



بررسی آبخوان محدوده مزرعه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان به روش مقاومت ویژه ژئوالکتریکی

هادی طهماسبی نژاد

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان، hdtahmasbi@yahoo.com

چکیده

روش مقاومت ویژه ژئوالکتریکی از نوع سونداژ الکتریکی قائم با آرایه‌ی شلومبرژه کاربردی ترین روش در مطالعات آب زیرزمینی می باشد. به منظور بررسی آبخوان محدوده مزرعه‌ی پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واقع در ۵ کیلومتری شرق شهر بهبهان، ۱۲ سونداژ قائم ژئوالکتریکی در طول چهار پروفیل برداشت گردید. پردازش داده‌های صحرایی با در نظر گرفتن لاگ چاه‌های منطقه و اطلاعات زمین شناسی توسط نرم افزار روسی IPI7.63 صورت گرفت و به کمک آن عمق و ضخامت لایه‌های زیرسطحی، نقشه‌های هم مقاومت ویژه‌ی ظاهری، مقاطع ژئوالکتریک، نقشه‌های هم عمق و هم مقاومت لایه‌ی آبدار و سنگ کف و نقشه‌ی هم مقترسیم شد. بر اساس مدل ژئوالکتریکی در این منطقه چهار لایه‌ی اصلی شامل آبرفت خشک با مقاومت الکتریکی متوسط حدود ۳۵۰ اهم متر و ضخامت متوسط ۱۸/۸ متر، لایه‌ی آبدار با مقاومت الکتریکی متوسط حدود ۳/۳ اهم متر و ضخامت متوسط حدود ۸/۶ متر و لایه‌ی سنگ کف با مقاومت الکتریکی متوسط حدود ۴۲ اهم متر (در اکثر نقاط بین ۶/۸ تا ۳۷ اهم متر) و عمق متوسط حدود ۲۷ متر و یک لایه‌ی کم مقاومت در زیر سنگ کف با مقاومت الکتریکی متوسط حدود ۲/۱ اهم متر و عمق متوسط ۶۳ متر به دست آمد. از نقشه‌ی هم مقاومت عرضی لایه آبدار که با قابلیت انتقال آبخوان متناسب است برای تعیین مناطق با پتانسیل آبدهی بالا در آبخوان و تعیین بهترین محل‌ها برای حفر چاه استفاده گردیده است. **واژه‌های کلیدی:** آرایه‌ی شلومبرژه، اکتشاف آب زیرزمینی، سونداژ الکتریکی قائم، مطالعات ژئوالکتریک.

Evaluation of the aquifer of research farm of Islamic Azad University of Behbahan using geoelectric resistivity method

H. Tahmasbi Nejad

Department of Geology, Islamic Azad University, Behbahan Branch, Behbahan, I.R. Iran

Abstract

Geoelectric resistivity method as the vertical electrical soundings using Schlumberger configuration is the most applied method in hydrogeology survey. In this research, 12 vertical electrical soundings along 4 profiles were carried out in order to evaluate the aquifer of the research farm of Islamic Azad University of Behbahan located at around 5 kilometers from the east of Behbahan city. The interpretation of the field data was carried out using the Russian software IPI7.63 with consideration of well logs and geology data of the area; so the depth and thickness of the subsurface layers of the area were determined. Also, the isoapparent resistivity maps, geoelectric sections, maps of the isodepth and iso-resistivity of aquifer and bedrock as well as the isotransverse resistance map have been drawn. Based on geoelectric model, in this area, 4 main layers are obtained involving dry alluvium with the average resistivity about 350 ohm-m and the average thickness of 18.8m, aquifer with the average resistivity about 3.3 ohm-m and the average thickness of 8.6 m, bedrock layer with the average resistivity about 42 ohm-m (between 6.8 to 37 ohm-m in most parts of area) and the average depth of 27 m and a low resistivity below the bedrock with the average resistivity about 2.1 ohm-m and the average depth of 63m. The transverse resistance map of aquifer that correlate to transmissivity is used to determine zones with high yield potential of the aquifer and the best location for well drilling in the area.

Key words: Geoelectrical surveys, Ground water exploration, Schlumberger array, Vertical electrical sounding.

۱- مقدمه

سونداژ الکتریکی قائم (VES, Vertical Electric Sounding) یکی از روش‌های مرسوم ژئوالکتریکی بوده که در آن تغییرات عمودی مقاومت الکتریکی سنجیده می‌شود (Heilan 1940). در این روش، جریان الکتریسیته وارد زمین گردیده و میدان پتانسیل حاصل اندازه‌گیری می‌شود و به این ترتیب مقاومت الکتریکی ظاهری لایه‌ها محاسبه می‌گردد. از ترسیم مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری در برابر طول‌های مختلف خط جریان، منحنی‌های سونداژ ژئوالکتریک، به دست می‌آید. با تفسیر این منحنی‌ها، می‌توان لایه‌های مختلف را تفکیک کرد و مقدار عمق هر لایه و مقاومت ویژه‌ی حقیقی آن را مشخص نمود.

روش سونداژ الکتریکی قائم در مطالعه‌ی هیدروژئولوژی حوضه‌های رسوبی مناسب‌تر است (Kelly & Stanislav 1993). وجود آب در بین لایه‌های زمین‌شناسی سبب کاهش شدید مقاومت الکتریکی می‌گردد، بنابراین تفاوت فاحشی بین مقاومت ویژه‌ی لایه‌ی آبدار و لایه‌ی خشک وجود دارد و این عامل باعث گردیده از روش مقاومت ویژه برای تشخیص لایه‌های آبدار به خوبی استفاده گردد.

همچنین از میان آرایش‌های مختلفی که برای روش سونداژ الکتریکی قائم استفاده می‌شوند، آرایش شلومبرژه در اکتشاف و ارزیابی آب‌های زیرزمینی مناسب‌تر است (Zohdy et al. 1974). این آرایش به عنوان عمومی‌ترین آرایش در مطالعات ژئوالکتریکی دشت محسوب می‌شود (Ayers. 1990). در آرایه‌ی شلومبرژه فاصله‌ی بین الکترودهای جریان افزایش می‌یابد، در حالی که فاصله‌ی الکترودهای پتانسیل تغییر چندانی نمی‌کند. هر چه فاصله‌ی الکترودهای جریان افزایش یابد، عمق نفوذ جریان نیز افزایش می‌یابد و لایه‌های عمیق‌تری بر مقدار مقاومت ویژه‌ی ظاهری اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارد (Apparao & Rao 1974). البته به‌طور کلی در این روش عمق بررسی کم است و فقط لایه‌های کم عمق مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (Danielsen et al. 2007).

