

Research Paper

Characterizing Aquifer Layers of Karstic Springs in Nahavand Plain Using Geoelectrical and Electromagnetic Methods

Rojin Fasihi¹,Abdollah Taheri Tizro^{2*},Safar Marofi³

¹ Ph.D Student of Water Science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: rojin.fasihi@yahoo.com, r.fasihi@agr.basu.ac.ir

² Associate Professor, Water Science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: ttizro@yahoo.com, ttizro@basu.ac.ir

³ Professor, Water Science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: marofisafar59@gmail.com

[10.22125/IWE.2023.388855.1711](https://doi.org/10.22125/IWE.2023.388855.1711)

Received:

March 7, 2023

Accepted:

May 29, 2023

Available online:

December 30, 2023

Keywords:**Karst, Spring,
Electromagnetic,
Nahavand****Abstract**

Electromagnetic method is new method that can play an important role in determining and separating subsurface layers with acceptable accuracy. In the present research, 10 electromagnetic soundings were collected in the upstream of five Karstic springs (Famaseb, Faresban, Ghale Baroodab, Giyan and Gonbad kabood) located in Nahavand plain of Hamadan province. By using the emerging data, the electromagnetic logs were prepared at different depths and compared with 5 logs of the geoelectric method obtained in field measurement. The comparison showed, the value of NRMSE in the geoelectric method for the 5 springs are 7.11, 7.50, 44.93, 3.99 and 2.99 respectively. And in the electromagnetic method, the value of this coefficient for the investigated springs are 1.4, 1.1, 1.2, 1.5, and 1.3. In addition, it is found that, the accuracy of the electromagnetic method based on the NRMSE value is higher in the geoelectric method. The advantage of the electromagnetic method compared to geoelectric is on less time consuming and its cost prohibitive. The depth to water table is the final result of this research work, which showed that in the springs of Famaseb, Faresban, Ghale Baroodab, Giyan and Gonbad kabood, having depth of about 6, 20, 10, 2 and 36 meters respectively. The maximum thickness of the aquifer layer was estimated in Gonbad kabood spring (36 meters) and the lowest in Giyan spring (2 meters). These results can be used to identify the water potential of the region in order to better manage water resources.

1. Introduction

The ever-increasing growth of the population and the rise in water demand intensify the need to use the geoelectric method (Mogaka, 2010). The ever-increasing growth of the water demand for domestic and agricultural use have created an urgent need to deal with the issue (Omeje et al. 2021). Telluric electric field frequency is simply called frequency selection method (FSM), which is a passive source electromagnetic exploration method (Yang et al. 2017). The FSM method is similar to the acoustic magneto telluric (AMT) method, but it only measures the horizontal electric component of the earth and does not measure the magnetic field component. The frequency selection of this method is mostly in the range of 15 Hz to 1.5 kHz, and the distance of the MN potential electrodes is usually 10 m to 20 m when using the profile method (Yulong et al. 2022).

* **Corresponding Author:** Abdollah Taheri Tizro

Address: Water Science and Engineering
Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan

Email: ttizro@yahoo.com, ttizro@Basu.ac.ir

Tel: 09181190052

2. Materials and Methods

Nahavand Plain is in the upper basin of the Karkhe River and is located in the Zagros highlands. The basic principle of the natural electric field frequency selection method is the amplitude of the natural electric field of the geomagnetic field. The field distributed on the ground; the field change is a function of the set of Maxwell's equation. The natural electric field geophysical tool is a type of electric field on which the source of the current is considered to be ground formations rock field. The natural electric field frequency selection method is called the frequency selection method for short. In principle, to study ground field changes, to solve geological problems, it is an alternating current exploration method that is based on the electric difference of the natural electromagnetic field of the earth (frequency 0-30 kHz) in several different frequencies of electromagnetic field changes (PQWT, 2022). The resistivity method originated from the work of the Schlumberger brothers in the 1920s (Loke, 2002).

