



کاربرد سونداژ الکتریکی قائم در شناخت ژئومکانیکی توده سنگ میزبان آنومالی III کانسار نارینگان، منطقه بافق، زون ایران مرکزی

سیده‌ادی بهشتی بافقی^۱، علیرضا یاراحمدی بافقی^{۱*}، احمد قربانی^۲، حسنعلی قاری^۲
۱. بخش استخراج، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، صندوق پستی: ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، یزد - ایران
۲. بخش اکتشاف، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، صندوق پستی: ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، یزد - ایران

*Email: ayarahmadi@yazd.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱

چکیده

روش الکتریکی به عنوان یک بررسی ژئوفیزیکی می‌تواند پارامترهای زمین‌شناسی شامل خردشدگی، شاخص دگرسانی توده سنگ، درصد اشباع، کیفیت آب زیرزمینی و ... را به خوبی نمایش دهد. این پارامترها نقش مهمی در طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ از طریق تأثیر بر دو شاخص کیفیت توده سنگ (RQD) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، کانه‌زایی عناصر و نیز نحوه حفاری دارند. در این مقاله با استفاده از روش سونداژ الکتریکی قائم در لایه‌های زیرسطحی به بررسی تعیین این پارامترها و متعاقباً دو شاخص مذکور در توده‌سنگ‌های آذرآواری آنومالی III کانسار نارینگان پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده (با استفاده از نرم‌افزار IPI2win) ارتباط قابل قبولی با میزان شاخص دگرسانی و تا حدی GSI در توده سنگ دارد. با این حال تعیین دقیق GSI و هم‌چنین RQD با استفاده از این روش ژئوفیزیکی از اعتماد بالایی برخوردار نیست. به بیان ساده‌تر با استفاده از یک رابطه ریاضی نمی‌توان با مقاومت ویژه الکتریکی میزان GSI و شاخص آلتراسیون را تخمین زد.

کلیدواژه‌ها: سونداژ الکتریکی قائم، طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ، شاخص دگرسانی، GSI، RQD

The application of vertical electrical sounding in geomechanical recognition of host rock mass of anomaly III of Narigan deposit, Bafgh region, Central Iran zone

S.H. Beheshti Bafqi¹, A.R. Yarahmadi Bafqi^{1*}, A. Gorbani², H.A. Gari²

1. Department of Mining and Metallurgy, Extraction Faculty, Yazd University, P.O.BOX: 8915818411, Yazd - Iran
2. Department of Mining and Metallurgy, Exploration Faculty, Yazd University, P.O.BOX: 8915818411, Yazd - Iran

Research Article

Received 8.1.2022 Accepted 20.2.2022

Abstract

The electrical method as a geophysical survey can show the geological parameters including fragmentation, rock mass alteration index, saturation percentage and groundwater quality. These parameters play an important role in rock mass engineering classification by affecting the rock mass quality design (RQD) and geological strength index (GSI), mineralization of elements and drilling method. In this paper, using the vertical electrical sounding method in subsurface layers, the determination of these parameters and subsequently two mentioned indicators in anomalous III pyroclastic rock masses of Narigan deposit was investigated. The results showed that the interpreted electrical resistivity (using IPI2win software) has an acceptable correlation between the degree of alteration index and GSI in the rock mass. However, accurate determination of GSI and RQD using this geophysical method is not very reliable. In other words, using a mathematical equation, it is not possible to estimate the amount of GSI and the alteration index with the electrical resistivity.

Keywords: Vertical electrical sounding, Rock mass engineering classification, Altration index, GSI, RQD



۱. مقدمه

بررسی ویژگی‌های ژئومکانیکی معادن در حال استخراج به دلیل عوامل متعددی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. خصوصیات ژئومکانیکی ساختگاه با کمک اطلاعات به دست آمده از کاوش‌های ژئوتکنیکی (حفاری گمانه، چاله‌های آزمایشی، بررسی رخنمون‌ها و غیره) و ژئوفیزیکی تهیه می‌گردد. غالباً از بررسی‌های ژئوفیزیکی به عنوان مکمل روش‌های ژئوتکنیک (تکمیل مرحله شناسایی و افزایش دقت نتایج آزمون‌های ژئوتکنیکی) استفاده می‌شود. از میان بررسی‌های ژئوفیزیکی، روش الکتریکی می‌تواند برخی خصوصیات زمین‌شناسی از قبیل خردشدگی، شاخص دگرسانی توده سنگ^۱، درصد اشباع، کیفیت آب زیرزمینی و ... را به خوبی نمایش دهد. این خصوصیات نقش مهمی در تعیین شاخص کیفیت توده سنگ (RQD) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) و متعاقباً طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ دارند. به گونه‌ای که RQD تا حدودی توانایی نمایش میزان خردشدگی (چگالی حجمی درزه‌داری) توده سنگ را دارد. از طرفی GSI به خردشدگی و کیفیت درزه‌ها بستگی دارد. کیفیت درزه‌ها نیز تا حدودی تابع شاخص دگرسانی است [۱-۳]. همچنین این خصوصیات (خردشدگی و شاخص دگرسانی) بر کانه‌زایی عناصر و نیز نحوه حفاری تأثیرگذارند [۴-۶]. بنابراین با برقراری ارتباط بین مقاومت ویژه الکتریکی و این خصوصیات، می‌توان با استفاده از این روش ژئوفیزیکی به عوامل مؤثر در کانه‌زایی عناصر پرتوزا و نیز نحوه معدن‌کاری آن‌ها پرداخت.

در این پژوهش مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در ۲۷ نقطه از آنومالی III کانسار نارینگان که با روش سونداژ الکتریکی قائم در دو پروفیل انجام شده با اطلاعات ژئومکانیکی (RQD) و شاخص دگرسانی) ۲۸ گمانه اکتشافی مجاور مقایسه شده و ارتباط هر کدام از این پارامترها با مقاومت ویژه الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت.

۲. منطقه مورد مطالعه

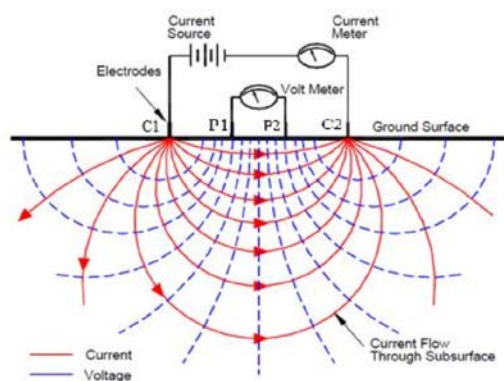
کانسارها و پتانسیل‌های معدنی بسیاری در منطقه ایران مرکزی شناسایی شده است. یکی از این کانسارها، کانسار نارینگان است. منطقه نارینگان بر اساس تقسیم‌بندی مناطق ساختاری در منطقه ایران مرکزی واقع شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌های موجود در منطقه، مجموعه‌ی پیروکلاستیک پرکامبرین می‌باشد که توده‌های گرانیته نارینگان با سن پرکامبرین (احتمالاً به

داخل آن‌ها نفوذ کرده‌اند. سنگ‌های منطقه شامل سه گروه گرانیته نارینگان، ریولیت (کوارتز پورفیر) و ولکانیک‌های رسوبی می‌باشند [۷].

