

اکتشاف مس با استفاده از مطالعات زمین‌فیزیکی IP/RS در کانسار مس ورزق (خراسان جنوبی)

منصور عادلپور^۱، هوشنگ پورکاسب^۲

^۱ دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ عضو هیئت علمی، زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

نام نویسنده مسئول:

منصور عادلپور

چکیده

دسترسی به مواد معدنی اولیه یکی از ملزومات گام نهادن در شاهراه توسعه است. این در حالی است که منابع سهل‌الوصول سطحی رو به اتمام است. لذا بهره‌گیری از روش‌های نوین اکتشافی به‌منظور دستیابی به ذخایر عمیق‌تر گریز ناپذیر است. با توجه به دلایل فوق، در این مقاله سعی بر آن است تا با به کارگیری نتایج مطالعات زمین‌شناسی، ضمن تکمیل مطالعات مذکور، با استفاده از روش‌های نوین زمین‌فیزیک اکتشافی، موقعیت مکانی زون کانی‌سازی کانسار مس ورزق تعیین شود. کانسار مس ورزق در ۲۲ کیلومتری جنوب‌شرق شهرستان قائن در زون شرق‌ایران واقع شده است. سنگ‌های آتشفانی-کانسار مس ورزق به سن پالئوسن-ائوسن، شامل تنابوی از گدازه‌ها (آندزیت، تراکی آندزیت و تراکی آندزیت-بازالت) و مواد آذرآواری (انواع توف و آگلومرا) هستند. در این تحقیق، مطالعات ژئوفیزیکی به دو روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی در کانسار مس ورزق به اجرا درآمده است. مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی از جمله روش‌هایی هستند که در مرحله اکتشافات تفصیلی جهت شناسایی محل کانی‌سازی سولفیدی و فلزی زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات اولیه زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، بر احتمال وجود کانه‌های سولفیدی در این منطقه دلالت دارد. در این راست، هدف از انجام این مطالعه تعیین محدوده‌های بی هنجار، بررسی عمق و ضخامت پیکره‌های معدنی موجود و همچنین تعیین وضعیت پیوستگی پیکره‌ها و در نهایت تعیین نقاط مناسب برای حفاری اکتشافی می‌باشد. در این تحقیق با تحلیل آماری و مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌های مقاومت ویژه و باریزیتری پروفیل‌های برداشت شده در منطقه تفسیر شدند. بررسی‌های زمین‌فیزیک نشان می‌دهد کانی‌سازی بیشتر به صورت محدوده‌های کوچک و پراکنده است.

کلمات کلیدی: قطبش القایی، مقاومت ویژه الکتریکی، مدل‌سازی معکوس، کانسار مس ورزق.

مقدمه

تکامل تمدن بشر بر پایه وجود فلزات پایه مانند مس، آهن، سرب، روی و... بوده و چرخ تولید آنها را مواد انرژی زایی همچون نفت، گاز، زغال سنگ و اورانیوم به حرکت در می آورند؛ که همگی آنها از زمین استحصال می شوند. از آنجا که منابع سهل الوصول سطحی، به مرور با روش های ساده کشف شده و بهره برداری شده اند، برای تداوم تکامل، به کارگیری روش های جدیدتر برای رسیدن به منابع عمیق تر زیر زمینی ضروری است. امروزه صرفاً با به کارگیری اطلاعات زمین شناسی سطحی، نمی توان به منابع مدفون دست یافت؛ بلکه باید از روش های مکمل مانند زمین فیزیک اکتشافی نیز بهره برد. این روش ها ارزان و قابل اعتماد هستند و در بسیاری موارد، باعث کاهش رسیک بزرگ سرمایه گذاری می شوند. کانسال مس ورق به وسعت تقریبی 30° کیلومتر مربع در 22° جنوب شرق شهرستان قائن، در استان خراسان جنوبی، در محدوده ای با طول جغرافیایی $45^{\circ} 17' 59''$ شرقی تا $40^{\circ} 21' 59''$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 25' 33''$ شمالی تا $33^{\circ} 40' 22''$ شمالی قرار دارد. این منطقه در تقسیم بندی ساختاری ایران بخشی از پهنه ایران باشی محسوب می شود و در بلوک لوت واقع شده است [۱]. بلوک لوت به واسطه داشتن موقعیت های تکتونیکی مختلف در زمان های گذشته (مانند فروزانش و محیط کششی پس از برخورد [۲۵] دارای حجم عظیمی از فعالیت مagma می باشد [۱۰]. به دلیل وجود این فعالیت ها که از ژوراسیک آغاز و در ترشییری به اوج خود رسیده است، بلوک لوت دارای پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی سازی های مختلف می باشد که از این میان می توان به کانسال های زیر اشاره نمود: مس- طلای پورفیری مانند ماهرا آباد و خونیک [۱۵] و دهسلم [۴]، طلای اپی ترمال سولفید بالا مانند چاه شلغумی [۹]، طلای مرتبط با توده های نفوذی احیایی مانند هیرد [۱۱]، کانی سازی رگه ای پلی متال مانند سوراب [۱۳] و کانسال های IOCNG مانند قلعه زری و کوه زر [۱۶]. در محدوده مورد مطالعه، نتایج مطالعات زمین شیمیایی سطحی و برداشت های زمین شناسی در مقیاس ۱:۵۰۰۰ در دسترس بود، لذا هدف اصلی این است که با انجام مطالعات زمین فیزیک، در مناطق دارای بی هنجاری های زمین شیمیایی وسیع تر مس در صورت تایید پتانسیل کانی سازی با اطمینان بیشتری در خصوص ادامه فعالیت های اکتشافی برنامه ریزی نمود. از آنجا که زایش ماده معدنی در مناطق مجاور، عموماً ساخت سولفید رگه رگه و افسان از خود نشان می دهد، بهترین روش مطالعه زمین فیزیکی در این خصوص، روش قطبش القایی و مقاومت ویژه الکترونیکی است. شایان ذکر است که در پاره ای از موارد، بررسی های مغناطیس سنجی نیز بطور مکمل نتایج با ارزشی نشان می دهند که به دلیل عدم وجود امکانات در حین اجرای این پژوهش، به کار گرفته نشدند.