روش سونداژ الکتریکی قائم کاربردهای زیادی در مطالعات آب زیرزمینی دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از: تعیین عمق، ضخامت و محدوده‌ی آبخوان (Bello & Makinde 2007, Omosuyi et al. 2007)، تعیین مناطق با پتانسیل آبدهی بالا در آبخوان (2006, Oseji et al. 2005)، تعیین سطح برخورد آب شور و شیرین (1992, Khalil 2006)، آلودگی آب زیرزمینی (1976, Park et al. 2007)، اکتشافات ژئوترمال (2006, El-Qady)، بررسی ساختارهای تکتونیکی (2001, Caglara & Duvarci)، بررسی سیستم شکستگی در مناطق کارستیک (2005, Szalali et al.)، تخلخل لایه‌ی آبدار (1978, Jackson et al.)، مقدار آب لایه‌ی آبدار (1985, Kessels et al.)، هدایت هیدرولیکی لایه‌ی آبدار (1995, Yadav 2007, Asfahan).

قابلیت انتقال لایه‌ی آبدار (Kosinski & Kelly 1981) و آبدهی ویژه‌ی لایه‌ی آبدار (Frohlich & Kelly 1988).

با توجه به توضیحات بالا، به منظور بررسی آبخوان مزرعه‌ی پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی بهبهان و تعیین مناطق با پتانسیل آبدهی بالا، ۱۲ سونداژ الکتریکی قائم با آرایه‌ی شلومبرژه در طول ۴ پروفیل در این منطقه برداشت گردیده است. در جدول ۱ نام سونداژ، پروفیل آن‌ها و موقعیت جغرافیایی هر سونداژ ارائه شده است. این سونداژها با حداکثر طول خط جریان ۱۰۰۰ متر ($AB/2 < 500m$) توسط دستگاه ژئوالکتریک Terrameter SAS1000 برداشت گردیده‌اند.

جدول ۱- مشخصات سونداژها و پروفیل‌ها

| نام پروفیل | نام سونداژ | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی |
|------------|------------|---------------|---------------|
| ۱ | A | ۳۳۶۸۸۱ | ۳۳۸۵۹۵۰ |
| | B | ۳۳۶۹۲۳ | ۳۳۸۵۸۵۵ |
| | C | ۳۳۷۱۳۱ | ۳۳۸۵۲۸۶ |
| ۲ | D | ۳۳۶۴۳۲ | ۳۳۸۵۶۲۹ |
| | E | ۳۳۶۷۲۲ | ۳۳۸۵۴۷۲ |
| | F | ۳۳۶۹۵۳ | ۳۳۸۵۲۸۷ |
| | G | ۳۳۷۲۳۲ | ۳۳۸۵۱۴۵ |
| ۳ | H | ۳۳۶۰۵۷ | ۳۳۸۵۴۸۷ |
| | I | ۳۳۶۳۶۰ | ۳۳۸۵۴۱۱ |
| | J | ۳۳۶۵۶۴ | ۳۳۸۵۲۰۰ |
| ۴ | K | ۳۳۶۱۰۰ | ۳۳۸۵۲۸۰ |
| | L | ۳۳۶۶۰۹ | ۳۳۸۵۱۶۱ |

منطقه‌ی مورد مطالعه (مزرعه‌ی پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی بهبهان) در فاصله‌ی حدود ۵ کیلومتری شرق بهبهان در استان خوزستان قرار دارد. راه دسترسی به آن جاده‌ی بهبهان به شیراز و سپس جاده‌ی فرعی منتهی به کوه‌های خاییز می‌باشد. این منطقه از نظر آب و هوایی، نیمه بیابانی و نیمه خشک و از نظر زمین‌شناسی، بخشی از زون چین‌خورده‌ی زاگرس با روند شمال غرب - جنوب شرق است. واحدهای سنگی - چینه‌ای منطقه از قدیم به جدید عبارتند از: سازندهای شیل گورپی، شیل پابده، آهک آسماری، مارن میشان، گچ گچساران، آواری آغاچاری و کنگلومرای بختیاری. سازند گورپی و پابده به دلیل لیتولوژی شیلی که مقاومت اندکی در برابر فرسایش دارد، نقاط فرورفته‌ای مابین سازندهای مقاوم‌تر یعنی سازندهای آهکی آسماری را تشکیل می‌دهند. سازند آسماری با حفره‌های کارستی و درزه‌های فراوان مرتفع‌ترین نقاط منطقه را تشکیل می‌دهد. تپه‌های مهورهای سازند تبخیری گچساران که روی آسماری قرار گرفته به دلیل مقاومت کم در برابر عوامل فرسایش کم ارتفاع‌ترین نقاط منطقه را تشکیل می‌دهند. آب‌های جاری به دلیل گچ و نمک شسته شده از این سازند تلخ و شور شده‌اند.

۳ حلقه‌ی چاه بهره‌برداری در منطقه قرار دارد و با توجه به وسعت آن (حدود ۵۰ هکتار) نیاز به حفر چاه‌های جدید خصوصاً در بخش جنوب شرقی آن

علامت و عمق آب در هر چاه در پایین علامت دیده می‌شود.

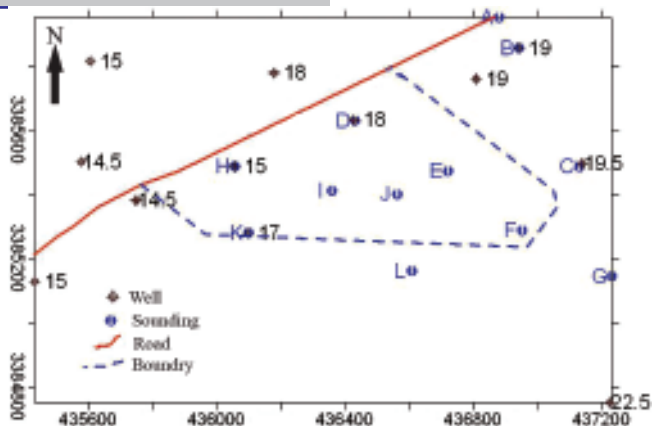
۷- منحنی‌های هم‌مقاومت ویژه‌ی ظاهری

این منحنی‌ها توزیع مقاومت ویژه‌ی ظاهری را در سطح دشت در مقابل فاصله‌ی الکترودهای جریان نشان می‌دهند. هر کدام از این منحنی‌ها نمایانگر عمق خاصی از دشت بوده که با توجه به عمق نفوذ جریان در آبخوان مورد مطالعه، تقریباً برابر $AB/4$ در نظر گرفته شده است. تصویر ۲ منحنی هم‌مقاومت ویژه‌ی ظاهری $AB=80m$ که بیان‌کننده‌ی عمق حدود ۲۰ متر بوده و تقریباً نمایانگر لایه‌ی آبدار در کل آبخوان است را نشان می‌دهد.

