

تعیین ارتباط میان خطواره‌های حاصل از روش مغناطیس‌سنجی با کانه‌زایی مس در کانسار سبزسنگ (شمال ساوه) بر اساس اکتشافات مستقیم

رضا احمدی^(۱)

۱. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

چکیده

در کانسار مس سبزسنگ واقع در استان مرکزی فعالیت‌های اکتشافی غیرمستقیم ژئوفیزیکی و اکتشافات مستقیم سطحی گسترده‌ای شامل برداشت نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی، آبراه‌های، حفر و برداشت نمونه از ترانشه‌ها در تمام سطح گستره مورد مطالعه صورت گرفته است. همچنین تعداد پنج حلقه گمانه اکتشافی در یک گستره مربع شکل به ابعاد 100×115 متر در بخش شرقی کانسار، حفاری شده است. در پژوهش حاضر ابتدا خطواره‌های موجود در کانسار سبزسنگ با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی شناسایی شد. برای این منظور بر روی داده‌های برداشت مغناطیسی انواع فیلترهای مورد نیاز به‌ویژه فیلترهای تشخیص لبه شامل مشتق افقی، سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت اعمال شد. سپس، بر اساس اکتشافات مستقیم انجام‌شده، میزان ارتباط میان خطواره‌ها با کانه‌زایی مس مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا میزان همبستگی کیفی میان خطواره‌ها با کانه‌زایی سطحی مس برای کل گستره سبزسنگ و میزان همبستگی کیفی و کمی میان خطواره‌ها با کانه‌زایی مس انواع کارهای اکتشافی سطحی و عمیق در گستره حفر گمانه‌های اکتشافی تعیین شد. نتیجه‌های پژوهش نشان می‌دهد تمرکز ماده معدنی در گستره سبزسنگ، بیشتر سطحی است و تطابق کیفی بسیار زیادی بین خطواره‌ها و حضور ماده معدنی در کل سطح گستره مورد مطالعه وجود دارد. برای تعیین همبستگی کمی، ابتدا نقشه دوبعدی مبتنی بر شبکه خطواره‌ها تولید شد، سپس داده‌های عیارسنجی مس و تعداد خطواره‌ها درون یک گستره هم‌اندازه، بعد از شبکه‌بندی یکسان درون‌یابی شدند. در نهایت بین داده‌های عیارسنجی مس و خطواره‌ها در بخش شرقی کانسار، میزان همبستگی بسیار ضعیف با ضریب همبستگی برابر با 0.2 - به دست آمد. نتیجه‌های این پژوهش، به‌عنوان کلید و راهنمایی به‌منظور تصمیم‌گیری برای چگونگی مرحله اکتشاف تفصیلی کانسار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اکتشاف مستقیم، خطواره، کانسار مس سبزسنگ، کانه‌زایی، مغناطیس‌سنجی.

مقدمه

به‌کارگیری تکنیک‌های تشخیص لبه در پردازش تصاویر همانند فیلترهای کنی^۴، سوبل^۵، پرویت^۶، روبرت^۷ و لاپلاس گوسی^۸ (Gonzalez and Woods, 2017) نیز در کنار روش مغناطیس‌سنجی به‌عنوان مکمل، کمک‌کننده خواهند بود. در پژوهش حاضر ابتدا خطواره‌های موجود در کانسار مس سبزسنگ با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی شناسایی شده، سپس، بر اساس اکتشافات مستقیم انجام شده، میزان ارتباط میان خطواره‌ها با کانه‌زایی در کانسار بررسی شده است. در ارتباط با پردازش و مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی و اعتبارسنجی نتیجه‌های عملیات اکتشاف ژئوفیزیکی با استفاده از نتیجه‌های عملیات حفاری، طی سال‌های اخیر پژوهش‌های چندی صورت گرفته، در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. سعدا (Saada, 2016) از پردازش‌های مختلف مانند مشتق زاویه شیب، مشتقات افقی و روش اویلر برای تشخیص لبه‌های بی‌هنجاری بر روی داده‌های مغناطیسی هوایی در فلات گل‌ال‌بهاریا^۹ استفاده کرد. احمدی و رضاپور (۱۳۹۸) در پژوهشی مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، قطبش القایی (IP) و مقاومت‌ویژه (RS) را در کانسار مس نارباغی شمالی ساوه انجام دادند. در پژوهش آن‌ها بررسی میزان تطابق کیفی نتیجه‌های عملیات برداشت ژئوالکتریک با داده‌های عیارسنجی گمانه‌های دارای ماده معدنی منطبق بر پروفیل‌های ژئوفیزیک، به‌طور کلی تطابق کیفی متوسطی را بین این داده‌ها نشان داد. احمدی و احسان‌نژاد (۱۴۰۰) عملیات پردازش، مقایسه و تجزیه‌وتحلیل داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، مقاومت‌ویژه و قطبش القایی را در راستای پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت‌شده در کانسار مس پورفیری علی‌آباد یزد انجام داده و ارتباط

شناخت کامل یک کانسار، مستلزم انجام یک سری عملیات اکتشافی شامل برداشت داده‌ها، پردازش، مدل‌سازی، تجزیه‌وتحلیل اطلاعات و تفسیر نتیجه‌های است. برای بیشتر کانسارهای فلزی انجام عملیات اکتشاف به دو صورت غیرمستقیم (همانند اکتشافات ژئوفیزیکی) و مستقیم (همانند عملیات حفاری) مورد نیاز است. روش‌های اکتشاف غیرمستقیم در مقایسه با روش‌های مستقیم، دارای سرعت عمل بالا و هزینه پایین هستند اما دقت عملکرد آن‌ها بسیار پایین‌تر است. در مرحله اکتشاف کانسارها تمام پارامترهای توصیفی مانند ساختار زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، دگرسانی و نوع کانه‌زایی مورد توجه هستند. بدیهی است هرچه این شواهد بیشتر باشند، یعنی مجموعه اطلاعات اکتشافی، بیشتر و کامل‌تر باشند، فرآیند شناخت کانسار کامل‌تر شده، مدل مفهومی حاصل، دقیق‌تر است و به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود و در نتیجه میزان احتمال دست‌یابی به ذخایر معدنی از تیپ مورد نظر بیشتر می‌شود (عطائی‌پور، ۱۳۹۸؛ Erickson, 1992). بر اساس پژوهش‌های انجام شده، در بسیاری از موارد تعیین ارتباط میان کانه‌زایی و ساختارهای زمین‌شناسی در گستره همانند خطواره‌ها (انواع شکستگی‌ها شامل درزه‌ها، شکاف‌ها و گسل‌ها)، کلید اکتشافی و راهنمای بزرگی برای تصمیم‌گیری در مورد روش و چگونگی انجام مراحل بعدی عملیات اکتشاف خواهد بود (به‌طور مثال Gohari Anaraki et al., 2022; Lu et al., 2021; Tagwai et al., 2021; Adi Gunawan et al., 2019). یکی از بهترین روش‌های شناسایی و تعیین خطواره‌ها، استفاده از روش ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی و اعمال فیلترهای تشخیص مرزها همانند مشتقات افقی، سیگنال تحلیلی^۱، کسینوس تتا^۲ و مشتق تیلت^۳ بر روی داده‌های مغناطیسی است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۱؛ امامی، ۱۳۹۲؛ شاهوردی و همکاران، ۱۳۹۶؛ احمدی و شریعتی، ۱۳۹۹؛ Stewart and Miller, 2018; Ma and Li, 2013; Doo et al., 2009; Wijns et al., 2005; HSU et al., 1996). البته استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و

1. Analytic-signal
2. Theta
3. Tilt derivative
4. Canny
5. Sobel
6. Prewitt
7. Robert
8. Laplacian of Gaussian (LoG)
9. Galala El Bahariya Plateau

شاید کانی‌های شرایط احیایی مس همانند کالکوپیریت، کالکوسیت و بورنیت در پهنه‌های عمیق‌تر مشاهده شوند. در کانسار سبزسنگ به‌طور کلی عقیده بر آن است، کانه‌زایی مس ناشی از عبور سیالات غنی از مس با دمای پایین در شکستگی‌های موجود در واحدهای آتشفشانی ائوسن می‌باشد و می‌توان آن را از نوع مس رگه‌ای گرمایی طبقه‌بندی کرد (جهان‌صنعت آتی معدن، ۱۴۰۰).

روش مطالعه

از آنجایی که عواملی همانند نوع واحدهای زمین‌شناسی، وجود توده‌های نفوذی و شکستگی‌ها می‌توانند در تمرکز کانی‌زایی در کانسار نقش داشته باشند، بنابراین، به‌منظور شناسایی و تعیین خطواره‌ها و گستره‌های بی‌هنجار مغناطیسی، ابتدا برداشت ژئوفیزیکی با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی زمینی در تمام سطح کانسار سبزسنگ انجام شده است. به‌منظور پوشش کل کانسار، یک شبکه مستطیلی با فواصل بین‌پروفیلی ۴۰ متر و فواصل بین‌ایستگاهی ۲۰ متر، طراحی و تعداد ۲۳۳۰ ایستگاه مغناطیس‌سنجی برداشت شد. سپس، بر روی داده‌های مغناطیسی فیلترهای مختلف و مناسب برگردان به قطب، مشتق قائم اول، مشتق قائم دوم، سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت اعمال شد. در مراحل بعد، کارهای اکتشافی سطحی گسترده‌ای شامل برداشت تعداد ۴۷ نمونه از رسوبات آبراهه‌ای، ۱۴۷ نمونه لیتوژئوشیمیایی، حفر تعداد ۱۱ رشته ترانشه به‌نام‌های Tr1 تا Tr11 با حجم کلی تقریبی ۵۴۳۰ متر مکعب، برداشت تعداد ۶۲ نمونه از ترانشه‌ها و ۲۳ نمونه از پاکت‌های لودر، و حفر تعداد پنج حلقه گمانه اکتشافی مایل به شماره‌های BH1 تا BH5 با طول مجموع ۳۴۹ متر همراه با مغزه‌گیری صورت گرفته است. بیشتر نمونه‌های سطحی برداشت‌شده از پهنه به‌صورت نقطه‌ای نبوده بلکه از یک ضخامت مشخص (به‌طور مثال با ضخامت دو متر در داخل ترانشه‌های ۱ و ۲) برداشت شده‌اند. همچنین تمام نمونه‌های برداشت شده با روش ICP-OES 35 عنصری از جمله برای مس، تجزیه شیمیایی شده و مطالعات بر

آن‌ها را با کانه‌زایی تعیین کردند. نتیجه‌های پژوهش آن‌ها نشان داد، در مجموع تطابق و انطباق خوبی بین داده‌های مغناطیس‌سنجی و ژئوالکتریک وجود دارد و این نشان‌دهنده آن است، بی‌هنجاری‌های موجود در پهنه، بیشتر در ارتباط با کانه‌سازی‌های فلزی هستند.