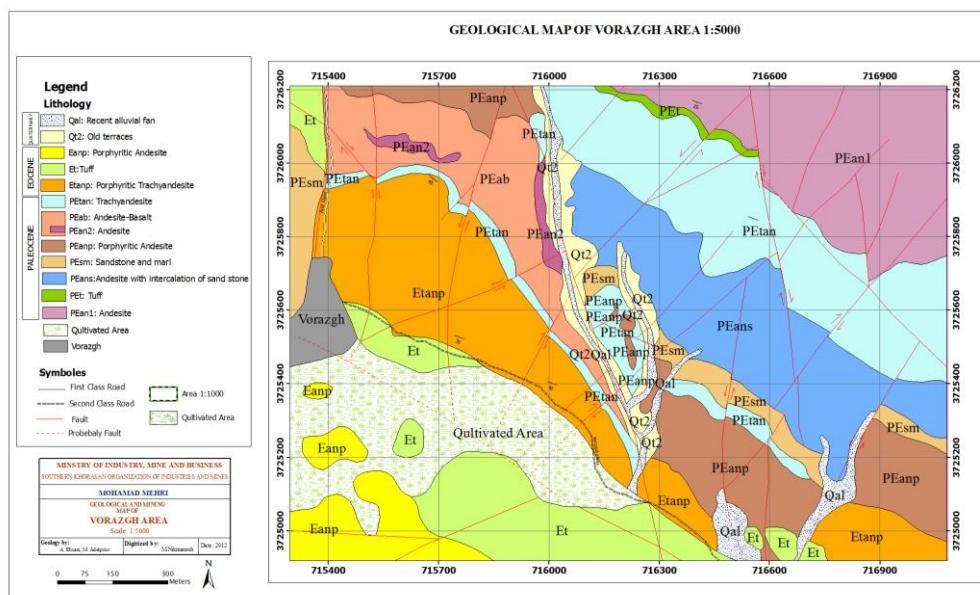
روش مطالعه

پس از بررسی های صحرایی، تعداد ۱۸ مقطع نازک جهت مطالعات سنگ شناسی و ۱۱ مقطع صیقلی جهت مطالعات مینرالوگرافی انتخاب گردید. همچنین داده های زمین فیزیکی IP/RS برداشت شده از منطقه ورق با نقشه های زمین شناسی و آلتراسیون انطباق داده شد و نتایج حاصل مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفت. پس از مطالعات مقدماتی و مشاهدات صحرایی انجام شده در محدوده اکتشافی، عملیات زمین فیزیکی به روش قطبش القایی و مقاومت ویژه انجام گرفت. عملیات اندازه گیری در مورد تعداد حدود 232° نقطه انجام شد. معیار زمین شناسی جهت تعیین این نقاط، رخمنو های سطحی بخش های کانه دار در محدوده بود که حداکثر حجم کارهای قدیمی نیز در امتداد همین بخش ها صورت گرفته است. در بررسی های زمین فیزیکی بکار گرفته شده در محدوده ورق از آرایه دوقطبی - دوقطبی استفاده گردید. به منظور پوشش منطقه، تعداد ۲ پروفیل دوقطبی - دوقطبی در فاصله جانبه 30° متر از یکدیگر پیاده شد. در این راستا و با توجه به تغییر روند زون کانی سازی دو پروفیل 1-DD و 2-DD با روند شمال شرق - جنوب غرب در محدوده مورد بررسی طراحی گردید.

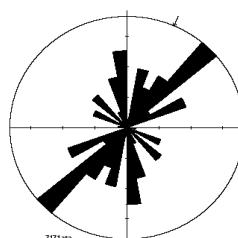
زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰.۰۰۰ ۱:۱۰۰.۰۰۰ ۱:۱۰۰.۰۰۰ قائن و قسمت مرکزی نقشه ۱:۱۰۰.۰۰۰ قائن، در بلوک لوت و کوه‌های خاوری ایران واقع شده است. سنگ‌های قدیمی‌تر از کرتاسه در محدوده مطالعه مشاهده نشده است. بر اساس نقشه ۱:۱۰۰.۰۰۰ قائن [۲] واحدهای سنگی که در این محدوده رخنمون دارند، از قدیم به جدید به شرح ذیل می‌باشند:

قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، سنگ آهک خاکستری رنگ فسیل‌دار است. رخنمون این واحد سنگی در قسمت اعظمی از جنوب محدوده و بخش‌هایی از غرب، شمال و شرق محدوده دیده می‌شود. مارن و ماسه سنگ با میان لایه‌های نازک آهکی با سن کرتاسه پایینی تا بالایی به صورت پراکنده در قسمت‌های شمالی، مرکزی و جنوبی محدوده رخنمون دارد. واحد توف سیز با سن پالئوسن-ائوسن، به رنگ سبز تا خاکستری و با لایه بندی ظرفی در قسمت مرکزی و غربی محدوده مشاهده می‌شود. واحد آندزیت مگاپورفیر در قسمت‌های مرکزی محدوده مورد مطالعه به رنگ خاکستری تیره تا خاکستری مایل به قهوه‌ای رخنمون دارد. واحد کنگلومرایی با سن پالئوسن پائینی در قسمت مرکزی و شمال محدوده دیده می‌شود. واحد آندزیت-آندزیت پورفیری در بخش شمال‌شرق، شرق، شمال‌غرب و قسمت‌هایی از مرکز محدوده رخنمون دارد. این واحد سنگی غالباً از گدازه‌های آندزیتی که برخی پورفیری هستند با بلورهای آمفیبول به رنگ خاکستری تا سبز مایل به قهوه‌ای تشکیل شده است. واحد مارن و ماسه سنگ ژیپس دار در قسمت‌های مرکزی و شرقی محدوده، به صورت پراکنده رخنمون دارد و متشکل از ماسه سنگ‌توفی، سیلت سنگ، آرژیلیت، مارن و ژیپس است. دایک‌های آندزیتی-آندزیتی با سن ایوسن بالایی در مرکز محدوده رخنمون یافته‌اند. در این راستا برای تفکیک بهتر واحدها بهویژه واحدهای آتش‌شانی در محدوده مطالعه اقدام به تهیه نقشه با مقیاس ۱:۵۰۰۰ در محدوده موردنظر پژوهش گردید (شکل ۱). بررسی گسل‌های اصلی و فرعی، حضور دو سیستم گسلی را در منطقه نشان می‌دهد: ۱- شمال‌غرب-جنوب‌شرق و ۲- شمال‌شرق-جنوب‌غرب (شکل ۲). به نظر می‌رسد که اصلی‌ترین بخش کانه‌دار منطقه ورزق، در محل تقاطع گسل‌ها قرار دارد.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی کانسار ورزق با مقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شده در مطالعه حاضر



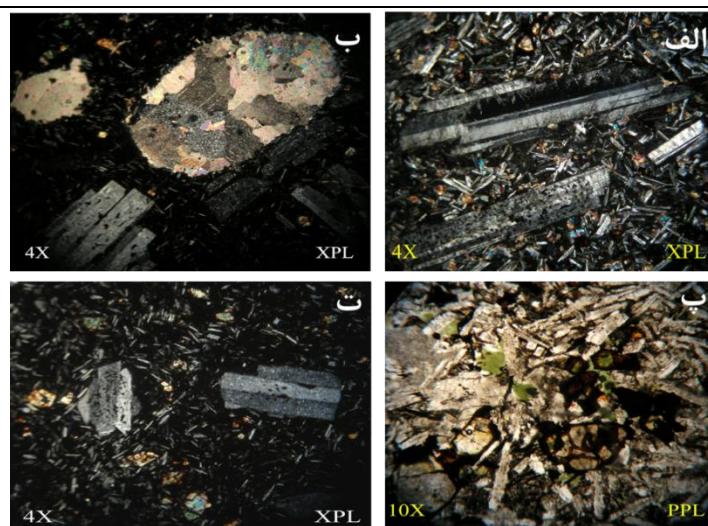
شکل ۲: دیاگرام گل‌سرخی ترسیم شده برای گسل‌های محدوده ورزق