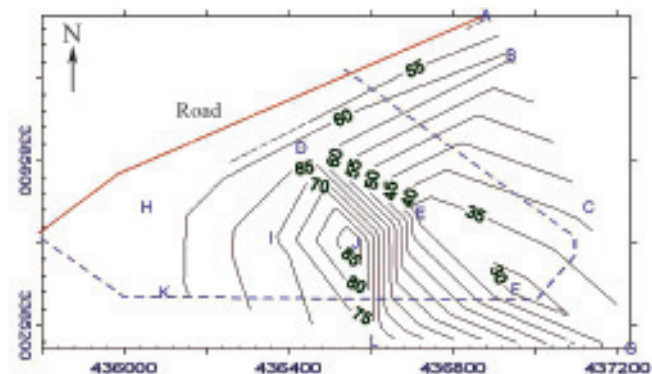
به‌طور کلی مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری در منحنی‌های هم‌مقاومت ویژه‌ی ظاهری با طول خط جریان کمتر، که بیانگر لایه‌ی سطحی آبرفت خشک می‌باشد، بیشتر از مقادیر منحنی $AB=80m$ که نمایانگر لایه‌ی آبدار است، می‌باشد، زیرا مقاومت الکتریکی کلی یک سازند هم به خواص رسوب و هم به خواص آب بین منفذی وابسته است. در حقیقت هدایت جریان الکتریکی هم از طریق سطح مؤثر دانه‌ها و رسوبات انجام می‌پذیرد (هدایت سطحی) و هم از طریق یون‌های موجود در آب (هدایت الکترولیتی) (Kosinski & Kelly 1981). بنابراین در منحنی‌های هم‌مقاومت ظاهری با طول خط جریان کمتر، که بیشتر جریان از آبرفت خشک عبور می‌کند، جریان الکتریکی عمدتاً به وسیله‌ی هدایت از سطح دانه‌ها کنترل می‌شود و دارای مقاومت الکتریکی بالایی است، اما در منحنی هم‌مقاومت ظاهری $AB=80m$ که جریان الکتریکی در لایه‌ی آبدار نفوذ می‌کند، آب نقش اساسی در هدایت جریان الکتریکی پیدا کرده و باعث کاهش مقاومت ویژه‌ی ظاهری می‌شود (Huntley 1980).

همچنین در این منحنی از جنوب شرق به سمت شمال و شرق منطقه خصوصاً در مرکز آبخوان (منطبق بر سونداژ J) مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل درشت دانه-تر شدن رسوبات در این ناحیه باشد.

به‌طور کلی رسوبات دانه درشت مقاومت الکتریکی بیشتر و رسوبات

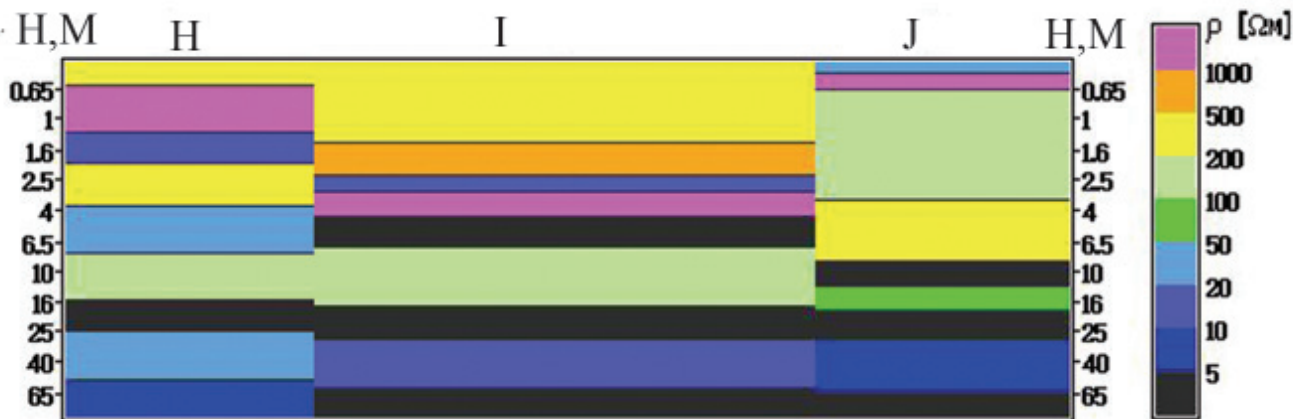


تصویر ۱- موقعیت چاه‌ها و سونداژها در منطقه

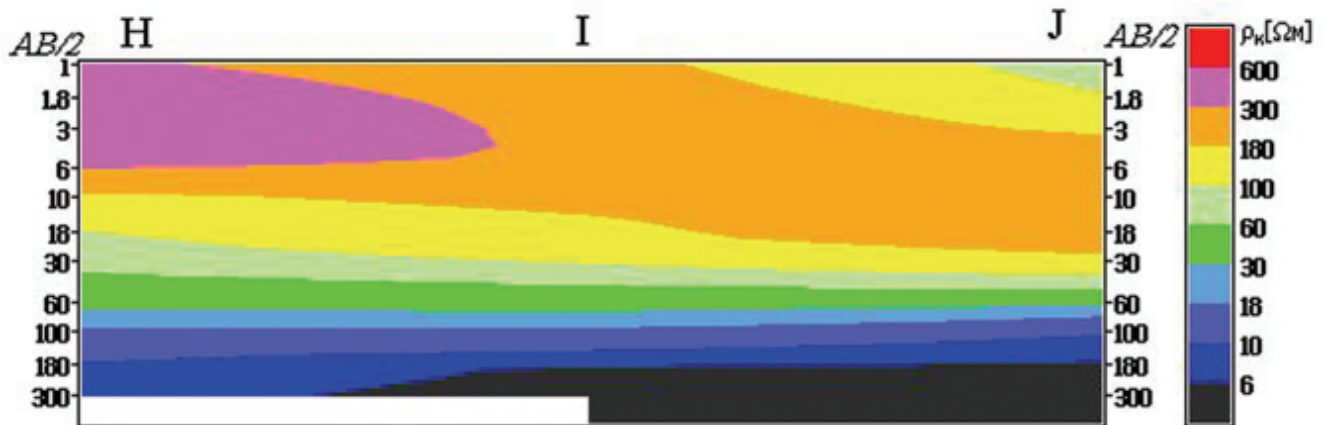


تصویر ۲- منحنی هم‌مقاومت ویژه‌ی ظاهری $AB=80m$

می‌باشد. یکی از اهداف اصلی این مطالعات نیز تعیین بهترین محل حفر چاه‌های جدید در این منطقه است. به‌منظور کمک به تفسیر منحنی‌های سونداژ الکتریکی آبخوان لازم است کلیه‌ی اطلاعات زمین‌شناسی و آب‌های زیرزمینی منطقه جمع‌آوری گردد (Yang & Lee 1998). به همین دلیل موقعیت جغرافیایی چاه‌ها، عمق آب چاه، میزان تقریبی هدایت الکتریکی آب و آبدهی چاه، عمق حفاری و عمق سنگ کف، نوع خاک لایه‌ی آبدار و لایه‌ی خشک و سایر اطلاعات تا حد امکان جمع‌آوری گردید. در تصویر ۱ موقعیت ۱۱ چاه موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه به همراه عمق آب و موقعیت ۱۲ سونداژ نمایش داده شده است. نام سونداژ در سمت چپ



تصویر ۳- شبه مقطع ژئوالکتریک پروفیل سه



تصویر ۴- مقطع ژئوالکتریک پروفیل سه

نشان می‌دهد که عبارتند از:

۱- لایه‌ی سطحی و آبرفت خشک با مقاومت الکتریکی متغیر: مقاومت الکتریکی این لایه به شدت تحت تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها، آرایش دانه‌ها، جورشدگی دانه‌ها، نوع سیمانی شدن و حتی دمای خاک قرار دارد.

