

اکتشاف لایه‌های تراورتن مدفون با تلفیق داده‌های ژئوالکترونیک و زمین‌شناسی در منطقه محلات

فریدون قدیمی

دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

نویسنده مسئول: ghadimi@Arakut.ac.ir *

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۴

دریافت: ۱۴۰۰/۱/۱۵

چکیده

بررسی‌های ژئوالکترونیک به روش مقاومت ویژه الکتریکی و با تعیین و ارزیابی خصوصیات لایه تراورتن زیر سطحی از جمله عمق باطله، ضخامت لایه تراورتن و عمق سنگ کف آن از اهداف این مقاله است. علاوه بر بررسی داده‌های زمین‌شناسی، مقاومت ویژه سونداژهای الکتریکی پس از تبدیل از مقاومت ویژه ظاهری به مقاومت ویژه واقعی با نرم‌افزار RES2DINV نیز تحلیل گردید. این بررسی نشان داد لایه‌های تراورتن با ضخامت متوسط ۱۵ متر در اعماق ۵ تا ۸۰ متری واقع شده و مقاومت ویژه آن به دلیل شکستگی و خردشدگی بسیار متغیر است. تلفیق داده‌های ژئوالکترونیک با زمین‌شناسی سطحی با حفر ۹ گمانه و ترسیم نقشه‌های هم‌ضخامت و هم‌عمق تراورتن نشان داد که باطله (خاک و آبرفت) روی تراورتن مدفون دارای عمق ۲ تا ۸۰ متر و تراورتن از جنس خالص و ناخالص کنگلومرای متغیر بوده و سنگ کف تراورتن از جنس کنگلومرای قرمز و شیل و ماسه‌سنگ تیره است. با تفسیر داده‌های مقاومت ویژه ظاهری در امتداد نیم‌رخ‌های مختلف و تطبیق آن‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مشخص شد که مقاومت ویژه بالا را لایه‌های کنگلومرای، مقاومت ویژه پایین را آبرفت‌ها و ماسه‌سنگ‌های رسی و مقاومت ویژه متوسط را لایه‌های تراورتن تشکیل داده است. بررسی صحت داده‌های مقاومت‌سنجی با لگ‌های حفاری نشان داد که دقت در تفکیک عمق باطله، ضخامت و عمق لایه تراورتن به ترتیب ۲۷، ۱ و ۶۳ درصد بوده است. داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی با پیش‌بینی عمق سنگ کف تراورتن راهنمای مناسبی جهت تعیین موقعیت و عمق حفاری در تراورتن مدفون منطقه بوده است.

واژه‌های کلیدی: مقاومت ویژه، داده‌های زمین‌شناسی، لایه تراورتن، عملیات حفاری، محلات

پیشگفتار

هورو و همکاران، (۲۰۲۱). بسیاری از مواد معدنی فلزی و غیرفلزی در طبیعت وجود داشته که نظیر نفت و آب زیرزمینی در زیر پوششی از سنگ‌ها و آبرفت‌ها قرار گرفته و مدفون هستند (رانی و همکاران، ۲۰۱۸؛ داکو و همکاران، ۲۰۲۰). دستیابی مستقیم به منابع معدنی مذکور خصوصاً مواد معدنی غیرفلزی نظیر تراورتن با حفر گمانه که هیچ گونه شناختی از عمق و ضخامت لایه‌های مربوطه نداشته، بسیار هزینه بر است. روش‌های ژئوفیزیکی و تلفیق آن با برداشت‌های زمین‌شناسی سطحی کمک شایانی در تعیین موقعیت، عمق گمانه و توصیف خصوصیات سنگ از نظر جنس و شکستگی می‌کنند (نواچوکوا و همکاران، ۲۰۱۷). زمین‌شناسی بر وضعیت تکتونیکی، ساختمانی و چینه‌ای تراورتن و سونداژهای ژئوالکترونیک به روش شلومبرگر وضعیت ساختمان زیرسطحی لایه‌ها را ارزیابی می‌کند (ندوگسا-مبارگا و همکاران، ۲۰۱۴).

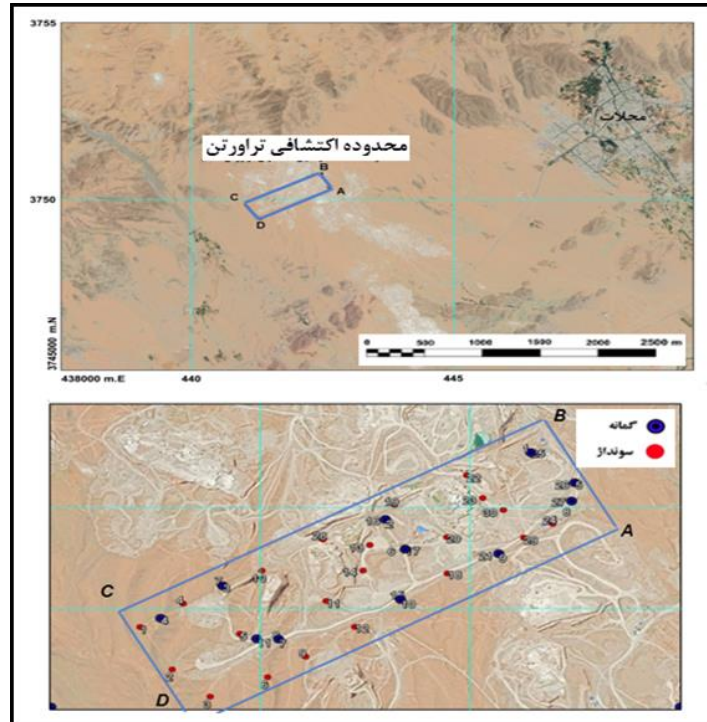
بدون تردید برای اکتشاف منابع پنهان زیرزمینی نمی‌توان تنها بر اطلاعات زمین‌شناسی تکیه کرد و به ناچار می‌بایست به نحوی آثار این منابع بر روی سطح زمین نیز آشکارسازی شوند. روش‌های ژئوفیزیکی نظیر مطالعات ژئوالکترونیک کمک شایانی در پی‌جویی این ذخایر می‌کنند (پیروالا، ۲۰۱۵؛ کومار و پال، ۲۰۲۰). روش کاربرد مقاومت ویژه الکتریکی موفقیت زیادی در حل مشکلات اکتشاف آب (کنسل، ۲۰۰۶)، مطالعات مهندسی عمران (سودها و همکاران، ۲۰۰۹)، مطالعات زیست‌محیطی (گریلیو و همکاران، ۲۰۰۷) داشته است. به دلیل سرعت بالای برداشت داده‌ها و توانایی در برداشت انبوه نمونه، همچنین مناسب بودن روش مقاومت ویژه در شناسایی نوع سنگ، درزه‌ها، منطقه خرد شده و گسل در اعماق مختلف، این روش به عنوان موفق‌ترین روش در اکتشاف ذخایر پنهان سطحی به کار گرفته شده است (نواچوکوا و فنگ، ۲۰۱۲؛

