



## زمین‌شناسی، ژئوشیمی و مطالعات مغناطیس‌سنجی زمینی در اکتشاف ذخایر آهن منطقه کلاته ناصر، خراسان جنوبی

سعید سعادت\*

گروه زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۰۲، پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۵

### چکیده

منطقه کلاته ناصر در شمال شرق بلوک لوت واقع شده است. توده‌های نفوذی با ترکیب هورنبلند کوارتز مونزونیت، بیوتیت گرانودیوریت و پیروکسن کوارتز دیوریت در محدوده رخنمون دارند. بخش اصلی محدوده توسط سنگهای کربناته پوشیده شده است که گاه به مرمر و به‌طور محدود به اسکارن تبدیل شده‌اند. کانه‌زایی آهن عمدتاً در همین واحد کربناته دیده می‌شود. مقادیر  $F_2O_3$  بین ۳۱ تا ۹۶ درصد،  $P_2O_5$  حداکثر ۰/۴۵ درصد و  $TiO_2$  بین ۰/۰۲ تا ۰/۵۴ درصد در نمونه‌های کانسنگ متغیر است. بیشترین شدت میدان در منطقه حدود ۷۰۰۰۰ و کمترین آن حدود ۴۰۰۰۰ نانوتسلا اندازه‌گیری شده است. نقشه‌های شدت کل، برگردان به قطب، سیگنال تحلیلی، مشتق اول قائم و ادامه فراسو تهیه شد. نتایج به‌دست آمده از حفاریهای انجام شده، انطباق بسیار خوبی با بررسیهای مغناطیس‌سنجی دارد و گسترش کانی‌سازی آهن تا عمق ۵۰ متر آشکار شده است. میزان پایین پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی و آلتراسیون ضعیف آنها نشان می‌دهد که این توده‌ها نقش اصلی در کانی‌سازی آهن ندارند و توده نفوذی مولد کانی‌سازی با فاصله و به احتمال زیاد در اعماق بیشتر قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی مگنتیت، مغناطیس‌سنجی زمینی، کلاته ناصر، آهن‌گران، بلوک لوت

### مقدمه

می‌تواند بیانگر توجه عمیق پیشینان بر نام‌گذاری مکانها و عوارض طبیعی بر اساس تمرکز ماده معدنی در آن ناحیه باشد (Madani and Yaghoobpour, 1996). محدوده اکتشافی کلاته ناصر در منطقه‌ای با مختصات جغرافیایی  $33^{\circ} 19'$  تا  $33^{\circ} 19' 42''$  عرض شمالی و  $60^{\circ} 9'$  تا  $60^{\circ} 9' 35''$  طول شرقی در حاشیه غربی بخشهای میانی رشته‌کوه آهن‌گران (جنوب شهر حاجی‌آباد، استان خراسان جنوبی) قرار دارد (شکل ۱). بر اساس پی‌جوییهای اولیه، رخنمونهای محدودی از کانی‌سازی مگنتیت در منطقه مورد بررسی، مشاهده و در ادامه عملیات اکتشافی و انجام عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی، وجود ذخایر با ارزش آهن در منطقه آشکار شد. هدف از این پژوهش، ارائه نتایج و بررسی بررسیهای اولیه زمین‌شناسی، ژئوشیمی و اندازه‌گیریهای مغناطیس‌سنجی زمینی در محدوده

عملیات مغناطیس‌سنجی از قدیمی‌ترین روشهای ژئوفیزیکی است که برای فعالیتهای اکتشافی در زمینه‌های مختلف و به‌ویژه اکتشاف ذخایر آهن مورد استفاده قرار گرفته است. برداشت اصولی و تفسیر صحیح داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی در کنار دیگر داده‌های اکتشافی می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها، اطلاعات ارزشمندی در مورد موقعیت، عمق و ابعاد بخشهای پنهان ذخایر آهن در اختیار پژوهشگران قرار دهد (Robinson and Coruh, 2005; Calagari, 1992). رشته‌کوه آهن‌گران با طول حدود ۳۰ کیلومتر و روند شمال، شمال‌غرب-جنوب، جنوب‌شرق در حاشیه شمال‌شرقی بلوک لوت قرار گرفته است. در بخشهایی از دامنه‌های غربی این رشته‌کوه، شواهدی از کانی‌سازی آهن به‌چشم می‌خورد که

(شکل ۳). این واحد به شدت تحت تأثیر تنش‌های زمین‌ساختی خرد شده است. بخش اصلی این واحد سنگی تمام بلورین و فقط از کلسیت تشکیل شده است و می‌توان آن را سنگ‌آهک بلورین تا میکرواسپاریت نامید. این واحد سنگی در بخش‌هایی در اثر دگرگونی مجاورتی به مرمر تبدیل شده است و دارای بافت گرانوبلاستی است (شکل‌های A-۴ و B) و غالباً از درشت‌بلورهای کربناتی دارای ماکل فشارشی تشکیل شده است. کمی کوارتز (بیشتر به‌عنوان پرکننده فضاهای خالی) نیز در سنگ دیده می‌شود. سنگ یادشده، فشارهای زمین‌ساختی را تحمل می‌کند و آثار خردشدگی در برخی درشت‌بلورها و درز و شکاف‌هایی که با کربنات ریزبلور و سیلیس پر شده‌اند، دیده می‌شوند (شکل A-۴). رخ‌داد کانه‌زایی آهن غالباً در همین واحد به‌صورت پراکنده دیده می‌شود (Saadat, 2014). توده‌های نفوذی اسیدی تا حدواسط با ترکیب هورنبلند کوارتز مونزونیت، بیوتیت گرانودیوریت، پیروکسن کوارتز دیوریت عمدتاً در بخش‌های شمال تا شمال‌غرب محدوده مورد بررسی رخنمون دارند (شکل ۳). تصاویر میکروسکوپی نمونه‌هایی از این سنگها با بافت هیبیدیومورف گرانولار، حاوی کانیهای کوارتز، پلاژیوکلاز شکل‌دار دارای زونینگ و ماکل، ارتوکلاز، بیوتیت و هورنبلند در شکل‌های C-۴ و D نمایش داده شده است. کانیهای فرعی شامل اسفن، آپاتیت، زیرکن و کانیهای اوپک است. در این سنگها بیوتیت قهوه‌ای و هورنبلند سبز کمی کلریتی شده است و در فلدسپاتها نیز آثار محدودی از آلتراسیون آرژیلیک دیده می‌شود. رخنمون‌هایی از سنگهای ولکانیک با ترکیب آندزیت تا داسیت همراه با سنگهای مافیک و اولترامافیک منسوب به دسته‌های افیولیتی، در بخش‌های جنوبی منطقه دیده می‌شود (شکل ۳). آندزیت به‌صورت برشی شده (شکل E-۴) دارای بافت پورفیری با زمینه ریزبلور است.

میکرولیت‌های پلاژیوکلاز و قالب‌های اکسیده هورنبلند همراه با کربنات و اکسید آهن در زمینه قرار گرفته‌اند. سنگ یادشده تحت تأثیر تنش‌های زمین‌ساختی خرد و به قطعاتی با ابعاد مختلف تقسیم شده است. لابه‌لای این قطعات، ذرات ریز و خرد شده سنگ همراه با اکسید آهن دیده می‌شود (شکل ۴-E). واحد بازالتی با بافت پورفیریتیک و زمینه اینترسرتال (شکل ۴-F) شامل درشت‌بلورهای شکل‌دار پلاژیوکلاز دارای ماکل است که تنها کانیهای نسبتاً سالم این سنگ هستند. این بلورها خرد و خالی شده؛ ولی قالب خود را حفظ کرده‌اند.

مورد نظر و کاربرد آن در اکتشاف هرچه بیشتر توده‌های مگنتیتی در دیگر مناطق این پهنه مستعد کانی‌سازی است.