۲- لایه‌ی آبدار با مقاومت الکتریکی بین حدود ۰/۶ تا ۶ اهم متر: مقاومت الکتریکی در لایه‌ی آبدار تابعی است از تخلخل، مقاومت الکتریکی مایع، مقاومت خاک یا سنگ، هدایت سطحی سنگ یا خاک و طول مسیر جریان و مقدار آب (Kalinski et al. 1993). طول مسیر جریان خود به‌طور مستقیم از شکل و قطر دانه‌ها، جورشدگی دانه‌ها، نوع آرایش و درجه‌ی سیمانی شدن بافت رسوب تبعیت می‌کند (Kwader 1985). مقاومت آب نیز به شوری و درجه حرارت وابسته است. هر چه دمای آب بالاتر و شوری آن بیشتر باشد، مقاومت الکتریکی آن کمتر می‌شود (Yadav & Abolfazli 1998).

در رسوبات فاقد رس که با سیالات بسیار هادی، اشباع شده‌اند هدایت سطحی دانه مهم نبوده و فرض بر این است که الکتریسته از میان فضای خالی و از طریق سیال هدایت می‌شود ولی در سازندهای شیلی یا رسی و اشباع از آب شیرین هدایت الکتریکی بیشتر از طریق هدایت سطحی دانه صورت می‌گیرد (Frohlich & Parke 1989). در آبخوان مورد مطالعه با توجه به دانه‌ریز بودن رسوبات تشکیل دهنده‌ی آبخوان هدایت الکتریکی عمدتاً از طریق هدایت سطحی رسوبات آبخوان صورت می‌گیرد و علت اصلی کم بودن مقاومت الکتریکی در این لایه ریزدانه بودن رسوبات آن است.

۳- لایه‌ی سنگ کف مارنی با مقاومت الکتریکی حدود ۶/۸ تا ۳۷ اهم متر در بیشتر نقاط دشت: جنس سنگ کف با توجه به جنس رخنمون‌ها، لاگ چاه‌های منطقه و نیز مقاومت الکتریکی حاصل از تفسیر سونداژها بیان گردیده است. اختلاف در مقاومت الکتریکی سنگ کف مارنی منطقه به میزان هوازگی و شکستگی و نفوذ آب در آن برمی‌گردد.

۴- لایه‌ی کم‌مقاومت زیرین با مقاومت الکتریکی کمتر از دو اهم متر در بیشتر نقاط دشت: با توجه به این‌که هیچ گمانه‌ای تا عمق برخورد به این لایه حفر

دانه‌ریز مقاومت الکتریکی کمتری دارند. کم بودن مقاومت الکتریکی در رسوبات دانه‌ریز به سه دلیل است: تمایل به ترکیب با آب، جذب کاتیون‌ها بر روی سطح خود و یونیزه شدن و آزاد کردن یون‌های آزاد (Mooney & Harold 1980).

۳- شبه مقاطع ژئوالکتریک (Geoelectrical Pseudosections)

شبه مقاطع ژئوالکتریک پروفیل‌ها توزیع مقاومت الکتریکی ظاهری را در طول پروفیل بر اساس عمق و طول الکترودهای جریان نشان می‌دهند. تصویر ۳ شبه مقطع ژئوالکتریک پروفیل شماره‌ی سه (شامل سونداژهای J, I, H) را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

از مقایسه شبه مقاطع نتایج ذیل به‌دست آمده‌است:

۱- در دید اول کاهش آشکار توزیع مقاومت ظاهری به سمت اعماق بیشتر در تمام شبه مقاطع قابل مشاهده است که این امر می‌تواند تحت تأثیر عوامل ذیل باشد:

الف) کاهش اندازه‌ی دانه‌ی رسوبات در مورد هدایت جریان الکتریکی از طریق هدایت سطحی

ب) وجود لایه‌ی آبدار با مقاومت الکتریکی پایین به دلیل هدایت جریان الکتریکی از طریق هدایت الکترولیتی

ج) وجود یک لایه با مقاومت الکتریکی بسیار پایین در زیر سنگ کف نسبتاً مقاوم آبخوان

۲- تقریباً در تمام شبه مقاطع ژئوالکتریک، سونداژهای شمالی پروفیل‌ها دارای مقاومت الکتریکی ظاهری بیشتری در خطوط جریان با طول کمتر (که بیشتر تحت تأثیر خاک سطحی قرار دارد) هستند که به دلیل درشت دانه بودن رسوبات سطحی در این نقاط می‌باشد.

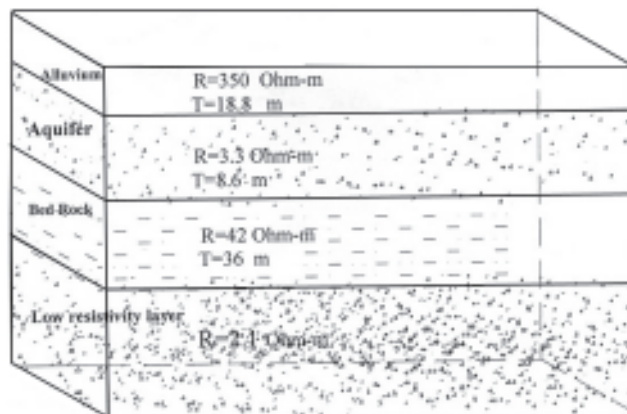
۴- تفسیر منحنی‌های سونداژ و ترسیم مقاطع ژئوالکتریک آبخوان

تفسیر منحنی‌های سونداژ، چهار لایه‌ی اصلی را در آبخوان مورد مطالعه

دانه ریز تا عمق ۱۸/۵ متری، می‌باشد. لایه‌ی آبدار دانه ریز به ضخامت حدود ۹ متر و مقاومت الکتریکی کمتر از یک اهم متر تا عمق حدود ۲۸ متری قرار دارد. مقاومت الکتریکی لایه‌ی سنگ کف مارنی با ضخامت حدود ۳۵ متر به حدود ۷ اهم متر می‌رسد. لایه‌ی کم مقاومت زیر آن در عمق حدود ۶۳ متری قرار دارد.

از تفسیر منحنی‌های سونداژ، مقادیر عمق، ضخامت و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آبخوان مورد مطالعه به دست آمد. در تصویر ۷ عمق آب در سمت چپ، ضخامت لایه‌ی آبدار در سمت راست و مقاومت الکتریکی لایه‌ی آبدار در بالای هر سونداژ نمایش داده شده است.