توده سنگ میزبان آنومالی III نارینگان از جنس ولکانیک‌های رسوبی می‌باشد. سنگ‌های پیروکلاستیک، وسعت زیادی در این محدوده دارند که به رنگ‌های خاکستری، سبز و قهوه‌ای قابل مشاهده بوده و ترکیب آن‌ها از اسیدی تا بازی متغیر است (شکل ۱). این سنگ‌ها در قسمت‌های مرکزی توسط رسوبات عهد حاضر پوشیده شده‌اند. کانی‌های قابل مشاهده این سنگ‌ها در نمونه دستی شامل کلریت، کوارتز، فلدسپات و به مقدار کم تر اپیدوت است. در مقاطع میکروسکوپی کانی‌های اصلی عبارتند از: بیوتیت، کوارتز، ارتوز و پلاژیوکلاز (الیگوکلاز). شایع‌ترین نوع دگرسانی در این سنگ‌ها شامل کلریتی‌شدن (که احتمالاً نتیجه آلتراسیون بیوتیت‌ها است) و نیز رسی‌شدن (محصول دگرسانی پلاژیوکلازها) است. هماتیته شدن و لیمونیتی‌شدن به همراه ژاروسیت و ژپس در این آنومالی وسعت زیادی را شامل می‌شود که حاصل هوازدگی سطحی می‌باشد. از نظر زمین‌ساختی نیز منطقه کاملاً خردشده می‌باشد. با توجه به شرایط زمین‌ساختی منطقه، شرایط حفاری بسیار سخت می‌باشد و متوسط RQD برداشت شده از مغزه‌های حفاری در حدود ۱۲ درصد ثبت شده است. به گونه‌ای که از ۲۸ گمانه اکتشافی مورد مطالعه با مجموع طول حفاری ۸۰۷۲ متر، تقریباً ۸۷ درصد از طول این حفاری‌ها، RQD کم‌تر از ۲۵ درصد را داشته‌اند. علاوه بر حفاری‌های مغزه‌گیری و پودری، مطالعات ژئوفیزیکی نیز در این منطقه انجام شده است. با توجه به این که لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه ثابت بوده (به عبارتی فرض بر این است که ماده سنگ کم و بیش ثابت باشد مگر در مناطقی که آلتراسیون به ویژه آلتراسیون آرژیلیکی اتفاق افتاده است)، آب‌زیرزمینی از نزدیکی سطح زمین تا عمق وجود دارد، می‌توان تغییرات مقاومت مکانیکی سنگ را به دلیل درزه‌داری و تغییرات شاخص دگرسانی آن در نظر گرفت (توده سنگ). از طرفی تغییرات در مقاومت ویژه الکتریکی نیز به دلیل خردشدگی و آلتراسیون می‌باشد. لذا مطالعه ویژه‌گی‌های توده سنگ از طریق ژئومکانیک و انطباق آن با ژئوفیزیک با متغیرهای کم‌تری روبه‌رو خواهد بود.

۱. شاخص دگرسانی مطابق درجه‌ی پیشنهادی انجمن مکانیک سنگ (ISMR(1978c)





شکل ۲. نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل [۹].

اندازه پتانسیل الکتریکی ایجاد شده به وسیله دو الکتروود جریان در فاصله‌ی معلومی از یک زمین همگن و همسانگرد، مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\varphi = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_{c1}} - \frac{1}{r_{c2}} \right) \quad (3)$$

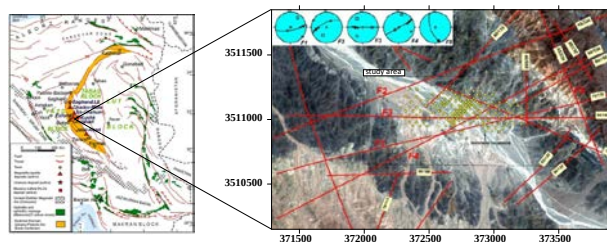
در این رابطه r_{c1} فاصله نقطه مورد نظر از الکتروود C_1 و r_{c2} مابین فاصله همان الکتروود از C_2 است. در شکل ۲ نمونه‌ای از یک آرایش چهار الکتروود نشان داده شده است. در این شکل، الکتروودهای C_1 و C_2 نشان‌دهنده الکتروودهای جریان و الکتروودهای P_1 و P_2 الکتروودهای پتانسیل می‌باشند. در این آرایش چهار الکتروود، اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده بین دو الکتروود پتانسیل، طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\Delta\varphi = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_{c1p1}} - \frac{1}{r_{c2p1}} - \frac{1}{r_{c1p2}} + \frac{1}{r_{c2p2}} \right) \quad (4)$$

که در آن $\Delta\varphi$ برابر اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکتروود پتانسیل، r_{c1p1} فاصله بین الکتروودهای C_1 و P_1 ، r_{c2p1} برابر فاصله بین الکتروودهای C_2 و P_1 است و به همین ترتیب r_{c1p2} فاصله بین الکتروودهای C_1 و P_2 و r_{c2p2} فاصله بین الکتروودهای C_2 و P_2 است. بعد از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل می‌توان اندازه مقاومت ویژه ظاهری زمین را طبق روابط ۵ و ۶ محاسبه نمود:

$$\rho_a = K \frac{\Delta\varphi}{I} \quad (5)$$

$$K = \left(\frac{1}{r_{c1p1}} - \frac{1}{r_{c2p1}} - \frac{1}{r_{c1p2}} + \frac{1}{r_{c2p2}} \right) \quad (6)$$



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و وضعیت زمین‌ساختی و موقعیت گمانه‌های اکتشافی.

