

تعیین مناطق کانی‌سازی با استفاده از پردازش داده‌های قطبش

القایی طیفی و مقاومت‌سنجی در منطقه تپه سرخ ایرانکوه

نوشته: علیرضا عرب امیری* و دکتر نادر فتحیان‌پور**

Determination of mineralization zones using interpretation of SIP and Resistivity Data in Tappeh Sorkh Area, Iran-kuh

By: A. R. Arab Amiri*, & Dr. N. Fathianpour **

چکیده

دسترسی به مواد معدنی اولیه یکی از ملزومات گام نهادن در شاهره توسعه است. این در حالی است که منابع سهل الوصول سطحی رو به اتمام است. لذا بهره‌گیری از روشهای نوین اکتشافی به منظور دستیابی به ذخایر عمیق‌تر گریز ناپذیر است. باتوجه به دلایل فوق، در این مقاله سعی بر آن است تا با به‌کارگیری نتایج مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی سطحی، ضمن تکمیل مطالعات مذکور، با استفاده از روشهای نوین زمین‌فیزیک اکتشافی موقعیت مکانی زون کانی‌سازی سرب و روی غرب معدن تپه سرخ (از معادن مجتمع معدنی باما، ایرانکوه) تعیین شود. متداول‌ترین روشهای زمین‌فیزیکی قابل استفاده در اکتشاف کانسارهای سولفیدی سرب و روی روشهای قطبش‌القایی و مقاومت‌سنجی است. از مزایای به‌کارگیری روش قطبش‌القایی امکان انجام اندازه‌گیری‌های قطبش‌القایی طیفی می‌باشد. در این پژوهش، از این روش نسبتاً جدید، در حوزه زمان استفاده شد. پارامترهای ثابت زمانی ظاهری، وابسته بسامد ظاهری و بارپذیری حقیقی استخراج گردید. با استفاده از نتایج پارامتر ثابت زمانی میانگین دانه‌بندی فلزی در منبع تولیدکننده قطبش‌القایی استنباط گردید. همچنین از نتایج پارامتر وابسته بسامد، میزان پراکندگی دانه‌های فلزی (بافت کانی‌سازی) تعیین شد. باتوجه به اینکه نتایج خام اندازه‌گیریها اطلاعات کمی دقیق و مطمئنی درباره عمق و هندسه توده‌های کانی‌سازی شده زیرسطحی در اختیار قرار نمی‌دهند؛ با استفاده از مقاطع حاصل از پارامترهای قطبش‌القایی طیفی و مدل‌سازی‌های معکوس (هموار و پارامتری) برای تعیین محل‌های احتمالی، گسترشهای جانبی و قائم کانی‌سازیهای زیرسطحی استفاده شد.

کلید واژه‌ها: قطبش‌القایی طیفی، مقاومت‌سنجی، سرب و روی، اکتشاف، بارپذیری، وابسته بسامدی، ثابت زمانی، مدل‌سازی معکوس هموار و پارامتری

Abstract

Accessibility to industrial minerals and ores is one of the necessities to facilitate the development. Meanwhile, it is clear that the shallow mineral resources are near to exhaust, therefore, using modern exploration methods to attain deeper mineral deposits is inevitable. An attempt has been made in this paper to apply and accomplish the results of geological and surface geochemical studies for determination of spatial mineralized zones in western area of Tappeh Sorkh lead - zinc mine (which is one of Bama mining complex mines).

IP and Resistivity techniques are the most popular geophysical methods for exploration of Pb and Zn sulfide deposits. There are some advantages in applying SIP method, such as identification of mineralization texture, grain structure, type of material, ore phase and parasitical data. In this study, a relatively new method of time domain SIP was used and apparent time constant, apparent frequency -dependent and true chargeability parameters were extracted. By using the results of time constant parameter, the average of metal grain size was determined, also the amount of metal grain dispersion (mineralization texture) was determined by applying the results of frequency dependent parameter. Probable mineralization places were determined by using SIP sections. Since the results of raw data do not indicate accurate information about the depth and geometry of mineralization, smooth and parametric inverse modeling were applied to determine probable zones and vertical and horizontal extent of mineralization.

Key words: Spectral induced polarization (SIP), Resistivity, Lead and zinc, Exploration, Chargeability, Frequency -dependent, Time constant, Smooth and parametric inverse modeling.

مقدمه

تکامل تمدن بشری بر پایه وجود فلزهای پایه مانند آهن، مس، سرب، روی و ... بوده و چرخ تولید آنها را مواد انرژی‌زایی همچون نفت، گاز، زغال‌سنگ و اورانیم به حرکت درمی‌آورند؛ که همگی آنها از زمین استحصال می‌شوند. از آنجا که منابع سهل‌الوصول سطحی، به‌مرور با روشهای ساده کشف شده و بهره‌برداری شده‌اند، برای تداوم تکامل، به‌کارگیری روشهای جدیدتر برای رسیدن به منابع عمیق‌تر زیرزمینی ضروری است. امروزه صرفاً با به‌کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی سطحی، نمی‌توان به منابع مدفون دست یافت؛ بلکه باید از روشهای مکمل مانند زمین‌فیزیک اکتشافی نیز بهره برد. این روشها ارزان و قابل اعتماد هستند و در بسیاری موارد، باعث کاهش ریسک بزرگ سرمایه‌گذاری می‌شوند. در محدوده مورد مطالعه، تنها نتایج مطالعات زمین‌شناسی سطحی و برداشتهای زمین‌شیمیایی در مقیاس ۱:۵۰۰۰ در دسترس بود؛ لذا هدف اصلی این است که با انجام مطالعات زمین‌فیزیک، در مناطق دارای بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی وسیع‌تر سرب و روی، در صورت تایید پتانسیل کانی‌سازی با اطمینان بیشتری درخصوص ادامه فعالیتهای اکتشافی برنامه ریزی نمود. از آنجا که زایش ماده معدنی در مناطق مجاور، عموماً ساخت سولفید رگه‌ای و گاه افشان از خود نشان می‌دهد، بهترین روش مطالعه زمین‌فیزیک در این خصوص، روش قطبش القایی و روش مقاومت ویژه الکتریکی است. شایان ذکر است که در پاره‌ای از موارد، بررسیهای مغناطیس‌سنجی نیز به‌طورمکمل نتایج با ارزشی نشان می‌دهند که به‌دلیل عدم وجود امکانات در حین اجرای این پژوهش، به‌کار گرفته نشدند.

موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی به محدوده مورد مطالعه

مجموع معادن ایرانکوه در بیست کیلومتری جنوب غربی شهرستان اصفهان در طول جغرافیایی $51^{\circ} 32'$ تا $51^{\circ} 45'$ و عرض جغرافیایی $28^{\circ} 28'$ تا $28^{\circ} 37'$ و در دامنه‌های شمالی و جنوبی ایرانکوه (شاهکوه سابق) واقع شده است.

شکل ۱ موقعیت کانسارهای شرکت معدنی باما و راههای دسترسی به محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محدوده مورد مطالعه، در یال شمالی ایرانکوه و در محدوده ۳۰۰ تا ۴۰۰ متری مرز باختری معدن تپه‌سرخ واقع شده است.

تاریخچه مطالعات و نتایج اکتشافی قبلی

در سال ۱۳۵۴، نخستین مطالعات زمین‌فیزیکی توسط شرکت C.G.G. در محدوده‌ای به وسعت ۵ هکتار صورت‌گرفته و روشهای مورد استفاده قطبش القایی، مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا بوده است. در سال ۱۳۵۶، مؤمن‌زاده به بررسی مسائل زمین‌شناسی ناحیه پرداخت. در سال ۱۳۶۱ استاد به شرح وقایع زمین‌شناسی و حوادث زمین‌ساختی منطقه پرداخت و نقشه زمین‌شناسی کل منطقه را در قالب دکترای خود تهیه نمود، که در حال حاضر کامل‌ترین راهنمای زمین‌شناسی منطقه است. در سالهای ۱۳۶۰، ۱۳۶۶ و ۱۳۶۷، آخرین مطالعه زمین‌فیزیکی توسط گروه زمین‌فیزیک سازمان زمین‌شناسی کشور با به‌کارگیری روش قطبش القایی و با استفاده از آرایه‌های مستطیلی و دوقطبی - دوقطبی انجام گرفت.

در سال ۱۳۷۷، مطالعه زمین‌شیمیایی سطحی، در آخرین مطالعه سیستماتیک اکتشافی پیش از برداشتهای زمین‌فیزیکی اخیر بوده است.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

منطقه معدنی ایرانکوه از نظر زمین‌شناسی، شرایط استثنایی و ویژه‌ای دارد (راستاد، ۱۳۶۱). به همین دلیل جدالهای علمی بین زمین‌شناسان در مورد علل کانه‌زایی آن هموار رونق دارد. تا به‌حال نظریه‌های متعددی در مورد زمین‌شناسی منطقه و زایش ماده معدنی ارائه شده؛ که گاهی این نظریات اختلاف زیادی باهم دارند. همین امر مسئله را کمی پیچیده‌می‌کند. اما صرف‌نظر از این‌گونه مسائل، نوع ماده معدنی کاملاً شناخته‌شده و افق‌های قرارگیری آنها از منظر چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی مشخص شده است. قدیمی‌ترین سنگهای ایرانکوه مربوط به ژوراسیک پایینی است که تنها رخنمون‌های آن در گسل شمالی در گردنه آنبیل در شمال باختر منطقه قابل مشاهده است. در این منطقه سنگهای رسوبی سن ژوراسیک میانی و بالایی (مالم و دوگر) وجود ندارد. سطح اصلی منطقه پوشیده از رسوبات لایه‌ای کربناتی است که به شکل یک ناپیوستگی بر روی رسوبات ژوراسیک زیرین قرار گرفته است. این رسوبات شامل تناوبهای پیوسته‌ای از سن بارمین به آلبن پایینی است. ضخامت این سنگها بیش از ۸۰۰ متر و متشکل از سنگ آهک و دولومیت به همراه مقادیر ناچیزی شیل و مارن است. این رسوبات به عنوان سنگ

میزبان ذخایر معدنی ایرانکوه قلمداد شده و به هفت افق مجزا تفکیک می شوند:

* کنگلومرای قاعده ودولومیت ماسه‌ای صورتی تا سرخ k_1

* آهک اریتولین دار خاکستری متمایل به زرد k_2l

* دولومیت سرخ تا قهوه‌ای و آهک خاکستری k_3l

(واحد)

اصلی شروع ماده معدنی)

* آهکهای خاکستری با لایه بندی ضخیم تا توده‌ای حاوی فسیل

اریتولین k_4l

* آهکهای خاکستری توده‌ای اریتولین دار و

رودیت دار kl

* سنگهای شیلی و مارنی با عدسی‌هایی از آهک k_{5sh}

* مارنهای آهکی اریتولین دار k_6l

شیوه تشکیل کانسارهای سرب و روی در منطقه ایرانکوه

بعضی از محققان بر این باورند که سازندهای یال‌های شمالی و جنوبی ایرانکوه از جانشینی متاسوماتیک در آهک‌های کرتاسه به وجود آمده‌اند (Burnol, 1968).

یک مدل ای‌رنیتیک نیز برای نهشته‌های ایرانکوه پیشنهاد شده، که این مدل با ماهیت ناهم‌شیب آنها، جایگزینی در طول خط گسل ایرانکوه، افت نسبت ایزوتوپهای پایدار کربن دولومیت‌های میزبان به موازات کانی‌سازی و ویژگیهای ایزوتوپی دولومیت و باریت در مرحله اصلی کانی‌زایی تایید می‌شود (غضبان، ۱۳۷۳).

