

## تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و مغناطیس‌سنجی در کانسار آهن آپاتیت‌دار ده‌زمان، استان خراسان رضوی

حسین حاجی میرزاجان<sup>۱</sup>، آزاده ملکزاده شفارودی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا حیدریان شهری<sup>۱</sup> و سید مسعود همام<sup>۱</sup>

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۲) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۲

### چکیده

کانسار آهن ده‌زمان در جنوب‌غربی استان خراسان رضوی و در شمال‌شرقی زون زمین‌ساختی کاشمر- کرمان واقع شده است. زمین‌شناسی منطقه شامل واحدهای رسوبی- آتشفشانی دگرگون‌شده و توده‌های نفوذی گرانیتی به سن پرکامبرین بالایی- کامبرین زیرین است. کانه‌زایی آهن آپاتیت‌دار به شکل رگه‌های مگنتیت  $\pm$  اسپیکولاریت در بخش مرکزی و مگنتیت- اسپیکولاریت در بخش شرقی در سنگ میزبان متاریولیت تا متاریوداسیت تشکیل شده است. کانی‌های اولیه شامل مگنتیت، اسپیکولاریت، آپاتیت و جزیی کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه مالاکیت و همتایت است. کلریتی‌شدن، کربناتی‌شدن، سیلیسی‌شدن و بیوتیتی‌شدن مهمترین آلتراسیون‌های همراه با رگه‌ها هستند. عیار آهن بین ۵۶ تا ۶۷ درصد و مقدار FeO بین ۰/۲۹ تا ۲۰/۱۳ درصد متغیر است. مقدار FeO رابطه معکوس با اسپیکولاریت در کانسنگ دارد. همچنین مقادیر قابل توجه عناصر نادر خاکی به‌ویژه عناصر LREE در کانسنگ دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که مقدار کل عناصر نادر خاکی اغلب بیش از ۱۰۰ گرم در تن بوده و به ۴۸۲۷ گرم در تن نیز می‌رسد. سنگ میزبان، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، آلتراسیون و ژئوشیمی این بخش از کانسار ده‌زمان شبیه به ذخایر آهن نوع کایروناس است.

اختلاف قابل توجه پذیرفتاری مغناطیسی رگه‌های آهن آپاتیت‌دار ( $SI = 5.000 \times 10^{-5}$  تا  $SI = 2.000 \times 10^{-3}$ ) و سنگ میزبان آتشفشانی (صفر تا  $SI = 10^{-5} \times 70$ ) باعث شده است تا روش مغناطیس‌سنجی و تلفیق آن با داده‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی بهترین روش برای اکتشاف آهن و عناصر نادر خاکی همراه با آن در منطقه باشد. تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی در بخش مرکزی و شرقی به ترتیب ۸۹۸۱ گاما و ۱۵۵۹۲ گاماست. نقشه RTP قسمت شرقی نشان‌دهنده وجود ناهنجاری با روند تقریباً شمالی- جنوبی است که گسترش عرضی آن در عمق به بیش از ۲۰ متر می‌رسد. نقشه‌های فراسو می‌رساند که عمق منبع ایجادکننده ناهنجاری (کانی‌سازی مگنتیت) تا بیش از ۵۰ متر ادامه دارد. در مرکز این زون به دلیل افزایش میزان اسپیکولاریت در رگه‌ها، ناهنجاری مغناطیسی پاسخ مناسبی ندارد. بر پایه ناهنجاری‌های مغناطیسی، زمین‌شناسی، کانی‌سازی و شیب رگه‌ها در سطح تعداد ۴ نقطه حفاری برای بخش شرقی پیشنهاد شد. ناهنجاری مغناطیسی در پنجره مرکزی دارای روند شرقی- غربی با عرض کم (حدود ۲۵ متر) است و انطباق خوبی با رخنمون‌های سطحی دارد. عمق کانی‌زایی بخش شرقی این زون تا بیش از ۵۰ متر ادامه دارد. حرکت گسل‌های راست‌گرد در قسمت میانی این منطقه باعث نبود کانه‌زایی و نبود پیوستگی ناهنجاری مغناطیسی شده است. بر پایه ناهنجاری‌های مغناطیسی و شیب رگه‌ها در سطح، دو نقطه حفاری برای بخش مرکزی پیشنهاد شد.

**واژه‌های کلیدی:** متاریولیت تا متاریوداسیت، مگنتیت  $\pm$  اسپیکولاریت، عناصر نادر خاکی، مغناطیس‌سنجی، ده‌زمان

## مقدمه

معدن آهن ده‌زمان در ۳۰ کیلومتری جنوب‌غربی بردسکن در استان خراسان رضوی و در محدوده طول‌های جغرافیایی  $46^{\circ}50'$  تا  $57^{\circ}$  تا  $48^{\circ}00'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $34^{\circ}57'35''$  شمالی قرار دارد. این معدن از نظر ساختاری در شمال‌شرق کمربند زمین‌ساختی کاشمر- کرمان قرار دارد (شکل ۱). کانه‌زایی آهن در کانسار ده‌زمان به دو شکل کانسنگ هماتی و بخش مگنتیت-اسپیکولاریت آپاتیت‌دار دیده می‌شود. کانه‌زایی هماتیت از نوع آهن رسوبی و نوع راپیتان معرفی شده است (Imanpour et al., 2017). بر اساس بررسی‌های ساخت و بافت، کانی‌شناختی، آلتراسیون و ژئوشیمی (Hajimirzajan et al., 2017a; Hajimirzajan et al., 2017b) بخش مگنتیت-اسپیکولاریت آپاتیت‌دار کانسار ده‌زمان شباهت زیادی به ذخایر آهن نوع کایرونا دارد. بهره‌برداری از این معدن از گذشته تاکنون معطوف به بخش هماتی بوده؛ به طوری که تعداد زیادی تونل در آن حفر شده و به شکل زیرزمینی در حال برداشت است؛ اما به کانسنگ آهن آپاتیت‌دار ده‌زمان توجه خاصی نشده است. رخنمون کم کانی‌سازی در سطح زمین، نبود رخنمون سنگ منشأ، گسترش و نوع آلتراسیون‌ها و نیز ریزدانه بودن یا ادخال بودن آپاتیت‌ها بیانگر آن است که هم‌اکنون در بخش‌های بالایی کانی‌سازی نوع کایرونا هستیم و برای دستیابی به اطلاعات بیشتر و جامع‌تر به حفاری نیاز است (Hajimirzajan et al., 2017 b). از طرفی این منطقه بسیار تکتونیزه بوده و فعالیت گسل‌ها موجب جابه‌جایی‌های متعدد رگه‌های کانی‌سازی شده است. از آنجایی که مگنتیت مهمترین و فراوانترین کانی موجود در این بخش از کانی‌سازی ده‌زمان است و سنگ میزبان آن یک واحد آتشفشانی آلتیره شده با میزان پذیرفتاری مغناطیسی کم است؛ روش مغناطیس‌سنجی بهترین روش برای تعیین موقعیت، گسترش و عمق کانی‌سازی محسوب می‌شود و بر پایه آن می‌توان نقاط مناسب حفاری را پیدا کرد. علاوه بر آن به دلیل بالابودن عناصر نادر خاکی در این نوع ذخایر، روش

مغناطیس‌سنجی بهترین روش غیرمستقیم برای اکتشاف این نوع عناصر است. هدف از این پژوهش، تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف بخش‌های پنهان بالقوه کانی‌سازی، عمق و گسترش کانی‌سازی مگنتیت-اسپیکولاریت آپاتیت‌دار ده‌زمان و در نهایت تعیین نقاط حفاری است. بررسی‌های این کانسار می‌تواند به‌عنوان الگویی برای اکتشاف کانسارهای مشابه پیشنهاد شود.

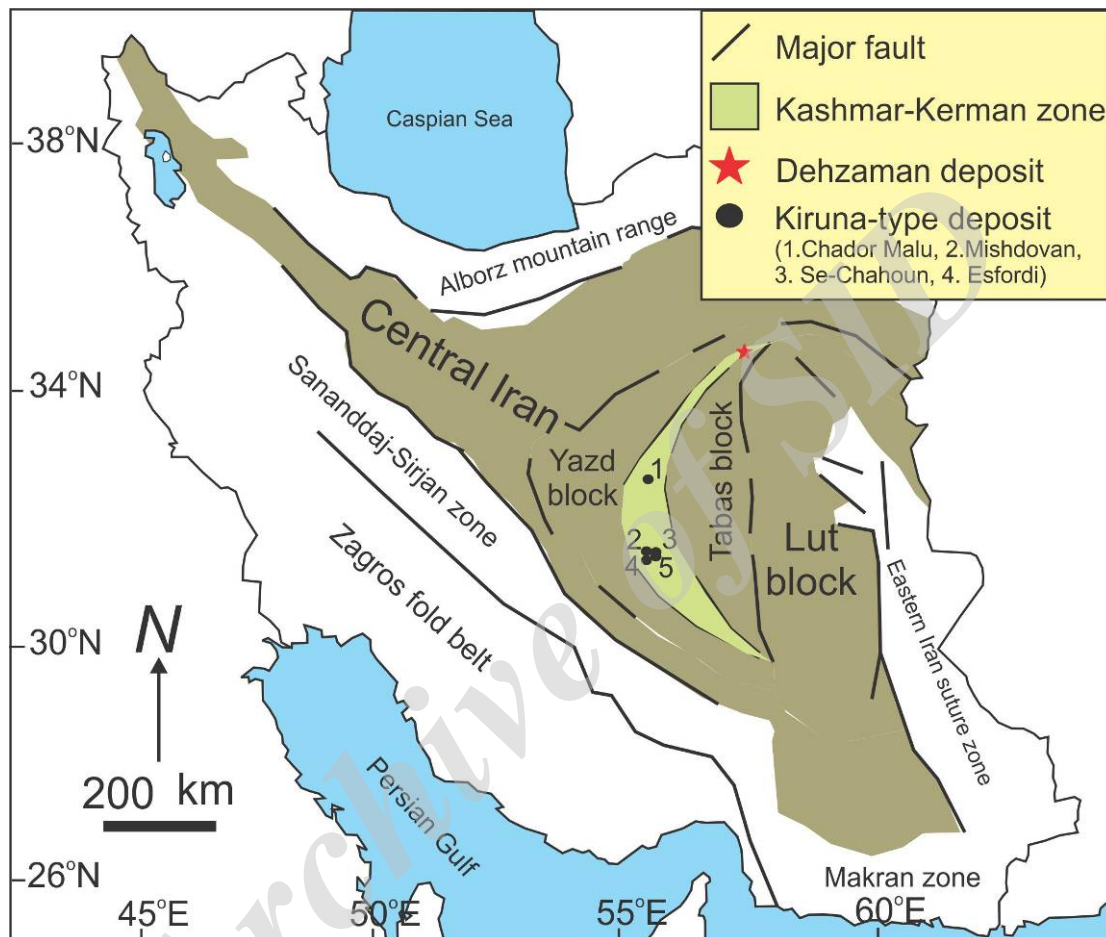
## روش مطالعه

برای دستیابی به اهداف مورد نظر این پژوهش، پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری، تعداد ۶۵ مقطع نازک و ۳۰ بلوک صیقلی برای بررسی‌های پتروگرافی، آلتراسیون و کانی‌سازی تهیه و مطالعه شدند. سپس بر پایه برداشت‌های صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی، نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ در نرم افزار ArcGIS تهیه شد. تعداد ۷ نمونه از زون کانی‌سازی مگنتیت-اسپیکولاریت آپاتیت‌دار برای تعیین عیار آهن به روش شیمی‌تر به شرکت تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمیتیس شرق ارسال شد. همچنین ۹ نمونه از کانسنگ پس از خریدایش و نمایش برای آنالیز عناصر نادر خاکی و برخی عناصر فرعی به روش ICP-MS به آزمایشگاه ACME کانادا فرستاده شد. روش آماده‌سازی ذوب قلیایی با کد LF100 بوده است. در این روش ۰/۱ گرم از نمونه در لیتیوم متابورات/تترابورات ذوب و در اسید سیتربیک هضم می‌شود.

برای برداشت‌های مغناطیس‌سنجی و به‌دست آوردن اطمینان از کارایی این روش در منطقه، ابتدا اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیس بیش از ۱۰۰ نمونه از کانسنگ و واحد سنگ آتشفشانی میزبان با دستگاه GMS2 سینترکس ساخت کشور کانادا و متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. سپس اندازه‌گیری شدت کل میدان مغناطیسی در ۲۲۲۳ نقطه و در قالب ۵۱ پروفیل در دو منطقه مرکزی و شرقی طراحی شد. برداشت‌ها توسط دستگاه مگنتومتر مدل Geometrics G856

تهیه شدند. سرانجام با تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی و مغناطیسی‌سنجی، تفسیرها و تحلیل‌های لازم انجام شد.

متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. پس از اعمال تصحیحات لازم، نقشه‌های TMI، RTP، فراسو، گرادیان قائم و سیگنال تحلیلی به کمک نرم‌افزار Geosoft Oasismontaj



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کانسار آهن ده‌زمان در شمال شرقی ایران و زون زمین‌ساختی کاشمر- کرمان. موقعیت کانسارهای بزرگ نوع کایرونا در مرکز این زون نشان داده شده است.

**Fig. 1.** Location of Dehzaman iron deposit in northeast of Iran and Kashmar-Kerman Tectonic Zone. Location of large Kiruna-type deposits is shown in central of this zone.