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده اکتشافی
 منطقه مورد مطالعه در غرب محلات از استان مرکزی (شکل ۱) و از نظر زمین‌شناسی در دو پهنه ساختاری ایران مرکزی در شمال و سندج - سیرجان در جنوب واقع شده است. مهمترین واحدهای زمین‌شناسی محل تراورتن را واحدهای ائوسن و کواترنری تشکیل داده است. ماسه‌سنگ‌های قرمز ضخیم لایه با میان لایه‌های کنگلومرای قرمز، شیل و مارن از واحدهای ائوسن (Es) بوده که به عنوان سنگ کف آبرفت‌ها و تراورتن‌های منطقه محسوب می‌شوند (شکل ۲). واحد تراورتن (Qtz) در برگیرنده نهشته‌های آهکی عهد حاضر بوده که فرآورده چشمه‌های آهک‌ساز است. لایه‌های تراورتن تقریباً افقی و با ضخامت قابل توجه به رنگ کرم و سفید در زیر پادگانه‌های آبرفتی قدیمی دیده می‌شوند. پادگانه‌های آبرفتی قدیمی (Qt₁) شامل رسوبات مخروط‌افکنه‌های کهن بوده که از رسوبات آبرفتی سست در بالا و کنگلومرای سست در پایین تشکیل شده است. واحد آبرفت عهد حاضر (Q) شامل رسوبات آبراه‌ای بوده که به صورت مسیل در محدوده اکتشافی دیده شده و ذرات تشکیل دهنده آن‌ها از فرسایش سنگ‌های بالادست منطقه است.

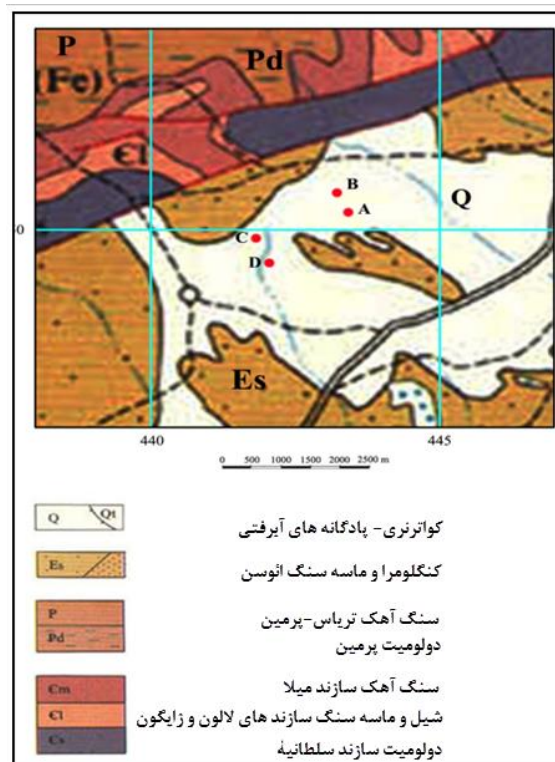
روش تحقیق

پس از انجام بررسی‌های زمین‌شناسی در منطقه اکتشافی تراورتن در محلات، تعداد ۳۰ سونداژ الکتریکی به روش شلومبرگر در امتداد سه نیمرخ برداشت گردید. داده‌های مقاومت ویژه ظاهری بر حسب نصف فاصله الکترودی جریان ترسیم گردید. لایه‌ها با توجه به مقاومت‌های ویژه هر سونداژ ژئوالکتریکی تفکیک گردیدند. برای تمام سونداژهایی که در امتداد یک نیمرخ قرار داشته، شبه مقطع دوبعدی مقاومت ویژه ترسیم و در امتداد هر نیمرخ جنس سنگ‌ها تعیین شد. برای کسب تصاویر واقعی دو بعدی، مقاطع ژئوالکتریکی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری در امتداد نیمرخ‌ها با نرم‌افزار Res2DINV برگردان شده و سپس مقاطع دوبعدی مقاومت‌های ویژه ترسیم شدند (لوک، ۲۰۰۴). از تصاویر حاصل و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، ۹ منطقه حفاری پیشنهاد، اجراء و لاگ چاه‌های حفاری تهیه شد.

روش مقاومت ویژه به دلیل مزیت‌هایی نظیر سادگی در برداشت‌های صحرائی و تهیه داده‌ها، کاربردی‌ترین روش ژئوفیزیکی در مطالعات زیرسطحی است (آنوموهانران، ۲۰۱۳). این روش به دلیل تفاوت مقاومت ویژه الکتریکی بین لایه‌های مختلف زمین‌شناسی به طور گسترده در اکتشافات مواد معدنی به کار می‌رود (تاماس بنجاد، ۲۰۰۹؛ آللی و همکاران، ۲۰۱۶). در این روش با فرستادن جریان الکتریکی به درون زمین و اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی، مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های زیرسطحی تشخیص داده می‌شود (دوبرین و ساویت، ۱۹۸۸). عمق‌یابی‌های الکتریکی قائم یکی از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی بوده که بر اساس تفاوت در مقاومت الکتریکی، چینه‌شناسی زیرسطحی را مشخص می‌نماید. تقریباً یک صد آرایش ژئوالکتریکی وجود دارد (سزالایی و سزارکا، ۲۰۰۸) اما انواع آرایش الکترودی که بیشتر استفاده می‌شود، به ترتیب آرایش‌های شلومبرگر، ونر و دوقطبی - دوقطبی هستند (آنوموهانران، ۲۰۱۳). در آرایش‌های شلومبرگر و ونر با افزایش فاصله الکترودهای جریان، عمق نفوذ افزایش یافته که میزان آن به ساختار زمین‌شناسی زیرسطحی وابسته است (آوولابی و همکاران، ۲۰۰۹). تفسیر منحنی‌های عمق‌یابی می‌تواند به صورت کمی یا کیفی صورت گیرد که نتیجه آن مدل سنگ‌شناسی از لایه‌های زیرسطحی است (آمادی و همکاران، ۲۰۱۰). تفسیر کمی منحنی‌های عمق‌یابی پس از برداشت مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در برابر طول خط جریان صورت می‌گیرد. تفسیر کیفی پس از ترسیم منحنی‌های هم مقاومت ویژه ظاهری و شبه مقاطع ژئوالکتریک انجام می‌شود (هورو و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج این دو تفسیر با تفکیک لایه‌های زیرسطحی براساس مقادیر عمق و مقاومت ویژه حقیقی به صورت مقاطع ژئوالکتریکی ارائه می‌شوند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۳).
 هدف از این مقاله استفاده از خصوصیات ژئوالکتریکی - زمین‌شناسی جهت تعیین ضخامت تراورتن، عمق سنگ کف و عمق باطله روی تراورتن با بررسی داده‌های مقاومت ویژه و پیشنهاد بهترین نقاط برای حفر گمانه اکتشافی و تعیین دقت روش ژئوالکتریک در تخمین پارامترهای مورد نظر در مقایسه با داده‌های حفاری است.



