



## بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوالکتریک در تعیین عمق و ضخامت لایه بوکسیتی در یکی از ذخایر بوکسیت جاجرم

کیانوش سلیمانی<sup>۱</sup>، علیرضا عرب‌امیری<sup>۲</sup>، ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۲</sup>، محمود شمس‌الدینی نژاد<sup>۳\*</sup> و فرج‌اله مومنی<sup>۱</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [mahmoud.shamsaddini@gmail.com](mailto:mahmoud.shamsaddini@gmail.com)

### چکیده

در این پژوهش به بررسی کارایی روش سونداژ ژئوالکتریک در تشخیص لایه معدنی در ذخایر بوکسیت کارستی دارای توپوگرافی شدید سطح زمین پرداخته می‌شود. بدین منظور ۲۱ سونداژ ژئوالکتریک در کنار نقاط حفاری شده در یکی از ذخایر بوکسیت جاجرم در طول یک خط، طراحی و برداشت گردید. داده‌های برداشت شده نخست به وسیله منحنی‌های استاندارد تفسیر شده و سپس نتایج حاصله به‌عنوان مدل اولیه به‌وسیله نرم‌افزار IX1D، مدل‌سازی یک‌بعدی شد. نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی، وجود حداقل چهار لایه ژئوالکتریک را در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد. جهت درک بهتر و جامع‌تر، این نتایج به‌صورت یک مقطع دو‌بعدی نشان داده شد. بررسی نتایج وارون‌سازی یک‌بعدی نشان داد که به دلیل تباین کافی مقاومت ویژه بین بوکسیت و سنگ کف دولومیتی، تشخیص کمرباطین لایه معدنی ممکن است؛ اما از آنجایی که اختلاف مقاومت ویژه بوکسیت کائولنی با لایه‌های بالایی آن اندک است؛ تشخیص کمر بالای ماده معدنی و در نتیجه تعیین ضخامت لایه معدنی مشکل است. به منظور بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی در محدوده معدنی، این نتایج با نتایج حاصل از حفاری‌های اکتشافی در منطقه مذکور مورد مقایسه قرار گرفتند. در این مقایسه مشخص شد ۵ سونداژ دارای خطای تخمین بالای ۵۰ درصد، ۱۰ سونداژ خطای تخمین بین ۱۰ تا ۳۰ درصد و ۶ سونداژ خطای تخمین کمتر از ۱۰ درصد دارند. ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال تائو بین تخمین عمق لایه‌ها به روش ژئوالکتریک و عمق به دست آمده از حفاری، مقدار ۰٫۴۸۶ به دست آمد؛ که نشان‌دهنده همبستگی نسبتاً خوبی بین عمق تشخیص کنتاکت دولومیت و بوکسیت در تفسیر نتایج سونداژ و نتایج حاصل از داده‌های حفاری اکتشافی در منطقه است.

### واژگان کلیدی

ژئوالکتریک  
مدل‌سازی  
بوکسیت کارستی  
حفاری  
مقاومت ویژه

پی‌جویی بوکسیت در جاجرم مربوط به زمین‌شناسان شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی است. آن‌ها در سال ۱۳۴۷ ضمن پی‌جویی زغال‌سنگ، وجود بوکسیت را گزارش کردند. کارشناسان سازمان زمین‌شناسی نیز با مطالعه عکس‌های هوایی و بازدید از منطقه، وجود زون بوکسیتی را تأیید کردند. در سال ۱۳۴۹ گزارشی از منطقه بوکسیت‌دار جاجرم تهیه شد؛ که در آن وجود دو افق معدنی را تأیید کرد. مطالعات اکتشافی زون بوکسیتی جاجرم به طول ۱۲ کیلومتر به همراه تهیه نقشه ۱:۲۵۰۰۰ منطقه، توسط سازمان زمین‌شناسی انجام شد.

در تیرماه ۱۳۶۸ بررسی‌های ژئوالکتریک با برداشت ۴۳ سونداژ یا گمانه ژئوالکتریک بر روی رخنمون‌های آهکی و ماده معدنی بوکسیت، در محدوده کانسارها و معادن بوکسیت انجام شد و نتایج حاصل به صورت نقشه‌ها و شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری الکتریکی ارائه شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها، هرچند به طور تئوری باید قادر به تشخیص کنتاکت شیل و آهک‌ها و تشخیص نواحی کارستی از بوکسیت باشد؛ اما در عمل حاکی از عدم موفقیت در تحقق انتظارات خواسته شده مسئولین ذی‌ربط شرکت معادن بوکسیت جاجرم بود؛ که از دلایل مهم آن می‌توان به عدم دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری و روش‌های تفسیر مورد استفاده، اشاره نمود. در معدن بوکسیت جاجرم تعیین ذخیره و محل قرارگیری لایه بوکسیتی در آن به صورت حفر گمانه‌های نزدیک به هم صورت می‌گیرد. حفر گمانه، علیرغم دقت اکتشافی بالا، زمان و هزینه زیادی را در پی دارد. از این‌رو استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مثل روش سونداژنی مقاومت ویژه الکتریکی، به منظور عملیات اکتشافی یک ضرورت انکارناپذیر قلمداد می‌شود.

عملیات سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی، در یک منطقه معدنی که در آن ماده معدنی به شکل توده‌ای، عدسی، رگه‌ای و یا هر شکل پیوسته دیگر، معمولاً به منظور تعیین عمق و ضخامت توده‌های معدنی مزبور مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما در مواردی برداشت سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی با هدف تعیین ضخامت روباره ماده معدنی و گاهی نیز برای شناسایی و تعیین عمق سنگ بستر یا کف که بلافاصله در زیر ماده معدنی قرار دارد، انجام می‌شود. در این تحقیق نیز برداشت سونداژهای الکتریکی، مدل‌سازی و تفسیر نتایج آن‌ها با هدف تعیین عمق، ضخامت و شناسایی دقیق‌تر زون کارستی کم‌پایین بوکسیت در یکی از معادن بوکسیت جاجرم انجام شده است.