۳. روش مقاومت ویژه الکتریکی

در روش مقاومت ویژه با استفاده از تزریق جریان مستقیم به زمین، اختلاف پتانسیلی ایجاد می‌شود که می‌توان این اختلاف پتانسیل را اندازه‌گیری نمود و از رابطه بین جریان و پتانسیل، مقاومت ویژه ظاهری زمین را محاسبه نمود. در این روش با عبور جریان الکتریکی از درون زمین، آثار قابل ثبت آن روی سطح زمین مشاهده می‌شود. واضح است که ویژگی این آثار متناسب با ویژگی‌های درونی زمین تغییر می‌کند. در حقیقت این روش بر رسانایی یا قابلیت هدایت الکتریکی سنگ‌ها و کانی‌ها استوار است [۸]. مقاومت ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین را نشان می‌دهد. در مورد رسانایی مواد با مقاومت الکتریکی R ، طول L و سطح مقطع A در زیرسطح زمین، رابطه ۱ برقرار است:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

بر اساس قانون اهم معادله اخیر به شکل رابطه ۲ در می‌آید:

$$\rho = \frac{\Delta V \cdot A}{I \cdot L} \quad (2)$$

که در این رابطه، ρ مبین مقاومت ویژه الکتریکی، I شدت جریان الکتریکی، ΔV برابر اختلاف پتانسیل الکتریکی و L طول استوانه فرضی می‌باشد. رابطه اخیر برای تعیین مقاومت ویژه محیط همگن و همسانگرد مناسب می‌باشد اما برای یک محیط ناهمگن و ناهمسانگرد باید مقاومت ویژه را در هر نقطه تعیین نمود.

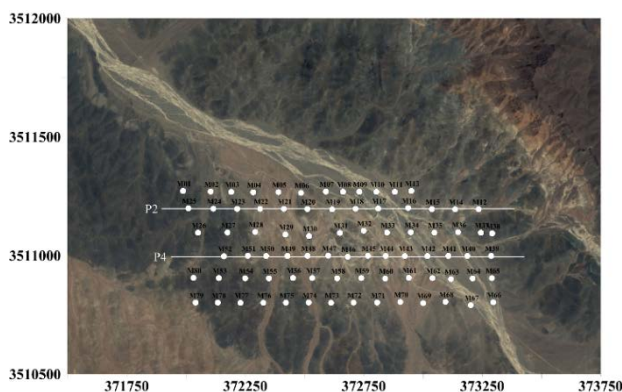
در شکل ۲ چگونگی توزیع جریان و نحوه توزیع پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در اثر شارش جریان به وسیله‌ی الکتروودهای پتانسیل نشان داده شده است.



سونداژ الکتریکی تشکیل شده است که در یک پروفیل خطی برداشت شده‌اند و در نتیجه می‌توانند به صورت دو بعدی نیز تفسیر شوند [۱۵].

در این روش هدف اولیه بررسی زمین به صورت یک بعدی است و برداشت در آن اغلب با آرایه شلومبرژه انجام می‌شود. با برداشت خطی چندین سونداژ امکان تفسیر دو بعدی مسیر خواهد شد. به دلیل حساسیت کم آرایه شلومبرژه به تغییرات جانبی، بهتر است مدل‌سازی به وسیله این آرایه را یک مدل‌سازی ۱/۵ بعدی دانست. آرایه شلومبرژه در نشان دادن تغییرات هموار مقاومت ویژه، قوی‌تر از دیگر آرایه‌ها است. از این‌رو روش برداشت CVES در زمین‌های با تغییرات عمقی هموار نتایجی قابل قبولی ارائه می‌دهد [۱۵].

در این پژوهش در محدوده مورد مطالعه در ۸۰ نقطه مطابق شکل ۳ سونداژ الکتریکی قائم با حداکثر فاصله الکتروده جریان ۱۰۰۰ متر ($AB=1000$) با آرایش شلومبرژه انجام شده است. فاصله پروفیل‌های برداشت شده نسبت به هم تقریباً ۱۰۰ متر است. گمانه‌های اکتشافی در حد فاصل پروفیل P_2 و P_4 واقع شده‌اند. فاصله الکترودهای جریان و پتانسیل نیز برای هر سونداژ تکرار شده است. به منظور بررسی تغییرات جانبی نیز زمانی که الکترودهای جریان در فاصله ۲۰، ۶۰، ۲۰۰ و ۶۰۰ متر از هم می‌باشند، الکتروده پتانسیل در دو فاصله مشخص اندازه‌گیری پتانسیل را انجام داده‌اند تا میزان تغییرات جانبی نیز مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۳. موقعیت سونداژهای الکتریکی قائم و پروفیل P_2 و P_4 ، سونداژ M_{12} و M_{39} در محل رسوبات آبرفتی و سونداژ M_{12} و M_{39} در محل رخنمون‌های سنگی.

در این رابطه ρ_a مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری زمین و K فاکتور هندسی برای آرایش مورد استفاده است. فاکتور هندسی، بستگی به چگونگی آرایش چهار الکترودهی در هر آرایش دارد. رابطه بین مقاومت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود [۱۰].

$$\rho_a = K.R \quad (7)$$

۴. بحث و روش‌شناسی

طبق قانون Archie، ۱۹۴۱ مقاومت الکتریکی توده سنگ اشباع از آب وابسته به فاکتور سازندی و میزان رسانایی محلول اشباع‌کننده می‌باشد [۱۲]. به‌طور کلی مقاومت ویژه الکتریکی در مناطق خرد شده نسبت به مناطق با شکستگی‌های کم‌تر، مقدار کم‌تری دارد. مقاومت مکانیکی توده‌های ژئوتکنیکی به عوامل زیادی از جمله تخلخل بستگی دارد. تخلخل (چگالی درزه‌داری حجمی) یا J_v زیاد در یک توده خاکی یا سنگی نمایان‌گر مقاومت مکانیکی پایین آن است. تخلخل می‌تواند به صورت ذاتی باشد یا در اثر عوامل مکانیکی یا شیمیایی به صورت ثانویه ایجاد شود. از طرف دیگر مقاومت الکتریکی توده به میزان آب موجود در فضاهای خالی آن بستگی دارد؛ لذا می‌توان فرض کرد که مقاومت مکانیکی توده و مقاومت ویژه الکتریکی به یک‌دیگر وابسته‌اند و تخلخل وجه مشترک نتیجه این دو کمیت است. مقاومت ویژه الکتریکی هم‌چنین مستقیماً با میزان رس نیز مرتبط است [۱۳]. رس‌های مرطوب و کانی‌های رسی که دارای مقاومت ویژه کمی هستند، در داخل توده‌های سنگی و خاکی اثر قابل‌ملاحظه‌ای در کاهش مقدار مقاومت ویژه‌ی توده دارند [۱۴]. به‌طور کلی میزان رس تابع دگرسانی توده سنگ می‌باشد. به عبارت دیگر هرچه شدت دگرسانی (تجزیه کانی و رسی شدن) در توده سنگ بیش‌تر باشد، مقاومت مکانیکی و الکتریکی کم‌تر می‌شود.