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای محدوده اکتشافی تراورتن در محلات به همراه موقعیت سونداژهای ژئوالکتریک و گمانه‌های حفر شده



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی به همراه موقعیت محدوده اکتشافی

تبدیلات مقاومت ویژه

با بررسی مقاومت ویژه الکتریکی در سطح زمین، ساختمان‌هایی که در زیرزمین اختلاف مقاومتی داشته تفکیک می‌گردند. با توجه به آرایش الکترودی در تفسیر

داده‌های مقاومت ویژه، روش‌های مختلفی از بررسی‌های مقاومت ویژه الکتریکی وجود دارد (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). حل موضوع وارون توزیع مقاومت ویژه ظاهری زیرسطحی با توجه به اندازه‌گیری‌های سطحی انجام

ΔV اختلاف پتانسیل، I شدت جریان الکتریکی برای فاصله الکترودی اندازه‌گیری شده و K فاکتور هندسی بوده که به آرایش الکترودی بستگی دارد (رابطه ۶).

$$K = \pi \left[\left(\frac{AB}{2} \right)^2 - \left(\frac{MN}{2} \right)^2 \right] / MN \quad (۶)$$

نتیجه و بحث

مقاومت ویژه ظاهری

نیمرخ مقاومت ویژه ظاهری از بهم پیوستن مقدار مقاومت ویژه آن در عمق به دست می‌آید (شکل ۳). در تمامی نیمرخ‌های A، B و C منطقه را می‌توان به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی و مقاومت ویژه ظاهری را به سه طبقه کم (کمتر از ۴۰۰ اهم‌متر)، متوسط (۴۰۰ تا ۶۰۰ اهم‌متر) و زیاد (بیش از ۶۰۰ اهم‌متر) تقسیم نمود. همچنین می‌توان اشاره نمود خطوط پربندی بسته معرف مناطق با تشکیلات سنگی مختلف و خطوط موازی در قسمت غربی معرف تشکیلات آبرفتی می‌باشند. در نیمه شرقی، مقاومت ویژه ظاهری زیاد حاکی از لایه کنگومرا و مقاومت ویژه ظاهری متوسط لایه تراورتن دارد. در بخش مرکزی، مقاومت ویژه ظاهری متوسط مربوط به تراورتن و مقاومت ویژه ظاهری کم در سطح مربوط به لایه آبرفتی و در عمق مربوط به ماسه‌سنگ رسی است. در نیمه غربی مقاومت ویژه ظاهری کم و در سطح مربوط به لایه‌های آبرفتی و در عمق مربوط به ماسه‌سنگ رسی است. بنابراین به سمت غرب لایه‌های تراورتن وجود نداشته و یا از ضخامت بسیار کم برخوردارند. تراورتن‌ها عموماً در عمق کمتر از ۶۰ متری سطح زمین قرار دارند.

مدل‌سازی وارون

نتایج بررسی‌های ژئوالکتریکی به صورت نیمرخ‌های وارون دوبعدی و منحنی‌های سونداژ یک بعدی است. نیمرخ‌های مقاومت ویژه الکتریکی به صورت کیفی و منحنی‌های سونداژ و نیمرخ ژئوالکتریک از نظر کمی تحلیل شدند. مدل مقاومت ویژه دوبعدی با تصویربرداری الکتریکی داده‌های زیرسطحی حاصل شد. مدل پیشرو برای محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و روش حداقل مربعات غیرخطی جهت وارون استفاده شد. روش تفسیر کمی با مقایسه منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری

می‌گیرد. تابع کرنل راه حل مناسبی در موضوع وارون ارائه می‌دهد. این تابع اندازه‌های مقاومت ویژه ظاهری را برحسب تغییر سنگ‌شناسی با عمق نشان می‌دهد. در این تابع فرض این بوده که زمین به طور محلی دارای لایه‌های افقی غیرهمگن بوده و برخلاف مقاومت ظاهری به شکل الکترودها بستگی ندارد. این مقدار در صحرا قابل اندازه‌گیری نبوده، اما از تبدیلات مقاومت ویژه ظاهری به دست می‌آید. تابع کرنل برای وارون‌سازی یک بعدی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری از رابطه ۱ حاصل می‌شود (ایزومو و همکاران، ۲۰۱۱).

$$\rho_a(\lambda) = r^2 \int T(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad 0 \leq \lambda \leq \infty \quad (۱)$$

در اینجا r نصف الکترود جریان، J_1 اولین مرتبه تابع بسل^۱ و $T(\lambda)$ تبدیل مقاومت ویژه طبق رابطه پیکریس^۲ است (باسکور، ۱۹۸۴).

$$T(\lambda) = r^{-1} \int \rho_a(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad 0 \leq \lambda \leq +\infty \quad (۲)$$

با جایگزینی متغیرهای $x = \ln r$ ، $y = \ln(1/\lambda)$ معادله ۳ حاصل می‌شود:

$$\rho_a(x) = \int T(y) [e^{2(x-y)} J_1(e^{x-y})] dy \quad -\infty \leq y \leq +\infty \quad (۳)$$

ورودی، فیلتر تبدیل مقاومت ویژه بوده و در تحلیل مقاومت ویژه پیشرو از روش فیلتر خطی استفاده می‌شود. از نظر ریاضی اجراء فیلتر خطی طبق رابطه ۴ است.

$$\rho_a(x_0) = \sum_j f_j T(y_0 - j\Delta y) \quad (۴)$$

در اینجا x_0 مقاومت ویژه ظاهری، y_0 تبدیل مقاومت ویژه ظاهری، Δy فاصله متوالی نمونه‌برداری و f_j ضریب فیلتر بوده که در مقادیر نمونه تبدیل مقاومت ویژه ضرب شده و مقاومت ویژه ظاهری حاصل می‌شود. زمانی که زمین تقریباً افقی، ایزوتروپ و دارای مواد هموزن بوده، تغییر مقاومت تابعی از عمق است. شلومبرگر مهمترین آرایشی است که اطلاعات ارزشمندی را در حل مسایل ژئوفیزیک زیرسطحی به دست می‌دهد. در سونداژزنی قائم مقاومت ویژه الکتریکی، چهار الکترود در خطوط مستقیم روی زمین با توجه به AMNB طراحی می‌شوند. مقاومت ویژه ظاهری حاصل (pa) با توجه به شرایط تابع شلومبرگر $AB \geq 5 MN$ طبق رابطه (۵) است.