### زمین‌شناسی

جنوبی در قسمت شمال دارای انحنا در جهت شمال‌شرق است و در جنوب به سمت جنوب‌شرق میل دارد (شکل ۱) (Ramezani and Tucker, 2003). وجود تعداد زیادی اندیس و معدن آهن در این کمربند مانند چغارت، چادرملو، میشدوان، سه چاهون، ناریگان، رباط پشت‌بادام، جلال‌آباد، لکه‌سیاه، آنومالی شمالی و اسفوردی موجب شده است تا این

معدن آهن ده‌زمان از نظر ساختاری در قسمت شمال‌شرقی کمربند زمین‌ساختی کاشمر- کرمان یا همان زون پشت‌بادام در خرد قاره ایران مرکزی قرار دارد. کمربند کمانی و ساختاری کاشمر- کرمان با طول حدود ۶۰۰ کیلومتر با مرزهای گسله، جداکننده بلوک یزد و طبس است. این کمربند با امتداد شمالی-

مجدد یافته و مرمر، ب) آهک دولومیتی تبلور مجدد یافته کرم تا زرد رنگ و پ) آهک دولومیتی تبلور مجدد یافته است. حرکات زمین‌ساختی باعث شده است که این طبقات رسوبی از حالت افقی خارج و به صورت شیب‌دار به سمت شمال دیده شوند. پذیرفتاری مغناطیسی در کل واحد کربناته صفر است. واحد سرسیت‌شیت با مرز شارپ، هم‌راستا با واحدهای کربناته دگرگون‌شده در شمال و جنوب لایه سنگ آهک دولومیتی تبلور مجدد یافته با روند شرقی- غربی دیده می‌شود. در شمال و هم‌راستا با این واحد، باند بزرگ کانه‌زایی هماتیت رسوبی به طول ۲۵۰۰ متر قرار دارد (شکل ۲). مجموع سرسیت‌شیت و باند هماتیت دارای پذیرفتاری مغناطیسی صفر تا  $SI \times 10^{-5}$  هستند.

واحد آتشفشانی متاریولیت- متاریوداسیت به‌طور عمده در بخش مرکزی و شرقی محدوده دیده می‌شود (شکل ۲). این واحد مهمترین لیتولوژی منطقه برای برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی است. این واحد در نقشه زمین‌شناسی قاسم‌آباد به‌عنوان ارتوگنیس با سن نئوپروتروزوئیک معرفی شده است (Sahandi et al., 2010). اما بررسی‌های این پژوهش نشان داد این واحد، یک گدازه ریولیتی تا ریوداسیتی است که تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای و دینامیکی قرار گرفته است. این واحد میزبان اصلی کانه‌زایی مگنتیت- اسپیکولاریت آپاتیت‌دار است. بافت غالب در این سنگ‌ها پورفیری با زمینه بسیار دانه ریز است و درشت‌بلورهای فلدسپار آلکالی، پلاژیوکلاز و کوارتز در یک زمینه از فلدسپار و کوارتز همراه با کانی‌های ثانویه دیده می‌شوند. زیرکن و مگنتیت مهمترین کانی‌های فرعی آن هستند. هاله آلتراسیونی کلریتی شدید و کربناتی در اطراف رگه‌های کانی‌سازی در این واحد آتشفشانی دگرگون‌شده دیده می‌شود. پذیرفتاری این واحد در مناطق بدون کانی‌زایی بین صفر تا  $SI \times 10^{-5}$  متغیر است.

واحد سینوگرانیت با رنگ روشن در شمال‌غرب محدوده قرار گرفته و دارای مرزهای گسله با واحد متاریولیت- متاریوداست است. بر اساس بررسی روستی و همکاران (Rossetti et al.,

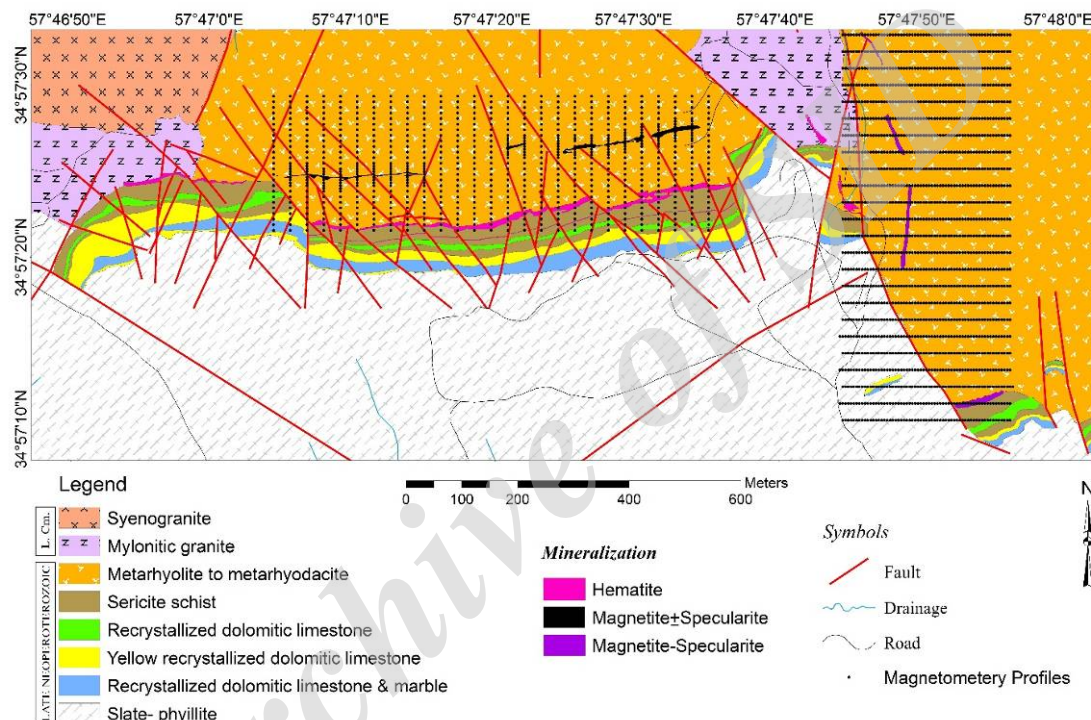
زون مهمترین ایالت فلززایی آهن ایران محسوب شود (Daliran, 1990; Foster and Jafarzadeh, 1994; Daliran, 2002; Moore and Modabberi, 2003; Torab and Lehmann, 2007; Jami et al., 2007; Daliran et al., 2007; Daliran et al., 2009; Daliran et al., 2010; Bonyadiet al., 2011).

در شمال‌شرقی زون زمین‌ساختی کاشمر- کرمان واحدهای سنگی از پرکامبرین تا نئوژن رخنمون دارند. اسلیت و میکاشیست با سن پرکامبرین بالایی- کامبرین زیرین قدیمی‌ترین و گسترده‌ترین واحد سنگی این منطقه هستند که طی کوه‌زایی کاتانگایی دچار دگرگونی شده‌اند (Nozaem et al., 2013). توده‌های گرانیتهی در سنگ‌های دگرگونی نفوذ کرده‌اند که بر اساس بررسی‌های سن‌سنجی انجام‌شده به روش U-Pb بر روی کانی زیرکن، سن آنها بین ۵۳۵ تا ۵۷۵ میلیون سال پیش مطابق با زمان نئوپروتروزوئیک پسین- کامبرین است (Rossetti et al., 2015). مجموعه سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک تا کرتاسه نیز گسترش قابل توجهی در منطقه دارند و شامل سنگ آهک، دولومیت، شیل و ماسه‌سنگ است. کنگلومرا، سنگ‌های تبخیری، مارن قرمز و ماسه‌سنگ نئوژن جوانترین واحدهای سنگی منطقه هستند که به سمت شمال در زیر رسوبات کواترنری مدفون می‌شوند.

مجموعه آتشفشانی- رسوبی دگرگون‌شده منطقه معدن ده‌زمان همگی متعلق به نئوپروتروزوئیک بالایی- کامبرین زیرین هستند که تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین و دگرشکلی حاصل از فعالیت‌های زیاد زمین‌ساختی قرار گرفته‌اند (Nozaem et al., 2014). قدیمی‌ترین واحد منطقه اسلیت و فیلیت‌های سیاه و خاکستری با میان‌لایه‌های کوارتزیت است که در جنوب منطقه گسترش دارند. وجود رگه‌چه‌های فراوان کوارتز شیری با ساخت بودیناژ در جهت شیت‌توزیته، ویژگی بارز این واحد است که تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای شکل گرفته‌اند. پذیرفتاری مغناطیسی این واحد بین صفر تا  $SI \times 10^{-5}$  است. واحد کربناته دگرگون‌شده با روند شرقی- غربی به ترتیب از قدیم به جدید شامل: الف) آهک دولومیتی تبلور

زمین‌ساختی، گرانیت‌ها در حاشیه و در محل گسل‌ها دچار دگرگونی شدید دینامیکی و همچنین باعث تشکیل گرانیت‌های میلوئیتی شده‌اند. این حالت به‌طور عمده در غرب و شمال‌شرق منطقه دیده می‌شود (شکل ۲). پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای گرانیتی در حد بسیار کم و نزدیک به صفر است.

سن این توده نفوذی کامبرین زیرین است. بافت آن هیدرومورف گرانولار بوده و کانی‌های اصلی آن شامل کوارتز، فلدسپار آلکالی، پلاژیوکلاز، بیوتیت و مسکویت است که در برخی قسمت‌ها مقدار کانی بیوتیت در آن افزایش می‌یابد. زیرکن و آپاتیت نیز مهمترین کانی‌های فرعی این واحد هستند. کانی‌سازی با این توده دیده نمی‌شود. بر اثر حرکات شدید



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی - کانی‌سازی کانسار ده‌زمان به همراه ایستگاه‌های برداشت مغناطیس‌سنجی زمینی

Fig. 2. Geology- Mineralization map of Dehzaman deposit with magnetometry stations

به صورت شرقی- غربی با شیب ۸۵ درجه به سمت شمال رخنمون دارد. طول رگه کانی‌سازی در قسمت مرکزی حداکثر ۷۵۰ متر با عرض ۲ تا ۵ متر است که در قسمت‌های میانی به‌صورت منقطع است. وجود گسل‌های امتداد لغز راست‌گرد و چپ‌گرد بعد از کانی‌زایی در قسمت میانی باعث جابه‌جایی و نبود پیوستگی زون کانه‌دار در این قسمت شده است (شکل ۲). کانی‌سازی مگنتیت- اسپیکولاریت در قسمت شرقی دارای روند شمالی- جنوبی و شیب ۷۵ درجه به سمت شرق است. مقدار

### کانی‌سازی و آلتراسیون

کانی‌سازی مگنتیت ± اسپیکولاریت و مگنتیت- اسپیکولاریت در کانسار ده‌زمان در کل کنترل ساختاری داشته و به شکل رگه و رگه‌چه در زون‌های گسلی و سطوح درز و شکستگی واحد متاریولیت- متاریوداسیت اواخر نئوپروتروزوئیک تشکیل شده است و فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید منطقه باعث شده است تا جابه‌جایی‌های متعددی در آن صورت گیرد (شکل ۲). بخش کانی‌سازی مگنتیت ± اسپیکولاریت در قسمت مرکزی محدوده

یک سانتی متر دیده می‌شوند (شکل ۳- D) و آثار دگرگونی ناحیه‌ای و دگرشکلی همانند مگنتیت در آنها وجود دارد. ریزبلورهای آپاتیت به شکل ادخال در داخل مگنتیت و اسپیکولاریت یا آزاد همراه با این دو کانی وجود دارد (شکل ۳- E). اندازه این کانی اغلب کمتر از ۳۰ میکرون است. مقدار آپاتیت در رگه‌های بخش شرقی بیشتر است. کم بودن کانی اولیه و ثانویه مس‌دار در محدوده نشان می‌دهد که مقدار مس در سیال کانه‌دار پایین بوده است (شکل ۳- F). شواهد کانی‌شناختی و ساخت و بافت این بخش از کانی‌سازی کانسار ده‌زمان شبیه به کانسارهای آهن نوع کایروناست.