پاراژنز کانسار سرب و روی منطقه ایرانکوه

مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع تهیه شده در نواحی سولفیدی نشانگر آن است که کانی‌سازی اولیه اساساً از جانشینی اسفالریت و گالن در سنگ‌های آهکی با توسعه ضعیف سیلیسی شدگی به وجود آمده‌است. غالباً اسفالریت و گالن به صورت منظم بر روی هم استقرار یافته‌اند. گاهی هم یک هسته گالن با نوارهایی از اسفالریت احاطه شده‌است که این حالت بسیار نادر است (Burnol, 1968). در این ناحیه آثار کانی‌سازی باریت و فلوریت نیز دیده می‌شود.

به منظور بررسی‌های بیشتر سنگ‌شناسی، بیش از پانزده نمونه مقطع صیقلی و نازک از محل مورد مطالعه برداشت شد که نتایج زیر حاصل

بررسی‌های میکروسکوپی مربوط به این نمونه‌ها است. کانی‌های کلسیت، دولومیت، اکسیدهای آهن مانند هماتیت، کوارتز، باریت، اسفالریت و پیریت در ابعاد ریزدانه با بافت برشی اسپارایتی در زونهای کانی‌سازی شده یافت شدند. تقریباً در همه مقاطع، پدیده دولومیتی شدن دیده می‌شود. شکل ۳ دو نمونه تیغه نازک و مقطع صیقلی مربوط به همین مطالعات را نشان می‌دهد.

مطالعات زمین‌فیزیکی

در عمل با در نظر گرفتن عوامل زمین‌شناختی، اقتصادی و فناوری، هندسه طبیعی کانسار، شیب، امتداد و عمق کانسار، عیار حد و مسائل فنی استخراج، عمق کاوش، بودجه در نظر گرفته شده، اطلاعات جمع‌آوری شده از گذشته و فرایندهای اجرایی، دو نیم‌رخ به فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر به نامهای 300W و 400W به ترتیب در فاصله ۳۰۰ و ۴۰۰ متری باختر معدن تپه سرخ بر روی گسترده‌ترین بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی پیاده شد (به دلیل محدودیت، در ادامه تنها نتایج بررسی‌های مربوط به نیم‌رخ 400W ارائه می‌شود). امتداد نیم‌رخ‌ها تقریباً عمود بر امتداد لایه‌بندی زمین‌شناسی منطقه و با آزیموت ۲۰۸ درجه در نظر گرفته شد. آرایش دوقطبی - دوقطبی با فواصل برداشت بیست متر انتخاب شد. تعداد گام‌ها حداکثر هشت گام در نظر گرفته شد، چرا که در گام‌های بالاتر از هشت، نسبت سیگنال به نوفه به شدت افت می‌کند و در عمل آنچه در برداشت‌های با گام‌های بالاتر ثبت می‌شود، مقادیر نوفه است (Luo & zang, 1998). در نهایت، عمق بررسی به ۸۰ تا ۹۰ متر می‌رسد. در پروژه‌های مشابه در کشور ما، معمولاً پیش از آنکه هیچ عملیات آماده‌سازی یا فیلترگذاری خاصی بر روی داده‌های برداشت شده اعمال شود، مقاطع بار پذیری و مقاومت ویژه ظاهری رسم و تفسیر می‌شود. اما از آنجا که نتایج خام در اندازه‌گیری‌های زمین الکتریک نمی‌تواند هیچ‌گونه اطلاعات کمی درباره عمق یا توزیع مقاومت‌های ویژه الکتریکی در زیرزمین بیان کنند؛ لذا مدل‌سازی داده‌ها اجتناب‌ناپذیر است (طالبی مزرعه شاهی، ۱۳۷۷ و Ward, 1990). شکل ۴ نشانگر شبه‌مقاطع مقاومت‌سنجی و بار پذیری داده‌های خام برداشت شده نیم‌رخ 400W است.

در زمین‌فیزیک و علوم وابسته برداشتها به صورت سامان‌مند 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 زمین‌فیزیکی 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 (Luo & zang, 1998). ورودی مدل‌سازی پیشرو، پارامترهای مدل است که با انجام محاسبات بر روی این پارامترها، پاسخ محاسبه شده یا معادل مصنوعی داده‌ها، به عنوان خروجی دریافت می‌شود. در روش مدل‌سازی پیشرو، با استفاده از روشهای عددی تفاضل محدود، تحلیل شبکه، اجزای محدود و معادله انتگرال، مدل‌ها تفسیر می‌شوند. از آنجا که روشهای مدل‌سازی پیشرو کند و ضعیف هستند، برای کاهش ریسک عملیات اکتشاف مدل‌سازی‌های قدرتمند و سریع معکوس سازی جایگاه ویژه‌ای در مسائل زمین‌فیزیکی یافته است. ورودی مدل‌سازی معکوس داده‌های مشاهده‌ای است که با انجام محاسبات مربوط به نظریه معکوس سازی بر روی آنها پارامترهای مدل به عنوان خروجی دریافت می‌شود (Luo & zang, 1998).

– مدل‌سازی معکوس هموار

یکی از روشهای مناسب برای معکوس سازی داده‌های اندازه‌گیری شده که قطعاً دارای خطاست و از حیث تعداد هم ناقص است؛ اعمال شرایط هموار است (Luo & zang, 1998). این روش، راهی ساده و ارزان برای حل مسائل ناپایدار یا مسائل با داده‌های کم است و در عین حال، اگر محدودیتهای اولیه یا مدل اولیه در دسترس نباشد، بهترین است (Yungul, 1996). در فرمول‌بندی مسائل معکوس سازی هموار، مطلوب آن است که پارامترهای مدل نسبت به مکان، تغییرات کمی همراه داشته باشند. در این صورت می‌توان اختلاف بین پارامترهای مجاور را کمینه کرد (Luo & zang, 1998).