در پژوهش‌های انجام‌شده قبلی، ارزیابی کلی نتیجه‌های عملیات ژئوفیزیکی با حفاری، بعد از پایان فرآیند عملیات اکتشاف صورت گرفته است اما در پژوهش حاضر نتیجه‌های بررسی ارتباط میان خطواره‌ها و کانه‌زایی در کانسار مس سبزسنگ، به‌عنوان کلید و راهنمایی به‌منظور تصمیم‌گیری برای چگونگی مرحله اکتشاف تفصیلی کانسار خواهد بود.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره

پهنه سبزسنگ با مساحت تقریبی ۱۷۶ هکتار در استان مرکزی، ۱۸ کیلومتری شمال شهر ساوه، در نزدیکی شهر زرنديه و جنوب‌غربی شهر مامونیه قرار دارد. پهنه مورد مطالعه بخشی از کمربند آتشفشانی ارومیه-دختر و بخش کوچکی بر روی برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساوه است که شامل واحدهای آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی با گسترش زیاد به سن ائوسن می‌باشد. جدیدترین واحد آن رسوبات کواترنری است و در اثر فرسایش‌های اخیر در پهنه، توسعه‌یافته است (قلمقاش، ۱۳۷۷). به‌طور کلی واحدهای سنگی پهنه مجموعه‌ای از واحدهای آتشفشانی همانند آندزیت و گدازه‌های بازالتی-آندزیتی تا ریوداسیتی، برش‌های آتشفشانی، واحدهای آذرآواری نظیر توفه‌های حدواسط تا اسیدی و لیتیک‌توف و واحدهای رسوبی همانند آهک و رسوبات کواترنری را شامل می‌شود که حاکی از پیچیدگی فرآیندهای ماگماتیسم و کانه‌زایی در گستره است (جهان‌صنعت آتی معدن، ۱۴۰۰). گسل‌های بزرگ فعال پهنه شامل گسل‌های کوشک‌نصرت (در جنوب کانسار سبزسنگ)، ساوه، نوبران و گستره گسله کوه‌قرمز است (قلمقاش، ۱۳۷۷). مهم‌ترین و عمده‌ترین کانه‌زایی قابل مشاهده در پهنه، کانه‌زایی رگه‌ای مس و آهن است، بیشتر به‌صورت رگه‌های مالاکیتی و هماتیتی در پهنه یافت می‌شوند. وجود کانی‌های سطحی همانند مالاکیت و کمتر آزوریت، در شرایط اکسیدان ایجاد می‌شود، دال بر آن است

تعیین ارتباط میان خطواره‌های حاصل از روش مغناطیس‌سنجی با کانه‌زایی مس در کانسار سبزسنگ...

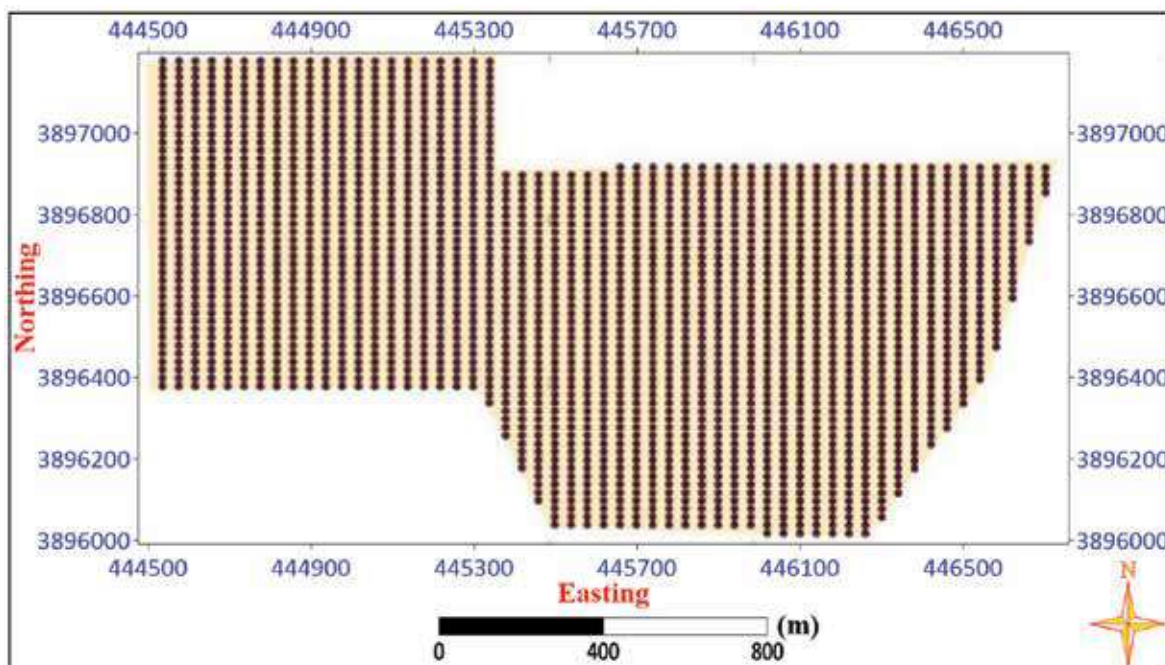
آهن، حضور توده‌های نفوذی یا واحد بازالتی باشند. این بی‌هنجاری‌ها اولویت‌بندی شده (اولویت ۱ با رنگ قرمز، اولویت ۲ با رنگ زرد و اولویت ۳ با رنگ سبز) و ۱۰ ناحیه با اولویت اکتشافی ۱، چهار ناحیه با اولویت اکتشافی ۲ و چهار ناحیه با اولویت اکتشافی ۳ مشخص شدند. بی‌هنجاری‌های با اولویت‌های ۱ و ۲ از نقطه‌نظر کانه‌زایی بالقوه وضعیت مطلوب‌تری دارند.

در شکل ۲ هر توده مغناطیسی، دارای قطب‌های مثبت و منفی مرتبط با آن است. بی‌هنجاری‌های با اولویت ۱ که دارای چند قطب مثبت و منفی هستند. در بخش شرقی گستره با روند شمال شرقی-جنوب غربی گسترش دارند. پاسخ مغناطیسی در بخش شرقی پهنه قوی‌تر است و می‌تواند در ارتباط با واحدهای آتشفشانی باشد. با انطباق نقشه شدت میدان مغناطیسی کل بر روی نقشه زمین‌شناسی-توپوگرافی پهنه (شکل ۳) مشاهده می‌شود که بیشتر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در این پهنه بر روی واحدهای آندزیت، آندزیت-داسیت و آذرآاری‌ها (توفها) قرار دارند. بی‌هنجاری‌های اولویت ۱ (با شدت زیاد) که بیشتر در مرزهای (زمین‌شناسی-گسلی) قرار دارند، شاید با کانه‌زایی مرتبط هستند.

روی آن‌ها صورت گرفته است. در نهایت، بر اساس نقشه خطواره‌های تولید شده از روش مغناطیس‌سنجی، اطلاعات و داده‌های اکتشافات مستقیم انجام شده در پهنه، مطالعات آماری و تحلیل‌های زمین‌شناسی-معدنی پهنه به کمک تهیه نقشه‌ها و مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، میزان ارتباط کیفی و کمی میان خطواره‌ها با کانه‌زایی تعیین شد.

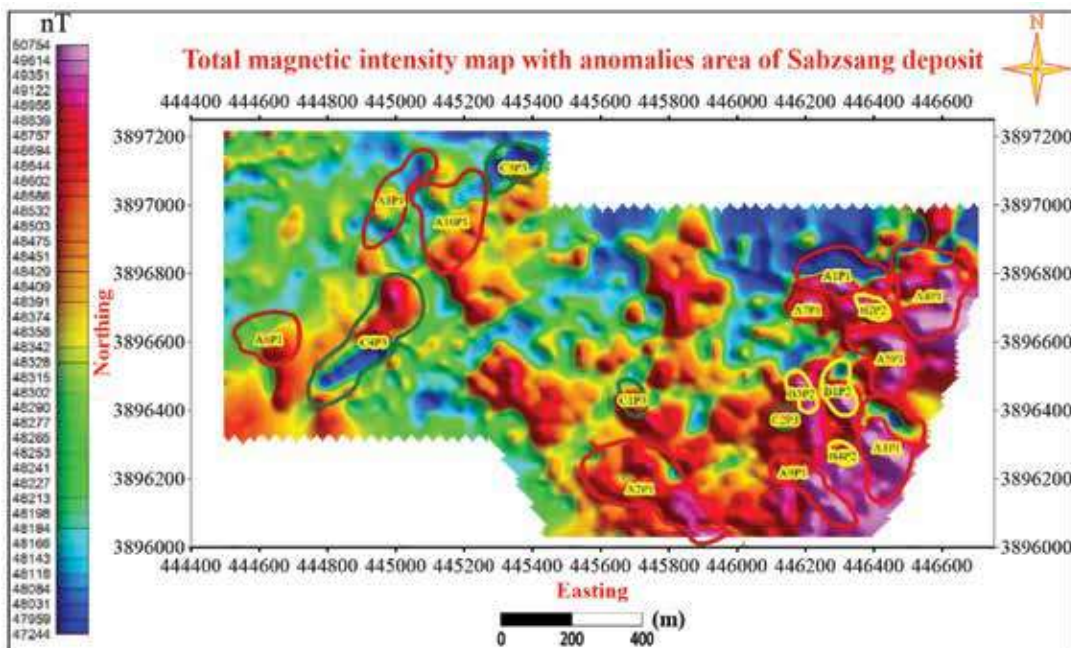
پردازش داده‌های مغناطیسی

شکل ۱ نقشه موقعیت ایستگاه‌های برداشت مغناطیسی را نشان می‌دهد. در شکل ۲ نیز نقشه شدت میدان مغناطیسی کل^۱ پهنه نشان داده شده است. با توجه به مقادیر عددی داده‌ها، دامنه تغییرات مغناطیسی در کل پهنه حدود ۳۵۰۰ نانوتسلا است. مطابق این شکل، شرایط و وضعیت زمین‌شناسی پهنه و وجود سنگ‌های آذرین با خودپذیری‌های متفاوت، موجب پیچیدگی مغناطیسی پهنه و تداخل چندگانه قطب‌های مثبت و منفی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در نقشه حاصل از برداشت شده است. با بررسی اولیه نقشه شدت میدان کل، تعداد ۱۸ بی‌هنجاری مغناطیسی شناسایی شد که می‌توانند به واسطه کانه‌زایی

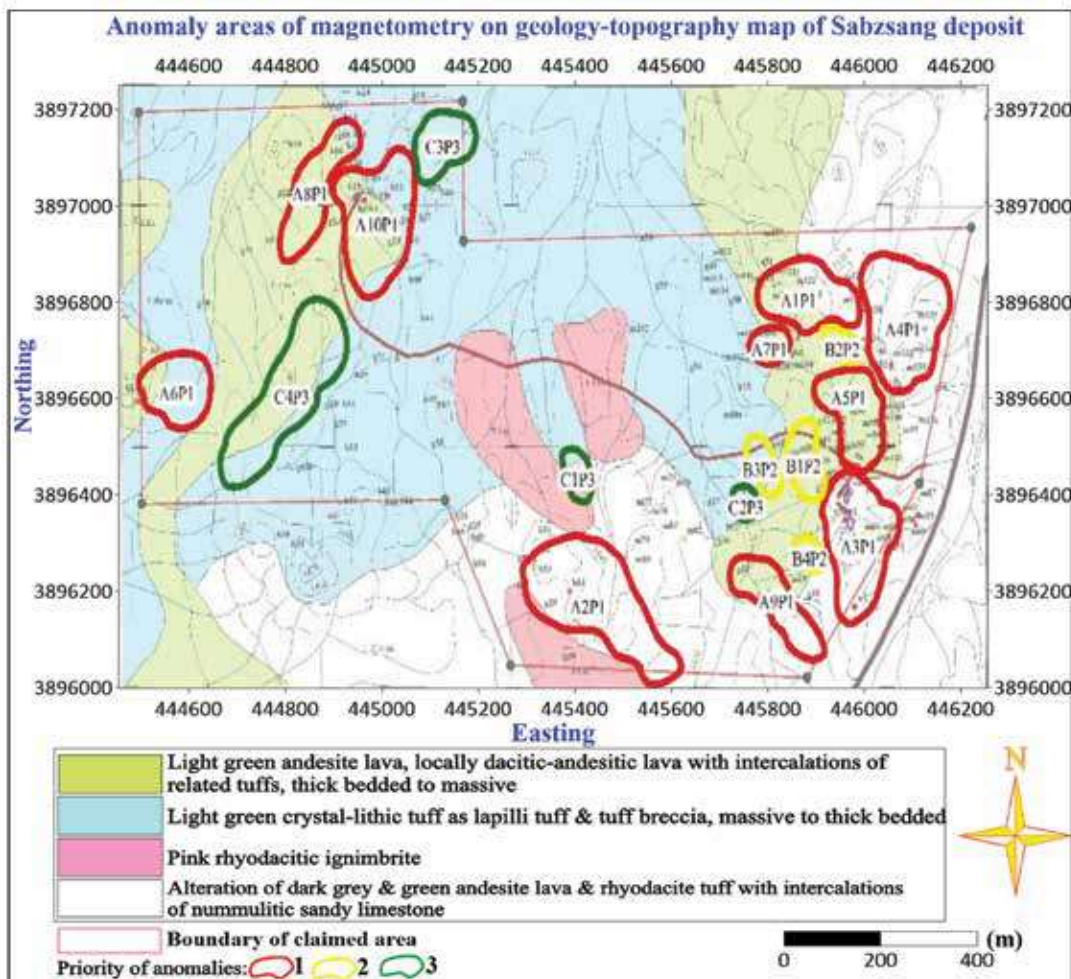


شکل ۱. موقعیت نقاط برداشت مغناطیس‌سنجی در پهنه کانسار سبزسنگ

1. Total magnetic intensity (TMI)



شکل ۲. نقشه شدت میدان مغناطیسی کل گستره مورد مطالعه با نمایش تعداد ۱۸ گستره بی‌هنجاری