به کمک نتایج و اطلاعات به دست آمده از مدل‌سازی و تفسیر کمی داده‌های سونداژ الکتریکی در منطقه معدنی مزبور می‌توان به تعیین محل بهینه حفر چاه‌های حفاری، برای کنترل مستقیم ماده معدنی بوکسیت، در زیر سطح زمین پرداخت. استفاده از سونداژ الکتریکی قائم همراه با اطلاعات زمین‌شناسی و سایر اطلاعات

کانسارهای بوکسیتی، کانسارهای برونزادی هستند؛ که در شرایط سطحی قاره‌ای و در آب و هوای گرم و مرطوب بر اثر هوازدگی شدید شیمیایی تشکیل می‌شوند. در تشکیل این کانسارها عوامل اقلیمی، زمین‌ساختی، زمین ریخت‌شناسی، سنگ شیمیایی و سنگ فیزیکی دخالت دارند (Bardossy, 1982). کانسارهای بوکسیتی به دلیل تفاوت در سنگ خاستگاه، سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ بستر، رخدادهای صحرایی و چگونگی تشکیل؛ دارای رده‌بندی‌هایی مختلفی هستند؛ که بر مبنای خاستگاه و چگونگی تشکیل به سه گروه لاتریتی، رسوبی و کارستی تقسیم می‌شوند (Bogatyrev et al., 2009). کانسارهای بوکسیت کارستی که تنها ۱۰ درصد از کل ذخایر بوکسیتی جهان را تشکیل می‌دهند؛ به دلیل بالا بودن پیچیدگی‌های پیدایشی همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار دارند (Karadağ et al., 2009).

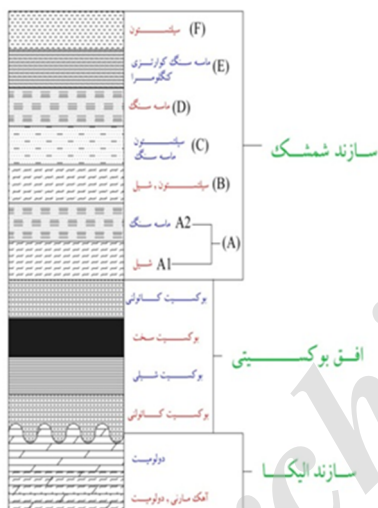
روش‌های اکتشاف بوکسیت مانند بسیاری از مواد معدنی، به دو گروه روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. حفر ترانشه و یا گمانه و گرفتن مغزه از جمله روش‌های مستقیم هستند، این روش‌ها پرهزینه و زمان‌بر هستند. البته روش‌های غیرمستقیم اکتشافی کم هزینه‌تر و اجرای آن‌ها سریع‌تر است. از روش‌های غیرمستقیم می‌توان به روش‌های ژئوفیزیکی اشاره کرد؛ که به علت سرعت عمل زیاد و هزینه کم، بسیار مورد توجه قرار گرفته و به سرعت گسترش یافته‌اند. به کمک روش‌های ژئوفیزیکی یک یا چند ویژگی فیزیکی مواد اندازه‌گیری می‌شوند و مقادیر فیزیکی اندازه‌گیری شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

روش‌های ژئوالکتریک به طور گسترده برای رسم و شناخت ناهمگنی‌های افقی و عمودی در محیط‌های کارستی به کار گرفته می‌شوند (لیوسی، گیورگی، ۲۰۰۵). روش سونداژنی الکتریکی قائم پیوسته، در حقیقت از تعدادی سونداژ الکتریکی تشکیل شده؛ که در یک پروفیل خطی برداشت شده‌اند و در نتیجه می‌توانند به صورت دوبعدی نیز تفسیر شوند (Molano et al., 1990).

در این روش هدف اولیه بررسی زمین به صورت یک‌بعدی است و برداشت در آن اغلب با آرایه شلومبرژه انجام می‌شود. با برداشت خطی چندین سونداژ امکان نمایش دوبعدی میسر خواهد شد. به دلیل حساسیت کم آرایه شلومبرژه به تغییرات جانبی، بهتر است مدل‌سازی به وسیله این آرایه را یک مدل‌سازی ۱/۵ بُعدی (1.5 D) دانست. در مدل سازه ۱/۵ بعدی در تجزیه و تحلیل و تفسیر نتایج از مدل‌سازی مستقیم یک‌بعدی استفاده می‌شود اما پارامترهای ساختار دوبعدی زمین‌شناسی (تعداد لایه‌ها و جنس لایه - نمایش دوبعدی) تخمین زده می‌شود. آرایه شلومبرژه در نشان دادن تغییرات هموار مقاومت‌ویژه، قوی‌تر از دیگر آرایه‌ها است، از این‌رو روش برداشت CVES در زمین‌های با تغییرات عمقی هموار نتایجی قابل‌قبولی ارائه می‌دهد (Muiuane and Pedersen, 1999).

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

تریاس فوقانی (واحد B) شامل دو بخش نرم یا شیلی (که در واقع لاتریت بوده و به عنوان بوکسیت شیلی نام‌گذاری شده است) و سخت است؛ که عیار  $Al_2O_3$  قسمت سخت بوکسیت بسیار بیشتر از قسمت نرم آن است. این دو بخش به وسیله دو واحد کائولن یا بوکسیت کائولنی پایین و بالایی محصور شده‌اند. ضخامت واحد بوکسیتی در طول ۱۲ کیلومتر گسترش خود یکنواخت نبوده و از حداقل کمتر از ۱ متر تا حداکثر بیش از ۴۰ متر متغیر است. رسوبات آواری سازند شمشک با سنی معادل تریاس فوقانی-ژوراسیک به طور هم‌شیب و عادی بر روی واحد بوکسیتی B قرار گرفته است. به طور کلی این سازند از ماسه‌سنگ، شیل و سیلتستون همراه با لایه‌های نازک و عدسی‌های زغال‌دار تشکیل شده است؛ که فسیل‌های گیاهی متعددی در این رسوبات یافت می‌شوند. لایه آهک با ضخامت کم که انباشته از قطعات دوکفه‌ای و اکیونوید است به عنوان لایه راهنما در منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ستون چینه‌شناسی سازندهای بالا و پایین افق بوکسیتی در جاجرم (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۴).