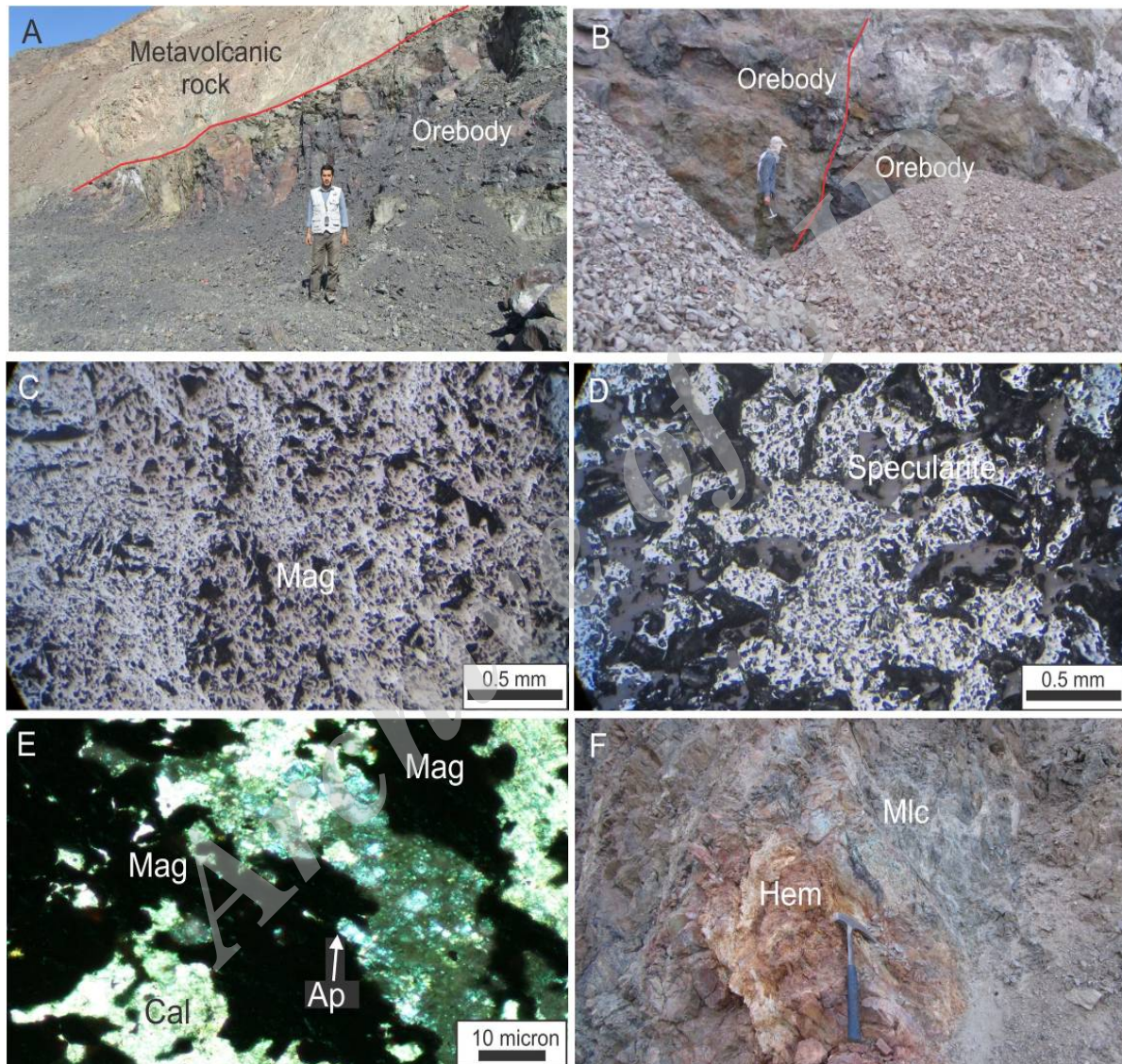
آلتراسیون در محدوده کانسار ده‌زمان غالباً محدود به بخش‌های کانه‌دار مگنتیت  $\pm$  اسپیکولاریت و مگنتیت-اسپیکولاریت آپاتیت‌دار است و به انواع کلریتی، کربناتی، سیلیسی، بیوتیتی و تورمالینی قابل تقسیم است. کلریتی شدن مهمترین آلتراسیون همراه با کانه‌زایی مگنتیت در منطقه است. مقدار کلریت در اطراف رگه‌های اصلی کانی‌سازی به حدود ۳۰ درصد حجمی سنگ می‌رسد؛ اما با دور شدن از محل کانی‌سازی به کمتر از ۵ درصد کاهش می‌یابد. رنگ سبز تیره این کانی در اطراف رنگ سیاه رگه‌های مگنتیت-اسپیکولاریت یکی از ویژگی‌های شاخص این بخش از کانسار ده‌زمان است (شکل ۴- A). علاوه بر کلریت‌های توده‌ای در اطراف رگه‌ها، رگه‌چه‌های کلریت‌دار متعدد همراه با کانی‌های فلزی در واحد متاریولیت-متاریوداسیت نیز دیده می‌شود (شکل ۴- B). کلسیت دیگر کانی باطله مهم منطقه است که همراه با کلریت در اطراف رگه‌های کانه‌دار دیده می‌شود. در واحد آتشفشانی دگرگون‌شده نیز کلسیت به شکل جانشینی در پلاژیو کلاز، پراکنده در متن سنگ و رگه‌چه‌های کلسیت-مگنتیت، کلسیت-کوارتز-اسپیکولاریت و کلریت-کلسیت-مگنتیت حضور دارد. همچنین رگه‌چه‌های تأخیری از کلسیت، رگه‌چه‌های اولیه کانی‌سازی را قطع می‌کنند (شکل ۴- C). آلتراسیون سیلیسی به شکل کوارتز ثانویه به مقدار کمتر از ۱۰ درصد در رگه‌های اصلی وجود دارد. علاوه بر آن رگه‌چه‌هایی از کوارتز همراه با

اسپیکولاریت در رگه‌های شرقی به‌خصوص در قسمت میانی آن بیشتر است. کانی‌سازی در این بخش نیز به‌صورت منقطع رخنمون دارد که حداکثر طول کانی‌سازی مشاهده شده در این قسمت حدود ۷۰۰ متر و عرض حدود ۳ تا ۵ متر است (شکل ۲). مرز گسله به‌صورت آینه گسل در مرز زون کانه‌دار و واحد متاریولیت-متاریوداسیت هم در بخش شرقی و هم بخش مرکزی دیده می‌شود (شکل ۳- A). حرکات زمین‌ساختی تأخیری باعث شده مرز گسله توسط آنها قطع شود و همچنین باعث جابه‌جایی رگه کانی‌سازی در برخی نقاط شده‌اند (شکل ۳- B). همچنین آثار دگرشکلی به‌صورت بودین‌شدگی و تغییر ضخامت در رگه‌های کانه‌دار دیده می‌شود. علاوه بر رگه‌های اصلی، بافت رگه-رگه‌چه‌ای و افشان در اطراف رگه‌های اصلی مگنتیت  $\pm$  اسپیکولاریت و مگنتیت-اسپیکولاریت و در سنگ میزبان آتشفشانی دیده می‌شود که با دور شدن از رگه‌ها، مقدار آن کاهش می‌یابد. ضخامت رگه‌چه‌ها اغلب از چند میلی‌متر تا حدود ۱۰ سانتی‌متر متغیر است. همچنین ساخت برشی نیز با قطعاتی از سنگ میزبان آلتیره‌شده در داخل سیمانی از مگنتیت، اسپیکولاریت  $\pm$  آپاتیت و کانی‌های باطله در زون‌های گسلی دیده می‌شود.

کانی‌شناسی کانسار بسیار ساده بوده و شامل مگنتیت و اسپیکولاریت با ریزبلورها یا ادخال‌های آپاتیت و به مقدار ناچیز کالکوپیریت است که با باطله‌های کلریت، کربنات، کوارتز، بیوتیت  $\pm$  تورمالین همراهی می‌شود. هماتیت و به مقدار کمتر مالاکیت مهمترین کانی‌های ثانویه هستند. مگنتیت که مهمترین و فراوانترین کانه فلزی این بخش از کانی‌سازی است؛ اغلب بی‌شکل بوده و در برخی موارد به‌صورت شکل‌دار در اندازه‌های ۰/۱ میلی‌متر تا ۱۱ میلی‌متر نیز دیده می‌شود. این کانی به‌صورت بخشی و یا گاهی به‌طور کامل به هماتیت تبدیل شده است (شکل ۳- C). آثاری همچون دگرشکلی، بودین‌شدگی، سایه و اتنشی و دور زدن برگ‌وارگی در مگنتیت دیده می‌شود که نشان‌دهنده تشکیل کانی‌سازی قبل از وقوع دگرگونی ناحیه‌ای است. اسپیکولاریت‌ها به شکل‌های تیغه‌ای و صفحه‌ای تا اندازه

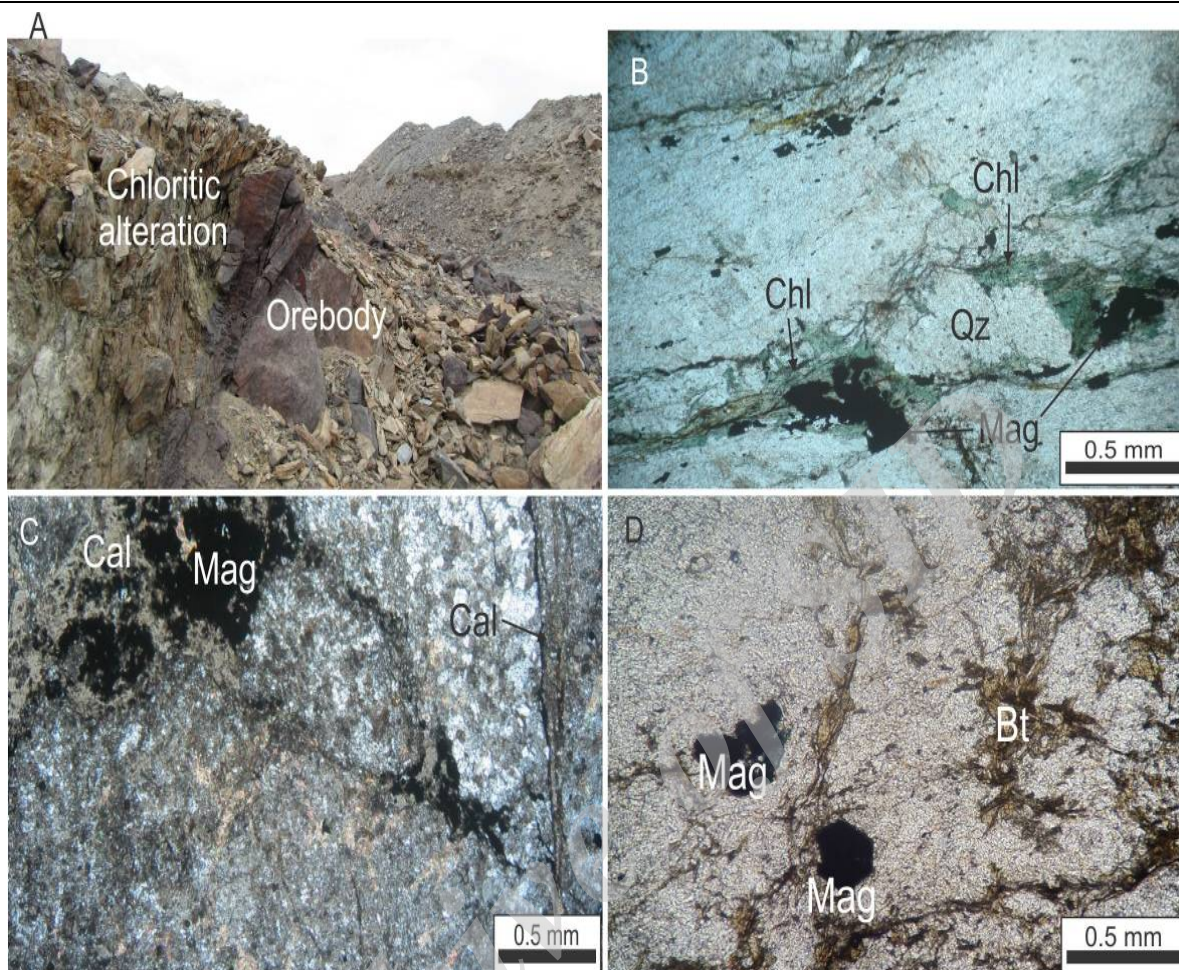
کمتر از ۵ درصد در واحد متاریولیت-متاریوداسیت دیده می‌شود (شکل ۴- D). مقدار تورمالین کمتر از ۳ درصد است و در برخی رگه‌های مگنتیت و بیوتیت‌دار حضور دارد.

مگنتیت، اسپیکولاریت، کلسیت، کلریت، بیوتیت و تورمالین در سنگ آتشفشانی میزبان و در اطراف رگه‌ها دیده می‌شود (شکل ۴- B). پولک‌های بیوتیت ثانویه اغلب به شکل رگه‌چه‌ای و کمتر پراکنده همراه با مگنتیت، کلریت، کوارتز و تورمالین



شکل ۳. تصاویری از کانی‌سازی آهن آپاتیت‌دار ده‌زمان، A: ماده معدنی و مرز گسلی آن با واحد سنگ آتشفشانی دگرگون شده میزبان، B: جابه‌جایی ماده معدنی توسط گسل‌های جوانتر بعد از کانی‌سازی، C: مگنتیت مارتیتیته شده در نور PPL، D: دانه‌های تیغه‌ای تا صفحه‌ای اسپیکولاریت در نور PPL، E: آپاتیت ریزدانه همراه با مگنتیت و کلسیت در نور XPL و F: ملاکیت و هماتیت در صحرا (Mag = مگنتیت، Cal = کلسیت، Ap = آپاتیت، Mlc = ملاکیت، Hem = هماتیت (Whitney and Evans, 2010)).

**Fig. 3.** Images of Dehzaman apatite-bearing iron mineralization. A: Orebody and metavolcanic host rock with faulting contact, B: Displacement of orebody by younger post-mineralization fault, C: Martitized magnetite in PPL, D: Bladed to sheeted specularite in PPL, E: Fine-grained apatite associated with magnetite and calcite in XPL, and F: Malachite and hematite in field (Mag = magnetite, Cal = calcite, Ap = apatite, Mlc = malachite, Hem = hematite (Whitney and Evans, 2010)).



شکل ۴. تصاویری از آلتراسیون آهن آپاتیت‌دار ده‌زمان، A: ماده معدنی همراه با آلتراسیون کلریتی، B: رگه‌چه کلریت-کوارتز-مگنتیت در سنگ میزبان در نور PPL، C: رگه‌چه کلسیت-مگنتیت و رگه‌چه کلسیت تأخیری در نور XPL و D: بیوتیت ثانویه و مگنتیت افشان در نور PPL (Whitney and Evans, 2010).

