

تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (IP/RS) و زمین‌شناسی محدوده اکتشافی سرب و روی گنهران (شرق شهرستان داران-استان اصفهان)

سبحان کرمی^۱، سیدوحید شاهرخی^{۲*}، طاهر فرهادی‌نژاد^۳، مصطفی اسماعیلی‌وردنجانی^۴، محمدعلی علی‌آبادی^۵

۱- دانشجوی دکتری؛ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد محلات، محلات، ایران

۲- دانشیار؛ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد خرم‌آباد، خرم‌آباد، ایران

۳- استادیار؛ بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، لرستان، ایران

۴- دکتری تخصصی؛ شرکت آتین معدن میدیا، اصفهان، ایران

۵- کارشناسی ارشد؛ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد محلات، محلات، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۷

* نویسنده مسئول مکاتبات: vahid.shahrokhi@gmail.com

چکیده	واژگان کلیدی
محدوده سرب و روی گنهران در استان اصفهان در ۲۶ کیلومتری شرق شهرستان داران قرار دارد. این محدوده در بخش کریناته پهنه سنج-سیرجان و کمربند فلزایی ملایر-اصفهان قرار دارد. سنگ میزبان کانی‌سازی، سنگ آهک توده‌ای کرتاسه آغازین می‌باشد. کانی‌سازی، عمدتاً با دگرسانی دولومیتی-سیلیسی همراه است. بخش‌های دولومیتی شده کانه‌دار بیشتر با پهنه‌های گسلی معکوس در ارتباط هستند و روندی به تقریب موازی با گسل‌های معکوس و رخ‌های شکستگی دارند. کانی‌سازی بافت ماده معدنی به صورت دانه پراکند، رگچه ای، پرکننده فضای خالی و لکه‌ای می‌باشد. ماده معدنی شامل سرب، روی و بعضاً مس است که به صورت کانی‌های گالن، اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت، سروزیت و باطله به ترتیب فراوانی شامل دولومیت، سیلیس و کلسیت می‌باشند. برداشت داده‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی به منظور اکتشاف عمقی این بی‌هنجاری‌ها طراحی و انجام شده است. همچنین مدل‌سازی داده‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه به روش وارون‌سازی هموار دو بعدی انجام و ارائه شد. منطقه مورد مطالعه به دو بخش تقسیم شده، بخش اول شامل ۱۱ پروفیل با آرایش دوقطبی-دوقطبی با امتداد شمالی-جنوبی و طول پروفیل‌ها ۴۰۰ تا ۴۲۰ متر و بخش دوم شامل ۱۸ پروفیل با فواصل ایستگاهی ۲۰ متر و آزیموت ۳۶ درجه که عمدتاً پروفیل‌ها دارای طول ۳۶۰ متر می‌باشند. در محدوده اول ۱۴۰۲ ایستگاه و در محدوده دوم ۱۹۱۱ ایستگاه برداشت شده که در مجموع نقاط برداشت شده در دو محدوده به روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه‌ی ظاهری ۳۳۱۳ ایستگاه است که در نهایت در دو محدوده ۴۵ نقطه برای حفاری پیشنهاد شده است.	آرایش دایبل-دایبل قطبش القایی مقاومت ویژه سرب و روی گنهران سنجد-سیرجان اصفهان

۱- مقدمه

ناحیه گنهران در شمال غرب اصفهان در پهنه سنج-سیرجان و در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان که یکی از محورهای بزرگ سرب و روی ایران قرار دارد (Karimpour and Sadeghi, 2018)، با توجه به اهمیت کانسارهای سرب و روی در این کمربند، بررسی‌های متعددی در زمینه کانه‌زایی، الگوی اکتشافی و منشأ کانسار بر روی آنها انجام شده است (Esmaili Sevieri et al., 2019; Karimpour et al., 2019; Niroomand et al., 2019)، به طور کلی، سنگ‌های کربناته کرتاسه زیرین کمربند فلززایی ملایر-اصفهان میزبان تعداد زیادی کانسار سرب و روی هستند (Ehya et al., 2010; Hou and Zhang., 2015). در پهنه سنج-سیرجان، پدیده‌های دگرگونی، ماگماتیسم و زمین‌ساخت پی‌درپی و هم‌آهنگ با فازهای زمین‌ساختی شناخته شده در مقیاس جهانی در بیشترین مقدار است، به همین رو این پهنه به‌عنوان پویاترین پهنه زمین‌ساختی ایران شناخته می‌شود (Alavi 1994؛ آقائباتی، ۱۳۸۳). مطالعات اکتشاف ژئوشیمیایی ۱:۲۵۰۰۰ محور گنهران-عسگران منطقه را مستعد کانه‌زایی دانسته است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۶). روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی هستند که معمولاً برای بدست آوردن نتایج بهینه در اکتشاف کانسارها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Gautneb and Tveten, 2000) که تقریباً در تمامی مراحل عملیات اکتشاف از این روش‌ها که عمدتاً قابل اعتماد و در بسیاری موارد باعث کاهش ریسک‌های بزرگ سرمایه‌گذاری می‌شوند، بهره گرفته می‌شود (telford et. 1990). همچنین روش‌های ژئوالکتریکی یکی از مهم‌ترین زیر مجموعه روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی هستند، که بر مبنای مطالعه میدان‌های الکتریکی زمین یا ویژگی‌های الکتریکی زمین‌شناسی و معدنی استوارند (Mistafaei and Ramazi, 2015). روش‌های ژئوالکتریکی کاربردهای گسترده‌ای دارند که اکتشاف کانسارها، آبخاوها و مطالعات عمرانی از اصلی‌ترین کاربردهای آن می‌باشد. پلاریزاسیون القایی یکی از روش‌های معمول و کارآمد در تشخیص کانی‌های سولفیدی مخصوصاً سولفیدهای پراکنده است. اندازه‌گیری‌های IP معمولاً در حوزه زمان یا فرکانس صورت می‌گیرند و بارپذیری معمول‌ترین متغیر در اندازه‌گیری حوزه زمان محسوب می‌شود. از آنجا که مقاومت ویژه نیز از ویژگی‌های ذاتی سنگ و تشکیلات مختلف به شمار رفته و در شناخت وضعیت ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مورد نیاز می‌باشد، به عنوان روش مکمل IP در اکتشاف ذخایر فلزی به کار گرفته می‌شود (مصطفائی و همکاران، ۱۳۸۹). با توجه به اهمیت منطقه گنهران از دید اکتشاف ذخایر فلزی و توانایی روش‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت‌ویژه در مطالعات اکتشافی مرتبط با این گونه ذخایر به کمک مقایسه و ترکیب نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی و همچنین تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از نتایج ژئوفیزیکی، استفاده از این روش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲- روش مطالعه

به منظور انجام عملیات صحرایی، بررسی واحدهای سنگی و نمونه‌برداری از واحدهای آهک‌دولومیتی، کانی‌سازی‌های سطحی و زیرسطحی و مطالعه پهنه‌های دگرسان در ناحیه گنهران، نقشه زمین‌شناسی و

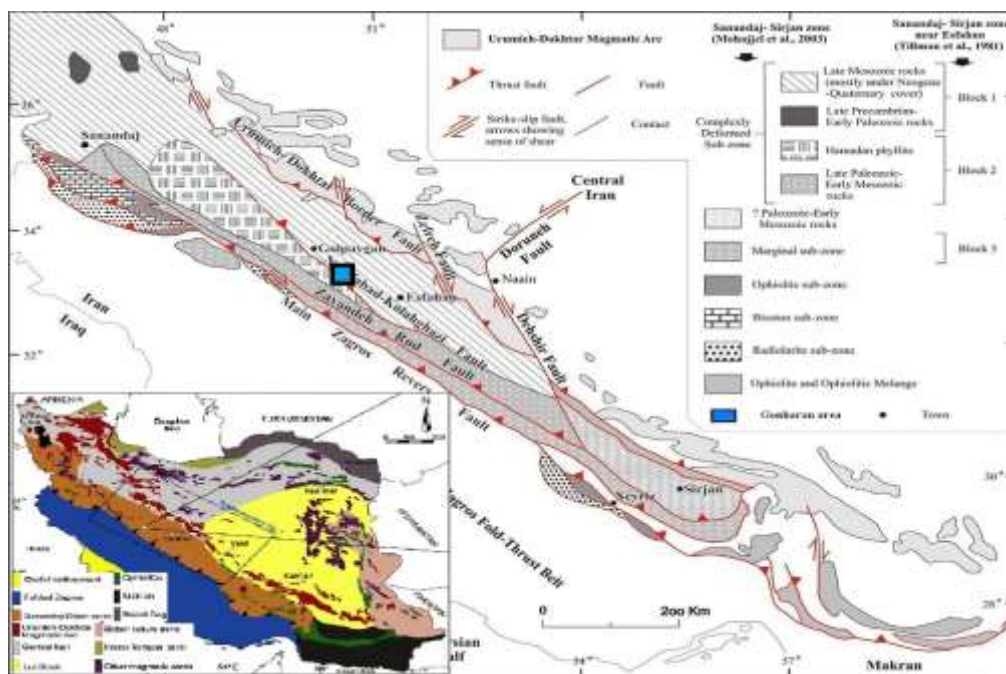
توپوگرافی ۱:۵۰۰۰ تهیه گردید. سپس به منظور انجام مطالعات زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌سازی و تعیین ژنز ماده معدنی تعداد ۱۸ مقطع نازک تهیه و مطالعه گردید. پس از آن با توجه به مطالعات اولیه زمین‌شناسی و شواهد کانی‌سازی در منطقه، عملیات صحرایی برداشت داده‌های IP و مقاومت ویژه به منظور شناسایی نواحی بی‌هنجار و بررسی عمقی آن‌ها صورت گرفت. با استفاده از نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی، محدوده‌هایی جهت حفاری با توجه به احتمال وجود کانه‌زایی سرب و روی پیشنهاد شد.

