

تفسیر و مقایسه داده‌های مغناطیسی و نتایج حفاری‌های انجام شده در کانسار اسکارن آهن خاک سرخ، غرب یزد

ساسان ملکی^{*}، علی اصغر کلاگری^۱، کمال سیاه‌چشم^۲، سعید علیرضایی^۴

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- استاد دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳- استادیار دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۴- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۳/۱۴

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۱/۲۸

چکیده

محدوده کانسار آهن خاک سرخ در حدود ۴۲ کیلومتری غرب شهر یزد قرار گرفته است. این کانسار در بخش میانی زون ارومیه-دختر قرار گرفته و رخنمون‌های پیرامون آن شامل سنگ‌های رسوبی تریاس بالایی- ژوراسیک پایینی و توده‌های نفودی الیگومیوسن می‌باشد. نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی الیگومیوسن به درون سنگ‌های رسوبی موجب کانه‌زایی اسکارن آهن شده است. مگنتیت کانه اصلی آهن بوده و اندکی آثار کانی‌زایی مس به صورت آغشتگی ملاکیت نیز به طور محلی دیده می‌شود. دو روند ساختاری مهم در این محدوده وجود دارد، روند شمال غرب- جنوب شرق که روند اصلی زون ارومیه-دختر را دنبال می‌کند و روند شمال شرق- جنوب غرب که روند قبلی را قطع کرده و در برخی مناطق موجب قطع‌شدگی در توده‌های کانسنگ شده است. در این مقاله از روش‌های ادامه فراسو (upward continuation) و واهم آمیخت اوپلر (Euler deconvolution) برای تفسیر داده‌های مغناطیسی استفاده شده است. ژرفای آنومالی‌های مغناطیسی که با واهم آمیخت اوپلر تعیین شده تایید کرد که توده‌های مغناطیسی در اعماق کم در شمال غرب منطقه قرار دارند. بی‌هنجاری‌های حاصل از این بررسی با روند اصلی زون ارومیه-دختر هم‌خوانی داشته و پیشنهاد می‌کند که احتمالاً روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در سایر بخش‌ها نیز هم‌روند با این زون بوده و به‌وسیله روندهای عمود بر آنها بعد از کانی‌زایی قطع شده‌اند. گمانه‌های حفاری شده عمق و گسترش کانه‌زایی پیش‌بینی شده براساس تفسیر داده‌های مغناطیسی را تایید نموده و عیار میانگین FeO_t حدود ۳۹٪ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ادامه فراسو، اسکارن آهن، خاک سرخ، واهمامیخت اوپلر.

مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی کارایی زیادی در اکتشاف کانسارها داشته و با توجه به ترکیب و هندسه توده‌های کانسنگ، ترکیب مواد همراه و سنگ‌های در برگیرنده روش‌های گوناگونی برای آنها ابداع شده و مورد استفاده قرار گرفته است. از مهم‌ترین این روش‌ها که برای تعیین پارامترهای مغناطیسی (عمق، مکان و شکل چشمه مغناطیسی) ابداع شده‌اند روش‌های سیگنال تحلیلی و واهم آمیخت اوپلر می‌باشند. روش سیگنال تحلیلی به وسیله نبیقیان (۱۹۷۲) برای اولین بار جهت تعیین عمق چشمه مغناطیسی به کار رفت. از دلایل مهم استفاده از سیگنال خطی در تفسیر داده‌های مغناطیسی وابسته نبودن آن به کمیت‌های جهت-دار و امکان تعیین موقعیت چشمه با استفاده از محل بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی است (باستانی و پدرسون، ۲۰۰۱). روش واهم آمیخت اوپلر نیز یکی از روش‌های خودکار تفسیر داده‌های مغناطیسی است که اساس آن استفاده از مشتق-های میدان در معادله همگن اوپلر است. روش اوپلر را می‌توان برای داده‌های نیم‌رخ (دو بعدی) و شبکه‌ای (سه بعدی) به کار برد. داده‌های این روش برای اولین بار به وسیله تامپسون (۱۹۸۲) جهت برآورد عمق و شکل ساختارهای دوبعدی مورد استفاده قرار گرفت. رید و همکاران (۱۹۹۰) روش واهم آمیخت اوپلر را برای حالت سه بعدی تعمیم دادند. برای گویاسازی داده‌های مغناطیسی برداشت شده در محدوده ابتدا تصحیح برگردان به قطب انجام گرفت تا تاثیر زاویه میل مغناطیسی و انحراف مغناطیسی اصلاح گردد. روش‌های نیمه‌خودکار (semi-automatic) کمی شامل واهم آمیخت اوپلر (deconvolution Euler) و سیگنال تحلیلی (analytical signal) به ترتیب جهت تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها و بارزسازی آنها به کار گرفته شده‌اند.

روش اوپلر یک روش نیمه خودکار تعیین عمق منشاء است که برای تحلیل تعداد زیادی از داده‌ها به کار می‌رود. این روش بر روی داده‌های شبکه و نیم‌رخ قابل استفاده است. تابع سیگنال تحلیلی در ابتدا برای تفسیر داده‌های دوبعدی در امتداد نیم-رخ مربوط به توده‌های دایکی شکل (نبیقیان و همکاران، ۱۹۷۴) و در ادامه به وسیله روست و همکاران (۱۹۹۲) برای تفسیر اشکال سه بعدی در نقشه‌های مغناطیس‌سنجی به کار گرفته شد. فرایند سیگنال تحلیلی موجب بارزسازی گوشه‌ها و لبه‌های بی‌هنجاری‌ها می‌گردد. این پردازش لبه‌های بی‌هنجاری را تقویت نموده و دو قطبی‌های مغناطیسی را به صورت بی‌هنجاری‌های برجسته نمایان می‌سازد (نبیقیان و همکاران، ۱۹۷۴). موارد متعددی از کاربرد روش‌های سیگنال تحلیلی ادامه فراسو و واهم آمیخت اوپلر در بررسی داده‌های مغناطیسی کانه‌زایی آهن در ایران تجربه شده است. از جمله کاربرد سیگنال تحلیلی در تفسیر بی-هنجاری‌های مغناطیسی کانسار جلال آباد زرنند (علمدار و همکاران، ۱۳۹۲)، کاربرد ادامه فراسو در تعیین عمق بی‌هنجاری‌های معدن گل‌گهر (انصاری و همکاران، ۱۳۹۰)، تعیین عمق بی‌هنجاری‌های منطقه رشم سمنان با استفاده از روش واهم آمیخت اوپلر (جونقانی و اسکوتی، ۱۳۹۰)، استفاده از سیگنال تحلیلی در برآورد عمق کانسار آهن مروارید زنجان (فاتحی و همکاران، ۱۳۹۲) و برآورد عمق بی‌هنجاری‌ها با استفاده از تلفیق سیگنال تحلیلی و واهم آمیخت اوپلر (علمدار و همکاران، ۱۳۹۲). در این مقاله از روش سیگنال تحلیلی و واهم آمیخت اوپلر جهت تعیین موقعیت، عمق و بارزسازی و از روش ادامه فراسو جهت تعیین گسترش عمقی چشمه‌های مغناطیسی استفاده گردید؛ سپس با استفاده از این نتایج موقعیت و عمق گمانه‌ها طراحی شد. در نهایت با استفاده از