سنگ نگاری و کانی شناسی سنگ‌های آتشفسانی

سنگ‌های آتشفسانی محدوده مورد مطالعه دارای ترکیب حدواسط بوده و به صورت گدازه و آذرآواری در سطح زمین دیده می‌شوند. مطالعات سنگ شناسی نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفسانی ترکیبی از آندزیت، آندزیت پورفیری، آندزیت مگاپورفیری، تراکی آندزیت، آندزیت-باالت و سنگ‌های آذرآواری شامل آگلومرا و انواع توفها دارند (شکل ۳). پلازیوکلاز، پیروکسن و الیوین مهمترین فنوکریستهای این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. فنوکریستهای پلازیوکلاز اغلب سالم و غیردگرسان هستند و در آنها بافت غربالی و ماکل آلبیت-کارلسbad مشاهده می‌شود. این پلازیوکلازها به صورت میکرولیت‌های ریز و فنوکریستهای درشت و خودشکل متبلور شده‌اند. فنوکریستهای پلازیوکلاز در سنگ‌های منطقه از نظر بافتی به دو گروه قابل تقسیم‌اند؛ گروهی بافت غربالی دارند و گروهی فاقد آن هستند. در پلازیوکلازهای واحد بافت غربالی، یا در تمام قسمت‌های کانی بافت غربالی به صورت فراغیر توزیع شده و یا فقط در قسمت‌های مرکزی بلور متتمرکز شده است. بافت غربالی دانه درشت در شرایط تحت اشباع از آب و نرخ کاهش فشار متوسط رخ می‌دهد [۲۱]. وجود هم‌zman پلازیوکلازهای نرمال و پلازیوکلازهای دارای بافت غربالی نمی‌تواند فقط به دلیل برداشته شدن فشار تشکیل شده باشد. به همین دلیل اختلاط با یک مagma آبدار و داغ‌تر برای تشکیل بافت غربالی لازم است [۱۲]. استوارت و پیرس [۱۹] معتقدند که ناپایداری بلورهای پلازیوکلاز در حین حرکت سریع magma به سمت بالا باعث پیدایش بافت غربالی در پلازیوکلاز می‌شود. چرا که بعضی از قسمت‌های پلازیوکلاز بطور بخشی ذوب می‌شود و محصولات ناشی از ذوب پلازیوکلاز در داخل پلازیوکلاز شروع به تبلور می‌نمایند. کانی‌های مافیک به دو صورت پیروکسن و الیوین در نمونه‌ها حضور دارند و حدوداً ۱۰٪ از فنوکریستهای سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. پیروکسن کانی فرومیزین اصلی این نمونه‌های است؛ که به صورت فنوکریستهای درشت و خودشکل در نمونه متبلور شده است. اغلب بلورهای الیوین به کلریت و اکسیدهای آهن تجزیه شده‌اند. بطوری که در برخی نمونه‌ها، تنها قالب‌های دروغین الیوین قابل تشخیص هستند. فراوان ترین کانی ثانویه موجود در حفرات و رگه‌های موجود در سنگ کلریت، کوارتز و کلسیت است. از دیگر کانی‌های ثانویه می‌توان به اکسیدهای آهن، کانی‌های فیلوسیلیکاته، کانی‌های تیره، آلبیت، کانی‌های رسی، زئولیت، ایدنگیت، بولنژیت و سرپانتین اشاره کرد (شکل ۴).



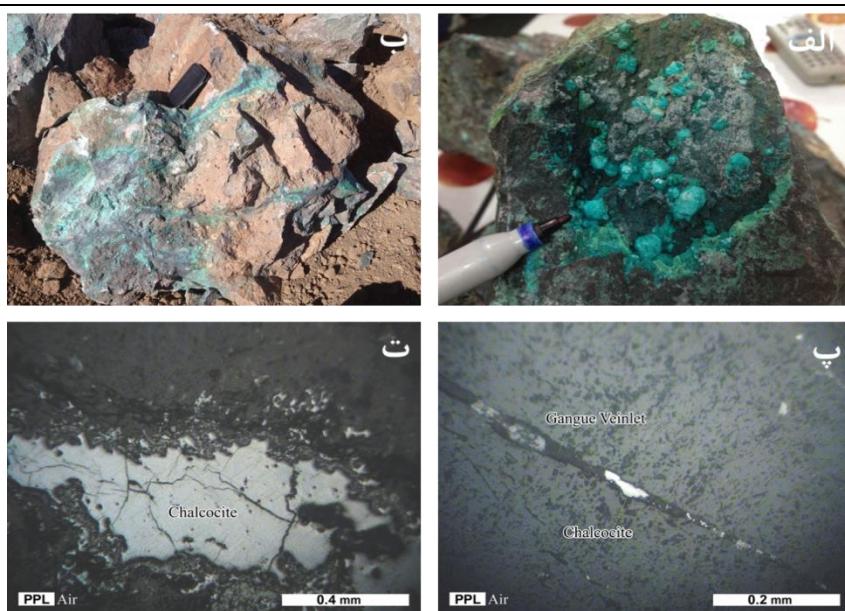
شکل ۳: دورنمای محدوده مورد مطالعه که در آن واحد آهکی و واحد آندزیت خاکستری رنگ نشان داده شده است (دید عکس به سمت شمال غرب)



شکل ۴: الف: در این شکل دو نوع پلازیوکلاز مشاهده می‌شود. بلور پلازیوکلازی که در بخش پائینی شکل وجود دارد و دارای بافت غربالی است و بلور پلازیوکلاز که در قسمت بالای شکل واقع است و از حاشیه به سریسیت دگرسان شده است. در حد فاصل بین دو فنوكریست پلازیوکلاز، میکرولیت‌های پلازیوکلاز زمینه همراه با بلورهای ریز کلینوپیروسن بافت اینترسرتال تشکیل داده‌اند؛ ب: حفرات پر شده با کربنات همراه با نمایی از فنوكریست پلازیوکلاز که دارای بافت غربالی می‌باشد؛ پ: دگرسانی الیون. بلورهای الیون از حاشیه به ایندگریست دگرسان شده‌اند و قسمت‌های مرکزی آن‌ها به کلریت تبدیل گشته‌اند؛ ت: پلازیوکلاز سمت راست به سریسیت دگرسان شده است و پلازیوکلاز سمت چپ دارای بافت غربالی است. زمینه از میکرولیت‌های پلازیوکلاز تشکیل شده است.