۳- زمین‌شناسی ناحیه ای

محدوده اکتشافی سرب و روی گنهران با مختصات جغرافیایی طول ۴۷۱۴۷۱ و عرض ۳۶۴۹۶۵۱ در زون ۳۹ سیستم UTM، با وسعت ۱۰۴ هکتار، در فاصله هوایی ۲۶ کیلومتری شرق شهرستان داران و ۱،۵ کیلومتری غرب روستای گنهران در شمال غرب استان اصفهان و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چادگان قرار گرفته است (قاسمی و همکاران ۱۳۸۵). از دیدگاه زمین ریخت‌شناختی پهنه سنج-سیرجان را در نزدیک اصفهان به سه بلوک تقسیم کرده‌اند. هر بلوک با روند مشابه پهنه سنج سیرجان، توسط گسل‌های پی سنگی معکوس تا ترافشارشی بلوک مجاور خود جدا شده است (Nadimi and Conon, 2012; Mohajjel et al., 2000)، (ناکینی و همکاران، ۱۳۹۴). پهنه سنج-سیرجان از لحاظ تکامل زمین‌شناسی، وضعیت رسوب‌گذاری و ساختاری، از ویژگی‌های خاصی برخوردار بوده به طوری که در دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک ناپیوستگی‌هایی در توالی چینه‌ای آن دیده می‌شود (Agard et al., 2005; Ghasemi and Talbot., 2006; Mohajjel and fergusson., 2014). پهنه سنج-سیرجان دارای پی سنگ قاره‌ای بوده و در ادبیات زمین‌شناسی از این پهنه به عنوان حاشیه فعال خرد قاره ایران مرکزی یاد شده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته پهنه سنج-سیرجان، توسط گسل‌های پی سنگی معکوس تا ترافشارشی از بلوک مجاور خود جدا شده است (Tillman et al., 1981). محدوده اکتشافی گنهران در این زیر پهنه بندی، در بلوک شماره یک و نزدیکی مرز بلوک یک و دو قرار می‌گیرد. افشانه‌های گسل ترافشارشی نجف آباد-کلاه قاضی از این محدوده عبور کرده است. پهنه سنج-سیرجان را از دیدگاه دگرریختی شکل پذیر به زیر پهنه‌هایی با پی سنگ قاره ای و همچنین زیر پهنه‌های با خاستگاه پوسته اقیانوسی قرار می‌گیرد. سرب و روی ناحیه گنهران در این تقسیم‌بندی، در زیر پهنه دارای دگرریختی پیچیده جای می‌گیرد (شکل ۱- Mohajjel et al., 2003). کانسارهای سرب و روی کمربند فلززایی ملایر-اصفهان در پهنه سنج-سیرجان، در محیط کشتی و حوضه پشت کمانی کرتاسه زیرین تشکیل شده‌اند (Rajabi et al., 2019; Niroomand et al., 2019). این پهنه در واقع به صورت یک نوار ماگمایی-دگرگونی با روند شمال‌باختر-جنوب‌خاور بین پهنه‌های زاگرس و ایران مرکزی واقع و از سنج در شمال باختر تا سیرجان در جنوب خاور امتداد دارد. از نظر فلززایی می‌توان این پهنه را به سه بخش جنوبی، میانی و شمالی تقسیم‌بندی نمود. با توجه به قرارگیری محدوده معدنی گنهران در بخش میانی پهنه دگرگونی سنج-سیرجان، این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. از

محدوده گنهران توسط گسل معکوسی با روند شمال غرب- جنوب شرق و با شیب به سمت شمال شرق بر روی واحدهای جوانتر قرار گرفته است. در راستای گسل شواهدی از دولومیتی شدن و کریستالیزه شدن به صورت بخش‌های لنزی شکل مشاهده می‌شود. بخشی از کانه‌زایی محدوده گنهران در این سنگ میزبان رخ داده است. واحد K_1^{mlsh} با تناوبی از مارن، آهک آرژیلیکی و شیل با ضخامت‌های متغیر به رنگ کرم و به شدت متورق می‌باشد. مهم ترین واحد سنگی در محدوده گنهران به لحاظ کانه‌زایی واحد K_1^{ldi2} می‌باشد (شکل ۳). این واحد با ترکیب آهک خاکستری متوسط تا نازک لایه و با تورق شدید به همراه فسیل اربیتولین در بخش مرکزی محدوده گنهران رخنمون دارد. در بخش‌های از این واحد سیال کانه‌دار باعث دگرسانی اکسید آهن (هماتیتی، لیمونیتی) شده است. جوانترین واحد کرتاسه زیرین در محدوده گنهران، واحد نازک لایه، کرم رنگ با تناوبی از مارن-آهک آرژیلیکی (K_1^{ml}) می‌باشد.

دیدگاه ماگماتیسیم و فرایندهای ماگمایی در این بخش، توده‌های آذرین عمدتاً دارای ترکیب گرانیتی تا گرانودیوریتی هستند. سنگ‌های نفوذی که واحدهای رسوبی از جنس مارنی و شیلی کرتاسه را قطع کرده‌اند، کوچکتر بوده و ترکیب گرانیتی، دیوریتی تا گابرو دیوریتی دارند با توجه به همپوشانی بخش بزرگی از سندها-سیرجان میانی با محور سرب و روی دار ملایر-اصفهان، انتظار وجود کانه‌زایی نشانه‌های معدنی سرب و روی قابل پیش بینی می‌باشد، این کانسارها اغلب چینه‌کران بوده و به صورت لایه‌ای، رگه‌ای و عدسی شکل دیده می‌شوند. واحدهای سنگی محدوده مورد مطالعه در نقشه ژوراسیک و کرتاسه زیرین قرار گرفته است. واحد K_1^{D11} متشکل از آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ خاکستری تیره و تا قهوه‌ای تشکیل شده است. بیشترین گستردگی در بخش‌های شمال شرقی و شمال غرب روستای گنهران می‌باشد. آثار تورق و شکستگی در نقاط مختلف قابل مشاهده است. این واحد در بخش‌های شمالی



شکل ۱: موقعیت محدوده اکتشافی گنهران (مربع آبی رنگ) در بلوک شماره یک (Tillman et al., 1981) در زیر پهنه دارای دگرریختی پیچیده (Mohajjel et al., 2003)

سرب بوده و در مواردی با روی و مس همراه می‌باشد. باطله کانسار نیز به ترتیب فراوانی شامل دولومیت، سیلیس، کلسیت می‌باشد. (شکل ۲- A,B,C,D). سنگ میزبان ماده معدنی عمدتاً سنگ آهک توده‌ای و در مواردی نیز مقداری به داخل مارن و سنگ آهک آرژیلی ادامه یافته است.

کنترل کننده‌های تشکیل و تمرکز ماده معدنی، کنتاکت واحد سنگ آهک خاکستری ضخیم لایه با واحدهای سنگ آهک آرژیلیکی کرم رنگ و پهنه‌های دولومیتی-سیلیسی درون سنگ آهک توده‌ای است، که بر این اساس کنترل کننده‌های ساختاری و چینه‌ای در تشکیل و تمرکز ماده

۴- کانی‌سازی و دگرسانی محدوده اکتشافی گنهران

بر اساس مطالعات انجام شده، محدوده اکتشافی گنهران شامل کانسار سرب و روی با سنگ میزبان کربناته و بافت ماده معدنی دانه پراکنده، رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و لکه‌ای می‌باشد که بر طبق بررسی‌های صورت گرفته در حین برداشت‌های صحرایی، نمونه‌های دستی، پاراژنز عنصری کانی‌سازی شامل عناصر سرب، روی و مس و پاراژنز کانیایی آن نیز شامل کانی‌های گالن، اسفالریت، اسمیت زونیت، همی مورفیت، سروزیت، اکسیدسرب و مالاکیت می‌باشد. ماده معدنی اصلی این کانسار

معدنی موثر بوده است. بلورهای گالن داخل درز و شکاف‌ها و شکستگی‌ها به شکل رگچه‌ایی یا داخل حفرات به صورت لکه‌های پراکنده با بافت پرکننده فضای خالی مشاهده می‌شوند که فراوانی گالن حدود ۵٪ است. گاهی نیز مقادیر اندکی گالن دیده می‌شود که توسط سروزیت در حال جانشینی است (شکل ۲-۲-E). اسفالریت در بسیاری از موارد ذکر شده به این صورت که به مقدار بسیار اندک در برخی نمونه‌ها زیر ۲۰ میکرون به صورت پراکنده حضور دارد (شکل ۲-۲-F). گالن به عنوان کانی اصلی و مهم در منطقه با ابعاد ۲ میکرون تا ۱ میلی متر قابل مشاهده است. پیریت نیز با فراوانی کمتر ۱٪ و با ابعاد ۲ الی ۲۰۰ میکرون به صورت بلورهای خودشکل پراکنده در سنگ استقرار یافته است (شکل ۲-۲-G). گاهی بلورهای خودشکل پیریت توسط بلورهای گالن در بر گرفته شده و در عین حال گالن به صورت انکلوژون با ابعاد ۲ الی ۴۰ میکرون درون پیریت حضور دارد. (شکل ۲-۲-H). کانی‌سازی عمدتاً با پهنه‌های دگرسانی دولومیتی-سیلیسی همراه و با رگه‌های کلسیتی در ارتباط نمی‌باشند، مگر آنکه رگه کلسیتی با پهنه‌های دولومیتی-سیلیسی همپوشانی مکانی داشته باشد.

