

تجزیه و تحلیل اکتشافی و تعیین ارتباط کانه‌زایی با گسل‌ها به‌عنوان کلید اکتشافی جدید در کانسار مس بشنه سیرجان

رضا احمدی^(۱) و سید جواد حسینی شهرکی^۲

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰

چکیده

کانسار مس بشنه با مساحت ۰/۵ کیلومتر مربع در استان کرمان و در فاصله ۸۰ کیلومتری غرب شهر سیرجان قرار دارد. در این کانسار فلزی با ارزش، فعالیت‌های اکتشافی متنوعی همانند عملیات دورسنجی، پیمایش‌های صحرائی، اکتشافات ژئوفیزیکی، اکتشافات ژئوشیمیایی سطحی شامل نمونه‌برداری سطحی و تجزیه شیمیایی ۹۴ نمونه، حفر و برداشت سه رشته ترانشه همراه با برداشت و تجزیه شیمیایی تعداد شش نمونه و نیز حفر هشت حلقه گمانه اکتشافی عمیق با مجموع طول کلی ۴۱۴/۵ متر صورت گرفته است. همچنین براساس عملیات دورسنجی و زمین‌شناسی ساختاری پهنه، تمام گسل‌های موجود در این پهنه به نقشه درآمده‌اند. در پژوهش حاضر تمام فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در کانسار مس بشنه، تجزیه و تحلیل شده و ارتباط آنها با گسل‌های موجود در پهنه، مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به هدف، تکنیک‌های مختلف همانند رسم نمودار گل سرخ گسل‌ها، پردازش داده‌های مقاومت ویژه و باریزبری برداشت مستطیلی و مدل‌سازی وارون هموار داده‌های پنج پروفیل دوقطبی-دوقطبی، رسم نقشه‌های هم‌عیار نمونه‌برداری‌های سطحی و ترانشه‌ها و تهیه مدل سه بعدی عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی پهنه بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که محل‌های کانه‌زایی در ارتباط مستقیم با شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در پهنه هستند و روند بیشتر رگه‌های کانه‌دار در راستای گسل‌های اصلی است. در پایان، به‌منظور تکمیل اکتشافات مراحل قبلی و شناخت بهتر کانسار، براساس تمام مطالعات انجام شده و تلفیق نتایج حاصل به‌عنوان یک راهنما و کلید اکتشافی، حفاری چند حلقه گمانه اکتشافی جدید پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: بشنه سیرجان، کانه‌زایی، گسل، مدل‌سازی.

مقدمه

(کریم‌پور و سعادت، ۱۳۹۶). بعضی از کانسارهای با ارزش مس از نوع رگه و رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی هستند و اغلب دارای گسترش کم و عیار نسبتاً بالایی می‌باشند. اکتشاف مستقیم این کانسارها به‌ویژه در شرایطی که ماده معدنی ناپیوسته، قطعه‌قطعه، بریده‌بریده و در اعماق زیاد واقع باشد، از طریق حفر گمانه‌های اکتشافی، عملیاتی

کانسارهای مس از جمله با ارزش‌ترین کانسارهای فلزی هستند و دارای پیچیدگی‌های زایشی و ساختاری زیادی نیز می‌باشند. به‌طور کلی کانسارهای مس به انواع اسکارن‌های مس‌دار، مس ماسیوسولفیدی، مس رسوبی استراتی‌باند، مس رگه‌ای و مس پورفیری دسته‌بندی می‌شوند

* نویسنده مرتبط: Rezahmadi@gmail.com

داده‌ها و تفسیر نتایج می‌باشد. این کار به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود، زمان‌بر بودن و مشکل بودن محاسبات مربوطه، همواره با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، دقیق‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود. به‌عنوان نمونه احمدی و رضاپور (۱۳۹۸) مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، قطبش القایی و مقاومت ویژه را برای کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی ساوه انجام دادند. آنها در گام نخست بر روی داده‌های مغناطیسی، پردازش‌های مورد نیاز را به‌منظور برجسته‌سازی بی‌هنجاری‌های عمقی، با استفاده از نرم‌افزار Oasis montaj اعمال کردند. سپس مدل‌سازی وارون داده‌های هفت پروفیل ژئوالکتریکی را با استفاده از نرم‌افزار Res2dinv انجام دادند و براساس تفسیر کیفی مقاطع ژئوفیزیکی باریذیری، مقاومت ویژه و فاکتور فلزی پروفیل‌ها، موقعیت بهینه حفاری را بر روی هر پروفیل پیشنهاد کردند. همچنین احمدی و شریعتی (۱۳۹۹) مدل‌سازی مصنوعی دوبعدی و سه‌بعدی اهداف هندسی گوناگون معرف ساختارهای زمین‌شناسی متداول را با استفاده از نرم‌افزار Encom Model Vision انجام دادند. آنها تأثیر عوامل مختلف همانند جنس، اندازه و ابعاد، عمق دفن و شکل هندسی توده و نیز فواصل برداشت پروفیلی را بر روی پاسخ توده‌های مغناطیسی به شکل کروی، بیضوی و خطی که معرف تمام انواع اشکال و ساختارهای زمین‌شناسی و معدنی هستند، مورد بررسی قرار دادند. مدل‌سازی داده‌های عیارسنجی عملیات حفاری‌های عمیق با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی نیز از جمله فعالیت‌های مرحله اکتشاف می‌باشد. به‌عنوان مثال احمدی و افضلی (۱۳۹۶) برای به‌تصویر کشیدن مطلوب ماده معدنی سرب و روی در کانسار اهر گنجه رباط خمین، از قابلیت‌های گرافیکی نرم‌افزار Rockworks استفاده کردند. آنها برای این منظور از تمام اطلاعات اکتشافی موجود شامل اکتشافات غیرمستقیم (برداشت‌های ژئوفیزیکی) و مستقیم (گمانه‌های عمیق) بهره بردند.

در پژوهش حاضر تمام فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در کانسار مس بشنه سیرجان، تجزیه و تحلیل شده و ارتباط آنها با گسل‌های موجود در پهنه، بررسی شده است. در سایه

پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. به همین دلیل تعیین موقعیت بهینه نقاط حفاری اکتشافی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در چنین کانسارهایی همواره یافتن درزه و شکاف‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌های دارای کانه‌زایی و یا به نحوی مرتبط با کانه‌زایی، بسیار مهم است. به‌منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه، همواره براساس نتایج حاصل از مراحل پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی شامل فعالیت‌های دورسنجی، مطالعات زمین‌شناسی صحرائی، اکتشافات سطحی و عملیات اکتشاف غیرمستقیم ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی، در مرحله اکتشاف نیمه‌تفصیلی گمانه‌های اکتشافی بر روی بی‌هنجاری‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین نقاط حفاری پیشنهاد و پیاده‌سازی می‌شوند.

شناخت کامل یک کانسار، مستلزم انجام یک سری فعالیت‌های اکتشافی، عملیات پردازش، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها و اطلاعات اکتشافی است. در تمام مراحل عملیات اکتشاف از مرحله پی‌جویی و شناسایی مقدماتی تا اکتشافات تفصیلی، مدل‌سازی داده‌ها و تجزیه و تحلیل آنها صورت می‌گیرد. اگرچه ماهیت داده‌های اکتشافی با یکدیگر متفاوت است، اما تمامی آنها در فرآیند اکتشاف از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در مرحله اکتشاف کانسارها تمام پارامترهای کیفی همانند ساختارهای زمین‌شناسی موجود در پهنه، سنگ‌شناسی و کانه‌زایی و پارامترهای کمی مانند داده‌های برداشت ژئوفیزیکی و داده‌های عیارسنجی نمونه‌ها مورد توجه هستند. بدیهی است که هرچه مجموعه داده‌های به‌دست‌آمده و اطلاعات اکتشافی، بیشتر، دقیق‌تر و کامل‌تر باشند، دقت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل فرآیند، کامل‌تر شده و نتایج به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود (احمدی و افضلی، ۱۳۹۶ الف؛ Shahrabi et al., 2017). در بسیاری از روش‌های اکتشاف از جمله اکتشافات ژئوفیزیکی، مدل‌سازی داده‌ها اجتناب‌ناپذیر است (Aliluo et al., 2018).

روش‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه^۱ و قطبش القایی^۲ مفیدترین روش‌ها برای اکتشاف بخش‌های پنهان کانه‌زایی کانسارهای مس هستند (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴؛ کلاگری، ۱۳۸۹؛ Keary, 2002؛ Milsom, 2003؛ Reynolds, 2011). مرحله بعد از مدل‌سازی، تجزیه و تحلیل

1. Magnetic survey

2. Resistivity (Rs)

3. Induced Polarization (IP)

هیدروکسیدهای آهن و منگنز به رنگ‌های قرمز، زرد تا قهوه‌ای و رگه‌های سیلیسی همراه با کانه‌زایی مس می‌باشد (شکل ۲). رگه‌های متعدد سیلیسی واحدهای سنگی را در گستره کانسار قطع کرده و نفوذ رگه‌های سیلیسی به درون شیست‌ها باعث سیلیسی شدن آنها در محل‌های کانه‌زایی شده است.

کانه‌زایی مس بیشتر در متاولکانیک‌ها و به صورت چینه سان و چینه کران رخ داده است (حسینی شهرکی، ۱۴۰۰). درون واحدهای دگرگونی فیلیتی پیریت به صورت پراکنده قابل مشاهده است. هاله‌هایی از دگرسانی سریسیتی نیز رگه‌های کانه‌زایی را در برمی‌گیرد.

بیشترین تمرکز رگه‌های معدنی در قسمت جنوب غربی ناحیه اکتشافی بشنه دیده می‌شود. بزرگترین رخنمون آنها دارای عرض حدود یک تا دو متر و طولی حدود ۳۰ متر است. به نظر می‌رسد رگه‌های معدنی در ناحیه اکتشافی دارای امتداد شمال شرق-جنوب غرب هستند. کانه‌زایی مس در رگه‌های معدنی قابل مشاهده، بیشتر از نوع مالاکیت و به مقدار کمتر آزوریت است، ولی آثاری از کالکوپیریت و بورنیت نیز همراه آنها مشاهده می‌شود. سنگ میزبان رگه‌های معدنی واحدهای آرکوز (شیست کوارتزی، کلریت شیست، ماسه‌سنگ و سیلتستون) می‌باشند. آثار شاخه درختی و دندریتی از اکسیدهای آهن و منگنز نیز در سنگ میزبان دیده می‌شود. هاله دگرسانی در اطراف بعضی از رگه‌های معدنی قابل مشاهده است. با توجه به حضور کالکوپیریت، بورنیت و پیریت در بعضی از نمونه‌ها که با چشم هم قابل مشاهده است، برداشت می‌شود که کانه‌زایی ابتدا به صورت اولیه رخ داده و شاید در عمق، حجم کانی‌زایی اولیه که به صورت سولفیدی است، افزایش یابد. کانی‌های سولفیدی قابل تشخیص اولیه بیشتر کالکوپیریت و به مقدار جزئی پیریت است و به احتمال زیاد کانی‌های متعدد دیگر نیز باید تشکیل شده باشند اما در بخش‌های سطحی بر اثر اکسیداسیون از بین رفته‌اند. در شکل ۳ تصاویر مقاطع صیقلی یک نمونه سنگی از پهنه، در زیر میکروسکوپ پلاریزان نور بازتابی نشان داده شده است. براساس مطالعات کانه‌نگاری در این مقطع صیقلی کانی‌های پیریت، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت مشاهده می‌شوند.