**Fig. 4.** Images of Dehzaman apatite-bearing iron alteration. A: Orebody associated with chloritic alteration, B: Chlorite-quartz-magnetite veinlet within host rock in PPL, C: Calcite-magnetite veinlet and later calcite veinlet in XPL, and D: Secondary biotite and disseminated magnetite in PPL (Mag = magnetite, Cal = calcite, Qz = quartz, Chl = chlorite, Bt = biotite (Whitney and Evans, 2010)).

### ژئوشیمی

برای تعیین عیار آهن در کانسنگ این بخش از کانی‌سازی کانسار ده‌زمان، تعداد ۷ نمونه به روش شیمی تر تجزیه شدند. در این نمونه‌ها کل آهن از ۵۶ تا ۶۷ درصد در تغییر است که نشان‌دهنده خلوص بالای کانی‌سازی آهن در منطقه است. همچنین میزان FeO بین ۰/۲۹ تا ۲۰/۱۳ متغیر است. تلفیق بررسی‌های کانی‌شناسی ۷ نمونه یادشده و اندازه‌گیری مقدار پذیرفتاری مغناطیسی آنها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار کانی

اسپیکولاریت در کانسنگ، میزان FeO و پذیرفتاری مغناطیسی نمونه کاهش یافته است (جدول ۱). به عبارتی همبستگی مثبتی بین مقدار مگنتیت، بالارفتن پذیرفتاری مغناطیسی و مقدار درصد FeO وجود دارد. بنابراین می‌توان انتظار داشت در طی برداشت مغناطیس‌سنجی زمینی از زون کانه‌دار، مناطق با میزان بالاتر اسپیکولاریت، دارای ناهنجاری پایین‌تر مغناطیسی باشند، مشروط بر این که مغناطیس باقی‌مانده وجود نداشته باشد.



جدول ۱. نتایج آنالیز شیمی تر زون کانی‌سازی مگنتیت ± اسپیکولاریت و مگنتیت- اسپیکولاریت معدن ده‌زمان همراه با پذیرفتاری مغناطیسی

**Table 1.** Wet geochemistry analysis of magnetite±specularite and magnetite-specularite zones associated with magnetic susceptibility of Dehزامن Mine.

Sample	Fe(T)%	FeO%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> %	Magnetic Susceptibility (*10 <sup>-5</sup> SI)
H2	66.09	5.70	75.39	18.36	13000
H5	67.21	8.55	67.50	27.54	15000
H14	67.28	20.13	29.02	64.85	200000
H15	66.22	19.63	29.18	63.24	105000
H38.1	66.99	9.55	63.84	30.77	21000
H42	56.14	1.72	74.44	5.54	1400
H45	59.96	0.29	84.66	0.93	90

LREE نسبت به HREE نیز در آنها دیده می‌شود ( Frietsch and Perdahl, 1995)، مطابقت دارد.

### مغناطیس‌سنجی

ویژگی مغناطیس‌القایی سنگ با اندازه‌گیری مقدار پذیرفتاری مغناطیسی آن مشخص می‌شود. بدین منظور پذیرفتاری مغناطیسی تعداد ۱۰۰ نمونه کانسنگ و واحد متاریولیت تا متاریوداسیت سنگ میزبان اندازه‌گیری شد. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های مختلف کانسنگ اکسید آهن آپاتیت‌دار اغلب از  $5.000 \times 10^{-5}$  SI تا  $2.000 \times 10^{-3}$  SI و سنگ میزبان از صفر تا  $7.0 \times 10^{-5}$  SI متغیر است. در بخش کانسنگ، افزایش میزان پذیرفتاری مغناطیسی با افزایش مقدار کانی مگنتیت رابطه مستقیم دارد. در برخی رگه‌های شرقی منطقه که مقدار اسپیکولاریت بیشتر است، پذیرفتاری مغناطیسی تا حد  $9.0 \times 10^{-5}$  SI کاهش یافته است. در چنین محیط‌هایی برداشت توأم گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی روش ایده‌آل است که هر دو ویژگی فیزیکی چگالی بالای اسپیکولاریت و پذیرفتاری بالای مگنتیت را شاسایی می‌کند. به‌علت محدودیت‌های دستگاهی، شکل رگه‌ای کانی‌سازی و هزینه‌های بالای گرانی‌سنجی زمینی، در این بررسی فقط از روش مغناطیس‌سنجی استفاده شده است. در هر حال، با توجه به اختلاف شدت پذیرفتاری مغناطیسی بین زون کانی‌سازی و سنگ میزبان، روش مغناطیس‌سنجی زمینی مناسبترین روش

همچنین برای بررسی مقدار عناصر فرعی و نادر خاکی در کانه‌زایی مگنتیت و اسپیکولاریت آپاتیت‌دار، نمونه‌برداری خرده‌سنگی از رگه‌های اصلی انجام شد که نشان‌دهنده حضور مقادیر قابل توجهی از عناصر نادر خاکی است. مقدار کل عناصر نادر خاکی در نمونه‌ها از  $10/44$  تا  $4827$  گرم در تن متغیر است. این میزان در همه نمونه‌ها (به جز دو نمونه H14.1 و H39) بالای  $100$  گرم در تن بوده و مقدار میانگین  $761/67$  گرم در تن است. بالاترین میزان عناصر نادر خاکی سبک مربوط به نمونه H2 است؛ به‌طوری‌که میزان La و Ce در این نمونه به‌ترتیب تا  $2274$  و  $1232$  گرم در تن می‌رسد (جدول ۲). افزایش عناصر نادر خاکی با افزایش ریزبلورها یا ادخال‌های آپاتیت در کانسنگ اکسید آهن ده‌زمان رابطه مستقیم دارد. در نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی نرمالیزه شده نسبت به کانداریت، غنی‌شدگی عناصر کمیاب سبک<sup>۱</sup> نسبت به عناصر نادر خاکی متوسط<sup>۲</sup> و سنگین<sup>۳</sup> تقریباً در همه نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۵). مقدار  $(La/Yb)_N$  بین  $6/1$  تا  $63/89$  متغیر است. همچنین ناهنجاری منفی Eu در همه نمونه‌ها کم‌وبیش وجود دارد و میزان  $Eu/Eu^*$  بین  $0/24$  تا  $0/96$  در تغییر است (جدول ۲). مقدار عناصر نادر خاکی و الگوی نرمالیزه شده این عناصر در کانسنگ ده‌زمان با بالا بودن عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌های اکسید آهن ذخایر کایرونا که معمولاً یک غنی‌شدگی مشخص

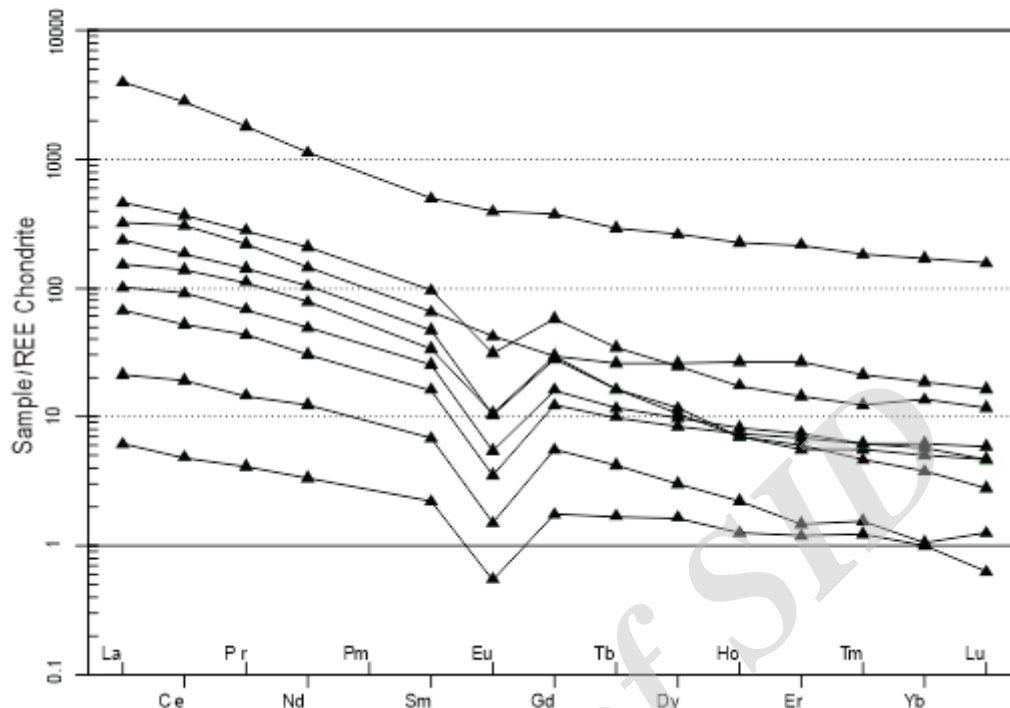
می‌گردد و قرائت تکراری انجام می‌شود. میزان تغییرات شدت میدان (تغییرات روزانه) محاسبه و در تصحیح روزانه اعمال شد. موقعیت نقاط برداشت روی خطوط مبنا و ابتدا و انتهای پروفیل‌ها به وسیله GPS ثبت شد. در منطقه مورد بررسی شمال جغرافیایی هم‌جهت با شمال مغناطیسی در نظر گرفته شده است. پس از انجام بررسی‌های دقیق زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و آنالیزهای ژئوشیمیایی، محل انجام عملیات مغناطیس‌سنجی تعیین شد.

اکتشافی در منطقه است. مغناطیس‌سنج مورد استفاده در این برداشت از نوع Geometrics G856 با دقت ۰/۱ گاما ساخت کشور آمریکا و متعلق به بخش زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد است که دستگاهی قابل حمل برای برداشت‌های زمینی مغناطیس‌سنجی است. برای انجام تصحیحات روزانه میدان مغناطیسی، برداشت به روش Loop انجام شد. بدین صورت که برای انجام تصحیحات روزانه هر ۲ ساعت یک‌بار برای هر پروفیل به نقطه مبنا بر

جدول ۲. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی به روش ICP-MS از کانسنگ اکسید آهن آپاتیت‌دار ده‌زمان (بر حسب گرم در تن)

**Table 2.** Geochemistry analysis results using ICP-MS method from Dehzaman apatite-bearing iron oxide orebody (ppm)

Name	H2	H14.1	H15	H38.1	H39	H42	H43	H45	A9
Ba	23	149	22	8	8	33	18	524	249
Co	2.5	26.7	24.2	29.2	45.7	3.7	4.0	2.1	2.1
Ga	2.8	42.6	53.0	48.1	56.9	28.3	0.9	26.4	32.2
Nb	1.4	0.9	2.1	2.2	0.8	4.4	1.8	7.6	20.3
Rb	0.9	0.3	0.1	0.9	0.7	4.1	2.8	1.7	1.6
Sn	34	13	12	9	8	14	188	74	97
Sr	17.7	54.6	17.5	22.6	7.2	30.6	19.1	72.4	30.2
Ta	<0.1	0.2	0.4	0.1	0.1	0.3	0.1	0.4	0.4
Th	6.0	0.8	4.4	8.5	0.8	5.1	2.4	7.4	5.0
U	3.2	2.0	0.2	2.8	0.3	2.2	2.3	1.8	1.3
V	112	611	684	637	694	746	38	411	462
W	35.6	5.1	2.4	9.3	1.0	4.4	29.5	24.0	53.8
Zr	6.7	3.3	2.5	7.0	19.4	33.3	17.7	11.2	5.7
Y	446.3	2.3	15.8	20.2	3.7	15.9	9.4	38.4	65.7
La	1232.5	1.9	72.9	31.1	6.6	20.8	99.5	141.8	47.3
Ce	2274.7	3.9	149.5	73.5	15.5	42.3	245.1	296.3	111.8
Pr	220.75	0.50	17.24	8.30	1.78	5.27	26.80	34.07	13.49
Nd	672.0	2.0	62.0	29.5	7.4	18.3	86.2	125.7	46.5
Sm	96.69	0.43	9.22	4.98	1.32	3.14	12.67	18.57	6.58
Eu	28.74	0.04	0.76	0.40	0.11	0.26	3.08	2.30	0.78
Gd	96.11	0.45	7.32	4.19	1.43	3.19	7.65	14.90	7.66
Tb	13.86	0.08	0.77	0.55	0.20	0.47	0.77	1.64	1.24
Dy	84.07	0.53	3.41	3.15	0.97	2.71	3.75	8.01	8.42
Ho	16.16	0.09	0.50	0.59	0.16	0.53	0.50	1.25	1.92
Er	45.25	0.25	1.25	1.57	0.31	1.43	1.16	3.03	5.64
Tm	5.89	0.04	0.15	0.20	0.05	0.20	0.18	0.40	0.69
Yb	35.48	0.21	0.79	1.18	0.22	1.30	1.05	2.83	3.91
Lu	5.01	0.02	0.09	0.15	0.04	0.19	0.15	0.38	0.53
ΣREE	4827	10.44	325.9	159.36	36.09	100.09	488.56	651.18	256.46
<b>Ratio</b>									
Eu/Eu*	0.91	0.28	0.28	0.27	0.24	0.25	0.96	0.42	0.34
(La/Yb) <sub>N</sub>	23.42	6.1	62.21	17.77	20.23	10.79	63.89	33.78	8.16



شکل ۵. الگوی عناصر نادر خاکی نرمالیزه شده به کندریت در کانسنگ اکسید آهن آپاتیت‌دار ده‌زمان (مقادیر کندریت از باینتون (Boynton, 1985)).