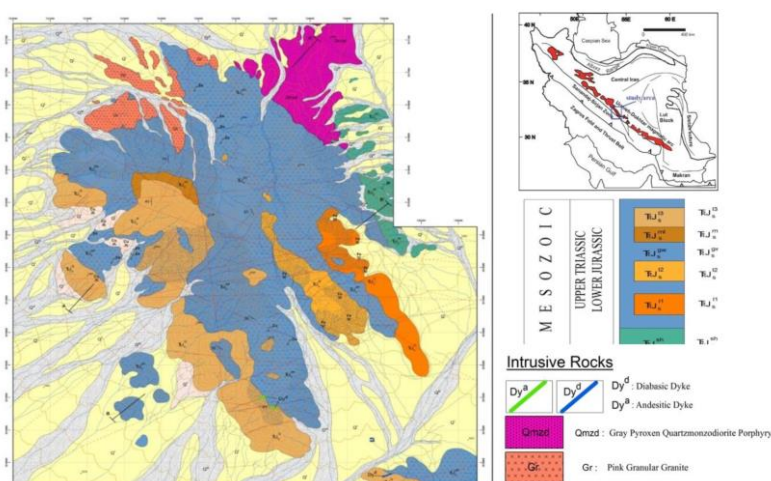
زاده و همکاران ۱۳۸۹) اشاره کرد. براساس نقشه زمین‌شناسی محلی (نقشه ۱:۵۰۰۰) رخنمون‌های منطقه به دو دسته کلی قابل تقسیم می‌باشند: ۱- واحدهای سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی کرتاسه با بین لایه‌های گری واک کوارتز-فلدسپاتی که بر روی شیل‌های تریاس بالایی قرار گرفته و همگی بخشی از سازند شمشک می‌باشند، ۲- واحدهای نفوذی با ترکیب گرانیت تا گرانودیوریت به سن الیگومیوسن (شکل ۱). واحد گری واک که به صورت بین لایه‌ای درون سازندهای رسوبی وجود دارد در بین توده‌های نفوذی و آهک‌های دولومیتی قرار گرفته و تبدیل به هورنفلس شده است. کانی‌زایی عمدتاً در بخش‌های سنگ آهک دولومیتی رخ داده که تبدیل به اسکارن شده‌اند. وجود مجموعه کانی دیوپسید، گارنت، سرپانتین، تالک، ترمولیت، فلوگوپیت و اپیدوت همراه با مگنتیت نشان‌دهنده رخداد متاسوماتیزم کلسیک-منیزیمی در محدوده خاک‌سرخ است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۵). روابط رخنمون‌های موجود در محدوده و تصاویر گمانه‌های حفاری در اشکال ۲ و ۳ ارائه شده است.

آنالیز نمونه‌های حفاری شکل توده مگنتیتی تعیین و با نتایج ژئوفیزیک مقایسه گردید.

محدوده مورد مطالعه

زمین‌شناسی

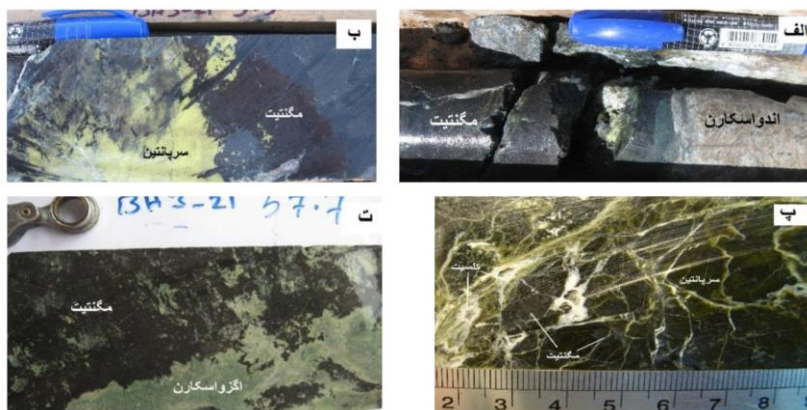
محدوده خاک سرخ در ۴۲ کیلومتری جنوب غرب شهرستان ندوشن واقع در غرب شهرستان یزد واقع شده و دسترسی به آن از کیلومتر ۱۲ جاده ندوشن-تفت از طریق جاده خاکی صدرآباد امکان‌پذیر است. نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی در شمال محدوده خاک سرخ موجب تبدیل واحدهای رسوبی به هورنفلس و اسکارن شده است. از نظر موقعیت زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه در بخش مرکزی پهنه ارومیه-دختر در یک منطقه امتداد لغز راستگرد بین گسل‌های دهشیر و برنا قرار گرفته است. بخش غربی شهر یزد از لحاظ ناحیه‌ای دارای پتانسیل تشکیل اسکارن و کانه‌زایی همراه آن بوده و از محدوده‌های اسکارن عمده در منطقه می‌توان به اسکارن آهن پناه کوه (زاهدی و بومری، ۱۳۹۲)، اسکارن مس و آهن خوت (زاهدی و بومری، ۱۳۹۲؛ زاهدی و همکاران، ۲۰۱۴)، اسکارن مس زرو (مکی



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در مقیاس ۱:۵۰۰۰ (بنی‌آدم، ۱۳۸۸) و شکل شماتیک موقعیت محدوده بر روی زون ارومیه-دختر (اصلاح شده بعد از اشتوکلین و نبوی، ۱۹۷۳)



شکل ۲: دورنمای رخنمون‌ها و سینه‌کارهای موجود در معدن خاک‌سرخ، دید به سمت غرب.