عمق تا سطح آب در این آبخوان بین حدود ۱۶ تا ۲۳ متر و به طور متوسط حدود ۱۸/۸ متر است. پایین ترین عمق تا سطح آب در شمال غرب منطقه و بالاترین عمق در شمال شرق منطقه اندازه گیری شد. ضخامت لایه‌ی آبدار بین حدود ۷ تا ۱۰/۵ متر تغییر می‌کند و به سمت سونداژ I تقریباً در مرکز

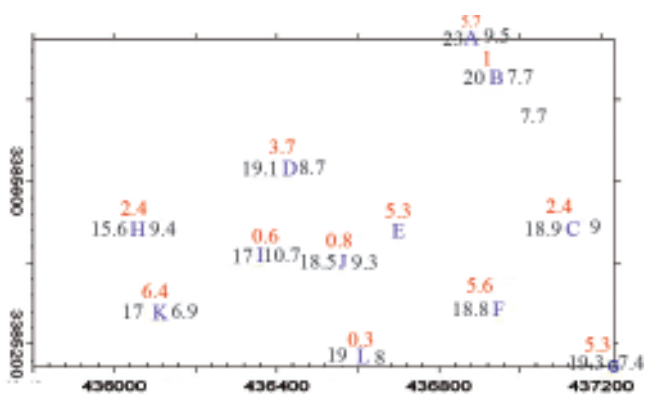


تصویر ۵- مدل ژئوالکتریکی آبخوان مورد مطالعه

نگردیده، جنس این لایه به طور یقین مشخص نمی‌باشد. میزان مقاومت الکتریکی این لایه و شواهد زمین شناسی منطقه حاکی از این است که این لایه احتمالاً ناشی از فرسایش رسوبات گچساران به همراه مقداری نمک، یا یک لایه‌ی آبدار محبوس دانه ریز با کیفیت آب نسبتاً پایین می‌باشد که به دلیل دانه ریز بودن، آبدهی آن پایین بوده و حفر چاه در آن مقرون به صرفه نمی‌باشد.

مقطع ژئوالکتریک پروفیل سه که پس از تفسیر منحنی‌های سونداژ H و I و J و تعیین عمق و مقاومت الکتریکی حقیقی هر لایه ترسیم گردیده، در تصویر ۴ نمایش داده شده است. در تصویر ۵ متوسط مقاومت الکتریکی و متوسط ضخامت هر یک از لایه‌ها در مدل ژئوالکتریکی آبخوان ارائه شده است. در جدول ۲ مقادیر مقاومت حقیقی، ضخامت و عمق لایه‌های ژئوالکتریک حاصل از تفسیر منحنی سونداژ I مشاهده می‌گردد. در تصویر ۶ منحنی تفسیر شده‌ی سونداژ I توسط نرم افزار IPI7.63 دیده می‌شود.

در این نقطه، لایه‌ی سطحی شامل یک لایه‌ی دانه درشت و یک لایه‌ی

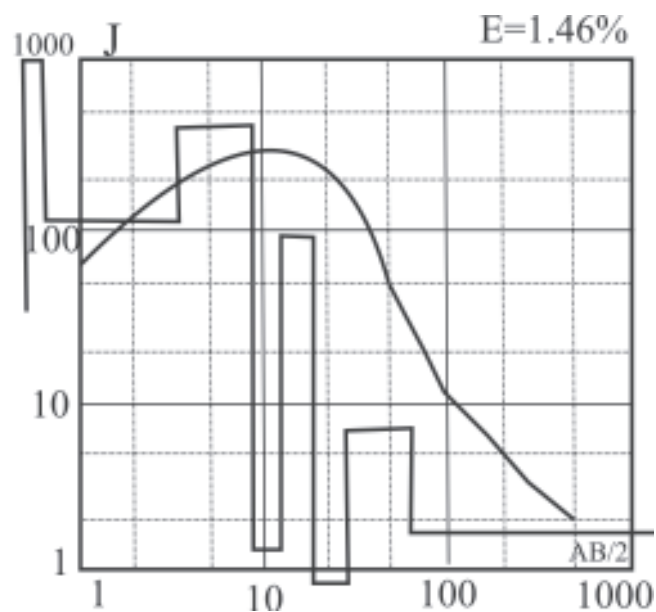


تصویر ۷- مقادیر عمق، ضخامت و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی لایه‌ی آبدار در محل هر سونداژ

آبخوان افزایش می‌یابد (تصویر ۸).

مقاومت ویژه‌ی الکتریکی لایه‌ی آبدار توسط تخلخل، مقدار و کیفیت آب و بافت رسوب کنترل می‌شود. این مقادیر در مرکز آبخوان کاهش می‌یابند که به علت کاهش کیفیت آب زیرزمینی یا کاهش اندازه‌ی دانه‌های تشکیل دهنده‌ی لایه آبدار می‌باشد. در تصویر ۹ اعداد سمت راست نقاط سونداژ، نمایشگر عمق سنگ کف و اعداد سمت چپ بیانگر مقاومت الکتریکی سنگ کف آبخوان می‌باشد.

عمق سنگ کف در این منطقه بین ۲۳/۸ تا ۳۳ متر و مقاومت الکتریکی آن بین ۶/۸ تا ۳۷ اهم متر متغیر است و در دو نقطه D و E مقاومت الکتریکی (به علت تغییر جنس سنگ کف به آهک مارنی) به ۱۲۰ و ۱۳۱ اهم متر می‌رسد. جنس سنگ کف با توجه به مقادیر مقاومت الکتریکی لایه‌ها، لاگ چاه‌های منطقه و بیرون زدگی سنگ‌ها، از نوع سنگ مارن (به جز نقاط D و E که از جنس آهک مارنی می‌باشند) تشخیص داده شد که در نقاط مختلف تراکم آن متفاوت است. این سنگ کف مارنی به صورت یک لنز با گسترش محدود، کل منطقه را پوشانده است. اما در عرض‌های جغرافیایی بالاتر منطقه، این لنز مارنی دیده



تصویر ۶- منحنی تفسیر شده‌ی سونداژ J

گردایان واحد از سطح مقطع با عرض واحد و طول معادل ضخامت آبخوان عبور کرده و به صورت ذیل نمایش داده می‌شود:

$$T = K \cdot b \quad (1)$$

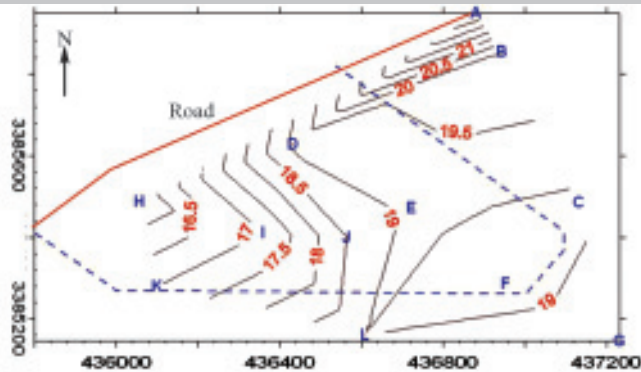
K هدایت هیدرولیکی به m/s و b ضخامت آبخوان می‌باشد (Todd 1980). از طرف دیگر طبق تعریفی که (Maillet 1947) از مقاومت عرضی به عنوان یک پارامتر دار زاروک داشت مقدار مقاومت عرضی برابر رابطه‌ی ذیل است:

$$\dot{A} \cdot b \cdot R_T \quad (2)$$

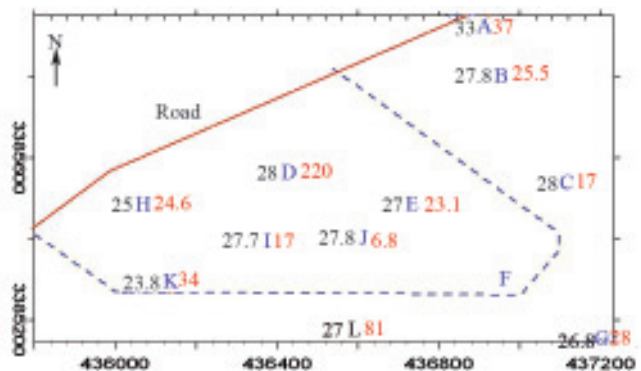
که در آن R مقاومت عرضی برحسب m مقاومت الکتریکی لایه برحسب $b \cdot m$ ضخامت آبخوان برحسب m می‌باشد. همان‌طور که مشخص است رابطه‌ی بین K (هدایت هیدرولیکی) و b (ضخامت آبخوان) در تعیین T (قابلیت انتقال) مانند رابطه‌ی بین \dot{A} (مقاومت الکتریکی لایه آبدار) و b (ضخامت آبخوان) در تعیین R_T (مقاومت عرضی) خطی است (Niwas & Singhal 1981). با تلفیق این دو معادله می‌توان نوشت:

$$T = (K/\dot{A})R \quad (3)$$

هدایت هیدرولیکی به دانه‌بندی رسوبات وابسته است، اما مقاومت الکتریکی علاوه بر دانه‌بندی به جنس دانه‌ها و خصوصیات آب (غلظت، مقدار، دما و...) نیز بستگی دارد. چون در یک دشت، رسوبات از تخریب ارتفاعات اطراف حاصل می‌شوند، جنس دانه‌ها در کل دشت یکنواخت فرض می‌شود. اگر هدایت الکتریکی آب نیز در دشت یکنواخت بوده یعنی تفاوت ناچیزی



تصویر ۸- نقشه‌ی هم‌ضخامت لایه‌ی آبدار



تصویر ۹- مقادیر عمق و مقاومت حقیقی سنگ کف در محل هر سونداژ

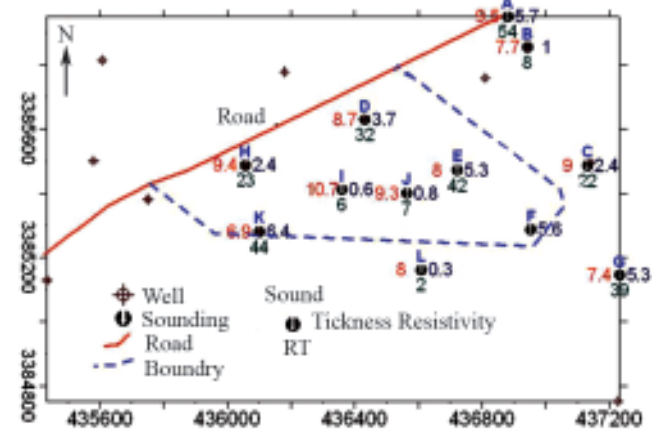
نمی‌شود و عمق سنگ کف و به طبع آن آبدهی چاه‌ها زیادتر می‌شود. با توجه به محدود بودن گسترش لنز مارنی، به احتمال زیاد لایه‌ی آبرفتی در زیر، ادامه دارد. وجود یک لایه‌ی کم‌مقاومت در زیر لایه‌ی سنگ کف مارنی، بیانگر وجود این لایه است، اما این لایه حتی اگر یک لایه‌ی آبرفتی (ناشی از فرسایش سازند گچساران حاوی مقداری نمک) و یا یک آبخوان تحت فشار باشد، به صورت دانه‌ریز با آبدهی پایین و یا کیفیت کم آب و مقاومت الکتریکی کم، می‌باشد و حفر سنگ کف برای رسیدن به این آبخوان مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۵- نقشه‌ی هم‌مقاومت عرضی و تعیین مناطق با پتانسیل آبدهی بالا در آبخوان مورد مطالعه

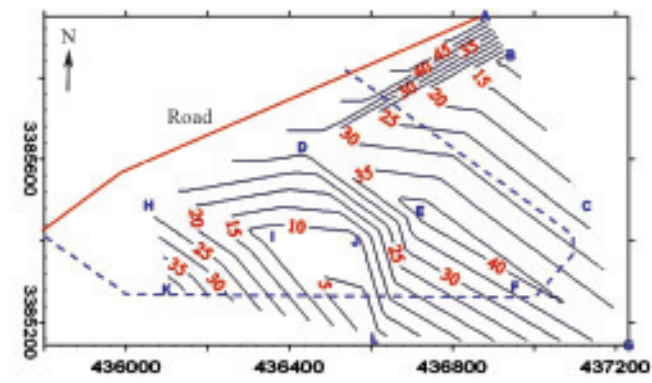
ضریب قابلیت انتقال آبخوان به‌طور گسترده‌ای در هیدرولیک آب‌های زیرزمینی به‌کار گرفته می‌شود و برابر مقدار جریان از آب است که تحت

جدول ۲- مقادیر مقاومت حقیقی، ضخامت و عمق لایه‌های ژئوالکتریک حاصل از تفسیر منحنی سونداژ I

| شماره‌ی لایه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|--------------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| مقاومت حقیقی | ۳۳/۲ | ۱۲۲/۶ | ۱۱۶ | ۲۱۱ | ۱/۳۲ | ۹۹/۲ | ۰/۸۵ | ۶/۸ | ۱/۶۲ |
| ضخامت | ۰/۵ | ۱/۲ | ۲/۷۲ | ۵/۱۳ | ۲/۸۹ | ۶/۰۵ | ۹/۳۲ | ۲۲/۸ | ۲۲/۸ |
| عمق | ۰/۵ | ۰/۶۲ | ۲/۲۹ | ۸/۵۲ | ۱۲/۴ | ۱/۸/۵ | ۲۷/۸ | ۶۲/۶ | ۶۲/۶ |



تصویر ۱۰- مقادیر ضخامت، مقاومت الکتریکی و مقاومت عرضی لایه‌ی آبدار



تصویر ۱۱- نقشه‌ی هم‌مقاومت عرضی لایه‌ی آبدار (RT) آبخوان مورد مطالعه

الکتریکی ظاهری نسبت به عمق می‌باشد. دلیل این امر وجود لایه‌ی آبدار با مقاومت الکتریکی پایین و نیز یک لایه‌ی کم مقاومت در زیر سنگ کف مارنی آبخوان است. تقریباً در تمام شبه مقاطع ژئوالکتریک، مقاومت الکتریکی ظاهری در خطوط جریان کمتر (که بیشتر تحت تأثیر خاک سطحی قرار دارد)، در سونداژهای سمت راست پروفیل بیشتر از سایر سونداژها است که به دلیل درشت دانه بودن رسوبات سطحی در این سونداژها است.