**Fig. 5.** Chondrite-normalized REE pattern for the Dehzman apatite-bearing iron oxide orebody. Chondrite values are from Boynton (1985).

مورد مجموعه داده‌های مغناطیسی نمی‌دهد، بلکه هر یک از آنها در تشخیص طرح‌های ناهنجاری مغناطیسی مزایای خاص خود را دارند و تفسیر آنها نیز متفاوت است (Gunn, 1996). بدین منظور در ادامه نقشه‌های انتقال به قطب، مشتق اول، سیگنال تحلیلی و فراسو برای هر بخش به تفکیک ارائه می‌شود:

#### الف) بخش شرقی

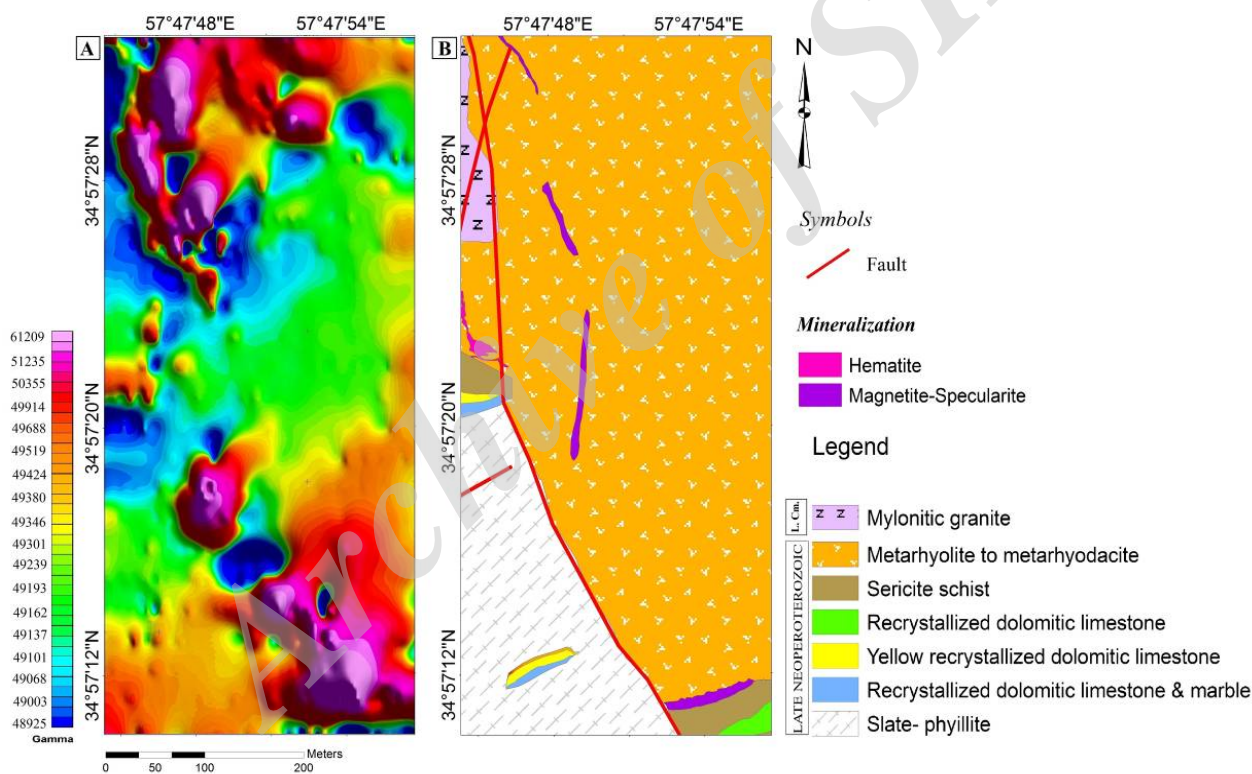
برداشت مغناطیس‌سنجی در بخش شرقی در ۱۴۶۸ ایستگاه و در ۲۴ پروفیل انجام شد (شکل ۲). طول هر پروفیل ۳۰۰ متر و فاصله هر پروفیل ۳۰ متر و با فاصله نقاط ۵ متر، با راستای شرقی-غربی و عمود بر کانی‌سازی انتخاب شد. محدوده تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی از ۴۵۱۰۴ تا ۶۰۶۹۶ گاما، یعنی در حدود ۱۵۵۹۲ گاما است. بیشترین تغییرات شدت کل منطبق بر زون کانه‌زایی مگنتیت-اسپیکولاریت است. نقشه رنگی شدت کل میدان یک تجسم کلی از داده‌های مغناطیسی فراهم می‌کند و برای تفسیر کلی استفاده می‌شود (Urquhart, 2007). از

اندازه‌گیری مغناطیس‌زمینی در منطقه ده‌زمان در دو بخش شرقی به مساحت برداشت ۳۰۰×۶۹۰ متر و بخش مرکزی به مساحت برداشت ۲۴۰×۷۸۰ متر انجام شد. میدان مغناطیسی اصلی زمین در منطقه مورد بررسی با استفاده از برنامه IGRF مقدار ۴۸۷۳۶ گاما در نظر گرفته شد (Thebaud et al., 2016). بنابراین مقادیر بالاتر و پایین‌تر از این مقدار ناهنجاری محسوب می‌شوند. همچنین زاویه میل و انحراف بر اساس سایت مرکز اطلاعات ژئوفیزیک NOAA به ترتیب ۵۳/۷ و ۳/۹۷ با در نظر گرفتن زمان برداشت و طول و عرض جغرافیایی منطقه به‌دست آمد. همچنین بر اساس اطلاعات رسمی در زمان برداشت مغناطیس‌سنجی، تغییرات اتمسفری مربوط به طوفان‌های مغناطیسی گزارش نشده بود (NOAA, 2016).

نقشه‌های مغناطیسی برای نمایش پدیده‌های ناهنجاری استفاده شده و معمولاً یک نقشه به تنهایی همه اطلاعات را در

غرب- جنوب شرق کنترل‌کننده روند کانی‌سازی و ناهنجاری در این بخش است (شکل ۶). با توجه به برداشت‌های زمین‌شناسی، رگه مگنتیت- اسپیکولاریت در این بخش به صورت پیوسته است که البته در برخی مناطق بدون رخنمون سطحی است. با توجه به نقشه RTP، ناهنجاری‌های مغناطیسی بخش شرقی به صورت ناپیوسته بوده است و به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم می‌شوند. ناپیوستگی در بخش مرکزی به دلیل وجود رگه با مقادیر بالاتر اسپیکولاریت است که عملاً پاسخ مغناطیسی بسیار ضعیفی دارد (شکل ۶).

آن‌جایی که میل و انحراف مغناطیسی باعث می‌شود ناهنجاری‌های مغناطیسی نسبت به منبع مولد خود انحراف داشته باشند، فیلتر RTP بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال می‌شود (Clark, 1997). تفسیر اصلی از مجموعه داده‌های مغناطیسی بر روی داده‌های انتقال داده شده به قطب صورت می‌گیرد (Nakatsuka and Okuma, 2006). در نقشه RTP با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد بررسی، نقشه مورد نظر نسبت به نقشه TMI کمی به سمت شمال منحرف شد که محل واقعی آنومالی را مشخص می‌کند. وجود گسل شمال



شکل ۶. A: تصویر RTP بخش شرقی و B: نقشه زمین‌شناسی- کانی‌سازی بخش شرقی در کانسار ده‌زمان

**Fig. 6.** A: RTP image of eastern part, and B: Geologic- Mineralization map of eastern part from Dehzman deposit.

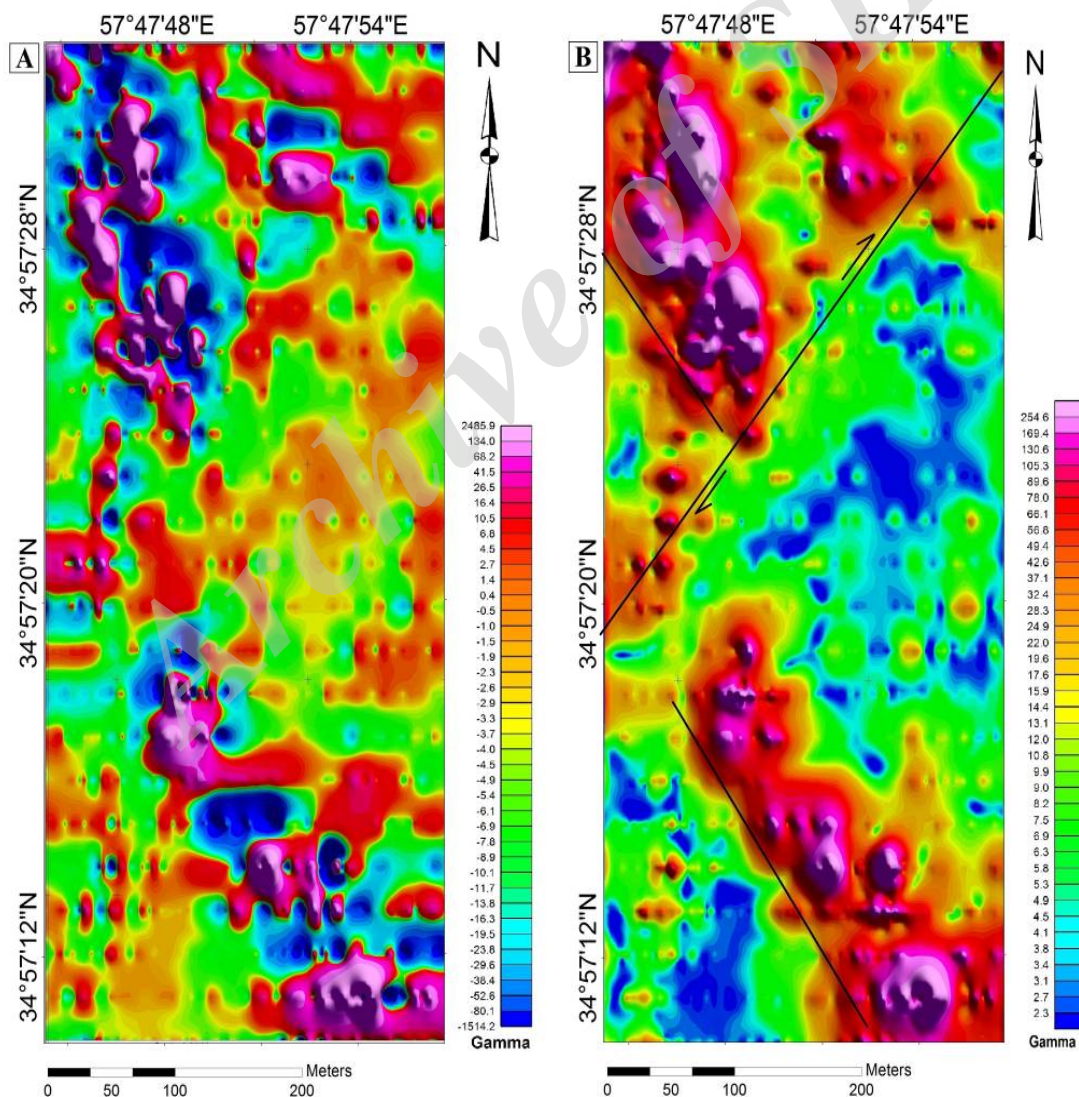
برای بررسی منابع سطحی ایجادکننده ناهنجاری دیده شده، از فیلتر گرادیان اول قائم استفاده شد. نقشه مشتق اول قائم (گرادیان عمودی) اثر ناهنجاری‌های عمیق با بسامد پایین را حذف کرده است و تأثیر منابع کم عمق با بسامد بالا را به نمایش در می‌آورد

با توجه به نقشه مشتق اول قائم، یک روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در منطقه شرقی دیده می‌شود که نشان‌دهنده کم‌عمق بودن آنومالی در این منطقه و ارتباط آن با رگه‌های

این فیلتر به خوبی می‌توان مرز گسل‌های احتمالی را آشکارسازی کرد. چنان‌که در شکل ۷-B نیز دیده می‌شود، مرز کانی‌سازی با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق به‌طور واضح مشخص است. این مرز نشان‌دهنده گسل مسبب و کنترل‌کننده رگه‌های مگنتیت- اسپیکولاریت در بخش شرقی است. دومین گسل موجود در منطقه برداشت مغناطیسی دارای روند شمال‌شرق- جنوب‌غرب است. این گسل با سازوکار امتداد لغز راست گرد باعث جابه‌جایی زون مگنتیت- اسپیکولاریت شده و نقش مخرب در منطقه ایفا کرده است (شکل ۷-B).

مگنتیت- اسپیکولاریت است که اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی و رخنمون‌های سطحی نیز آن را تأیید می‌کند. در برخی قسمت‌ها با توجه به نبود رخنمون سطحی کانی‌سازی مگنتیت- اسپیکولاریت، نقشه مشتق اول قائم ناهنجاری نشان می‌دهد که بیانگر وجود کانی‌سازی در عمق کم است (شکل ۷-A).