$$\rho_a = \frac{K\Delta V}{I} \quad (ohm.m) \quad (۵)$$

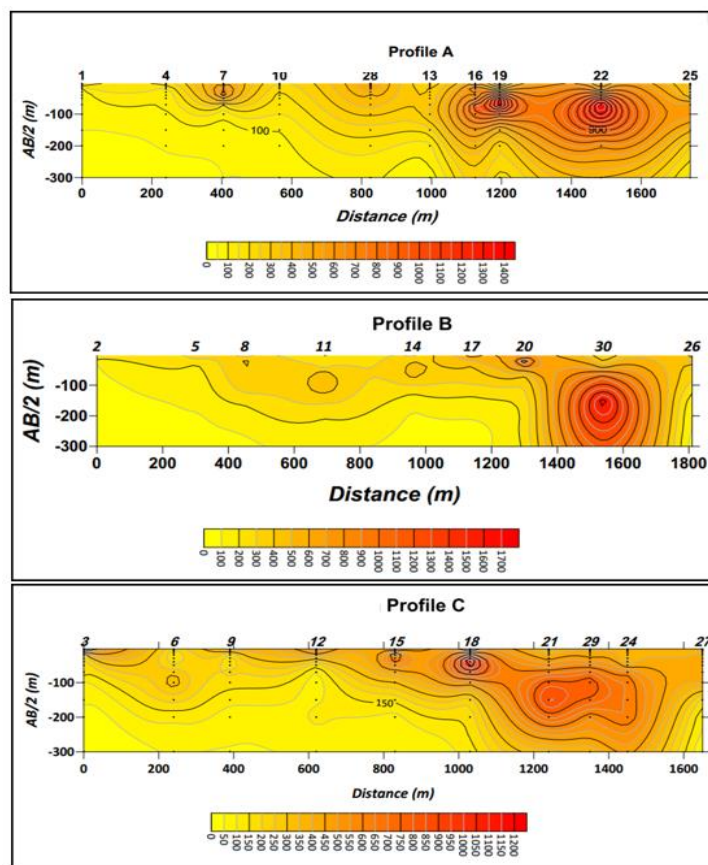
² Pekeris

¹ Bessel

نیمرخ B نیز نظیر نیمرخ A لایه آبرفتی با مقاومت ویژه کم در نزدیکی سطح زمین دیده می‌شود. لایه با مقاومت ویژه بالا از نوع سنگ سخت یعنی تراورتن در بالا و کنگلومرا در پایین بوده که تا عمق ۶۰ متر در محل سونداژهای ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۸، ۳۰ و ۲۶ به چشم می‌خورد. به سمت اعماق لایه سنگی سست از نوع ماسه‌سنگ رسی است. در محل سونداژ ۲ و ۵ لایه با مقاومت کم نیز لایه سست آبرفتی و لایه سنگی سست از نوع ماسه‌سنگ رسی است. در نیمرخ C لایه با مقاومت ویژه بالا از نوع سنگی بوده که تراورتن در بالا و کنگلومرا در پایین است. این لایه تا عمق ۱۲۰ متر و در محل سونداژهای ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴ دیده می‌شود. در اعماق بیشتر از سونداژهای فوق، مقاومت ویژه کم و حاکی از لایه سنگی سست از نوع ماسه‌سنگ رسی است.

اندازه‌گیری شده در نمودار لگاریتمی و با مقایسه و یا برازش آن‌ها با منحنی‌های دولایه‌ای مربوط به آرایش شلومبرگر انجام گرفت.

مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون یکی از سونداژها به صورت نمونه و نتایج وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری در امتداد نیمرخ‌های A، B و C در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. در نمودار وارون دوبردی از نیمرخ A لایه با مقاومت ویژه الکتریکی کم به ضخامت متوسط ۵ متر در آبرفت سطحی دیده می‌شود. در محل سونداژهای مورد نظر به غیر از سونداژ ۱۰ و ۲۸ تا عمق ۸۰ متر لایه‌های سنگی با مقاومت ویژه بالا حاکی از وجود تراورتن و کنگلومرا است. این واحد در محل سونداژ ۷ دارای عمق حدود ۴۰ متر است. واحدهای سنگی با مقاومت ویژه کم در اعماق زیاد را ماسه‌سنگ رسی تشکیل داده است. در



شکل ۳. مقاومت ویژه ظاهری نیمرخ‌های A، B و C از معدن تراورتن

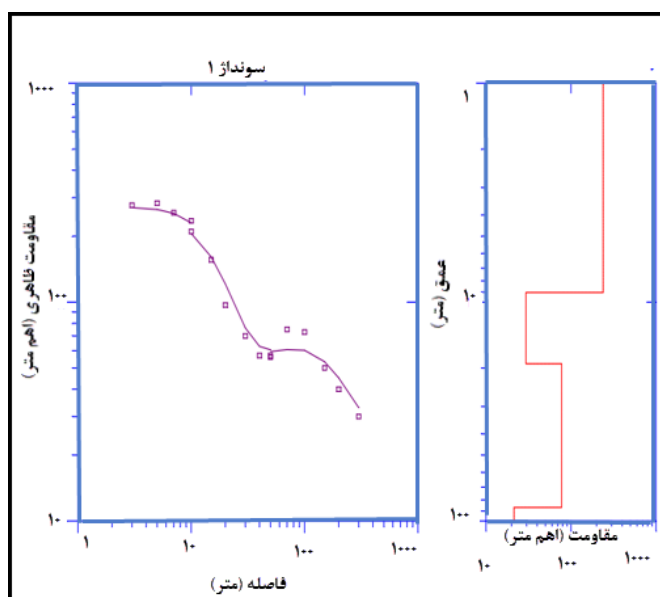
لایه‌ها در مدل وارون دوبردی، نیمرخ‌های زمین‌شناسی در امتداد نیمرخ‌های ژئوالکتریکی تهیه گردید (شکل ۶). نیمرخ A در راستای نیمرخ طولی ژئوالکتریک A بوده که سنگ کف اصلی تراورتن را ماسه‌سنگ رسی ائوسن تشکیل

نیمرخ‌های زمین‌شناسی

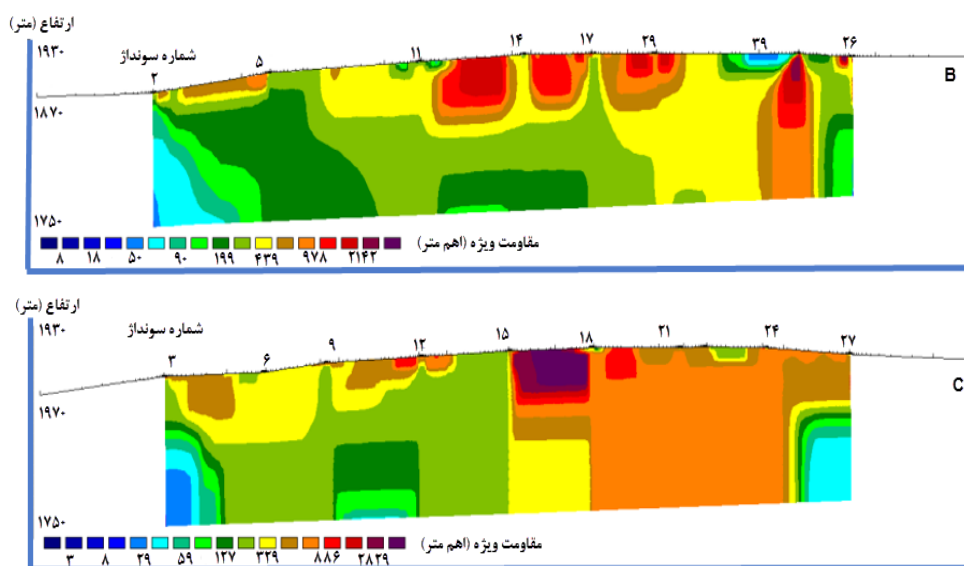
با استفاده از مدل وارون یک بعدی تعداد لایه در هر سونداژ تفکیک و با مقایسه مقاومت ویژه ظاهری هر لایه با توالی سنگ‌شناسی منطقه و همچنین با تعیین ارتباط جانبی

است. کنگلومرای بین لایه‌ای ائوسن در محل سونداژهای ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۳۰ و ۲۶ به چشم می‌خورد. تراورتن‌ها سطحی و در اعماق کمتر از ۳۰ متر دیده می‌شوند. ضخامت تراورتن به دلیل حرکت چشمه تراورتن‌ساز در جهات مختلف متفاوت است. در این نیمرخ پوشش آبرفتی تراورتن در محل سونداژهای ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۰، ۳۰ و ۲۶ از ضخامت کمی برخوردار است. در محل سونداژ ۲ و ۵ تراورتن دیده نشده و اگر هم وجود داشته با آبرفت فوقانی ترکیب و به شکل مخلوط یعنی کنگلومرای تراورتنی است.