نتیجه معکوس سازی هموار داده‌های نیم‌رخ 400W با استفاده از نرم افزار Res2Dinv در شکل ۵ آمده است. در مقطع بارپذیری، می‌توان توده اصلی کانی‌سازی را در فاصله ۱۶۰ تا ۲۰۰ متری مبدا حدس زد. که در قسمتهای سطحی‌تر دو شاخه شده و در فواصل ۱۸۰ تا ۱۲۰ متری و ۱۸۰ تا ۲۲۰ متری مبدا قابل مشاهده است. در این نیم‌رخ، آثار شکستگی‌های زیادی دیده می‌شود که احتمال وجود کانی‌سازی و اثر گسل اصلی منطقه را تقویت می‌کند.

– مدل‌سازی معکوس پارامتری

داده‌های برداشت‌شده صحرایی، دارای دقت کم و ناهماهنگ و گاه متناقض هستند. در نتیجه، بینهایت مدل مناسب برای یک مجموعه از این داده‌ها وجود دارد. باید مدلی یافت که مشاهدات ما را به‌طور کامل تشریح کند و محدودیت‌های وارده از طرف فیزیک مسئله را پاسخگو باشد. رگرسیون‌ریج، روشی برای برآورد ضرایب رگرسیون داده‌های نامتعاد است. در این روش ضرایب برآورد شده در مقایسه با برآوردهای کمترین مربع‌ها به روش معمول، میانگین مربع خطای کوچک‌تری دارند. از آنجا

که برآوردهای کمترین مربع‌های ریج پایدار بوده، تحت تاثیر تغییرات جزئی داده‌ها قرار نمی‌گیرند و میانگین مربع‌های خطا در آنها کمتر از روشهای معمول است؛ لذا مقادیر برآورد شده با این روش، در مقایسه با روشهای معمول، به مقادیر حقیقی ضرایب رگرسیون نزدیک‌تر است. چون مقادیر حقیقی مجهول هستند، استفاده از این روش در مواقعی که بین داده‌ها هم‌راستایی چندگانه بسیار بالایی وجود دارد، توصیه می‌شود (Marquardt, 1963 و Telford et al, 1990).

نتیجه معکوس سازی پارامتری داده‌های نیم‌رخ 400W با استفاده از نرم افزار RESIXIP2DI، در شکل ۶ آمده است. جدول ۱ نیز نشان‌دهنده ویژگی توده‌های زیرسطحی شناخته‌شده حاصل از مدل‌سازی پارامتری مربوط به همین نیم‌رخ است.

در این مقطع، علت پایین بودن مقاومت ویژه زمینه را می‌توان ناشی از گسترش شدید فعالیت زمین‌ساختی، سطح توپوگرافی نسبتاً آرام و گسترش دولومیت‌های آهن‌دار دانست. به نظر می‌رسد توده اصلی فلزی، توده شماره ۲ باشد. احتمالاً بارپذیری بالا به علت وجود پیریت یا گالن است. البته وجود پیریت در منطقه، با بررسی‌های پراش پرتو ایکس روی چند نمونه نیز ثابت شده است. شکل ۷ نتایج مربوط به یک نمونه از این تجزیه را نشان می‌دهد.

اما از آنجا که همراهی گالن و اسفالریت نیز در منطقه ثابت شده؛ لذا احتمال وجود اسفالریت نیز دور از ذهن نیست. لازم به ذکر اینکه به علت پایین بودن بارپذیری ذاتی اسفالریت، امکان تشخیص آن از طریق این برداشتهای زمین‌فیزیکی دشوار است. توده گوه‌ای و سطحی شماره ۴ نیز بارپذیری بالا و مقاومت ناچیز دارد. احتمال می‌رود این توده در ارتباط با پرشدگی ثانویه یک زون برشی یا گسلی با کانی‌های رسی باشد و احتمال کانی‌سازی فلزی در آن کمتر است.

همچنین در همه مواردی که تغییرات شیب سطح توپوگرافی بالاتر از ۱۰ درجه است، لازم است تصحیح توپوگرافی انجام شود. چون اثر توپوگرافی باعث تغییر شکل ظاهری پاسخ توده مورد مطالعه در برداشتهای و در بعضی از حالات باعث مخفی کردن بی‌هنجاری‌های واقعی موجود در زیر سطح می‌شود؛ از روش اجزای محدود برای تصحیح توپوگرافی داده‌ها استفاده شد. این روش بر این اساس استوار است که شبه‌مقطع زمین ناهموار در طول خط برداشت برای زمین همگن با مقاومت‌های ویژه یک اهم- متر مدل‌سازی می‌شود و مقاومت‌های ویژه ظاهری مشاهده شده، بر مقادیر متناظرشان تقسیم می‌شوند. در حقیقت در این فرایند، ضریب هندسی با یک روش بهنجارسازی، تصحیح می‌شود (طالبی مزرعه‌شاهی، ۱۳۷۷ و Loke & Barker 1996).

– روش قطبش القایی طیفی

اشاره شد که روشهای الکتریکی مانند مقاومت‌سنجی و قطبش‌القایی،

بر اساس رابطه ۱، سه پارامتر قطبش القایی طیفی حوزه زمان یا بسامد عبارتند از $\mathbf{C}, \tau, \mathbf{m}$ ، که همگی وابسته به منبع قطبش القایی هستند. (m) بار پذیری، عبارت است از حاصل تقسیم ولتاژ باقیمانده بلافاصله پس از قطع جریان بر ولتاژ مشاهده شده درست پیش از قطع جریان. مقدار آن در فاصله (۱ و ۰) متغیر است (Apparao, 1997).