نقشه سیگنال تحلیلی مرز ناهنجاری مغناطیسی را مشخص‌تر نمایش می‌دهد. همچنین سیگنال تحلیلی توان بالایی در به نمایش در آوردن مؤلفه‌های خطی دارد. از این‌رو، با استفاده از



شکل ۷. A: نقشه مشتق اول و B: نقشه سیگنال تحلیلی بخش شرقی کانسار ده‌زمان

Fig. 7. A: Vertical derivative map, and B: Analytical signal map of eastern part from Dezaman deposit

نشان‌دهنده وجود ناهنجاری با روند شرقی - غربی منطبق بر رگه اصلی کانه‌زایی است. در قسمت جنوبی پروفیل‌های برداشت به دلیل ورود به باند هماتیت رسوبی، سرسیت شیبست و واحدهای کربناته، ناهنجاری مغناطیسی افت محسوس نشان می‌دهد. نقشه انتقال به قطب نشان‌دهنده محل واقعی کانی‌سازی است و انطباق بسیار خوبی با محل واقعی رگه‌ها بر روی زمین دارد (شکل ۹).

نقشه مشتق اول قائم، مطابق انتظار نشان‌دهنده وجود کانی‌سازی سطحی در محل رخنمون سطحی رگه‌های مگنتیت  $\pm$  اسپکیولاریت است. ناهنجاری سطحی بسیار ضعیف در قسمت جنوبی منطقه برداشت و هم‌راستا با ناهنجاری اصلی دیده می‌شود که مربوط به باند هماتیت رسوبی است. پذیرفتاری مغناطیسی این باند نسبت به سنگ‌های اطراف در حد  $10^{-5}$  SI  $\times$  ۵۰ بالاتر است (شکل ۱۰).

با توجه به مرز گسله رگه‌های مگنتیت  $\pm$  اسپکیولاریت در بخش مرکزی، استفاده از فیلتر سیگنال تحلیلی در این قسمت می‌تواند در بارزسازی مرزهای ناهنجاری به مقدار زیادی کمک کند. با استفاده از برداشت‌های صحرایی و تأیید آن در نقشه سیگنال تحلیلی، سه نسل گسل در منطقه برداشت مغناطیس‌سنجی در بخش مرکزی شناسایی شد. اولین گسل (F1) که نقش سازنده در کانی‌سازی دارد، دارای روند تقریباً شرقی - غربی است و قدیمی‌ترین گسل محسوب می‌شود. گسل F2 با روند شمال غرب - جنوب شرق با سازوکار امتداد لغز راست گرد از نظر زمانی دومین عملکرد را داشته و باعث جابه‌جایی کانی‌زایی از حالت خطی شده است. جابه‌جایی این گسل در روی زمین حدود ۴۰ تا ۵۰ متر است. گسل F3 با روند شمال شرق - جنوب غرب سومین مرحله زمین‌ساختی در این بخش است. میزان جابه‌جایی این گسل کمتر از گسل F2 و حدود ۵ تا ۱۰ متر است (شکل ۱۱). حرکات دو گسل F2 و F3 باعث جابه‌جایی و ایجاد یک زون بسیار برشی شده است.

برای بررسی گسترش عمقی کانی‌سازی در بخش مرکزی، نقشه‌های فراسو ۱۰ متر تا ۵۰ متر از منطقه تهیه شد (شکل ۱۲). در عمق ۱۰ متری ناهنجاری تقریباً مشابه سطح است و از همان

برای بررسی گسترش عمقی کانی‌سازی مگنتیت‌دار مسبب ناهنجاری مغناطیسی از فیلتر فراسو استفاده شد. نقشه ادامه به سمت بالا اثر ناهنجاری‌های سطحی با بسامد بالا را حذف و به این طریق اثر ناهنجاری‌های عمیق‌تر با بسامد کم را بهتر آشکار می‌سازد (Gunn et al. 1997). هرچه منبع مغناطیسی به سطح زمین نزدیکتر و منبع کوچکتر باشد، طول موج‌ها، کوتاه‌تر و بسامدها در واحد طول بیشتر خواهد بود و برعکس (Tarlowski et al., 1997).

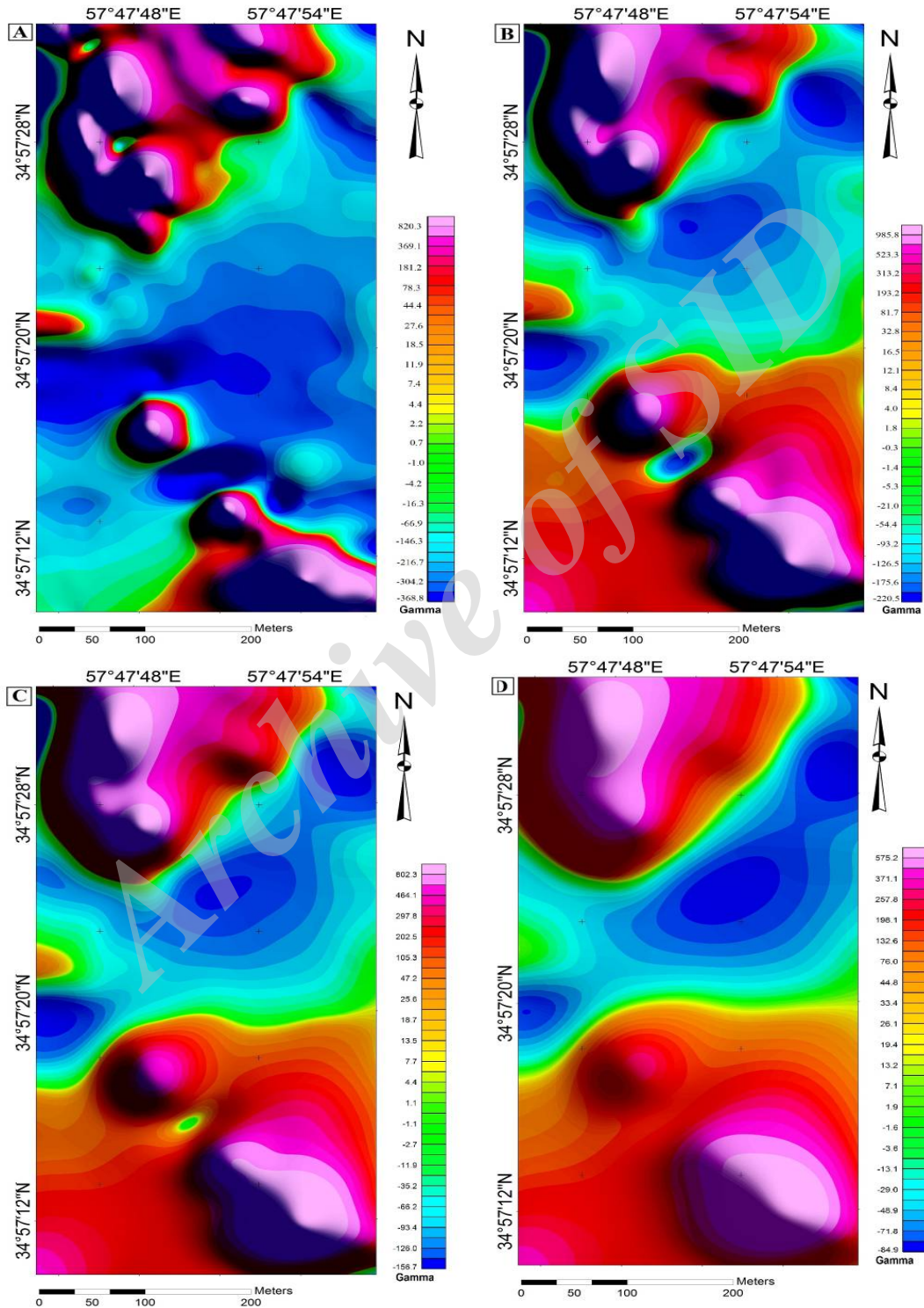
نقشه‌های ادامه فراسو با ارتفاع ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ متری از محدوده شرقی تهیه شد (شکل A-8، B، C و D). در نقشه‌های فراسو یک روند مشخص دیده می‌شود. بدین ترتیب که با افزایش ارتفاع ناهنجاری بخش شمالی و جنوبی به تدریج از حالت خطی بودن خارج می‌شود و گسترش عرضی بیشتری پیدا می‌کند. همچنین با افزایش عمق کانی‌سازی، فاصله بیشتری بین دو ناهنجاری شمالی و جنوبی ایجاد می‌شود که نشان از نبود کانی‌سازی عمقی مگنتیت در بخش میانی این زون است. آنچه که مسلم است کانی‌سازی تا عمق ۵۰ متر در شمال و جنوب هنوز ادامه دارد، همچنین در بخش شمالی و جنوبی گسترش قابل توجهی برای زون کانی‌سازی (تا بیش از ۲۰ متر) در عمق نسبت به رخنمون آن رگه‌ها در سطح دیده می‌شود (شکل ۸).

### ب) بخش مرکزی

اندازه‌گیری شدت کل میدان مغناطیسی در ۷۵۵ ایستگاه و در ۲۷ پروفیل به طول میانگین ۲۴۵ متر و به فاصله ۳۰ متر از یکدیگر و با فاصله نقاط ۱۰ متر با راستای شمالی - جنوبی انجام شد (شکل ۲). محدوده تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی در بخش مرکزی از ۵۳۱۴۹ تا ۴۴۱۶۸ گاما یعنی ۸۹۸۱ گاما بوده است. با توجه به برداشت‌های صحرایی در این قسمت، رخنمون رگه‌های مگنتیت  $\pm$  اسپکیولاریت دارای روند شرقی - غربی است که البته در قسمت میانی به جهت حرکات زمین‌ساختی بدون پیوستگی است (شکل A-9 و B). حرکت گسل جوان با سازوکار امتداد لغز راست گرد باعث جابه‌جایی رگه کانه‌زایی در قسمت میانی شده است. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در این بخش،

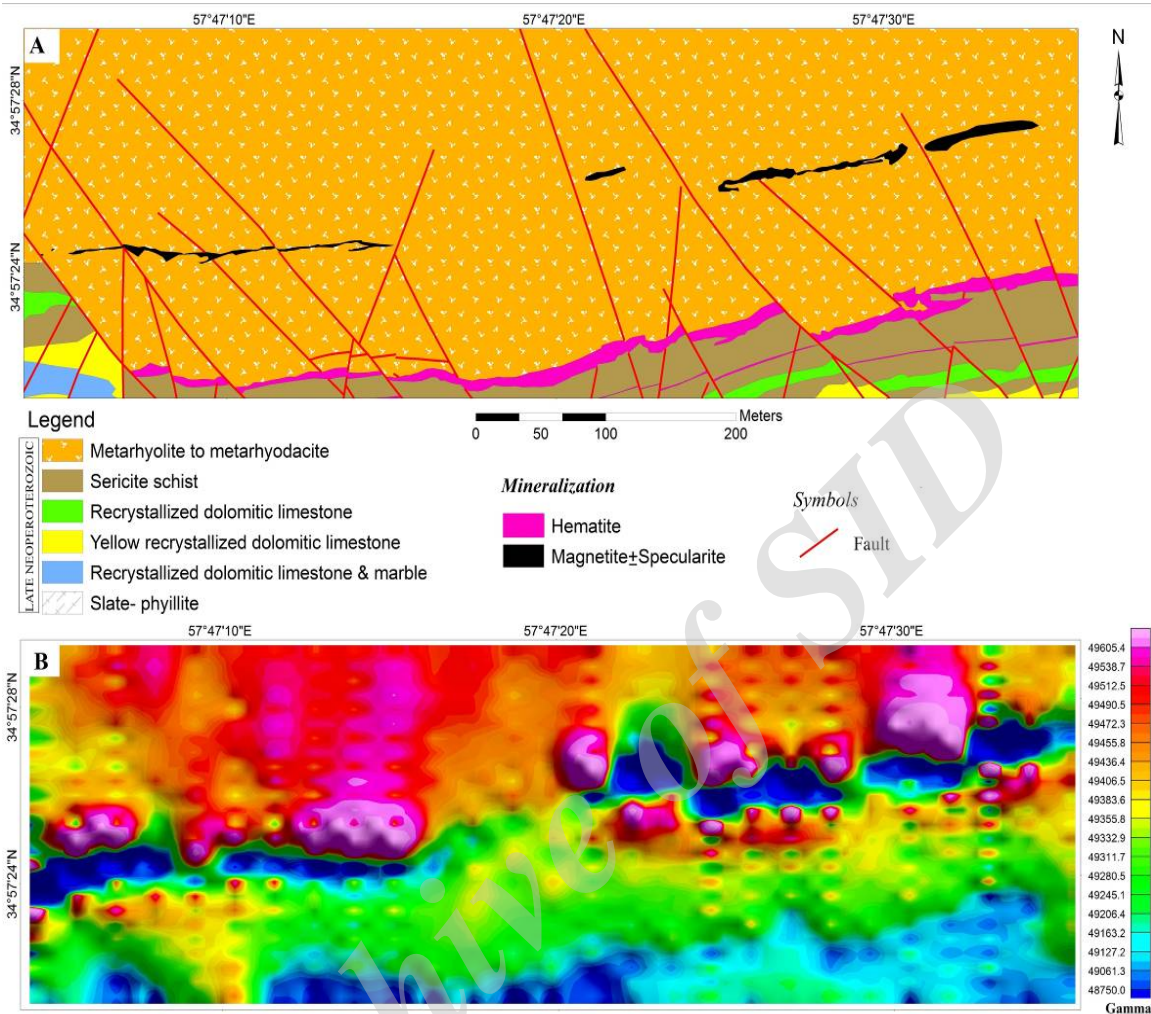
از حالت پیوسته خارج می‌شود.