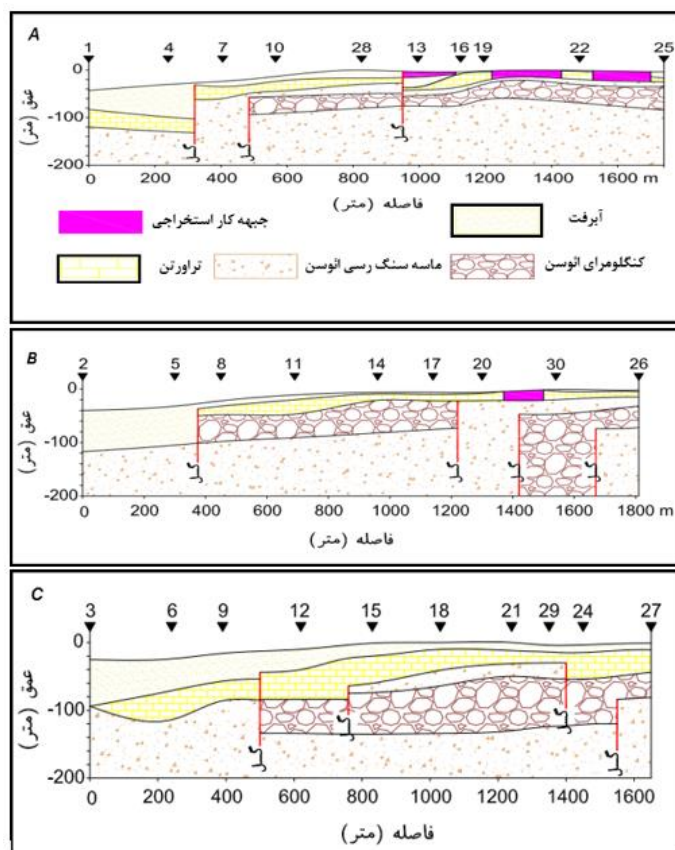
داده و در محل سونداژهای ۱۰، ۲۸، ۱۳، ۱۶، ۱۹، ۲۲ و ۲۵ کنگلومرای میان لایه‌ای ائوسن به چشم می‌خورد. سنگ کف به شدت گسل خورده بوده و محلول‌های تراورتن‌ساز از محل گسل‌ها به سطح لایه‌های ماسه‌سنگ رسی هدایت شده و تراورتن را تشکیل داده است. بعدها با عبور رودخانه از روی تراورتن‌ها لایه‌های آبرفتی برجای گذاشته شده و تراورتن‌ها را در زیر خود پنهان نموده‌اند. در این نیمرخ تراورتن‌ها دارای ضخامت متوسط ۱۵ متر بوده که توسط گسل‌های جوان بریده و جابجا شده‌اند. نیمرخ زمین‌شناسی B نظیر نیمرخ A دارای سنگ کف ماسه‌سنگ رسی گسل خورده در محل تمامی سونداژها



شکل ۴. تعیین تعداد لایه با استفاده از مدل‌سازی وارون در سونداژ یک



شکل ۵. نیمرخ‌های A، B و C از مدل وارون دو بعدی معدن تراورتن محلات



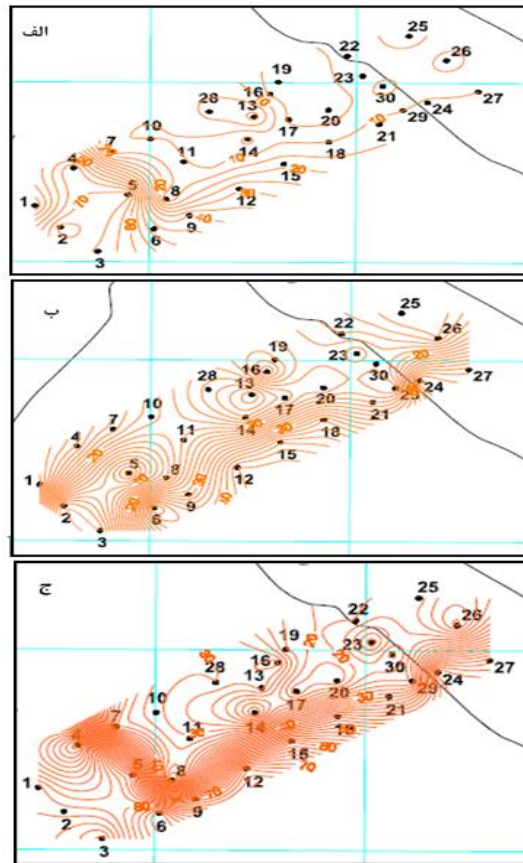
شکل ۶. نیمرخ‌های زمین‌شناسی در امتداد نیمرخ‌های ژئوالکتریک A، B و C تراورتن محلات

انتخاب شد (شکل ۷ ب). طیف ضخامت تراورتن در منطقه از ۱۰ تا ۴۰ متر متغیر است. ضخامت‌های بیش از ۲۰ متر در نیمه جنوبی منطقه و به عبارتی در محل نیمرخ C و سونداژهای ۹، ۳، ۶، ۱۲، ۱۵، ۲۱، ۱۸، ۲۹، ۲۴ و ۲۷ دیده شد. در نیمه شمال شرقی محدوده طرح، ضخامت تراورتن حدود ۲۰ متر است. منظور از سنگ کف سنگی بوده که تراورتن بر روی آن واقع شده است. جنس سنگ کف را کنگلومرا و ماسه‌سنگ رسی ائوسن تشکیل داده است. طیف تغییرات سنگ کف ۲۰ تا ۸۰ متر است (شکل ۷ ج). سنگ کف در نیمه غربی (محل سونداژهای ۱ الی ۶) در عمق بیش از ۷۰ متری قرار دارد. عمق سنگ کف در نیمه شمال شرقی (محل سونداژهای ۱۷، ۱۶، ۱۳، ۲۸، ۲۰، ۳۰، ۲۳، ۱۹، ۲۲، ۲۶ و ۲۵) بیش از ۲۰ متر است. با توجه به اینکه هدف از عملیات ژئوالکتریک در محدوده اکتشافی در حین استخراج تراورتن، مشخص کردن بهترین محل‌ها برای حفر گمانه اکتشافی و تعیین عمق گمانه بوده، لذا با بررسی نیمرخ‌های ژئوالکتریک، نیمرخ‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های هم‌عمق آبرفت، هم‌عمق سنگ کف و هم‌ضخامت تراورتن محل‌های حفاری در جدول پیشنهاد گردید.

نیمرخ C نظیر نیمرخ‌های A و B دارای سنگ کف ماسه‌سنگی رسی ائوسن است. در بین لایه ماسه‌سنگی، کنگلومرای بین لایه‌ای در محل سونداژهای ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۹، ۲۴ و ۲۷ وجود دارد. ضمناً در محل سونداژهای ۳، ۶ و ۹ بافت‌ها به عنوان خاک باطله در محل سونداژهای ۳، ۶ و ۹ بالغ بر ۵۰ متر است. تراورتن ضخامت یکسانی نداشته و به نظر می‌رسد ضخامت تراورتن در محل نیمرخ C بیش از دو نیمرخ دیگر باشد.