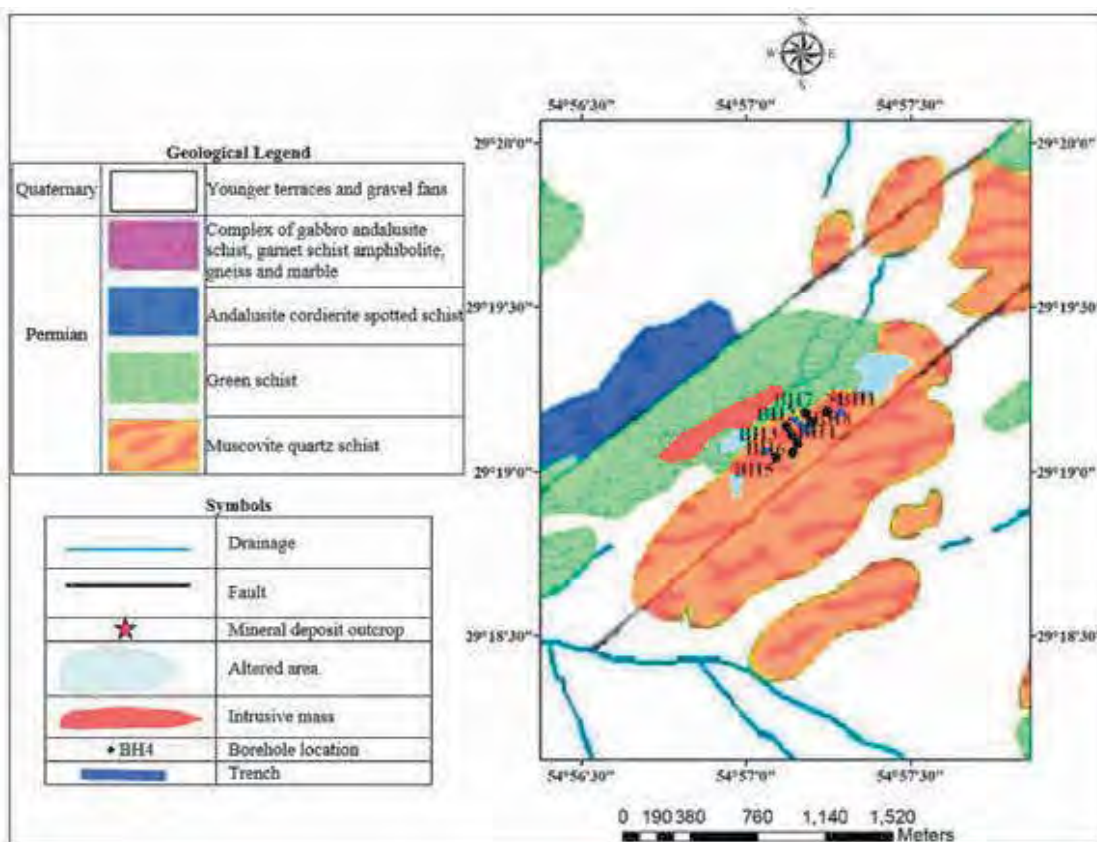
به کارگیری این روش‌ها و تلفیق نتایج آنها با یکدیگر به عنوان یک راهنما و کلید اکتشافی برای شناخت بیشتر این کانسار در راستای سطحی و عمقی، فعالیت‌های اکتشافی جدیدی پیشنهاد شده است.

ناحیه مورد مطالعه: موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

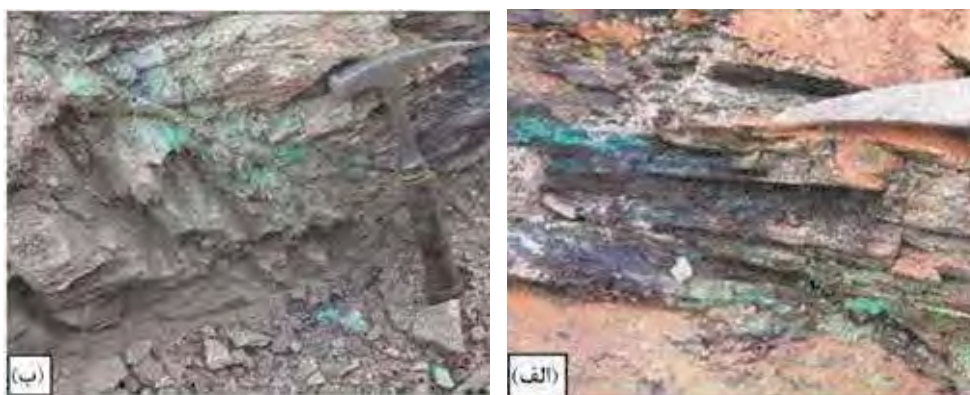
کانسار مس بشنه در جنوب شرق ایران در استان کرمان، در فاصله ۸۰ کیلومتری غرب شهر سیرجان و پنج کیلومتری شمال شرق روستای بشنه قرار دارد. این ناحیه بخشی از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ سیرجان است. برای دسترسی به ناحیه مورد نظر باید از طریق جاده سیرجان-خیرآباد مسافت ۴۰ کیلومتری به سمت غرب شهر سیرجان را طی کرد. سپس حدود ۴۲ کیلومتر جاده خاکی به سمت غرب حرکت کرد. مهم‌ترین واحدهای سنگی تشکیل دهنده این ناحیه، آرکوز، شیست‌های کوارتزی، کلریت شیست، مرمر و اسلیت هستند. قدیمی‌ترین آثار ماگماتیسیم در شمال ناحیه و متعلق به گدازه‌های مافیک و اولترامافیک داخل واحدهای پرکامبرین-کامبرین و سیلورین-دونین است. علاوه بر واحدهای سنگی یادشده، سنگ‌های گرانیت، ریولیت و گرانیت-گنایس در سطح ناحیه رخنمون داشته و با فاصله کمی از ناحیه مورد نظر، دایک‌های دیابازی و گابرو نیز قابل مشاهده است. توده نفوذی موجود در ناحیه مورد مطالعه با طول حدود ۶۰۰ متر و عرض تقریبی دو تا سه متر از جنس گابرو دیوریتی است. دگرسانی در سطح ناحیه مورد مطالعه، بیشتر از نوع آرژیلیک می‌باشد و در بخش‌های جنوبی و غربی ناحیه مورد مطالعه (با وسعتی حدود ۵۰۰ مترمربع) رخنمون دارد (حسینی شهرکی، ۱۴۰۰). شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی پهنه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

توده‌های نفوذی بیان‌شده از نظر شرایط دمایی مناسب و عملکرد، به‌عنوان موتور حرارتی برای کانه‌زایی دارای اهمیت است و در رخداد کانه‌زایی عامل مثبت به شمار می‌آیند. برداشت‌های زمین‌شناسی، وجود آثار کانه‌زایی سطحی مس (مالاکیت، آزوریت و کریزوکولا) همگی در روند شیستوزیته را اثبات کرده است. نکته قابل توجه در مشاهدات صحرایی، حضور

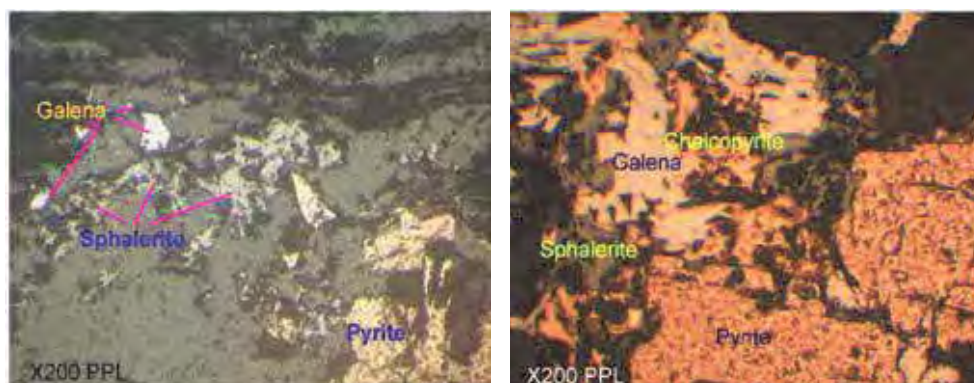
تجزیه و تحلیل اکتشافی و تعیین ارتباط کانه‌زایی با گسل‌ها به‌عنوان ...



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی پهنه مورد مطالعه



شکل ۲. کانی‌زایی مس در پهنه مورد مطالعه. الف) به‌صورت اکسیدی (مالاکیت) هم‌روند با شیس‌توزیته، ب) در امتداد گسل همراه با هیدروکسیدهای آهن و منگنز



شکل ۳. تصویر کانی‌های کالکوپیریت، اسفالریت، گالن و پیریت در مقاطع صیقلی پهنه مورد مطالعه

شرقی-غربی که گسل‌های با روند شمال شرقی-جنوب غربی توسط گسل‌هایی با روند شمال غربی-جنوب شرقی قطع شده‌اند. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بزرگ‌ترین (طولانی‌ترین) گسل‌های موجود در پهنه در راستای امتدادی N40E تا N50E (آزیموت ۴۰ تا ۵۰ درجه) قرار دارند و مجموع طول گسل‌های موجود در این بازه ۱۰ درجه‌ای، حدود ۲۰۰۳ متر است.

تحلیل فعالیت‌های اکتشافی انجام شده

در کانسار مس بشنه فعالیت‌های اکتشافی متنوعی انجام شده و مهم‌ترین آنها به صورت زیر است:

شناسایی و پی‌جویی

عملیات پی‌جویی در ناحیه مورد مطالعه شامل مطالعات دورسنجی، پیمایش‌های صحرایی، بررسی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی و کانه‌زایی موجود در آنها است. در گام نخست با احتمال وجود ارتباط بین شکستگی‌ها و پتانسیل‌های معدنی در پهنه، عملیات دورسنجی برای شناسایی شکستگی‌های اصلی نزدیک سطح زمین (به‌عنوان یک نوع خطواره) انجام شد. این کار پس از انجام پیش‌پردازش‌های رادیومتری، تصحیحات هندسی و اعمال تعدادی از فیلترهای جهت‌دار بر روی تصاویر ETM ماهواره لندست ۷ به کمک نرم‌افزارهای ERMapper و PCI Geomatica صورت گرفت. تهیه نقشه گسل‌های پهنه (شکل ۴-الف) به کمک نقشه‌های ساختاری موجود، یکی از خروجی‌های مرحله عملیات دورسنجی است. تهیه نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی گام بعدی عملیات بود.