شکل ۳. نمایش گستره‌های بی‌هنجاری مغناطیسی بر روی نقشه زمین‌شناسی-توپوگرافی گستره کانسار سبزسنگ

یکی دیگر از فیلترهای مناسب برای برجسته‌سازی مرز توده‌ها زاویه تیلت است و به صورت تانژانت وارون نسبت مشتق قائم به مشتق افقی تعریف می‌شود. این فیلتر توسط میلر و سینق (Miller and Singh, 1994) به صورت رابطه ۲ معرفی شده است.

$$Tilt = \frac{\partial T / \partial z}{\sqrt{(\partial T / \partial x)^0 + (\partial T / \partial y)^0}} \quad (\text{رابطه } 2)$$

زاویه تیلت به عنوان یک نسبت بدون بعد، به منابع کم عمق و عمیق، کم و بیش به طور یکسان پاسخ می‌دهد. زاویه تیلت یک فیلتر مناسب برای متعادل‌سازی دامنه بی‌هنجاری‌های قوی و ضعیف است. زاویه تیلت بر روی منبع، مقداری مثبت، در نزدیکی‌های لبه ساختار (یا منبع) جایی که مشتق قائم صفر و مشتق افقی بیشینه است، مقدار صفر و در خارج از منبع، مقادیر منفی را نمایش می‌دهد (امامی، ۱۳۹۲؛ Cooper and Cowan, 2006).

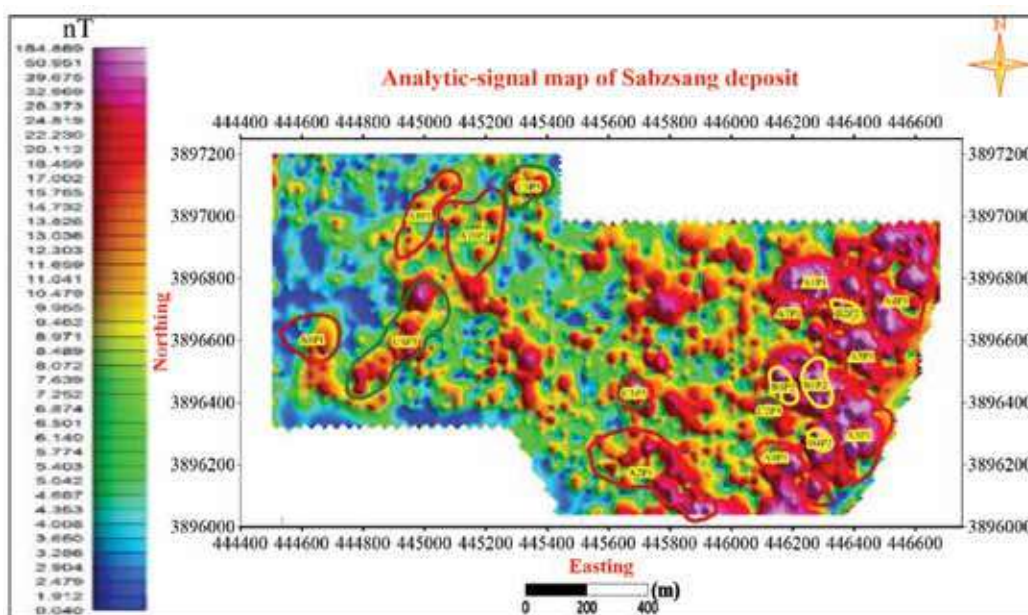
به منظور شناسایی دقیق‌تر ساختارهای خطی در کانسار مس سبزسنگ در شکل ۵ فیلتر زاویه تیلت بر روی داده‌های مغناطیسی گستره، اعمال شده است. در شکل ۶ نیز خطواره‌های شناسایی شده در گستره بر اساس تفسیر نقشه زاویه تیلت و به کمک تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای صحرائی، به صورت خطوط مشکی رنگ نشان داده شده‌اند.

در ادامه بر روی داده‌های مغناطیسی فیلترهای برگردان به قطب، مشتق قائم اول و مشتق قائم دوم نیز اعمال شد (جهان‌صنعت آبی معدن، ۱۴۰۰). شکل ۴ نقشه سیگنال تحلیلی پهنه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در فیلتر سیگنال تحلیلی که در حالت سه‌بعدی مطابق رابطه ۱ به صورت تابعی از توان دوم مشتقات افقی و قائم تعریف می‌شود، مقادیر بیشینه سیگنال تحلیلی بر روی مرز منابع مغناطیسی منطبق است (Ma and Li, 2013).

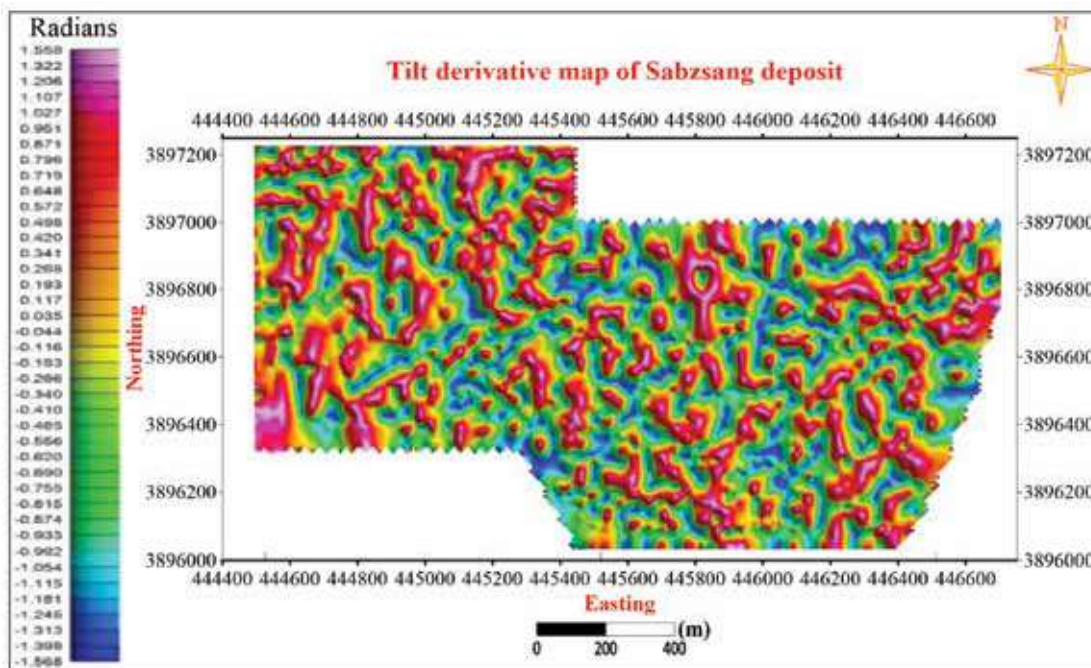
$$|AAS(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^0 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^0 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^0} \quad (\text{رابطه } 1)$$

$\frac{\partial T}{\partial y}$ و $\frac{\partial T}{\partial x}$ مشتقات افقی و $\frac{\partial T}{\partial z}$ مشتق قائم میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده است.

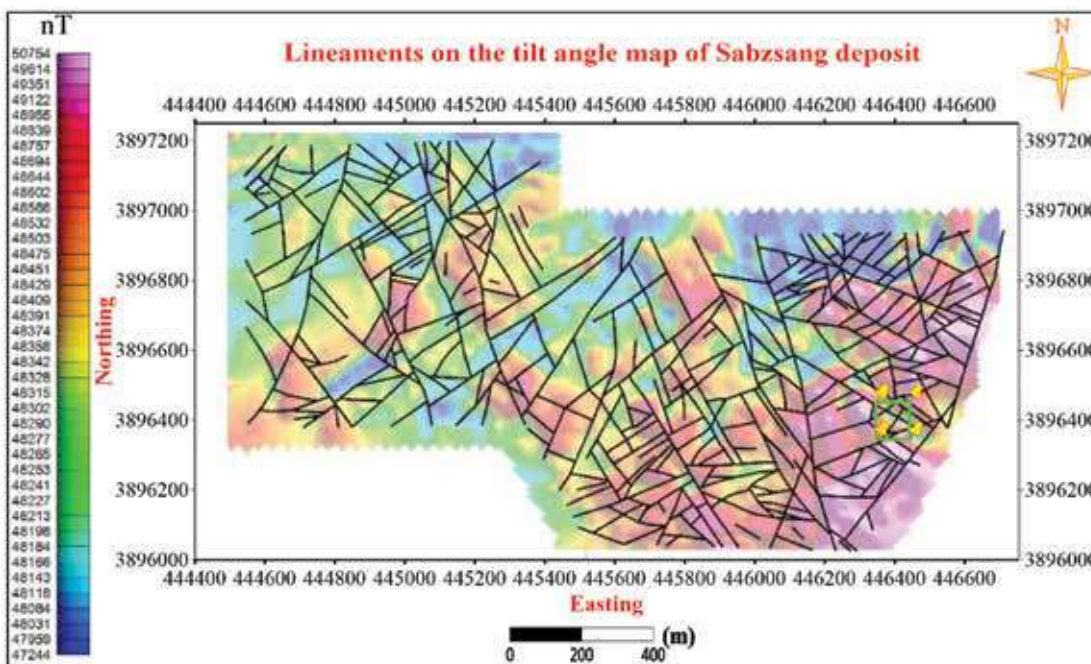
در نقشه سیگنال تحلیلی مقادیر بیشینه یا کمینه میدان مغناطیسی (قطب مثبت و منفی) با عملیات ریاضی و مشتق‌گیری به قطب مثبت تبدیل می‌شود و بنابراین به راحتی می‌توان لبه‌ها و پهنه مرز بی‌هنجاری‌ها را شناسایی کرد (انصاری و همکاران، ۱۳۹۱). برای گستره مورد مطالعه مقدار ۸۰ نانوتسلا بر متر به عنوان مرز احتمالی بی‌هنجاری مغناطیسی در نظر گرفته شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تعداد ۱۸ بی‌هنجاری مغناطیسی به‌خوبی در این نقشه بارز شده و مرز آن‌ها مشخص شده است.



شکل ۴. نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی گستره مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه زاویه تیلت میدان مغناطیسی گستره مورد مطالعه



شکل ۶. خطواره‌های شناسایی شده (خطوط مشکی‌رنگ) در کانسار مس سبزسنگ بر روی نقشه شدت میدان مغناطیسی کل

تحلیل اکتشافات سطحی انجام شده

می‌دهند، بیشترین میزان عیار مس، در نمونه‌های برداشت شده از ترانشه‌ها می‌باشد. همچنین متوسط عیار نمونه‌های پاکت لودر از نمونه‌های کارهای سطحی دیگر بیشتر است.