(τ) ثابت زمانی، تعیین کننده آهنگ افت ولتاژ باقیمانده، که مقدار آن با افزایش میانگین دانه بندی دانه های فلزی در منبع تولید کننده قطبش القایی افزوده می شود. در حقیقت، این پارامتر بیشتر وابسته به مربع اندازه متوسط دانه بندی است. در عمل این پارامتر دارای گستره تغییرات زیادی از چند میلی ثانیه تا چندین هزار ثانیه است و مبنایی است در تشخیص توده های قطبش پذیر از دیگر ساختارهاست (Apparao, 1997).

(C) وابسته بسامد، کنترل کننده انحنای منحنی افت است و از نظر فیزیکی وابسته به میزان پراکندگی دانه های فلزی در منبع تولید کننده قطبش القایی است. جدول ۲، نشانگر گستره تغییرات وابسته بسامد برای سنگهای با کانی سازیهای مختلف است (Apparao, 1997).

اندازه گیری قطبش القایی طیفی حوزه زمانی

تیمب 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 \mathbf{I}_0 بر اساس رابطه ۵ است.

$$V(t) = m \mathbf{I}_0 \mathbf{R}_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t}{\tau}\right)^{nc}}{\eta^{(nc+1)}} \quad (5)$$

همان پارامترهای به کار رفته در مدل کل-کل و تابع گاما است. اکنون باید پارامترهای $\mathbf{m}, \mathbf{c}, \tau$ با اندازه گیری $\mathbf{V}(t)$ مشخص شوند. دو روش عمده برای تشخیص وجود دارد که در این مقاله تنها به ذکر آنها اکتفا می شود. یکی روش ترسیم، دیگری روش عددی. اشکال روش ترسیم، زمان بر بودن و استفاده از روش سعی و خطا برای تشخیص پارامترهای مناسب است.

برای استخراج پارامترهای طیفی قطبش القایی حوزه زمان در ناحیه مورد مطالعه، یک برنامه رایانه ای نوشته شد و پارامترهای مطلوب به دست آمد. شکل ۸ نشان دهنده پارامترهای طیفی مربوط به نیمرخ 400W است.

مقادیر بزرگ ثابت زمانی بیشتر تمرکز با بافت و ساخت رگه ای و یکپارچه با ابعاد دانه بندی درشت را نشان می دهد. وابسته بسامد بزرگ (میانگین ۰/۴۲) نشانگر توزیع یکنواخت دانه بندی فلزی است. زون اصلی کانی سازی احتمالاً در فواصل ۱۴۰ تا ۲۰۰ متری قرار دارد. البته در فاصله ۲۶۰ تا ۲۸۰ متری میدا نیمرخ نیز مقادیر بالای بار پذیری مشاهده می شود که ریشه ای نیست و احتمالاً ناشی از پرشدگی زون برشی است.

در اکتشاف کانسارهای فلزی با بافت افشان اولویت خاصی دارند. از طرفی، چون اندازه گیری های قطبش القایی قادر به تشخیص منابع مختلف تولید کننده خود نیستند؛ لذا استفاده از قطبش القایی طیفی برای رفع این مشکل ضروری است (Pelton et al, 1978).

اندازه گیری قطبش القایی طیفی در دو حوزه بسامد، و زمان متداول است. برتری اندازه گیری حوزه زمانی نسبت به حوزه بسامد، سرعت بیشتر اندازه گیری ها و صرفه جویی در زمان است. به علت بالا رفتن ارزش زمان در اکتشاف، اندازه گیری حوزه زمانی به سرعت پیشرفت کرده است (Hohmann, 1975).

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 (Tombs, 1981 و Johnson, 1984).

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

$\mathbf{Z}(i\omega)$ میدان مختلط بر حسب اهم، $\mathbf{Z}(0)$ مقاومت DC بر حسب اهم، m مقدار بار پذیری بدون بعد، τ ثابت زمانی بر حسب ثانیه، ω بسامد زاویه ای بر حسب عکس ثانیه، \mathbf{C} وابسته بسامد بدون بعد و $i = \sqrt{-1}$ است. با بهنجار سازی $(i\omega)$ و $\mathbf{Z}(0)$ از راه اندازه گیری آرایه و محاسبه مقاومت از رابطه ۲:

$$\rho = \mathbf{K} \frac{\Delta V}{\mathbf{I}} = \mathbf{KZ} \quad (2)$$

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

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

ثابت زمانی قطبش حجمی معمولاً کوچک تر از ثابت زمانی قطبش سطحی دانه های کانه های رساناست. رفتارهای مختلف ثابت زمانی (τ) برای دانه های قطبش پذیر کانی سازی، پایه های نظری مناسبی را برای تشخیص توده های قطبش پذیر بر اساس ساختار آنها با استفاده از یک ثابت زمانی فراهم می کند.

نتایج فوق تنها برای یک دانه منفرد و برای سنگهای کانی سازی شده با دانه های هادی همگن معتبر است. اما سنگهای طبیعی دارای چندین عضو کانی سازی با دانه های کانی متعدد و دارای ثابت های زمانی مختلف می باشند. بنابراین، حتی اگر رفتار الکتروشیمیایی دانه های کانی و محلول درون آنها برای همه عضوهای قطبش پذیر یکسان باشد (C یکسان باشد)، اختلاف مقادیر ثابت های زمانی باعث طیف گسترده مقاومت مختلط می شود و در نتیجه وابسته بسامد ظاهری کم می شود. اگر وابسته بسامد قطبش سطحی ($\mathbf{c}^{(S)}$) نامیده شود، رابطه بین وابسته بسامد قطبش سطحی و حجمی به صورت رابطه ۴ است. یعنی وقتی دانه های کانی فلزی همگن هستند، $\mathbf{c} = \mathbf{c}^{(S)}$ است و وقتی دانه ها ناهمگن هستند، $\mathbf{c} < \mathbf{c}^{(S)}$ است (Horel & Kennard, 1970b).

$$\mathbf{c} \leq \mathbf{c}^{(S)} \quad (4)$$

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

از مجموع مقاطع مدل‌سازی معکوس داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی و همچنین بررسیهای طیفی داده‌های قطبش القایی، نتایج آتی به دست آمد:

۱- به علت وجود نوفه در داده‌های اندازه‌گیری شده، نتایج متفاوت آرایه‌های گوناگون بر روی یک مدل خاص و وجود بی‌هنجاری‌های دروغین به همراه بی‌هنجاری‌های حقیقی، حتماً باید از مدل‌سازی معکوس به منظور اخذ موقعیت دقیق توده زیرسطحی استفاده شود تا محل‌های حفاری با دقت بیشتری تعیین گردد.