کنترل کننده‌های تشکیل و تمرکز ماده معدنی، پهنه‌های دولومیتی-سیلیسی درون سنگ آهک توده‌ای و محل تماس گسله واحد سنگ آهک خاکستری ضخیم لایه با واحدهای سنگ آهک آرژیلیکی کرم‌رنگ می‌باشند، بخش‌های دولومیتی‌شده کانه‌دار بیشتر با پهنه‌های گسلی معکوس در ارتباط هستند و روندی به تقریب موازی با گسل‌های معکوس و رگه‌های شکستگی دارند. بخش‌های دولومیتی‌شده ترد و شکننده بوده و بیشتر رگه‌های کانه‌دار آن‌ها به تقریب موازی با رگه‌های کششی و گسل‌های نرمال هستند.

راستای دسته رگه‌های کانه‌دار درترانشه‌ها N-S, NE-SW و NW-SE است. به لحاظ ساختاری، در ناحیه یک تاقدیس اصلی با روند WNW-ESE و میل محوری ESE و نزدیک به محل پلانژ آن قرار دارد. بخشی از ماده معدنی و دگرسانی همراه آن در فضای خالی موجود در محور تاقدیس تشکیل شده است. این کانی‌سازی می‌تواند در چند سطح تراز در امتداد محور چین تکرار شود. در ناحیه گنهران، ۳ تیپ دگرسانی رخ داده است، تیپ اول رگه‌ها و پهنه‌های کلسیت متبلور است که به تنهایی با کانی‌سازی همراه نمی‌باشد، مگر آنکه با پهنه‌های دولومیتی-سیلیسی همپوشانی مکانی داشته باشد. رگه‌ها و زون‌های کلسیت متبلور (اسپاریت) عمدتاً در واحد سنگ آهک اربیتولین دار ضخیم لایه رخ داده است بطوریکه وجود رگه-رگچه‌های کلسیتی از مشخصه‌های عمومی این واحد در چارک جنوب غرب محدوده اکتشافی می‌باشد. این رگه‌های کلسیتی تقریباً خالص می‌باشد، عمدتاً در زون‌های خرد شده مشاهده می‌شود، در هیچ مورد داخل آنها کانی‌سازی مشاهده نمی‌شود مگر آنکه داخل زون‌های دولومیتی-سیلیسی واقع شده باشند. در مواردی روند خاصی ندارند و درزه‌های سنگ را پر کرده‌اند و در مواردی روند عمومی آنها از روند گسل‌های همراه آنها تبعیت می‌کند. این تیپ دگرسانی بصورت رگچه‌ای از

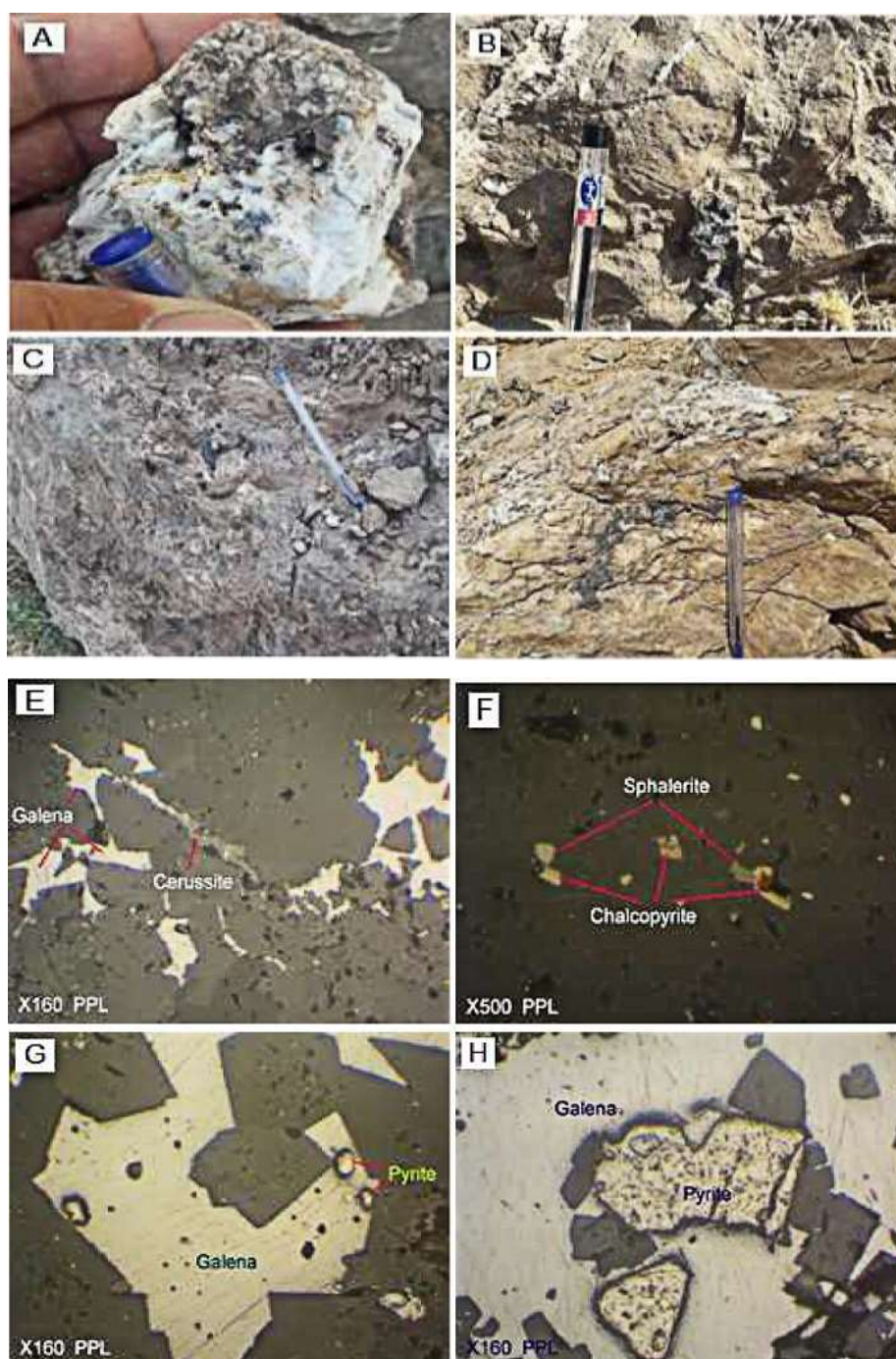
ویژگی عمومی واحد آهک اربیتولین دار است و در حالت رگه‌ای ضخامت کمتر از یک متر دارد. تیپ دوم پهنه‌های دولومیتی-سیلیسی به عنوان میزبان اصلی کانی‌سازی سرب، روی و مس در محدوده می‌باشد. این تیپ دگرسانی از لحاظ موقعیت چین‌های در کنتاکت واحدهای آهک اربیتولین دار و واحد سنگی متشکل از مارن و سنگ آهک غنی از رس می‌باشد که در داخل واحد آهک اربیتولین دار رخ داده است. در مواردی که این دگرسانی در واحد آهک اربیتولین دار رخ داده، محدوده دگرسان شده نسبت به سنگ دربرگیرنده مورفولوژی ملایم‌تر و پست را تشکیل می‌دهد. بر اساس بررسی‌های میدانی و مطالعات مقاطع نازک ترکیب کانی‌های اصلی این تیپ دگرسانی دولومیت، سیلیس، کلسیت و کانی‌های فرعی آن آلبیت، موسکویت و ایلیت می‌باشد. رخداد دولومیت بصورت فراگیر و سیلیسی بصورت فراگیر و درموردی رگه-رگچه‌ای است. روند عمومی این زون‌های دگرسانی در مواردی از روند کنتاکت‌ها و گسل‌های همراه آنها تبعیت می‌کند و در مواردی بنظر می‌رسد با گسل همراه نمی‌باشد. اکثر کانی‌سازی صورت گرفته در محدوده با این تیپ دگرسانی همراه می‌باشد بنابراین، از لحاظ اقتصادی فوق‌العاده ارزشمند هستند. کانی‌های اصلی این تیپ دگرسانی، دولومیت، کوارتز، کلسیت و کانی‌های فرعی و کمیاب آنها آلبیت، موسکویت و ایلیت می‌باشد. تیپ سوم تشکیل دولومیت در مقیاس میکروسکوپی در سنگ آهک بوده و مرتبط با کانی‌سازی نیست. علاوه بر دگرسانی سیلیسی-دولومیتی که در مقیاس ماکروسکوپی قابل مشاهده می‌باشد. در محدوده اکتشافی یک تیپ دیگر دولومیتی شدن نیز رخ داده است که فقط در مقیاس میکروسکوپی قابل مشاهده است، در این مورد بلورهای پراکنده دولومیت داخل واحد آهک اربیتولین دار و میان لایه‌های آهکی واحد متشکل از مارن تشکیل شده و در مواردی سنگ را تبدیل به آهک دولومیتی نموده است. این دولومیت نیز از نوع ثانویه است. این تیپ دولومیتی شدن ارزش اقتصادی ندارد چون با کانی‌سازی ارتباطی ندارد. سنگ میزبان ماده معدنی سنگ آهک توده‌ای و کنتاکت گسله این واحد با واحد مارن کرم‌رنگ و آهک آرژیلیکی می‌باشد.