در جدول ۱ آماره‌های توصیفی داده‌های عیارسنجی مس تمام کارهای اکتشافی سطحی، هم به‌طور تفکیکی و هم به‌صورت یکجا آورده شده است. داده‌های این جدول نشان

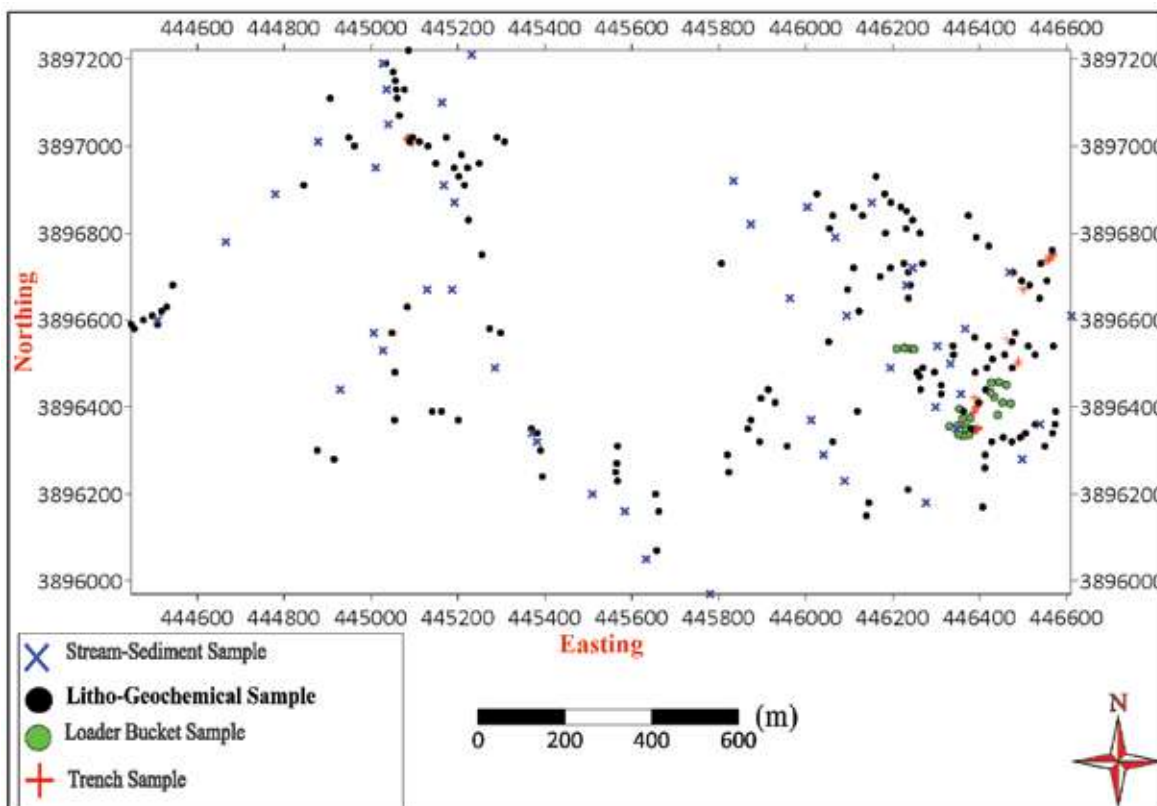
تعیین ارتباط میان خطواره‌های حاصل از روش مغناطیس‌سنجی با کانه‌زایی مس در کانسار سبزسنگ...

جدول ۱. پارامترهای آماری داده‌های عیارسنجی مس کارهای اکتشافی سطحی کانسار مس سبزسنگ

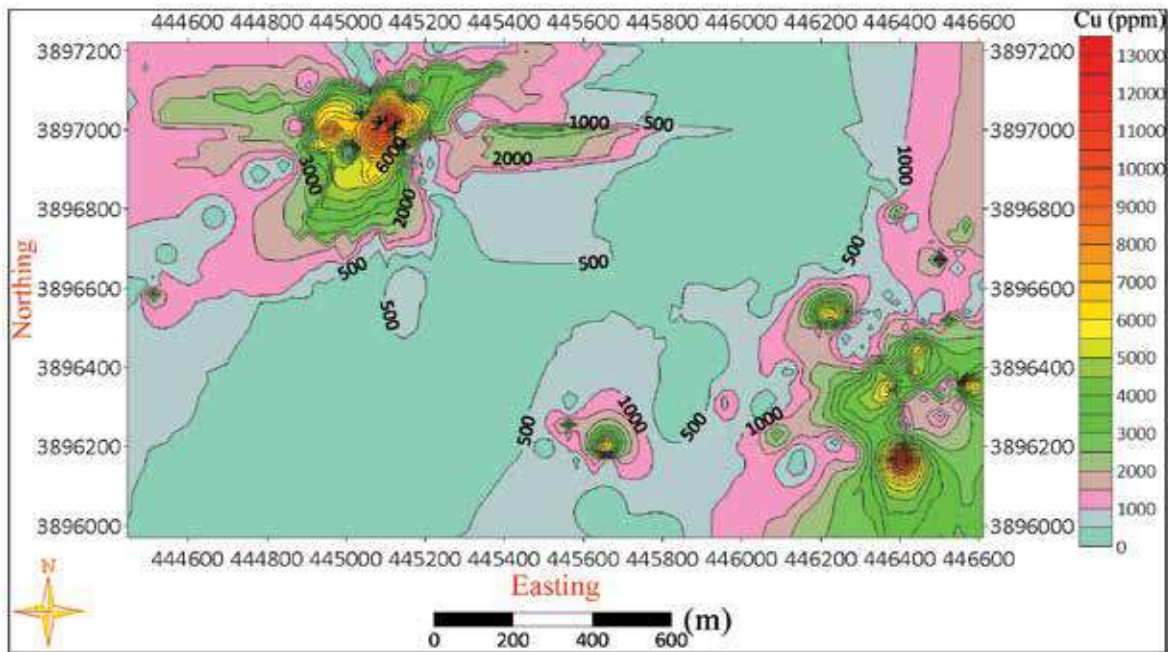
نوع کار اکتشافی	تعداد نمونه	کمینه (ppm)	بیشینه (ppm)	دامنه تغییرات (ppm)	میانه (ppm)	مد (ppm)	انحراف معیار (ppm)	ضریب تغییرات (%)	چولگی	کشیگی
لیتوژئوشیمیایی و آبراهه‌ای	۱۹۴	۵	۳۴۵۲۴	۳۴۵۱۹	۱۲۴۱/۹	-	۳۹۱۴/۹	۳/۱۵	۵/۷۵	۳۸/۹۶
نمونه‌های ترانشه‌ها	۶۲	۷۸/۸	۵۸۸۴۵/۴	۵۸۷۶۶/۶	۳۷۱۴/۹	-	۷۸۲۹/۶	۲/۱۱	۶	۴۱/۵۵
نمونه‌های پاکت لودر	۲۳	۳۴۰۰	۱۰۱۰۰	۶۷۰۰	۶۶۱۷/۴	۷۰۰۰	۱۴۴۲/۴	-۰/۲۲	-۰/۳۱۱	۱/۶۴
کل داده‌های کارهای سطحی	۲۷۹	۵	۵۸۸۴۵/۴	۵۸۸۴۰/۴	۲۲۳۴/۶	۲۰۷	۵۱۹۸/۳	۲/۳۳	۶/۳۶	۵۷/۱۷

سطحی با استفاده از الگوریتم درونیایی عکس مجذور فاصله نشان می‌دهد. مطابق این شکل بخش بزرگ میانی گستره با راستای شمال شرقی-جنوب غربی دارای عیار پایین (کمتر از ۱۰۰۰ ppm) و در حال حاضر بدون ارزش اقتصادی است. تمرکز اصلی سطحی ماده معدنی در دو گستره مجزا یکی در جنوب شرق و دیگری در شمال غرب گستره است.

در شکل ۷ نقشه موقعیت پراکندگی تمام کارهای اکتشافی سطحی شامل نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی و آبراهه‌ای، نمونه‌های برداشت‌شده از ترانشه‌ها و نمونه‌های برداشتی از پاکت‌های لودر در گستره کانسار مس سبزسنگ نشان داده شده است. شکل ۸ نیز نقشه هم‌عیار مس (برحسب ppm) را بر اساس داده‌های عیارسنجی نمونه‌های



شکل ۷. نقشه موقعیت پراکندگی کارهای اکتشافی سطحی در گستره کانسار مس سبزسنگ



شکل ۸. نقشه هم‌عیار داده‌های عیارسنجی مس کارهای اکتشافی سطحی در گستره کانسار مس سبزسنگ

تحلیل اکتشافات عمقی انجام‌شده

در طول مغزه مربوطه در گمانه است. مطابق این شکل تغییرات عیار پهنه مورد مطالعه با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار ۱۸۹۰۰ ppm به ۱۹ بخش رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. با توجه به این شکل بیشترین میزان عیار مس در گمانه BH2 قرار دارد، ولی ضخامت این بخش پرعیار، کم است. گمانه BH3 نیز بیشترین میزان ضخامت ماده معدنی را دارا است. گمانه BH4 تنها در بخش سطحی، دارای ماده معدنی است و در اعماق کم‌وبیش فاقد ماده معدنی می‌باشد.

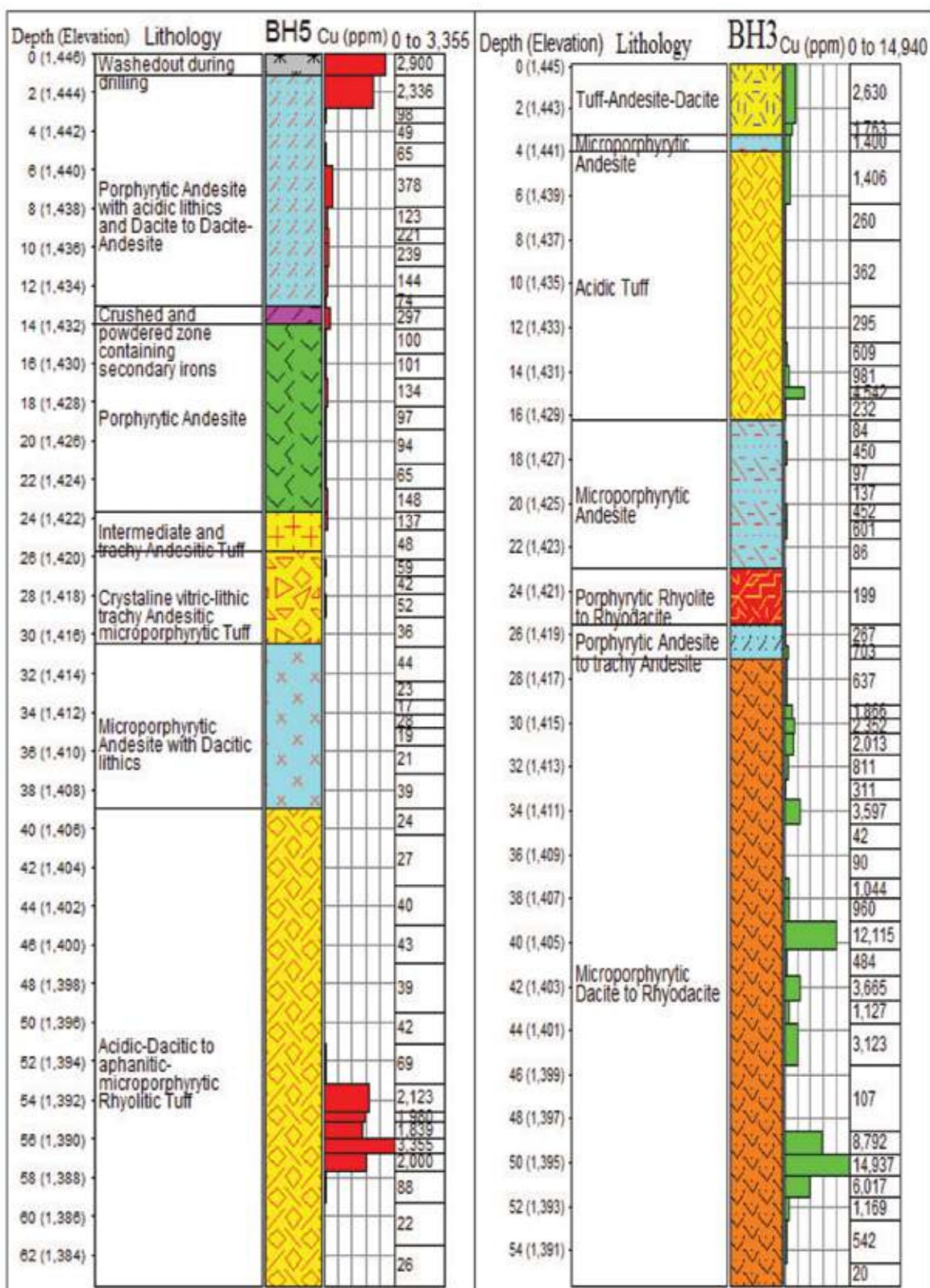
در شکل ۱۱- الف مدل سه‌بعدی عیارسنجی کانسار مس سبزسنگ به کمک نرم‌افزار RockWorks (www.rockware.com/Rockworks2022) نشان داده شده است. برای ساخت این مدل از یک مدل شبکه‌ای اولیه کم‌وبیش مکعبی‌شکل به ابعاد ۱۰۵×۱۰۰×۱۰۰ متر با سلول‌های ۵×۵×۵ متری و داده‌های عیارسنجی نمونه‌های تمام گمانه‌های اکتشافی، به کمک الگوریتم عکس فاصله وزن‌دار پیشرفته استفاده شده است. در این الگوریتم امکان وزن‌دهی فاصله با توان متفاوت در جهت‌های مختلف وجود