شیوه تشکیل کانسار مس ورزق

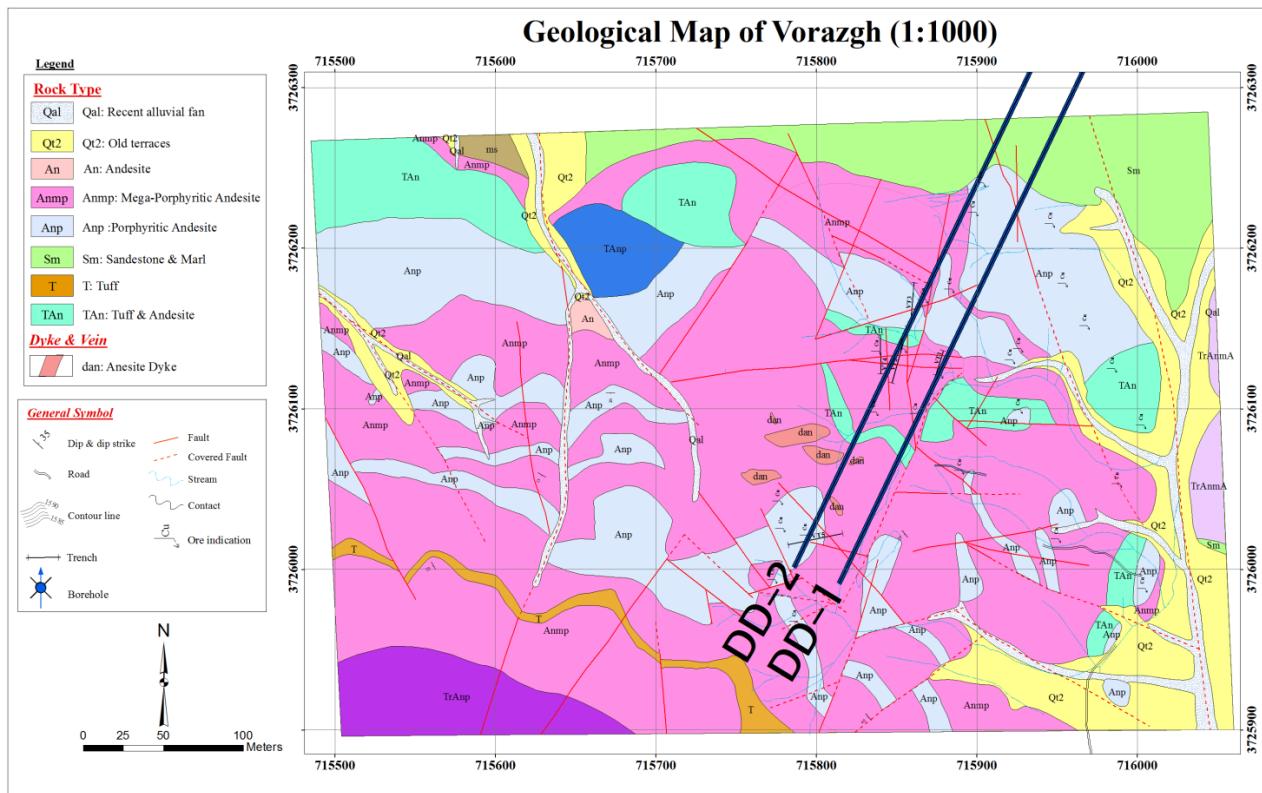
کانه‌زایی مس در کانسار مس ورزق با میزبانی سنگ‌های آتشفسانی و مواد آذرآواری به سن پالئوسن- ائوسن زیرین صورت گرفته است. بافت غالب در این کانسار، بافت پورفیری، آمیگدالوئیدال و جریانی است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته کانه‌زایی مس پس از تشکیل سنگ‌میزبان خود، شکل گرفته است. یعنی ماگمایی غنی از مس حین صعود از زون فرومانتش، به سطح زمین برخورد کرده است و مجموعه ای از سنگ‌های آتشفسانی با ترکیب حدواسط تا بازیک به صورت گدازه و آذرآواری در سطح زمین ایجاد کرده است که میزبان کانه‌زایی مس می‌باشدند. پرمایه بودن گدازه از سیالات فرار و برخورد آن با سطح باعث ایجاد بافت پورفیری و آمیگدالوئیدال گشته است. سنگ‌های آتشفسانی میزبان کانی‌سازی، دگرسانی گرمابی را تحمل کرده‌اند. شدت دگرسانی در سنگ‌های آتشفسانی میزبان کانی‌سازی و سنگ‌های آتشفسانی بدون کانی‌سازی متفاوت است. بدان معنی که با فاصله گرفتن از زون کانه‌دار از شدت دگرسانی کاسته می‌شود. عملکردگسل‌ها و شکستگی‌های فراوان در سنگ‌های منطقه از عوامل مهم تسهیل دگرسانی گرمابی در آنها می‌باشد. در این منطقه غنی‌سازی برونزاد مرتبط با هوازدگی سطحی، عامل مهمی در کانه‌زایی به شمار نمی‌آید و تنها در بخش اکسیداسیون، کانی‌های کربناته مس همچون مالاکیت و آزوریت تشکیل می‌شوند. عموماً زون کانه‌زا در بالاترین تراز گدازه‌های آتشفسانی قرار می‌گیرد؛ در نتیجه ماده معدنی به صورت چینه‌کران است. چینه و پیشگی در کانسارات‌های شمال شیلی نیز دیده می‌شود. به اعتقاد بوریک چینه خصیصه‌ای نشانگر ایپی ژنتیک بودن این ذخایر است [۵]. در محدوده مورد مطالعه، کانه اصلی مس کالکوست می‌باشد. بطورکلی، براساس مطالعات میکروسکوپی و مشاهدات صحرایی، کانه‌سازی در ورزق، بیشتر به دوگونه رگره‌گچه‌ای و افشار دیده می‌شود. در مقیاس صحرایی علاوه بر کانی‌های کربناته مس (آزوریت و مالاکیت) که قابل شناسایی هستند، رگره‌های سولفیدی سیاه رنگی نیز دیده می‌شود. هنگامی که این رگره‌ها زیر میکروسکوپ مطالعه می‌شوند، مشخص می‌شود که کانی کالکوست بیشینه سهم را از این رگره‌ها، به خود اختصاص داده است. مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع تهیه شده در نواحی سولفیدی نشانگر آن است که کانه زایی اولیه به صورت رگره‌گچه، افشار و پرکننده فضاهای باز می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵: الف: بادامک های پر شده توسط ملاکیت در آندزیت مگاپورفیر؛ ب: کانه زایی رگه ای کالکوسیت در واحد تراکی آندزیت؛ پ: عکس میکروسکوپی از رگچه حاوی کالکوسیت؛ ت: کانه کالکوسیت به صورت منفرد در واحد ولکانیکی واحد کانه زایی مس

مطالعات زمین‌فیزیکی

با در نظر گرفتن عوامل زمین‌شناسخی، اطلاعات جمع‌آوری شده از گذشته و فرآیندهای اجرایی، دو پروفیل به فاصله تقریبی ۳۰ متر پیاده شد. مشخصات کلی شبکه برداشت به این صورت است که ابتدا موازی با بیرون زدگی ماده معدنی و یا بطور کلی، موازی با روند بی‌هنگاری ظاهری بر روی زمین خطی به عنوان خط مبنا تعیین می‌گردد. برداشت‌ها عمود بر این خط و به عبارتی عمود بر روند عمومی زون کانی‌سازی انجام می‌شود. در این راستا و با توجه به روند زون کانی‌سازی دو پروفیل DD-1,2 با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب به اجرا در آمد (شکل ۶) (به‌دلیل محدودیت، در ادامه تنها نتایج بررسی های مربوط به پروفیل DD-1 ارائه می‌شود). آرایش دوقطبی- دوقطبی با فاصله دوقطبی بیست متری هشت گام انتخاب شد، چرا که در گام‌های بالاتر از هشت، نسبت سیگنال به نویه به شدت افت می‌کند و در عمل آنچه در برداشت‌های با گام‌های بالاتر ثبت می‌شود، مقادیر نویه است [۱۴] با انتخاب این پارامترها، عمق بررسی به ۸۰ تا ۹۰ متر می‌رسد. اما از آنجا که نتایج خام در اندازه‌گیری‌های زمین‌کتریک نمی‌توانند هیچ‌گونه اطلاعات کمی درباره عمق یا توزیع مقاومت‌های ویژه‌الکتریکی در زیرزمین بیان کنند، لذا مدل‌سازی داده‌ها اجتناب ناپذیر است [۲۳]. در زمین‌فیزیک و علوم وابسته برداشت‌ها به صورت سامان-مند و در شرایط کنترل شده انجام می‌شود و نتایج این برداشت‌ها، به صورت مقادیر عددی ارائه می‌شوند. این مشاهدات را داده‌های تجربی یا مشاهده‌ای می‌نامند. برای هر نوع نتیجه‌گیری از این داده‌ها، باید رابطه بین توزیع خواص فیزیکی سامانه مورد مطالعه (زمین) و پاسخ زمین-فیزیکی قابل مشاهده معلوم شود. دستگاه معادلاتی که این رابطه را نشان می‌دهد، نظریه مستقیم (مدل‌سازی پیشرو) نامیده می‌شود. استنباط خواص فیزیکی سامانه مورد مطالعه از روی داده‌های مشاهده‌ای، یک روند معکوس است و ابزار کمی مورد نیاز برای رسیدن به آن، نظریه معکوس (مدل‌سازی معکوس) خوانده می‌شود [۱۴]. ورودی مدل‌سازی پیشرو، پارامترهای مدل است که با انجام محاسبات بر روی این پارامترها، پاسخ محاسبه شده یا معادل مصنوعی داده‌ها، بعنوان خروجی دریافت می‌شود. در روش مدل‌سازی پیشرو، با استفاده از روش‌های عددی تفاضل محدود، تحلیل شبکه، اجرای محدود و معادله انتگرال، مدل‌ها تفسیر می‌شوند. از آنجا که روش‌های مدل‌سازی پیشرو کند و ضعیف هستند، برای کاهش ریسک عملیات اکتشاف مدل‌سازی های قدرتمند و سریع معکوس‌سازی جایگاه ویژه‌ای در مسائل زمین‌فیزیکی یافته است. ورودی مدل‌سازی معکوس داده‌های مشاهده‌ای است که با انجام محاسبات مربوط به نظریه معکوس‌سازی بر روی آنها پارامترهای مدل به عنوان خروجی دریافت می‌شود [۱۴].