روند تقریباً شرقی- غربی پیروی می‌کند. در عمق ۲۰ متری به تدریج ناهنجاری قسمت غرب در حال کوچک‌شدن است و



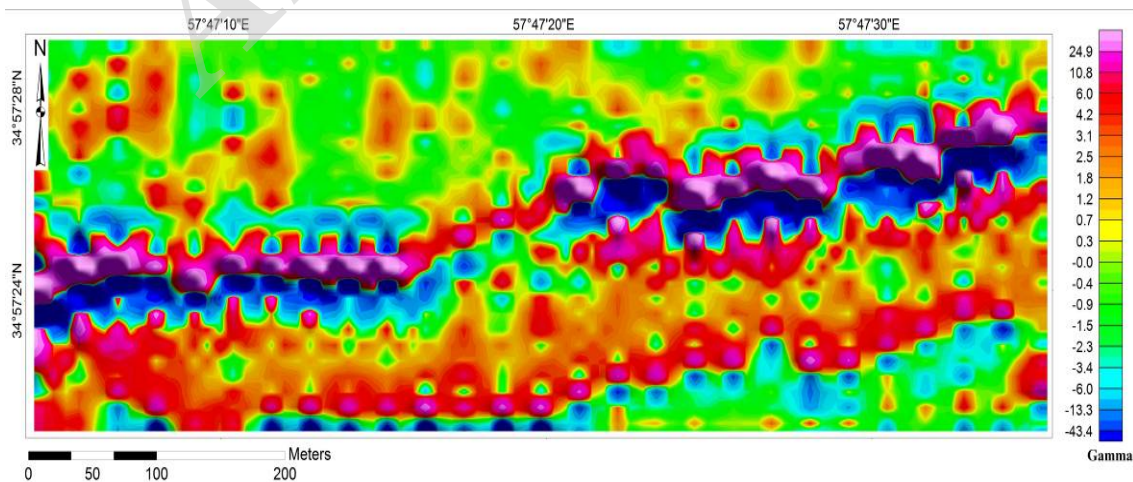
شکل ۸. تصاویر فراسو بخش شرقی کانسار ده‌زمان، A: ۱۰ متر، B: ۲۰ متر، C: ۳۰ متر و D: ۵۰ متر

Fig. 8. A:10 m, B: 20 m, C:30 m, and D: 50 m , Upward continued images of eastern part from Dehzman deposit



شکل ۹. A: نقشه زمین‌شناسی- کانی‌سازی بخش مرکزی و B: تصویر RTP بخش مرکزی در کانسار ده‌زمان

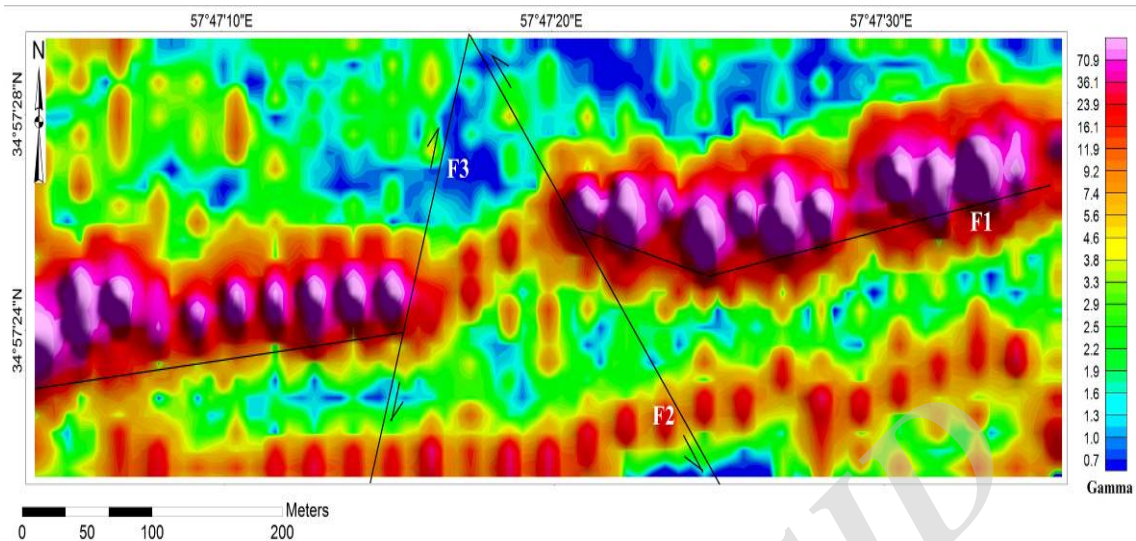
Fig. 9. A: Geologic- Mineralization map of central part, and B: RTP image of central part from Dehzaaman deposit



شکل ۱۰. نقشه مشتق اول قائم در بخش مرکزی کانسار ده‌زمان

Fig. 10. Vertical derivative map of Central part from Dehzaaman deposit





شکل ۱۱. نقشه سیگنال تحلیلی به همراه گسل‌های بخش مرکزی کانسار ده‌زمان

Fig. 11. Analytical signal map with faults of Central part from Dehzeaman deposit

مرکز و شرق کانسار ده‌زمان نسبت به سنگ میزبان آتشفشانی، باعث شده است تا به کمک روش مغناطیس‌سنجی و تلفیق آن با داده‌های زمین‌شناسی - کانی‌سازی و برداشت‌های صحرایی، بتوان نتایج مطلوبی از روند، گسترش و عمق این کانی‌سازی‌ها به دست آورد. علاوه بر آن با توجه به وجود مقادیر قابل توجه عناصر نادر خاکی (به دلیل همراهی با آپاتیت) در ذخایر کاپرونا می‌توان اذعان داشت که روش مغناطیس‌سنجی می‌تواند علاوه بر اکتشاف بخش‌های پنهان کانی‌سازی مگنتیت، روشی مناسب برای اکتشاف غیرمستقیم عناصر نادر خاکی باشد. همچنین نکته قابل چالش در کانسار ده‌زمان همراهی اسپیکولاریت و مگنتیت است. به دلیل پایین‌تر بودن پاسخ مغناطیسی اسپیکولاریت نسبت به مگنتیت، در بخش‌هایی که مقدار اسپیکولاریت در رگه‌ها افزایش یافته است (به ویژه بخش شرقی کانسار)، ناهنجاری مغناطیسی نیز از بین رفته است.

برداشت مغناطیس‌سنجی زمینی در رگه‌های بخش شرقی نشان‌دهنده یک ناهنجاری تقریباً شمالی - جنوبی در نقشه RTP است. مقایسه بین رخنمون‌های سطحی رگه‌ها در بخش شرقی و نقشه RTP نشان‌دهنده ناهنجاری در بخش‌هایی است که بدون رخنمون سطحی نیز هست. برعکس، در قسمت میانی با وجود

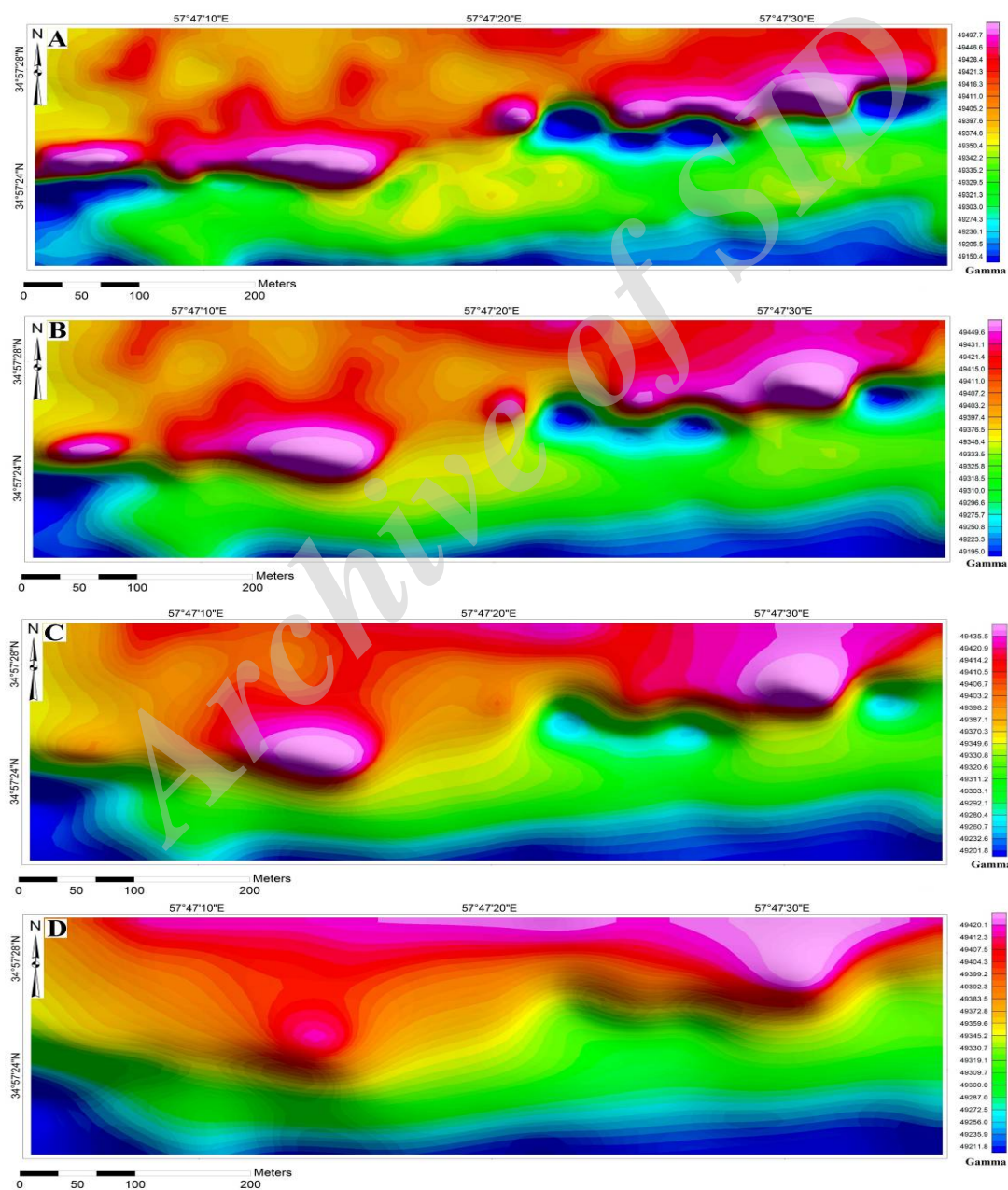
در عمق ۳۰ متری ناهنجاری کاملاً به قسمت غربی با گسترش کمتر و قسمت شرقی با گسترش بیشتر تقسیم می‌شود و در قسمت میانی کاملاً ناپیوسته است. با توجه به شیب کانی‌سازی که به سمت شمال است، با افزایش عمق مقداری ناهنجاری به سمت شمال متمایل می‌شود. در عمق ۵۰ متری ناهنجاری قسمت غربی کاملاً از بین می‌رود و فقط ناهنجاری شرقی با عرض بیشتر دیده می‌شود (شکل ۱۲). با توجه به تصاویر فراسو می‌توان چنین نتیجه گرفت که رگه مگنتیت  $\pm$  اسپیکولاریت در بخش شرقی عمیق‌تر بوده است و با افزایش عمق به تدریج عرض زون کانه‌دار بیشتر می‌شود. با توجه به همراهی کانی‌سازی با گسل (F1)، به نظر می‌رسد که گسل یادشده نیز در شرق عمیق‌تر از قسمت غرب باشد. با توجه به کم عمق بودن کانی‌سازی و گسل در قسمت میانی و غربی، جابه‌جایی‌های گسل‌های F2 و F3 توانسته است باعث ایجاد زون خرد و جابه‌جایی رگه مگنتیت  $\pm$  اسپیکولاریت در این بخش شود (شکل ۱۲).

### نتیجه‌گیری

بالا بودن مقدار پذیرفتاری مغناطیسی رگه‌های مگنتیت  $\pm$  اسپیکولاریت و مگنتیت - اسپیکولاریت آپاتیت‌دار به ترتیب در

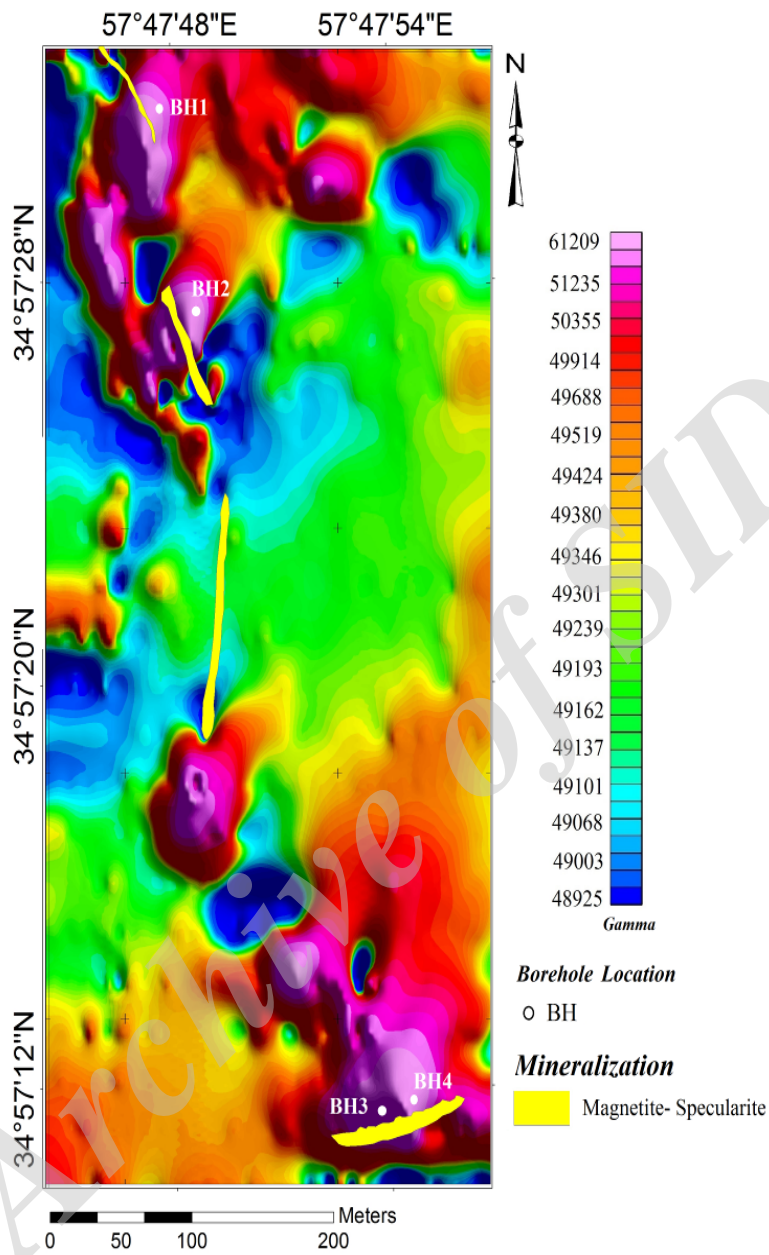
رگه‌ها به سمت شرق (به‌استثنای رگه جنوبی که امتداد شرقی-غربی دارد و دارای شیب به سمت شمال است)، ۴ نقطه حفاری در ناهنجاری‌های مغناطیسی شمالی و جنوبی بخش شرقی کانسار ده‌زمان در کمر بالای رگه‌ها (شکل ۱۳) به عمق حداکثر ۱۲۰ متر و زاویه قائم تا ۸۰ درجه پیشنهاد می‌شود (جدول ۳).