۳- تفسیر منحنی‌های سونداژ و مدل ژئوالکتریک منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد چهار لایه‌ی اصلی در این منطقه وجود دارد که عبارتند از:

(الف) لایه‌ی سطحی و آبرفت خشک با ضخامت متوسط ۱۸/۸ متر دارای مقاومت الکتریکی متغیر به‌طور متوسط حدود ۳۵۰ اهم متر

(ب) لایه‌ی آبدار با مقاومت الکتریکی حدود ۰/۶ تا ۶ اهم متر و به‌طور متوسط حدود ۳/۳ اهم متر و ضخامت متوسط حدود ۸/۶ متر

(ج) لایه‌ی سنگ کف با عمق متوسط حدود ۲۷ متر که مقاومت الکتریکی آن در بیشتر نقاط دشت حدود ۶/۸ تا ۳۷ اهم متر می‌باشد ولی مقاومت الکتریکی متوسط آن در کل منطقه حدود ۴۲ اهم متر است.

(د) لایه‌ی کم مقاومت زیر سنگ کف که مقاومت الکتریکی آن به‌طور متوسط حدود ۲/۱ اهم متر و عمق متوسط آن ۶۳ متر می‌باشد.

۴- مقادیر عمق، ضخامت و ویژه‌ی الکتریکی لایه‌ی آبدار نشان می‌دهد که سطح آب در عمق بین حدود ۱۶ متر تا ۲۳ متر و به‌طور متوسط حدود ۱۸/۸ متری قرار دارد و به‌طور کلی به سمت طول و عرض جغرافیایی بیشتر (منطبق بر سونداژ A) این عمق بیشتر می‌شود. ضخامت لایه‌ی آبدار بین حدود ۷ متر تا ۱۰ متر تغییر می‌کند و به سمت سونداژ I تقریباً در مرکز آبخوان افزایش می‌یابد. مقادیر مقاومت الکتریکی لایه‌ی آبدار بین حدود ۰/۶ تا ۶ اهم متر متغیر است و در دو نقطه‌ی منطبق بر سونداژ I و B به دلیل کاهش کیفیت آب زیرزمینی یا کاهش اندازه‌ی دانه‌های تشکیل دهنده‌ی لایه‌ی آبدار کاهش می‌یابد.

۵- مقادیر عمق و مقاومت الکتریکی سنگ کف منطقه نشان می‌دهد که عمق سنگ کف بین حدود ۲۵ تا ۳۲ متر متغیر است و به سمت غرب منطقه، کاهش می‌یابد. مقادیر مقاومت الکتریکی سنگ کف از ۶/۸ اهم متر تا حدود ۱۳۰ اهم متر در نوسان می‌باشد و به طرف مرکز آبخوان افزایش می‌یابد. جنس سنگ کف با توجه به مقادیر مقاومت الکتریکی لایه‌ها و لاگ چاه‌های منطقه و بیرون زدگی سنگ‌ها در اکثر نقاط منطقه از نوع سنگ مارن تشخیص داده شده است. این سنگ کف مارنی به صورت یک لنز با گسترش محدود، کل منطقه‌ی مورد مطالعه را پوشانده است.

۶- نقشه‌ی هم مقاومت عرضی لایه‌ی آبدار (R) مزرعه‌ی دانشگاه نشان می‌دهد مقدار مقاومت عرضی در محل سونداژهای L, J, I کمتر از ۱۰ اهم متر مربع بوده و با توجه به ارتباط بین مقاومت عرضی (R) و ضریب قابلیت انتقال (T) لایه‌ی آبدار، پتانسیل آبدهی در این نقاط کم است. بهترین محل برای حفر چاه در منطقه، که دارای بیشترین پتانسیل آبدهی باشد، با توجه به مقادیر ضخامت لایه‌ی آبدار، مقاومت الکتریکی و مقاومت عرضی بالای لایه‌ی آبدار و نیز عدم وجود چاه در کنار آن، محل سونداژ E پیشنهاد می‌گردد.

بین هدایت الکتریکی در نقاط مختلف دشت وجود داشته باشد، می‌توان گفت که مقدار A و K هر دو به دانه بندی آبخوان وابسته می‌باشند. در این صورت نسبت K/A در سطح دشت عدد ثابتی خواهد شد. یعنی با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها مقدار K و A هر دو افزایش پیدا کرده و نسبت K/A ثابت می‌ماند، در این صورت می‌توان از رابطه‌ی $T = (K/A)R_p$ برای تعیین قابلیت انتقال آبخوان استفاده نمود.

ضریب قابلیت انتقال آبخوان به هر دو عامل مؤثر در میزان آبدهی آبخوان یعنی نوع دانه بندی و ضخامت آبخوان وابسته است، بنابراین می‌تواند فاکتور مناسبی برای تعیین پتانسیل آبدهی یک آبخوان باشد. به دلیل وجود ارتباط بین مقاومت عرضی (R) و ضریب قابلیت انتقال (T) لایه‌ی آبدار، معمولاً نقشه‌های هم مقاومت عرضی را متناسب با نقشه‌ی ضریب قابلیت انتقال آبخوان در نظر می‌گیرند و از نقشه‌های هم مقاومت عرضی برای تعیین مناطق با پتانسیل آبدهی بالا و مناسب برای حفر چاه استفاده می‌شود (De Oliveria Braga 2006). در تصویر ۱۰ مقادیر ضخامت لایه‌ی آبدار در سمت چپ سونداژ، مقادیر مقاومت الکتریکی در سمت راست، مقادیر مقاومت عرضی در زیر علامت و نام سونداژ در بالای علامت مورد نظر مشاهده می‌گردد. در این تصویر چاه‌های حفر شده در منطقه نیز نشان داده شده است تا بتوان بهترین محل حفر چاه را که مقاومت عرضی لایه‌ی آبدار آن بیشتر باشد و نزدیک به چاه‌های حفر شده نیز نباشد، مشخص نمود. چاه‌های منطقه در کنار سونداژهای D و H و K قرار دارند.

نقشه‌ی هم مقاومت عرضی لایه‌ی آبدار (R) نیز در تصویر ۱۱ ارائه شده است. مطابق تصاویر ۱۰ و ۱۱ مقدار مقاومت عرضی در محل سونداژهای L, J, I کمتر از ۱۰ اهم متر مربع بوده و با توجه به توضیحات بالا می‌توان گفت پتانسیل آبدهی در این نقاط کم است. بهترین محل برای حفر چاه در منطقه که دارای بیشترین پتانسیل آبدهی می‌باشد، با توجه به مقادیر ضخامت لایه‌ی آبدار، مقاومت الکتریکی و مقاومت عرضی بالای لایه‌ی آبدار و نیز عدم وجود چاه در کنار آن، محل سونداژ E پیشنهاد می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه برخی نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت ذیل عنوان کرد:

۱- مقایسه‌ی منحنی‌های هم مقاومت و ویژه‌ی الکتریکی ظاهری نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری در منحنی‌های با خط جریان کم، بسیار بیشتر از مقادیر منحنی $AB = 80m$ می‌باشد. دلیل این امر این است که منحنی‌های با خط جریان کم بیانگر لایه‌ی سطحی آبرفت خشک هستند و جریان الکتریکی عمدتاً به وسیله‌ی هدایت از سطح دانه‌ها کنترل می‌شود و منحنی $AB = 80m$ نمایشگر لایه‌ی آبدار بوده و هدایت الکتریکی آن‌ها به صورت الکترولیتی از طریق آب صورت می‌پذیرد. همچنین در هر دو منحنی به طرف مرکز آبخوان (منطبق بر سونداژ J) به دلیل درشت دانه تر شدن رسوبات مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری افزایش نشان می‌دهد.