اکتشافات ژئوفیزیکی

مطالعات ژئوفیزیکی در این ناحیه ابتدا توسط آرایه مستطیلی با طول خط جریان $AB=800m$ با روش‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی انجام شد. سپس با هدف شناسایی وضعیت بی‌هنجاری‌ها در عمق و براساس نتایج حاصل، در مرحله بعد تعداد پنج پروفیل ژئوفیزیکی به نام‌های DD1 تا DD5 با آرایه دوقطبی-دوقطبی به روش‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی در جهت تقریبی عمود بر روند کانه‌زایی برداشت شده است

کانه‌زایی در رگه‌ها و شکستگی‌ها بر اثر حرکت محلول‌های کانه‌دار تشکیل می‌شوند و با توجه به اینکه کانه‌زایی اولیه از نوع سولفیدی است، باید محلول‌های گرم در تشکیل آنها دخالت داشته باشند (Evans, 2000). با در نظر گرفتن پهنه زمین‌ساختی و فلززایی دربرگیرنده ناحیه بشنه، تیپ کانه‌زایی احتمالی این پهنه از نوع ماسیوسولفید است (حسینی شهرکی، ۱۴۰۰). البته برای تعیین مدل دقیق کانه‌زایی ناحیه، مقایسه پارامترهای مرتبط با کانه‌زایی به‌ویژه مشخصات ژئوشیمیایی کانه‌زایی با کانسارهای ماسیوسولفید، ضروری است.

روش مطالعه

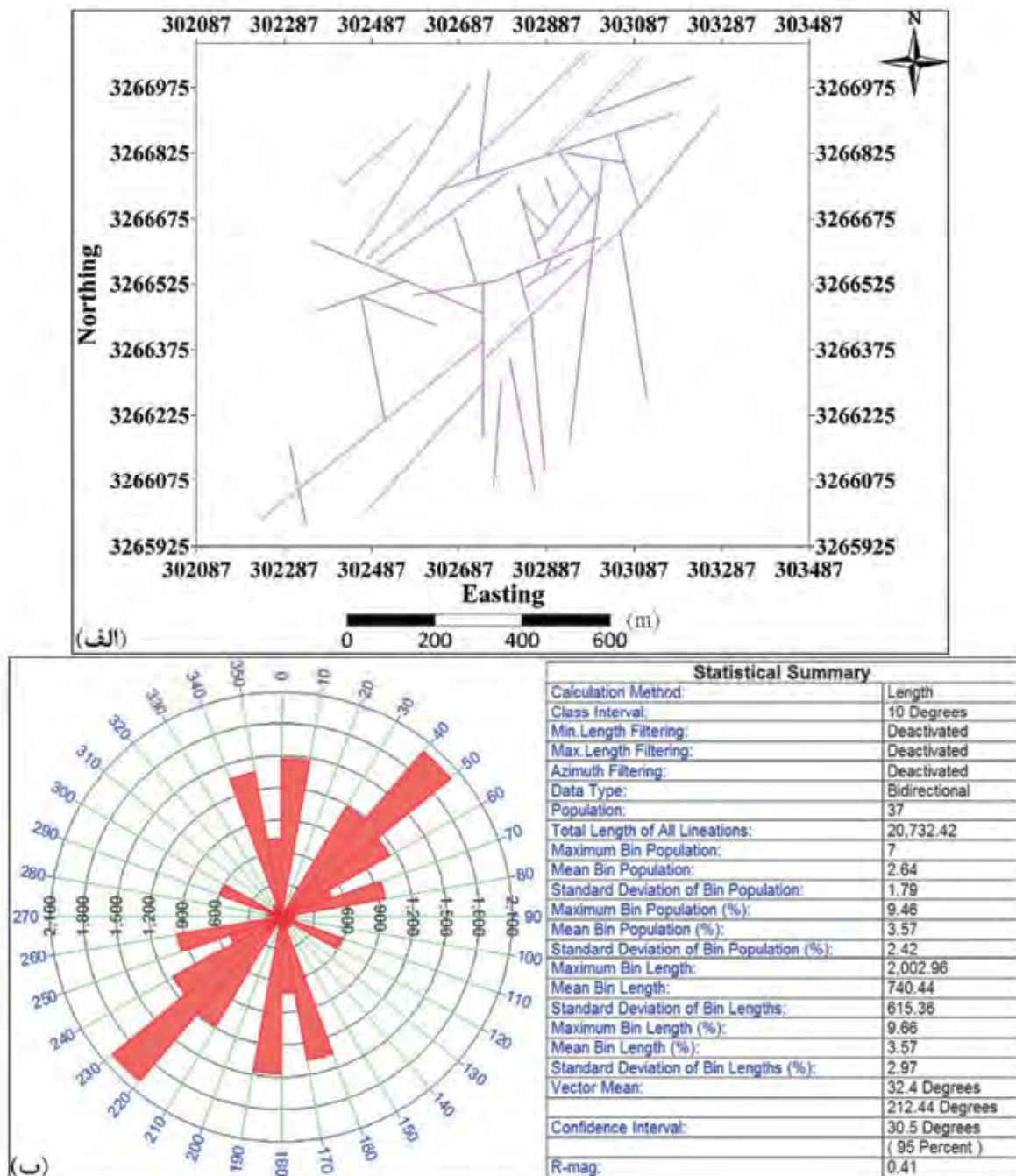
در این پژوهش تمامی فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در کانسار مس بشنه با دقت، بررسی و تجزیه و تحلیل شد. سپس ارتباط آنها با گسل‌های موجود در پهنه به‌عنوان یک کلید اکتشافی جدید ارزیابی شد.

بررسی وضعیت گسل‌های پهنه

از آنجایی که ناحیه بشنه بخشی از پهنه زمین‌ساختی سندج-سیرجان است و از شرایط عمومی این پهنه تبعیت می‌کند، در نتیجه از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی فعال است. مطالعات مربوط به شناسایی و تعیین شکستگی‌ها و گسل‌های پهنه مورد مطالعه از طریق بازدیدها و برداشت‌های صحرایی، بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی ساختاری و مطالعات دورسنجی پهنه (حسینی شهرکی، ۱۴۰۰) صورت گرفت. در شکل ۴-الف نقشه موقعیت پراکندگی گسل‌های برداشت شده در پهنه و در شکل ۴-ب نمودار گل سرخی رسم شده براساس طول این گسل‌ها همراه با پارامترهای آماری مربوطه نشان داده شده است.

در این پهنه چندین گسل اصلی وجود دارد که با هم تلاقی داشته و گسل‌های دیگر از این گسل‌ها تبعیت می‌کنند. زمان فعالیت این دو دسته گسل متقاطع بعد از ائوسن است (حسینی شهرکی، ۱۴۰۰) و با توجه به قطع‌شدگی واحدهای سنگی می‌تواند تا زمان حال نیز ادامه داشته باشد. مطابق شکل ۴ روند این گسل‌ها به ترتیب اولویت عبارت‌اند از شمال غربی - جنوب شرقی، شمال شرقی - جنوب غربی و

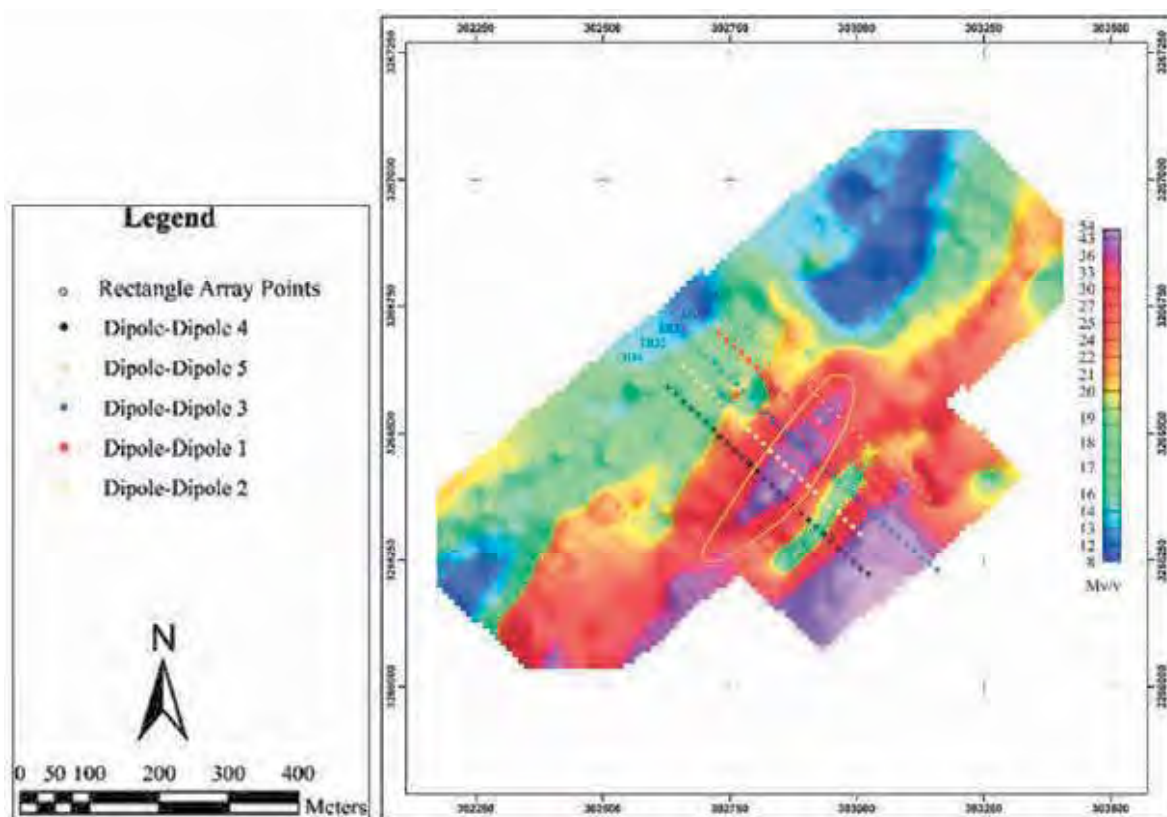
تجزیه و تحلیل اکتشافی و تعیین ارتباط کانه‌زایی با گسل‌ها به‌عنوان ...