۵. روش‌های برداشت مقاومت ویژه الکتریکی

داده‌های مقاومت ویژه به صورت یک بعدی و دو بعدی به دست می‌آیند. به‌طور کلی برداشت‌های یک بعدی مقاومت ویژه، جهت بررسی تغییرات جانبی و عمقی به دو روش پروفیل‌زنی و سونداژزنی صورت می‌پذیرد. در این تحقیق برای بررسی تغییرات مقاومت ویژه در جهت قائم از روش برداشت سونداژزنی قائم پیوسته استفاده شده است. این روش در حقیقت از تعدادی



۱.۶ شاخص کیفیت سنگ (RQD)

دیر ۱۹۶۴ [۱۶] یک اندیس کمی مبتنی بر درصد بازیابی مغزه مطابق رابطه ۸ ارائه داد. این شاخص کیفیت سنگ یا RQD به طور وسیعی در طرح‌های مختلف استفاده شده و در انتخاب سیستم نگهداری تونل نیز سودمند واقع گردیده است. انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ توصیه کرده است که اندازه قطر مغزه حداقل ۵۴ میلی‌متر بوده و حفاری با سرمته الماسی انجام گیرد.

$$RQD = 100 \cdot \frac{\sum_i X_i}{L} \quad (۸)$$

که در آن X_i طول قطعه i با اندازه بزرگ‌تر یا مساوی با ۱۰ سانتی‌متر، n تعداد قطعات با طول بزرگ‌تر از ۱۰ سانتی‌متر و L طول حفاری یا خط برداشت می‌باشد چرا که RQD را برای خط برداشت نیز می‌توان محاسبه نمود. در اکثر موارد RQD تنها روشی است که برای اندازه‌گیری چگالی درزه‌داری در طول گمانه‌های حفاری از آن استفاده می‌شود. با این وجود اکثر افرادی که در زمینه ثبت داده‌های مغزه و مهندسی سنگ مشغول هستند، محدودیت‌هایی را برای RQD عنوان کرده‌اند. برای مثال در مواردی که فاصله بین درزه‌ها ۹ سانتی‌متر یا کمتر است، مقدار RQD برابر با صفر می‌باشد در حالی که وقتی فاصله بین درزه‌ها برابر با ۱۱ سانتی‌متر یا بیشتر می‌باشد مقدار RQD، ۱۰۰ درصد به دست می‌آید. حال آن‌که تفاوت یا فاصله چندانی بین اندازه ۹ تا ۱۱ سانتی‌متر وجود ندارد.

۲.۶ شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

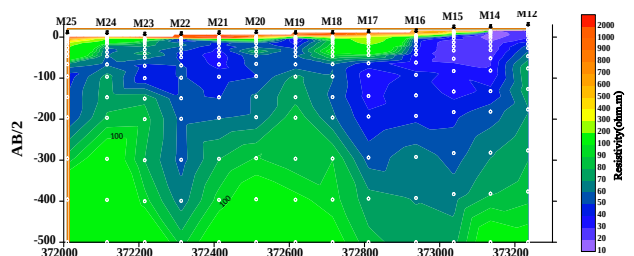
شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) توسط هوک و همکاران در ۱۹۹۸ [۱۷] معرفی شده است. از این شاخص برای برآورد مقاومت توده سنگ در شرایط مختلف زمین‌شناسی و با کمک مشاهدات صحرایی استفاده شده است. طبقه‌بندی GSI بر اساس توصیف فاکتورهای ساختار توده سنگ و شرایط سطح درزه تشکیل شده است. این فاکتورها بیانگر RQD (از طریق خردشدگی) و کیفیت درزه‌ها هستند. هوک ۲۰۱۳ [۱۸] یک نمودار GSI کمی شده براساس دو پارامتر شرایط درزه و پیشنهاد دادند. همچنین مقدار GSI را می‌توان با تعیین نرخ شرایط درزه و میزان RQD و با کمک رابطه ۹ به دست آورد:

$$GSI = 1.5 J_{Cond} + RQD / 2 \quad (۹)$$

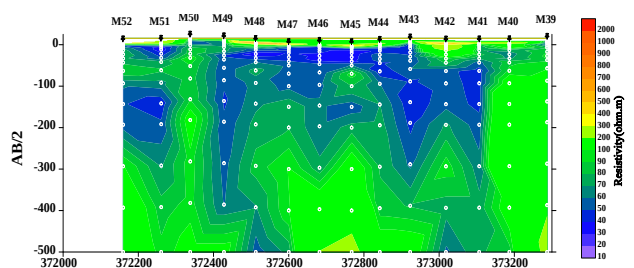
نتایج اولیه تفسیر و بررسی مقاومت ظاهری در پروفیل‌های $P2$ و $P2$ نیز حاکی از دو آنومالی کاهش مقاومت ویژه الکتریکی در این دو خط برداشت می‌باشد که در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است در محل سونداژهای $M17$ و $M42$ که در محل مسیل رودخانه واقع شده است به علت وجود شن‌های خشک فاقد رس، همان‌طور که انتظار می‌رود مقاومت حداکثر اندازه‌گیری شده است. همچنین در محل سونداژهای $M12$ و $M39$ که رخنمون سنگ منطقه وجود دارد می‌توان مقاومت الکتریکی توده سنگ هوازده را تعیین کرد. آن‌چه مسلم است این موضوع است که رخنمون سنگی در محل سونداژهای یاد شده مقاومت الکتریکی به مراتب کم‌تری از شن‌های رودخانه‌ای دارند که این موضوع می‌تواند متأثر از میزان کانی‌های رسی باشد که در اثر آلتراسیون در توده سنگ به وجود آمده‌اند.

۶. طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ

محققین بسیاری در زمینه طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ روش‌هایی را ارائه نموده‌اند، در اکثر طبقه‌بندی‌ها پارامترهایی نظیر مقاومت مکانیکی سنگ بکر، جهت‌داری، بازشدگی و گسترگی درزه‌ها و نیز میزان جریان آب باید مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به این‌که بعضی اطلاعات یاد شده از مغزه‌های اکتشافی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد فقط روش طبقه‌بندی RQD و GSI که پارامترهای آن قابل اندازه‌گیری از مغزه‌های اکتشافی می‌باشد در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.



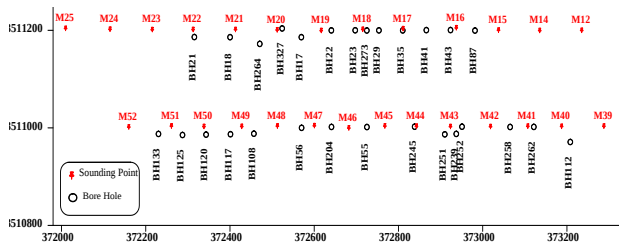
شکل ۴. مقطع مقاومت ویژه ظاهری در پروفیل $P2$.