### روش مطالعه

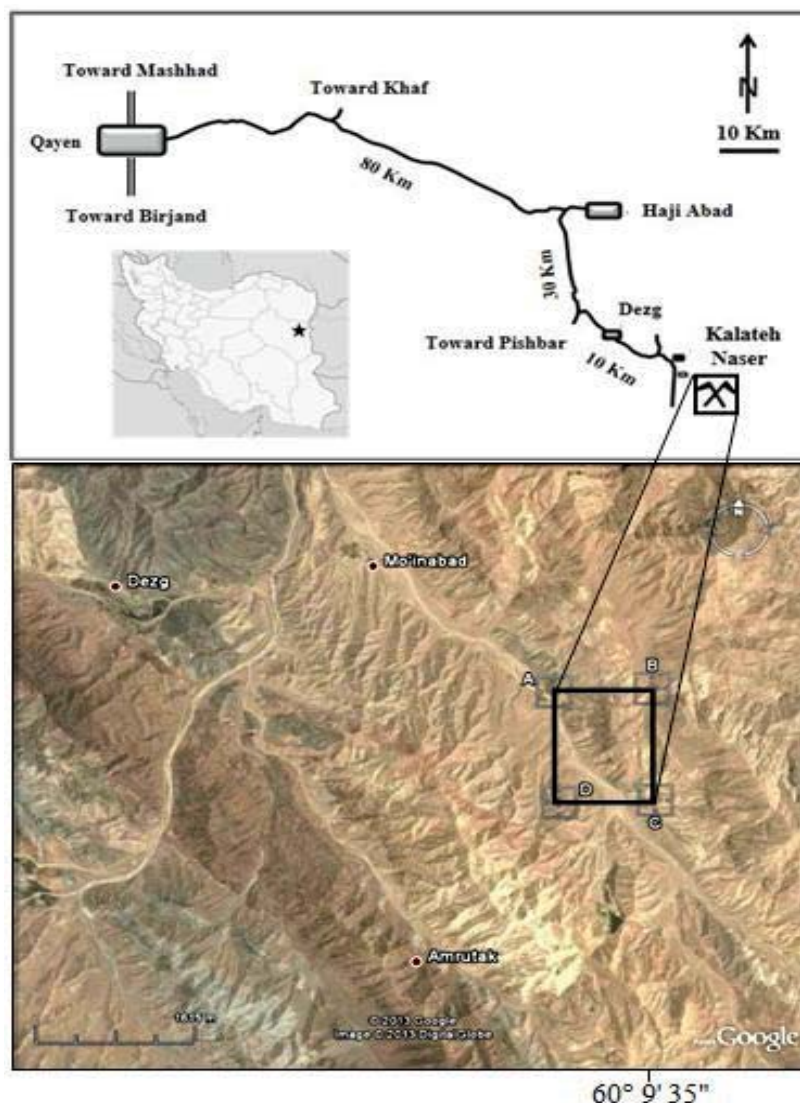
برای بررسی انواع واحدهای زمین‌شناسی منطقه، نمونه‌برداری و بررسی مقاطع نازک واحدهای مختلف سنگی انجام شد. بررسیهای کانی‌شناسی به کمک پراش پرتو ایکس و بررسیهای ژئوشیمیایی به روشهای ICP-MS, XRF و شیمی تر انجام شده است. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی سنگهای مختلف منطقه به‌وسیله دستگاه پذیرفتاری سنج مدل SM-30 با دقت  $10^{-7}$ ، ساخت شرکت HZ-instruments امریکا صورت گرفته است. بر اساس نتایج پی‌جوییهای اولیه و بررسیهای زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی انجام شده، محدوده مناسب برای اجرای مطالعات مغناطیس‌سنجی انتخاب و با توجه به روند کانی‌سازی، امتداد خطوط برداشت شمالی-جنوبی در نظر گرفته شد. در طراحی انجام شده، فاصله خطوط برداشت ۲۰ متر و فاصله نقاط برداشت بر روی مقاطع شمالی-جنوبی ۱۰ متر در نظر گرفته شد و کار صحرایی در مدت شش روز توسط گروه ژئوفیزیک در ۲۰۰۰ نقطه اندازه‌گیری انجام شد. برای ثبت داده‌های مغناطیس، از دو دستگاه مگنتومتر پروتون مدل GSM19T شرکت کانادایی GEM استفاده شد. مشخصات دستگاه در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از انجام بررسیهای صحرایی و انطباق با نقشه زمین‌شناسی، حذف داده‌های تکراری و مخدوش، اعمال تغییرات روزانه و دیگر تصحیحات، پردازشهای لازم انجام شد. تغییرات شدت میدان در ایستگاه مبنا در شکل ۲ ارائه شده است.

### زمین‌شناسی و کانی‌سازی

منطقه مورد بررسی در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آهنگران (Guillou et al., 1981) قرار دارد. مهمترین واحد سنگی رخنمون‌یافته در محدوده اکتشافی سنگهای کربناته منسوب به کرتاسه است (شکل ۳). سنگ‌آهکهای کرم‌رنگ توده‌ای در بخش‌های شرقی منطقه اکتشافی رخنمون گسترده دارند. این واحد در بخش‌های مرکزی به مجموعه‌ای از شیل و آهک نازک‌لایه تبدیل می‌شود و در نهایت، به سمت غرب، آهکهای بلورین قرمز و سفیدرنگ را شاهد هستیم که گاه می‌توان از آن به‌عنوان مرمر یاد کرد

اکسید آهن و کانیهای ثانویه پر شده است. حفرات پر شده با کربنات هم به فراوانی دیده می شوند (شکل ۴-F).

بلورهای الیوین کاملاً تجزیه شده (ایدینگزیته و گاهی احتمالاً با جانشینی بولنزیت) دیده می‌شوند. زمینه حاوی میکرولیت‌های ظریف پلاژیوکلاز است که لابه‌لای آنها با



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی محدوده اکتشافی آهن کلاته ناصر

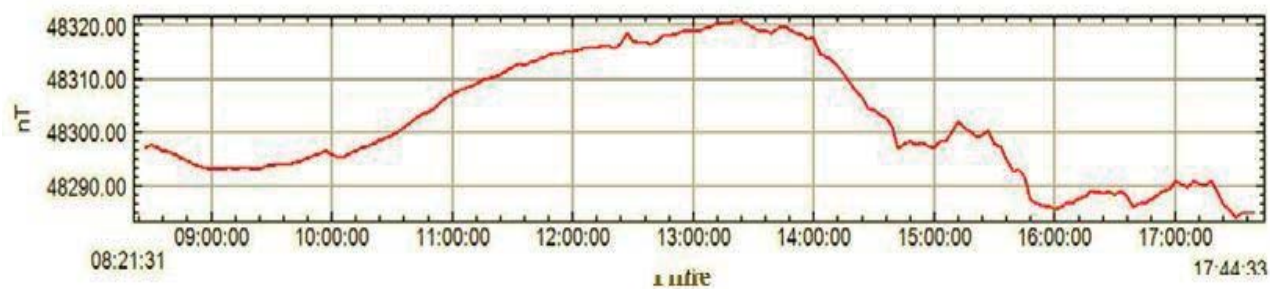
**Fig. 1.** Location and road map of Kalateh Naser prospecting area

جدول ۱. مشخصات دستگاه مگنتومتر پروتون مورد استفاده در برداشتهای زمینی منطقه اکتشافی کلاته ناصر

**Table 1.** Properties of Proton Magnetometer using in magnetic survey in Kalateh Naser prospecting area

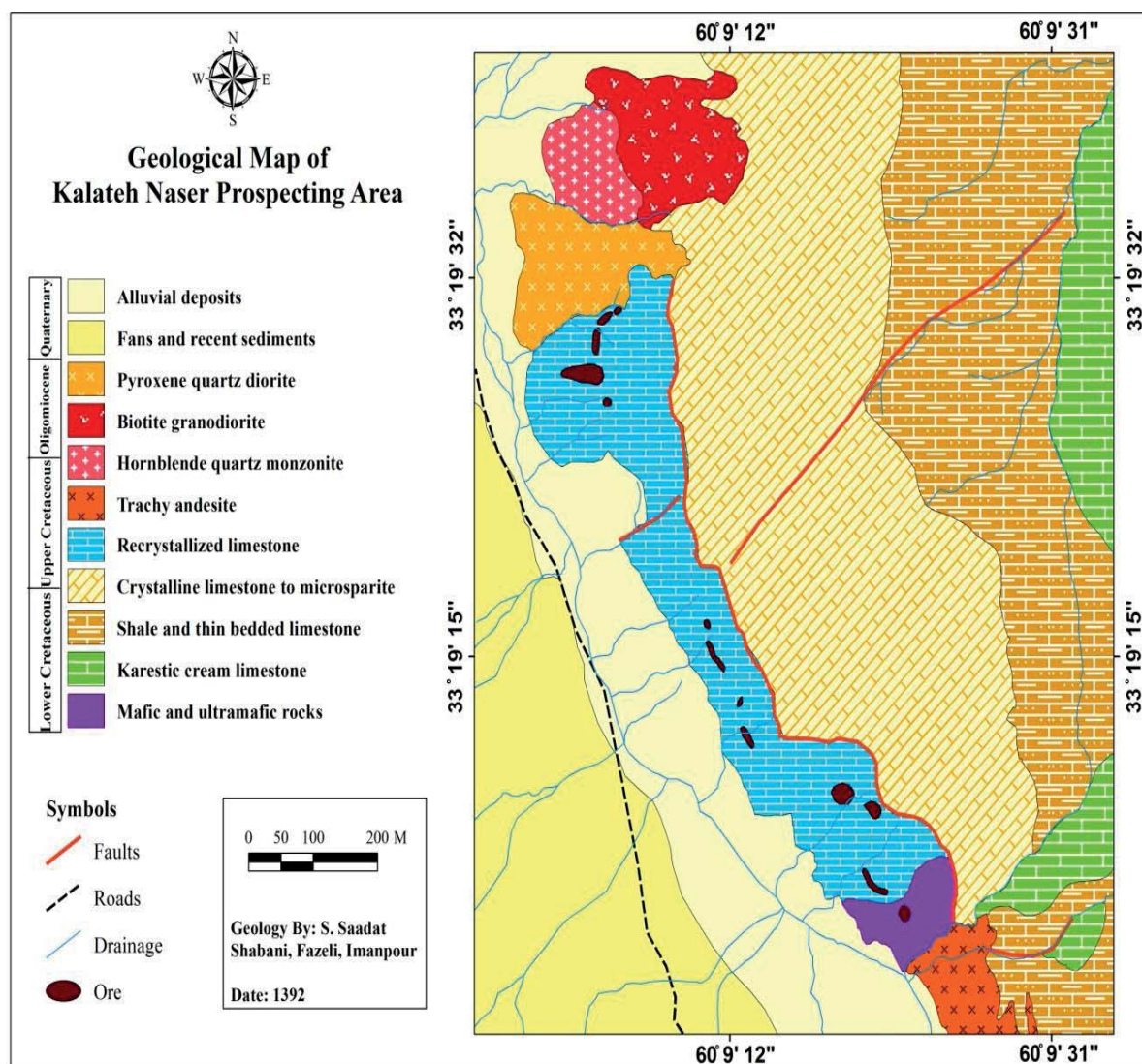
Sensitivity	<0.1nT@ 1Hz
Resolution	0.01nT
Absolute Accuracy	1nT
Dynamic range	10.000- 12000nT
Gradient Tolerance	Over 7000nT/M
Sampling Rate	Reading per 3 to 60 sec
Operating Temperature	-40°C to +60°C