شکل ۴. الف) نقشه موقعیت پراکندگی گسل‌های برداشت شده در کانسار مس بشنه، ب) نمودار گل سرخی گسل‌ها به همراه پارامترهای آماری مربوطه

شمال شرقی-جنوب غربی با رنگ زرد مشخص شده است. به نظر می‌رسد که این بی‌هنجاری در ارتباط با حضور کانی‌های فلزی سولفور هادی در داخل رگه و رگچه‌ها و شکستگی‌های موجود در ناحیه باشد. پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی نیز عمود بر راستای این بی‌هنجاری با فاصله ۵۰ متر از یکدیگر و به موازات هم برداشت شده‌اند. این پروفیل‌ها با

(نجاری، ۱۳۹۹). شکل ۵ نقشه تغییرات بارپذیری ظاهری برداشت مستطیلی برحسب میلی ولت بر ولت و نیز موقعیت پروفیل‌های برداشت دوقطبی-دوقطبی را در پهنه نشان می‌دهد. در این شکل یک بخش بی‌هنجاری بارپذیری شاخص با مقدار بیش از ۳۶ mV/v در بخش میانی نقشه با روند

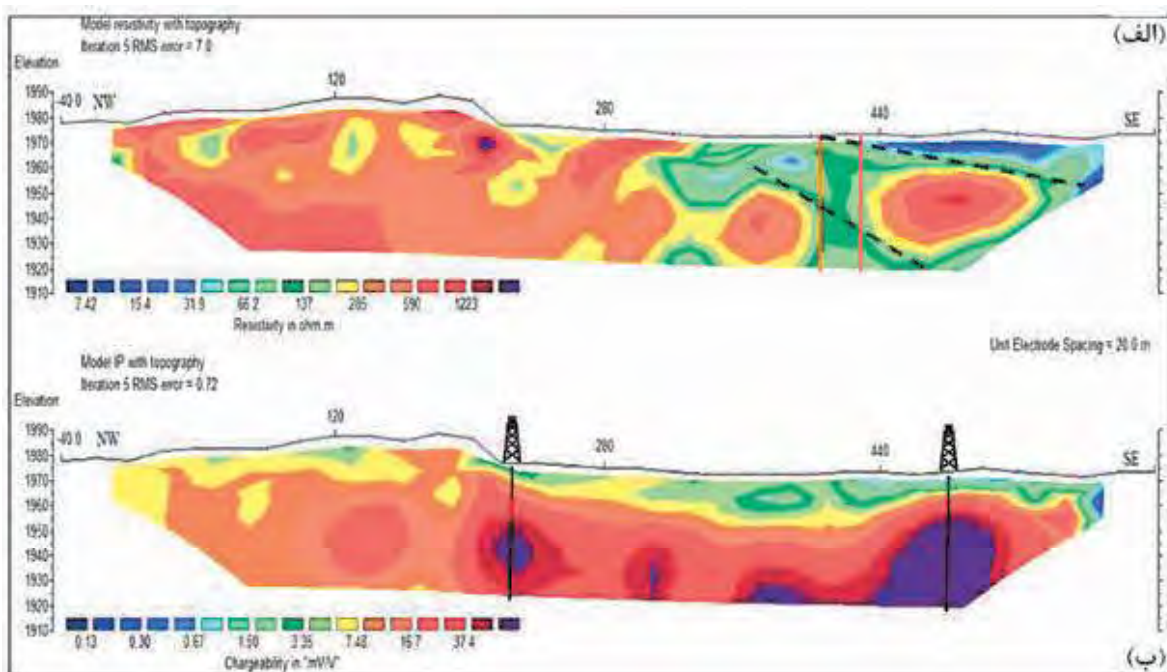


شکل ۵. نقشه هم بارپذیری ظاهری برداشت مستطیلی و موقعیت پروفیل‌های برداشت دوقطبی-دوقطبی در پهنه

وجود دارد. بنابراین می‌توان وجود دو گسستگی یا گسل احتمالی (مشخص شده با علامت خط‌چین سیاه‌رنگ بر روی شکل) را در این بخش پیش‌بینی کرد. حتی در فضای بین این دو بخش بجای یک گسل احتمالی، وجود کنتاکت قائم یا یک دایک قائم (بخش واقع بین دو خط‌چین قرمز رنگ) نیز احتمال دارد. بخش بزرگ مقطع بارپذیری به‌ویژه نواحی عمقی، دارای مقدار بارپذیری زیاد است و تمامی این بخش‌ها می‌توانند دلالت بر حضور ماده معدنی داشته باشند. حضور ماده معدنی احتمالاً سولفیدی در نیمه سمت راست این مقطع، می‌تواند در ارتباط با وجود گسستگی‌ها یا گسل‌های احتمالی موجود در این بخش باشد. از آنجایی که در نیمه سمت چپ مقطع مقاومت ویژه، مقدار مقاومت ویژه به نسبت بالا است، بالا بودن مقاومت ویژه این بخش می‌تواند ناشی از مقاومت الکتریکی زیاد سنگ میزبان کانه‌زایی باشد. در موقعیت‌های بی‌هنجاری‌های برجسته‌تر مقطع بارپذیری، حفر دو گمانه اکتشافی قائم با عمق حداقل ۵۵ متر مطابق شکل ۶-ب پیشنهاد می‌شود.

فواصل الکترودی جریان و پتانسیل برابر با ۲۰ متر و مقدار پیرش ۱۰ متر تا بیشینه ۱۰ پیرش ($n=10$) برای الکترودهای پتانسیل (MN)، از شمال غرب به جنوب شرق برداشت شده‌اند.

در این پژوهش برای تمام پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده، مدل‌سازی وارون هموار به روش کمترین مربعات خطا با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV (Loke and Lane, 2002; Loke, 2000; Loke and Barker, 1996; Loke, 1999) صورت گرفت و مقاطع هریک به‌طور جداگانه تفسیر شد. به‌عنوان نمونه برای پروفیل مرکزی DD3 با طول ۶۴۰ متر که تعداد ۲۵۵ نقطه، اندازه‌گیری شده است، مقاطع بارپذیری و مقاومت ویژه مدل‌سازی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل بخش بزرگ نیمه سمت راست مقطع مقاومت ویژه دارای مقادیر پایینی است، در حالی که ناحیه متناظر با این بخش در مقطع بارپذیری به‌جز نواحی سطحی، بارپذیری بالایی را نشان می‌دهد. البته درون این بخش دو ناحیه مجزای با مقاومت ویژه بالا نیز



شکل ۶. الف) مقطع مقاومت ویژه، ب) مقطع بارپذیری پروفیل DD3 بعد از مدل‌سازی وارون هموار داده‌ها

نمونه‌برداری شد. بازه‌های نمونه‌برداری براساس تغییرات در لیتولوژی، دگرسانی و کانه‌زایی‌های مشهود و با احتمال وجود کانه‌زایی تعریف شده است. نمونه‌های برداشت شده با روش‌های ICP-OES و Fire Assay برای عناصر مختلف و به‌ویژه مس مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت.

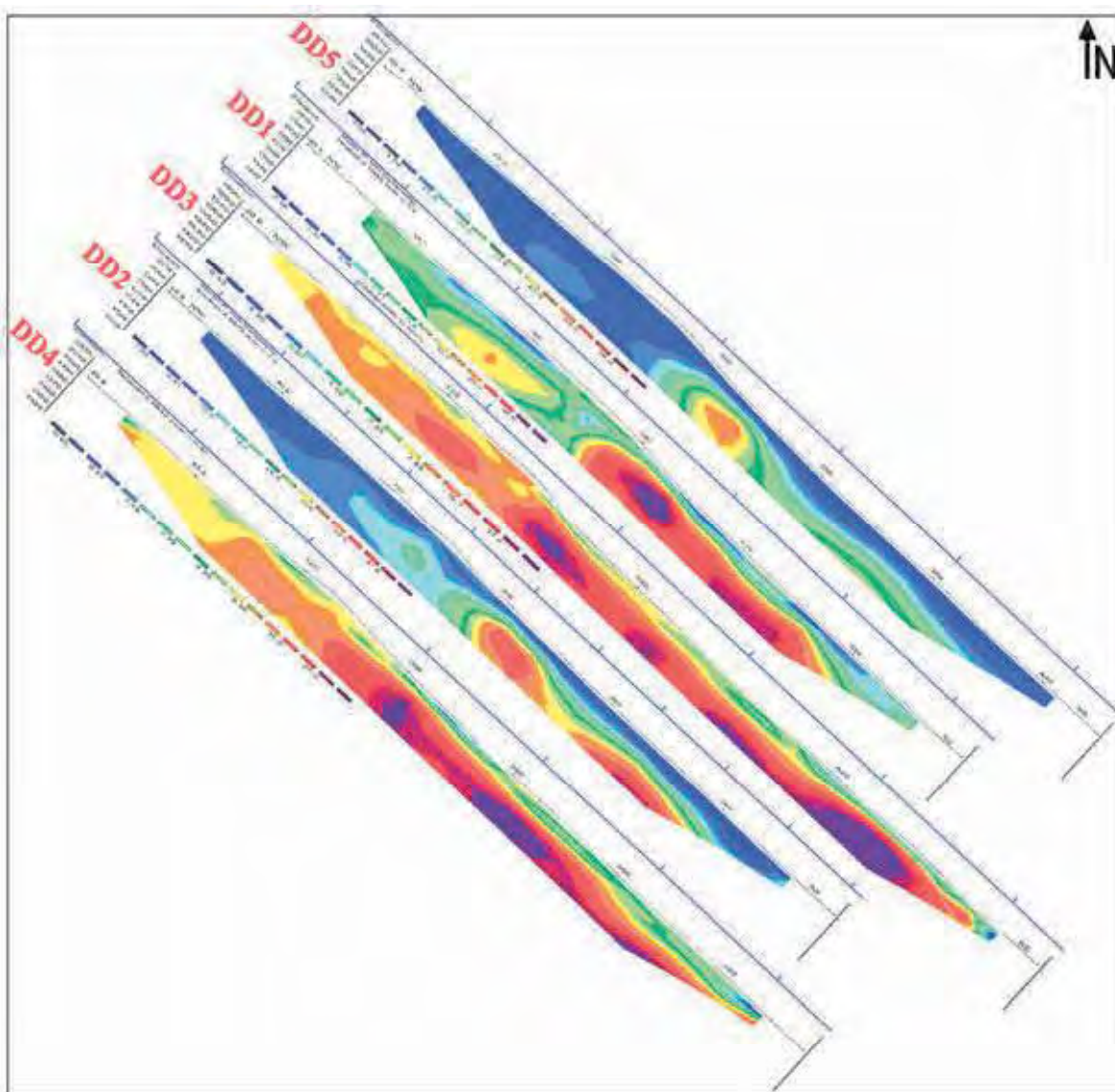
شکل ۸ نقشه برداشت دیواره غربی ترانشه اول (TR1) با طول ۵۴ متر از جنوب به شمال را نشان می‌دهد. لیتولوژی سطحی این ترانشه، همگی شیست با روند شیستوزیته ۲۰ تا ۷۰ درجه می‌باشد. شیب در نقاط مختلف به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی متغیر است. در سه بخش از سطح این ترانشه تراوش‌هایی از کانه‌زایی اکسیدی مس مشاهده شد و از ۱۱ متری، ۲۰ متری و ۵۰ متری طول ترانشه، سه نمونه معرف برای تجزیه شیمیایی برداشت شد و کانه‌زایی هم‌روند با شیستوزیته و محدود به مناطق گسلی می‌باشد. راستای برداشت ترانشه دوم (TR2) با طول تقریبی ۲۵ متر از شمال به جنوب است و مطابق شکل ۹ لیتولوژی سطحی این ترانشه، همانند ترانشه اول بیشتر شیست است. از هشت متری، ۱۱ متری و ۱۴ متری طول ترانشه، سه نمونه معرف برای تجزیه شیمیایی برداشت شد. در این ترانشه،

در شکل ۷ مقاطع بارپذیری مدل‌سازی وارون شده نظیر پروفیل‌های ژئوفیزیکی DD1، DD2، DD3، DD4 و DD5 به ترتیب از بالا به پایین در مجاورت یکدیگر نشان داده شده است. نتایج مطالعات ژئوفیزیکی از طریق مقایسه این مقاطع با نقشه بارپذیری برداشت مستطیلی (شکل ۵) نشان می‌دهد، به‌طور کلی انطباق مناسبی بین نواحی امیدبخش براساس برداشت مستطیلی با پروفیل‌های برداشت دوقطبی-دوقطبی وجود دارد.