شکل ۶ موقعیت آرایه‌های دوقطبی – دوقطبی اجرا شده محدوده اکتشافی ورزق (مقیاس نقشه ۱:۱۰۰۰)

مدل سازی معکوس هموار

یکی از روش‌های مناسب برای معکوس‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده، اعمال شرایط هموار است [۱۴]. این روش، راهی ساده و ارزان برای حل مسائل ناپایدار یا مسائل با داده‌های کم است و در عین حال، آنگر محدودیت‌های اولیه یا مدل اولیه در دسترس نباشد، بهترین است [۲۴]. در فرمول‌بندی مسائل معکوس‌سازی هموار، مطلوب آن است که پارامترهای مدل نسبت به مکان، تغییرات کمی همراه داشته باشند [۱۴]. در اینصورت می‌توان اختلاف بین پارامترهای مجاور را کمینه کرد.

این روش بر اساس رابطه زیر استوار است:

$$(j^T j + uF)d = T_g^F$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad \text{که در آن:}$$

در جائیکه:

f_z : فیلتر نرم‌سازی افقی f_x : فیلتر نرم‌سازی عمودی

J : ماتریس ژاکوبین مشتق‌های جزئی F : ماتریس هموارساز

d : فاکتور کنترل نوسان

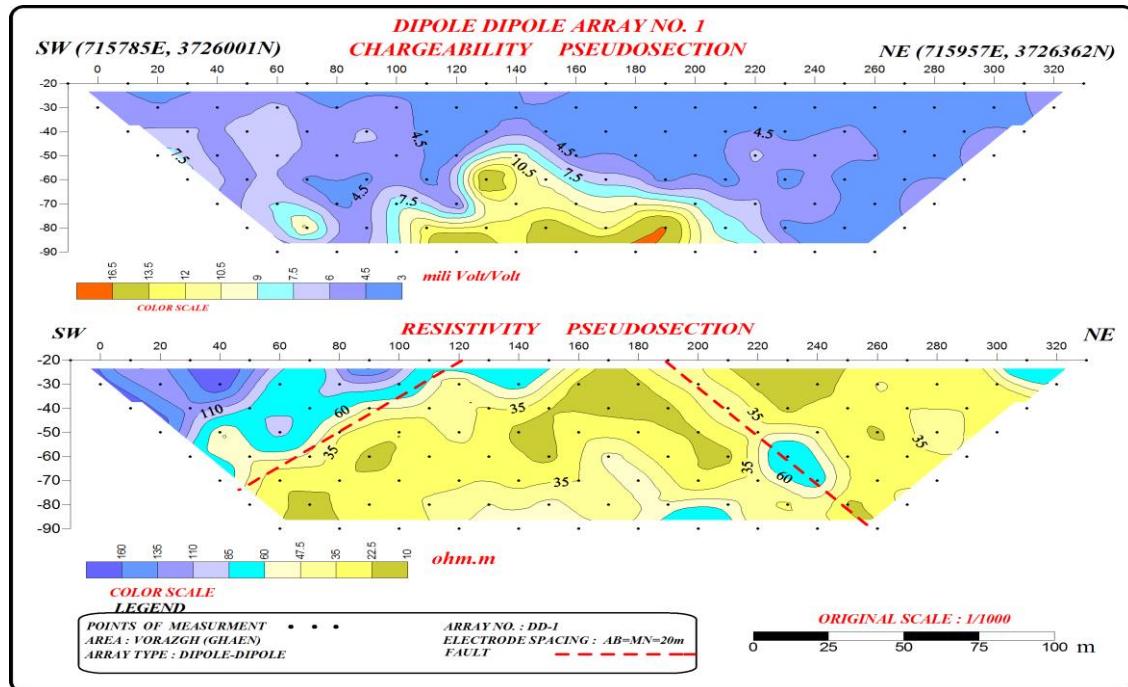
u : بردار اختلاف

g : بردار مقاومت

بردار اختلاف g، شامل اختلاف بین مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده و محاسبه شده است. مدل دو بعدی مورد استفاده قرار گرفته توسط نرم‌افزار RES2DINV، فضای زیر سطحی را به تعداد معینی بلوک مستطیلی تقسیم می‌کند. منظور از این عمل، تعیین کردن مقدار مقاومت ویژه و قطبش القایی برای هر کدام از بلوک‌های مستطیلی است. بطوری که بتواند یک شبکه مقطع مقاومت ویژه ظاهری و قطبش القایی را که با اندازه‌گیری‌های واقعی منطبق است را تولید کند.

روش بهینه‌سازی در این نرم‌افزار بطور کلی سعی می‌کند که اختلاف بین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و قطبش اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را بوسیله تغییر دادن مقدار مقاومت و قطبش هر کدام از بلوک‌ها کاهش دهد؛ که در نهایت سنجه‌ای از این اختلاف توسط فاکتور R.M.S Root Mean Square Error یا R.M.S نیز گاهی تغییرات

بزرگ و غیر واقعی از مقادیر مقاومت‌ویژه و قطبش را با واقعیت نشان می‌دهند و بنابراین همیشه نمی‌توان آنها را بهترین مدل بر اساس مقطع زمین‌شناسی در نظر گرفت. بطور کلی روش اساسی در مدلسازی، توسط RES2DINV انتخاب آن مدلی برای IP و RS است که مقادیر خطای R.M.S مربوط به آن در تکرارهای مختلف انجام شده توسط نرم‌افزار تغییر اساسی نکرده است، که این موضوع معمولاً در سومین تا پنجمین تکرار اتفاق می‌افتد. نتیجه شبه مقطع داده‌های پروفیل DD-1 با استفاده از نرم افزار RES2DINV در شکل ۷ آمده است.



شکل ۷: شبه مقطع قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به آرایه پروفیل شماره یک (DD-1).