۵- مطالعات ژئوفیزیکی

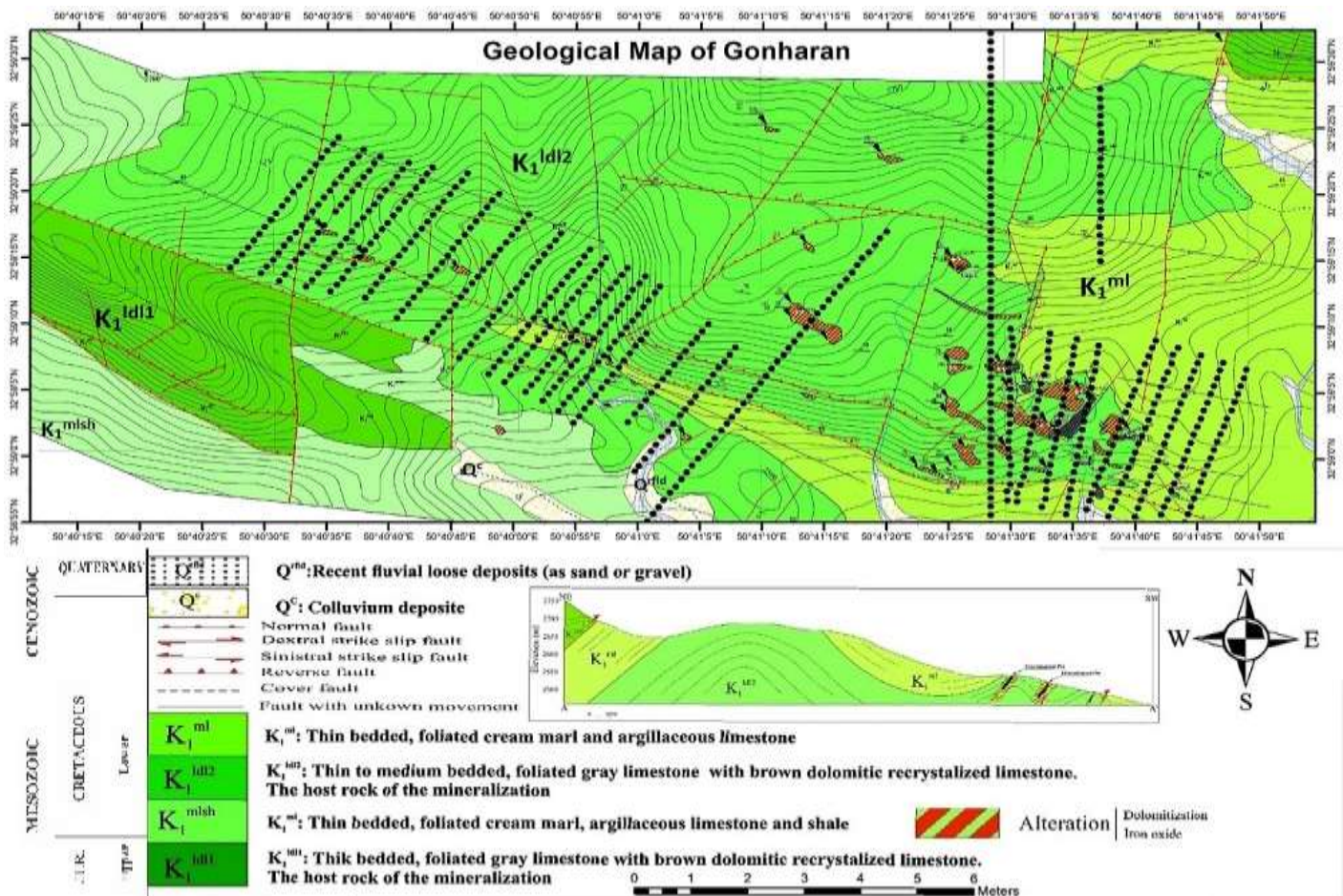
با توجه به شناسایی و بهره‌برداری اغلب کانسارهای سطحی در حال حاضر بیشتر فعالیت‌های اکتشافی بر روی کانسارهای پنهان و پوشیده متمرکز شده است، که به این منظور از روش‌های غیر مستقیم مانند ژئوفیزیک استفاده می‌گردد. قطبش القایی (IP) و مقاومت ویژه الکتریکی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی هستند، که در مرحله اکتشاف نیمه‌تفصیلی و تفصیلی جهت شناسایی محل کانی‌سازی سولفیدی و فلزی زیر سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش IP برای اکتشاف کانی‌های فلزی سولفیدی پورفیری بسیار مناسب بوده و کاربرد وسیعی در اکتشاف فلزات

با آرایش دوقطبی - دوقطبی در دو محدوده برداشت شد که کل نقاط برداشت شده در دو محدوده به روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه ظاهری ۳۳۱۳ ایستگاه می‌باشد. (شکل ۳). به منظور بررسی عمقی کانی‌سازی در منطقه، برداشت داده‌های IP و مقاومت ویژه در محدوده اول ۱۱ پروفیل و در محدوده دوم ۱۸ پروفیل بر روی محدوده‌های بی‌هنجار، با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی صورت گرفت. به همین منظور، تجزیه و تحلیل داده‌های خام صحرایی با استفاده از وارون‌سازی هموار داده‌های برداشت شده به کمک نرم‌افزار RES2DINV انجام شد و تفاسیر مربوط به هر پروفیل بر اساس نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی صورت گرفت. در بخش‌هایی که شکستگی در سنگ آهک موجب کاهش مقاومت ویژه شده و از طرفی تمرکز پلاریته داریم، استعداد کانی‌سازی بیشتر خواهد بود. در اینجا به علت شدت پلاریته بالای پروفیل ۴ از محدوده اول در بخش شرق و پروفیل ۱۵ از محدوده دوم در بخش غرب که به علت اختصار به ذکر این دو پروفیل بسنده می‌شود.

پایه دارد که عمق نفوذ آن به طور تقریبی از ۵۰ تا ۲۰۰ متری می‌باشد (Telford et al. 1990). از آنجا که مقاومت ویژه نیز از ویژگی‌های ذاتی سنگ‌ها و تشکیلات مختلف به شمار رفته و در شناخت وضعیت ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مورد نیاز می‌باشد، به عنوان روش مکمل IP در اکتشاف ذخایر فلزی به کار گرفته می‌شود. محدوده اکتشافی مورد مطالعه شامل دو محدوده می‌باشد که در محدوده اول ۱۱ پروفیل با فواصل ایستگاهی ۲۰ متر طراحی شد که از شرق به غرب از یک تا ۱۱ نامگذاری شده‌اند. همه پروفیل طولی حدود ۴۰۰ متر داشته ولی پروفیل ۱۰ به منظور بررسی عمق بیشتر و برداشت با فواصل الکترودی ۴۰ متر طول آن ۱۲۴۰ متر طراحی گردید. پنج پروفیل اول با آزمون ۲۰ درجه، چهار پروفیل بعدی با آزمون ۱۰ درجه و سه پروفیل آخر با امتداد شمالی - جنوبی انتخاب شد. در محدوده دوم در مجموع ۱۸ پروفیل با آزمون ۳۶ درجه طراحی شده که از غرب به شرق از یک تا ۱۸ نامگذاری شده‌اند. در طراحی پروفیل‌ها سعی شده که حتی الامکان امتداد پروفیل‌ها بر امتداد کانی‌سازی عمود باشند. در مجموع ۲۹ پروفیل



شکل ۲: تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی ناحیه گنهران. A- کانی‌سازی سرب با بافت پرکننده فضای خالی در یکی از محدوده‌های دگرسانی. B- رگچه‌های سیاه‌رنگ گالن همراه رگچه‌های سیلیسی در ناحیه دگرسانی. C- لکه‌های سیاه‌رنگ گالن اکسیده با بافت دانه پراکنده و شکاف پرکن در دیواره کار راکد (نگاه به شمال). D- کانی‌سازی گالن بصورت رگچه‌ای و شکاف پرکن E- جانشینی گالن توسط سروزیت. F- حضور اسفالریت به صورت پراکنده. G- حضور دانه‌های پیریت داخل کانی گالن. H- کریستال‌های اتومرف پیریت با ابعاد ۲ الی ۲۰۰ میکرون احاطه شده توسط گالن.



شکل ۳: موقعیت پروفیل‌ها بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱/۵۰۰۰ گنهران

مقاومت ویژه را در امتداد پروفیل ۴ که با نرم‌افزار Res2dinv ترسیم شده نشان می‌دهد. بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل دو زون مقاوم بارز که در هر حدود ایستگاه ۲۰۰ از هم جدا شده‌اند دیده می‌شود. زون جنوبی محدودتر بوده و ظاهراً به عمق بسته می‌شود. زون شمالی از ۲۲۰ شروع و عمقی حدود ۲۰ متر نشان می‌دهد که به عمق باز و گسترده شده است و همچنان به سمت شمال ادامه دارد. اما بر روی مدل پلاریته این پروفیل شدت بی‌هنجاری نسبت به پروفیل‌های قبلی بیشتر بوده و بی‌هنجاری پلاریته در عمق به صورت دو بخش جداگانه در هماهنگی با زون‌های مقاوم افزایش یافته است. لذا ایستگاه ۲۴۰ و ۱۶۰ بر روی این پروفیل برای حفاری عمقی تا عمق ۵۰ متر و بیشتر پیشنهاد می‌شود. تنها چیزی که این بخش‌ها را کمی متمایز می‌کند این است که زون دارای پلاریته بالا در زیر بخش مقاوم تمرکز بیشتری نشان می‌دهد به طوری که می‌توان بخش بالایی زون مقاوم را دارای پلاریته کمتر و بخش عمقی‌تر را دارای پلاریته بیشتر دانست (شکل ۶).