1. Advanced inverse distance weighted (IDW)

بر اساس نتیجه‌های عملیات اکتشاف ژئوفیزیکی با روش‌های IP و RS انجام‌شده در گستره (جهان‌صنعت آبی معدن، ۱۴۰۱)، در یک بخش محدود در شرق کانسار مورد مطالعه، تعداد پنج حلقه گمانه اکتشافی مایل به شماره‌های BH1 تا BH5 با طول مجموع ۳۴۹ متر حفاری شده است. طول کوتاه‌ترین گمانه حفر شده در پهنه (گمانه BH1) ۵۴/۶ متر و عمیق‌ترین گمانه (BH2) ۱۱۱/۶ متر می‌باشد. همه گمانه‌های اکتشافی در واحدهای لیتولوژی آندزیتی و توفی، حفاری شده‌اند. به‌عنوان نمونه در شکل ۹ چاه‌نگار دوبعدی گمانه‌های اکتشافی BH3 و BH5 بر اساس مطالعات مغزه‌های حاصل از حفر گمانه‌ها رسم شده است. در این چاه‌نگارها علاوه بر ستون سنگ‌شناسی، فراوانی‌نمای تغییرات عمقی عیارسنجی مس (برحسب ppm) نیز نشان داده شده است.

در شکل ۱۰ چاه‌نگار عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی کانسار مس سبزسنگ به‌صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است. راهنمای رنگی عیاری در این شکل تغییرات میزان عیار مس گمانه‌ها را برحسب ppm نشان می‌دهد. در این شکل میزان شعاع استوانه‌ها نشان‌دهنده بزرگی مقدار عیار

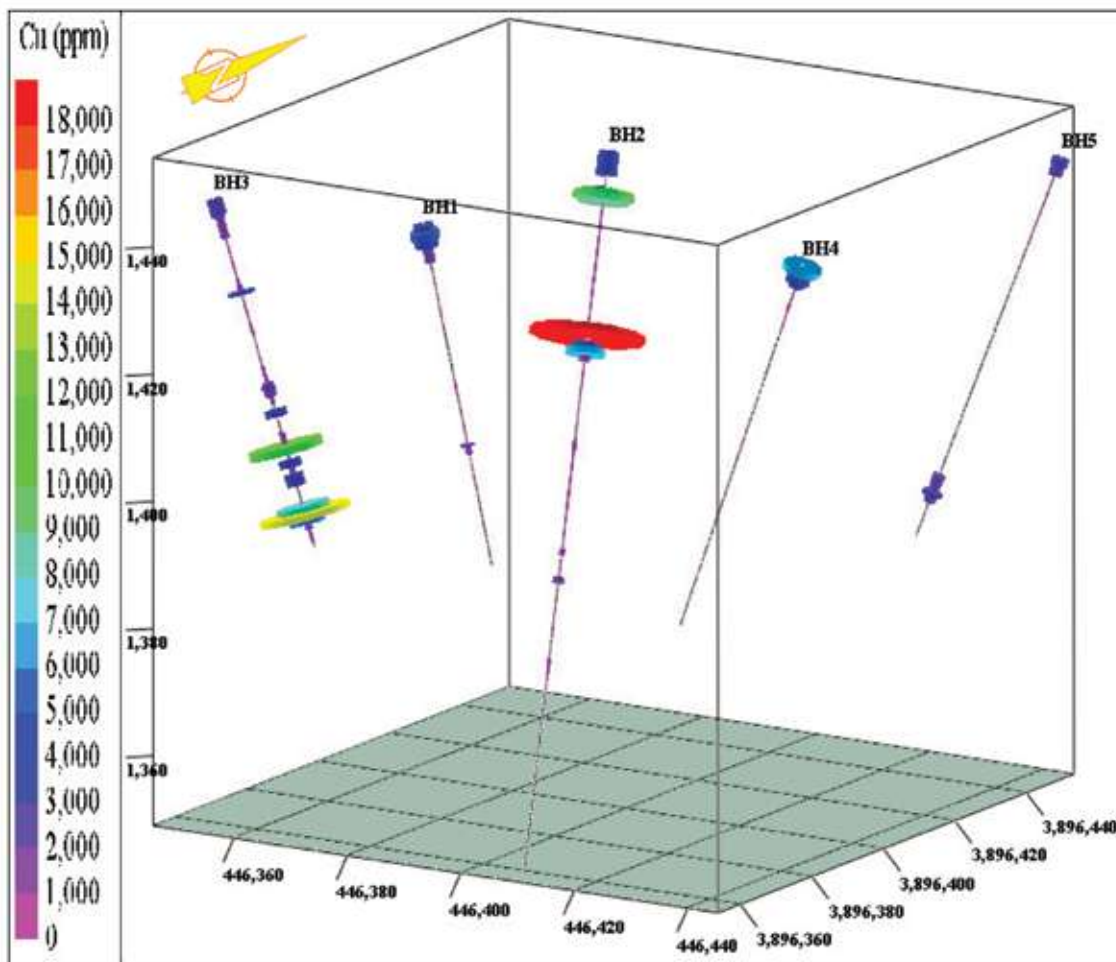
تعیین ارتباط میان خطواره‌های حاصل از روش مغناطیس‌سنجی با کانه‌زایی مس در کانسار سبزسنگ...



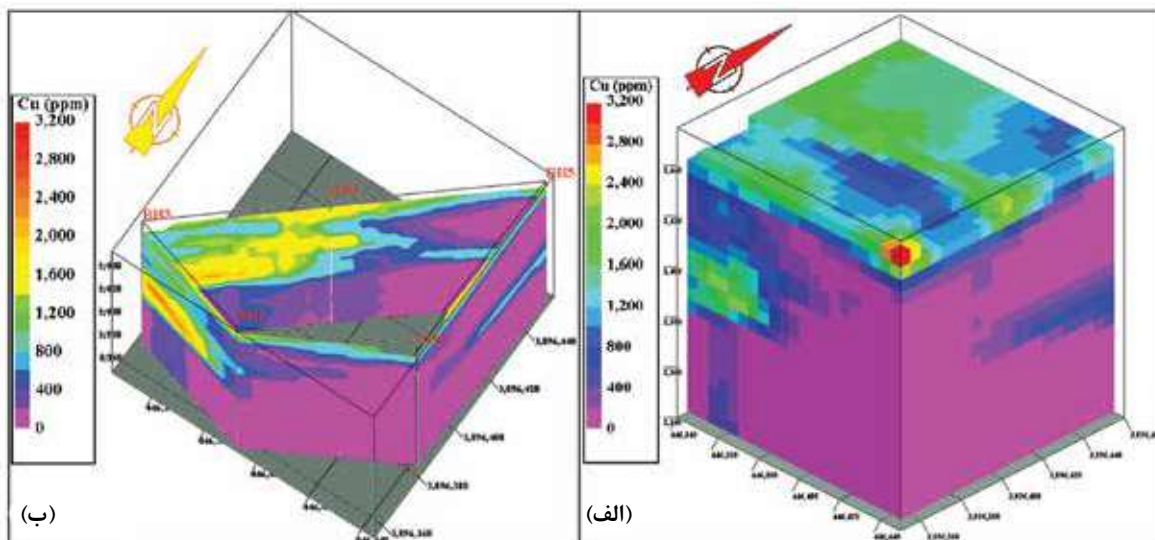
شکل ۹. چاه‌نگار دوبعدی زمین‌شناسی-معدنی گمانه‌های BH5 و BH3 در کانسار مس سبزسنگ

معدنی (۱۰ متر نخست) نسبت به اعماق بهتر است و تنها در بخش جنوب غربی پهنه حفر گمانه‌های اکتشافی، عیار ماده معدنی تا اعماق ۵۰ متری به نسبت مطلوب است. به منظور تجسم بهتر نحوه تغییرات عیار مس در مرز گمانه‌های اکتشافی در گستره مورد مطالعه، در شکل ۱۱-ب نمودار نرده‌ای سه بعدی تغییرات عیار سنجی مرزی گستره حفر گمانه‌های اکتشافی نشان داده شده است. مطابق این شکل پهنه، دارای عیار قابل قبول مس (بیش از ۱۰۰۰ ppm) با گستره رنگی سبز تا قرمز مشخص شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود گستره پرعیار در سطح زمین در تمام سطح گستره حفر گمانه‌های اکتشافی، و در اعماق در قسمت جنوب غربی این بخش قرار دارد.

دارد. در این مورد به دلیل نبود جهت‌یافتگی مشخص، در هر دو جهت افقی و قائم وزن دو به داده‌ها نسبت داده شد. راهنمای رنگی عیاری در این شکل، تغییرات میزان عیار ماده معدنی در پهنه را برحسب ppm نشان می‌دهد. مطابق این شکل تغییرات عیار پهنه مورد مطالعه با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار ۳۲۰۰ ppm به ۱۶ گستره رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. مطابق این شکل بخش بزرگ گستره در اعماق دارای عیار به نسبت پایینی (کمتر از ۴۰۰ ppm) است. البته هم‌طول نبودن تمام گمانه‌های اکتشافی و در نتیجه در دسترس نبودن داده‌های عیار سنجی در اعماق برای تمام گمانه‌ها و نبود درون‌یابی آن‌ها، در این امر تاثیرگذار است. به طور کلی وضعیت سطحی عیار ماده



شکل ۱۰. نمایش سه بعدی چاه‌نگار عیار سنجی گمانه‌های اکتشافی کانسار مس سبز سگ



شکل ۱۱. الف) مدل سه‌بعدی عیارسنجی، ب) نمودار نرده‌ای تغییرات عیار مرزی گمانه‌های کانسار مس سبزسنگ

تعیین ارتباط میان شکستگی‌ها با کانه‌زایی

هم کارهای اکتشافی سطحی و هم گمانه‌های اکتشافی عمیق انجام شده است. به عبارت دیگر در این بخش تمرکز انواع فعالیت‌های اکتشافی زیاد است. در شکل ۱۲ موقعیت برداشت نمونه‌های سطحی اعم از نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی و آبراه‌ای، نمونه‌های برداشت‌شده از ترانشه‌ها و نمونه‌های برداشتی از پاکت لودر واقع در پهنه حفر گمانه‌های اکتشافی همراه با موقعیت دهانه گمانه‌های اکتشافی نشان داده شده است. در این شکل نام هر نمونه نیز در موقعیت مکانی آن آورده شده است.