نقشه هم‌عمق و هم‌ضخامت تراورتن

از بهم وصل کردن عمق‌های آبرفت با ضخامت یکسان نقشه هم‌عمق آبرفت حاصل شد. طیف تغییرات منحنی‌های هم‌عمق ۱۰ متر انتخاب گردید (شکل ۷ الف). این بررسی نشان داد عمق آبرفت و یا به عبارتی باطله خاکی روی تراورتن به سمت غرب و محل سونداژهای ۱ الی ۶ بالغ بر ۵۰ متر بوده، به طوری که در محل سونداژ ۲ حدود ۸۰ متر است. عمق آبرفت در نیمه شرقی محدوده یعنی از سونداژ ۱۰ تا ۳۰ کمتر از ۱۰ متر است. طیف تغییرات منحنی در نقشه هم‌ضخامت تراورتن نیز ۱۰ متر



شکل ۷. الف- نقشه هم‌عمق آبرفت، ب- هم‌ضخامت تراورتن و ج- هم‌عمق سنگ کف

جدول ۱. عمق آبرفت، ضخامت تراورتن و عمق سنگ کف حفاری پیشنهادی به روش ژئوالکتریک و حفاری انجام شده (عمق و ضخامت به متر)

شماره گمانه	عمق		ضخامت		آبرفت	
	ژئوالکتریک	حفاری	ژئوالکتریک	حفاری	ژئوالکتریک	حفاری
۱	۱۲	۴۳	۱۰	۲۵	۱۷	۲۲
۲	۵	۵۲	۳۰	۵	۴۷	۳۵
۳	۱۲	۵۰	۱۸	۳۰	۲۰	۳۰
۴	۵۰	۷۵	۳۵	۳۰	۴۵	۸۵
۵	۵	۲۷	۱۰	۹	۱۸	۱۵
۶	۵	۲۳	۱۱	۲۶	۷	۱۶
۷	۱۰	۴۳	۱۷	۱۹	۲۴	۲۷
۸	۱۰	۴۵	۳۵	۲۵	۲۰	۴۵
۹	۱۲	۴۸	۴۰	۲۸	۲۰	۵۲
۱۰	۲۰	۴۸	۴۰	۳	۴۵	۶۰
۱۱	۱۰	۵۶	۱۸	۲۳	۳۳	۲۸

متوسط (ضریب همبستگی ۰/۵۲) (شکل ۸ الف) و با توجه به ضریب تعیین ژئوالکتریک، تنها ۲۷ درصد در تخمین عمق آبرفت مؤثر بوده است. از طرفی با توجه به توزیع تی استیودنت^۱ محاسباتی (۱/۸۲) کمتر از تی استیودنت بحرانی (۱/۸۳) و همچنین سطح احتمال^۲ محاسباتی

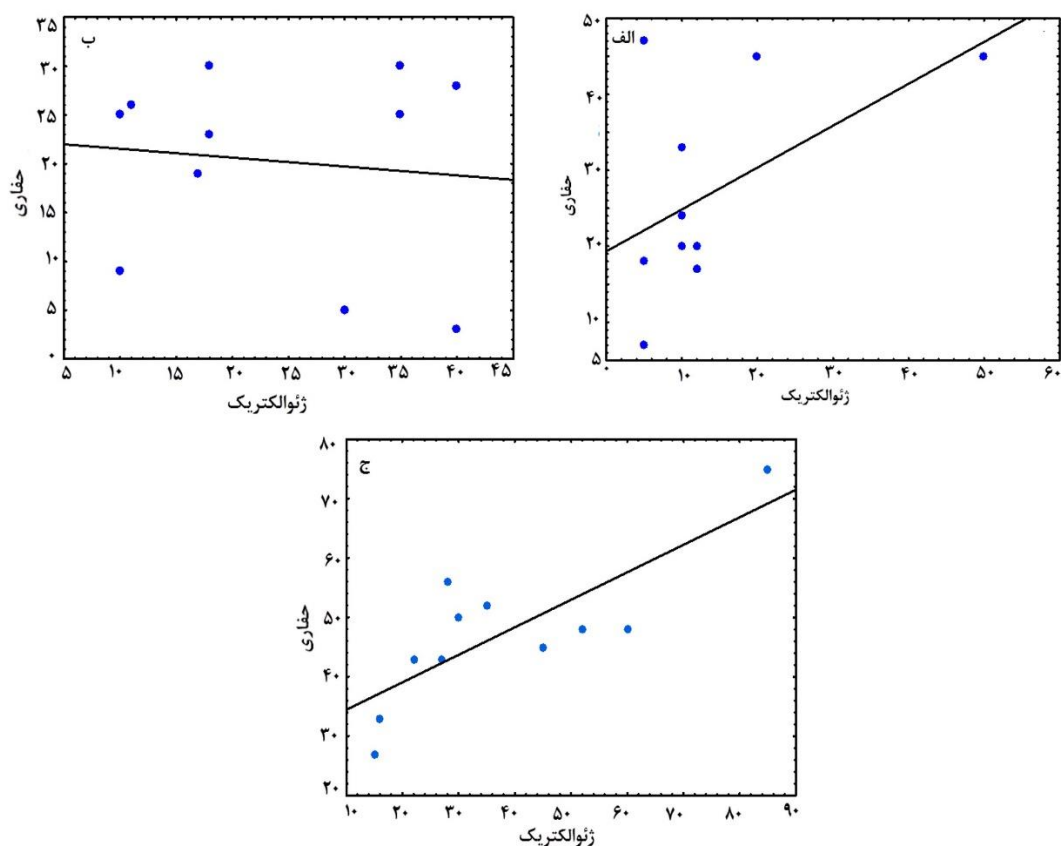
دقت داده‌های مقاومت‌سنجی ژئوالکتریک در محاسبه عمق آبرفت روی تراورتن (باطله)، ضخامت تراورتن و عمق آن با داده‌های گمانه حفاری به روش رگرسیون خطی تحلیل گردید. ضریب همبستگی بین عمق آبرفت پیشنهادی به روش ژئوالکتریک و عمق آبرفت حفاری

^۲ p-value

^۱ T student

از کنگلومرای تراورتنی به تراورتن کنگلومرای متغیر است. تشابه مقاومت ویژه ظاهری واحدهای مورد نظر با تراورتن، تفکیک دو واحد آبرفتی را با لایه تراورتن مشکل نموده است. بنابراین داده‌های ژئوالکتریک نتوانستند در تخمین ضخامت آبرفت یا ضخامت خاک باطله روی تراورتن مؤثر باشند. نواچوکوا و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از داده‌های مقاومت‌سنجی و اختلاف زیاد مقاومت ویژه ظاهری در واحدهای مختلف سنگی و یکنواختی مقاومت ویژه در هر واحد سنگی نتوانستند عمق خاک باطله روی توده‌های نفوذی را در نیجریه تعیین و مرز این توده‌ها را از واحدهای ماسه‌سنگی و شیلی اطراف تفکیک نمایند.