شکل ۳: تصاویر روابط کانه‌زایی مگنتیت با توده گرانودیوریتی و کانی‌های همراه. مرز بین مگنتیت توده‌ای و بخش اندواسکارن؛ الف) مرز بین مگنتیت و سرپانتین، ب) مگنتیت پراکنده در زمینه سرپانتین که هر دو به وسیله رگه‌های کلسیت تاخیری قطع شده‌اند، پ) مرز بین مگنتیت و آهک دولومیتی که به آگرواسکارن حاوی دیوپسید و سرپانتین تبدیل شده است، ت) رگچه‌های تاخیری کلسیت که متن بخش کانه‌دار مگنتیت و سرپانتین را قطع کرده‌اند.

مواد و روش‌ها

نتایج مگنتومتري تعداد ۱۴ حلقه گمانه حفر شد. از بخش‌های کانه‌دار گمانه‌ها نمونه جهت تعیین عیار آهن و تخمین ذخیره برداشت و آنالیز گردید. اولین قدم در بررسی داده‌های مغناطیسی استفاده از فیلترهای ریاضی برای بارسازی بی‌هنجاری‌ها و به دست آوردن اطلاعات در مورد منبع بی‌هنجاری می‌باشد. در بین فیلترهای مورد استفاده از برگردان به قطب ادامه فراسو و فیلترهای مشتق (مشتق اول و دوم) از همه بیشتر کاربرد دارند (نبیقیان و همکاران، ۱۹۷۴).

سیگنال تحلیلی نیز یکی دیگر از روش‌های پردازش معمول است که در این بررسی استفاده شده است. سیگنال تحلیلی لبه‌های بی‌هنجاری را تقویت

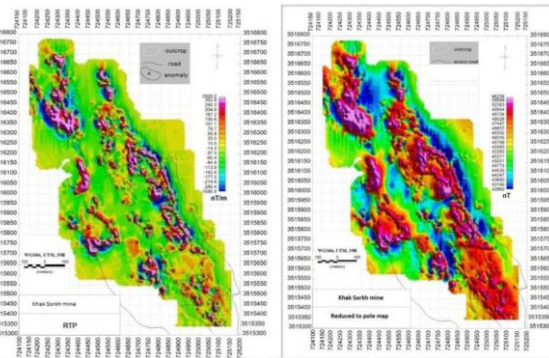
داده‌های زمینی در شبکه‌ای با ابعاد ۱۰*۱۰ مترمربع در محدوده‌ای به وسعت ۷۵/۲۷ هکتار در ۸۱۷۰ ایستگاه برداشت شد. مغناطیس کل با مغناطیس سنج نوع پروتون GSM-19T برداشت شده و تغییرات روزانه جهت تعیین اختلاف بین دستگاه‌های متحرک و ثابت و انجام تصحیحات با استفاده از مغناطیس‌سنج Trifield برداشت گردید. تغییرات روزانه میدان مغناطیسی در این مدت در حد کم‌تر از 41 نانوتسلا بود. با توجه به تغییرات ۵۰۳۶۷ نانوتسلایی بین کم‌ترین و بیش‌ترین داده ثبت شده در این محدوده، تغییرات روزانه بسیار ناچیز است. (جوادی‌پور و راکی، ۱۳۹۱). براساس

وسيله روندهای عمود بر آنها قطع شده‌اند. تصحيح انتقال به قطب با استفاده از پارامترهای طول و عرض جغرافیایی، زاویه‌ی انحراف مغناطیسی و زاویه‌ی میل مغناطیسی انجام گرفته است. میزان تصحيح اعمال شده براساس طول و عرض جغرافیایی برای زوایای میل مغناطیسی و انحراف مغناطیسی در این محدوده به ترتیب شامل زاویه انحراف مغناطیسی (inclination) ۴۹/۲۸ و زاویه میل مغناطیسی (declination) برابر با ۳/۲۷ درجه می‌باشد. نقشه برگردان به قطب محدوده در شکل ۲ ارائه شده است.

مشتق اول: یک فاکتور مهم در روش‌های مغناطیسی این است که ابعاد بی‌هنجاری مطابق عمق منبع تولید کننده آن تغییر می‌کند. به منظور حذف تاثیرات ناحیه‌ای و تداخل بین بی‌هنجاری‌های مجاور از مشتق درجه اول استفاده می‌گردد، به این دلیل که مشتق درجه اول مقادیر فرکانس بالا را نسبت به انواع پایین بیشتر افزایش می‌دهد. بنابراین تاثیرات طول موج بزرگ مربوط به منابع ناحیه‌ای عمیق بر روی بی‌هنجاری‌های کوچک حذف خواهند شد (هاینز و همکاران، ۲۰۱۳). مشتق قائم بیشتر برای افزایش قابلیت درک بی‌هنجاری‌های حاصل از منابع کم عمق استفاده شده و مشتق افقی برای تعیین محل گوشه‌های منابع بی‌هنجاری وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از هر دو مشتق قائم و افقی در تفسیرها استفاده می‌گردد در حالی که مشتقات افقی بیشتر از مشتق درجه اول به دست می‌آیند (سیمپسون و همکاران، ۱۹۸۶). نقشه مشتق اول محدوده خاک‌سرخ که از برگردان به قطب به دست آمده در شکل ۴ ارائه شده است.

نموده و دو قطبی‌های مغناطیسی را به صورت بی‌هنجاری‌های برجسته آشکار می‌سازد. در بررسی ادامه فراسو تغییرات بی‌هنجاری‌ها تا عمق ۴۰ متری جهت کم اثر نمودن بی‌هنجاری‌های سطحی و تقویت انواع عمقی بررسی شد. در نهایت نتایج بی‌هنجاری‌های به دست آمده در طراحی گمانه‌های اکتشافی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آنالیز نمونه‌های به دست آمده از حفاری‌های مغزه‌گیری جهت تعیین مدل عیاری و مقایسه آن با بی‌هنجاری‌های به دست آمده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حفاری‌ها نمونه‌برداری شده و بروش شیمی تر جهت تعیین درصد آهن مورد آنالیز قرار گرفتند. گسل‌های موجود در منطقه با توجه به بررسی‌های صحرایی و نقشه زمین‌شناسی تعیین شده و موقعیت رخنمون‌های مگنتیت نسبت به آنها مورد بررسی قرار گرفت.