در شکل ۱۳ نقشه هم‌عیار نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۱۲ با استفاده از الگوریتم درون‌یابی عکس مجذور فاصله رسم شده است. برای استفاده بیشینه از تمامی اطلاعات اکتشافی موجود در گستره حفر گمانه‌های اکتشافی، سعی شده که ارتباط منطقی و معنی‌داری بین داده‌های کارهای اکتشافی سطحی و گمانه‌های اکتشافی برقرار شود. از آنجایی که ارتفاع ترانشه‌های ۱ و ۲ به ترتیب برابر با سه و چهار متر است، بنابراین میانگین عیار مغزه‌های بخش سطحی (تا عمق سه-چهار متری) پنج گمانه اکتشافی، محاسبه شده و در رسم این نقشه مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق راهنمای رنگی نقشه این شکل،

1. Occurrence

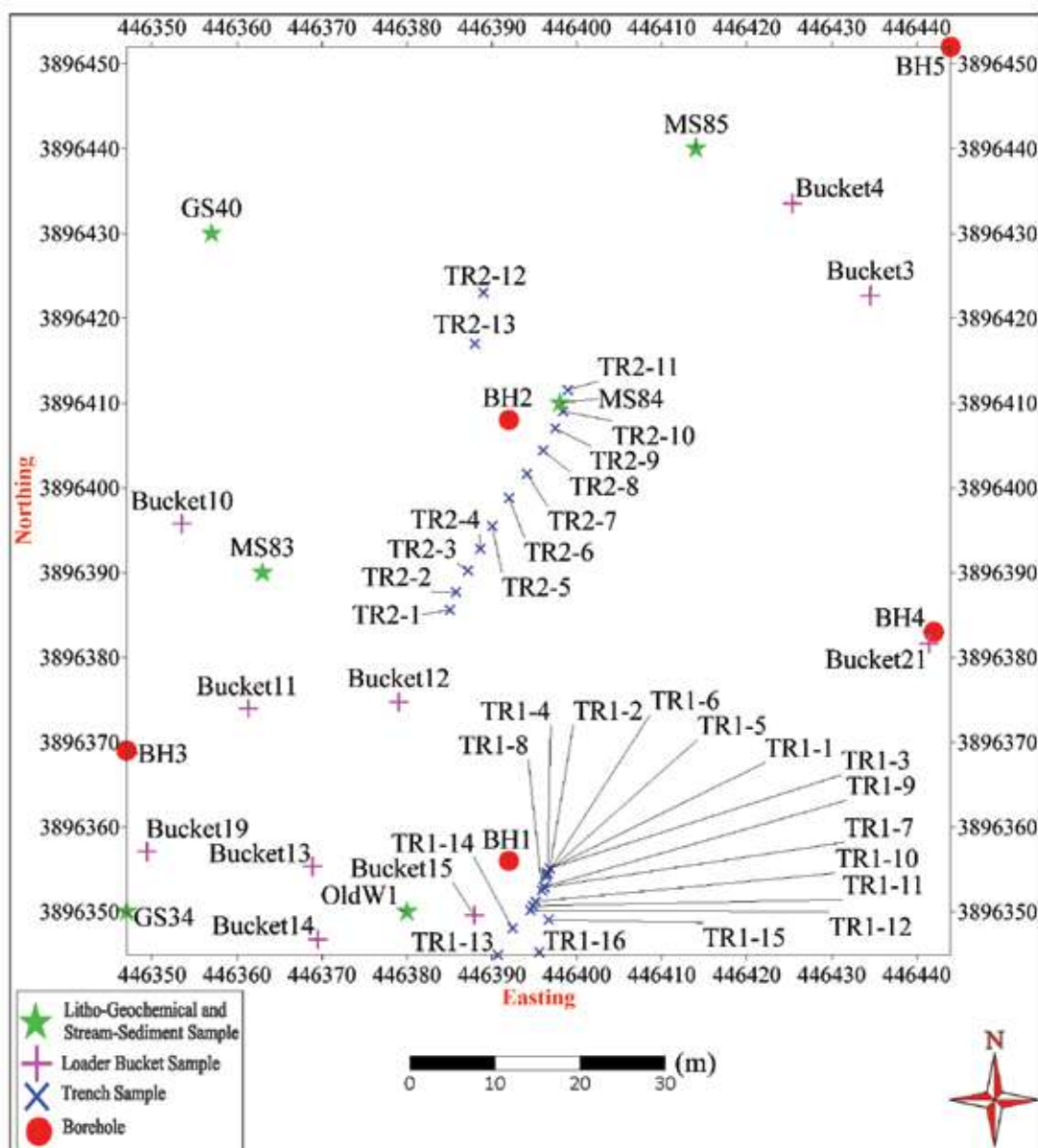
بر اساس نتیجه‌های به دست آمده، به طور کلی میزان عیار ماده معدنی در سطح پهنه مورد مطالعه نسبت به اعماق بیشتر است. این نشان‌دهنده آن است که تمرکز ماده معدنی در پهنه سبزسنگ، بیشتر سطحی است. مقایسه نقشه‌های شکل‌های ۶ و ۸ به طور کیفی نشان می‌دهد که در شکل ۶ تمرکز خطواره‌ها (خطوط شکستگی) در دو گستره جنوب شرقی و شمال غربی گستره مورد مطالعه نسبت به بخش میانی (به شکل نواری پهن با راستای شمال شرقی-جنوب غربی) به نسبت بالا است. همچنان که در شکل ۸ تمرکز اصلی سطحی ماده معدنی در دو گستره مجزا یکی در جنوب شرق و دیگری در شمال غرب پهنه است و بخش بزرگ میانی گستره با راستای شمال شرقی-جنوب غربی دارای عیار پایین (فقدان ماده معدنی با ارزش) می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به این دو شکل و بر اساس اطلاعات اکتشافی سطحی، تطابق کیفی بسیار زیادی بین خطواره‌ها و پیدایش^۱ (حضور) و عیار ماده معدنی در کل سطح پهنه مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

برای تعیین بهتر میزان ارتباط کیفی و کمی میان کانه‌زایی و شکستگی‌ها در کانسار، بخش شرقی کانسار (مربع سبزسنگ در شکل ۶) مناسب‌تر تشخیص داده شد زیرا در این بخش از یک سو بر اساس نتیجه‌های عملیات ژئوفیزیک، تمرکز بی‌هنجاری‌ها زیاد است و از سوی دیگر،

است (همانند گستره جنوب‌غربی این بخش)، میزان حضور و همچنین عیار ماده معدنی هم بالا است. کم‌وبیش در هر محلی که انباشتگی ماده معدنی وجود دارد، شکستگی هم دیده می‌شود. البته عکس این مطلب درست نیست، یعنی در بعضی بخش‌ها شکستگی وجود دارد، ولی در آن بخش‌ها ماده معدنی یافت نمی‌شود که شاید این شکستگی‌ها در مراحل بعدی و با فاصله زمانی بعد از شکستگی‌های اولیه دارای ماده معدنی، ایجاد شده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت بر اساس مقایسه کیفی، تطابق به‌نسبت خوبی بین کانه‌زایی سطحی و شکستگی‌های موجود در پهنه وجود دارد.

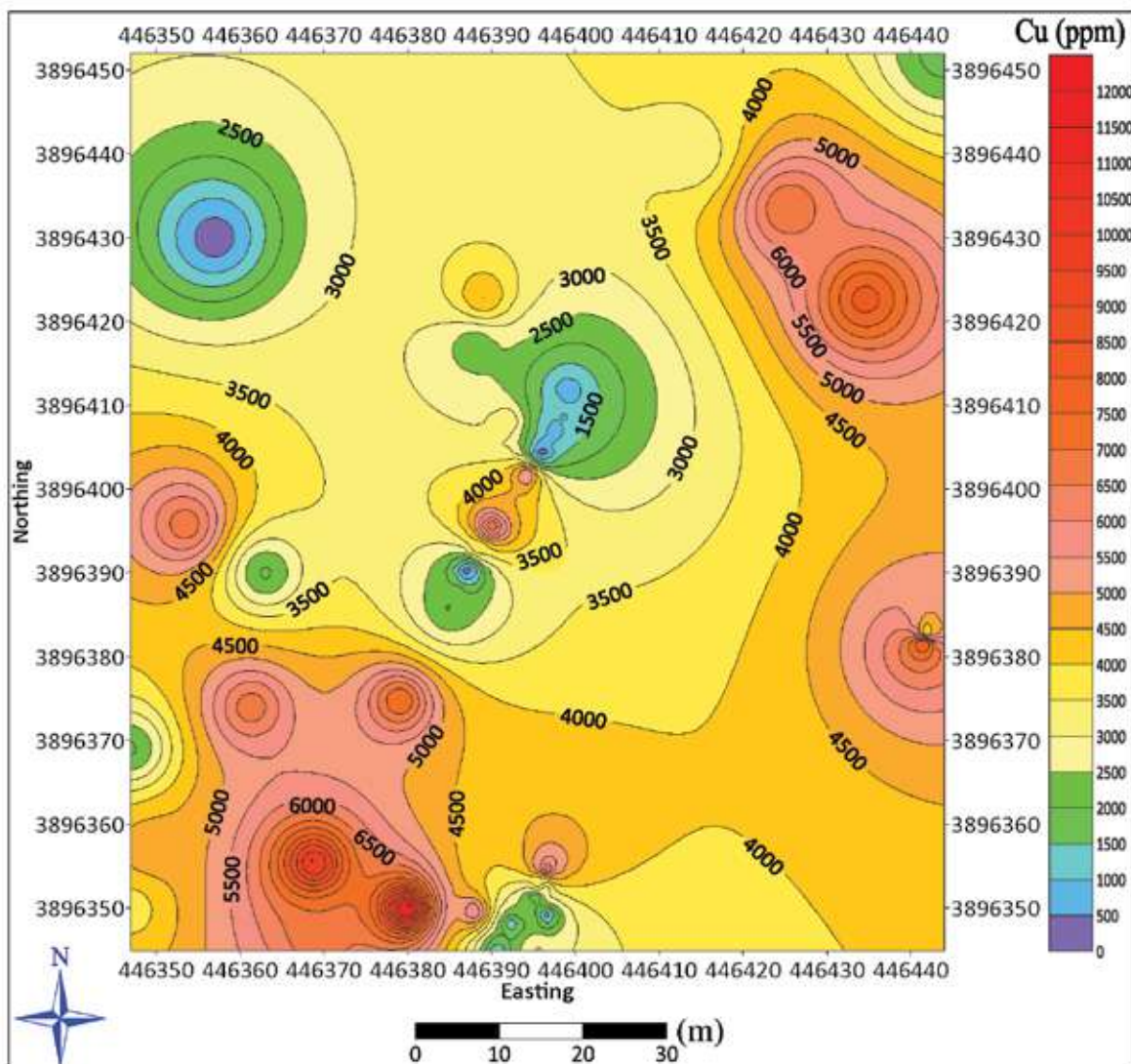
کم‌وبیش بیش از ۹۰ درصد مساحت سطح این گستره دارای عیار مس بیش از ۱۰۰۰ ppm است.

به‌منظور تعیین ارتباط میان شکستگی‌ها و کانه‌زایی به‌صورت کیفی در بخش معین و محدودی در شرق پهنه مورد مطالعه، در شکل ۱۴ نقشه هم‌عیار تمام کارهای اکتشافی و نقشه شکستگی‌های شناسایی‌شده در این بخش، در یک قاب نشان داده شده است. در این بخش مطابق شکل، تعداد نه شکستگی متقاطع با یکدیگر به‌صورت کم‌وبیش مشبک وجود دارد. با توجه به این شکل در بخش‌هایی که تمرکز شکستگی یعنی تعداد شکستگی‌ها در واحد سطح، بالا



شکل ۱۴. موقعیت برداشت نمونه‌های سطحی در گستره حفر گمانه‌های اکتشافی

تعیین ارتباط میان خطواره‌های حاصل از روش مغناطیس‌سنجی با کانه‌زایی مس در کانسار سبزشنگ...