شکل ۲. تغییرات شدت میدان مغناطیسی در ایستگاه مبنا در محدوده اکتشافی کلاته ناصر

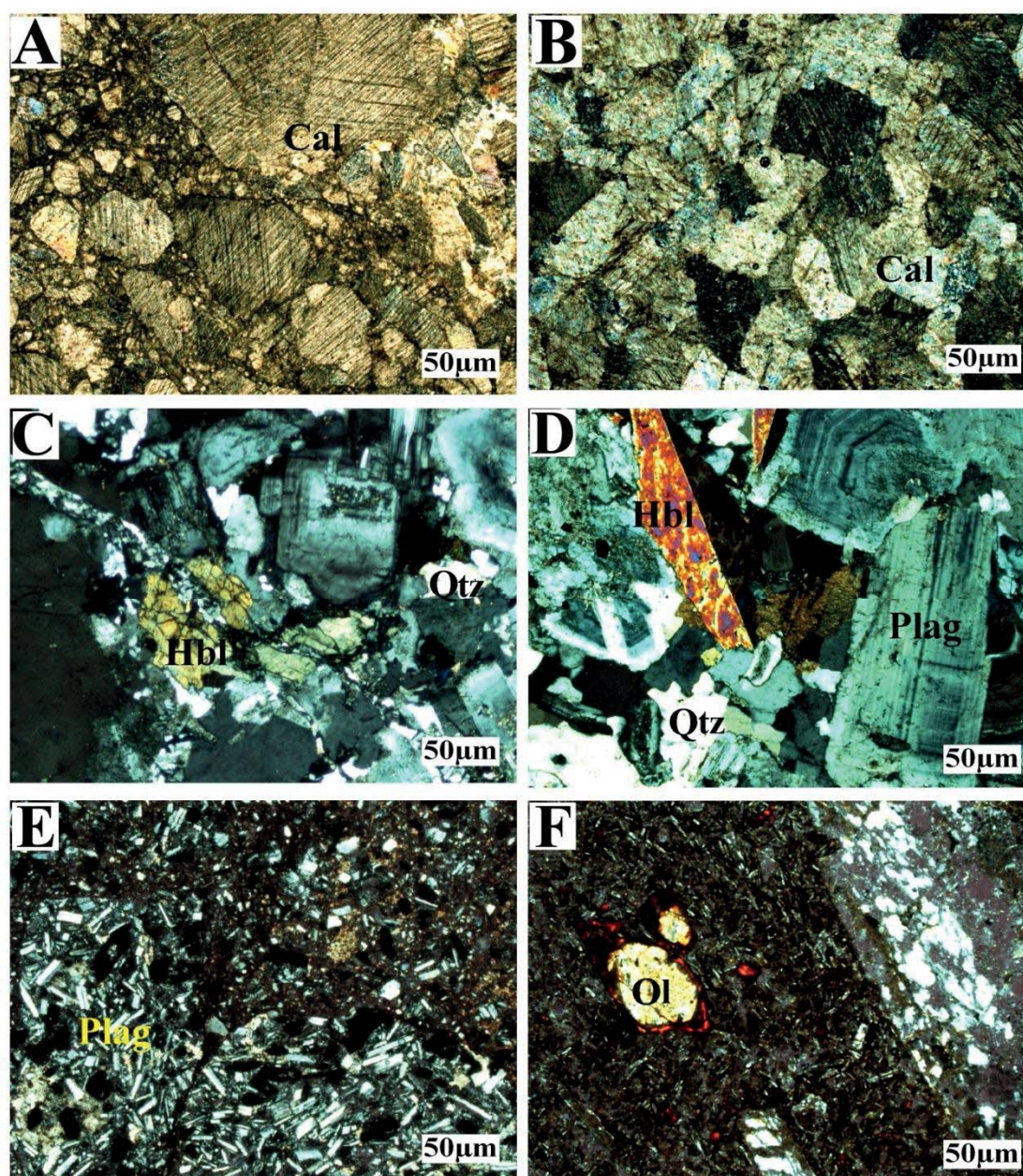
Fig. 2. Variation of total magnetic intensity in the reference's station in Kalateh Naser prospecting area



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی کلاته ناصر

Fig. 3. Geological map of Kalateh Naser prospecting area





شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی (XPL) از A و B: سنگ آهک بلورین و مرمر، C: هورنبلند کوارتز مونزونیت، D: هورنبلند بیوتیت گرانودیوریت، E: تراکی‌اندزیت و F: بازالت. (Hbl = هورنبلند، Qtz = کوارتز، Cal = کلسیت، Plag = پلاژیوکلاز، Ol = اولیون) (Siivola and Schmid, 2007)

**Fig. 4.** Photomicrographs (XPL) of A and B: Crystalline limestone and marble, C: Hornblende quartz monzonite, D: Hornblende biotite granodiorite, E: Basalt, and F: Andesite. (Hbl = Hornblende, Qtz=Quartz, Cal=Calcite, Plag=Plagioclase, Ol=Olivine) (Abbreviations from Siivola and Schmid, 2007)

Cu، Co، Ni و Au نیز ممکن است حضور داشته باشند (Meinert et al., 2005). از سویی، آلتراسیون ضعیف موجود در سنگهای نفوذی رخنمون‌یافته در سطح و از سوی دیگر، نبود کانیهای اسکارنی دمای بالا نظیر گارنت در سنگهای کربناته مجاور توده‌ها می‌تواند بیانگر آن باشد که محلولهای مولد کانی‌سازی با توده‌های رخنمون‌یافته در سطح مرتبط

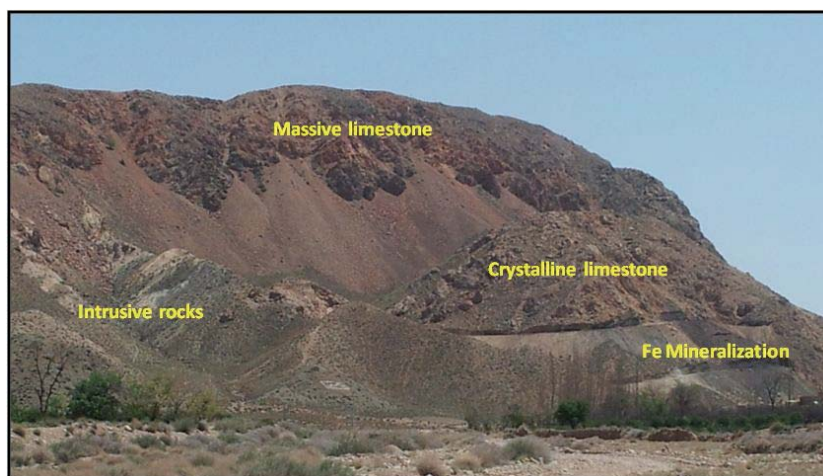
هرچند برای اظهارنظر دقیق در مورد نحوه تشکیل و ویژگیهای کانی‌سازی در منطقه نیاز به بررسیهای بیشتری است؛ لکن شواهد صحرایی و وجود کانه‌زایی آهن در سنگ کربناته می‌تواند بیانگر رخداد کانی‌سازی اسکارن در این محدوده باشد. آهن به‌صورت مگنتیت عمده‌ترین محصول قابل استخراج در اسکارن‌های آهن است؛ اما مقادیر فرعی از عناصر



تقریباً شمال غرب- جنوب شرق رخنمون دارد. نماهایی از رخنمون واحدهای سنگی منطقه در شکل ۵ و حضور گسترده ماده معدنی که پس از انجام عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی و حفر پیش‌کارهای اکتشافی در نقاط پیش‌بینی شده رخنمون پیدا کرده، در شکل ۶ نشان داده شده است. فراوانی و تراکم عدسیه‌های آهن‌دار در منطقه به‌گونه‌ای است که با توجه به نزدیکی آنها به یکدیگر، می‌توان از آنها به‌عنوان زون‌های کانه‌دار نام برد که گاه تا چند ده متر طول و ۱ تا ۵ متر عرض دارند.

نیست و از عمق بیشتری منشأ گرفته‌اند و این امر می‌تواند احتمال وجود کانی‌سازی با گسترش و تنوع بیشتر در عمق را تقویت کند.

برای کسب اطمینان از ترکیب کانی‌شناسی کانسنگ، نمونه‌هایی به‌روش پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده، تأییدکننده مشاهدات صحرایی است. کانی‌مگنتیت به‌عنوان فاز اصلی و کانیهای هماتیت، گوتیت، کلریت، کلسیت و کوارتز به‌عنوان کانیهای همراه گزارش شده است (Saadat, 2014). مگنتیت به‌صورت واریزه و عدسی‌شکل، غالباً در بخش غربی محدوده اکتشافی با روند



شکل ۵. نمایی از محدوده اکتشافی کلاته ناصر و رخنمون واحدهای سنگی مختلف (نگاه به سمت شرق تا جنوب شرق)

**Fig. 5.** The Portrait of Kalateh Naser prospecting area showing different rock units outcrops (view to the east-southeastward)

#### ژئوشیمی

برای بررسی میزان عناصر فرعی و کمیاب در نمونه‌های سنگی حاوی مواد معدنی، نتایج تجزیه شیمیایی ۱۸ نمونه به‌روش XRF و ۱۱ نمونه به‌روش ICP-MS به‌ترتیب در جدولهای ۲ و ۳ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، تغییرات مقادیر  $F_2O_3$  بین ۳۱ تا ۹۶ درصد اندازه‌گیری شده است. میزان  $P_2O_5$  حداکثر ۰/۴۵ درصد و میزان  $TiO_2$  بین ۰/۰۲ تا ۰/۵۴ درصد در نمونه‌های کانسنگ حاوی مقادیر متفاوت آهن، متغیر است. بر اساس نتایج به‌دست آمده (شیمی تر) گستره و میزان آهن کل بین حدود ۴ تا ۶۷ درصد و بیشترین مقادیر گزارش شده مربوط به زون شمالی است (شکل ۷-۸).