3. Results

The results of field measurements with the help of two geoelectric and electromagnetic methods for 5 springs of Nahavand plain showed in summary the apparent specific resistance values considered for three layers in each spring by geoelectric method and the type and material of the layer. The upper and lower parts of each spring were determined separately by electromagnetic method. The general results of the two methods used show that in all investigated springs, the trend of changes in apparent specific resistance was consistent with frequency. Also, the changes in each subsurface layer recorded by the electromagnetic method with the change in the apparent specific resistance value of the same layers were also recorded by the geoelectric method, which proves the accurate measurement of both methods in the investigated areas. Both methods used for 5 Karstic springs in the region to determine the water layer and water exploration showed that the electromagnetic method has high accuracy in estimating the thickness of the underlying layers similar to the geoelectric method and the electromagnetic method with higher speed and lower cost than other methods.

4. Discussion and Conclusion

As the drilling of new wells are difficult task and expensive. In this research, the geoelectric and electromagnetic methods combinely has been applied to estimate thickness of subsurface layers. The geoelectric and electromagnetic methods were used to investigate the aquifer layer upstream of 5 Karst springs in Nahavand. The maximum thickness of the aquifer layer was estimated at 36 meters in Gonbad kabood spring and the lowest in Giyan spring with a depth of 2 meters. The results presented in this research can be used for the purpose of water management.

5. Six important references

- 1) Loke, M. H., 2002. 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, Online Tutorial edition, (drmhloke@hotmail.com).
- 2) Mogaka, D.N. 2010. Geophysical Characterization of the Lithology and Structure of the Olobanita Well Field, Lower Lake Baringo Basin, Kenya Rift: Implication on Groundwater Occurrence (p. 118). Doctoral dissertation, University of Nairobi.
- 3) Omeje, E. T., Ugbor, D. O., Ibuot, J. C. and Obiora, D. N. 2021. Assessment of groundwater repositories in Edem Southeastern Nigeria, using vertical electrical sounding. *Arabian Journal of Geosciences* 14, 421. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06769-1>.
- 4) PQWT. 2022. Hunan Puqi Geological Exploration Equipment Research Institute of Changsha, Hunan, China.
- 5) Yang, T.C.; Xia, D.L.; Wang, Q.R.; and Fu, G.H. 2017. Theoretical Research and Application of Natural Electric Field Frequency Selection Method; Central South University Press: Changsha, China.
- 6) Yulong, L., Tianchun, Y., Tizro, A T., and Yang, L. 2022. Fast Recognition on Shallow Groundwater and Anomaly Analysis Using Frequency Selection Sounding Method. *Water*, 15(1): 96.



شناسایی لایه‌های آبدار چشمه‌های کارستی دشت نهاوند با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک و الکترومغناطیس

روژین فصیحی^۱، عبدالله طاهری تیزرو^۲، صفر معروفی^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

