porreca, M., Mattei, M., Giordano, G. & Cas, R. A. F., 2009- Meandering flow of a pyroclastic density current documented by the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) in the quartz latite ignimbrite of the Pleistocene Monte Cimino volcanic centre (central Italy). *Tectonophysics*, v. 466, p. 64–78.
- Lanza, R. & Meloni, A., 2006- *The Earth's Magnetism*. Springer, 278 p.
- Maffione, M., Speranza, F., Faccenna, C. & Rossello, E., 2010- Paleomagnetic evidence for a pre-early Eocene (~50 Ma) bending of the Patagonian orocline (Tierra del Fuego, Argentina): Paleogeographic and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 289, p. 273–286.
- Martin-Hernandez, F. & Ferre, E. C., 2007- Separation of paramagnetic and ferrimagnetic anisotropies: A review. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, B0310.
- Meijers, M. J. M., Kaymakci, N. & van Hinsbergen, D. J. J., 2010- Late Cretaceous to Paleocene oroclinal bending in the central Pontides (Turkey). *Tectonics*, v. 29, TC4016.
- Muttoni, G., Mattei, M., Balini, M., Zanchi, A., Gaetani, M. & Berra, F., 2009- The drift history of Iran from the Ordovician to the Triassic. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 312, p. 7-29.
- Opdyke N. D. & Chanell, J. E. T., 1996- *Magnetic Stratigraphy*. Department of Geology, University of Florida, Gainesville, Florida, 346 P.
- Pares, J. M., van der Pluijma, B. A. & Dinares-Turell, J., 1999- Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, northern Spain). *Tectonophysics*, v. 307, p. 1–14.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E. & Siever, R., 1987- *Sand and Sandstone*, 2nd ed. Springer-Verlag, 553 p.
- Rousse, S., Gilder, S., Farber, D., McNulty, B. & Torres, V., 2002- Paleomagnetic evidence for rapid vertical-axis rotation in the Peruvian Cordillera ca. 8 Ma. *Geology*, v. 30; no. 1; p. 75–78.
- Seyed-Emami, K., 2003- Triassic in Iran. *Facies*, p. 4895–106.
- Soto, R., Larrasoana, J. C., Arlegui, L. E., Beamud, E., Oliva-Urcia, B. & Simón, J. L., 2009- Reliability of magnetic fabric of weakly deformed mudrocks as a palaeostress indicator in compressive settings. *Journal of Structural Geology*, v. 31, p. 512–522.
- Tauxe, L., 2007- lectures in palaeomagnetism, chapter 3: Induced and Remanent Magnetism (<http://earth.ref.org/Magic/books/Tauxe/2007>).
- Weil, A. B., Yonkee, A. & Sussman, A. J., 2010- Reconstructing the kinematic evolution of curved mountain belt: A paleomagnetic study of Triassic red beds from the Wyoming salient, Sevier thrust belt, U.S.A.. *Geological Society of America Bulletin*, v. 122, p.3-23.
- Wilmsen, M., Fürsich, F. T., Seyed-Emami, K., Majidifard, M. R. & Taheri, J., 2009- The Cimmerian orogeny in northern Iran: tectono-stratigraphic evidence from the foreland. *Terra Nova*, v. 21, p. 211-218.