بیشترین مس مقدار اندازه‌گیری شده ۷۴۰۵ پی‌پی‌ام گزارش شده است. مقادیر مس بیشتر از ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام در گوشه

شمال غربی (شکل ۷-۸) و تیتانیوم در مقادیر بیشتر از ۰/۴ درصد در دو بخش جنوبی و مرکزی حضور دارد (شکل ۸-۸). بیشترین مقدار فسفر اندازه‌گیری شده در آزمایشات مختلف، ۲۵۰۰ پی‌پی‌ام گزارش شده است. فسفر در مقادیر بیشتر از ۰/۰۲ درصد در بخش جنوبی حضور دارد (شکل ۸-۸). موقعیت بی‌هنجاری تیتانیوم و فسفر در بخشهای شمال غربی با یکدیگر مطابقت دارند. بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده وانادیوم ۲۱۰ پی‌پی‌ام گزارش شده است. مقادیر بیشتر از ۸۰ پی‌پی‌ام غالباً در بخشهای مرکزی حضور دارد (شکل ۹-۸). بالاترین مقادیر منگنز گزارش شده بیشتر از ۳۰۰۰ پی‌پی‌ام است که در بخش مرکزی حضور دارد (شکل ۹-۸). موقعیت بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده منگنز با وانادیوم هم‌خوانی دارد.



شکل ۶. نماهایی از گسترش کانی‌سازی آهن در محدوده کلاته ناصر (بالا: نگاه به سمت شمال تا شمال شرق، پایین: نگاه به سمت جنوب شرق)  
**Fig. 6.** The Portraits of Iron mineralization in Kalateh Naser prospecting area (Top: view to the north-northeastward. Down: view to the southeastward)

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی نمونه‌هایی از سنگ معدن منطقه کلاته ناصر (مقادیر بر حسب درصد)

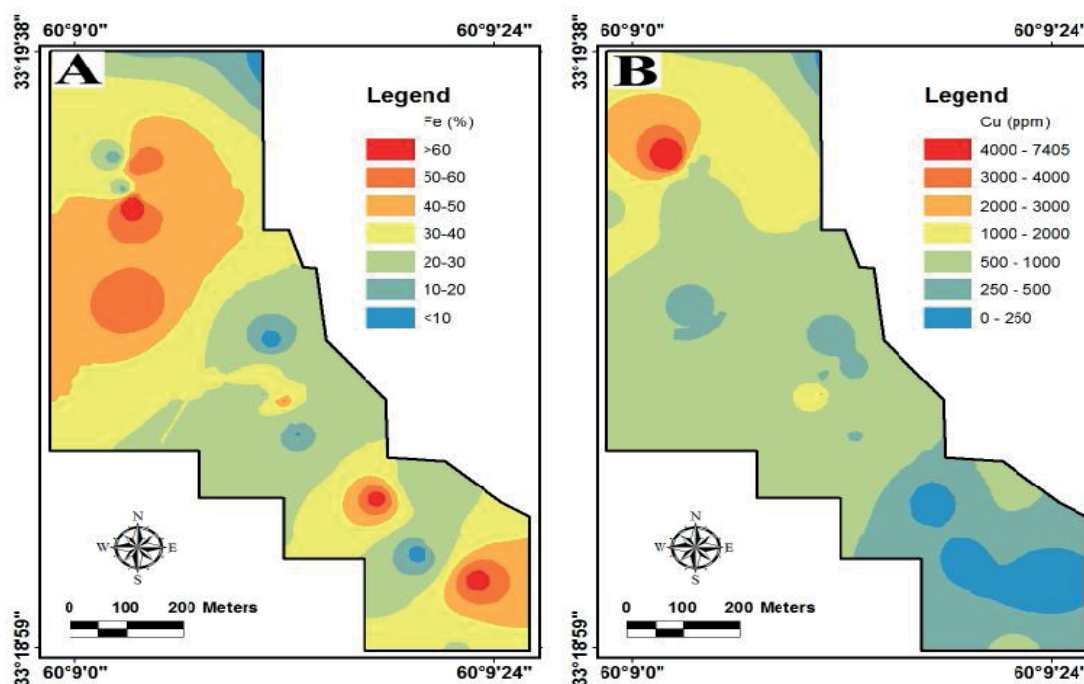
**Table 2.** Major element concentrations (in wt. %) of ore samples from Kalateh Naser prospecting area

Oxide	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Oxide	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
SN-21	0.04	0.46	0.02	63.90	0.21	NA-B1202	0.10	0.27	0.15	84.51	1.26
SN-24	0.02	0.50	0.03	46.70	3.58	NA-B1302	0.08	0.39	0.02	56.75	3.64
SN-4	0.04	0.14	0.002	96.01	0.10	NA-B202	0.54	0.39	0.28	32.85	4.96
SN-5	0.07	0.30	0.014	84.35	0.01	NA-B302	0.47	0.47	0.25	40.31	2.64
SN-6	0.05	0.10	0.445	93.52	0.44	NA-B3250	0.36	0.21	0.18	58.09	2.46
SN-7	0.03	0.18	0.002	96.02	0.002	NA-B502	0.39	0.16	0.20	31.27	1.92
SN-8	0.32	0.16	0.001	94.56	0.001	NA-B802	0.22	0.13	0.07	79.20	2.12
NA-B10253	0.47	0.22	0.24	47.26	2.5	NA-B902	0.16	0.08	0.13	71.04	4.86
NA-B1102	0.12	0.22	0.17	80.66	0.89	NA-B11022	0.20	0.12	0.25	62.53	8.21

جدول ۳. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر انتخابی نمونه‌هایی از سنگ معدن منطقه کلاته ناصر (مقادیر بر حسب پی‌پی‌ام)

**Table 3.** Trace element concentrations (in ppm) of ore samples from Kalateh Naser prospecting area

Element	Cu	Fe	Mn	P	S	Ti	V
SN-20	2369	157737	5	10	50	133	60
SN-21	1318	265693	2087	56	35637	199	210
SN-22	296	41364	3065	48	795	4744	112
SN-23	293	257347	2077	961	936	67	45
SN-24	1228	213059	1860	58	4150	202	95
SN-25	557	265997	3110	39	12913	682	74
SN-26	333	263613	1085	103	4301	89	55
SN-27	332	241070	1870	47	1399	186	86
SN-28	215	250695	1086	79	25796	166	47
SN-29	11	10247	949	61	11557	93	3
NA-B1402	7405	126032	4492	218	43697	2458	65



شکل ۷. نقشه توزیع ژئوشیمیایی A: عنصر آهن و B: عنصر مس در محدوده کلاته ناصر

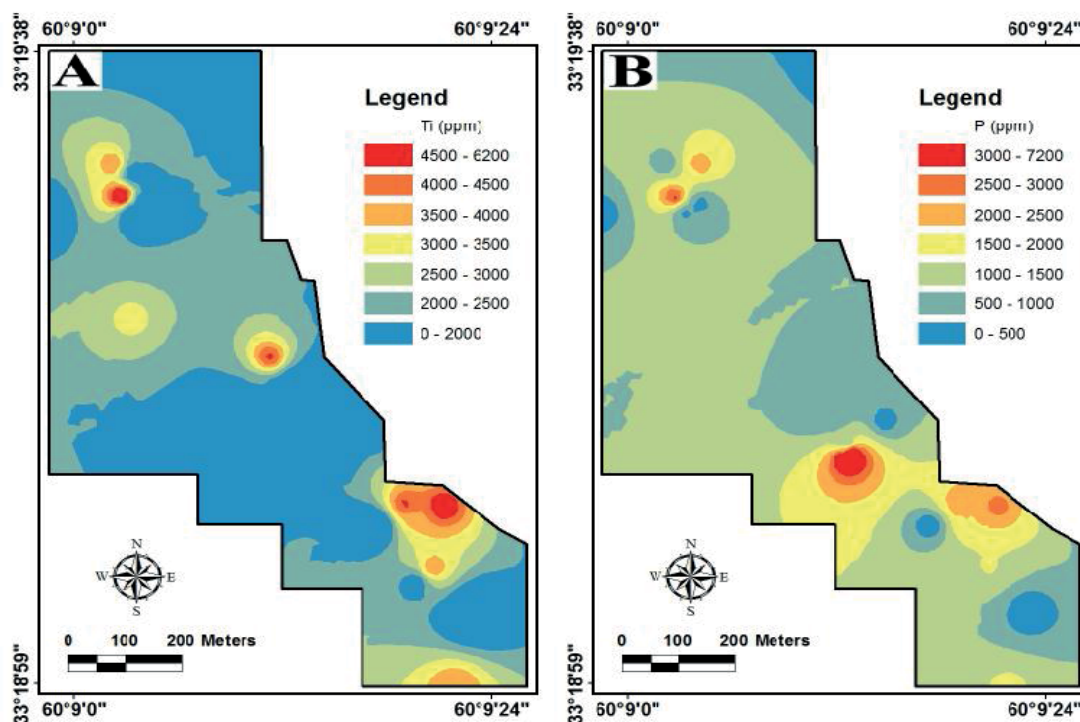
**Fig. 7.** Geochemical distribution of A: Fe, and B: Cu in Kalateh Naser area

مربوط به واحدهای اسکارنی و در حد  $SI \times 10^{-5} \times 34000$  است که با کانی‌سازی آهن در منطقه مرتبط است. شدت پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به واحد آهک بلورین حدود  $SI \times 10^{-5} \times 50$  و مرمز کمتر از  $SI \times 10^{-5} \times 10$  است که کاملاً تأثیر کانی‌سازی آهن در واحد کربناته را نمایان می‌کند.