### ۳- روش کار

در این پژوهش از روش مقاومت‌ویژه جهت شناسایی و پتانسیل‌یابی بوکسیت در معدن بوکسیت جاجرم استفاده شد. بدین منظور پس از بررسی روش ژئوالکتریک برای تعیین امکان‌سنجی استفاده از برداشت‌های ژئوالکتریک در شناسایی محل قرارگیری ذخایر بوکسیت در زیرسطح، لازم بود یک مکان مناسب برای انجام این برداشت‌ها در مجموعه معدنی بوکسیت جاجرم انتخاب و عملیات برداشت در آن اجرا شود. این منطقه باید دارای شرایطی باشد که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود: شرایط زمین‌شناسی در آن شناخته شده باشد. کمر بالا، کمر پایین و حدود و صغور ماده معدنی و باطله تا حد زیادی معلوم باشد. چرا که این اطلاعات منبع ارزیابی نتایج

موجود، باعث افزایش کیفیت و دقت بررسی‌ها می‌شود. البته سؤال اصلی تحقیق در این است که آیا روش مقاومت ویژه الکتریکی در اکتشاف بوکسیت کارآمد است؟ دقت نتایج مدل‌سازی و تفسیر برداشت سونداژهای الکتریکی، در تعیین عمق و شناسایی زون کارستی کمرپایین بوکسیت، در منطقه مورد نظر تا چه حد است؟ آیا این روش می‌تواند در تعیین ضخامت ذخیره نیز مؤثر باشد؟ با برداشت سونداژهای الکتریکی در منطقه معدنی بوکسیت جاجرم و مدل‌سازی و تفسیر نتایج و با مقایسه با داده‌های حفاری مشخص گردید که روش ژئوالکتریک تخمین نسبتاً خوبی از عمق لایه بوکسیتی دارد.

### ۲- زمین‌شناسی منطقه

کانسار بوکسیت جاجرم در استان خراسان شمالی در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب شهر بجنورد و ۱۵ کیلومتری شمال شرق شهر جاجرم در کوه‌های زو و تاگوئی قرار گرفته است. ریخت‌شناسی منطقه مورد مطالعه مانند دیگر معادن بوکسیت جاجرم، اساساً کوهستانی و نسبتاً مرتفع بوده و به صورت رشته کوهی در شمال کویر جاجرم قرار گرفته است.

از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد بررسی در حوضه‌ی ساختمانی بینالود واقع شده است. این حوضه از نظر زمین‌ساختی منطقه‌ای بسیار پرتکاپو محسوب می‌شود؛ که با تظاهر چین‌ها و گسل‌های متعدد با ساز و کار راستای طولی و رانشی مشخص می‌شود (آق‌آبائی، ۱۳۸۳). ویژگی‌های سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی سازندهای گسترده در منطقه و تکتونیک حاکم بر ناحیه نقش اساسی را در ژئومورفولوژی منطقه بر عهده داشته و تاقدیس زو با ارتفاع بیش از ۱۸۳۲ متر از سطح دریا مظهر روشن تغییرات مورفولوژی منطقه است.

سازندها و واحدهای مهم منطقه به ترتیب عبارت‌اند از: سازند الیکا، واحد بوکسیتی، سازند شمشک. سازند الیکا شامل دو بخش است؛ که بخش زیرین آن از حدود ۹۵ متر آهک، آهک دولومیتی متورق و شیل به رنگ زرد تا صورتی تشکیل شده و بخش فوقانی آن با ضخامت حدود ۲۰۰ متر شامل دولومیت و دولومیت آهکی با لایه‌بندی خوب تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری مایل به زرد تشکیل شده است. این دو بخش احتمالاً متعلق به تریاس زیرین و میانی می‌باشند. در منطقه جاجرم علاوه بر واحد بوکسیتی مربوط به تریاس فوقانی، یک واحد بوکسیتی دیگر نیز وجود دارد؛ که مربوط به قبل از تریاس زیرین است، شکل ۱ ستون چینه‌شناسی افق بوکسیتی جاجرم را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

این دو واحد را به ترتیب بنام واحدهای A و B نام‌گذاری کرده‌اند. واحد بوکسیتی B ضخامت و عیار قابل‌توجهی در مقایسه با واحد بوکسیتی زیر سازند الیکا (واحد بوکسیتی A) داشته و سطح فرسایش یافته و کارستی شده الیکا را پوشانده است. واحد بوکسیتی

سلیمانی و همکاران، بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوالکتریک در تعیین عمق و ضخامت لایه بوکسیتی در یکی از ذخایر ...، صفحات ۲۳۵-۲۲۵.

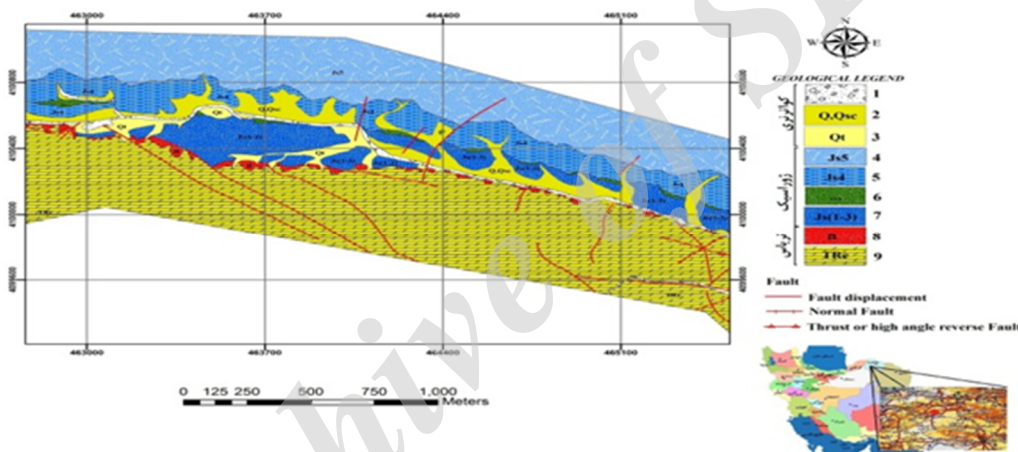
ماده معدنی و نیز حفاری‌های اکتشافی قبلی که در این منطقه صورت گرفته، تغییرات شدیدی در عمق و ضخامت لایه بوکسیتی مورد انتظار است؛ به همین دلیل فواصل سونداژها مطابق با فواصل گمانه‌های اکتشافی در نیمرخ اکتشافی در نظر گرفته شده ۲۵ متر منظور گردید. همچنین شواهد و رخنمون‌های موجود در منطقه، حاکی از شیب‌دار بودن لایه‌های زمین‌شناسی است. در نهایت تعداد ۲۱ سونداژ به فاصله ۲۵ متر از هم در طول دره برداشت شد. شکل ۳ شبکه برداشت سونداژهای ژئوالکتریک را نشان می‌دهد. محل سونداژهای ژئوالکتریک با فاصله کمی تقریباً منطبق بر گمانه‌های حفاری است؛ که وجود واریزه‌های حفاری در محل می‌تواند باعث نوفه در داده‌های برداشتی شود؛ که بدین منظور برای برطرف کردن آن الکترودهایی را که روی واریزه قرار می‌گرفتند، به صورت متقارن جابجا شد و در این موارد فاکتور هندسی برای محاسبه مقاومت ویژه به صورت مجزا محاسبه گردید.