آرایش دایپل - دایپل بر روی پروفیل ۴

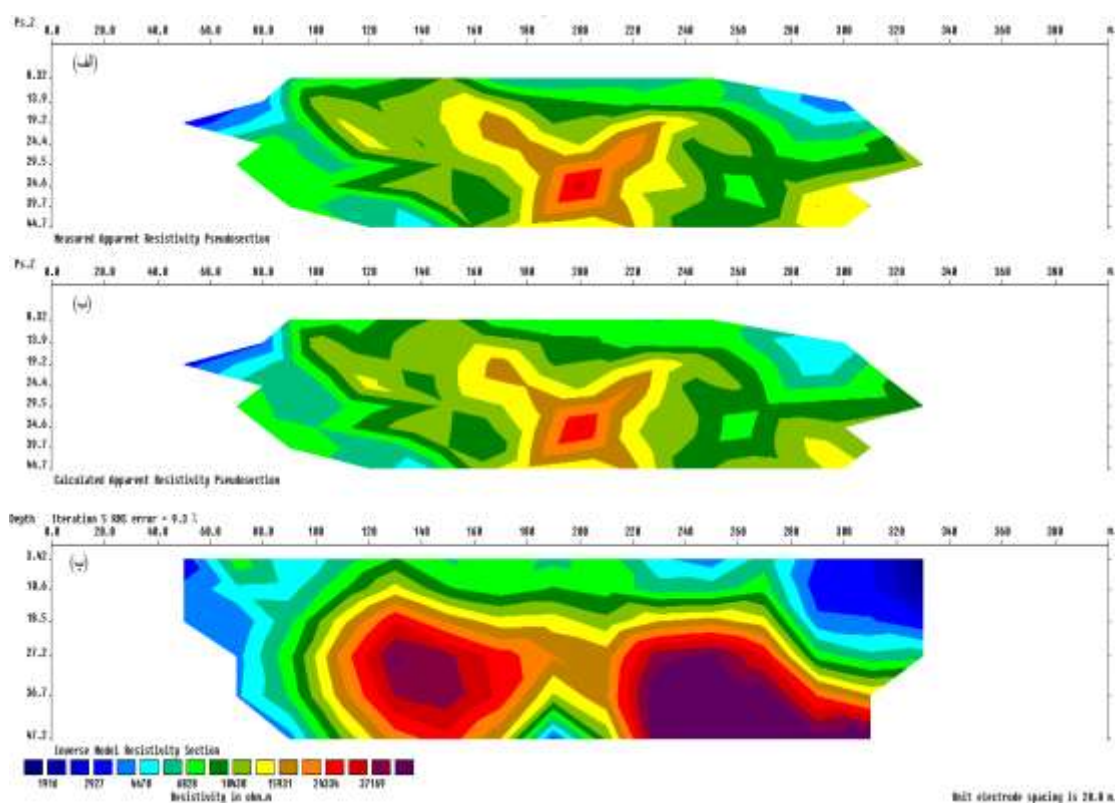
بر روی این مقطع برداشت‌ها با آزیموت ۲۰ درجه و فاصله الکترودی ۲۰ متر، پرش ۲۰ متر و حداکثر تا ۸ پرش ۲۰ متری برای الکترودهای پتانسیل انجام شده است. شروع این آرایش با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۲۰ و صفر در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته بطوریکه آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۸۰ و ۴۰۰ قرار گرفته است. به این ترتیب جمعاً ۱۰۶ نقطه بر روی این پروفیل برای دو پارامتر پلاریزاسیون القایی ظاهری بر حسب میلی ولت بر ولت (mv/v) و مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر ($\Omega.m$) اندازه‌گیری شده است.

(شکل ۴) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری را بر روی پروفیل ۴ به همراه مدل نشان می‌دهد. بیشترین مقدار برای مقاومت ویژه ظاهری ۳۸۵۵۰ و کمترین مقدار ۳۲۸۵۶ اهم متر برداشت شده است.

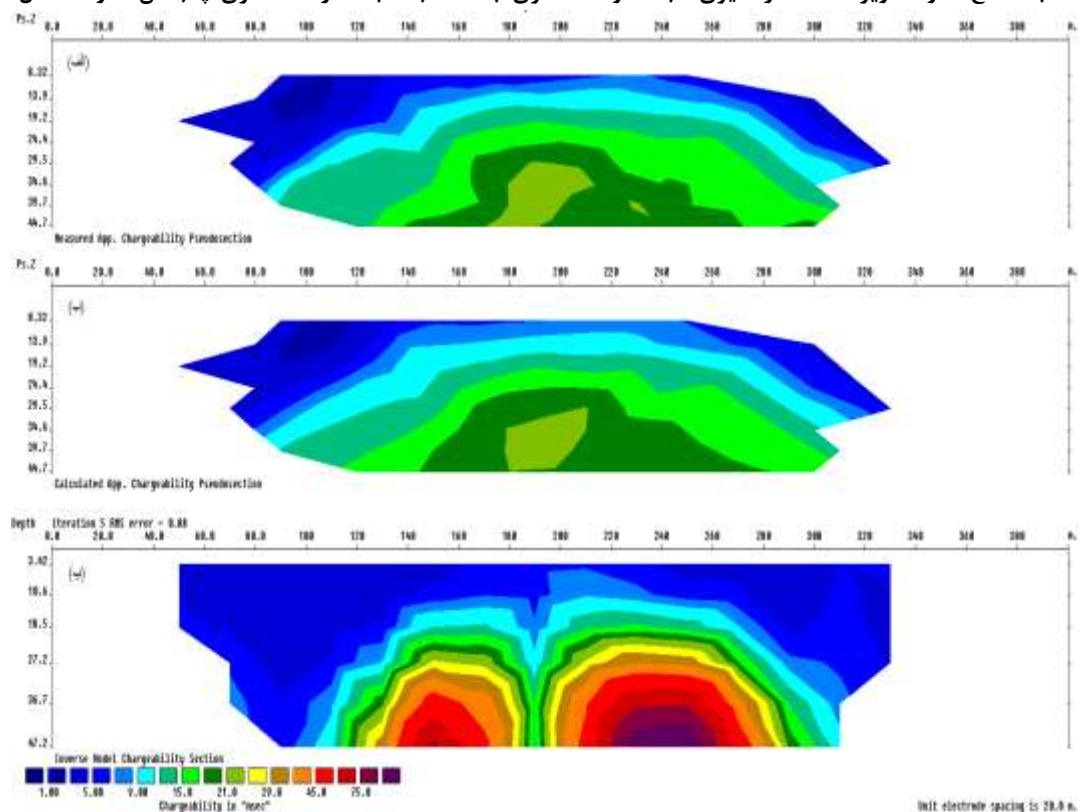
(شکل ۵) شبه مقطع پلاریزاسیون القایی ظاهری را بر روی پروفیل ۴ به همراه مدل نشان می‌دهد. بیشترین مقدار برای پلاریزاسیون القایی که بر روی این مقطع برداشت شده ۸۸٫۹ و کمترین مقدار ۳۹ میلی ولت بر ولت است.

نتایج بدست آمده از مدل‌سازی در این راستا مدل پلاریزاسیون القایی و

تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (IP/RS) و زمین‌شناسی محدوده اکتشافی سرب و روی گنهران (شرق شهرستان داران-استان اصفهان)، کرمی و همکاران، صفحات ۷۷-۹۲.