در شبه مقطع بارپذیری این آرایه موقعیت یک زون بی‌هنجری با شدت متوسط تا بالا و در حوالی ایستگاه‌های 100(715871E, 3726114N) تا 3726204E (715914E, 3726204E) ملاحظه می‌شود. موقعیت این زون بی‌هنجری در حوالی ایستگاه 130(715884E, 3726141N) به سطح نزدیک می‌شود. بر اساس مشاهدات سطحی موقعیت این بی‌هنجری انباتی نسبی خوبی با رخنمون زون‌های کانی‌سازی دارد. بر اساس شبه مقطع بارپذیری شروع زون بی‌هنجری در اعماق تقریبی ۴۰-۴۵ متر است که با افزایش عمق بتدریج بر شدت آن افزوده می‌شود. بر اساس شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی در بیشتر قسمتهای این آرایه یک زون با مقاومت ویژه الکتریکی متوسط تا کم دیده می‌شود. عملکرد یک گسل که امتداد آن در حوالی ایستگاه 120(715882E, 3726135N) به سطح می‌رسد باعث جدایش و تفکیک یک زون با مقاومت ویژه متوسط تا بالا در قسمتهای جنوب‌غربی از بخش‌های با مقاومت ویژه الکتریکی کم در شمال‌شرق آرایه شده است. علاوه بر این موقعیت یک گسل دیگر نیز بوضوح قابل مشاهده می‌باشد که امتداد آن در حوالی ایستگاه 190(715912E, 3726199N) به سطح می‌رسد.

روش قطبش القایی طیفی

روش‌های الکتریکی مانند مقاومت‌سنگی و قطبش القایی، در اکتشاف کانسارهای فلزی با بافت افسان اولویت خاصی دارند. از طرفی، جوابهای قطبش القایی یکتا نیستند؛ لذا استفاده از قطبش القایی طیفی برای رفع این مشکل ضروری است [۱۷]. روش قطبش القایی طیفی (SIP) روش نسبتاً جدید در اکتشافات زمین‌فیزیکی می‌باشد. این روش مقاومت مختلط ظاهری را در طیف وسیعی از فرکانس اندازه‌گیری می‌کند که برای مشخص شدن پارامترهای طیفی و توزیع فضایی ساختارها استفاده می‌گردد. سه پارامتر اصلی بارپذیری، ثابت زمانی و وابستگی فرکانسی در حوزه فرکانس و در حوزه زمان با روشهای مختلف وارون سازی قابل استنتاج هستند. ثابت زمانی ظاهری می‌تواند مستقیماً در شناخت زنارهای قابل پلاریزه با توجه به ساختمان آنها مورد استفاده قرار گیرد. کانسارهایی که در عمق بالا دفن شده و با روش‌های متداول IP بی‌هنجری واضحی ندارند، با استفاده از ثابت زمانی قابل تشخیص هستند. وابستگی فرکانسی ظاهری نیز در تشخیص تمرکز محلی زنارهای معدنی و تشخیص نوع کانسار کارا می‌باشد [۶]. اندازه‌گیری قطبش القایی طیفی در دو حوضه بسامد و زمان انجام می‌شود. حوزه فرکانسی نسبت به حوزه زمانی دارای این مزیت است که نسبت سیگنال به پارازیت در آنها بیشتر است و برتری اندازه‌گیری‌های حوزه زمانی نسبت به حوزه فرکانسی سرعت بیشتر اندازه‌گیری‌ها و صرفه‌جویی در زمان است [۱۸].

در سال ۱۹۷۸ پلتون و همکاران برای تفسیر پدیده قطبش القایی طیفی حوزه بسامد، رابطه ۱ را که به مدل کل-کل معروف است، به کار گرفتند [۸] و [۲۲].

$$Z(i\omega) = Z(0) \left[1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right] \quad (1)$$

Z(i ω) میدان مختلط بر حسب اهم، (R0) مقاومت DC بر حسب اهم، m مقدار بارپذیری بدون بعد، τ ثابت زمانی بر حسب ثانیه، ω بسامد زاویه‌ای بر حسب عکس ثانیه، C وابسته بسامد بدون بعد و $i = \sqrt{-1}$ است. با بهنجار سازی (i ω) و (0) از راه اندازه‌گیری آرایه و محاسبه مقاومت از رابطه ۲:

$$P = K \frac{\Delta V}{I} = KZ \quad (2) \quad \text{ضریب هندسی آرایه}$$

مقاومت مختلط مربوط به قطبش حجمی از رابطه ۳ به دست خواهد آمد.

$$p(i\omega) = p(0) \left[1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right] \quad (3)$$

ثابت زمانی قطبش حجمی معمولاً کوچکتر از ثابت زمانی قطبش سطحی دانه‌های کانی‌های رساناست. رفتارهای مختلف ثابت‌زمانی (τ) برای دانه‌های قطبش پذیرکانی‌سازی، پایه‌های نظری مناسی را برای تشخیص توده‌های قطبش پذیر بر اساس ساختار آنها با استفاده از یک ثابت‌زمانی فراهم می‌کند. نتایج فوق تنها برای یک دانه منفرد و برای سنگ‌های کانی‌سازی شده با دانه‌های هادی همگن معتبر است. اما سنگ‌های طبیعی دارای چندین عضو کانی‌سازی با دانه‌های کانی متعدد و دارای ثابت‌های زمانی مختلف می‌باشند. بنابراین، حتی اگر رفتار الکتروشیمیایی دانه‌های کانی و محلول درون آنها برای همه عضوهای قطبش پذیر یکسان باشد، اختلاف مقادیر ثابت‌های زمانی باعث طیف گسترده مقاومت مختلط می‌شود و در نتیجه وابسته بسامد ظاهری کم می‌شود. اگر وابسته بسامد قطبش سطحی (C(s)) نامیده شود، رابطه بین وابسته بسامد قطبش سطحی و حجمی به صورت رابطه ۴ است. یعنی وقتی دانه‌های کانی فلزی همگن هستند، $C(s) = C$ است و وقتی دانه‌ها ناهمگن هستند، $C(s) < C$ است [۷].

$$C \leq C(s) \quad (4)$$

بر اساس رابطه ۱، سه پارامتر قطبش القایی طیفی حوزه زمان یا بسامد عبارتند از τ، m و C، که همگی وابسته به منبع قطبش القایی هستند. (m) بارپذیری، عبارت است از حاصل تقسیم ولتاژ باقیمانده بالافصله پس از قطع جریان بر ولتاژ مشاهده شده درست پیش از قطع جریان مقدار آن در فاصله (10) و متغیر است [۳]. (τ) ثابت زمانی، تعیین کننده آهنگ افت ولتاژ باقیمانده، که مقدار آن با افزایش میانگین دانه‌بندی دانه‌های فلزی در منبع تولید کننده قطبش القایی افزوده می‌شود. در حقیقت، این پارامتر بیشتر وابسته به مربع اندازه متوسط دانه‌بندی است. در عمل این پارامتر دارای گستره تغییرات زیادی از چند میلی ثانیه تا چندین هزار ثانیه است و مبنایی است در تشخص توده‌های قطبش پذیر از دیگر ساختارهاست [۳]. (C) وابسته بسامد، کنترل کننده اتحانی منحنی افت است و از نظر فیزیکی وابسته به میزان پراکندگی دانه‌های فلزی در منبع تولید کننده قطبش القایی است. جدول ۱، نشانگر گستره تغییرات وابسته بسامد برای سنگ‌های کانی‌سازی‌های مختلف است [۳].