رگه کانی‌سازی، ناهنجاری دیده نمی‌شود که به دلیل افزایش میزان اسپیکولاریت است. عرض کانی‌سازی در شمال و جنوب بخش شرقی به بیش از ۲۰ متر می‌رسد. نقشه‌های فراسو نشان‌دهنده گسترش عمقی کانی‌سازی تا عمق بیش از ۵۰ متر در قسمت شمال و جنوب این بخش است (شکل ۱۲- A, B, C و D). با توجه به اطلاعات به دست آمده از مغناطیس‌سنجی و شیب



شکل ۱۲. تصاویر فراسو بخش مرکزی کانسار ده‌زمان، A: ۱۰ متر، B: ۲۰ متر، C: ۳۰ متر و D: ۵۰ متر

Fig. 12. A: 10 m, B: 20 m, C: 30 m, and D: 50 m, Upward images of central part from Dehzeaman deposit



شکل ۱۳. تصویر RTP بخش شرقی کانسار ده‌زمان همراه با موقعیت رگه‌ها و گمانه‌های پیشنهادی

Fig. 13. RTP image of eastern part of Dehzman deposit associated with veins and offered boreholes location

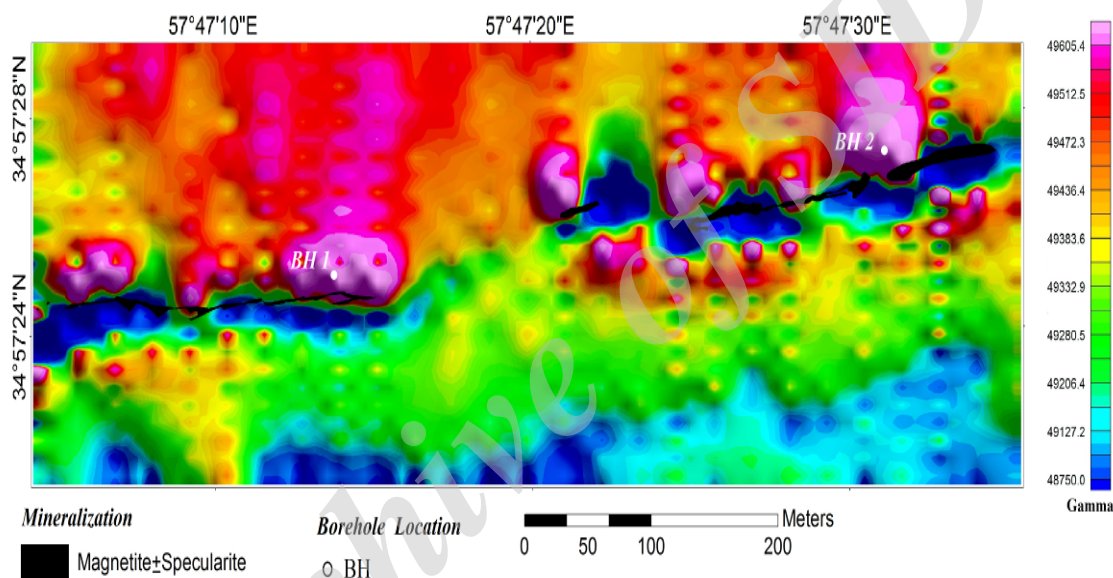
جدول ۳. مشخصات نقاط حفاری پیشنهادی در شرق کانسار ده‌زمان

Table 3. Characteristics of offered boreholes in eastern part of Dehzman deposit

Borehole No.	Lat.	Lon.	Depth (m)	Azimuth	Dip
BH 1	34° 57' 31.3"	57° 47' 47.6"	100	N 220	80°
BH 2	34° 57' 27.3"	57° 47' 48.3"	100	N 220	80°
BH 3	34° 57' 11.4"	57° 47' 53.4"	120	N 180	90°
BH 4	34° 57' 11.8"	57° 47' 54.5"	120	N 180	85°

میانی بخش مرکزی به دلیل حرکت دو گسل راست گرد و چپ گرد بوده که پس از کانه‌زایی سبب جابه‌جایی زون کانه‌دار شده است. با توجه به اطلاعات به دست آمده از مغناطیس‌سنجی و شیب رگه‌ها به سمت شمال، ۲ نقطه حفاری در ناهنجاری‌های مغناطیسی شرقی و غربی بخش مرکزی کانسار ده‌زمان در کمر بالای رگه‌ها (شکل ۱۴) به عمق حداکثر ۱۰۰ متر و با زاویه قائم تا ۸۰ درجه پیشنهاد می‌شود (جدول ۴).

ناهنجاری‌های مغناطیسی در بخش مرکزی کانسار ده‌زمان به دلیل بالاتر بودن مقدار مگنتیت در رگه‌ها، انطباق بهتری با رخنمون‌های سطحی نشان می‌دهد. ناهنجاری در این بخش به صورت شرقی-غربی است و عرض ناهنجاری از ۲۵ متر تجاوز نمی‌کند. نقشه‌های فراسو بیانگر گسترش عمقی کانی‌سازی تا عمق بیش از ۵۰ متر و نیز گسترش عرضی در قسمت شرق این زون است. ناپوستگی ناهنجاری در قسمت



شکل ۱۴. تصویر RTP بخش مرکزی کانسار ده‌زمان همراه با موقعیت رگه‌ها و گمانه‌های پیشنهادی

Fig. 14. RTP image of central part of Deh Zaman deposit associated with veins and offered boreholes location

جدول ۴. مشخصات نقاط حفاری پیشنهادی در مرکز کانسار ده‌زمان

Table 4. Characteristics of offered boreholes in central part of Deh Zaman deposit

Borehole No.	Lat.	Lon.	Depth (m)	Azimuth	Dip
BH 1	34° 57' 13.1"	57° 47' 13.5"	80	N 180	90°
BH 2	34° 27' 27.1"	57° 47' 31.4"	100	N 200	80°

به‌ویژه آقایان مهندس نقی‌پور و مالکی به‌علت همکاری‌های لازم سپاس‌گزاریم.

### قدردانی

این پروژه با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳۶۹۷۲/۳ مورخ ۱۳۹۳/۱۲/۱۴ انجام شده است. از مدیرعامل و کارکنان محترم شرکت اپال کانی پارس

## References

- Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi B., Meffre S. and Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran, insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology*, 281(2011):253-269.
- Boynton, W.V., 1985. Cosmo chemistry of the rare earth elements, Meteorite studies. In: P., Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*, (Developments in Geochemistry 2). Elsevier, Amsterdam, pp. 115-1522.
- Clark, D.A., 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): 83-103.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2004. Filtering using variable order vertical derivatives. *Computers and Geosciences*, 30(5): 455-459.
- Daliran, F., 1990. The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, East Central Iran, An alkali rhyolite hosted, 'Kiruna type' occurrence in the Infracambrian Bafq Metallotectonic (Mineralogic, Petro-graphic and geochemical study of the ores and the host rocks). Unpublished Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 248 pp.
- Daliran, F., 2002. Kiruna type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of the their apatites. In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: a global perspective*. PGC Publishing, Adelaide, pp. 303-320.
- Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P., 2007. Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and apatites of the Bafq District, Central-East Iran. In: C.J. Andrew, et al. (Editors), *Digging deeper*, Proceeding of the 9<sup>th</sup> Biennial SGA Meeting, Dublin, pp. 1501-1504.
- Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P., 2009. A review of the early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apatite deposits (IOA) of the Bafq District, Iran. In: P.E. Williams's (Editor), *Smart science for exploration and mining*, Proceedings of the 10th Biennial of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Townsville, Qld, Australia, pp. 623-625.
- Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P., 2010. Lower Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east- Central Iran. In: L. Corriveau, and H. Mumin, (Editors), *Exploring for iron-oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues*. Published in partnership by Mineral Deposits Division, Geological Association of Canada and Geological Survey of Canada, short course notes, 20, Québec, pp. 143-155.
- Ford, K., Kating, P. and Thomas, M.D., 2007. Overview of geophysical signature associated with Canadian ore deposits. Geological Survey of Canada, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5. pp. 939-970.
- Foster, H. and Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in Central Iran- a highly mineralized Infracambrian volcanic field. *Economic Geology*, 89(8): 1697-1721.
- Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews*, 9(6): 489-510.
- Gunn, P.J., 1996. Workshop Interpretation of aeromagnetic data. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): 105-113.
- Gunn, P.J., Madment, D. and Milligan, P.R., 1997. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. *Journal of Australia Geology and Geophysics*, 17(2):175-185.
- Hajimirzajan, H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Hidarian Shahri, M.R. and Homam, S.M., 2017 a. Modeling of magnetite- specularite mineralization in Dehzaman iron deposit, Khorasan Razavi province: mineralogy, texture and structure, and alteration. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(3): 543-556. (in Persian)
- Hajimirzajan, H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Hidarian Shahri, M.R. and Homam, S.M., 2017b. Geochemistry and genesis of apatite-bearing magnetite-specularite ore body in Dehzaman iron deposit, Northeastern Kashmar-Kerman tectonic zone. *Journal of Advanced Applied Geology*, in print.
- Imanpour, B., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2017. Mineralization and geochemistry of Dehzaman hematite ore deposit (southwest of Bardaskan) and

- comparison with banded iron formation deposits. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 4(24): 675-690. (in Persian)
- Thebault, E., Finlay, C., Beggan C.D., Patrick, A., Aubert, J. and Barrois, O., 2015. Earth, Planets and Space, 67:79. Retrieved June 27, 2016, From <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2016. Retrieved September 27, 2001, From <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>
- Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran. Economic Geology, 102(6): 1111-1128.
- Moore, F. and Modabberi, S., 2003. Origin of choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, central Iran: new isotopic and geochemical evidence. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 14(3): 259-269.
- Nakatsuka, T. and Okuma, S., 2006. Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. Exploration Geophysics, 37(1): 121-128.
- Nozaem, R., Mohajjel, M., Rossetti, F., Della Seta, M., Vignaroli, G., Yassaghi, A., Salvini, S. and Eliassi, M., 2013. Post-Neogene right-lateral strike-slip tectonics at the north-western edge of the Lut Block (Kuh-e-Sarhangi Fault), Central Iran. Tectonophysics, 589: 220-233.
- Nozaem, R., Mohajjel, M., Yasaghi, A. and Nasrabadi, M., 2014. Structural analysis and determination of deformation under Kuh-e-sarhangi shear zone in the granite of the mountain, northwest Lut Block. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 22(1): 15-26. (in Persian)
- Ramezani, J. and Tucker, R., 2003. The saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implication for gondwana tectonics. American journal of science, 303(7): 622-665.
- Rossetti, F., Nozaem, R., Lucci, F., Vignaroli, G., Gerdes, A., Nasrabadi, M. and Theye, T., 2015. Tectonic setting and geochronology of the Cadomian magmatism in Central Iran, Kuh-e- Sarhangi region (NW Lut Block. Journal of Asian Earth Sciences, 102(2015): 24-44.
- Sahandi, M.R., Ghasemi, M.R. and Ekhtiarabadi, A., 2010. Geological map of Ghasemabad, Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Tarlowski, C., Gunn, P.J. and Mackey, T., 1997. Enhancements of the magnetic map of Australia. Journal of Australia Geology and Geophysics, 17(2): 77-82.
- Torab, F.M. and Lehmann, B., 2007. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology. Mineralogical Magazine, 71(3): 347-363.
- Urquhart, W.E.S., 2007. Airborne magnetic data compilation and interpretation. Geophysical Airborne Survey Compilation and Interpretation, [http://www.geoexplo.com/airborne\\_survey\\_workshop.html](http://www.geoexplo.com/airborne_survey_workshop.html)
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185-187.