#### پذیرفتاری مغناطیسی

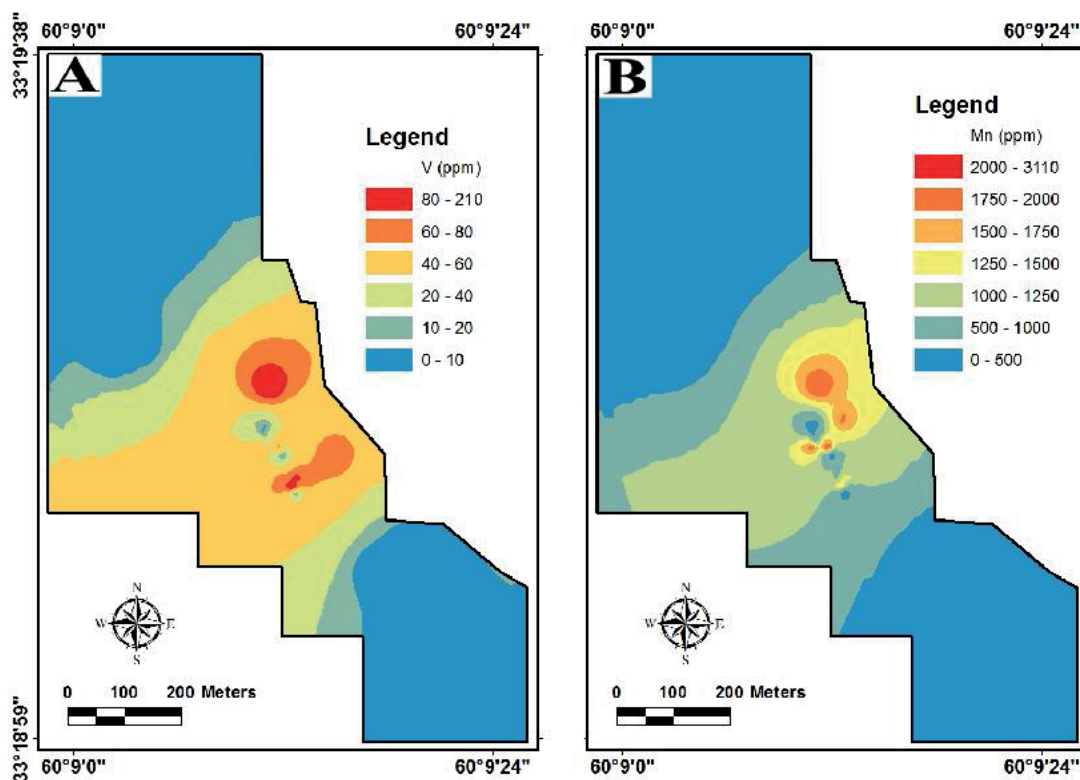
ویژگیهای مغناطیسی سنگ با اندازه‌گیری مقدار پذیرفتاری مغناطیسی مشخص می‌شود. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای سنگی مختلف با استفاده از دستگاه حساسیت‌سنج مغناطیسی مدل GMS-2 اندازه‌گیری شد (جدول ۴). بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی





شکل ۸. نقشه توزیع ژئوشیمیایی A: عنصر تیتانیوم و B: عنصر فسفر در محدوده کلاته ناصر

Fig. 8. Geochemical distribution of A: Ti, and B: P in Kalateh Naser area



شکل ۹. نقشه توزیع ژئوشیمیایی A: عنصر وانادیوم و B: عنصر منگنز در محدوده کلاته ناصر

Fig. 9. Geochemical distribution of A: V, and B: Mn in Kalateh Naser area

جدول ۴. پذیرفتاری مغناطیسی چند نمونه سنگی مختلف از منطقه کلاته ناصر

Table 4. Magnetic susceptibility of different rocks from Kalateh Naser area

Rock Type	Magnetic Susceptibility
Crystalline limestone	$50 \times 10^{-5}$
Marble	$9 \times 10^{-5}$
Fe Skarn	$34000 \times 10^{-5}$
Biotite Granodiorite, Hornblende quartz monzonite	$900-1870 \times 10^{-5}$
Diabase-Basalt	$16200 \times 10^{-5}$
Diorite-Gabbro	$3000-4400 \times 10^{-5}$

(A). حداکثر شدت میدان اندازه‌گیری شده حدود ۷۰۰۰۰ نانوتسلا و حداقل آن حدود ۴۰۰۰۰ نانوتسلا و به‌صورت تغییرات طیف رنگی کنار نقشه شدت کل نشان داده شده است (شکل ۱۰- A). تغییرات زیاد شدت میدان مغناطیسی در این نقشه نشان‌دهنده تغییرات زیاد در مقدار خودپذیری مغناطیسی سنگها در این محدوده است. در این منطقه سه زون بزرگ بی‌هنجاری مغناطیسی همراه با دو زون آنومالی کوچکتر قابل مشاهده است (شکل ۱۰- A). روند این زون‌های بی‌هنجاری شمال‌غرب- جنوب‌شرق است و عمدتاً در دامنه ارتفاعات دیده می‌شوند. بیشترین تغییرات شدت میدان بر روی شمالی‌ترین بی‌هنجاری مغناطیس منطبق است و به نظر می‌رسد بی‌هنجاریهای مغناطیسی به سمت جنوب‌شرق و شمال محدوده برداشت نیز ادامه دارد (Ryahei, 2013). مقایسه نقشه شدت کل میدان مغناطیس با نقشه زمین‌شناسی نیز نشان می‌دهد که موقعیت بی‌هنجاریهای مغناطیسی مشاهده شده با موقعیت توده‌های نفوذی هم‌خوانی ندارد. بنابراین، این توده‌ها منشأ ناهنجاریهای مغناطیسی دیده شده در منطقه نیست (شکل ۱۰- B).

#### نقشه برگردان به قطب<sup>۳</sup>

استفاده از فیلتر برگردان به قطب برای دستیابی به محل واقعی بی‌هنجاریها در مناطق مورد بررسی انجام می‌شود (Clark, 1997). از آنجایی که میل و انحراف مغناطیسی باعث می‌شود بی‌هنجاریهای مغناطیسی نسبت به منبع ایجادکننده خود انحراف داشته باشند، فیلتر مربوط به تصحیح زاویه میل و انحراف مربوطه بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال می‌شود و در نهایت، بر اساس داده‌های مغناطیسی انتقال داده شده به قطب، تفسیر اصلی صورت می‌گیرد (Nakatsuka and Okuma, 2006).

پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی منطقه مانند هورنبلند کوارتز مونزونیت بیشتر از  $SI \times 10^{-5}$  است (جدول ۴). در رابطه با پذیرفتاری توده‌های نفوذی، ایشی‌هارا (Ishihara, 1981) مقدار پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتوئیدهای دسته مگنتیت را (به‌علت حضور کانی فرعی مگنتیت) بیش از  $SI \times 10^{-5}$  و دسته ایلمنیت را کمتر از این حد می‌داند. بر این اساس، توده‌های نفوذی منطقه مورد بررسی در محدوده دسته مگنتیت قرار می‌گیرند. نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای سنگی منطقه نیز نشان‌دهنده آن است که ناهنجاری مغناطیسی در محدوده کلاته ناصر با کانی‌سازی آهن در این منطقه مرتبط است. میزان پایین پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی رخنمون‌یافته در منطقه نیز نشان می‌دهد که این توده‌ها در کانی‌سازی آهن نقشی نداشته‌اند و خود زیر آلتراسیون ضعیف قرار گرفته‌اند و توده نفوذی مولد کانی‌سازی با فاصله و به احتمال زیاد در اعماق بیشتر قرار دارد.

#### بررسی نقشه‌های مغناطیس‌سنجی

##### نقشه شدت کل میدان مغناطیسی

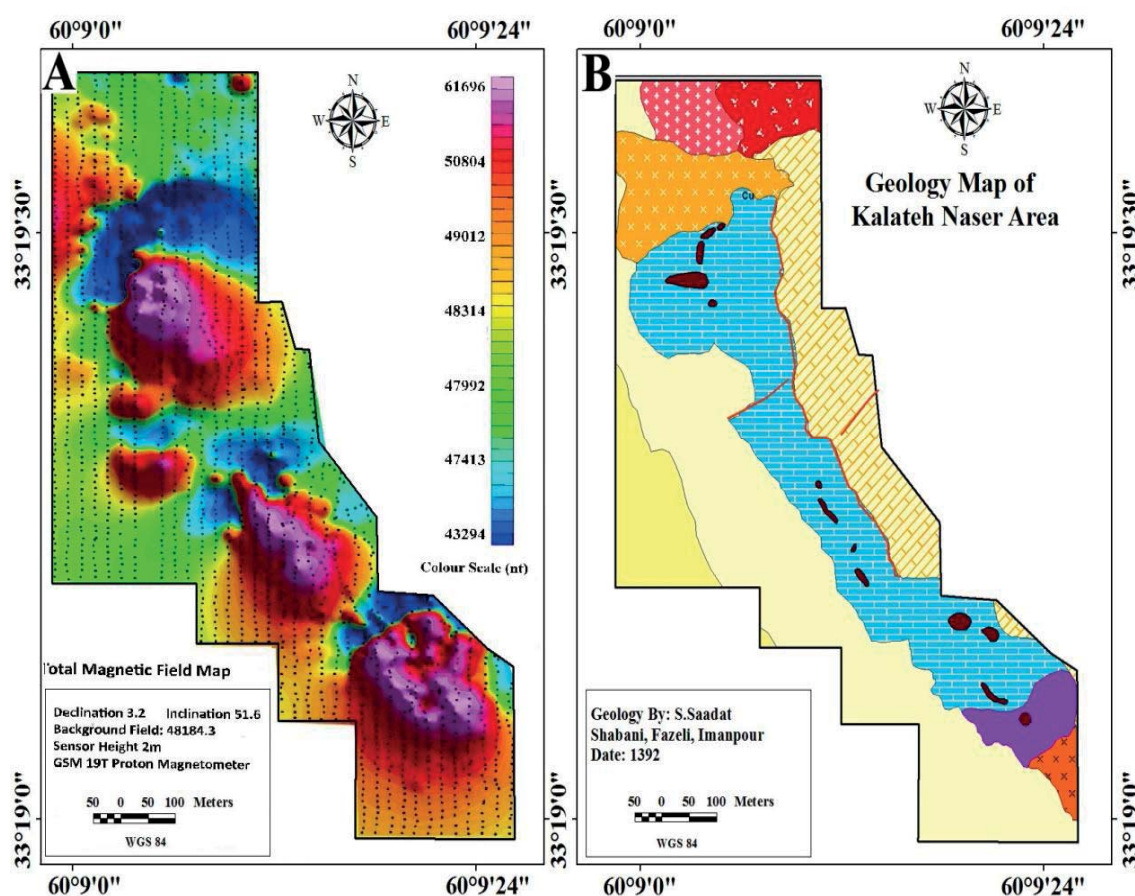
نقشه شدت کل میدان مغناطیسی<sup>۱</sup> یک برداشت کلی از داده‌های مغناطیسی فراهم می‌کند و برای تفسیرهای کلی استفاده می‌شود (Liu and Mackey, 1998). میدان مغناطیسی اصلی زمین در منطقه مورد بررسی، با استفاده از برنامه رفرنس بین‌المللی ژئومغناطیس<sup>۲</sup> مقدار ۴۸۱۷۲ نانوتسلا در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر بالاتر از آن، می‌تواند ناهنجاری محسوب شود.