۲- مقایسه‌ی شبه مقطع ژئوالکتریک پروفیل‌ها بیانگر کاهش مقادیر مقاومت

- Kelly, W. E., 1976**, "Goelectric sounding for delineating ground water contamination", *Ground Water*, Vol. 14(1): 6-11.
- Kelly, W. E. & Stanislav, M., 1993**, "Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice", *Elsevier Amsterdam*, 289p.
- Kessels, W., Flentge, I., & Kolditz, H. 1985**, "Dc goelectric sounding to determine water content in the salt mine asse (FRG)", *Geophys. Prospec.*, Vol. 33: 456-446.
- Khalil, M. H., 2006**, "Goelectric resistivity sounding for delineating salt water intrusion in the Abu Zenima area, west Sinai, Egypt", *J. Geophys. Eng.*, Vol. 3: 243-251.
- Kosinski, W. K., & Kelly, W. E., 1981**, "Goelectric sounding for predicting aquifer properties", *Ground Water*, Vol. 19(2): 163-171.
- Kwader, T., 1985**, "Estimating aquifer permeability from formation resistivity factors", *Ground Water*, Vol. 23(6): 762-766.
- Maillet, R., 1947**, "The fundamental equations of electrical prospecting", *Geophysics*, Vol. 12(4): 529-556.
- Mooney, H. M. & Harold, M., 1980**, "Handbook of engineering geophysics Volume 2: electrical resistivity", *Bison Instruments, Inc., Minneapolis, Minn.*, 81 p.
- Omosuyi, G. O., Adeyemo, A. & Adegoke, A. O., 2007**, "Investigation of groundwater prospect using electromagnetic and goelectric sounding at Afunbiowo, near Akure, Southwestern Nigeria", *Pacific Journal of Science and Technology (PJST)*, Vol. 8 (2): 172-182.
- Oseji, J. O., Atakpo, E.A. & Okolie, E. C., 2005**, "Goelectric investigation of the aquifer characteristics and groundwater potential in Kwale, Delta state, Nigeria", *J. Appl. Sci. Environ. Mgt.* Vol. 9(1): 157-160.
- Park, Y., Doh, S. & Yun, S., 2007**, "Goelectric resistivity sounding of riverside alluvial aquifer in an agricultural area at Buyeo, Geum River watershed, Korea: An application to groundwater contamination study", *Environ. Geol. J.*, Vol. 53(4): 849-859.
- Niwas, S., & Singhal, D. C., 1981**, "Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous media", *J. of Hydrol.*, Vol. 50: 393-399.
- Todd, D. K., 1980**, "Groundwater hydrology", 2nd ed. *John Wiley, New York*, 539p.
- Yadav, G. S., 1995**, "Relating hydraulic and goelectric parameters of the Jayant aquifer, India", *J. of Hydrol.*, Vol. 167: 23-38.
- Yadav, G. S. & Abolfazli, H., 1998**, "Goelectric soundings and their relationship to hydraulic parameters in semiarid regions of Jalore, northwestern India", *J. Appl. Geophysics*, Vol. 39: 35-51.
- Yang, Ch. & Lee, W., 1998**, "Using resistivity sounding and geostatistics to aid in hydrogeological studies in the Choshuichi alluvial fan, Taiwan", *Institute of Applied Geology, National Central University, Taiwan*, 40 (2): 65-73.
- Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P. & Mabey, D. R., 1974**, "Application of surface geophysics to ground-water investigations", *U.S. geological survey, Techniques of water-Resources Investigation, Book 2, Chap. D1*, 116p.
- Apparao, A. & Rao, T. G., 1974**, "Depth of investigation in resistivity methods using linear electrodes", *Geophys. Prospec.*, Vol. 22: 211-223.
- Akaolisa, C., 2006**, "Aquifer transmissivity and basement structure determination using resistivity sounding at jos plateau State Nigeria", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 114 (1-3): 1-3.
- Asfahan, J., 2007**, "Neogene aquifer properties specified through the interpretation of electrical sounding data, Salamiyeh region, central Syria", *Hydrologi. Processes*, Vol. 21 (21): 2934-2943.
- Ayers, J. F., 1990**, "Conjunctive use of geophysical and geological data in the study of an alluvial aquifer", *Ground Water*, Vol. 27 (5): 625-632.
- Bello, A. A. & Makinde, V., 2007**, "Delineation of the aquifer in the south-western part of the Nupe basin, Kwara state, Nigeria", *J. of Am. Sci.*, Vol. 3(2): 36-44.
- Çaglara, I. & Duvarci, E., 2001**, "Goelectric structure of inland area of the Gökova rift, southwest Anatolia and its tectonic implications", *J. of Geodyn.*, Vol. 31 (1): 33-48.
- Danielsen, J., Dahlin, T., Owen, R., Mangeya, P. & Auken, E., 2007**, "Geophysical and hydrogeologic investigation of groundwater in the Karoo stratigraphic sequence at Sawmills in northern Matabeleland, Zimbabwe: A case history", *Hydrogeology J.*, Vol. 15(5): 945-960.
- De Oliveira Braga, A. C., Filho, W. M. & Dourado, J. C., 2006**, "Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies", *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 24 (4): 573-581.
- El-Qady, G., 2006**, "Exploration of a geothermal reservoir using goelectrical resistivity inversion: case study at Hammam Mousa, Sinai, Egypt", *J. Geophys. Eng.* Vol. 3: 114-121.
- El-Waheidi, M. M., Merlanti, F. & Pavan, M., 1992**, "Goelectrical resistivity survey of the central part of Azraq basin (Jordan) for identifying saltwater/freshwater interface", *J. Appl. Geophysics*, Vol. 29: 125-133.
- Frohlich, R. K. & Kelly, W. E., 1988**, "Estimates of specific yield with the goelectrical resistivity method in glacial aquifers", *J. of Hydrol.*, Vol. 97: 33-44.
- Frohlich, R. K. & Parke, C. D., 1989**, "The electrical resistivity of vadose zone – field survey", *Ground Water*, Vol. 27 (4): 524-530.
- Heilan, C. A., 1940**, "Geophysical exploration", *Prentice Hall, New York, N.Y.*, 264p.
- Huntley, D., 1980**, "Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers", *Ground Water*, Vol. 24(4): 466-474.
- Jackson, P. N., Taylor Smith, D. & Stanford, P. N., 1978**, "Resistivity- porosity- particle shape relationships for marine sands", *Geophysics*, Vol. 43(6): 1250-1268.
- Kalinski, R. J., Kelly, W. E., Bogardi, I., & Pesti, G. 1993**, "Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers", *J. Appl. Geophysics*, Vol. 30: 161-173.