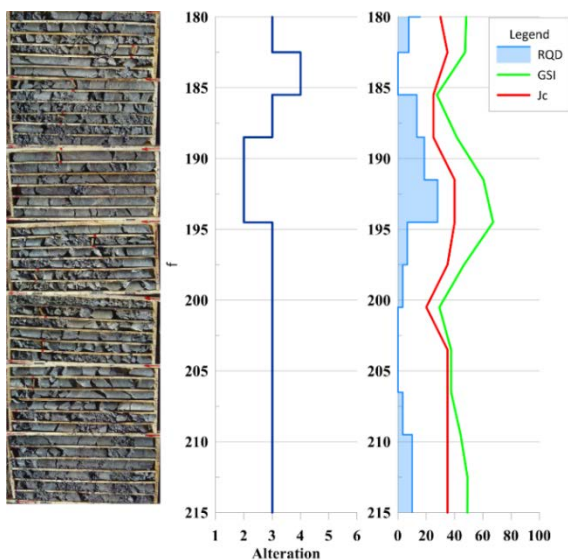
شکل ۵. مقطع مقاومت ویژه ظاهری در پروفیل $P4$.



با در نظر گرفتن شکل ۸ می‌توان دریافت که نقش دگرسانی سنگ بر شرایط درزه مؤثرتر می‌باشد. این مسأله می‌تواند نشان دهد که احتمالاً دگرسانی از طریق انتقال محلول‌های گرمایی از طریق درزه‌های موجود ایجاد شده و شرایط درزه را متأثر کرده است. این نتیجه‌گیری با پژوهش‌های زمین‌شناسی نیز انطباق دارد.



شکل ۶. موقعیت چاه‌های اکتشافی نسبت به سونداژهای الکتریکی.



شکل ۷. تأثیر تکتونیک و آلتراسیون در توده سنگ منطقه و تشکیل کانی‌های رسی، گمانه BH31117 از عمق ۱۸۱ تا ۲۱۵.

۷. برداشت‌های ژئوتکنیک از مغزه‌های اکتشافی

به منظور طبقه‌بندی توده سنگ در منطقه مورد مطالعه و بررسی ارتباط با نتایج سونداژهای الکتریکی قائم، ۱۳ گمانه در نزدیکی خط پروفیل P2 و ۱۵ گمانه در نزدیکی خط پروفیل P4 مطابق شکل ۶ انتخاب شدند و پس از مطالعه ۸۰۷۲ متر مغزه، اطلاعاتی نظیر RQD، شرایط درزه و شدت دگرسانی مطابق درجه‌ی پیشنهادی انجمن مکانیک سنگ (۱۹۷۸C) ISRM از گمانه‌های یاد شده برداشت شد.

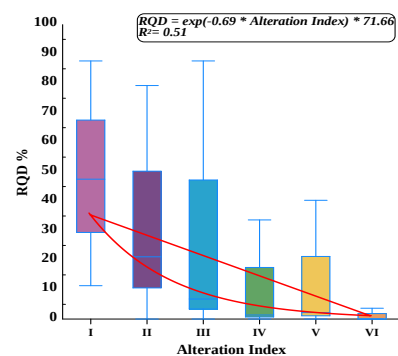
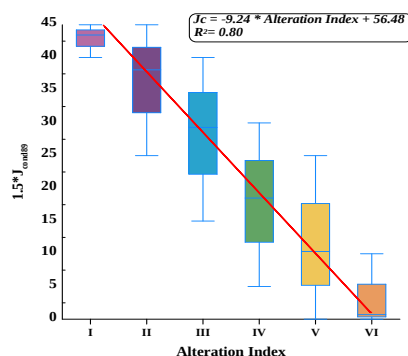
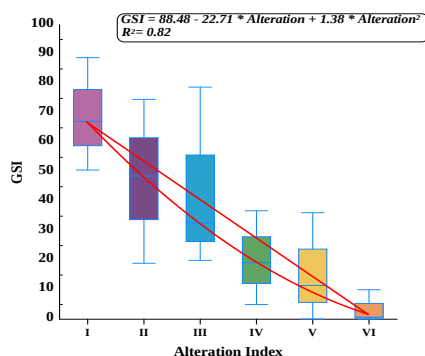
پس از مطالعه مغزه‌های اکتشافی اطلاعات برداشت‌هایی نظیر RQD و شرایط درزه‌ها ($J_{condition}$)، میزان GSI و شدت دگرسانی توده سنگ برای بازه‌های مورد مطالعه اندازه‌گیری و ثبت شد و در نهایت براساس موقعیت داده‌های برداشت شده منحنی میزان هر یک از پارامترهای یاد شده ژئوتکنیکی در مقاطع P1 و P4 رسم گردید.

بررسی روابط بین داده‌های برداشت شده از گمانه‌های اکتشافی نشان می‌دهد همبستگی میان دگرسانی با سایر پارامترها وجود دارد و بیش‌ترین همبستگی مربوط به شدت دگرسانی و GSI می‌باشد به عبارت دیگر وجود دگرسانی در سنگ‌های خردشده سبب تخریب سطوح ناپیوستگی شده که این موضوع کاهش شاخص مقاومت زمین‌شناسی را در برداشته است. در شکل ۷ روابط میان دگرسانی و سایر پارامترهای برداشت شده از گمانه‌های اکتشافی ارائه شده است. رابطه RQD و دگرسانی (شکل ۷ الف) نشان می‌دهد با افزایش دگرسانی RQD نیز کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت که نمونه‌های با RQD یکسان می‌توانند درجات مختلفی از دگرسانی را متحمل شده باشند. بررسی ارتباط شرایط درزه و دگرسانی (شکل ۷ ب) نشان می‌دهد که افزایش دگرسانی مستقیماً موجب کاهش کیفیت درزه و متعاقباً GSI می‌شود.

الف)

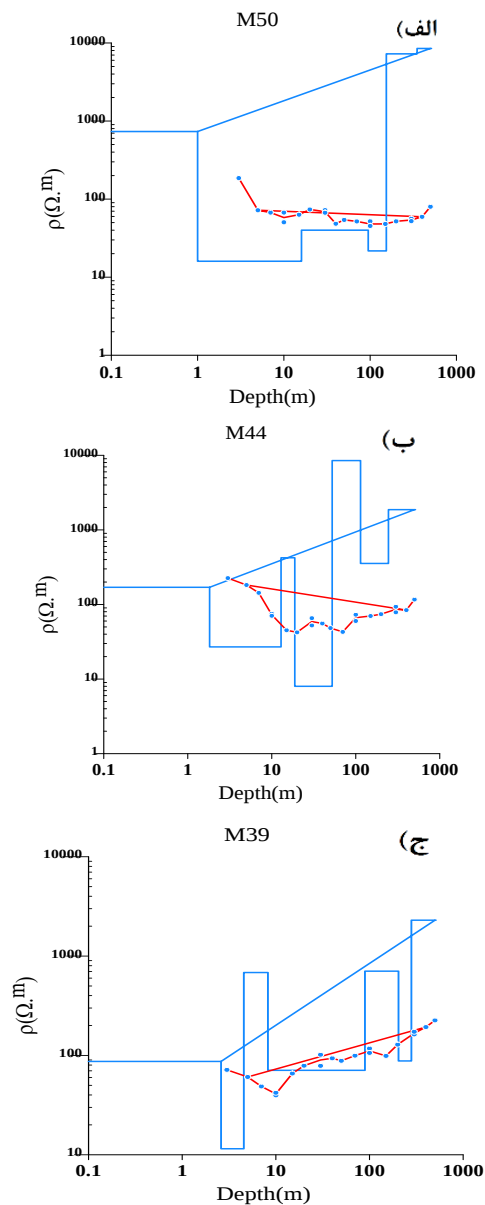
ب)

ج)



شکل ۸. الف) ارتباط RQD با شاخص دگرسانی؛ ب) ارتباط شرایط ناپیوستگی با شاخص دگرسانی؛ ج) ارتباط شاخص مقاومت زمین‌شناسی با شاخص دگرسانی.