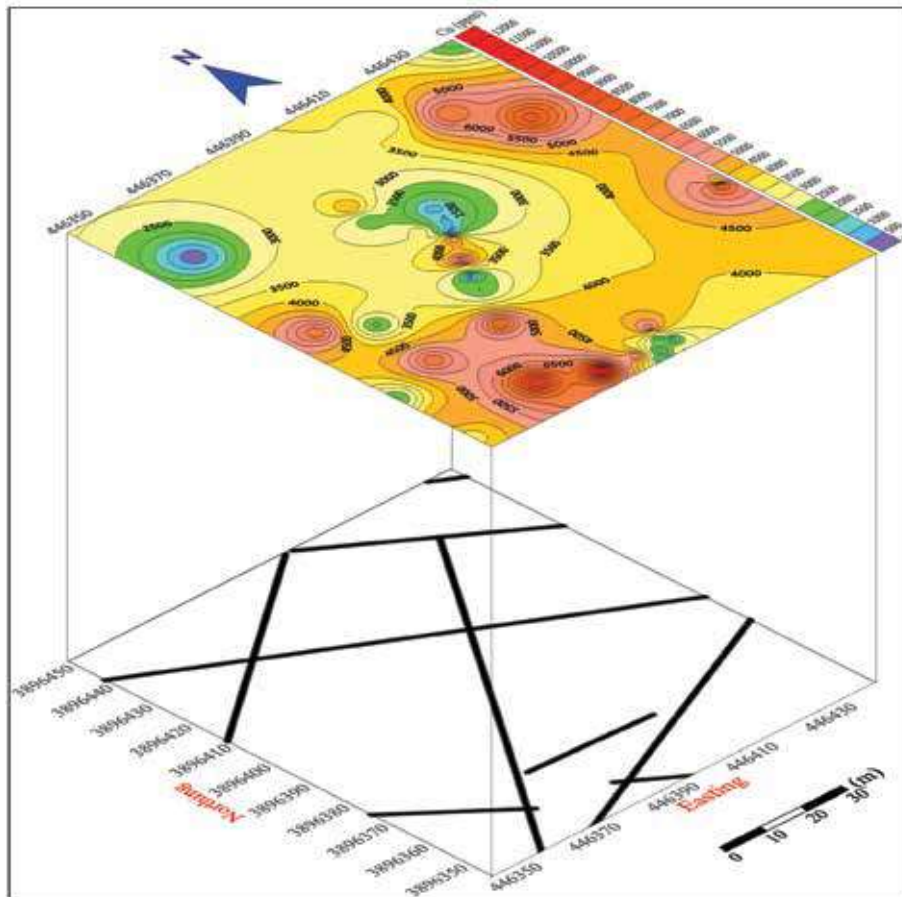


شکل ۱۳. نقشه هم‌عیار مس (برحسب ppm) بخش سطحی گمانه‌های اکتشافی و نمونه‌های سطحی واقع در پهنه حفر گمانه‌های اکتشافی

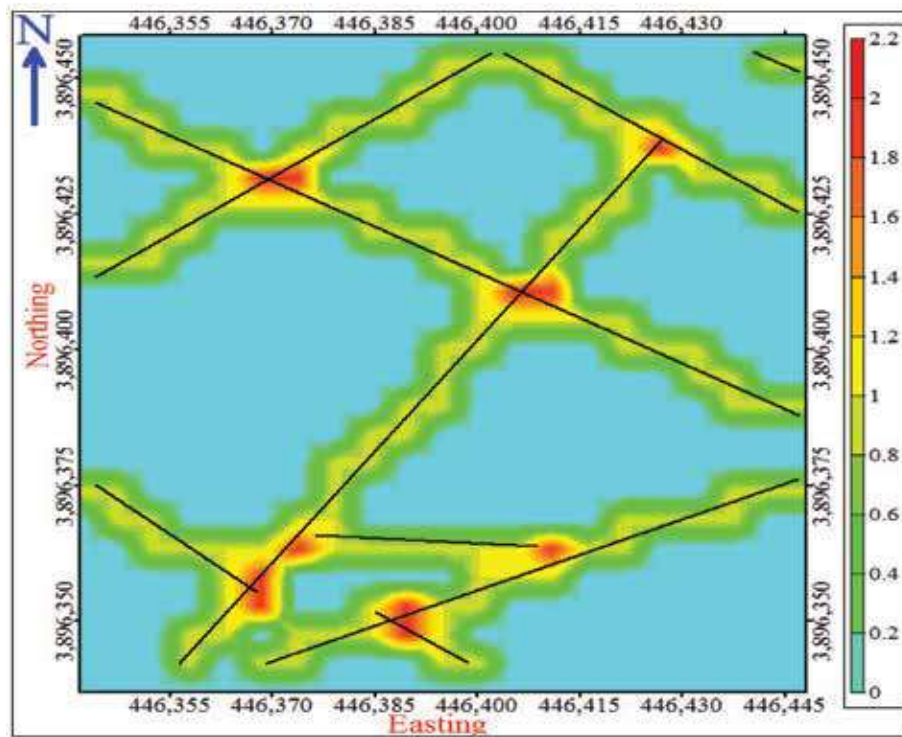
فرایند کار به‌منظور مقایسه نتیجه‌ها در مراحل بعدی کار، ۵×۵ متر انتخاب شد. سپس تعداد (فراوانی) شکستگی‌های واقع در هر سلول شبکه به مرکز آن سلول نسبت داده شد. در این نوع شبکه که به آن شبکه فراوانی شکستگی‌ها هم گفته می‌شود، عدد هر سلول شامل مجموع تعداد شکستگی‌هایی است و ابتدا یا انتهای آن‌ها در داخل سلول است یا از درون آن سلول عبور می‌کنند. در نهایت نتیجه‌ها به‌صورت نقشه منحنی‌های میزان رسم شد. مطابق این شکل تمرکز فراوانی خطوط شکستگی به‌صورت نوارهایی در راستاهای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است و در بخش جنوب‌غربی این بخش نیز زیاد است.

در شکل ۱۵ نقشه دوبعدی مبتنی بر شبکه شکستگی‌های موجود در بخش شرقی کانسار مس سبزشنگ در سطح گستره‌ای به ابعاد ۱۱۵×۱۰۰ متر نشان داده شده است. در این شکل خطواره‌های موجود در این بخش نیز به‌صورت خطوط مشکی‌رنگ نشان داده شده‌اند. برای تهیه نقشه دوبعدی مبتنی بر شبکه شکستگی‌ها، مختصات طول و عرض جغرافیایی نقاط ابتدا و انتهای هر شکستگی مورد استفاده قرار گرفتند. برای رسم نقشه این بخش، در گام نخست سطح گستره دارای شکستگی‌ها شبکه‌بندی شد. در مرحله شبکه‌بندی، ابتدا اندازه و ابعاد سلول‌های شبکه با توجه به ابعاد بخش مورد مطالعه، میزان کمینه و بیشینه طول شکستگی‌های موجود در این بخش و نیز حفظ یکنواختی

1. Grid-based map



شکل ۱۴. نقشه‌های هم‌عیار و شکستگی‌های موجود در یک بخش معین و محدود در شرق کانسار مس سبزسنگ



شکل ۱۵. نقشه دوبعدی مبتنی بر شبکه شکستگی‌های موجود در بخش شرقی کانسار مس سبزسنگ

و ارتباط آنها با عیار ماده معدنی به‌طور کمی تعیین شده است. بیشتر این شکستگی‌ها دارای ماده معدنی هستند ولی میزان عیار ماده معدنی در این شکستگی‌ها متفاوت است. در واقع این شکستگی‌ها دو دسته می‌باشند. تعدادی از این شکستگی‌ها از کانی‌های کربناته مس همانند مالاکیت و اکسیدهای آهن ثانویه پر شده‌اند، منشا سطحی دارند و در نتیجه عوامل جوی ایجاد می‌شوند، بنابراین نمی‌توانند در ارتباط با کانه‌زایی درون‌زاد باشند. دسته دیگر شکستگی‌های تکتونیکی هستند و در امتداد آن‌ها کانه‌زایی درون‌زاد صورت می‌گیرد. میزان ضریب همبستگی بین تعداد شکستگی‌ها و عیار ماده معدنی در گستره، نشان‌دهنده آن است شاید در این بخش شکستگی‌هایی وجود دارند و هیچ‌گونه کانه‌زایی پرعیاری درون آن‌ها رخ نداده است، یا اینکه ممکن است بعضی از شکستگی‌ها حتی موجب جابجایی ماده معدنی از محل اصلی خود شده باشند. احتمال قوی‌تر آن است که در واقع بخش عمده شکستگی‌های موجود در گستره سبزسنگ از نوع اول هستند. یعنی همبستگی کیفی به‌نسبت مطلوبی بین شکستگی‌ها و وضعیت سطحی ماده معدنی وجود دارد، ولی همبستگی کمی میان شکستگی‌ها و عیار ماده معدنی در کل گستره به‌ویژه در اعماق یافت نمی‌شود. در پایان نیز ذکر این نکته ضروری است که درون‌یابی داده‌ها در یک گستره و به‌ویژه فضا‌های بدون شکستگی، موجب کاهش میزان ضریب همبستگی بین شکستگی‌ها و عیار ماده معدنی می‌شود.

برای تعیین میزان همبستگی کمی بین شکستگی‌های موجود در کانسار و کانه‌زایی در پهنه، ابتدا داده‌های میزان ضریب همبستگی بین تعداد شکستگی‌ها و عیار ماده معدنی برابر با ۰/۰۲- به دست آمد که بر اساس واژه‌های توصیفی مربوط به میزان ضرایب همبستگی در جدول ۲، معادل همبستگی "بسیار کم" می‌باشد. افزودنی است که داده‌های عیارسنجی مس (برحسب ppm) و تعداد شکستگی‌های درون یک گستره مشخص، هم‌اندازه و یکسان، بعد از شبکه‌بندی معین و برابر، با استفاده از الگوریتم عکس مجذور فاصله درون‌یابی شدند. سپس با تولید تعداد زیادی داده درون‌یابی شده به‌کمک داده‌های اولیه، میزان ضریب همبستگی داده‌ها از نوع خطی پیرسون^۱ (Schober et al., 2018) تعیین شد.

در واقع این مقدار همبستگی ناچیز بین تعداد شکستگی‌ها و عیار ماده معدنی هم‌وارونه است، یعنی نه‌تنها هیچ ارتباط مستقیمی بین تعداد شکستگی‌ها با عیار ماده معدنی وجود ندارد، بلکه تمرکز فراوانی خطوط شکستگی با میزان عیار ماده معدنی رابطه وارون دارد. به‌عبارت‌دیگر با افزایش فراوانی خطوط شکستگی، میزان عیار ماده معدنی کاهش می‌یابد. از آنجایی که کانسار مس سبزسنگ از نوع کانسارهای رگه‌ای اپی‌ترمال است، در این نوع کانسارها انتظار می‌رود ارتباط مستقیم قوی بین شکستگی‌ها با کانه‌زایی وجود داشته باشد. البته بیان این نکته نیز لازم است که در پژوهش حاضر تمام شکستگی‌های موجود در گستره حاصل از روش مغناطیس‌سنجی، مد نظر قرار گرفته

جدول ۲. واژه توصیفی مربوط به میزان ضریب همبستگی بین دو متغیر (محلوجی، ۱۳۷۶؛ احمدی، ۱۳۷۹)

میزان همبستگی	۰-۰/۲	۰/۲۱-۰/۴	۰/۴۱-۰/۷	۰/۷۱-۰/۹	۰/۹۱-۱
واژه توصیفی	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد

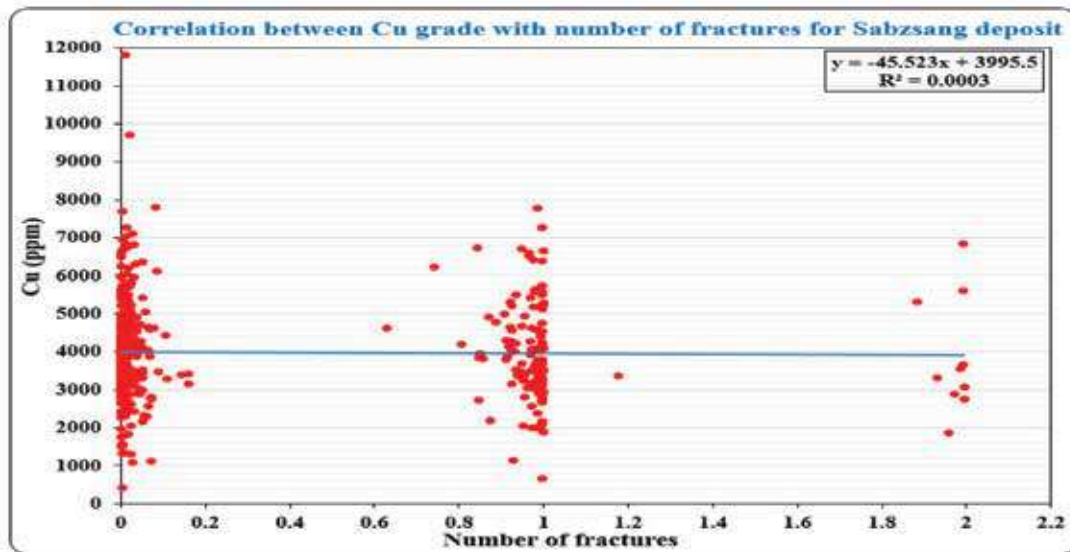
میزان ضریب همبستگی، مقدار ضریب تعیین^۲ که متداول‌تر است، آورده شده است. معیار ضریب تعیین نشان‌دهنده میزان انطباق مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده (محاسباتی) است که بهترین حالت آن به‌ازای مقدار برابر با یک است و اگر صفر باشد، یعنی میزان همبستگی داده‌های

در شکل ۱۶ نیز نمودار پراکندگی داده‌های عیارسنجی مس در مقابل تعداد شکستگی‌های موجود برای بخش شرقی کانسار سبزسنگ (با شبکه‌بندی یکسان) نشان داده شده است. در این نمودار شکل هندسی و معادله خط راست مبین میزان همبستگی خطی بین داده‌ها نیز نمایش داده شده است. البته در گوشه بالا سمت راست این نمودار بجای

1. Pearson correlation coefficient
2. Determination coefficient

بین داده‌های عیارسنجی مس و شکستگی‌ها در کانسار مس سیزسنگ وجود ندارد و این بدان معنی است که اگرچه در بیشتر بخش‌های دارای شکستگی، ماده معدنی وجود دارد، ولی در این بخش‌ها عیار ماده معدنی زیاد نیست.

اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، بسیار ضعیف است. با توجه به مقدار ضریب تعیین در نمودار شکل ۱۶ و اطلاعات جدول ۲ مشاهده می‌شود، میزان همبستگی بین داده‌های تعداد شکستگی‌ها و عیارسنجی مس "بسیار ضعیف" است. به عبارت دیگر به‌طور کمی همبستگی منطقی و معنی‌داری



شکل ۱۶. نمودار پراکندگی داده‌های عیار مس در مقابل تعداد شکستگی‌ها برای بخش شرقی کانسار مس سیزسنگ

نتیجه‌گیری

ماده معدنی در سطح گستره مورد مطالعه نسبت به اعماق بیشتر است و تمرکز ماده معدنی بیشتر سطحی است. نتیجه‌های پژوهش نیز نشان می‌دهند بر اساس مقایسه کیفی، به‌طور کلی تطابق نسبی خوبی بین کانه‌زایی سطحی و شکستگی‌های موجود در پهنه وجود دارد. همچنین وجود ارتباط معنی‌دار بین شکستگی‌ها و کانه‌زایی مس در پهنه برای گمانه‌های اکتشافی حفاری شده، اثبات نشد. به‌گونه‌ای که بر پایه محاسبات ضریب همبستگی خطی پیرسون، میزان همبستگی بین داده‌های تعداد شکستگی با عیارسنجی مس "بسیار ضعیف" است. البته ارتباط بین شکستگی‌ها و کانه‌زایی مس در پهنه، به ژنز یا نحوه بوجود آمدن کانسار هم بستگی دارد و برای بررسی دقیق‌تر این موضوع به‌ویژه در اعماق و تصمیم‌گیری در مورد چگونگی انجام عملیات اکتشاف تفصیلی پهنه، باید در وهله اول مطالعات زمین‌شناسی جامعی صورت گرفته و ژنز کانسار به‌طور دقیق

در کانسار مس سیزسنگ فعالیت‌های اکتشافی غیرمستقیم و مستقیم سطحی در کل گستره و نیز فعالیت‌های اکتشافی عمیق در یک بخش محدود به‌صورت مربعی شکل به ابعاد ۱۱۵×۱۰۰ متر در شرق کانسار انجام شده است. برای طراحی شبکه اکتشاف تفصیلی گمانه‌های اکتشافی عمیق در کل سطح گستره، اطلاع از میزان ارتباط شکستگی‌ها با کانه‌زایی مس، ضروری است. در پژوهش حاضر میزان همبستگی کیفی میان خطواره‌های شناسایی شده توسط روش مغناطیس‌سنجی با کانه‌زایی سطحی مس برای کل گستره سیزسنگ و نیز میزان همبستگی کیفی و کمی در یک گستره مربعی شکل در بخش شرقی کانسار شامل انواع کارهای اکتشافی سطحی و عمیق، مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه‌های فعالیت‌های اکتشافی انجام‌شده تا امروز در گستره سیزسنگ نشان‌دهنده آن است که میزان عیار

مغناطیس آنومالی ۳۲ سنگ‌آهن ساغند با استفاده از روش‌های پردازش تصویری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. ۱۳۶.

- انصاری، ع.، فاتحی، م. و علمدار، ک.، ۱۳۹۱. برآورد مرز بی‌هنجاری‌های مغناطیسی رباط پشت‌بادام به کمک مشتقات میدان پتانسیل و ترکیبات مکانی و فازی بین آن‌ها. مجله ژئوفیزیک ایران، ۶ (۳)، ۳۱-۴۵.

- شاهرودی، م.، نمکی، ل.، منتهایی، م.، مصباحی، ف. و بساوند، م.، ۱۳۹۶. تفسیر داده‌های مغناطیسی بر اساس محاسبه زاویه تیلت و بهبود گردان افقی، مطالعه موردی: فروافتادگی زنجان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۳ (۱)، ۱۰۱-۱۱۳.

- شرکت جهان‌صنعت آتی معدن، ۱۴۰۰. گزارش اکتشاف ژئوفیزیک به روش مگنتومتری در گستره سبزسنگ ساوه، ۷۶.

- شرکت جهان‌صنعت آتی معدن، ۱۴۰۰. گزارش اکتشافات انجام شده در گستره سبزسنگ. ۷۷.

- شرکت جهان‌صنعت آتی معدن، ۱۴۰۱. گزارش اکتشاف ژئوفیزیک به روش IP/RS در گستره سبزسنگ ساوه. ۸۵.

- عطائی‌پور، م.، ۱۳۹۸. مبانی مدلسازی دوبعدی ذخائر معدنی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۳۲۶.

- قلمقاش، ج.، ۱۳۷۷. گزارش زمین‌شناسی ورقه یکصد هزارم ساوه. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- محلوجی، ه.، ۱۳۷۶. شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته-پیشامد. مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف. ۷۰۷.

- Adi Gunawan, M., Roni Cahya, S. and Heri, S., 2019. Fracture analysis of uranium-bearing rock in Eko-Remaja exploration tunnel at depth 50-200 meters, Kalan, west Kalimantan. Journal of Physics: Conference Series 1363 012013 DOI 10.1088/1742-6596/1363/1/012013, 1-6.

- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. Computers and Geoscience, 32, 1585-1591.

تعیین شود و در وهله دوم باید وضعیت شکستگی‌ها در اعماق به‌طور دقیق مورد مطالعه قرار گیرد. برای دستیابی به این هدف، حفر گمانه‌های اکتشافی بیشتری نیاز است و البته از آنجایی که مشخصات و به‌ویژه عمق شکستگی‌های قابل مشاهده در سطح، به‌طور دقیق مشخص نیست، حفر گمانه‌های اکتشافی جدید تنها در محل شکستگی‌های قابل مشاهده در سطح، موفقیت‌آمیز نخواهد بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود، موقعیت بهینه حفر گمانه‌های اکتشافی جدید، بر اساس اطلاعات و نتیجه‌های اکتشافات ژئوفیزیکی انجام شده در پهنه (با روش‌های IP و RS) صورت گیرد. در گام بعد ارتباط شکستگی‌ها با کانه‌زایی مس در اعماق با استفاده از نتیجه‌های گمانه‌های اکتشافی قدیم و جدید انجام شود. سپس گمانه‌های اکتشافی مرحله اکتشاف تفصیلی، در موقعیت شکستگی‌های تایید شده حفر شوند.

منابع

- احمدی، ر.، ۱۳۷۹. ارزیابی کانسار تپه‌سرخ با استفاده از تلفیق داده‌های اکتشافی به روش همبستگی زمین‌آماری داده‌ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۳۳.

- احمدی، ر. و احسان‌نژاد، ج.، ۱۴۰۰. پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های حجیم ژئوفیزیکی برداشت شده در کانسار مس علی‌آباد یزد به منظور تعیین ارتباط آن‌ها با کانی‌زایی. دومین کنفرانس ملی داده‌کاوی در علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.

- احمدی، ر. و رضاپور، م.، ۱۳۹۸. پیشنهاد موقعیت بهینه حفاری در کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی ساوه بر اساس مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد دوازدهم، ۳ و ۴، ۹۵-۱۲۱.

- احمدی، ر. و شریعتی زارچ، س.م.، ۱۳۹۹. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ اهداف مغناطیسی در روش مغناطیس‌سنجی با استفاده از مدل‌سازی پیشروی دوبعدی و سه‌بعدی. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۱۳، ۳، ۱۵-۳۴.

- امامی، ع.، ۱۳۹۲. تفسیر داده‌های گرانی و

- Doo, W.B., HSU, S.K., Tsai, C.H. and Huang, Y.S., 2009. Using analytic signal to determine magnetization/density ratios of geological structures. *Geophysical Journal International*, 179 (1), 112-124.
- Erickson, Jr.A.J., 1992. Geological interpretation, modeling and representation. In: H. Hartman (Editor), *SME Mining Engineering Handbook*. SME-AIME, New York, 333-343.
- Gohari Anaraki, M., Tadayon, M., Nardimi, A. and Katal, R., 2022. Post-Eocene structural evolution of the Qole-Kaftaran and investigate the linkage between structures and Pb-Zn and Cu mineralization, North Toroud fault. *Tectonics Journal*, 5(20): 77-95, DOI: 10.22077/JT.2022.5323.1140.
- Gonzalez, R. and Woods, R., 2017, *Digital Image Processing*. 4th Edition, Pearson, 1022.
- HSU, S.K., Sibuet, J.C., Shyu, C.T., 1996. High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique. *Geophysics* 61(2), 373-386.
- Lu, Y., Li, X., Liu, Y. and Leng, J., 2021. The Establishment of ore-controlling fracture system of Baoginshan gold mine based on fracture-tectonic analysis. *Mobile Information Systems*, <https://doi.org/10.1155/2021/5887680>, 1-9.
- Ma, G. and Li, L., 2013. Direct analytic signal (DAS) method in the interpretation of magnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 88, 101-104.
- Miller, H.G. and Singh, V., 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32 (2-3), 213-217.
- Saada, A., 2016. Edge detection and depth estimation of Galala El Bahariya Plateau, Eastern Desert-Egypt, from aeromagnetic data. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2(1), 25-41.
- Schober, P., Boer, C. and Schwarte, L., 2018. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation *Anesthesia and Analgesia*, 126 (5), 1763-1768.
- Stewart, I.C.F. and Miller, D.T., 2018. Directional tilt derivatives to enhance structural trends in aeromagnetic grids. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 553-563.
- Tagwai, M.G., Jimoh, O.A., Ariffin, K.S. and Abdul Razak, M.F., 2021. Investigation based on quantified spatial relationships between gold deposits and ore genesis factors in northeast Malaysia. *Journal of Spatial Science*, 66 (2): 229-252.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005. Theta map: Edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70(4), 39-43.
- www.rockware.com/Rockworks2022