اکتشافات ژئوشیمیایی سطحی

براساس یک شبکه‌بندی منظم در سطح ناحیه، تعداد ۹۴ نقطه نمونه‌برداری سطحی از رگه‌های سیلیسی با ضخامت‌ها و طول‌های مختلف، استوک ورک‌ها، دگرسانی‌ها و اکسیدهای آهن برداشت شد. سپس نمونه‌های برداشت شده به روش ICP-OES برای ۳۴ عنصر مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. بیشترین میزان عیار مس این نمونه‌ها ppm ۱۱۴۷ است. همچنین به‌منظور بررسی گسترش کانه‌زایی در بخش‌های سطحی، تعداد سه رشته ترانشه با نام‌های TR1 تا TR3 تا حد امکان عمود بر روندهای کانه‌زایی، طراحی و حفر شد و از رخنمون‌های کانه‌دار با روش تراشه پیوسته

1. Continuous chip



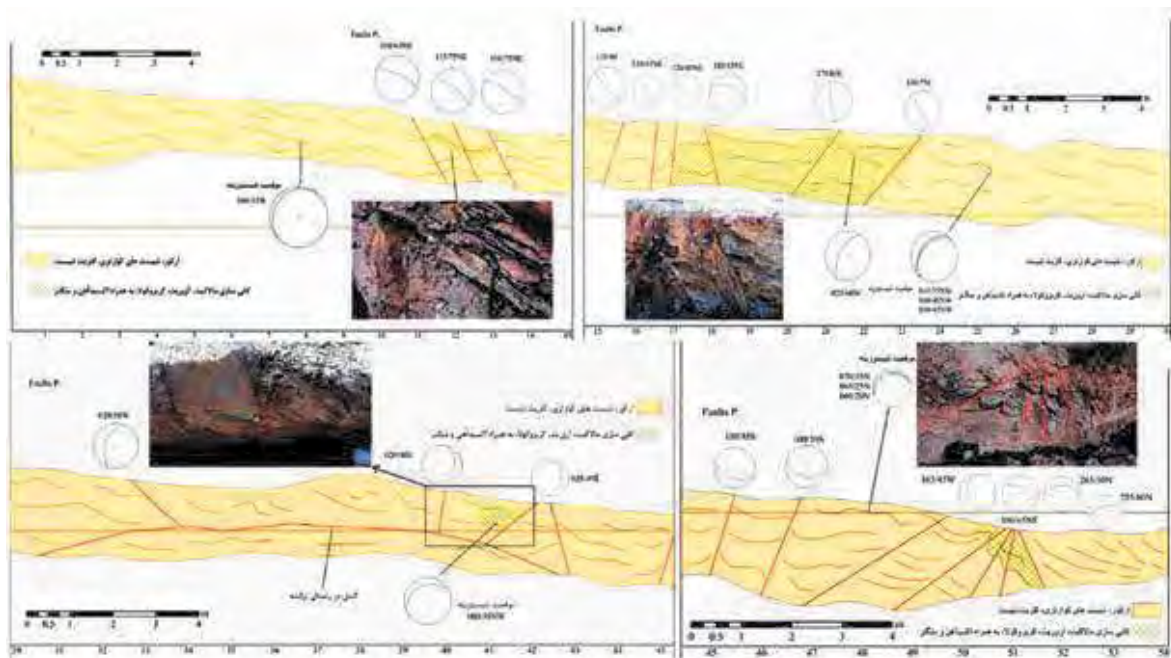
شکل ۷. مقطع باریزبری پروفیل‌های ژئوفیزیکی DD5، DD1، DD3، DD2 و DD4 در مجاورت یکدیگر به ترتیب از بالا به پایین

از برداشت مستطیلی قرار دارد. اما در حال حاضر در این منطقه تعداد هشت حلقه گمانه اکتشافی مایل همگی با شیب ۷۰ درجه و آزمون ۱۳۵ درجه با مجموع طول کلی ۴۱۴/۵ متر حفاری شده است و بانام‌های BH1 تا BH8 شناخته می‌شوند. البته موقعیت بعضی از این گمانه‌ها با موقعیت‌های پیشنهادی عملیات ژئوفیزیکی همخوانی ندارد. چاه نگار (لاگ) زمین‌شناسی و اکتشافی تمام گمانه‌های اکتشافی بیان شده، جمع‌آوری شده که به عنوان نمونه نتایج آنها برای گمانه‌های BH1 و BH3 در جدول ۱ آورده شده است.

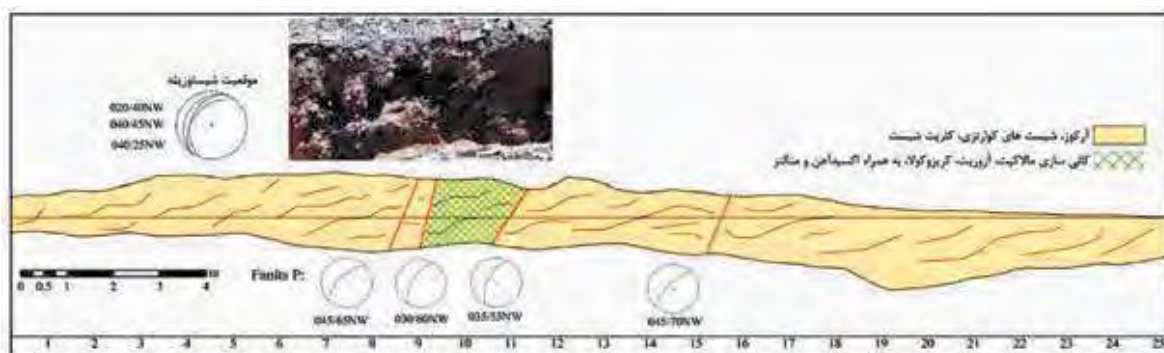
کانه‌زایی در راستای شیستوزیته و محدود بین دو گسل کم و بیش هم‌روند و هم‌شیب به ضخامت یک و نیم متر رخنمون دارد. در ترانشه سوم به دلیل عمق کم و نداشتن کیفیت حفاری، برداشت زمین‌شناسی انجام نشد. بیشترین میزان عیار مس در ترانشه اول حدود ۲/۱ درصد و در ترانشه دوم حدود ۱/۴ درصد ثبت شده است.

اکتشافات ژئوشیمیایی زیرسطحی

براساس نتایج یافته‌های ژئوفیزیکی، در نهایت حفر تعداد شش حلقه گمانه اکتشافی در پهنه، پیشنهاد شده است که موقعیت آنها اغلب بر روی بخش بی‌هنجاری حاصل



شکل ۸. نقشه برداشت دیواره غربی ترانشه اول (TR1) (مقطع طولی از جنوب به شمال)



شکل ۹. نقشه برداشت دیواره شمال شرقی ترانشه دوم (TR2) (مقطع طولی از جنوب به شمال)

بحث

نیز نشان می‌دهد، واحدهای سنگی، تحت تاثیر گسل هستند و در برخی مناطق این گسل‌ها و مناطق برشی دارای کانه‌زایی می‌باشند که مقدار مقاومت ویژه نیز تحت تاثیر قرار دارد. کاهش مقاومت ویژه در بخش‌های سطحی نیز متاثر از وجود آبرفت‌ها، مناطق اکسیده و دگرسان شده سطحی هستند.

شکل ۱۰ نقشه موقعیت پراکندگی پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده و موقعیت گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی بر روی پروفیل‌ها (شش گمانه نام‌گذاری شده با GBH1 تا GBH6) را همراه با موقعیت گسل‌های موجود در پهنه مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده

در ادامه، نتایج هر یک از فعالیت‌های اکتشافی انجام شده با جزئیات بیشتر بررسی می‌شود و ارتباط آنها با گسل‌های موجود در پهنه، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

ارتباط یافته‌های ژئوفیزیکی با گسل‌ها

در پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده، بی‌هنجاری‌های با بارپذیری بالا (که به احتمال زیاد دارای پیریت هستند) دارای روند و امتداد مشخص شمال شرقی-جنوب غربی می‌باشند (شکل ۷). همچنین بخش‌های بی‌هنجاری‌های با بارپذیری بالا دارای مقدار مقاومت ویژه متوسط هستند و در نتیجه این بی‌هنجاری‌ها در ارتباط با مناطق خردشده و گسله پهنه می‌باشند. بررسی مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی

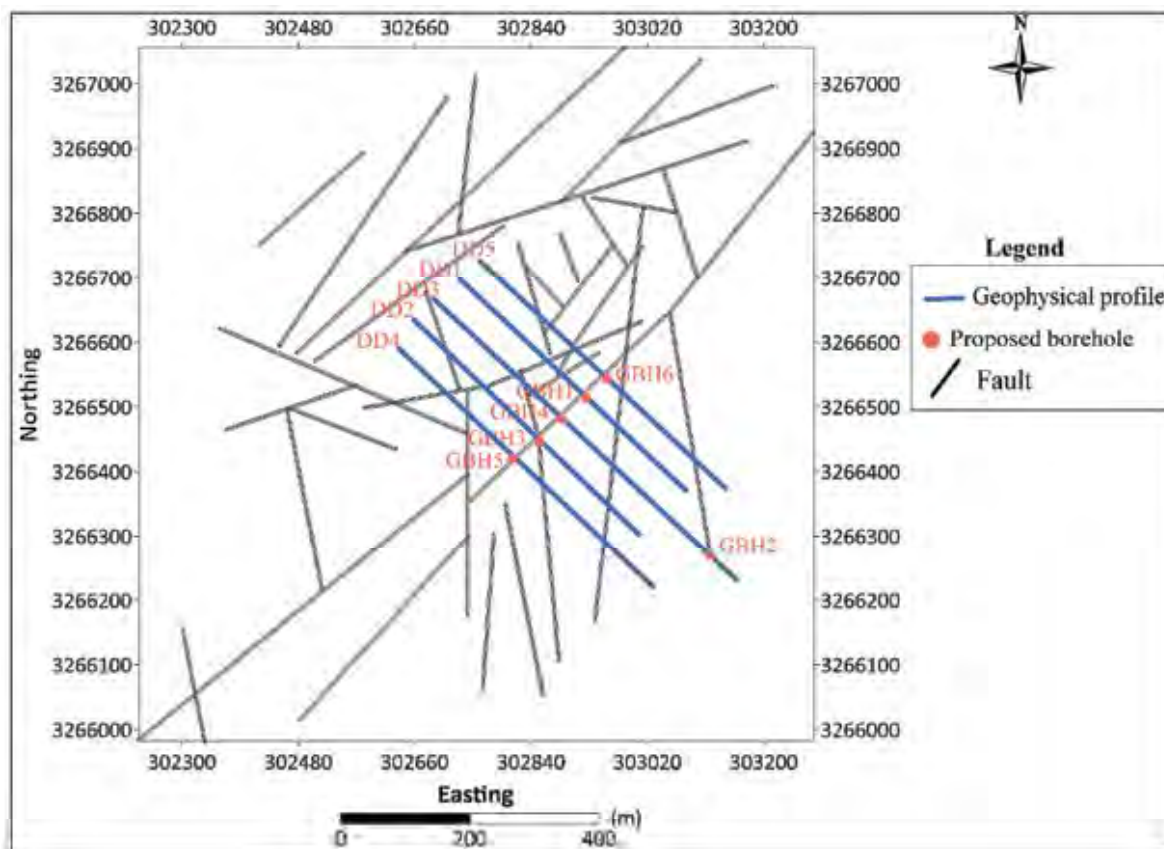
جدول ۱. چاه نگار زمین‌شناسی و اکتشافی گمانه‌های BH1 و BH3