برگردان به قطب (RTP): برگردان به قطب یک قدم مهم در تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌باشد. به دلیل انحراف داده‌های مغناطیسی از استوا به طرف قطب بی‌هنجاری‌های حاصل از منابع زیر سطحی از منبع خود فاصله پیدا کرده و بی‌هنجاری حالت نامتقارن به خود می‌گیرد که کار تفسیر را به خصوص در عرض‌های پایین تر مشکل می‌سازد. برای غلبه بر این مشکل روشی پیشنهاد شد که در آن بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشاهده شده در هر عرض جغرافیایی به بی‌هنجاری‌هایی منتقل می‌گردند که در یک میدان مغناطیسی قائم قابل مشاهده می‌باشند (بارانوف، ۱۹۵۷). شکل ۲ جهت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی موجود در محدوده خاک‌سرخ را در طول دو روند موازی در جهت شمال‌غرب-جنوب‌شرق نشان می‌دهد که هر دو به



شکل ۴: (تصویر سمت راست) نقشه برگردان به قطب محدوده مورد مطالعه. (تصویر سمت چپ) نقشه مشتق قائم مرتبه اول از RTP محدوده خاک سرخ.

پنجره باید دقت نمود اندازه آن طوری انتخاب شود که تنها یک بی هنجاری درون آن قرار گرفته و تغییرات اساسی میدان را در بر بگیرد. مورد دیگری که در واهم آمیختگی اوپلر مطرح است انتخاب شاخص ساختاری است. در واقع براساس هندسه حدودی منبع مغناطیسی و براساس تقسیم‌بندی تامپسون (تامپسون، ۱۹۸۲) مقادیری برای N در نظر گرفته می‌شود. در این بررسی این مقدار $1/5$ در نظر گرفته شده است. اساس واهم آمیختگی اوپلر طبق معادله رابطه ۱ ارائه شده به وسیله تامپسون (تامپسون، ۱۹۸۲) به صورت زیر است:

رابطه ۱)

$$\frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T)$$

در این معادله (x_0, y_0, z_0) موقعیت منبع مغناطیسی بوده که میدان کل آن در نقطه (x_0, y_0, z_0) شناسایی شده است. B مقدار شدت میدان کل بوده و N شاخص ساختاری می‌باشد. بی هنجاری‌ها برای تفسیر راحت‌تر به چهار دسته A, B, C و C_6 تقسیم شده‌اند که هر کدام دارای دامنه و تغییرات عمق متفاوتی می‌باشند (جدول ۱).

جدول ۱: دامنه تغییرات و میانگین عمق به دست آمده برای بی هنجاری‌ها با استفاده از واهم آمیخت اوپلر.

Anomaly	Depth range (m)	Average
A group	6-13	9
B group	4-20	10
C group	5-25	10
C_6	8-32	16

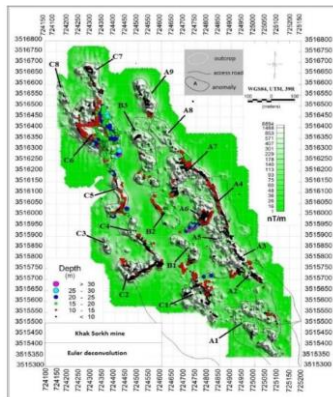
تفسیر بی هنجاری‌ها

روش‌های مختلفی در اینجا برای تفسیر بی هنجاری استفاده شده است شامل: واهم آمیختگی اوپلر (Euler deconvolution)، سیگنال تحلیلی (Analytic signal) و ادامه فراسو (upward continuation).

روش واهم آمیخت اوپلر: معرفی این روش در تعیین عمق و موقعیت منابع بی هنجاری موجب کاربرد وسیع آن گردید (تامپسون، ۱۹۸۲). از جمله خصوصیات مهم این روش این است که نتایج آن مستقل از جهت پلاریزاسیون مغناطیسی بوده، نیازی به پیش‌بینی در مورد شکل بی هنجاری نداشته و داده‌ها برای تجزیه و تحلیل نیاز به برگردان به قطب ندارند. این روش معمولاً برای داده‌های دارای پروفیل برداشت منظم به کار می‌رود ولی برای داده‌های برداشت شده در شبکه نیز گسترش یافته است. برای استفاده از روش اوپلر به دلیل حجم بالای داده‌ها در پردازش از یک پنجره استفاده می‌شود که روی شبکه داده‌ها جابه‌جا شده و عملیات پردازش روی آن انجام می‌گیرد. در انتخاب

در آن به سطح ماده معدنی دست یافت. داده‌های تعیین عمق نشان داد که در بی‌هنجاری‌های گروه A توده‌های مگنتیت به طور متوسط در اعماق بین ۶ تا ۱۳ متری قرار گرفته و مقادیر بیشینه و کمینه عمق آنها به ترتیب ۳۵ و ۴ متری می‌باشد. انحراف معیار ۳/۴ برای این گروه نشان می‌دهد که تغییرات عمق در آنها زیاد نیست. تغییرات عمق برای بی‌هنجاری‌های گروه B مشابه گروه A می‌باشد (بین ۶/۵ تا ۱۳ متری). اعماق کمینه و بیشینه برای رسیدن به این ناهنجاری‌ها به ترتیب برابر با ۴ و ۲۰ متر است. تخمین واهم آمیخت اوپلر در حدود ۲۵ متری بوده و تغییرات عمق در آنها زیاد نیست. فراوانی تجمعی واهم آمیخت اوپلر برای بی‌هنجاری‌های گروه B در شکل ۳ و دامنه تغییرات و میانگین عمق به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. به دلیل اینکه تغییرات عمق برای بی‌هنجاری C6 متفاوت از سایر بی‌هنجاری‌های گروه C می‌باشد واهم آمیخت اوپلر و دامنه تغییرات برای آن به طور جداگانه محاسبه گردید. منبع مغناطیسی در زیر بی‌هنجاری C6 بین اعماق ۱۲ تا ۲۰ متری قرار دارد. تغییرات عمق در خود این بی‌هنجاری نشان می‌دهد بخش شرقی عمیق‌تر از بخش غربی می‌باشد. مقادیر بیشینه و کمینه به ترتیب ۸ تا ۳۲ متری بوده و میانگین عمق در این بی‌هنجاری ۱۶ متری می‌باشد. انحراف معیار برای واهم آمیخت اوپلر در حدود ۴ متر بوده و نسبت به سایر بی‌هنجاری‌ها تغییرات عمق بیشتری از خود نشان می‌دهد (جدول ۱). توده‌های قرار گرفته در زیر بی‌هنجاری‌های گروه C به طور عمده در اعماق ۷ تا ۱۴ متری قرار داشته و میانگین عمق جایگیری آنها ۱۰ متری می‌باشد. انحراف معیار برای واهم آمیخت اوپلر ۳/۵ متری بوده و تغییرات عمق چندانی نشان نمی‌دهد (شکل ۵).