برداشت‌های ژئوالکتریک در ادامه مطالعات خواهد بود. شرایط توپوگرافی، فاصله از منابع نوفه الکتریکی و گستردگی منطقه برای گسترش الکترودهای برداشت به گونه‌ای باشد که به یک برداشت ایده آل ژئوالکتریک نزدیک باشد (Fox et al., 1980).

### ۳-۱- برداشت‌های ژئوالکتریک

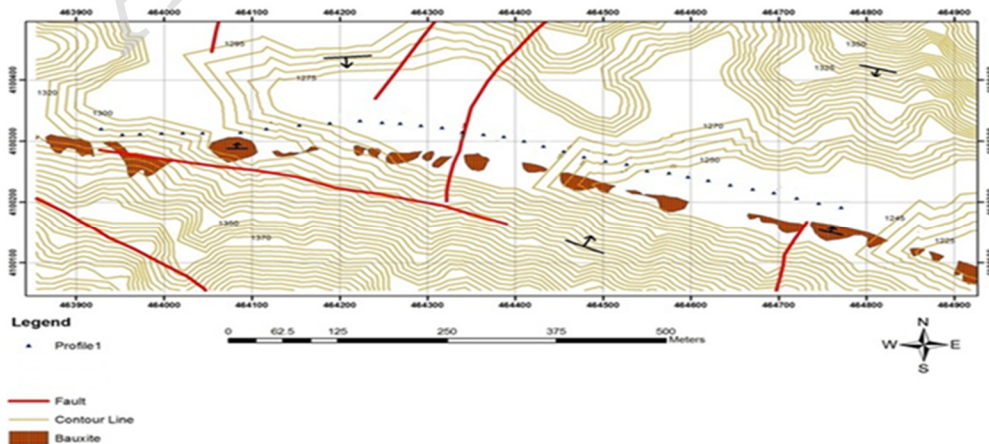
پس از انجام مطالعات اولیه و بازدید مقدماتی ناحیه معدنی بوکسیت جاجرم، قسمتی از این ناحیه به عنوان محل طراحی و برداشت پروژه انتخاب گردید. منطقه مورد نظر دارای توپوگرافی شدیدی است که طراحی شبکه برداشت را محدود می‌نماید.

از آن‌جا که هدف، یافتن عمق و ضخامت لایه معدنی است و از طرفی چون تغییرات قائم مقاومت‌ویژه، بیشتر از تغییرات افقی مقاومت ویژه بیانگر مشخصات لایه بوکسیتی است؛ بنابراین، آرایش شلومبرژه برای برداشت داده‌های مورد نظر به کار گرفته شد. آرایش شلومبرژه متداول‌ترین آرایش مورد استفاده در عملیات سونداژزنی است. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی به ویژه کربناته بودن بستر



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.

(۱) رسوبات آبرفتی، (۲) واریزه‌های دوران چهارم، (۳) مخروط افکنه‌های قدیمی مربوط به تریاس، (۴) شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سفید کوارتزیتی، (۵) مارن‌های خاکستری زیتونی و لایه نازک ماسه‌ای، (۶) لایه‌های نازک آهک، (۷) شیل‌های خاکستری دگرسان شده و لایه‌های ماسه‌سنگ با مقدار کم فسیل، (۸) بوکسیت، (۹) دولومیت توده‌ای به رنگ سفید، خاکستری و زرد نخودی (سلیمانی، ۱۳۹۲).



شکل ۳: موقعیت سونداژهای الکتریکی در منطقه مورد مطالعه به همراه نمایش توپوگرافی، رخنمون‌های بوکسیتی و گسل‌های منطقه.

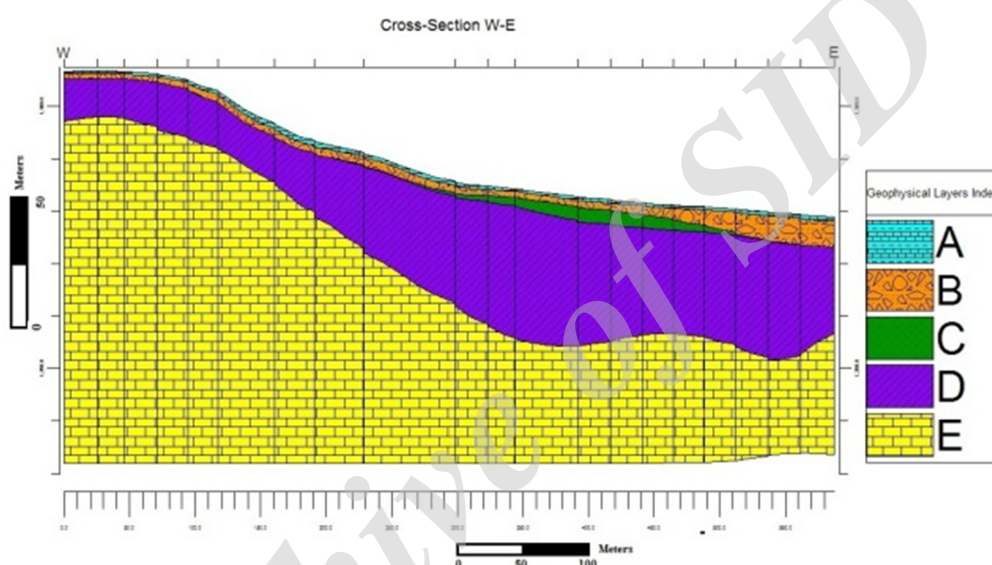
## ۴- بحث و نتایج

سونداژهای الکتریکی به دو روش تفسیر شدند. نخست منحنی‌های سونداژ الکتریکی با استفاده از منحنی‌های استاندارد یا سرمنحنی‌های دولایه‌ای و منحنی‌های کمکی مورد تفسیر قرار گرفتند. سپس نتایج حاصله به عنوان مدل اولیه با استفاده از نرم‌افزار IXID مدل‌سازی شد. در روش دیگر داده‌های خام صحرایی مستقیماً توسط نرم‌افزار IXID به کمک دو روش آکام و ریج وارون‌سازی شد. در روش اول از نتایج حاصل از تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه به کمک سر منحنی‌ها به عنوان مدل اولیه در نرم‌افزار IXID استفاده می‌شود. مفسر بدون داشتن مهارت بالا و به هزینه و زمان کمتری در تفسیر داده‌ها نیازمند است. البته در روش دوم که مدل‌سازی داده‌ها توسط

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

نرم‌افزار انجام می‌شود، مفسر به اطلاعات بیشتری نیازمند است تا اطلاعات مورد نظر شامل تعداد لایه‌ها، مقاومت ویژه لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها را از نتایج مدل‌سازی استخراج کند. در این تحقیق نتایج روش اول مورد بررسی قرار گرفته است.