گمانه BH3				گمانه BH1			
از	تا	سنگ‌شناختی	عیار مس (ppm)	از	تا	سنگ‌شناختی	عیار مس (ppm)
۰	۵	شیل	۳۰۹	۰	۱	شیل	۶۹۳
۵	۱۰	شیل	۶۳	۱	۵	شیل	۱۶۹
۱۰	۱۵	شیل	۶۸	۵	۶	شیل	۱۳۵۲
۱۵	۲۰	شیل	۵۲	۶	۷	شیل	۸۲۶
۲۰	۲۵	شیل	۲۷	۷	۹	شیل	۱۴۱۱
۲۵	۲۷	شیل	۲۰	۹	۱۰	سنگ‌آهک	۷۶
۲۷	۲۸	شیل	۳۵	۱۰	۱۵	سنگ‌آهک	۱۶۱
۲۸	۳۰	سنگ‌آهک	۱۷	۱۵	۲۰	سنگ‌آهک	۲۷۴
۳۰	۳۵	سنگ‌آهک	۴	۲۰	۲۵	سنگ‌آهک	۲۳۸
۳۵	۴۰	سنگ‌آهک	۲۴	۲۵	۲۵/۹	شیل	۱۵۵۶۱
۴۰	۴۱	سنگ‌آهک	۵	۲۵/۹	۲۶/۹	شیل	۱۲۸۲۵
۴۱	۴۲	سنگ‌آهک	۶	۲۶/۹	۲۷/۹	سنگ‌آهک	۱۳۲
۴۲	۴۵	سنگ‌آهک	۷	۲۷/۹	۲۸/۹	سنگ‌آهک	۴۷
۴۵	۵۰	سیلیس	۱۴	۲۸/۹	۲۸/۹	سنگ‌آهک	۴۰
۵۰	۵۱	سیلیس	۱۳۸۷				
۵۱	۵۲	سیلیس	۱۰۸				
۵۲	۵۳	سیلیس	۵۱				
۵۳	۵۴	سنگ‌آهک	۵۵				
۵۴	۵۵	سنگ‌آهک	۸۱				
۵۵	۵۷	سنگ‌آهک	۷۰				
۵۷	۶۰	سنگ‌آهک	۶۹				
۶۰	۶۱	سنگ‌آهک	۴۳۶				
۶۱	۶۲	سنگ‌آهک	۹۲				
۶۲	۶۳	گرانیت و گنایس	۲۴۶				
۶۳	۶۴	گرانیت و گنایس	۱۵۷				
۶۴	۶۵	گرانیت و گنایس	۱۸۵				
۶۵	۶۶	گرانیت و گنایس	۸۴				
۶۶	۶۷	گرانیت و گنایس	۴۹				
۶۷	۶۸	گرانیت و گنایس	۵۲				
۶۸	۶۹	گرانیت و گنایس	۲۱				
۶۹	۷۰	گرانیت و گنایس	۵۴				
۷۰	۷۱	گرانیت و گنایس	۷۴۲				
۷۱	۷۵	گرانیت و گنایس	۱۲۹				

ارتباط یافته‌های لیتوژئوشیمیایی سطحی و زیرسطحی با گسل‌ها

شکل ۱۱ نقشه موقعیت پراکندگی کلیه کارهای اکتشافی انجام شده شامل نمونه‌برداری‌های نقطه‌ای سطحی، ترانشه‌ها و گمانه‌های اکتشافی و نیز گسل‌های برداشت شده در پهنه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه برداشت ترانشه‌های TR1 و TR2 شکل‌های ۸ و ۹ و نیز

می‌شود، موقعیت گمانه‌های پیشنهادی بیشتر در بخش میانی نقشه و همگی بر روی گسل قرار دارند. از آنجایی که موقعیت گمانه‌های اکتشافی براساس بی‌هنجاری‌های برجسته مقاطع بارپذیری تعیین شده و این بی‌هنجاری‌ها در ارتباط با کانه‌زایی احتمالی در پهنه می‌باشند، بنابراین چنین نتیجه‌گیری می‌شود که محل‌های کانه‌زایی احتمالی در پهنه مورد مطالعه، در ارتباط مستقیم با موقعیت گسل‌های موجود در پهنه هستند.



شکل ۱۰. نقشه موقعیت پراکندگی پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده، گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی بر روی پروفیل‌ها و گسل‌های موجود در پهنه مورد مطالعه

دو بخش پرعیار مجزا در بخش میانی پهنه، به‌طور خیلی واضح قابل مشاهده هستند. این بخش‌ها متناظر با بخش تمرکز و تقاطع گسل‌های موجود در پهنه (شکل ۱۳-الف) می‌باشند.

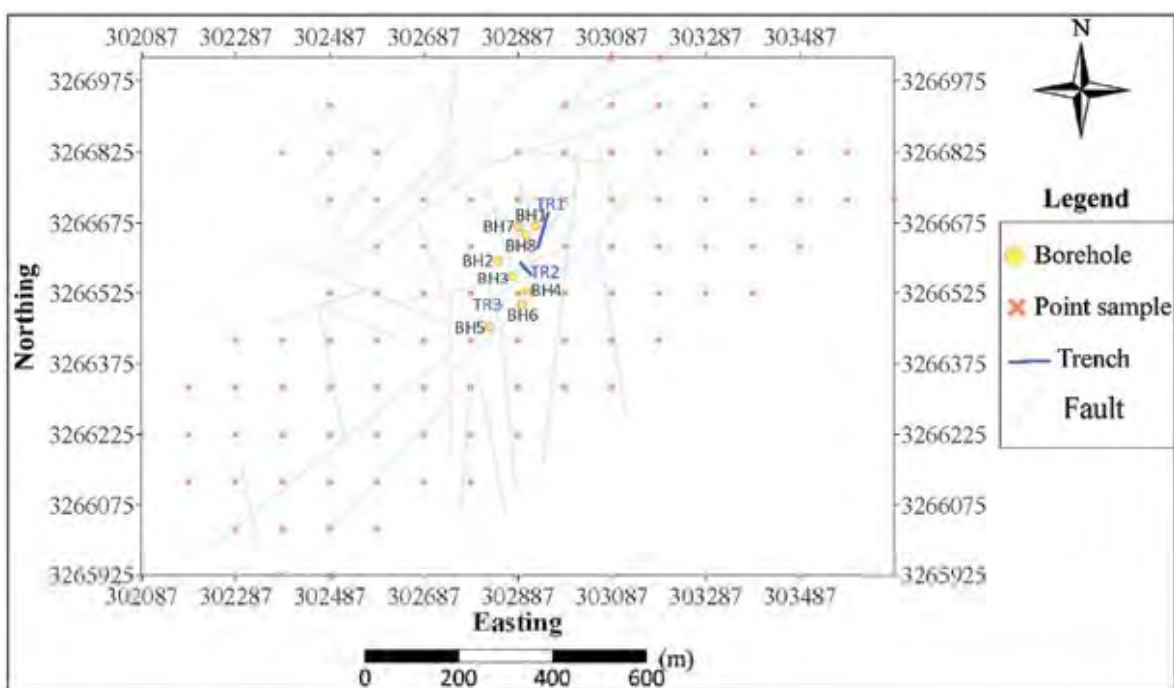
در شکل ۱۴ نمای سه بعدی چاه‌نگار عیارسنجی تمام گمانه‌های اکتشافی و مدل سه بعدی عیارسنجی پهنه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Rockworks16 رسم شده است. راهنمای رنگی عیاری در این شکل تغییرات میزان عیار مس گمانه‌ها را برحسب گرم بر تن (ppm) نشان می‌دهد. در شکل ۱۴-الف میزان شعاع استوانه‌ها نشان‌دهنده بزرگی مقدار عیار در طول مغزه مربوطه در گمانه است. مدل سه بعدی عیارسنجی (شکل ۱۴-ب)

نیز با استفاده از الگوریتم عکس مجذور فاصله وزن‌دار پیشرفته ساخته شده است. در این الگوریتم امکان وزن دهی فاصله با توان متفاوت در جهات مختلف وجود دارد.

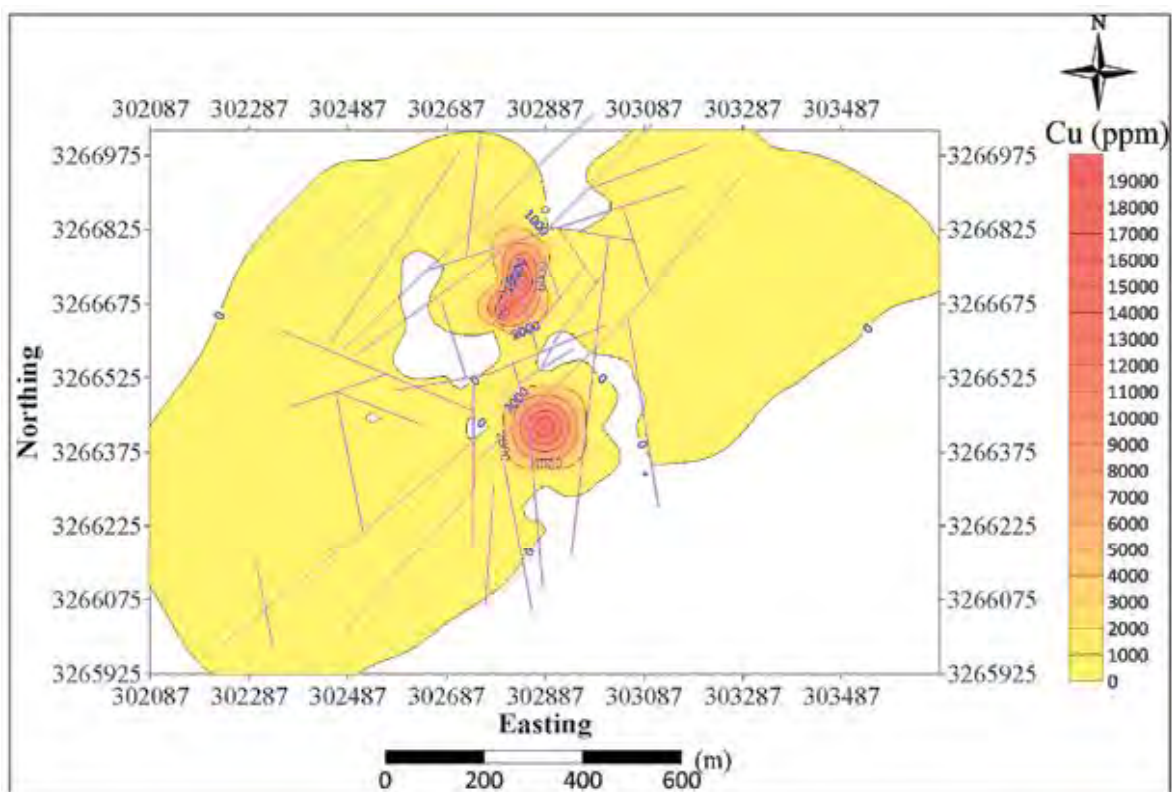
1. Advanced inverse distance weighted (IDW)

شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که بیشتر بخش‌های کانه‌زایی شده این ترانسه‌ها در ارتباط با شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در پهنه هستند. شکل ۱۲ نیز نقشه هم‌عیار کانسار مس بشنه را بر اساس عیار نمونه‌های نقطه‌ای و ترانسه‌های برداشت شده در پهنه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این شکل گسل‌های موجود در پهنه هم نشان داده شده‌اند. مطابق این شکل عیار مس کانسار در دو بخش مجزا در بخش میانی ناحیه مورد مطالعه بالا است. بخش‌های پرعیار در محل تمرکز و تقاطع گسل‌ها واقع هستند و ترانسه‌های اکتشافی نیز بیشتر در این بخش‌ها قرار دارند. بنابراین ساختارهای پهنه و گسل‌ها کنترل‌کننده اصلی کانه‌زایی در پهنه هستند.

به‌منظور نمایش و تجسم بهتر در شکل ۱۳ نقشه دو بعدی موقعیت پراکندگی گسل‌های موجود در پهنه مورد مطالعه بر روی نقشه سه‌بعدی عیارسنجی مس کانسار حاصل از نمونه‌های سطحی و ترانسه‌های برداشت شده با استفاده از نرم‌افزار Surfer نشان داده شده است. در شکل ۱۳-ب



شکل ۱۱. نقشه موقعیت پراکندگی کارهای اکتشافی و گسل‌های موجود در پهنه مورد مطالعه



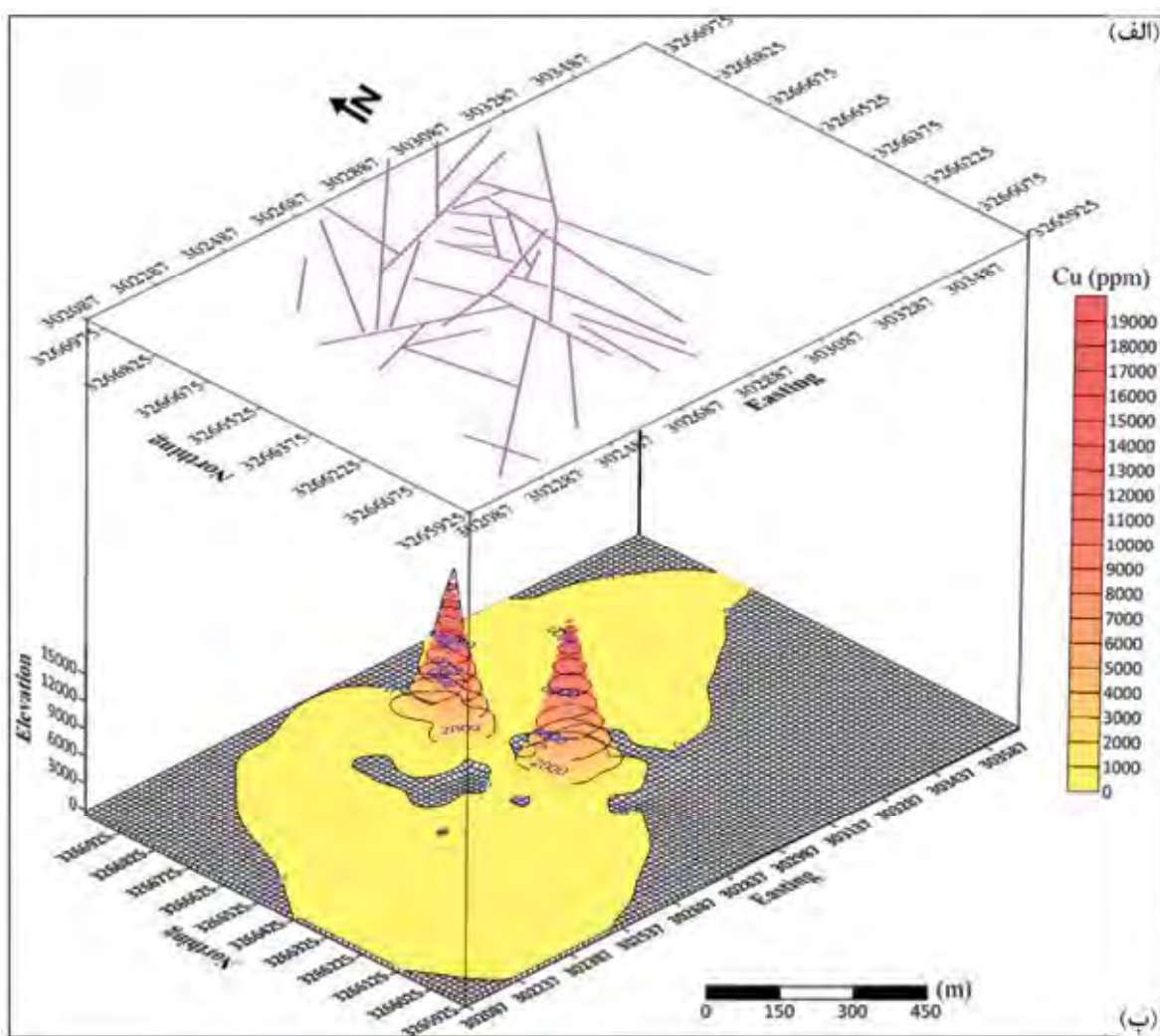
شکل ۱۲. نقشه هم‌عیار کانسار مس بشنه براساس عیار نمونه‌های نقطه‌ای و تراشه‌های برداشت شده در پهنه مورد مطالعه، خطوط بنفش رنگ نشان‌دهنده گسل‌های موجود در پهنه هستند

مطابق این شکل تغییرات عیار پهنه مورد مطالعه با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار (ppm) ۱۲۰۰۰ به ۱۲ بخش رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود، به‌طور کلی بخش شامل ماده معدنی، از وسعت زیادی برخوردار نبوده و بخش بزرگی از ناحیه به‌ویژه بخش میانی، دارای عیار زیر ۴۰۰۰ ppm

تجزیه و تحلیل اکتشافی و تعیین ارتباط کانه‌زایی با گسل‌ها به‌عنوان ...

(با امتدادهای شمال شرقی-جنوب غربی و شمال غربی-جنوب شرقی) با یکدیگر است. به‌عبارت‌دیگر کانه‌زایی در اعماق پهنه مورد مطالعه نیز در ارتباط با شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در پهنه می‌باشد.

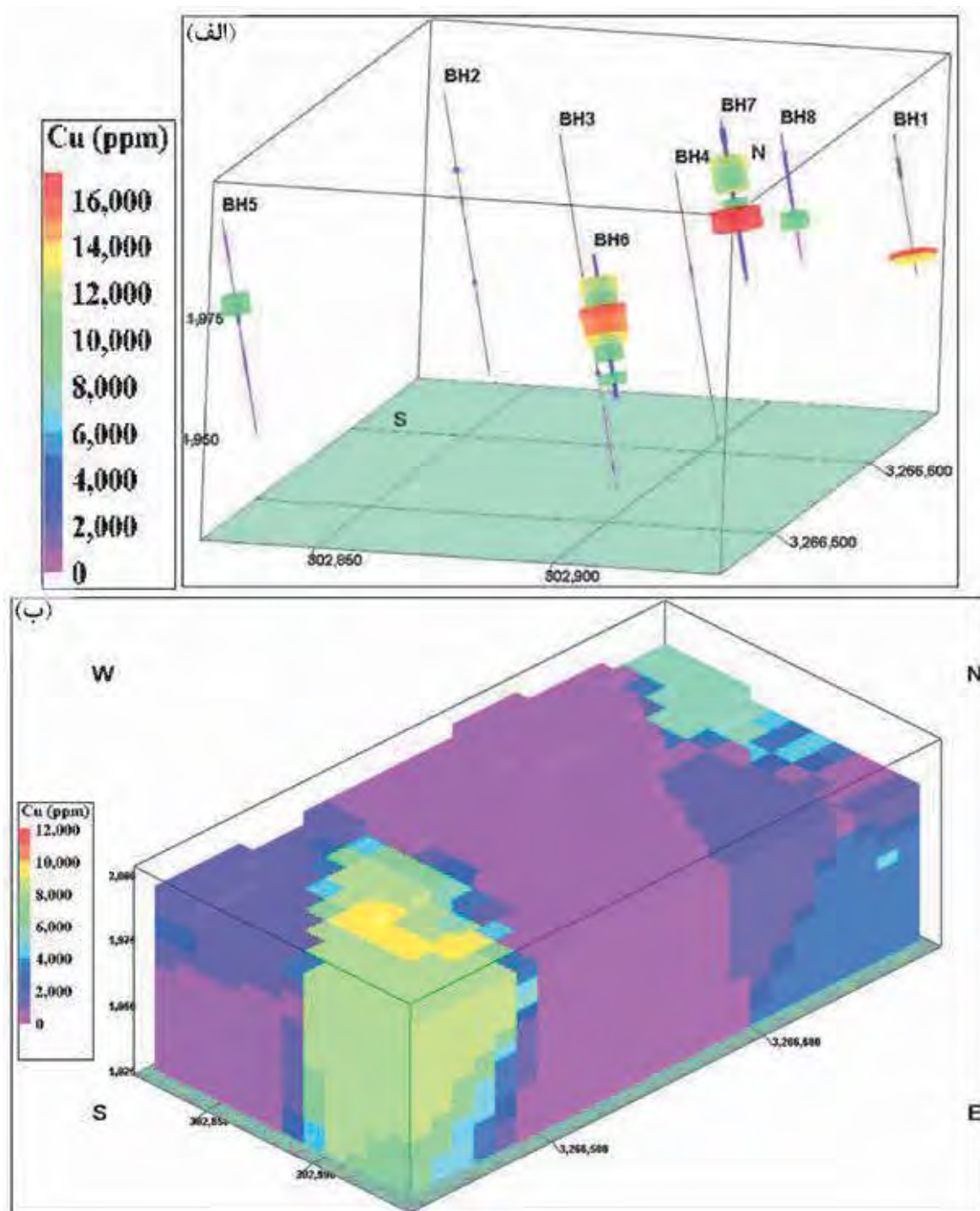
(۴/۰ درصد) است. مطابق این شکل دو بخش پرعیار یکی در بخش شمال غربی و دیگری در بخش جنوب شرقی گستره حفر گمانه‌های اکتشافی وجود دارد. براساس شکل ۱۰ بخش شمال غربی محل تجمع و تقاطع چند گسل کوچک و بخش جنوب شرقی نیز محل تقاطع چند گسل اصلی



شکل ۱۳. الف) نقشه دوبعدی موقعیت پراکندگی گسل‌های موجود در پهنه، ب) نقشه سه‌بعدی عیارسنجی مس کانسار حاصل از نمونه‌های سطحی و ترانسه‌ها

گمانه‌ها در این جدول به معنای ترتیب اولویت و اهمیت نقاط نیست. در شکل ۱۵ نیز موقعیت گمانه‌های پیشنهاد شده قبلی براساس عملیات ژئوفیزیک، گمانه‌های اکتشافی حفاری شده و گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی جدید همراه با موقعیت گسل‌های موجود در پهنه مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به این شکل هم مشاهده می‌شود که بیشتر گمانه‌های پیشنهادی جدید بر روی گسل قرار دارند.