این محدوده‌ها دارای روند، شدت و موقعیت متفاوتی می‌باشند بدین ترتیب که بی‌هنجاری‌های گروه C در بخش غربی محدوده قرار داشته و دارای بیشترین شدت می‌باشند. گروه A با شدت کمتر در بخش شرقی محدوده گسترش داشته و در بین این دو گروه B قرار گرفته که دارای کمترین شدت و گسترش می‌باشد. بی‌هنجاری‌های گروه A بیشتر بخش‌های شرقی محدوده را در بر گرفته و در امتداد شمال‌غرب-جنوب‌شرقی به طول ۱۴۰۰ متر مساحتی در حدود ۱۰ هکتار را در بر گرفته‌اند. براساس ناپیوستگی‌ها بی‌هنجاری‌های گروه A از A1 تا A9 تقسیم شده‌اند که در بین آنها بی‌هنجاری‌های A3، A6، A7 و A9 دارای بیشترین انحراف معیار بوده و دارای مقادیر متفاوت میدان کل می‌باشند. بی‌هنجاری‌های گروه B در سمت غرب گروه A با روند مشابهی قرار داشته و ۳۳۷۰۵ هکتار را پوشش می‌دهند. این گروه نسبت به گروه A مساحت کمتری را پوشش داده و دارای شدت کمتری می‌باشند. مطابق جدول ۱ بی‌هنجاری‌های B3 و B1 دارای شدت متوسط بوده و بی‌هنجاری B2 ضعیف می‌باشد. گروه C از نظر شدت و مساحت بعد از گروه A قرار داشته و با داشتن ۹۵۰ متر طول حدود ۱۲۷۰۷ متر مربع (حدود ۱۲/۷۸ هکتار) مساحت دارد. گروه C دارای ۸ زیر مجموعه می‌باشد. بعد از بی‌هنجاری A6 بی‌هنجاری C6 دارای بیشترین شدت می‌باشد. این بی‌هنجاری دارای 47423 nT اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه می‌باشد که می‌تواند به دلیل قطبش منفی بالا باشد. این ناهنجاری بمقدار 10201 nT انحراف معیار داشته و با 39340 متر مربع (حدود ۳/۹ هکتار) دارای بیشترین مساحت در بین تمام بی‌هنجاری‌ها است. نکته مهم در بین این گروه‌ها غالب بودن روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق در همه آنها می‌باشد. عمق حاصله از این روش حداقل عمقی است که می‌توان



شکل ۵: نقشه اعماق به دست آمده از واهم آمیخت اوپلر برای محدوده‌های ناهنجار.

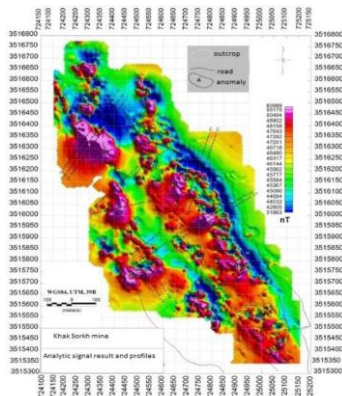
همکاران، ۲۰۱۳). این روش به‌ویژه در تفسیر منابع دو بعدی مورد استفاده قرار گرفته در عرض‌های جغرافیایی پایین و در مناطقی که دارای مغناطیس باقیمانده قابل توجه هستند کاربرد دارد (مک لئود و همکاران، ۱۹۹۳). سیگنال تحلیلی به وسیله گرفتن ریشه دوم مجموع مربعات هرکدام از سه مشتق درجه اول میدان مغناطیسی طبق معادله رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

رابطه ۲)

$$A(x,y) = \sqrt{(Dt/dx)^2 + (Dt/dy)^2 + (Dt/dz)^2}$$

براساس روش تخمین عمق سیگنال تحلیلی بر روی چند پروفیل دلخواه که بی‌هنجاری‌های مهم مغناطیسی را در منطقه قطع می‌کنند اعمال شده و به صورت دو بعدی شکل چشمه‌ها و عمق آنها را تعیین می‌کند (شکل ۶).

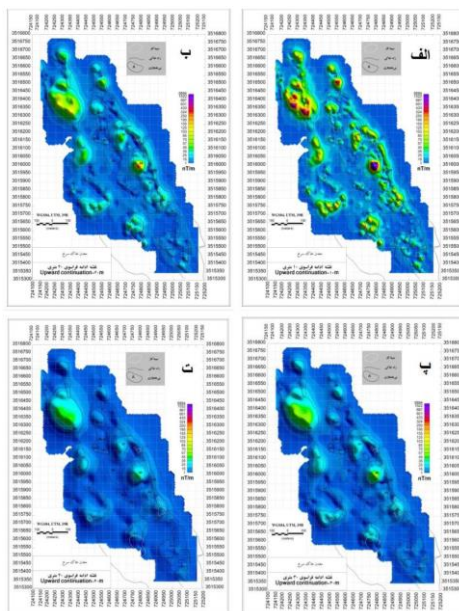
تعیین عمق با استفاده از سیگنال تحلیلی: این فیلتر در حقیقت جذر مجموع مربعات مشتقات میدان می‌باشد که جهت تشخیص هندسه توده‌های نزدیک به سطح و همچنین لبه‌های آنها استفاده می‌گردد. سیگنال تحلیلی در تعیین عمق و محل چشمه‌ها کاربرد دارد. یکی از ویژگی‌های این روش تاثیر نگرفتن از کمیت‌های جهت‌دار مانند زاویه میل، انحراف میدان و زاویه شیب است که موجب می‌شود در مواردی که مغناطیس باقیمانده مشخص نیست به کار رود. یکی از پردازش‌های سیگنال تحلیلی بررسی نیمرخ‌های عمق بی‌هنجاری‌ها می‌باشد. در این روش بی‌هنجاری‌های مهم در طول پروفیل‌هایی که عمود بر آنها قرار گرفته‌اند بررسی شده و با سیگنال‌های تحلیلی سروکار دارد که به وسیله میدان کل و یا به وسیله مشتقات قائم از روی داده‌های پروفیل به دست می‌آیند (هاینز و



شکل ۶: نقشه سیگنال تحلیلی محدوده و موقعیت پروفیل‌های رسم شده جهت تعیین عمق.