برای تهیه مقطع دوبعدی لایه‌ها مقادیر مقاومت ویژه واقعی و ضخامت لایه‌های تفسیر شده در محدوده مورد مطالعه سونداژهای ژئوالکتریکی به صورت گمانه‌های حفاری مجازی به عنوان اطلاعات ورودی در نرم‌افزار Rock Work14 مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس مدل دوبعدی به دست آمده ۵ لایه ژئوالکتریکی مشخص شد (شکل ۴).



شکل ۴: مقطع درون‌یابی شده نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی سونداژهای ژئوفیزیک منطقه مورد مطالعه با نرم‌افزار ROCK WORK14.

۳) یک روباره رسانا با مقاومت ویژه کمتر از لایه دوم که مقاومت ویژه آن در حدود ۳۰ تا زیر ۱۰۰ اهم‌متر است. جنس این لایه، عموماً آبرفت‌های سطحی است. با توجه به میزان بالای نزولات جوی و زمان برداشت داده (آبان و دی ماه) این لایه، مرطوب بوده و کم بودن مقاومت ویژه آن متأثر از این موضوع است (لایه B).

۴) یک لایه نازک سطحی که گستره مقاومت ویژه بالایی دارد و مقاومت ویژه‌های بسیار بالا (بیش از ۱۰۰۰ اهم‌متر) تا کم (حدود ۴۰ اهم‌متر) در آن دیده می‌شود. مقادیر کم احتمالاً مربوط به رس‌ها و آبرفت‌های دانه‌ریز و مرطوب سطحی و مقادیر بالا در روی سکوی حفاری گمانه‌ها و واریزه‌های ناشی از حفاری ثبت گردیدند (لایه A و C).

داده‌های حفاری منطقه نیز برای مقایسه با داده‌های ژئوفیزیک به شکل استاندارد شده در آمد به این صورت که سازند شمشک که تناوبی از لایه‌های ماسه‌سنگ و شیل و سیلت است به دلیل عدم تباین کافی بین مقاومت ویژه لایه‌های ماسه‌سنگ و شیل و سیلت

در نتیجه تفسیر کلی سونداژهای ژئوالکتریکی ضمن توجه توأم به شواهد صحرایی و زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه ۵ لایه ژئوالکتریکی قابل تشخیص است. این لایه‌ها از پایین (عمق بیشتر) تا بالا (عمق کمتر تا سطح زمین) عبارت‌اند از:

(۱) لایه دولومیتی که نقش سنگ بستر را دارد و تا حداکثر عمق

نفوذ جریان مستقیم الکتریکی، گسترش قائم دارد. این لایه، نسبت به لایه‌های ژئوالکتریکی دیگر مقاومت ویژه بالاتری دارد و گستره مقاومت ویژه آن از ۲۰۰ تا ۵۰۰ اهم‌متر و بیشتر، است (لایه E).

(۲) لایه بعد حاوی انواع واحدهای بوکسیتی، شیل‌های زغالی، ماسه‌سنگ دانه‌ریز و متخلخل و سیلت‌استون و ... است؛ که به دلیل عدم تباین مقاومت ویژه و هم‌پوشانی گستره مقاومت ویژه آن‌ها از هم قابل تفکیک نیستند. مقاومت ویژه این لایه، در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر و در موارد انگشت‌شماری بیش از این مقدار است (لایه D).

سلیمانی و همکاران، بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوالکتریک در تعیین عمق و ضخامت لایه بوکسیتی در یکی از ذخایر ...، صفحات ۲۳۵-۲۲۵.

درستی و صدق مقدار اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد ولی دقت بیان‌کننده‌ی این است که اندازه‌گیری‌های مختلف تا چه حد به هم نزدیک بوده‌اند (حسنی پاک، ۱۳۹۰).

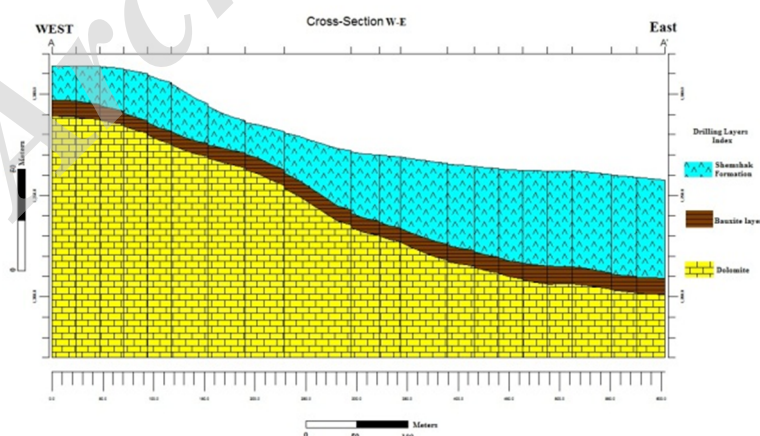
در جدول ۲ عمق کنتاکت بین دولومیت کارستی و بوکسیت در گمانه‌های اکتشافی حفر شده و نقاط مختلف سونداژ ژئوفیزیکی یا ژئوالکتریک در مجاورت گمانه‌های اکتشافی مزبور نشان داده شده است. با توجه به اطلاعات جدول ۱ در محل سونداژهای ۲ و ۶ و ۹ و ۱۲ و ۲۱ دقت و انطباق تخمین عمق کمر پایین لایه بوکسیتی به روش ژئوالکتریک، با توجه به نتایج عمقی حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی مورد نظر بدین علت که مقدار خطای تخمین عمق کنتاکت بین دولومیت کارستی و بوکسیت در این سونداژها، با توجه به نتایج عمقی حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی مجاور آن‌ها، از ۵۰ درصد تجاوز می‌کند تقریباً خوب یا قابل قبول نیست.