۲- با مقایسه مقاطع مدل‌سازیهای مختلف نتیجه می‌شود که از بین روش‌های معکوس‌سازی، روش‌های هموار در مقایسه با روش‌های پارامتری نسبت به نوفه حساسیت کمتری دارند. همچنین از میان روش‌های پارامتری، روش رگرسیون ریج به دلیل به کارگیری ضریب تعدیل مارکارت، در مقایسه با سایر روش‌های پارامتری نسبت به پارازیت حساسیت کمتری دارد و با یک حدس اولیه نسبتاً ضعیف هم می‌تواند به سوی مدل واقعی همگرا شود.

۳- روش معکوس‌سازی هموار، هاله‌ای از توده بی‌هنجاری را نشان می‌دهد که به تدریج به زمینه تقلیل می‌یابد. حال آنکه با استفاده از معکوس‌سازی پارامتری می‌توان محل دقیق توده را مشخص کرد. لذا جهت تعیین محل حفاری‌های اکتشافی بهتر است از نتایج نهایی مدل‌سازی معکوس پارامتری استفاده گردد.

۴- انجام تصحیح توپوگرافی بر روی داده‌های با توپوگرافی بزرگ‌تراز ۱۰ درجه ضروری است، چراکه شیب زیاد توپوگرافی باعث انحراف بیشتر خطوط جریان و به دنبال آن سطوح هم‌پتانسیل می‌شود. در نتیجه، اختلاف بین کمترین و بیشترین مقاومت ویژه ظاهری حاصل، بیشتر می‌شود که این امر باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های دروغین و تضعیف بی‌هنجاری‌های واقعی می‌شود.

۵- با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که مقاطع مربوط به داده‌های خام و مقاطع پارامترهای قطبش القایی طیفی باهم تفاوت‌هایی دارند که در صورت تأیید نتایج مطالعات، می‌توان به پتانسیل‌های مفید استفاده از پارامترهای قطبش القایی طیفی حوزه‌زمانی در تشخیص منابع تولیدکننده قطبش القایی پی‌برد.

۶- یکی از عوامل مؤثر و کنترل‌کننده توزیع پارامترهای قطبش القایی طیفی، بافت و ساخت توده‌های کانی‌سازی شده است که در این میان بافت‌های افشان، رگه‌ای و پیوسته را می‌توان به خوبی و از طریق پارامتر ثابت‌زمانی از هم تمیز داد. همچنین وابسته بسامد در تعیین توزیع دانه‌بندی و تشخیص نوفه‌های جفت شدگی القایی به خوبی قابل استفاده است.

باتوجه به نتایج به دست آمده از مطالعات این مقاله و نتایج تحقیقات انجام شده و در حال انجام دیگر محققان دنیا، پیشنهاد می‌شود:

۱- از آنجا که هیچ یک از روش‌های اکتشافی به تنهایی روش جامع و کاملی نیست و روش قطبش القایی طیفی حوزه‌زمانی هم از این قاعده مستثنی نیست، لذا برای دستیابی به اطلاعات کامل‌تر و دقیق‌تر، از روش‌هایی مانند مغناطیس‌سنجی و در صورت وجود ابزار و وسایل اندازه‌گیری از روش قطبش القایی مغناطیسی در ادامه مطالعات استفاده شود.

۲- با توجه به مقاطع مربوط به مدل‌سازیهای معکوس و پارامترهای قطبش القایی طیفی حوزه زمان پیشنهاد می‌شود دست کم یک گمانه اکتشافی به عمق تقریبی ۱۳۵ متر بر روی نیمرخ 400W و در فاصله ۱۴۰ متری مبدا نیمرخ با شیب ۷۳ درجه و به سمت جنوب (عمود بر سطح زمین شیبدار) حفر شود. بدیهی است که تنها با بررسی نتایج حاصل از حفاری مذکور می‌توان در خصوص منابع ایجاد بی‌هنجاری‌های قطبش القایی اطمینان مطلق حاصل کرد.

۳- از آنجا که توپوگرافی محدوده برداشت کاملاً دوبعدی نیست، پیشنهاد می‌شود از مدل‌سازی‌های سه‌بعدی که دقت عمل بیشتری نسبت به دوبعدی دارند، استفاده شود. برای رسیدن به این هدف، لازم است داده‌ها با تراکم بیشتری برداشت شوند و مورد مطالعه قرار گیرند.

۴- پیشنهاد می‌شود که از هر دو متر مغزه حفاری، نمونه‌برداری گردد و مطالعات سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری و تجزیه شیمیایی بر روی ترکیب‌های Fe_2O_3 ، $Fe.ZnO.PbO$ و عناصر Pb و Zn صورت پذیرد. به گونه‌ای که بتوان از این نتایج در شناسایی مستقیم منابع ایجادکننده بی‌هنجاری‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه استفاده کرد.