جدول ۱: گستره تغییرات بسامد برای سنگ‌های با کانی‌سازی‌های مختلف [۳]

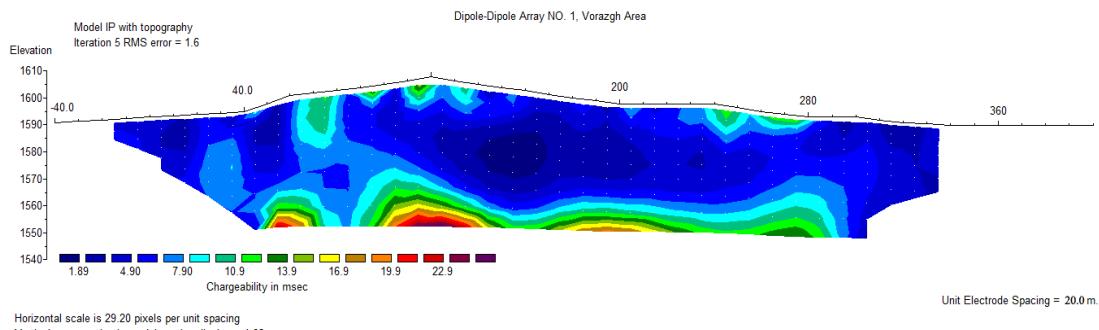
علت	گستره C	نوع سنگ
یکسان نبودن دانه‌های کانی‌سازی شده	<0.4	سنگ‌های کانی‌سازی شده
همگن بودن دانه‌های کانی‌سازی شده	0.4-0.6	سنگ‌های افسان
ناهمگن بودن دانه‌های کانی‌سازی شده	0.2-0.6	سنگ‌های با کانی‌سازی کم
-	0.5	سنگ‌های با کانی‌سازی گرافیتی و رسانا

اندازه گیری قطبش القایی طیفی حوزه زمانی

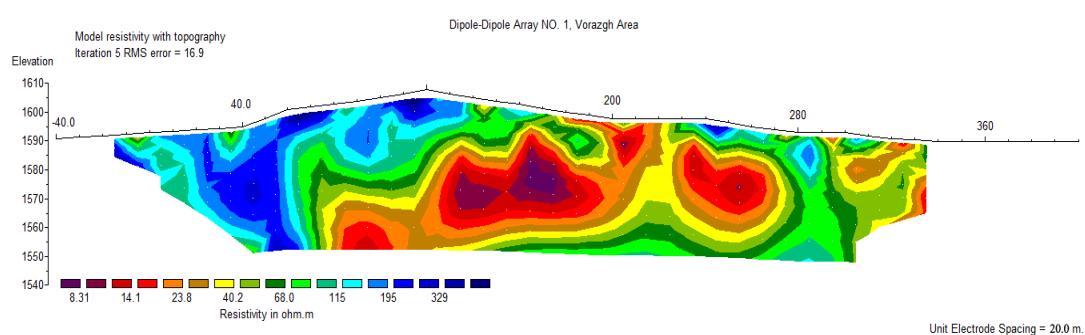
تمب در سال ۱۹۸۱ برای استفاده از روش قطبش القایی طیفی حوزه زمانی نشان داد که پاسخ رسیده به گیرنده در زمان t پس از قطع جریان I_0 بر اساس رابطه ۵ است.

$$V(t) = mI_0R_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t}{\tau}\right)^n}{\eta(n+1)} \quad (5)$$

$V(t) = R_0$, c , m , τ همان پارامترهای به کار رفته در مدل گل-کل و η تابع گاما است. اکنون باید پارامترهای τ , c , m با اندازه گیری ($V(t)$) مشخص شوند. دو روش عمده برای تشخیص وجود دارد که در این پژوهش تنها به ذکر آنها اختفای شود. یکی روش ترسیمی و دیگری روش عددی است. اشکال روش ترسیمی، زمان بر بودن و استفاده از روش سعی و خطا برای تشخیص پارامترهای مناسب است. برای استخراج پارامترهای طیفی قطبش القایی حوزه زمان در منطقه مورد مطالعه، یک برنامه رایانه‌ای نوشته شد و پارامترهای مطلوب به دست آمد. τ بطور معمول از ۰/۰ تا بیش از ۱۰۰ ثانیه تغییر می‌کند. سولفیدهای پراکنده خوب ریز شده، ثابت زمانی کوچکی را نشان می‌دهند. مقادیر بزرگ ثابت زمانی بیشتر تمرکز با بافت و ساخت رگهای و یکپارچه با ابعاد دانه‌بندی درشت را نشان می‌دهد. سنگ‌های کانی‌سازی شده غیر متراکم یا پراکنده، دارای مقادیر وابستگی فرکانسی بزرگی هستند (۰/۰ تا ۰/۴). زیرا دانه‌های کانی‌سازی شده معمولاً همگن‌تر هستند. سنگ‌های با درجه بالای کانی‌سازی، اغلب دارای دانه‌های کانی‌سازی شده غیر همگن‌تری در داخل خود می‌باشند و مقادیر وابسته به سامد پایین (۰/۲ تا ۰/۴) نشان می‌دهند. بر اساس مدل بارپذیری، موقعیت زون بی‌هنگاری عمقی بصورت یک بخش تقریباً پیوسته در بیشتر قسمتهای مقطع دیده می‌شود. موقعیت این زون در حوالی ایستگاههای ۱۰۰ تا ۱۴۰ مقداری به سطح نزدیک می‌شود. با افزایش عمق، بطور نسبی بر شدت پاسخ IP در این زون افزوده می‌شود (شکل ۸). براساس مدل RS، نیز حضور منطقه کم مقاومت در بیشتر قسمتهای این آرایه قابل مشاهده است. همچنین گسلهای شناسایی شده در حوالی ایستگاههای ۱۲۰ و ۱۹۰ در این مدل نیز بخوبی قابل مشاهده و رهگیری می‌باشد. بر اساس این مدل نیز در تمامی قسمتهای مقطع، شواهد مقاومت ویژه الکتریکی کم تا متوسط قابل مشاهده است. مقایسه مقاطع قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی نشان می‌دهد که آنومالی‌ها در قسمتهای سطحی نزدیک به بخش‌هایی قرار دارند که افزایش مقاومت ویژه وجود دارد و بنابراین قسمتی از افزایش بارپذیری در این عمق‌ها بدلیل افزایش اختلاف مقاومت ویژه کانی‌سازی با سنگ میزبان می‌باشد. این آنومالی‌ها در سنگ‌های پایین در مقاومت ویژه نسبتاً کم قرار گرفته اند که از نظر عیار می‌توانند اهمیت بیشتری داشته باشند (شکل ۹).



شکل ۸: مقطع مدلسازی شده قطبش القایی برای پروفیل DD-1



شکل ۹: مقطع مدلسازی شده مقاومت ویژه الکتریکی برای پروفیل DD-1

نتیجه گیری

از مجموع مقاطع مدل سازی معکوس داده های اندازه گیری شده صحرایی و همچنین بررسی های طیفی داده های قطبش القایی، نتایج ذیل به دست آمده است:

۱- با مقایسه مقاطع نتیجه می شود که از بین روش های معکوس سازی، روش های هموار در مقایسه با روش های پارامتری نسبت به نوافه حساسیت کمتری دارند.

۲- یکی از عوامل موثر و کنترل کننده توزیع پارامترهای قطبش القایی طیفی، بافت و ساخت توده های کانی سازی شده است که در این میان بافت های افسان و رگهای را می توان به خوبی و از طریق پارامتر ثابت زمانی از هم تمیز داد. همچنین وابسته بسامد در تعیین توزیع دانه بندی و تشخیص نوافه های جفت شدگی القایی به خوبی قابل استفاده است.

۳- سیستم کانی سازی در این محدوده از نوع رگره گچه و افسان در سنگ های آتشفسانی است. وضعیت تکتونیکی فعال این محدوده یکی از عوامل مؤثر در شکل گیری و گسترش این تیپ کانی سازی در سطح محدوده بوده است.