(جدول ۱) به صورت یک لایه در آمد. لایه بوکسیت که شامل چند لایه بوکسیت سخت و بوکسیت کائولنی و بوکسیت نرم است به دلیل عدم تفاوت زیاد در مقاومت ویژه لایه‌های بوکسیتی به صورت یک لایه بوکسیتی در آمد. در ادامه مقطع دوبعدی حاصل از داده‌های حفاری با استفاده از نرم‌افزار ROCK WORK14 تهیه شد (شکل ۵).

به منظور بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی در محدوده معدنی این نتایج با نتایج حاصل از حفاری‌های اکتشافی در منطقه مذکور مورد مقایسه قرار گرفتند و بر این اساس، توان روش به کار گرفته شده برای پیش‌بینی عمق لایه یا زون کارستی کمرپایین بوکسیت با دقت مورد نیاز مورد بررسی قرار گرفت. صحت یک اندازه‌گیری معرف نزدیکی مقدار اندازه‌گیری شده به اندازه حقیقی آن است. در واقع صحت یک اندازه‌گیری درجه

جدول ۱: مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها (Telford et al., 1990).

نوع سنگ	مقاومت ویژه الکتریکی (اهم‌متر)
شن و ماسه خشک	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰
شیل	۲۰-۲۰۰۰
مارن	۳۰-۷۰
رس	۱-۱۰۰
بوکسیت	۲۰۰-۶۰۰۰
لاتریت	۱۲۰-۱۵۰۰
آهک	۵۰-۱۰۰۰۰۰۰
دولومیت	۳۵۰-۵۰۰۰
ماسه‌سنگ آرژیلیتی	۵۰-۳۰۰
شیسیت آرژیلیتی یا تخریب شده	۱۰۰-۳۰۰
شیسیت سالم	۳۰۰-۳۰۰۰



شکل ۵: مقطع درونیابی شده داده‌های حفاری منطقه توسط نرم‌افزار ROCK WORK14 (از بالا به پایین به ترتیب توالی سازند شمشک، بوکسیت و دولومیت‌های سازند الیکا).

جدول ۲: مقایسه عمق کنتاکت بین دولومیت کارستی و بوکسیت در داده‌های حفاری و ژئوالکتریکی.

خطای تخمین (درصد)	عمق تشخیص کنتاکت دولومیت و بوکسیت در سونداژ (متر)	عمق کنتاکت دولومیت و بوکسیت در گمانه (متر)	کد سونداژ
6	22.06	23.4	S1
52	11.96	24.95	S2
31	17.87	25.75	S3
37	16.21	25.8	S4
7	34.29	32	S5
58	14.36	34.5	S6
6	21.277	22.7	S7
30	26.05	20	S8
49	40.94	27.5	S9
9	40.73	37.5	S10
45	55.888	38.5	S11
51	64.59	42.9	S12
22	60	49	S13
18	57.15	48.4	S14
15	44.03	51.75	S15
8	48.88	53.3	S16
18	49.04	60	S17
11	48.08	53.9	S18
14	64.20	56.4	S19
9	64.28	58.95	S20
50	28.16	55.9	S21

تشدید کرده و عدم انطباق بیشتر بین نتایج تفسیر حاصل از برداشت سونداژهای ژئوالکتریکی و نتایج حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی مجاور سونداژهای ژئوالکتریکی را ایجاد می‌نمایند.

۲- نوفه مصنوعی به دلیل عوامل مختلف ناشی از فعالیت‌های انسانی در منطقه مورد مطالعه مانند انجام حفاری‌های اکتشافی و برهم زدن توپوگرافی طبیعی سطح زمین، قرار گرفتن الکترودها به ویژه الکترودهای جریان بر روی واریزه‌های حفاری و سنگ‌ها و خاک‌های نابرجا.

۳- عدم تباین کافی بین رسانندگی یا مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های مجاور هم به ویژه لایه‌های بوکسیت و ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های بالایی آن در منطقه مورد مطالعه.

برای تعیین دقت سونداژهای ژئوالکتریکی فاکتور میزان همبستگی بین عمق تشخیص کنتاکت دولومیت و بوکسیت در سونداژ و عمق کنتاکت دولومیت و بوکسیت در عمل قرار گرفت. ضریب همبستگی بین عمق کنتاکت دولومیت و بوکسیت در گمانه و نتایج عمق تشخیص کنتاکت دولومیت و بوکسیت در سونداژ مقدار ۰,۷۳ به دست آمد (شکل ۶).

ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال تاو یک آماره ناپارامتری (در سطح سنجش رتبه‌ای) است که برای سنجش میزان تناظر یا مطابقت بین دو مجموعه رتبه و ارزیابی معنی‌داری این تناظر به کار می‌رود و به ویژه زمانی کاربرد دارد که در داده‌های مربوط به متغیرها موارد هم رتبه زیاد باشد. به سخن دیگر، این ضریب قوت رابطه‌ی جدول هان توافقی یا متقاطع را نشان می‌دهد. این آماره نشان می‌دهد که یا چه میزان افزایش یا کاهش در یک متغیر با افزایش یا کاهش در

با این حال در اکثر سونداژهای ژئوالکتریکی، مقدار تخمین عمق کنتاکت بین دولومیت کارستی و بوکسیت قابل قبول است چرا که مقدار خطای تخمین عمق کنتاکت مورد نظر در سونداژهای مذکور، با توجه به نتایج عمقی حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی مجاور آن‌ها، کمتر از ۳۰ درصد است. در محل سونداژهای ۱، ۵، ۷، ۱۰، ۱۶، ۲۰، (از ۲۱ سونداژ ژئوالکتریکی برداشت شده)، یعنی در ۳۰ درصد سونداژها، پاسخ یا مقدار تخمین عمق کنتاکت بین دولومیت کارستی و بوکسیت بسیار خوب بوده است. چرا که مقدار خطای تخمین عمق کنتاکت مورد نظر در سونداژهای مذکور، با توجه به نتایج عمقی حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی مجاور آن‌ها، کمتر از ۱۰ درصد است و این مسئله، نتایج حاصل از تفسیر سونداژهای ژئوالکتریکی را بسیار امیدوارکننده نشان می‌دهد. در مواردی که انطباق خوبی بین نتایج حاصل از برداشت سونداژهای ژئوالکتریکی در طول خط برداشت و نتایج حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی مجاور سونداژهای ژئوالکتریکی مزبور از نظر دقت در تخمین عمق لایه بوکسیتی وجود ندارد. این امر را می‌توان به دلایل زیر نسبت داد:

۱- نوفه‌های زمین‌شناسی به دلیل افقی نبودن (یا شیب‌دار بودن) لایه‌های زیر سطح زمین و همچنین توپوگرافی غیر هموار سطح زمین در منطقه برداشت. در این خصوص در بعضی موارد لایه‌بندی نزدیک به حالت قائم بوده و علاوه بر توپوگرافی نسبتاً شدید سطح زمین، عواملی مانند ناهمگنی و پیچیدگی ساختارهای زیرسطحی، تغییرات آرام و تدریجی مرز لایه‌ها، تغییرات سریع عمق سنگ کف و در نهایت تباین اندک مقادیر رسانندگی یا مقاومت ویژه الکتریکی ساختارهای موجود در منطقه مورد مطالعه، این نوفه را

سلیمانی و همکاران، بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوالکتریک در تعیین عمق و ضخامت لایه بوکسیتی در یکی از ذخایر ...، صفحات ۲۳۵-۲۲۵.