برای محدوده مورد بررسی، با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از ۲۰۰۰ نقطه اندازه‌گیری صحرائی و پس از اعمال تصحیحات لازم، نقشه شدت کل میدان مغناطیسی تهیه شد (شکل ۱۰-).

1. Total Magnetic Intensity Map
2. International Geomagnetic Reference
3. Reduced to Pole Magnetic Map

حدی شمال جابه‌جا شده است (شکل ۱۱- A). با توجه به تغییرات ایجاد شده، مقدار تغییرات شدت میدان نیز در نقشه برگردان به قطب نسبت به نقشه شدت کل تغییر کرده که این موضوع در مقیاس رنگی کنار نقشه (شکل ۱۱- A) مشخص است.

در محدوده مورد بررسی، با توجه به زاویه انحراف مغناطیسی معادل  $3/2$  درجه و زاویه میل مغناطیسی معادل  $51/6$  درجه نقشه برگردان به قطب تهیه شده است (Ryahei, 2013). در این نقشه، زون‌های شدت پایین از محل خود جابه‌جا شده و به سمت غرب بی‌هنجاریهای شدت بالا کشیده شده‌اند و بی‌هنجاریهای شدت بالا در این نقشه‌ها نیز به سمت شرق و تا



شکل ۱۰. A: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی محدوده کلاته ناصر و B: نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی کلاته ناصر (راهنما مشابه شکل ۳)  
**Fig. 10.** A: Total magnetic intensity map of Kalateh Naser area, and B: Geological map of Kalateh Naser prospecting area (Legend as Fig. 3)

به صورت تداخل کانی‌سازی مگنتیت با سنگ میزبان کربناته و به صورت رگه، رگه‌چه و عدسیهای کوچک نشان می‌دهد. نکته دیگر در این نقشه، تغییر در روند بی‌هنجاریهای نقشه از جنوب تا شمال است؛ به صورتی که در بی‌هنجاری شمالی تقریباً روند بی‌هنجاری شمالی- جنوبی است و در بی‌هنجاری جنوبی روند تقریباً شمال غرب- جنوب شرق است (Ryahei, 2013). در این نقشه که با هدف مشخص شدن لبه‌های بی‌هنجاری ایجاد

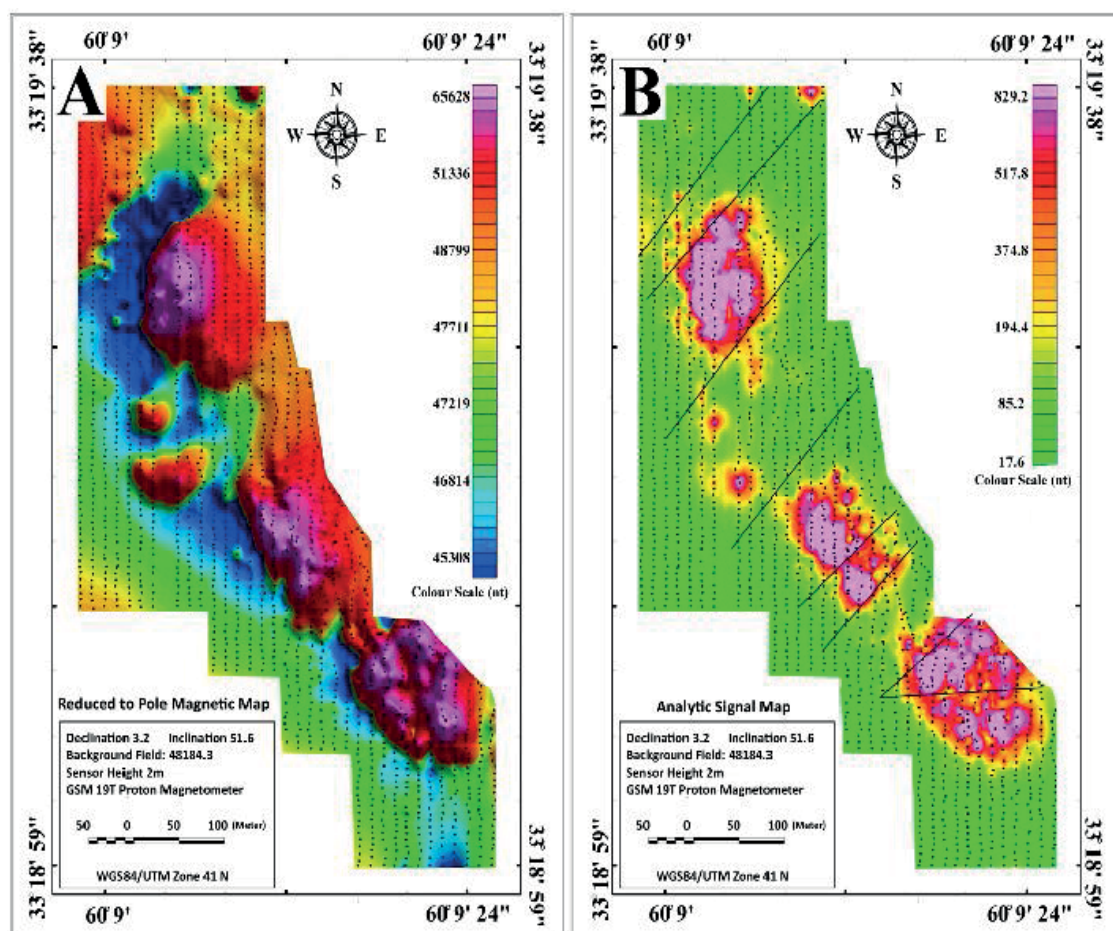
### نقشه سیگنال تحلیلی<sup>۱</sup>

در این نقشه، بیشترین تغییرات منطبق بر بی‌هنجاریهای نقشه شدت کل و برگردان به قطب است (شکل ۱۱- B). در این نقشه بی‌هنجاری جنوبی منقطع است و به نظر می‌رسد که عامل به وجود آورنده این بی‌هنجاری دارای تغییرات زیادی در مقدار خودپذیری مغناطیسی است. این امر در حفاریهای انجام شده در بخش جنوبی نیز مورد تأیید قرار گرفت و خود را



بی‌هنجاریهای کوچکتری تشکیل شده‌اند، ابعاد کل محدوده بی‌هنجار در نظر گرفته شده است.

شده است، ابعاد محدوده بی‌هنجار از شمال به جنوب، به ترتیب  $۶۰ \times ۱۴۰$ ،  $۴۰ \times ۷۰$  و  $۱۹۰ \times ۱۴۰$  متر است (شکل ۱۱-B). در محدوده بی‌هنجار جنوبی و مرکزی با توجه به این‌که خود از



شکل ۱۱. A: نقشه برگردان به قطب محدوده کلاته ناصر و B: نقشه سیگنال تحلیلی محدوده کلاته ناصر

Fig. 11. A: Reduced to pole magnetic map of Kalateh Naser area, and B: Analytic signal map of Kalateh Naser area.

به زون‌های بی‌هنجاری قابل مشاهده در این نقشه (شکل ۱۲- A)، تعدادی خطواره مغناطیسی قابل تشخیص است. به نظر می‌رسد عمده‌ترین خطواره‌ها در این محدوده در جهت شمال شرق - جنوب غرب است (Ryahei, 2013). همان‌گونه که در شکل ۱۲-A دیده می‌شود، بیشترین مقادیر تغییرات در این نقشه منطبق بر بی‌هنجاریهای نقشه برگردان به قطب است. در مقایسه محدوده‌های بی‌هنجار از شمال تا جنوب محدوده برداشت به نظر می‌رسد در این محدوده بی‌هنجاری شمالی دارای شکل هموارتری است و تعداد بی‌هنجاریهای مثبت و منفی داخل محدوده بی‌هنجاری در بی‌هنجاری شمالی