تقدیر و تشکر

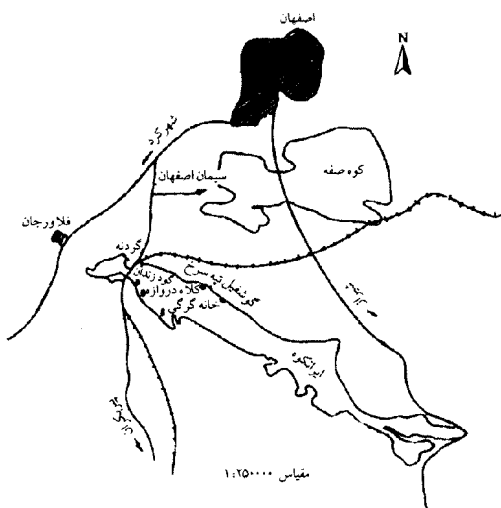
اجرای این تحقیق بدون مساعدت‌های شرکت معدنی باما میسر نبود. از ایشان بخاطر این حمایتها کمال تشکر را دارد.

جدول ۱- ویژگی توده های زیرسطحی اصلی شناخته شده حاصل از مدل سازی پارامتری نیمرخ 400W

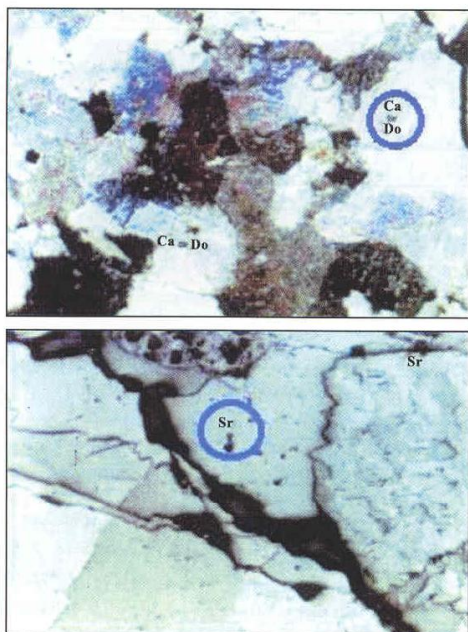
توده	IP	Res	علت
زمینه	۱۵،۳	۱۴۴۳	تکتونیک شدید و دولومیت های آهن دار
۱	۲۶،۱	۳۷۰۰	آبرفت خشک و شیل های ژوراسیک
۲	۷۹	۳۸۶۰	توده فلزی پیریت یا گالن
۳	۷،۴	۶۲۵۲	دولومیت های سخت و بدون کانی سازی
۴	۳۶،۶	۹۴۶،۷	پرشدگی ثانویه توسط رس
۵	۹،۵	۵۹۲۷	دولومیت های بدون کانی سازی

جدول ۲- گستره تغییرات وابسته بسامد برای سنگ های با کانی سازی های مختلف [Apparao, 1997]

نوع سنگ	گستره C	علت
سنگ های کانی سازی شده	< 0.4	یکسان نبودن دانه های کانی سازی شده
سنگ های افشان	0.4 - 0.6	همگن بودن دانه های کانی سازی شده
سنگ های با کانی سازی کم	0.2 - 0.6	ناهمگن بودن دانه های کانی سازی شده
سنگ های با کانی سازی گرافیتی و رسانا	0.5	-



شکل ۱- موقعیت کانسارهای شرکت معدنی باما و راه های دسترسی به محدوده مورد مطالعه (طالبی مزرعه شاهی، ۱۳۷۷)



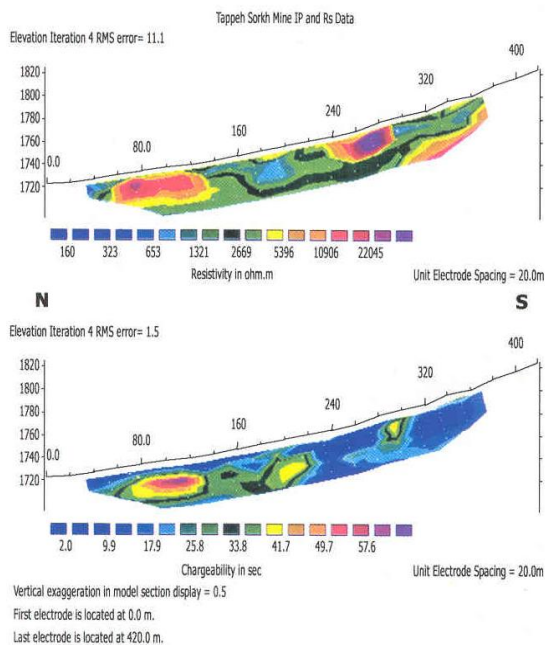
شکل ۳- دو نمونه تیغه نازک و مقطع صیقلی مربوط به محدوده مورد مطالعه



راهنمای نقشه

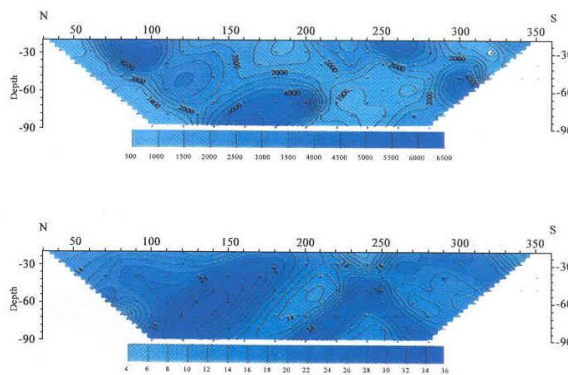
LIGHT BROWN DOLOMITE	LD
TALLUS & BRECCIA	TA
TICK BEDDED DOLOMITE	D
ALLUVIUM	Q

مقیاس ۱:۵۰۰۰

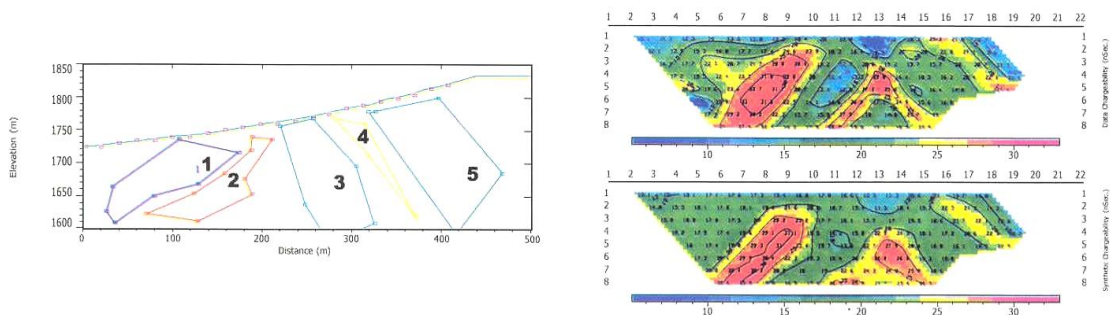


شکل ۵- مقاطع مقاومت ویژه (قسمت بالا) و قطبش القایی (قسمت پایین) حاصل از مدل‌سازی معکوس هموار نیم‌رخ 400W