حفاری مقدار ضریب همبستگی تاوی بی-کندال مقدار ۰,۴۸۶ به دست آمده است (جدول ۳). به دلیل این که مقدار Sig. در این تحقیق ۰,۰۰۲ محاسبه شده است و این مقدار از ۰,۰۱ کوچکتر است، پس این ضریب همبستگی در سطح ۰,۰۵ معنی دار است. در این تحقیق فرض صفر مبنی بر عدم وجود رابطه بین تخمین عمق لایه‌ها به روش الکتریکی و عمق به دست آمده از حفاری رد می‌گردد. پس می‌توان نتیجه گرفت که بین تخمین عمق لایه‌ها به روش ژئوالکتریک و عمق به دست آمده از حفاری رابطه وجود دارد. همچنین به دلیل متوسط بودن مقدار ضریب همبستگی می‌توان گفت که رابطه نسبتاً خوب بین تخمین عمق لایه‌ها به روش ژئوالکتریک و عمق به دست آمده از حفاری وجود دارد.

متغیر دیگر همراه است. ضریب کندال تائو همواره بین ۱- تا ۱+، در نوسان است. اگر بین دو رتبه یا دو مجموعه رتبه توافق کامل وجود داشته باشد (دو رتبه درست همانند هم باشند)، مقدار ضریب ۱+ خواهد بود؛ اگر بین دو رتبه یا دو مجموعه رتبه عدم توافق کامل وجود داشته باشد (دو رتبه در جهت عکس همدیگر قرار گیرند، یعنی پایین‌ترین رتبه با بالاترین و بالاترین با پایین‌ترین رتبه متناظر شود) مقدار فریب ۱- خواهد بود. در سایر چیدمان‌ها مقدار ضریب بین ۱- تا ۱+ خواهد بود. البته اگر رتبه‌ها به طور کامل مستقل از هم باشند و افزایش یا کاهش در یکی با افزایش و یا کاهش دیگری مرتبط نباشد، مقدار ضریب به طور متوسط برابر با صفر خواهد بود. در مقایسه نتایج حاصل از تخمین به روش ژئوالکتریک و روش



شکل ۶: نمودار پراکنش بین عمق کنتاکت دولومیت و بوکسیت در داده‌های حفاری و داده‌های سونداژ زنی.

جدول ۳: ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال تائو بین تخمین عمق لایه‌ها به روش ژئوالکتریک و عمق به دست آمده از حفاری.

		Drilling	Geoelectric
Drilling	Correlation Coefficient	1.000	.486**
	Sig. (2-tailed)	.	.002
	N	21	21
Kendall's tau_b	Correlation Coefficient	.486**	1.000
	Sig. (2-tailed)	.002	.
	N	21	21

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

پیش‌بینی عمق و ضخامت لایه یا زون کارستی بوکسیتی مورد بررسی قرار گرفت.

به دلیل عدم تباین مقاومت ویژه و هم‌پوشانی گستره مقاومت ویژه بین واحد بوکسیتی با لایه بالایی آن که شامل واحدهای شیل‌های زغالی، ماسه‌سنگ دانرئیز و متخلخل و سیلت‌استون و ... این واحدها از هم قابل تفکیک نیستند. در نتیجه تشخیص ضخامت

## ۵- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوالکتریک در محدوده مورد مطالعه، این نتایج با نتایج حاصل از داده‌های حفاری‌های اکتشافی در منطقه مورد مطالعه مورد مقایسه قرار گرفتند و بر این اساس، توان روش به کار گرفته شده برای



نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

دربرگیرنده آن با استفاده از تلفیق نتایج دورسنجی، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و حفاری در یکی از ذخایر بوکسیت جاجرم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

سلیمانی، ک.، عرب امیری، ع.، کامکار روحانی، ا. و شمس‌الدینی نژاد، م.، ۱۳۹۴، تعیین مدل اکتشافی بوکسیت جاجرم با استفاده از داده‌های اکتشافی در محیط GIS، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، ۱۰ (۲۸)، ۸۳-۹۱.

Bardossy, G., 1982, Karst Bauxites (Bauxite deposits on carbonate rocks) Budapest, Hungary.

Bogatyrev, B.A., Zhukov, V.V. and Tsekhovskiy, Y.G., 2009, Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits, Lithology and Mineral Resources, 44 (2), 135-151.

Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack, T.J. and Rijo, L., 1980, Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys, Geophysics, 45 (1), 75-93.

Karadağ, M.M., Küpeli, Ş., Arýk, F., Ayhan, A., Zedef, V. and Döylen, A., 2009, Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya-Southern Turkey), Chemie der Erde-Geochemistry, 69 (2), 143-159.

Molano, C.E., Salamanca, M. and Overmeeren, R.A., 1990, Numerical modelling of standard and continuous vertical electrical soundings, Geophysical Prospecting, 38 (7), 705-718.

Muiuane, E.A. and Pedersen, L.B., 1999, Automatic 1D interpretation of DC resistivity sounding data, Journal of applied geophysics, 42 (1), 35-45.

Telford, W., Geldart, L. and Sheriff, R., 1990, An Introduction to Applied Geophysics, Cambridge University Press. New York, pp. 283-292 and pp. 522-577.

لایه بوکسیتی با استفاده از روش ژئوالکتریک مشکل است.