شکل ۹. الف) منحنی سونداژ $M50$ و نتیجه تفسیر یک بعدی منحنی سونداژ با خطای 8.51% ؛ ب) منحنی سونداژ $M44$ و نتیجه تفسیر تک بعدی منحنی سونداژ با خطای 9.1% ؛ ج) منحنی سونداژ $M39$ و نتیجه تفسیر تک بعدی منحنی سونداژ با خطای 6.4% .

تفسیر نتایج داده‌های ژئومکانیکی و تفسیر سونداژهای الکتریکی در پروفیل‌های شرقی- غربی $P2$ و $P4$ که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است بیانگر این است که این منطقه با توجه به RQD برداشت شده به شدت خرد شده می‌باشد و این کمیت در هر دو پروفیل تقریباً یکسان است. با این حال، تفاوت آشکار بین دو پروفیل مربوط به تغییرات در شاخص دگرسانی می‌باشد که خود باعث تغییر در شرایط درزه‌ها و در نتیجه آن تغییرات GSI می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در پروفیل $P2$ با توجه به شاخص دگرسانی بیش‌تر، وجود رس‌ها و با در نظر گرفتن خردشدگی یکسان، این پروفیل نسبت

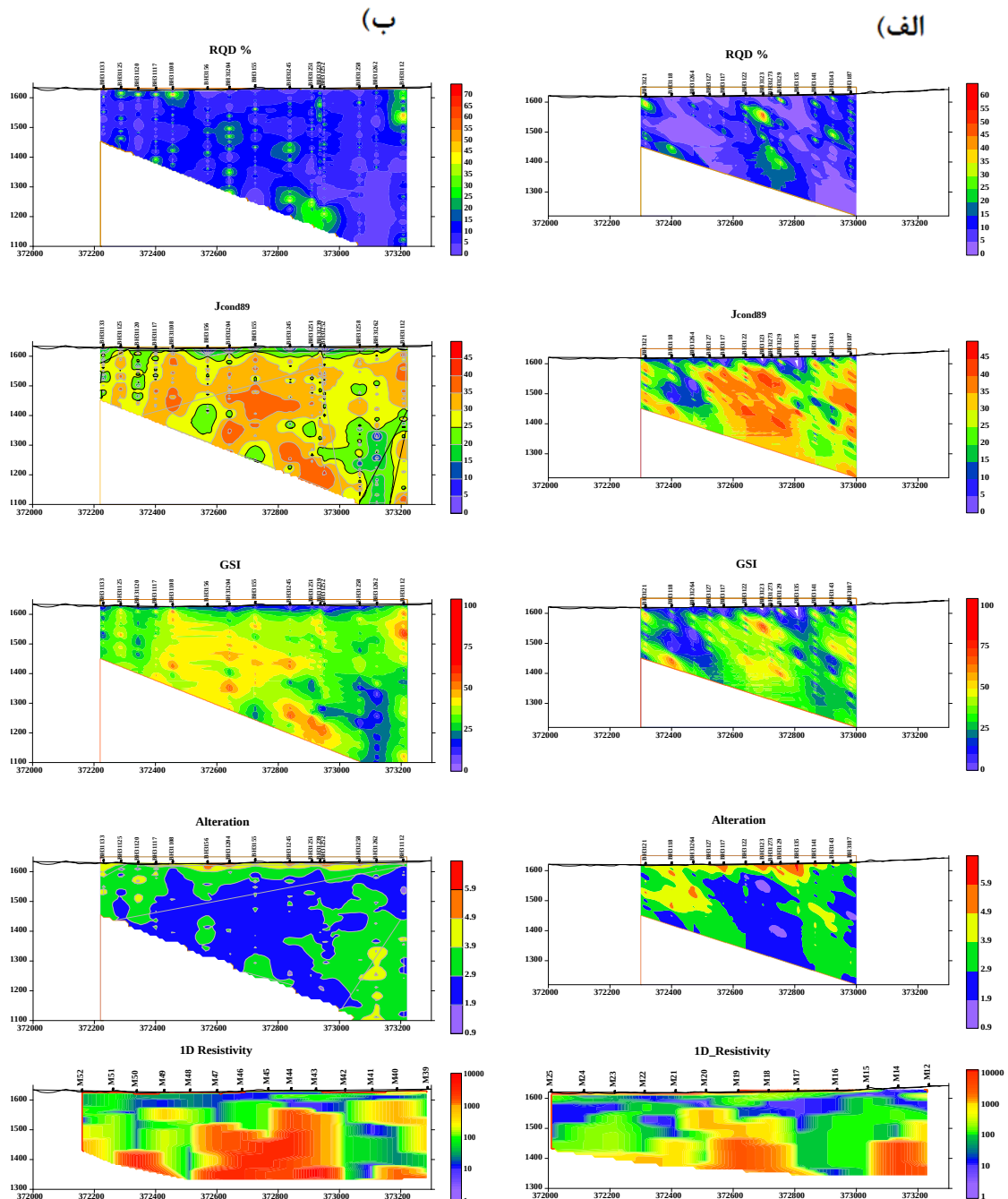
۸. بررسی ارتباط مقاطع سونداژ الکتریکی قائم با خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ

پس از برداشت مقاومت ویژه ظاهری، نتایج توسط نرم‌افزار $IPi2win$ یک بعدی تفسیر شد و ضخامت و میزان مقاومت ویژه الکتریکی برای هر لایه مشخص گردید. منحنی سونداژ (رنگ قرمز) و نتایج تفسیر با نرم‌افزار $IPi2win$ (رنگ آبی) در شکل ۹ برای سونداژهای $M50$ ، $M44$ و $M39$ نشان داده شده است. نتایج حاصل از تفسیر یک بعدی در کنار هم قرار گرفته و با درون‌یابی به صورت دو بعدی نمایش داده شده‌اند. دو مقطع پروفیل‌های $P1$ و $P2$ تهیه شد. با قرار دادن داده‌های حاصل از برداشت‌های ژئومکانیکی گمانه‌های اکتشافی روی پروفیل تفسیر شده سونداژ الکتریکی، ارتباط مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده و داده ژئومکانیکی متناظر در همان محل مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۹). از نتایج تفسیر تک بعدی این‌گونه استنباط می‌شود که در محل آبرفت‌های رودخانه‌ای خشک که فاقد رس نیز می‌باشند، مقاومت ویژه الکتریکی بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ اهم متر می‌باشد و ضخامت این لایه کم‌تر از ۱۰ متر می‌باشد. پس از این لایه خشک رطوبت و آب در بین رسوبات پیدا می‌شود و مقاومت رسوبات مرطوب بین ۲۰ تا ۵۰ اهم متر کاهش می‌یابد. در زیر رسوبات مرطوب توده سنگ خرد شده یا هوازده و بعضاً دگرسان وجود دارد. توده سنگ هوازده خشک مقاومت ویژه الکتریکی کم‌تر از ۱۰۰ اهم متر دارد و توده سنگ هوازده مرطوب مقاومت ویژه الکتریکی نزدیک به ۱۰ اهم متر دارد. سنگ‌های خردشده اشباع نیز متناسب با شدت خردشدگی مقاومت ویژه الکتریکی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم متر را دارند. همچنین بستر سنگی نیز که از عمق ۲۰۰ به پایین وجود دارد مقاومت ویژه الکتریکی بین ۳۰۰۰ تا ۱۴۰۰۰ اهم متر را دارا است. سونداژهای $M50$ و $M44$ در محل بستر رودخانه فصلی پوشیده از رسوبات خشک و سونداژ $M39$ در محل رخنمون سنگی هوازده خشک می‌باشد که در عمق ۴ متری اشباع از آب می‌باشد.



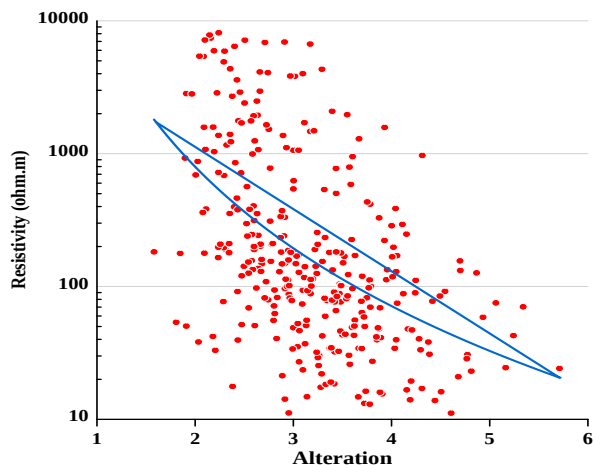
برای ارتباط شاخص دگرسانی و GSI با مقاومت ویژه الکتریکی به ترتیب $۰/۷۴$ و $۰/۷۵$ می‌باشد. نکته قابل توجه در این تحقیق توانایی روش سونداژ الکتریکی قائم در نمایش کیفی طبقه‌بندی توده سنگ و شدت دگرسانی است. به عبارت دیگر سونداژ الکتریکی قائم در محل‌هایی که میزان GSI کم‌تر از ۲۵ بوده و توده سنگ بسیار خرد شده و شرایط درزه ضعیفی داشته است و یا دگرسانی در این محل حداکثر بوده است، توانایی شناسایی را دارد.

به پروفیل P_4 ، از مقاومت ویژه الکتریکی کم‌تری برخوردار است. بر اساس معیار شباهت ساختاری $(SSMI - Structural Similarity Index)$ ، اطلاعات ساختار دو تصویر مرجع و هدف ارزیابی می‌گردد [۱۹]. محدوده تغییرات $SSMI$ در بازه $[-۱، ۱]$ است. هر چه مقدار آن، به عدد یک نزدیک‌تر باشد، شباهت دو تصویر به هم بیش‌تر است. میزان $SSMI$ در مقطع P_2 برای ارتباط شاخص دگرسانی و GSI با مقاومت ویژه الکتریکی به ترتیب $۰/۷۳$ و $۰/۷۱$ و در مقطع P_4

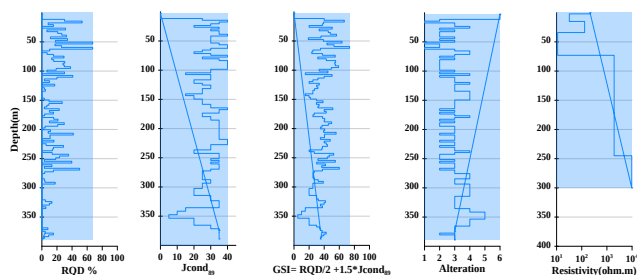


شکل ۱۰. الف) مقاطع خصوصیات ژئومکانیکی و طبقه‌بندی توده‌سنگ و تفسیر نتایج سونداژ الکتریکی در مقطع P_2 ؛ ب) مقاطع خصوصیات ژئومکانیکی و طبقه‌بندی توده سنگ و تفسیر نتایج سونداژ الکتریکی در مقطع P_4 .





شکل ۱۲. ارتباط مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی با شاخص دگرسانی.



شکل ۱۳. بررسی تفسیر مقاومت ویژه یک بعدی سونداژ M۴۳ و داده‌های اکتشافی BH۳۱۲۳۹.

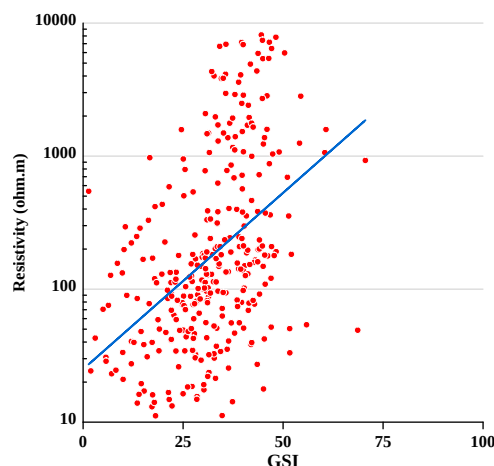
۹. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارتباط مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در ۲۷ نقطه که با روش سونداژ الکتریکی قائم در دو پروفیل انجام شده با اطلاعات ژئومکانیکی برداشت شده از ۲۸ گمانه اکتشافی در آنومالی III کانسار نارینگان که نزدیک به نقاط سونداژ بوده‌اند مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج برداشت‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی، می‌توان گفت که روش سونداژ الکتریکی قائم به‌عنوان یک روش ارزان و سریع در بررسی کیفی خصوصیات ژئومکانیکی مناطقی که پیچیده‌گی زمین‌شناسی ندارند، قابل استفاده است و به‌علت محدودیت روش برداشت و تفسیر تک بعدی امکان کمی کردن ارتباط مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌ها با شرایط و خصوصیات ژئومکانیکی وجود ندارد.