متری با استفاده از روش ادامه فراسو تعیین گردید (شکل ۷). در شکل شماره ۷A که ادامه فراسو مربوط به ارتفاع ۱۰ متری می‌باشد تعدادی از ساختارهای سطحی که در نقشه سیگنال تحلیلی ظاهر شده بودند (بی هنجاری B2) محو شده‌اند که نشان‌دهنده گسترش کم عمق این بی‌هنجاری‌ها می‌باشد. مطابق شکل ۷ مشخص است که بی‌هنجاری‌ها با ادامه فراسو از عمق ۱۰ تا ۴۰ متری به تدریج کاهش می‌یابند و این نشان می‌دهد اکثر بی‌هنجاری‌ها از این عمق به بعد کاهش یافته و گسترش چندانی ندارند که خود تعیین کننده حداکثر عمق پیشنهادی برای گمانه‌ها می‌باشد. تنها بی‌هنجاری که به‌نحو بارزی تا اعماق بیش از ۴۰ متری گسترش دارد بی‌هنجاری شماره C6 می‌باشد. با توجه به نتایج ادامه فراسو حداکثر عمق برای گمانه‌های پیشنهادی ۵۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۷).

تعیین عمق با استفاده از روش ادامه فراسو: یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در تفسیر داده‌های مغناطیسی تعیین عمق تا توده مولد بوده و روش ادامه فراسو از مهم‌ترین تبدیلات در تعیین این پارامتر است که از آن به عنوان یک روش کیفی برای بررسی گسترش عمقی استفاده می‌گردد. این تبدیلات داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده را در سطحی بالاتر از سطح زمین محاسبه و منعکس می‌کند (بلکلی، ۱۹۹۶؛ ژنگ و ژو، ۲۰۰۱). یکی از خصوصیات این روش کاهش اثرات توده‌های کوچک‌تر و باریک‌تر در مقایسه با انواع بزرگ‌تر با استفاده از افزایش ارتفاع می‌باشد. ادامه فراسو یک فیلتر نرم با قابلیت عبور طول موج پایین می‌باشد که روی بی‌هنجاری‌های دارای عمق بیشتر و ابعاد بزرگ‌تر نسبت به انواع کم عمق‌تر و نوفه موجود در منطقه بیشتر تاکید می‌کند (تلفورد و شریف، ۱۹۹۰). در این بررسی اعماق چشمه از ۱۰ الی ۴۰



شکل ۷: نقشه‌های ادامه فراسو برای اعماق ۱۰ متری (الف)، ۲۰ متری (ب)، ۳۰ متری (پ) و ۴۰ متری (ت).

آهکی، اسکارنی‌شدن و تشکیل کانه آهن در محدوده خاک‌سرخ شده است. کانه‌زایی آهن به صورت لنزهای مگنتیت در سنگ میزبان آهک دولومیتی ایجاد شده است. مجموعه کانی‌های

بحث و نتایج

نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن به درون واحدهای رسوبی تریاس بالایی- ژوراسیک پایینی موجب ایجاد پدیده‌های تبلور مجدد بخش‌های

عیار ۳۴/۱۵٪ درصد به‌عنوان ذخیره قطعی محدوده برآورد گردید. گمانه‌هایی که فاقد بخش‌های کانه‌دار بودند تا متر از نهایی حفاری نشده و از آنها برای تعیین عیار نمونه برداشت نگردید. مدل عیاری به دست آمده از نتایج عیار گمانه‌ها (شکل ۹) به وسیله نرم‌افزار Datamine نشان می‌دهد که شکل توده و روند آن به خوبی با بی‌هنجاری به دست آمده از تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی مطابقت داشته و بخش‌های کانه‌دار در جهت شمال شرق-جنوب غرب دچار قطع‌شدگی شده‌اند که خود می‌تواند روند غسل‌های احتمالی را نشان دهند. عیار نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. براساس نتایج ادامه فراسو اکثر ناهنجاری‌ها از اعماق ۱۰ متری شروع شده و این امر کم عمق بودن ناهنجاری‌ها و میزان کم باطله‌برداری مورد نیاز را در محدوده نشان می‌دهد که خود با نتایج حفاری‌ها و شروع کانه‌زایی مگنتیت از عمق کم تایید گردید. در کل صحت تفسیر ناهنجاری‌های مغناطیسی در نتایج حفاری، آنالیز نمونه‌ها و مدل سه بعدی به خوبی تایید می‌شود.

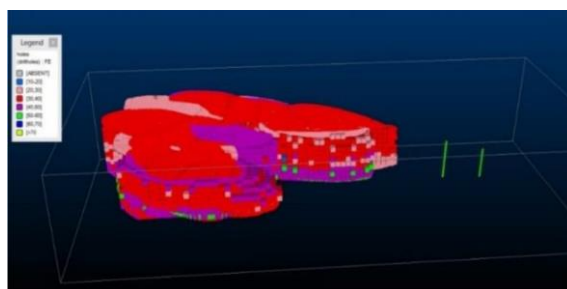
سیلیکات بدون آب (پیروکسن و گارنت)، کانی‌های آبدار (فلوگوپیت، اپیدوت، اکتینولایت و کانی‌های دگرسانی تاخیری (کلسیت و کوارتز) همراه با وجود سرپانتین به‌عنوان باطله اصلی همراه با مگنتیت، شواهد وجود اسکارن منیزیمی در منطقه است. با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی نقشه برگردان به قطب تهیه شده و ناهنجاری‌های پنهان بررسی و شناسایی گردید. جهت تعیین گسترش عمقی کانه-زایی نقشه‌های ادامه فراسو تا عمق ۴۰ متری تهیه شد. براساس بی‌هنجاری‌های به دست آمده تعداد ۱۵ حلقه گمانه قائم بر روی بی‌هنجاری شماره C6 در بخش شمال غربی محدوده به دلیل وسعت زیاد و بارزتر بودن طراحی گردید. عمق حفاری‌ها به خاطر اینکه نقشه‌های ادامه فراسو تا اعماق ۴۰ متری گسترش داشت حداکثر تا ۵۰ متری طراحی شد. از این گمانه‌ها تعداد ۱۴ گمانه با حداکثر عمق ۶۵ متر حفر گردید. در کل اکثر گمانه‌ها بخش‌های کانه‌دار را قطع کرده‌اند که ضخامت آنها از حدود ۱۰ تا بیش از ۵۰ متر متغیر بوده و به طور میانگین حدود ۳۹ درصد آهن داشتند. براساس مطالعات آماري و ارزیابی ذخیره، ۱,۷۳۸,۵۰۰ تن آهن با

جدول ۲: عیار میانگین نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌های حفر شده بر روی ناهنجاری‌های مغناطیسی.