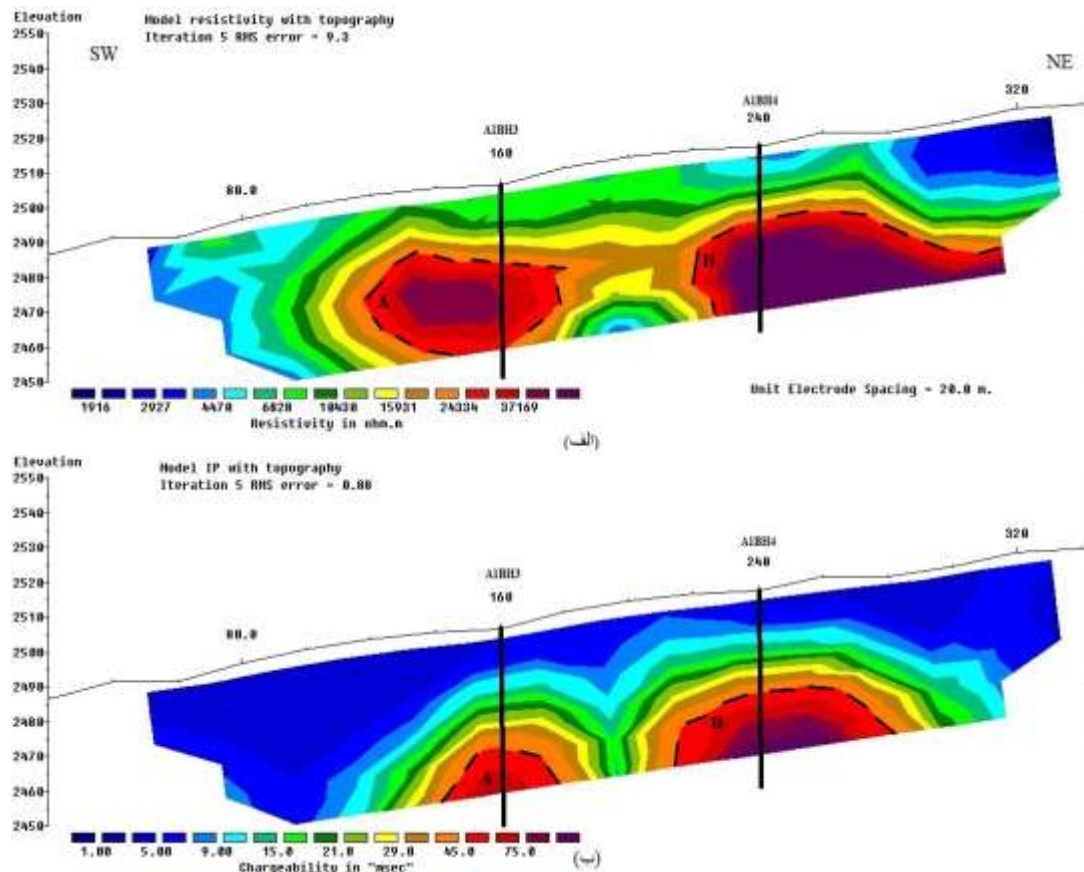


شکل ۴: شبه مقطع مقاومت ویژه (الف) اندازه گیری شبه مقاومت ظاهری (ب) محاسبه شبه مقاومت ظاهری (پ) بخش مقاومت مدل معکوس



شکل ۵: شبه مقطع پلاریزاسیون القایی (الف) اندازه گیری شبه پلاریزاسیون القایی (ب) محاسبه شبه مقطع (پ) بخش مدل معکوس پلاریزاسیون القایی

پروفیل شماره ۴



شکل ۶: نتایج مدل سازی داده های الف) مقاومت ویژه ب) بارپذیری با استفاده از نرم افزار RES2DINV در امتداد پروفیل ۴

ولت است. این مقادیر در هنگام اندازه‌گیری ثبت شده است و مقادیر بدست آمده از نتایج مدل سازی با این مقادیر متفاوت است.

نتایج بدست آمده از مدل سازی: در این راستا مدل پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه را در امتداد پروفیل ۱۵ که با نرم افزار Res2dinv ترسیم شده، نشان می‌دهد. بر روی مدل مقاومت ویژه پروفیل بخش مقاوم در سمت جنوب شامل توده های آهکی یا دولومیتی است که به سمت دره به عمق کشیده شده و روی آن توسط بخشی با مقاومت کم و رنگ آبی از ایستگاه ۶۰ تا ۱۴۰ پوشانده شده است. سپس میزان مقاومت در شمال در سطح تا عمق کم حدود ۲۰ متر تا انتهای پروفیل کشیده شده است. زیر این بخش مقاومت کم شده است.

بر روی مدل پلاریته در سمت جنوب در عمق منطبق با بخش‌های مقاوم، مقدار پلاریته افزایش یافته ولی در بخش شمال این پروفیل بی‌هنجاری با پلاریته نسبی بالا بسته شده است که منطبق با بخش با مقاومت کمتر است و احتمال فلزی بودن آن را تقویت می‌کند. این بخش از حدود ایستگاه ۱۴۰ شروع و در زیر بخش مقاوم تا ۲۰۰ ادامه یافته است (شکل ۹).

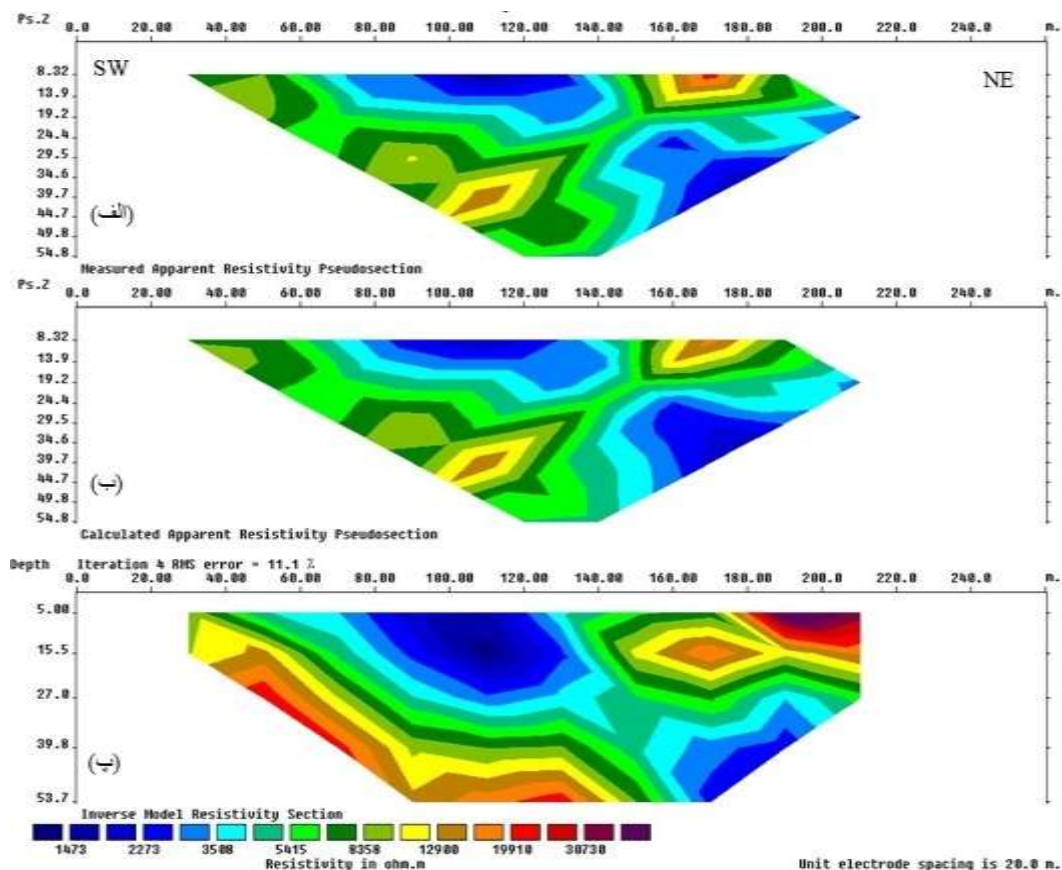
آرایش دایپل- دایپل بر روی پروفیل ۱۵

بر روی این مقطع نیز که دارای آزمون ۳۶ درجه است برداشت‌ها با فاصله الکترودی ۲۰ متر، پرش ۲۰ متر و تا ۸ پرش ۲۰ متری برای الکترودهای پتانسیل انجام شده است. شروع این آرایش با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۲۰ و صفر در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته بطوریکه آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۲۴۰ و ۲۶۰ قرار گرفته است. این پروفیل به دلیل صعب العبور بودن تا ایستگاه ۲۶۰ برداشت گردید. به این ترتیب جمعاً ۶۲ نقطه بر روی این پروفیل برای دو پارامتر پلاریزاسیون القایی ظاهری بر حسب میلی ولت بر ولت (mv/v) و مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر ($\Omega.m$) اندازه‌گیری شده است.

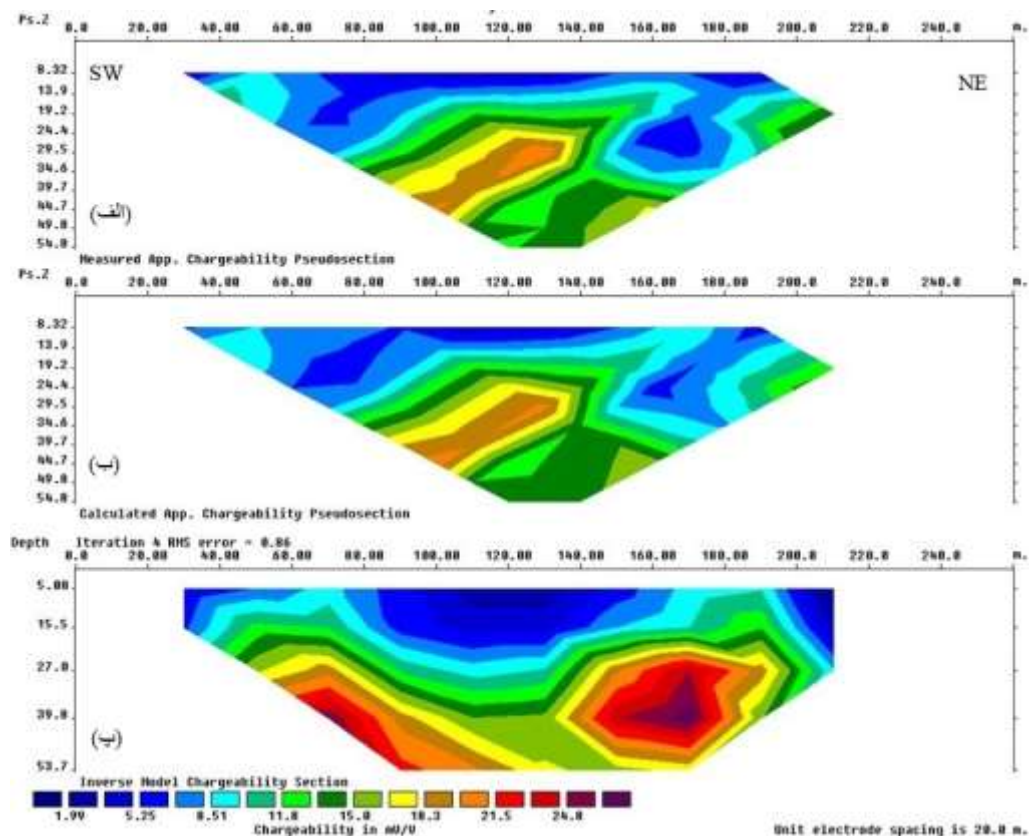
(شکل ۷) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری را بر روی پروفیل ۱۵ به همراه مدل نشان می‌دهد. بیشترین مقدار برای مقاومت ویژه ظاهری ۲۲۱۸۰ و کمترین مقدار ۱۵۶۱/۷ اهم متر برداشت شده است.