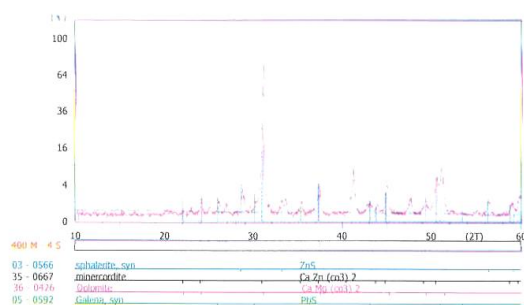
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه برداشت



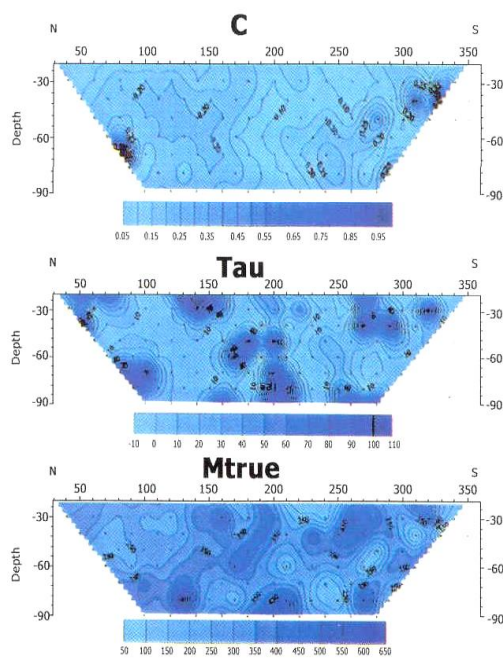
شکل ۴- شبه‌مقاطع داده‌های خام نیم‌رخ 400W (بالا: مقاومت ویژه ظاهری، پایین: بار پذیری)



شکل ۶- مقطع قطبش القایی (سمت راست) و توده های زیر سطحی (سمت چپ) حاصل از مدل سازی معکوس پارامتری پروفیل 400W



شکل ۷- نتایج حاصل از تجزیه پراش پرتو ایکس به همراه کانی های تشخیص داده شده در نیمرخ 400W



شکل ۸- مقاطع مربوط به پارامترهای طیفی نیمرخ 400W

کتابنگاری

طالبی مزرعه‌شاهی، م.، ۱۳۷۷- تصحیحات اثر توپوگرافی بر روی داده‌های ژئوالکترونیک با استفاده از روش اجزاء محدود، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

غضبان، ف. و حاجی کاظمی، ا.، ۱۳۷۳- شواهد زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی موجود در سنگ میزبان نهشته‌های سرب، روی و باریم در ناحیه ایرانکوه غرب ایران مرکزی، چهارمین سمپوزیم معدنکاری ایران، جلد اول (اکتشاف)، ص ص ۷۹ - ۴۹، یزد.

References

- Rastad, E., 1981- Geological mineralogical and ore facieses investigations on the lower cretaceous strata band Zn, Pb, (Ba , Cu) deposits on the irankuh mountain range, Isfahan west central Iran, Ph.D. Thesis,.
- Burnol, L., 1968 - Contribution a L'etude des gisements de plumb et zinc L'Iran essais de classification paragenetique, Geological survey of Iran, Report No 11.
- Luo, Z.Z., Zang, G., 1998- Theory and application of Spectral Induced Polarization, Geophysical monograph series, No.8, SEG publication.
- Ward, S.H., 1990- Investigations in geophysics Geotechnical and environmental geophysics, No.5, SEG publication.
- Yungul, S. H., 1996-Electrical methods in geophysics exploration of deep sedimentary basins, 1st edition, Chapman Hall.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., , 1990- Applied geophysics, 2nd editions, Cambridge University Press.
- Marquardt, D.W., 1963- "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", J. Soc. Indust. Appli. Math., Vol.11, no.2.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996-"Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi- Newton method", Geophysical prospecting, No.44, pp. 131 – 152.
- Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R., Nelson, P.H., 1978- "Mineral discrimination and removal of Induced Polarization Coupling with multi frequency IP.", Geophysics, Vol.43, No.3, pp. 588-609.
- Hohmann, G.W., , 1975- "3-D Induced Polarization EM modeling", Geophysics, Vol.40, pp. 309 - 324.
- Johnson, I.M., . 1993 - 2003, 1984 -"Spectral Induced Polarization parameters as determined through Time-domain measurements", Geophysics, Vol.49, No.11, pp.
- Tombs, J.M.C., 1981- "The feasibility of Spectral Induced Polarization measurements in the Time-domain", Geo exploration, Vol.19, pp. 91 - 102.
- Horel, A.E., Kennard, R.W., 1970b -"Ridge regression: Application to non orthogonal problems", Tachnometrics, No.12, pp. 69 – 82.
- Apparrao, A., 1997-Developments in geo electrical methods, National geophysical research institute, Hyderabad, A. A. Balkama. Pub.

* عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

** استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان

* Academic staff of Shahrood University of Technology

**Assistant professor of Isfahan University of Technology