(۰/۱۰) بیش از ۰/۰۵ بدیهی است ژئوالکتریک تخمین‌گر خوبی برای محاسبه عمق آبرفت روی تراورتن نبوده است. بررسی مغزه‌های حفاری نشان داد آبرفت روی تراورتن در اکثر گمانه‌ها ترکیب یکنواختی ندارد. آبرفت مورد نظر که در طیف ضخامت ۷ تا ۴۷ متغیر بوده از جنس‌های مختلف نظیر آبرفت سست، کنگلومرای سست و سخت از سطح تا عمق و بر روی تراورتن است. در برخی از گمانه‌ها به دلیل خردشدگی تراورتن (ایجاد برش تراورتن) و نفوذ ترکیبات آبرفتی به داخل شکستگی‌ها و حفره‌های تراورتن ناشی از جریان قائم آب زیرزمینی و همچنین وجود قطعات سنگی زیاد تراورتن در آبرفت، مرز واضحی بین تراورتن و واحدهای آبرفتی وجود ندارد. به طوری که مرز تدریجی و



شکل ۸. رابطه الف-عمق آبرفت، ب-ضخامت تراورتن و ج- عمق سنگ کف تراورتن به روش ژئوالکتریک و روش حفاری

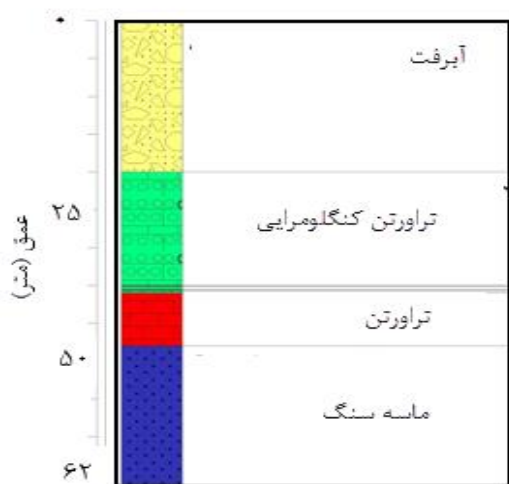
محاسباتی (۰/۴۷) بیش از ۰/۰۵ بدیهی است، ژئوالکتریک تخمین‌گر خوبی برای محاسبه ضخامت تراورتن نبوده است. این بررسی نشان داد تراورتن‌های منطقه واحد یکپارچه‌ای نبوده و جنس آن‌ها از تراورتن کنگلومرای تا تراورتن خالص متغیر است. همچنین بررسی مغزه‌های حفاری از تراورتن‌ها حاکی از خردشدگی شدید دارد.

تخمین ضخامت لایه تراورتن با داده‌های مقاومت‌سنجی و مقایسه آن با مغزه‌های حفاری نشان داد، ضریب همبستگی ضعیف (برابر ۰/۱۱) (شکل ۸ ب) و ضریب تعیین یک درصد در تخمین ضخامت لایه تراورتن موفق نبوده است. از طرفی با توجه به تی استیودنت محاسباتی (۰/۳۳) کمتر از تی استیودنت بحرانی (۱/۸۳) و همچنین سطح احتمال

عمق سنگ کف تراورتن به روش ژئوالکتریک ۶۳ درصد بوده است. همچنین با توجه به تی استیودنت محاسباتی (۳/۹۲) بیش از تی استیودنت بحرانی (۱/۸۳) و سطح احتمال محاسباتی (۰.۰۰) کمتر از ۰/۰۵، بدیهی است ژئوالکتریک تخمین‌گر خوبی جهت تعیین عمق سنگ کف قاعده تراورتن بوده است. تراورتن در تمامی منطقه بر روی سنگ کنگلومرای سخت و واحد شیل و ماسه‌سنگ تیره ائوسن قرار گرفته و مرز واضحی بین تراورتن با سنگ‌های اخیر وجود داشته، لذا اختلاف فاحش مقاومت ویژه منجر به تفکیک لایه‌های تراورتن با لایه‌های زیرین شده است (شکل ۹). تفکیک واحدهای سنگی به روش مقاومت ویژه به دلیل یکنواختی ترکیب گرانیته و اختلاف زیاد مقاومت ویژه آن با سنگ‌های اطراف و گسترش کم شکستگی در توده‌های گرانیته شمال غرب ایران جهت ارزیابی کیفیت گرانیته نیز تأیید شده است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۳).

بنابراین تراورتن با طیف وسیعی از مقاومت ویژه الکتریکی (۱۲۰ تا ۳۵۰۰ اهم‌متر) همراه است. تغییر در مقاومت ویژه ناشی از تغییرات شدید در جنس و شکستگی مانع از تخمین ضخامت به روش ژئوالکتریک است. ندوگسا-مبارگا و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی سنگ‌آهک‌های منطقه مایو بوکی^۱ شمال کامرون مشخص نمودند که واحدهای مختلف سنگی هریک ترکیب یکنواختی داشته و ترکیب هر واحد متفاوت از واحد دیگر بوده لذا از روش مقاومت‌سنجی ژئوالکتریک نه تنها ضخامت لایه آهک بلکه خصوصیات ساختاری (درزه و گسل) را تعیین نمودند. لازم به توضیح است طیف تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در سنگ‌آهک‌ها کم، اما طیف تغییر مقاومت ویژه ظاهری واحد سنگ‌آهک با سایر واحدها زیاد بوده لذا تعیین ضخامت سنگ‌آهک آسان بوده است.

ضریب همبستگی بین عمق سنگ کف به روش ژئوالکتریک با روش حفاری زیاد (برابر ۰/۷۹) (شکل ۸ ج) بوده و تخمین



شکل ۹. لایه حفاری شماره ۹ از معدن تراورتن محلات

است. همچنین تفسیر نتایج سبب شناسایی نواحی خرد شده و درزه‌ها در لایه‌های تراورتن شد که در امر استخراج و کیفیت ماده معدنی تراورتن تأثیرگذار است. از تحلیل مطالعات، اطلاعات با ارزشی از جمله میزان تقریب از ذخیره لایه تراورتن یا گسترش آن، پیشنهاد عمق برای حفر گمانه و اینکه عمق باطله روی تراورتن و همچنین عمق سنگ کف تراورتن به چه میزان بوده در اختیار متخصصان استخراج معدن قرار گرفت و براساس آن نوع بهره‌برداری مشخص شد. برای تبدیل داده‌های مقاومت ویژه ظاهری به

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با برداشت داده‌های ژئوالکتریکی، لایه‌های تراورتن شناسایی گردید. داده‌های حاصل از زمین‌شناسی سطحی به عنوان داده‌های مکمل استفاده شد. تفسیر داده‌های مقاومت ویژه ظاهری در امتداد نیمرخ‌های مختلف و تطبیق آن‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه نشان داد که مقاومت ویژه بالا را لایه‌های کنگلومرای، مقاومت ویژه پایین را آبرفت‌ها و ماسه‌سنگ‌های رسی و مقاومت ویژه متوسط را لایه‌های تراورتن تشکیل داده