(شکل ۸) شبه مقطع پلاریزاسیون القایی ظاهری را بر روی پروفیل ۱۵ به همراه مدل نشان می‌دهد. بیشترین مقدار برای پلاریزاسیون القایی که بر روی این مقطع برداشت شده ۲۶/۳ و کمترین مقدار ۱۹/۸ میلی ولت بر

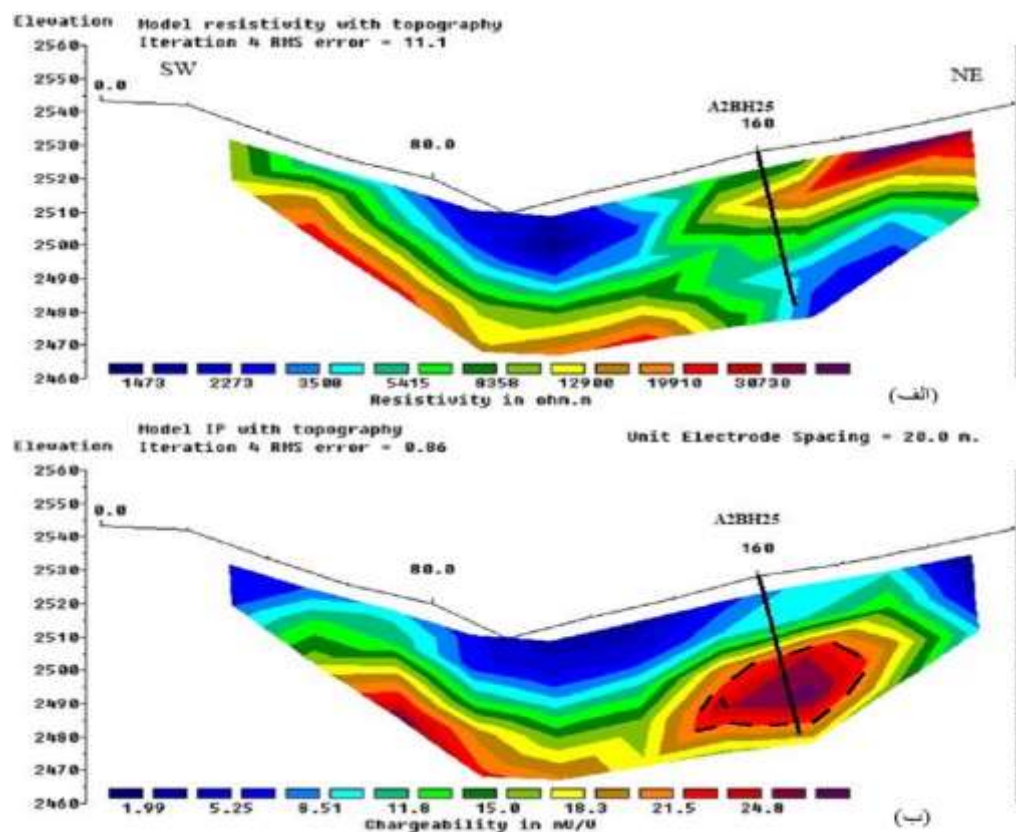
تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (IP/RS) و زمین‌شناسی محدوده اکتشافی سرب و روی گنهران (شرق شهرستان داران-استان اصفهان)، کرمی و همکاران، صفحات ۷۷-۹۲.



شکل ۷: شبه مقطع مقاومت الف) اندازه گیری شبه مقاومت ظاهری ب) محاسبه شبه مقاومت ظاهری پ) بخش مقاومت مدل معکوس



شکل ۸: شبه مقطع پلاریزاسیون القایی شبه مقطع پلاریزاسیون القایی الف) اندازه گیری شبه پلاریزاسیون القایی ب) محاسبه شبه مقطع پ) بخش مدل معکوس پلاریزاسیون القایی پروفیل شماره ۱۵



شکل ۹: نتایج مدل سازی داده های الف) مقاومت ویژه ب) بارپذیری با استفاده از نرم افزار RES2DINV در امتداد پروفیل ۱۵

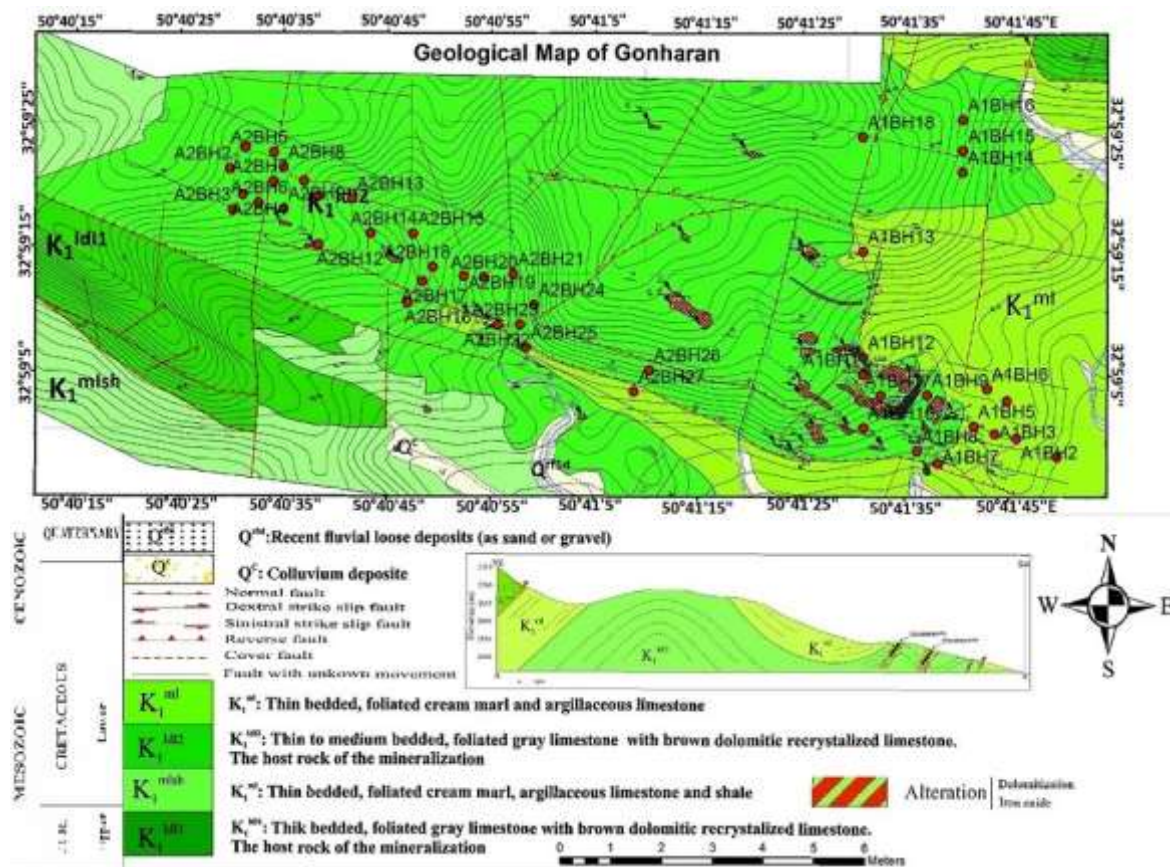
نتیجه گیری

شکندنده بوده و بیشتر رگه‌های کانه‌دار آنها به تقریب موازی با رگه‌های کششی و گسل‌های نرمال هستند. در این دو محدوده جمعا تعداد ۲۹ پروفیل بر اساس شرایط زمین‌شناسی و داده‌های موجود از منطقه با طول ۳۶۰ تا ۴۲۰ متر، حدود ۳۳۱۳ نقطه برداشت شده و محدوده‌ای به مساحت تقریبی ۲۰۰۰۰ متر مربع را پوشش قرار داده است. بعد از بررسی داده‌های ژئوفیزیکی و با بررسی‌های زمین‌شناسی و مشاهدات عینی تعداد ۴۵ نقطه را به منظور حفاری پیشنهاد شده است (جدول ۱) (شکل ۱۰). در نهایت بر اساس مطالعه انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به کانی‌سازی و ارتباط آن با ساختارهای گسلی و شکستگی در محدوده و همچنین انطباق مطالعات ژئوفیزیکی با اطلاعات زمین‌شناسی و کمک گرفتن از این اطلاعات در تفسیر نتایج مطالعات ژئوفیزیکی، موجب کاهش عدم قطعیت در پیشنهاد نقاط حفاری و همچنین احتمال افزایش کشف مناطق امید بخش در منطقه می‌شود. تلفیق لایه‌های داده‌های اکتشافی و دیتا بیس دقت تصمیم‌گیری را بهبود داده و از شخص مستقل کرده است. اولویت‌ها بر اساس نتایج ژئوفیزیک بوده و ممکن است با پیشرفت حفاری تغییر نماید که تعدادی از حفاری‌ها تنها بر اساس بی‌هنجاری IP پیشنهاد شده و ممکن است حاوی کانی‌سازی نباشد و تنها بخش‌هایی از سنگ دربرگیرنده باشد، اما چون از نظر ژئوفیزیکی نقاط دارای بی‌هنجاری می‌تواند دارای اهمیت باشد پیشنهاد به منظور حفاری در این نقاط ارائه شده است.