قابل قبول نبودن مقدار تخمین عمق کنتاکت بین دولومیت کارستی و بوکسیت در ۵ سونداژ ژئوالکتریکی به دلایلی از جمله، وجود نوفه یا نویز مصنوعی ناشی از عوامل مختلف انسانی در منطقه مورد مطالعه به ویژه فرار گرفتن الکترودها به خصوص الکترودهای جریان بر روی واریزه‌های حفاری و سنگ‌ها و خاک‌های نابرجا و وجود توپوگرافی نسبتاً شدید در سطح زمین است. همبستگی بین عمق تشخیص کنتاکت دولومیت و بوکسیت در سونداژ و عمق کنتاکت دولومیت و بوکسیت در گمانه نشان‌دهنده‌ی صحت نسبتاً خوب داده‌های ژئوالکتریکی جهت تخمین عمق کم‌پایین لایه بوکسیتی است.

بنابراین هر چند پیش‌بینی روش ژئوفیزیک به منظور در تعیین عمق لایه بوکسیتی خیلی دقیق نبوده ولی به طور تقریبی نتایج اطلاعات حاصل از تفسیر داده‌های ژئوفیزیک در محدوده، در بازه‌ای از خطا یا همان دقت تخمین، در بیشتر موارد، قابل قبول است. در نهایت می‌توان گفت که روش ژئوالکتریک در تخمین عمق کمر پایین لایه بوکسیتی (مرز بین لایه بوکسیت و دولومیت کارستی) از صحت و دقت نسبتاً خوبی برخوردار است.

## ۶- سپاس‌گزاری

نگارندگان از کارکنان محترم معدن بوکسیت جاجرم که در طول تحقیق کمال همکاری را با ایشان داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنند.

## ۷- منابع

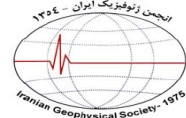
آقاناتی، ع.، ۱۳۸۶، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافی معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.

حسنی پاک، ع.ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۹۰، تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم.

سلیمانی، ک.، ۱۳۹۲، تعیین مدل اکتشافی ذخیره و لایه‌های



Shahrood University of Technology



## Investigation of the accuracy of the results of geoelectrical surveys to determine the depth and thickness of bauxite layer in one of Jajarm bauxite deposits

Kianoush Soleimani<sup>1</sup>, Ali Reza Arab-Amiri<sup>2</sup>, Abolghasem Kamkar-Rouhani<sup>2</sup>, Mahmoud Shamsaddini Nejad<sup>3\*</sup> and Farajollah Momeni<sup>1</sup>

1- M.Sc., School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- M.Sc., Department of Mining, Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 4 December 2016; Accepted: 25 July 2017

\* Corresponding author: mahmoud.shamsaddini@gmail.com

### Keywords

Geoelectric  
Modeling  
Karstic Bauxite  
Drilling  
Resistivity

### Extended Abstract

#### Summary

In this research, the efficiency of electrical sounding method in recognizing the mineral layer in karstic bauxite deposits having coarse topography is investigated. For this purpose, 21 electrical sounding locations beside drilled points along a survey line in one of Jajarm bauxite deposit have been designed and surveyed. First, the acquired data have been interpreted using standard curves, and then, the obtained results have been modelled by IXID software.

Because of enough resistivity contrast between the bauxite and dolomite bed rock, the recognition of basement is possible. Despite this, due to low resistivity contrast between the bauxite and upper layers, the recognition of upper layers, and thus, determination of the bauxite layer thickness is difficult. In order to investigate the accuracy of the results of the geoelectrical surveys in the mineralized area, these results were compared with the results of exploration drilling in the study area. After comparison, it was identified that estimation error of the results of 5 sounding locations were above 50%, estimation error of the results of 10 sounding points were between 10% and 30%, and estimation error of the results of 6 sounding locations was less than 10%. Kendall rank correlation coefficient between estimated depth of basement by geoelectrical method and the achieved depth of drilling results was 0.486 that revealed a good correlation between contact of recognized dolomite depth and bauxite from the interpretation of sounding results and from the results of drilling data in the study area.

### Introduction

Bauxite exploration methods like exploration of most of minerals have divided into direct and indirect methods. Different drilling methods such as borehole drilling, core drilling and trench drilling are different kinds of direct methods, which are expensive and taking very much time. Among indirect exploration methods, we can refer to geophysical methods, which their applications are spreading because they are cheaper and faster, i.e. have higher operation speed. The major question of this research is whether electrical resistivity method is effective in bauxite exploration or not? and also, how much is the accuracy of modeling results and interpretation of electrical sounding surveys in determination of the depth and thickness of bauxite layer in the study area?

### Methodology and Approaches

In this research, resistivity method has been used for recognition of bauxite layer in Jajarm bauxite mine. After preliminary studies and inspection of Jajarm bauxite mine, one part of that area has been selected as an area for planning and acquisition of geoelectrical surveys. This area has coarse topography that limits the planning of survey network. Finding the depth and thickness of the bauxite layer is the purpose of this research. As the resistivity in vertical direction changes more than resistivity in horizontal direction in the area, vertical changes in resistivity represent the properties of bauxite layer in the vertical direction, and thus, the Schlumberger electrode array was used for geoelectrical sounding surveys. The distance between successive sounding points in survey lines according to exploration boreholes was considered 25 meters. Geological and exploration reports as well as the positions of the bauxite outcrops show the dip of bauxite layers. Considering this point, 21 electrical sounding points having 25 m distances from each other were surveyed. In this research, first, electrical sounding data were interpreted by standard curves, and then, the achieved results as the primary model were modeled by IXID software. Kendall rank correlation

coefficient between estimated depth of basement as a result of modeling electrical sounding data and the achieved depth of drilling results was 0.486 that revealed a good correlation between the basement depth from the interpretation of sounding results and from the results of drilling data in the study area.

### **Results and Conclusions**

Five geoelectrical layers have generally been recognized in the study area as a result of the interpretation of all the acquired electrical sounding data, and also, the geological evidences from the area. Insufficient resistivity contrast between the bauxite unit and its overlying layer cause that these two units cannot be separable, and thus, determination of the thickness of the bauxite layer using geoelectrical method seems to be difficult. Although there is sufficient resistivity contrast between the bauxite unit and its underlying karstic dolomite basement, the estimated contact depths between these two layers from the interpretation of sounding data in 5 sounding locations, based on the drilling results in these locations, are not acceptable because of artificial noises from different human factors such as drilling equipment, drilling debris and other human installation, and also, because of geological noises such as varying thickness and dip of soil and rock layers and the existence of coarse topography in the study area. In general, based on the obtained results from the interpretation of the electrical sounding data, we can say that the accuracy of the geophysical method in estimation of subsurface information in this research is acceptable. We can also conclude that the geoelectrical method in the estimation of bauxite and basement layers has high accuracy.

Archive of SID