#### نقشه مشتق اول قائم<sup>۱</sup>

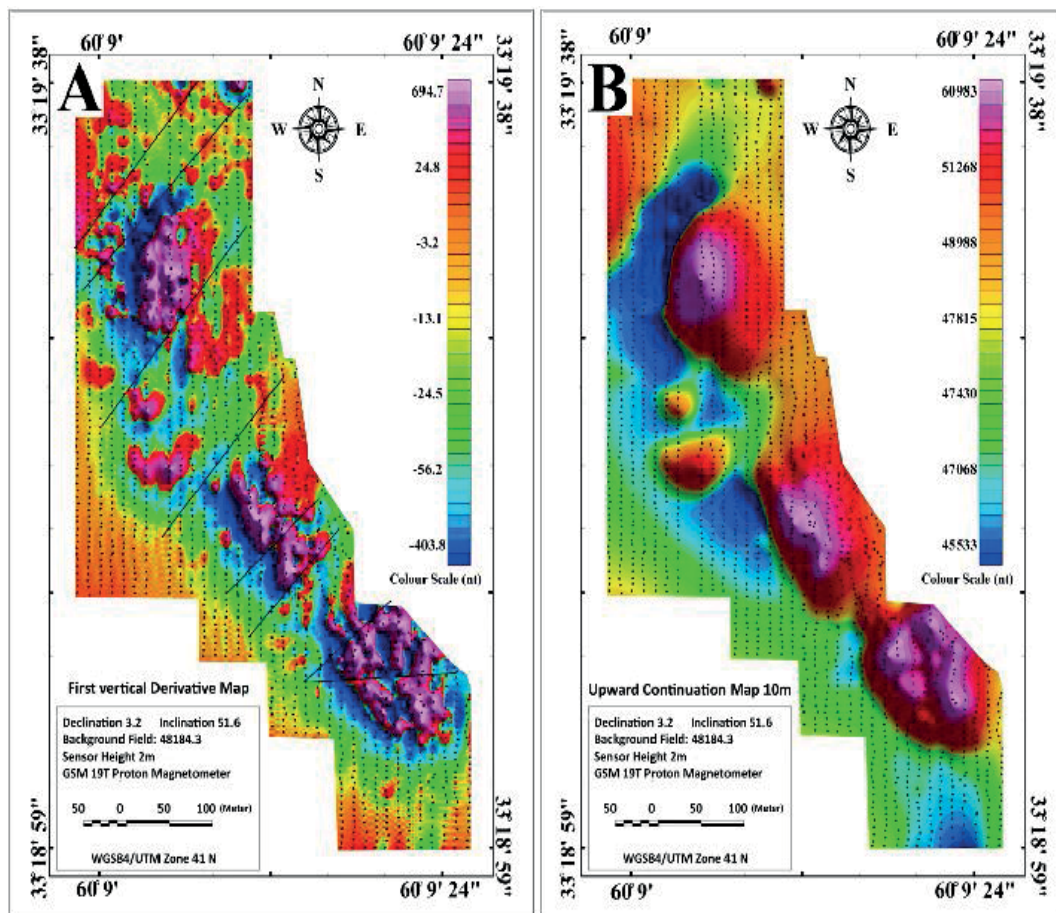
فیلتر مشتق اول قائم، اثر بی‌هنجاریهای عمیق با بسامد پایین را حذف کرده است و منابع کم‌عمق با بسامد بالا را نشان می‌دهد (Gunn, 1996; Tarlowski et al., 1997). نقشه گرادیان عمودی، تصویری فیلتر شده از میدان مغناطیسی فراهم می‌کند که ویژگیهای مغناطیس نزدیک سطح زمین را برجسته‌تر می‌کند (Cooper and Cowan, 2004; Ford et al., 2007). بی‌هنجاری نزدیک به سطح را بهتر تشخیص داد و روند گسل و شکستگی عمده موجود در محدوده را مشخص کرد. با توجه

۵۰ متر (با استفاده از فیلتر ادامه فراسو بر روی نقشه برگردان به قطب) تهیه شده است. با مقایسه این نقشه‌ها مشاهده می‌شود که در نقشه ادامه فراسوی ۱۰ و ۳۰ متر، بی‌هنجاریهای کوچک منطبق بر محدوده‌های بی‌هنجار در حال حذف شدن است (شکل ۱۲-B و ۱۳-A) و محدوده بی‌هنجار به شکل محدوده هموار شدت بالا در ادامه فراسوی ۵۰ متر دیده می‌شود (Ryahei, 2013). در ادامه فراسوی ۵۰ متر، همچنان تغییرات شدت میدان بالاست و بی‌هنجاریهای مغناطیسی در نقشه به صورت واضح دیده می‌شود و فقط دو بی‌هنجاری کوچک در غرب محدوده برداشت در ادامه فراسوی ۵۰ متر حذف شده است (شکل ۱۳-B). این نتایج نشان می‌دهد ماده معدنی با گسترش مناسب حداقل تا عمق ۵۰ متر ادامه دارد.

کمتر از بی‌هنجاریهای دیگر این محدوده است. با توجه به این نقشه، محدوده‌های بی‌هنجاری از بخشهای کوچکتری تشکیل شده است و در داخل عامل بی‌هنجاری تغییراتی در مقدار خودپذیری مغناطیسی وجود دارد. چنان‌که دیده می‌شود خطواره‌های اصلی قابل استخراج در این نقشه تقریباً با خطواره‌های استخراج شده از نقشه سیگنال تحلیلی مطابقت دارند.

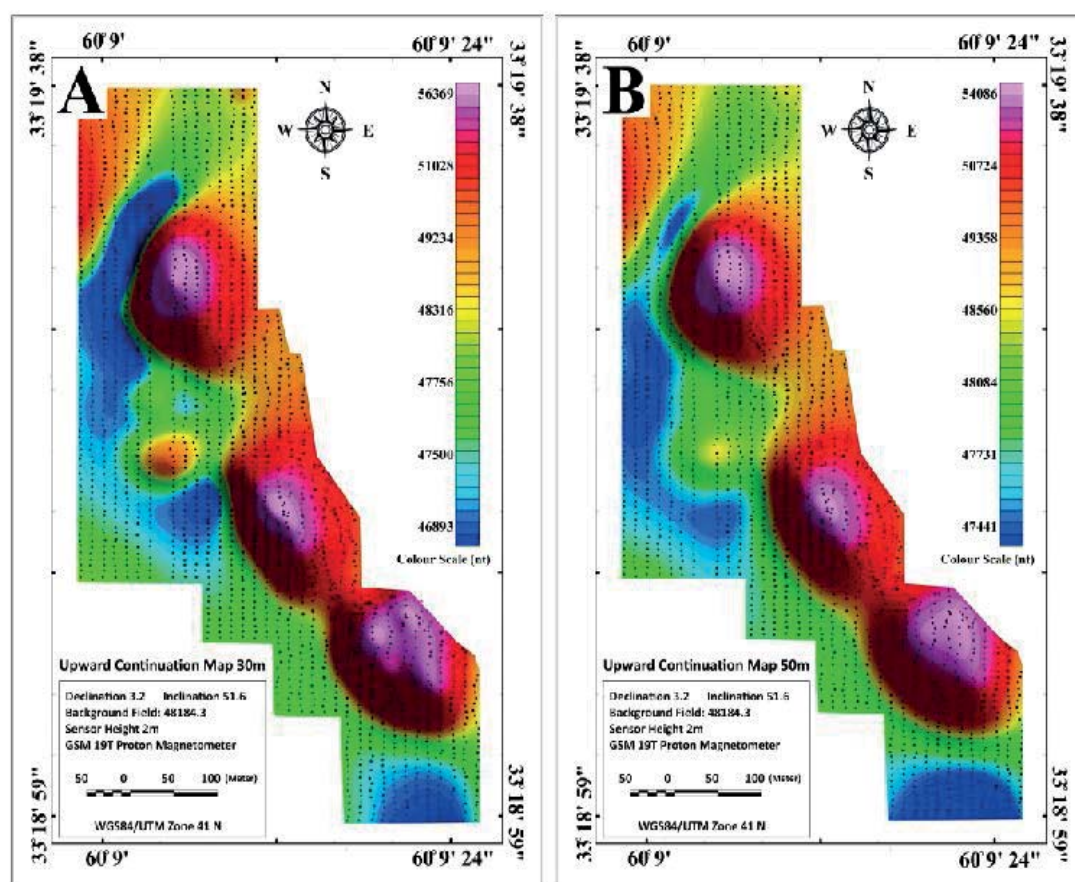
### نقشه‌های ادامه فراسو<sup>۲</sup>

فیلتر ادامه به سمت بالا اثر بی‌هنجاریهای با طول موج کوتاه را حذف، دامنه بی‌هنجاری را تضعیف و اختلالات را کاهش می‌دهد، بنابراین، مانند یک روش پایین گذر عمل می‌کند (Tarlowski et al., 1997). با توجه به ابعاد و شکل محدوده برداشت، نقشه‌های ادامه فراسو ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰



شکل ۱۲. A: نقشه مشتق اول قائم محدوده کلاته ناصر و B: نقشه ادامه فراسو ۱۰ متر محدوده کلاته ناصر

Fig. 12. A: First vertical derivative map, and B: Ten meter upward continuation map of Kalateh Naser area



شکل ۱۳. A: نقشه‌های ادامه فراسو ۳۰ متر محدوده کلاته ناصر و B: نقشه‌های ادامه فراسو ۵۰ متر محدوده کلاته ناصر

**Fig. 13.** A: Thirty meter upward continuation map of Kalateh Naser area, and B: Fifty meter upward continuation map of Kalateh Naser area

#### نتیجه‌گیری

تأیید قرار گرفته است و اکتشافات هنگام استخراج ادامه دارد. نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای سنگی منطقه نشان می‌دهد که ناهنجاری مغناطیسی در محدوده کلاته ناصر با کانی‌سازی آهن در این منطقه مرتبط است. میزان پایین پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی رخمون‌یافته در منطقه و آلتراسیون ضعیف آنها نشان می‌دهد که این توده‌ها نقش اصلی در کانی‌سازی آهن ایفا نکرده‌اند و توده نفوذی مولد کانی‌سازی با فاصله و به احتمال زیاد در اعماق بیشتر قرار دارد.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده صحیح از روشهای مغناطیس‌سنجی زمینی در کنار دیگر داده‌های اکتشافی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها، بالا بردن کارایی برنامه‌های اکتشافی و تسهیل در این امر به‌طور قابل توجهی کمک کند. ارائه نتایج اکتشافات ژئوشیمیایی و بررسی اندازه‌گیریهای مغناطیس زمینی در محدوده معدنی کلاته ناصر

بر اساس برداشتهای صحرائی و بررسیهای زمین‌شناسی، مطالعات ژئوشیمیایی و نتایج به‌دست آمده از مغناطیس‌سنجی زمینی، در محدوده معدنی کلاته ناصر، پنج بی‌هنجاری مغناطیسی ظاهر شد که در ارتباط با عامل بی‌هنجاری با مقدار خودپذیری مغناطیسی بالاست. این بی‌هنجاریها به‌صورت منقطع و عدسی‌مانند در امتداد هم و با جهات مختلف در نقشه‌های مغناطیسی قابل مشاهده است. در بین این بی‌هنجاریها، بی‌هنجاری شمالی به‌صورت یک زون پیوسته با امتداد شمالی - جنوبی دیده می‌شود و بی‌هنجاریهای جنوبی به‌صورت یک زون منقطع و مرکب از تعدادی بی‌هنجاری کوچکتر قابل مشاهده است. نتایج اولیه به‌دست آمده از حفاریهای عمقی، انطباق بسیار خوبی با بررسیهای انجام‌شده در سطح نشان می‌دهد. تاکنون تا عمق ۵۰ متر، ذخیره‌های بیش از ۱/۵ میلیون تن سنگ آهن مگنتیتی در منطقه مورد



خانم دکتر قورچی و دیگر عزیزانی که در برداشتهای زمینی، تهیه نقشه‌ها و پردازش داده‌ها همکاری صمیمانه داشته‌اند، سپاس‌گزاری می‌نمایم.