با استفاده از معیار شباهت ساختاری می‌توان دریافت که بین مقاومت ویژه الکتریکی با میزان شاخص دگرسانی و GSI توده سنگ در کانسار نارینگان به لحاظ کیفی ارتباط خوبی دارد، میزان $SSMI$ در مقایسه تصاویر مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده از نتایج سونداژ الکتریکی قائم با مقاطع GSI و شاخص دگرسانی عددی بالاتر از ۰/۷ را نشان می‌دهد که این عدد از شایستگی کیفی مقایسه ژئوفیزیک و ژئوتکنیک می‌باشد.

داده‌های مقاومت الکتریکی تا عمق ۳۰ متر به علت وجود رسوبات شنی خشک و آبدار حذف شدند. سپس روابط بین مقاطع ژئوالکتریک و GSI و شاخص دگرسانی ترسیم گردیدند (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). هر یک از پارامترهای GSI و شاخص دگرسانی با مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده از سونداژ الکتریکی ارتباط نسبتاً ضعیف نشان می‌دهند. این بدان معنی است که با استفاده از یک رابطه ریاضی نمی‌توان با استفاده از مقاومت الکتریکی یک لایه که با روش سونداژ الکتریکی قائم به دست آمده است تخمین دقیقی از میزان GSI و یا شاخص دگرسانی توده سنگ داشت.

برای بررسی ارتباط مقاطع ژئوفیزیکی در نمودارهای بالا از شبکه ۲۵ در ۲۵ متر استفاده شده است که با بررسی بیش‌تر ابعاد شبکه تخمین شاید بتوان به نتایج بهتری دست یافت ولی بیش‌ترین عاملی که باعث می‌شود تا نتوان با استفاده از روش سونداژ الکتریکی قائم تخمین مناسبی از شرایط ژئوتکنیک داشته باشیم این موضوع است که در تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی به روش یک بعدی حداکثر ۴ تا ۵ لایه با مقاومت ویژه الکتریکی مختلف مشخص می‌شود ولی در برداشت داده‌های ژئومکانیک از گمانه‌های اکتشافی به ازای هر ۳ متر یک داده (RQD و شدت دگرسانی) برداشت می‌شود. به طور مثال برای یک لایه ۱۰۰ متری با یک مقاومت ویژه الکتریک تفسیر شده به روش یک بعدی بیش از ۳۰ عدد متفاوت از شاخص مقاومت زمین‌شناسی استخراج شده از اطلاعات گمانه وجود دارد (شکل ۱۳) ولی به طور کیفی با افزایش میزان GSI و کاهش شاخص دگرسانی در توده سنگ مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده از داده‌های سونداژ الکتریکی قائم افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱. ارتباط مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی با شاخص مقاومت زمین‌شناسی.



8. M. Khalili, *Comparison of graphic and mathematical methods in interpreting Schlumberger probe and validation of results with the help of well data in Amanabad region of Arak*, Master's Thesis. Shahroud University.
9. O.R. Corvallis, D.C. Resistivity methods, *Northwest Geophysical* (2000).
10. M.H. Loke, *Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys*, (2004a).
11. J. Reynold, *An Introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley. England, 418-490 (1997).
12. G.E. Archie, *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*, *Tran. AIME*, **146**, 54-67 (1941).
13. G.P. Hersir, K. Árnason, *Resistivity of Rocks, Presented at Short Course V on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, GDC and KenGen, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, Oct. 29 – Nov. 19* (2010).
14. A. Ganbari, F. Rezaee, A. Dehghan, *Comparison of geotechnical parameters of soil mass in the tunnel including the results of reverse analysis and direct shear testing*, *Sixth Iranian Conference on Engineering Geology and Environment* (2009).
15. E. Molano, M. Salamanca, A. Van Overmeeren, *Numerical modelling of standard and continuous vertical electrical soundings*, *Geophysical Prospecting*, **38**, 705-89 (1990).
16. D.U. Deere, *Technical Description of Rock Cores for Engineering Purpose*, *Rock Mechanics and Engineering Geology*, **1**(1), 16-22 (1963).
17. E. Hoek, P. Marinos, M. Benissi, *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for very weak and sheared rock masses, The case of the Athens Schist Formation*, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **57**, 151-160 (1998). 10.1007/s100640050031.
18. E. Hoek, T.G. Carter, M.S. Diederichs, *Quantification of the geological strength index chart, In 47th US rock mechanics/geomechanics symposium*. OnePetro (June 2013).
19. W. Zhou, et al, *Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity*, *IEEE Transactions on Image Processing*, **13**(4), 600-612 (2004).

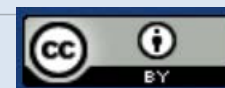
ولی با این حال استفاده از روش سونداژ الکتریکی قائم برای تعیین دقیق *GSI* و *RQD* از اعتماد بالایی برخوردار نیست. به بیان ساده‌تر با یک رابطه ریاضی نمی‌توان براساس مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده از سونداژ الکتریکی میزان *GSI* و *RQD* را تخمین زد ولی در مقابل مناطق آتره شده در این نوع کانسار قابل شناسایی می‌باشد. این وابستگی بین زون‌های کانه‌زایی با مناطق دگرسانی محصور و یا مرتبط با شکستگی‌ها، قابلیت استفاده از روش سونداژ الکتریکی به عنوان یک ابزار اکتشافی غیرمستقیم در کنار دیگر روش‌های زمین‌شناسی را بیان می‌کند.

مراجع

1. A. Palmström, *Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (RMI), Tunnelling and Underground Space Technology*, **11**(2), 175-188 (1996).
2. M. He, Z. Zhang, N. Li, *Prediction of fracture frequency and RQD for the fractured rock mass using drilling logging data*, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **80**(6), 4547-4557 (2021).
3. S. Tzamos, A.I. Sofianos, *A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices*, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **44**(4), 477-495 (2007).
4. H. Xu, et al, *Setting up simple estimating equations of TBM penetration rate using rock mass classification parameters*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **115**, 104065 (2021).
5. J. Hassanpour, et al, *TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel*, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **43**(4), 427-445 (2010).
6. G.H. Brimhall, *Lithologic determination of mass transfer mechanisms of multiple-stage porphyry copper mineralization at Butte, Montana; vein formation by hypogene leaching and enrichment of potassium-silicate protore*, *Economic Geology*, **74**(3), 556-589 (1979).
7. M. Yazdi, et al, *Stream-Sediment Geochemical Exploration for Uranium in Narigan Area Central Iran*, *J. of Nuclear Sci. and Tech*, **46**, 33-42 (2009).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سیدهادی بهشتی بافقی، علیرضا یاراحمدی بافقی، احمد قربانی، حسنعلی قاری (۱۴۰۲)، کاربرد سونداژ الکتریکی قائم در شناخت ژئومکانیکی توده سنگ میزبان آنومالی III کانسار نارینگان، منطقه بافق، زون ایران مرکزی، ۱۰۴، ۱۳۸-۱۴۷

DOI: 10.24200/nst.2023.1369

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1369.html