محدوده اکتشافی سرب و روی گنهران دارای سنگ میزبان کربناته است. سنگ میزبان ماده معدنی سنگ آهک توده‌ای کرتاسه آگازین (آلبین-آپتین) می‌باشد که از لحاظ چینه‌ای ماده معدنی داخل پهنه‌های دگرسانی سنگ آهک توده‌ای تشکیل شده است. هیچ توده نفوذی و سنگ آذرین تا فاصله چندین کیلومتری از آن رخنمون ندارد، بنابراین کانی‌سازی در ارتباط مستقیم با فعالیت‌های آذرین نمی‌باشد. در محدوده مورد مطالعه ماده معدنی شامل سرب، روی و بعضا مس است که به صورت کانی‌های گالن، اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت، سروزیت و باطله به ترتیب فراوانی شامل دولومیت، سیلیس و کلسیت می‌باشند. بافت ماده معدنی دانه پراکند، رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و لکه‌ای می‌باشد. کانی‌سازی عمدتا با دگرسانی دولومیتی-سیلیسی همراه می‌باشد و با رگه‌های کلسیتی در ارتباط نمی‌باشد مگر آنکه رگه کلسیتی با پهنه‌های دولومیتی-سیلیسی همپوشانی مکانی داشته باشد. کنترل‌کننده‌های تشکیل و تمرکز ماده معدنی، پهنه‌های دولومیتی-سیلیسی داخل سنگ آهک توده‌ای و کنتاکت گسله واحد سنگ آهک خاکستری ضخیم لایه تا توده‌ای و مارن با سنگ آهک متوسط لایه می‌باشد، بنابراین در تشکیل و تمرکز ماده معدنی هم کنترل‌کننده ساختاری و هم کنترل‌کننده چینه‌ای موثر بوده است، بخش‌های دولومیتی شده کانه‌دار بیشتر با پهنه‌های گسلی معکوس در ارتباط هستند و روندی به تقریب موازی با گسل‌های معکوس و رخ‌های شکستگی دارند. بخش‌های دولومیتی شده ترد و

جدول ۱: مختصات نقاط حفاری پیشنهاد شده

نام	X	Y	عمق حفاری	آزیموت (درجه)	زاویه (درجه)	نام	X	Y	عمق حفاری	آزیموت (درجه)	زاویه (درجه)
A1BH1	471595	3649444	60	-	0	A2BH6	469759	3650023	50	-	0
A1BH2	471502	3649486	50	-	0	A2BH7	469795	3650071	50	-	0
A1BH3	471452	3649496	50	-	0	A2BH8	469818	3650103	40	36	10
A1BH4	471480	3649571	50	-	0	A2BH9	469818	3650009	80	-	0
A1BH5	471404	3649513	50	-	0	A2BH10	469865	3650072	40	36	10
A1BH6	471435	3649598	50	-	0	A2BH11	469898	3650038	40	36	10
A1BH7	471321	3649429	50	10	10	A2BH12	469898	3649928	40	-	0
A1BH8	471274	3649457	50	10	10	A2BH13	469975	3650032	40	-	0
A1BH9	471297	3649584	50	-	0	A2BH14	470017	3649953	40	36	20
A1BH10	471150	3649510	50	-	0	A2BH15	470116	3649952	30	216	20
A1BH11	471150	3649630	50	-	0	A2BH16	470102	3649796	50	36	15
A1BH12	471150	3649670	50	-	0	A2BH17	470136	3649844	50	36	15
A1BH13	471150	3649910	50	-	0	A2BH18	470160	3649876	50	36	15
A1BH14	471380	3650090	50	-	0	A2BH19	470231	3649856	50	-	0
A1BH15	471380	3650139	50	-	0	A2BH20	470278	3649853	40	-	0
A1BH16	471381	3650209	50	-	0	A2BH21	470346	3649860	40	36	10
A1BH17	471190	3649583	50	-	0	A2BH22	470310	3649744	30	-	0
A1BH18	471151	3650170	30	-	0	A2BH23	470360	3649745	50	-	0
A2BH1	469731	3650148	50	36	20	A2BH24	470394	3649790	30	-	0
A2BH2	469695	3650100	50	-	0	A2BH25	470374	3649693	50	36	10
A2BH3	469700	3650007	40	-	0	A2BH26	470658	3649641	50	-	0
A2BH4	469723	3650041	40	-	0	A2BH27	470622	3649593	50	-	0
A2BH5	469795	3650137	40	-	0						



شکل ۱۰: موقعیت نقاط پیشنهادی حفاری محدوده اکتشافی گنهران

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان نامه دکتری نویسنده اول است. نویسندگان بر خود فرض لازم می دانند تا از حمایت های معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات و همچنین از زحمات مدیریت محترم شرکت آبتین معدن میدیا تقدیر و تشکر نمایند.

نقش آن در جایگاه ماده معدنی در معادن انجیره-وجین، تیران، باختر اصفهان. فصلنامه علوم زمین، سال ۲۴، شماره ۹۵، ص ۲۳۱-۲۴۲.

منابع

- مستطای، ک. نوروزی، غ. عسکری، م. ص. شیوا، م. (۱۳۸۹). "تحلیل آماری و مدل سازی داده های ژئوفیزیکی RS و IP اندیس معدنی همیچ"، اولین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، شهریور ۱۳۸۹.
- آقاباتی، س. ع.، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، تهران، ایران.
- پی جویی به روش اکتشاف ژئوشیمیایی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در محور گنهران-عسگران، شرکت مشاور توسعه علوم زمین، پژوهشکده سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- قاسمی، ع.، حاج حسینی، ف.، ابوالفضل، و محمد حسینی ۱۳۸۵. نقشه
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros, Iran: Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3), 401-419
- Alavi, M., 1994, Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations", *Tectonophysics*, 229, 211-238.
- Esmaili, Sevieri, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh
- زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چادگان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ناکینی، ع.، محجل، م. و یارمحمدی، ع.، ۱۳۹۴، الگوی چین خوردگی و

- belt. *Journal of Economic Geology*, 10(2), 677-706. (In Persian with English abstract).
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3), 263-278.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. *Journal of Earth Science*, 21, 397-412.
- Nadimi, A., Konon, A., 2012, Strike slip faulting in the central part of the Sanandaj-Sirjan Zone, Zagros Orogen, Iran. *Journal of Structural Geology*. NW Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8263-8275.
- Niroomand, S., Haghi, A., Rajabi, A., Tabbakh Shabani, A.A. and Song, U.C., 2019. Geology, isotope geochemistry, and fluid inclusion investigation of the Robat Zn-Pb-Ba deposit, Malayer-Esfahan metallogenic belt, southwestern Iran. *Ore Geology Review*, 112(1), 103040.
- Telford, W. Geldart L. & Sheriff R., 1990. *An Introduction to Applied Geophysics*, American Mineralogist, 95, 185-187.
- geophysical exploration of base metals in Victoria, geology survey of victoria report 119. Australian Society of Exploration Geophysics special. Publication, 11, 1-22
- Shafaroudi, A. and Mahboubi, A., 2019. Knowledge-driven Approach to Exploration of Carbonate Hosted Zinc and Lead Deposits, Case study: North Irankuh district, Isfahan – Iran. *Journal of Economic Geology*, 11(4): 565–602. (in Persian with English abstract)
- Ehya, F., Lotfi, M. and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn–Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2), 186-194
- Ghasemi, A. and Talbot, C., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Science*, 26(6), 683-693.
- Hou, Z. and Zhang, H., 2015. Geodynamics and formation of Irankuh-Emarat Pb-Zn MVT belt, Central Iran” by Mohammad Hassan Karimpour and Martiya Sadeghi. *Journal of Geochemical Exploration*, 205(1), 106346.
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30-50km: KEY to formation of Irankuh-Emarat PbZn MVT belt, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 194(1), 88-103.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Alaminia, Z., Esmaeili Sevieri, A. and Stern, C.R., 2019. New hypothesis on time and thermal gradient of subducted slab with emphasis on dolomitic and shale host rocks in formation of Pb-Zn deposits of Irankuh Ahangaran
- Tilman, J.E., Poosti, A., Rossello, S., A., 1981. Structural evolution of Sanandaj-Sirjan Ranges near Esfahan, Iran. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 65, 674-687.
- Willocks. A. j., Moore. D. H., 1999. *Geology and Zhou, B., 1992, Discussion on: "The use of Hartley transform in geophysical applications", R. Saatcilar, S. Ergintav, and N. Canitez, authors, Geophysics*, 57, 196–197.