می‌تواند در اکتشاف هرچه بیشتر توده‌های مگنتیتی در دیگر مناطق این پهنه مستعد کانی‌سازی مفید واقع شود.

#### قدردانی

بدین‌وسیله از کارشناسان و همکاران محترم آقایان ریاحی، شکر، معدنی، ابراهیم‌زاده، سالاری، خانواده مالدار، سرکار

#### References

- Calagari, A.A., 1992. Principals of geophysics exploration. Tabesh press, Tabriz, 588 pp.
- Clark. D.A., 1997, Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *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.
- Ford, K., Keating, P. and Thomas, M.D., 2007. Overview of geophysical signatures associated with Canadian ore deposits. *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 5: 939-970.
- Guillou, Y., Maurizot, D., Vaslet, H. and Villeon, D., 1981. Geological map of Ahangan. scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Gunn, P.J., 1996. Workshop Interpretation of aeromagnetic data. *Journal of Australian Geology and geophysics*. 17(2): 105-113.
- Ishihara, S., 1981. The Granitoid Series and Mineralization. In: B.J. Skinner (Editor), *Economic Geology 75th Anniversary Issue*. Economic Geology Publishing Company, New Haven, Connecticut, pp. 458-484.
- Liu. S. and Mackey. T., 1998. Using images in a geological interpretation of magnetic data. *Australian Geological Survey Organisation Research Newsletter*, 28: 1-3.
- Madani, H. and Yaghoobpour A., 1996. Estimation and evaluation of ore deposits. Payam Noor Press, Tehran, 219 pp.
- Meinert, I., Dipple, G.M, and Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Inc. Littleton, Colorado, pp.299-336.
- Nakatsuka, T. and Okuma S., 2006. Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. *Exploration Geophysics*, 37(1): 121-128.
- Robinson, E.S. and Coruh, C. (translated by Haydarian Shahri, M.R.), 2005. Basic exploration geophysics. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad, 750 pp.
- Ryahei, H., 2013. Magnetite data of Kalateh Naser prospecting area. Madan Yaran Lut Company, Mashhad, Internal report, Report 1, 17 pp.
- Saadat, S., 2014. Final exploration report of Kalateh Naser prospecting area. Madan Yaran Lut Company, Mashhad, Internal report, Report 3, 100 pp.
- Siivola, J. and Schmid, R., 2007. A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 12. List of mineral abbreviations. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. Recommendations, web version of 01.02. [http://www.bgs.ac.uk/scmr/docs/papers/paper\\_12.pdf](http://www.bgs.ac.uk/scmr/docs/papers/paper_12.pdf)
- 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.



## Geology, Geochemistry and Ground Magnetic Survey on Kalateh Naser Iron Ore Deposit, Khorasan Jonoubi Province

Saeed Saadat\*

Department of Geology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Submitted: Aug. 23, 2016

Accepted: Dec. 25, 2016

**Keywords:** Magnetite mineralization, Ground Magnetometry, Kalateh Naser, Ahangaran, Lut block

### Introduction

Ground magnetometer surveys is one of the oldest geophysical exploration methods used in identifying iron reserves. The correct interpretation of ground magnetic surveys, along with geological and geochemical data will not only reduce costs but also to indicate the location, depth and dimensions of the hidden reserves of iron (Robinson and Coruh, 2005; Calagari, 1992). Kalateh Naser prospecting area is located at 33° 19' to 33° 19' 42" latitude and 60° 0' to 60° 9' 35" longitude in the western side of the central Ahangaran mountain range, eastern Iran (Fig.1). Based on primary field evidences, limited outcrops of magnetite mineralization were observed and upon conducting ground magnetic survey, evidence for large Iron ore deposits were detected (Saadat, 2014). This paper presents the geological and geochemical studies and the results of magnetic measurements in the area of interest and its applicability in exploration of other potential Iron deposits in the neighboring areas.

### Materials and methods

To better understand the geological units of the area, samples were taken and thin sections were studied. Geochemical studies were conducted through XRF and ICP-Ms and wet chemistry analysis. The ground magnetic survey was designed to take measurements from grids of 20 meter apart lines and 10 meter apart points along the north-south trend. 2000 points were measured during a 6-day field work by expert geophysicists. Records were made by Canadian manufactured product Magnetometer Proton GSM19T (Fig. 2). Properties of Proton Magnetometer using in magnetic survey in Kalateh Naser prospecting

area is shown in Table 1. Total magnetic intensity map, reduced to pole magnetic map, analytic single map, first vertical derivative map and upward continuation map have been prepared for this area.

### Results

The most significant rock units in the area are cretaceous carbonate rocks (Fig. 3). The unit turns to shale and thin bedded limestone in the central part and into red and white crystalline limestone towards the west, which sometimes can be referred as marble and skarn (Figs. 4, 5 and 6; Saadat, 2014). Iron mineralization is mostly observed in these units. Acidic to intermediate intrusive bodies consisting hornblende quartz monzonite, biotite granodiorite, pyroxene quartz diorite have outcrops in the north and northwestern part of the area (Fig. 3). Outcrops from andesite to dacite volcanic rocks in combination with ultra-mafic rocks can be seen in the southern part of the region.

The geochemical results indicated  $F_2O_3$  value range of %31 to %96.  $P_2O_5$  of maximum %0.45 was observed and  $TiO_2$  varied from %0.02 to %0.54 (Tables 2 and 3 and Figs 7, 8 and 9). The highest values of iron and copper are found in the northern part, titanium and phosphorus are located in the southern part and manganese and vanadium are placed in the central sector. According to the obtained results, the highest magnetic susceptibility was associated with the skarn units and was measured at  $34000 \times 10^{-5}$  SI which is related to the mineralization of Iron in the area. Magnetic susceptibility of limestone crystalline units were close to  $50 \times 10^{-5}$  SI and marble was less than  $10 \times 10^{-5}$  SI which highlights the influence of

iron mineralization in the carbonates rocks. This value was around  $80 \times 10^{-5}$  SI for intrusive rocks such as hornblende quartz monzonite in the area (Table 4). Ground magnetic studies suggest minimum of 40000 nT and maximum of 70000 nT total magnetic intensity in the area (Fig. 10-A; Ryahei, 2013). Utilizing the Reduced to Pole Magnetic Filter is to locate the anomalies in the study area (Fig. 11-A). Since magnetic declination causes a degree of deviation between the source and magnetic anomalies, the said filter is applied to magnetic data and ultimately, analysis is done based on the magnetic data transferred to the pole (Nakatsuka and Okuma, 2006; Clark, 1997). The results of reduce to pole magnetic map for this area yielded three large and two small magnetic anomalies (Figs 12-A and 12-B). The upward continuation maps were taken with 5m, 10m, 20m, 30m, 40m, and 50m. Smaller anomalies tend to disappear more comparing the 5m to 20m continuation maps respectively, and a homogenous large anomaly starts to form in the 50m map (Fig. 13). Large and clear anomalies continue to be present in the 50m continuation map and only two smaller anomalies are disappeared from the west of the area (Ryahei, 2013).

### Discussion

The results of geological, geochemical and magnetic susceptibility measurements indicate that magnetic anomalies in the Kalate-Naser area is related to the iron mineralization in this area. Lower amount of magnetic susceptibility in intrusive mass outcrops also indicate that these intrusive rocks did not play the main role in iron mineralization and were in fact have been weakly altered. It can only be concluded that the intrusive mass that led to mineralization sits beneath, at a higher depth.

The initial geophysical survey results are closely comparable to the powder drilling trials that confirm magnetite mineralization to the named

depth (Saadat, 2014). Thus far, 1.5 Million ton of Iron ore deposits have been confirmed in the area and exploration continues during production. The obtained results once again highlight the importance of ground magnetic surveys that combined with other exploration methods can reduce costs, increase efficiency and simplify the exploration process. Methodology and results of the magnetic measurements conducted in Kalateh Naser can help to better understand the magnetite bodies in the neighboring areas.

### Acknowledgement

Hereby, I would like to thank my colleagues particularly, Ryahi, Shokri, Madani, Ebrahimzadeh, Salari, Maldar family, Ghoorchi, amongst others that assisted with field visits, mapping, processing and data analysis.

### References

- Calagari, A.A., 1992. Principals of geophysics exploration. Tabesh press, Tabriz, 588 pp.
- Clark, D.A., 1997, Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(2): 83-103.
- Nakatsuka, T. and Okuma S., 2006. Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. Exploration Geophysics, 37(1): 121-128.
- Robinson, E.S. and Coruh, C. (translated by Haydarian Shahri, M.R.), 2005. Basic exploration geophysics. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad, 750 pp.
- Ryahei, H., 2013. Magnetite data of Kalateh Naser prospecting area. Madan Yaran Lut Company, Mashhad, Internal report, Report 1, 17 pp.
- Saadat, S., 2014. Final exploration report of Kalateh Naser prospecting area. Madan Yaran Lut Company, Mashhad, Internal report, Report 3, 100 pp.