۴- موقعیت زون های بی هنجاری IP در بیشتر پروفیل ها انسجام و همبستگی بالایی را نشان نمی دهنند. از این رو نمی توان انتظار رخداد کانی سازی های بزرگ و گسترده را در این محدوده داشت. بر اساس نتایج بررسی های زمین فیزیک به نظر می رسد زون های کانی سازی، بیشتر به صورت محدوده های کوچک و پراکنده است.

۵- در شبه مقاطع RS بدلیل تأثیر شکستگی و تخلخل نسبتاً زیاد ناشی از هوازدگی در سنگ های آتشفسانی و همچنین تأثیر احتمالی نقش سیلات بین دانه های در کاهش مقاومت ویژه، میزان مقاومت ویژه الکتریکی تا حدودی کاهش پیدا کرده است.

۶- در مجموع و بر اساس انتباق شواهد سطح اراضی با شبه مقاطع و مقاطع قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی باید گفت که زون های تحت اراضی دارای شارژ پذیری متوسط و مقاومت ویژه الکتریکی کم به صورت توأم، بیشترین پتانسیل اکتشافی را از نظر پی جویی سولفیدهای فلزی در این محدوده نشان می دهند.

۷- منحني پاسخ IP در بیشتر قسمت ها دارای شدت متوسط تا ضعیف می باشد. این موضوع حکایت از گسترش کم کانی سازی و عیار پایین زون های کانه دار دارد.

۸- در بیشتر بخش های کانی سازی شده با افزایش نسبی عمق به شدت خطوط پربندی زون های بی هنجار افزوده می شود، این موضوع حکایت از افزایش نسبی عیار کانی سازی سولفیدی با افزایش عمق دارد.

۹- در مجموع و بر اساس تلفیق نتایج زمین شناسی سطح اراضی و زمین فیزیک تحت اراضی در محدوده ورزق باید گفت که انتظار وجود یک سیستم کانی سازی پر عیار سولفیدی در این محدوده دور از ذهن است. کانی سازی انجام شده عموماً به صورت بخش های کوچک و کم عیار بوده و انتظار افزایش قابل توجهی در میزان عیار این بخش های کوچک، لائق تا پایان عمق مدل سازی نمی رود.

قدرتانی

بدینوسیله از همکاری صمیمانه شرکت مهندسین مشاور زرناک اکتشاف به جهت فراهم آوردن امکانات مورد نیاز در اجرای این پژوهش تقدیر و تشکر به عمل می آید.

منابع و مراجع

- [1] Aghanabati, A (2004). Geology of Iran. "Geological survey and mineral exploration", Iran, 345 p.
- [2] Akrami, M.A., Chaichi, Z. and Haddadan, M (2005). "Geological map of Abiz, scale 1:100,000". Geological Survey of Iran.
- [3] Apparao, A (1997). "Developments in Geoelectrical Methods". August Aimé Balkema, USA, 293p.
- [4] Arjmandzadeh, R (2011). "Studies of mineralization, geochemistry and tectonic setting in the Dehsalam and Chahshlghmy mining indexes, Lut Block, East Iran. Ph.D. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad", Mashhad, Iran, 369 p.
- [5] Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N.S.F. and Zentilli, M (2002). "The Geology of the El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile. In: T.M. Porter (Editor), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits". A Global Perspective, Adelaide. 163-184.
- [6] Hafizi, M.K. and Asarzadgan, B (2008). "Application of spectral induced polarization (SIP) in the exploration of mineral resources and oil". First National Symposium on the Application of new technologies and new methods of Geosciences. Islamic Azad University, Mahallat branch. Iran (in Persian with English abstract).

- [7] Horel, A.E. and Kennard, R.W (1970). "Ridge regression: Application to non orthogonal problems". *Tachnometrics*, 12: 55–67.
- [8] Johnson, I.M (1984). "Spectral Induced Polarization parameters as determined through Time-domain measurements". *Geophysics*, 49:1993-2003.
- [9] Karimpour, M.H (2005). "Quartz-alunite and quartz pitted alteration zones (high sulfidation) of the upper zone of porphyry copper systems in Chah Shalghami area, South Khorasan". 13th Congress of Crystallography and Mineralogy, Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
- [10] Karimpour, M.H., Malekzadeh shafarodi, A., Farmer, L. and Stern, S (2012). "petrogenesis of granitoids, age assessment method zircon U-Pb, Sr- Nd isotope geochemistry and mineralization Tertiary important event in the Lut Block, East Iran". *Journal of Economic Geology*, 1: 1-27.
- [11] Karimpour, M.H., Malekzadeh shafarodi, A., Heidarian shahri, M.R. and Askari, A (2007). "Mineralization, alteration and geochemistry of Hired gold-tin prospecting area, South Khorasan province". 14th Congress of Crystallography and Mineralogy, Birjand University, Birjand, Iran. (in Persian with English abstract).
- [12] Kuscu, G.G. and Floyd, P.A (2001). "Mineral compositional and textural evidence for magma mingling in the Saraykent volcanics". *Lithos*, 56: 207-230.
- [13] Lotfi, M (1982). "Geological and geochemical investigations on the volcanicogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore- mineralizations in the Shurab-GaleChah and northwest of Khur (Lut, east of Iran)". Unpublished Ph.D. thesis, der Naturwissenschaften der Universitat Hamburg, 151 p.
- [14] Luo, Z.Z. and Zang, G (1998). "Theory and application of Spectral Induced Polarization. Society of Exploration" *Geophysicists*, 6:1-171.
- [15] Malekzadeh shafarodi, A (2009). "Geology, mineralization, alteration, geochemistry, interpretation of geophysical data, microthermometry, isotope studies and determination of the origin of the mineralization of Mahrabad and khonik, South Khorasan province". Ph.D. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 600 p.
- [16] Mazlomi, A. R., Karimpour, M.H., Rassa, I., Rahimi, B. and Vosoughi Abedini, M (2008). "Kuh-E-Zar Gold Deposit in Torbat-e-Heydaryeh New Model of Gold Mineralization". *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 3: 364-376. (in Persian with English abstract).
- [17] Pelton, W.H., Ward, S. H., Hallof P. G., Sill, W. R. and Nelson, P.H (1978). "Mineral discrimination and removal of Induced Polarization Coupling with multi frequency IP". *Geophysics*, 43: 588-609.
- [18] Robinson, A. (translated by Heidarian shahri, M.R.) (2005) *Principles of Exploration Geophysics*. Mashhad University Press, Mashhad, 750 p.
- [19] Stewart, M.L. and Pearce, T.H (2004). "Sieve-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results". *American Mineralogy*, 89: 348-351.
- [21] Tombs, J.M.C (1981). "The feasibility of Spectral Induced Polarization measurements in the Time-domain. *Geoexploration*", 19 : 91-102.
- [22] Tsuchiyama, A (2001). "Dissolution kenitics of plagioclase in the melt of the system diopside – albite-anorthite and origin of dusty plagioclase in andesite". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89:1-16.
- [23] Ward, S.H (1990). "Geotechnical and Environmental Geophysics". Society of Exploration Geophysicists, 1: 147-189.
- [24] Yungul, S.H (1996). "Electrical methods in geophysics exploration of deep sedimentary basins". Springer, Las Vegas, 208 p.
- [25] Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y. and Lee, H.Y (2012). "Zircon U–Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran". *Lithos*. 154: 392–405.