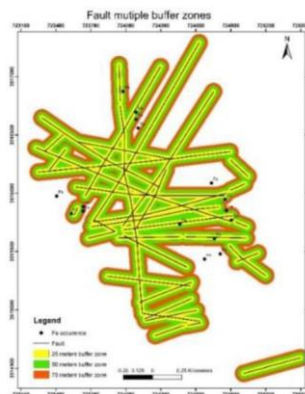
گمانه	از	تا (متر)	طول متر از (متر)	Fe (%)	FeO(%)	Fe ₂ O ₃ (%)
BH3-20	۰	۳۹/۷	۳۹/۷	۴۵/۲	۱۶/۱۷	۴۵/۲۴
BH3-21	۲/۴	۱۸/۵	۱۶/۵	۳۲/۸	۱۱/۲۴	۳۵/۲۸
BH3-21	۲۰/۵	۴۰/۶	۲۰/۱	۴۱/۱۸	۱۶/۱۸	۴۰/۰۹
BH3-22	۰	۱۵/۳	۱۵/۳	۳۴/۹۲	۱۳/۵۶	۳۴/۷۸
BH3-22	۲۰/۷	۵۱	۳۰/۳	۵۱/۴۷	۲۰/۰۴	۵۱/۱۹
BH3-24	۰	۵۲	۵۲	۳۶/۰۲	۱۳/۲۱	۳۶/۷۳
BH3-26	۱۱/۷	۲۲/۳	۱۰/۶	۳۴/۴۵	۱۱/۱۲	۳۶/۸۳
BH3-29	۰	۶۱/۵	۶۱/۵	۴۱/۳۸	۱۳/۰۶	۴۵/۹۹
BH3-30	۰	۱۴	۱۴	۳۵/۹۸	۱۲/۱۳	۳۷/۸۸
BH3-30	۲۲/۴	۴۱	۱۸/۶	۲۸/۵۴	۹/۵۷	۳۰/۱۲
BH3-30	۴۵/۴	۵۲/۵	۷/۱	۴۵/۲	۱۸/۱۳	۵۱/۲۸

فواصل مختلف و موقعیت رخنمون‌های مگنتیت با هم مقایسه شدند. مطابق این بررسی (شکل ۹) اکثر نقاط کانه‌زایی در شعاع تاثیر ۷۵ متری گسل‌ها قرار دارند و این ساختاری بودن کانه‌زایی و تمرکز محلول‌های کانه‌زا را در مناطق گل‌سه نشان می‌دهد. این نتایج تاثیر تکتونیک با وجود آثار برشی شدن و خردشدگی در سنگ‌های میزبان و رگه‌های مگنتیت نیز هم‌خوانی دارند.

نتایج بررسی مگنتومتری علاوه بر تعیین خصوصیات توده‌های مغناطیسی شامل موقعیت، گسترش عمقی و روند، موارد دیگری شامل قطع شدگی‌های ایجاد شده در ناهنجاری‌ها و تاثیر روندهای ساختاری را در توزیع این توده‌های مغناطیسی مشخص ساختند. به منظور بررسی بیشتر عملکرد روندهای ساختاری بر روی کانه‌زایی، تاثیر گسل‌های موجود در محدوده با شعاع تاثیر در



شکل ۸: مدل عیاری به دست آمده با استفاده از نتایج آنالیز نمونه‌ها، بخش‌های قرمز رنگ مناطق کانه‌دار را نشان می‌دهند. قطع‌شدگی بین دو بخش کانه‌دار تاثیر روندهای شمال‌شرق-جنوب‌غرب را روی کانه‌زایی نشان می‌دهد (دید به سمت غرب).



شکل ۹: ارتباط بین توزیع نقاط کانه‌زایی مگنتیت و شعاع تاثیر گسل‌های موجود در فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متری.

نتیجه‌گیری

منبع ایجاد کننده ناهنجاری‌های مغناطیسی کانی مگنتیت است که به وسیله نتایج حفاری تائید شده است. با استفاده از نقشه‌های ادامه فراسو مشخص گردید که عمق بخش‌های مغناطیسی (کانسنگ مگنتیتی) حداقل تا ۴۰ متری گسترش دارند که این مطلب با حفاری‌های انجام شده تایید گردید.

گمانه‌های حفر شده براساس نتایج تفسیر بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی طراحی شده و اکثراً دارای کانه‌زایی می‌باشند که خود می‌تواند به دلیل اختلاف زیاد شدت مغناطیسی کانه‌زایی مگنتیت و سنگ میزبان آهک دولومیتی باشد. بیشترین گسترش ناهنجاری‌ها در بخش شمال‌غربی محدوده برداشت شده قرار گرفته که می‌تواند به دلیل

در تعیین موقعیت لزه‌های مگنتیت استفاده نمود. نقشه سیگنال تحلیلی هم‌چنین روابط قطع‌شدگی توده‌های مغناطیسی را به وسیله روندهای شمال-شرق-جنوب‌غرب به خوبی نشان می‌دهد. نتایج ادامه فراسو با نشان دادن گسترش توده‌های مغناطیسی تا اعماق بیش از ۴۰ متری با نتایج حفاری‌ها که گسترش بخش‌های کانه‌دار را تا اعماق بیش از ۵۰ متری اثبات نموده هم‌خوانی دارد. نتایج این روش با اعماق به دست آمده از روش واهم-آمیخت اوپلر پیشنهاد می‌کند که از این دو روش می‌توان در حفاری‌های اکتشافی برای تخمین حداکثر عمق حفاری استفاده نمود. بررسی شعاع تاثیر گسل‌ها و رخنمون‌های مگنتیت تاثیر روندهای ساختاری در کانه‌زایی را تایید می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده و اینکه حفاری‌های مرحله اول حداکثر ۶۵ متری بوده‌اند پیشنهاد می‌شود جهت افزایش تخمین ذخیره و بررسی گسترش توده مولد کانه‌زایی با تهیه نقشه‌های عمیق‌تر فراسو حفاری‌های عمیق‌تری طراحی و اجرا شود.

سپاسگزاری

با تشکر از شرکت معدنکاران خاک‌سرخ یزد و مهندس بنی‌آدم که امکان دسترسی به داده‌های مغناطیس‌سنجی، نتایج عیارگمانه‌ها و بازدید از منطقه را فراهم نمودند.

مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۵، شماره ۴، ص ۱-۱۲.
- بنی‌آدم، ف.، ۱۳۸۸. گزارش پایان عملیات اکتشاف معدن سنگ آهن خاک‌سرخ ندوشن، ۲۱۶ ص.