¹ Mayo Boki

- Dobrin, M. B., Savit, C. H (1988) Introduction to geophysical prospecting (4th edn), Mc Graw-Hill, New York. 245pp.
- Ezomo, F. O., Ifedili, S. O (2011) Geophysical Study of Limestone Attributes at Abudu Area of Edo State, Nigeria. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2: 795-800.
- Grellier, S., Reddy, K. R., Gangathulasi, J., Adib, R., Peters, C. C (2007) Correlation between electrical resistivity and moisture content municipal solid waste in bioreactor landfill: Geotechnical Special Publication No. 163, ASCE Press, Reston, Virginia.
- Horo, D., Pal, S. K., Singh, S., Srivastava, S (2020) Combined self-potential, electrical resistivity tomography and induced polarisation for mapping of gold prospective zones over a part of Babaikundi-Birgaon Axis, North Singhbhum Mobile Belt, India. *Exploration Geophysics*, 51: 507-522.
- Horo, D., Kumar, S., Pal, S., Singh, S (2021) Mapping of Gold Mineralization in Ichadih, North Singhbhum Mobile Belt, India Using Electrical Resistivity Tomography and Self-Potential Methods. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 38: 397-411.
- Kneisel, C (2006) Assessment of subsurface lithology in mountain environments using 2D resistivity imaging. *Geomorphology*, 80: 32-44.
- Kumar, S., Pal, S. K (2020) Underground coalfire mapping using analysis of self-potential (SP) data collected from Akashkinaree Colliery, Jharia coalfield, India. *Journal of Geology Society India*, 95(4): 333-438.
- Loke M. H (2004) Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, email: mhloke@pc.jaring.my.
- Ndougua-Mbarga, T., Yene-Atangana Joseph, Q., Assatsé, W. T., Meying, A., Pattrick Stéphane, P.A (2014) Geoelectrical Inversion Study of Limestone Attributes at Mayo Boki Area (Northern Cameroon). *International Journal of Geosciences*, 5: 816-825.
- Nwachukwu, M. A., Feng, F (2012) Environmental hazards and sustainable development of rock quarries, lower Benue trough Nigeria. *International Journal of Sustainable Development*, 5(6): 51-68.
- Nwachukwua, M. A., Nwosu, L. I., Uzoije, P. A., Nwoko, C. A (2017) 1D resistivity inversion technique in the mapping of igneous intrusives; A step to sustainable quarry development. *Journal of Sustainable Mining*, 16: 127-138.
- Pierwola, J (2015) Using Geoelectrical Imaging to Recognize Zn-Pb Post-Mining Waste Deposits. *Pollution Journal Environment Studies*, 24(5): 2127-2137.
- Rani, K., Guha, A., Subhendu, M., Pal, S. K, Vinod Kumar, K (2018) ASTER data, ground magnetic data, ground spectroscopy and space based مقادیر مقاومت‌های ویژه واقعی ساختارهای سنگی، از روش برگردان داده‌ها در امتداد نیمرخ‌های مختلف استفاده گردید. بعد از تبدیل این داده‌ها به مقادیر فیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی، تصاویر زیرسطحی به دست آمد که با استفاده از محدوده مقادیر مقاومت‌های ویژه ظاهری، نواحی تراورتن با کیفیت‌های مختلف تشخیص داده شد.
- تشکر و قدردانی**
- از داوران محترم این نشریه که در جهت ارتقای کیفیت این مقاله، پیشنهادات ارزنده‌ای ارائه نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.
- منابع**
- مرادی، ع.، ا. میرزایی، م.، ریاحی، م.، ع. عباسی، م.، نظری‌نسب، م (۱۳۹۳) کاوش توده‌های نفوذی گرانیتی با استفاده از روش معکوس‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری، کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۳ تا ۲۵ اردیبهشت، ص ۴۴-۴۸.
- Alile, O. M., Enoma, N., Ojo K. O., Osuji, O. U (2016) 2 – Dimensional electrical resistivity surveying for mineral deposit in Eguare, igueben lga, south – south, Nigeria. *Journal of Scientific Research in Allied Sciences*, 2(3): 67-81.
- Amadi, A. N., Olasehinde, P. I., Okunlola, I. A., Okoye, N. O., Waziri, S (2010) A multidisciplinary approach to subsurface characterization in Northwest of Minna, Niger State, Nigeria. *Bayero. Journal Physics Mathematical Sciences*, 3(1): 74-83.
- Anomohanran, O (2013) Investigation of Groundwater Potential in Some Selected Towns in Delta North District of Nigeria. *International Journal of Applied Science and Technology*, 3(6): 61-66.
- Ayolabi, E. A., Adeoti, L., Oshinlaja, N. A., Adeosun, I. O., Idowu, O. I (2009) Seismic refraction and resistivity Studies of part of Igbogbo Township, south-west Nigeria. *Journal Science Research and Development*, 11:42-61.
- Basokur, A. T (1984) A Numerical Direct Interpretation of Resistivity Sounding Using the Pekeris Model. *Geophysical Prospecting*, 32(6): 1131-1146.
- Da Co, F., Papadopoulou, M., Koivisto, E., Sito, T., Savolainen, M., Valentina Socco, L (2020) Application of surface-wave tomography to mineral exploration: a case study from Siilinjärvi, Finland. *Geophysical Prospecting*, 68: 254-269.

- EIGEN 6C4 data for identifying potential zones gold sulphide mineralization in Bhukia, Rajasthan, India. *Journal Applied Geophysics*, 160: 28-46.
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., Rai, J (2009) Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 67: 74-79.
- Szalai, S., Szarka, L (2008) On the classification of surface geoelectric arrays. *geophysics Prospect*, 56: 159-175.
- Tahmasbinejad, H (2009) Geoelectric investigation of the aquifer characteristics and groundwater potential in Behbahan Azad University Farm, Khuzestan Province, Iran. *Journal of Applied Sciences*, 9(20): 3691-3698.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sherif, R. E (1990) *Applied Geophysics*. 4th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 860. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139167932>.

Exploration of buried travertine layers by combining geoelectric and geological data in Mahallat area

F. Ghadimi

Assoc. Prof., Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* ghadimi@Arakut.ac.ir

Received: 2021/4/3 Accepted: 2021/8/14

Abstract

Geoelectric studies by electrical resistivity method and by determining and evaluating the characteristics of subsurface travertine layer such as tailings depth, thickness of travertine layer and depth of its floor rock are the objectives of this article. In addition to reviewing the geological data, the resistivity of the electrical conduction sections in one and two dimensions were also analyzed with RES2DINV software after conversion from apparent resistance to real resistance. This study showed that travertine layers with an average thickness of 15 meters are located at depths of 5 to 80 meters and its specific resistivity varies from 120 to 3500 ohm meters due to breakage and crushing. Combining geoelectric data with surface geology by drilling 9 boreholes and drawing maps of both thickness and depth of travertine showed that the tailings (soil and alluvium) buried on travertine had a depth of 2 to 80 meters and travertine is variable. Base rock of travertine is made of red conglomerate and dark shale and sandstone. By interpreting the apparent resistivity data along different profiles and matching them with the geological information of the region, it was shown that the high resistivity is the conglomerate layers, the low resistivity is the alluvium and clay sandstones and the medium resistivity is travertine layers. Examination of the accuracy of resistance data with drilling logs showed that the accuracy in separating the tail depth, thickness and depth of the travertine layer was 27%, 1% and 63%, respectively. Electrical resistance data by predicting the depth of travertine base rock has been a good guide to determine the position and depth of drilling in travertine buried in the area.

Keywords: Specific resistivity, Geological data, Travertine layer, Drilling operations, Mahallat