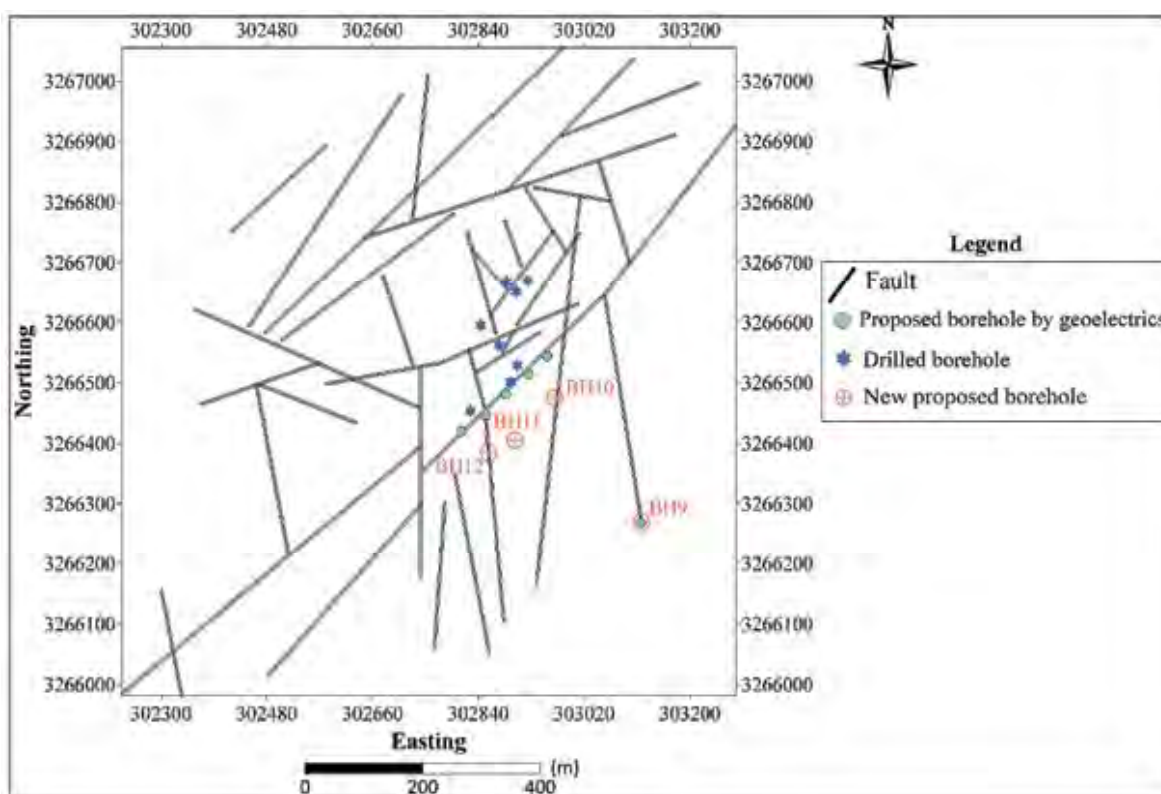
در پایان، به‌منظور تکمیل اکتشافات مراحل قبلی و شناخت بهتر پهنه مورد مطالعه، براساس تمام بررسی‌های انجام شده همانند مقاطع ژئوفیزیکی دوقطبی-دوقطبی (شکل ۷)، نقشه عیارسنجی نمونه‌برداری‌های سطحی و ترانسه‌ها (شکل ۱۲) و گمانه‌های اکتشافی حفر شده (شکل ۱۴)، حفاری چند حلقه گمانه اکتشافی جدید در موقعیت‌های مطابق جدول ۲ پیشنهاد می‌شود. البته شماره



شکل ۱۴. الف) نمای سه بعدی چاه‌نگار عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی، ب) مدل سه بعدی عیارسنجی کانسار مس بشنه

جدول ۲. مشخصات و موقعیت جغرافیایی گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی جدید

نام گمانه	طول جغرافیایی (متر)	عرض جغرافیایی (متر)	شیب (درجه)	طول (متر)
BH۹	۳۰۳۱۱۷	۳۲۶۶۲۷۰	۹۰	۵۵
BH۱۰	۳۰۲۹۷۰	۳۲۶۶۴۷۶	۹۰	۵۰
BH۱۱	۳۰۲۹۰۲	۳۲۶۶۴۰۵	۹۰	۵۵
BH۱۲	۳۰۲۸۵۷	۳۲۶۶۳۸۵	۹۰	۶۰



شکل ۱۵. موقعیت گمانه‌های پیشنهاد شده براساس عملیات ژئوفیزیکی، گمانه‌های اکتشافی حفاری شده و گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی جدید همراه با موقعیت گسل‌های موجود در پهنه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

عمیق‌تر، گمانه اکتشافی جدید حفر شود. البته گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی جدید در اولویت هستند و باید از طریق بازدید صحرایی و بررسی دقیق وضعیت زمین‌شناسی محل، در خصوص انجام عملیات حفاری، تصمیم‌گیری نهایی صورت گیرد.

منابع

- احمدی، ر. و افضلی، ن.، ۱۳۹۶ الف. مدل‌سازی وارون هموار داده‌های ژئوفیزیکی اکتشافی کانسار سرب و روی حسین‌آباد خمین، دهمین همایش ملی زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور، تبریز.
- احمدی، ر. و افضلی، ن.، ۱۳۹۶ ب. مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار سرب و روی رباط خمین با استفاده از نرم‌افزار Rockworks، دهمین همایش ملی زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور، تبریز.
- احمدی، ر. و رضای‌پور، م.، ۱۳۹۸. پیشنهاد

براساس مطالعات زمین‌شناسی و بازدیدهای صحرایی در کانسار مس بشنه سیرجان، روند بیشتر رگه‌های سیلیسی و کانه‌دار در راستای گسل‌های اصلی است و بیانگر عملکرد کششی این دسته از گسل‌ها در پهنه می‌باشد. بیشتر دایک‌های پهنه نیز در راستای شکستگی‌های با راستای شمال شرقی-جنوب غربی یا شمال غربی-جنوب شرقی هستند. محل تلاقی گسل‌ها یا جناق‌ها از لحاظ دارا بودن رگه و رگچه سیلیسی، بخش استوکورکی و کانه‌زایی دارای اهمیت است. در پژوهش حاضر بیشتر بودن حضور کانی‌زایی فلزی در پهنه در حاشیه محل برخورد این گسل‌ها، براساس فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در پهنه به اثبات رسید. بنابراین پیشنهاد می‌شود موقعیت گسل‌های موجود در پهنه به‌ویژه گسل‌های اصلی یک بار دیگر به‌طور دقیق مورد بازدید صحرایی قرار گیرند و در صورت نیاز به بررسی بیشتر سطحی در موقعیت خاص، ترانشه و در صورت نیاز به اکتشاف

- Geology (Geoscience Texts). Wiley Blackwell, 240.
- Keary, Ph., Brooks, M. and Hill, I., 2002. An Introduction to Geophysical Exploration. Third edition, Blackwell Science, 281.
 - Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a Quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.
 - Loke, M.H. and Lane, J., 2002. The use of constraints in 2D and 3D resistivity modeling. The 8th EEGS-ES Meeting, Portugal.
 - Loke, M.H., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys, 66.
 - Loke, M.H., 2000. Topographic modeling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, Glasgow, Scotland.
 - Milsom, J., 2003. Field Geophysics. Third edition, John Wiley and Sons Ltd, 249.
 - Reynolds, J.M., 2011. An introduction to applied and environmental geophysics. Second edition, Reynolds Geo-Sciences, 710.
 - Shahrabi, M.A., Amanian, M. and Hafezi Moghaddas, N., 2017. Application of IP and Rs investigation method in exploration of copper ore in Kashmar. Proceedings of the 17th Iranian Geophysical Conference, Iranian Geophysical Society, Tehran, 21-23.
- موقعیت بهینه حفاری در کانسار مس پورفیری نارباغی شمالی ساوه براساس مدل سازی داده های ژئوفیزیکی. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۱۲، ۴، ۹۵-۱۲۱.
- احمدی، ر. و شریعتی زارچ، س.م.، ۱۳۹۹. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ اهداف مغناطیسی در روش مغناطیس سنجی با استفاده از مدل سازی پیشروی دوبعدی و سه بعدی. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۱۳، ۳، ۱۵-۳۴.
 - حسینی شهرکی، س.ج.، ۱۴۰۰. گزارش پایان عملیات اکتشافی مس بشنه سیرجان. ۷۱.
 - کریم پور، م.ح. و سعادت، س.، ۱۳۹۶. زمین شناسی اقتصادی کاربردی. دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات ارسلان، ۵۳۶.
 - کلاگری، ع.ا.، ۱۳۸۹. اصول اکتشافات ژئوفیزیکی. ناشر: مولف، تبریز، ۴۸۵.
 - نجاری، م.، ۱۳۹۹. مطالعات ژئوفیزیک به روش IP/Rs در محدوده معدنی بشنه سیرجان-استان کرمان. ۷۴.
 - نوروزی، غ.ح. و غلامی، س.، ۱۳۸۴. تحلیل و مدل سازی داده های ژئوفیزیکی (IP, Rs, M) در محل اندیس معدنی مس سوناچیل. نشریه دانشکده فنی، ۲، ۲۵۳-۲۶۵، ۳۹.
 - Aliluo, S.K., Abedi, M. and Norouzi, G.H., 2018. IP-Rs geophysical 3D modelling of Cu-Fe skarns; A case study Ghalandar skarn deposit. Proceedings of the 18th Iranian Geophysical Conference, Iranian Geophysical Society, Tehran, 962-964.
 - Evans, A.M., 2000. Introduction to Ore