نزدیکی آنها به توده‌های گرانیتوئیدی شمال محدود بوده و گسترش آنها در جهت جنوب‌شرق احتمال گسترش توده‌های نفوذی زیر واحدهای رسوبی در این جهت را محتمل می‌سازد که باید با حفاری‌های عمیق بررسی و تایید گردد. با توجه به نتایج حفاری شیب ظاهری کانی‌سازی به طرف شمال است که خود می‌تواند به دلیل نزدیکی بیشتر به توده‌های نفوذی در این قسمت بوده و با نقشه‌های ادامه فراسو که بیشترین عمق گسترش را در این بخش نشان می‌دهند مطابقت دارد. بی-هنجاری‌های مغناطیسی در منطقه خاک‌سرخ به طور کلی در دو روند به موازات هم و در جهت شمال‌غرب-جنوب‌شرق وجود دارند که به وسیله گسل‌های احتمالی در جهت عمود بر این امتداد قطع شده‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد روندهای اصلی در زون ارومیه-دختر جهت جایگیری توده‌های نفوذی مولد لزه‌های مگنتیتی را کنترل کرده و خود این ناهنجاری‌های مغناطیسی توسط گسل‌هایی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب قطع شده‌اند. روندهای ذکر شده می‌توانند به‌عنوان راهنمای اکتشافی در سایر مناطق زون ارومیه-دختر جهت طراحی برداشت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مدنظر قرار بگیرند. از فیلتر سیگنال تحلیلی جهت تعیین هندسه توده‌های مغناطیسی استفاده شد. در این فیلتر مناطق و توده‌های مغناطیسی نزدیک به سطح دارای مقدار سیگنال نسبتاً بالاتری نسبت به نواحی غیر مغناطیسی بوده و با توجه به کم عمق بودن ناهنجاری‌های مغناطیسی به خوبی می‌توان از آن

منابع

-انصاری، ا.، حیسنعلی، ق.، علمدار، ک. و مرادی، س.، ۱۳۹۰. بررسی ارتباط بین میدان‌های پتانسیل ادامه فراسو شده با عمق قرارگیری توده‌های معدنی با بررسی موردی در معدن سنگ آهن گل‌گهر،

- زاهدی، ا. و بومری، م.، ۱۳۹۲. سنگ‌نگاری و شیمی گارنت‌ها در اسکارن خوت، شمال باختر تفت، استان یزد، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲، ص ۲۶۷-۲۷۶.
- فاتحی، م.، نوروزی، غ. و حاجی‌ئی، ف.، ۱۳۹۲. برآورد عمق توده‌های مغناطیسی با استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۷، شماره ۴، ص ۵۲-۶۳.
- مکی زاده، م.ع.، رهگشای، م. و دلیران، ف.، ۱۳۸۶. پیدایش گرونا‌ی آندراریتی در اسکارن‌های آهن سور، نوار افیولیتی-سورک، مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان، شماره ۲۷، ص ۱۵۷-۱۶۷.
- ملکی، س.، کلاگری، ع.ا.، سیاه‌چشم، ک.، علیرضایی، س.، کورفو، ف. و بنی‌آدم، ف.، ۱۳۹۵. کانی‌شناسی و مراحل تشکیل اسکارن مگنتیت دار خاک سرخ به کمک داده‌های مینرال شیمی، بیستمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps, Pseudo gravimetric anomalies, Geophysics, v. 22, p. 359-383.
- Bastani, M. and Pedersen, L.B., 2001. Automatic interpretation of magnetic dikes parameters using the analytic signal technique, Geophysics, v. 66, p. 551-561.
- Blackely, J.R., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications: Cambridge University Press, 441 p.
- Hinze, J.W., Vonfrefe, R.R.B. and Saad, A.H., 2013. Gravity and Magnetic Exploration- Principles, Practice and Applications, Cambridge University Press, New Yark, 512 p.
- MacLeod, I.C., Jones, K. and Dai, T.F., 1993. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes, Exploration geophysics, v. 24, p. 679-688.
- جوادی پور، ش. و راکی، م.، ۱۳۹۱. گزارش ژئوفیزیک به روش مغناطیس‌سنجی در معدن آهن خاک سرخ ندوشن یزد، ۵۴ ص.
- جونقانی، س.ج. و اسکویی، ب.، ۱۳۹۰. برآورد عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی زمینی با استفاده از روش واهمامیخت اوپلر استاندارد در منطقه رشم، استان سمنان، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۲، ص ۳۳-۴۳.
- علمدار، ک.، روحانی، ا.ک. و انصاری، ع.، ۱۳۹۲. برآورد عمق و نوع توده‌های مولد بی‌هنجاری مغناطیسی با استفاده از تلفیق تابع‌های ویژه سیگنال خطی و اوپلر واهمامیخت، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۹، شماره ۲، ص ۷۹-۹۴.
- زاهدی، ا. و بومری، م.، ۱۳۹۲. سنگ‌نگاری زمین‌شیمی و سنگ‌زایی اسکارن پناهکوه، باختر یزد، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲، ص ۳۴۰-۳۸۹.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use of automated anomaly interpretation: Geophysics, v. 37, p. 507-517.
- Nabighian, M.N., 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal crossection, Geophysics, v. 39, p. 85-92.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. and Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, Geophysics, v. 55, p. 80-91.
- Roest, W.R., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using 3-D analytic signal: Geophysics, v. 57, p. 116-125.
- Simpson, R.W., Jachens, R.C., Blakely, R.J. and Saltus, R.W., 1986. A new

- isostatic residual gravity map of the conterminous United States with a discussion on the significance of isostatic residual anomalies, *Journal of Geophysical Research*, v. 91, p. 8348-8372.
- Stocklin, J. and Nabavi, M.H., 1973. Tectonic map of Iran, 1:2500000, Geological Survey of Iran.
- Telford, W.M. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 770 p.
- Thompson, D.T., 1982. EULDPH, a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, v. 47, p. 31-37.
- Zahedi, A., Boomeri, M., Nakashima, K., Mackizadeh, M.A., Ban, M. and Lentz, D.R., 2014. Geochemical characteristics, origin, and evolution of ore-forming fluids from the Khut copper skarn deposit (west of Yazd, Central Iran), *Resource Geology*, v. 64, p. 209-232.
- Zeng, H. and Xu, D., 2001. Discussion on continuation for potential-field anomaly enhancement (R. Pawlowski, *Geophysics*, 60(2), 390-398): *Geophysics*, v. 66, p. 695-697.