مقاله پژوهشی

چکیده

روش ژئوالکتریک یکی از مؤثرترین روش‌ها در تعیین و تشخیص لایه‌های زیرسطحی است. روش الکترومغناطیس نیز روشی جدیدتر می‌باشد که با دقت قابل قبول می‌تواند نقش مهمی در تعیین و تفکیک لایه‌های زیرزمینی ایفا نماید. در تحقیق حاضر با پیمایش صحرایی در بالادست ۵ چشمه کارستیکی فاماسب، فارسبان، قلعه باروداب، گیان و گنبدکبود دشت نهاوند استان همدان ۱۰ سونداژ الکترومغناطیسی برداشت شد. سپس با استفاده از داده‌های برآمده لوگ‌های الکترومغناطیس در اعماق متفاوت تهیه گردید و با ۵ لوگ روش ژئوالکتریک مقایسه شد، این مقایسه نشان داد مقدار NRMSE در روش ژئوالکتریک برای ۵ چشمه فاماسب، فارسبان، قلعه باروداب، گیان و گنبدکبود به ترتیب ۷/۱۱، ۷/۵۰، ۴۴/۹۳، ۳/۹۹ و ۲/۹۹ است و در روش الکترومغناطیس مقدار این ضریب برای چشمه‌های مورد بررسی به ترتیب حدود ۱/۴، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۵ و ۱/۳ می‌باشد. علاوه بر همسو بودن نتایج دو روش مورد استفاده دقت روش الکترومغناطیس بر اساس مقدار NRMSE بالاتر از روش ژئوالکتریک می‌باشد. در واقع کمتر بودن مقدار ضریب NRMSE نشان از دقت بالای آن دارد. مزیت روش الکترومغناطیس در مقایسه با ژئوالکتریک صرف زمان و هزینه کمتر است. مقدار ضخامت لایه آبدار نتیجه نهایی این پژوهش می‌باشد که نشان داد در چشمه‌های فاماسب، فارسبان، قلعه باروداب با درز و شکاف‌های موجود در این چشمه، گیان و گنبدکبود به ترتیب حدود ۶، ۲۰، ۱۰، ۲ و ۳۶ متر لایه آبدار وجود دارد. بیشترین مقدار ضخامت لایه آبدار در چشمه گنبدکبود (۳۶ متر) و در مقابل کمترین در چشمه گیان (۲ متر) تخمین زده شد. از این نتایج جهت شناسایی لایه‌های آبدار منطقه به منظور مدیریت بهتر منابع آب می‌توان بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: کارست، چشمه، الکترومغناطیس، نهاوند.

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب-منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

ایمیل: r.fasihi@agr.basu.ac.ir, rojin.fasihi@yahoo.com

^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران (نویسنده مسول) ایمیل: ttizro@yahoo.com, ttizro@Basu.ac.ir

^۳ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران ایمیل: marofisafar59@gmail.com



مقدمه

آب شیرین یک منبع محدود و آسیب پذیر است و بسیاری از مردم هنوز به منابع کافی برای نیازهای اساسی دسترسی ندارند. افزایش جهانی فعالیت‌های اقتصادی و بهبود استانداردهای زندگی منجر به افزایش رقابت و درگیری بر سر منابع محدود آب شیرین شده است (Mogaka, 2010). رشد روزافزون جمعیت جامعه و افزایش تقاضای آب برای مصارف خانگی و کشاورزی، نیاز مبرمی به رسیدگی به موضوع شناسایی لایه‌های آبدار را به وجود آورده است. به همین دلیل، کاوش سازندهای زمین شناسی واحدهای آبخوان سیار مفید خواهد بود (Omeje et al. 2021). روش انتخاب فرکانس میدان الکترومغناطیسی تلوریک به سادگی روش انتخاب فرکانس (FSM¹) نامیده می‌شود. که یک روش اکتشاف الکترومغناطیسی منبع غیرفعال است (Yang et al. 2017). روش FSM شبیه به روش مگنتوتلوریک صوتی (AMT²) است، اما فقط جزء الکترومغناطیسی زمین را اندازه‌گیری می‌کند و جزء میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری نمی‌کند. انتخاب فرکانس این روش بیشتر در بازه ۱۵ هرتز تا ۱/۵ کیلوهرتز است و فاصله الکترودهای پتانسیل MN معمولاً ۲۰ متر یا ۱۰ متر در هنگام استفاده از روش پروفیل است (Yulong et al. 2022). بنابراین، الکترومغناطیس ابزاری کارآمد و مقرون به صرفه برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی می‌باشد و نسبت به سایر روش‌های اکتشاف ژئوفیزیکی که در مناطق کوهستانی و شهرهای با امکانات ساختمانی متراکم انجام می‌شود، سازگارتر است. در عین حال، FSM مشابه روش اکتشاف جریان تلوریک و پروفیل تلوریک-تلوریک (TTP³) است که فقط مؤلفه میدان الکترومغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کند (Berdychevsky, 1962; wang et al. 2019).

با استفاده از روش مقاومت الکترومغناطیسی غارهای خشک که غالباً در بالای سطح ایستابی قرار دارند تشخیص داده می‌شوند و همچنین کانال‌هایی که دارای جریان سریع آب (در صورتی که غیر اشباع باشند) هستند و داده‌برداری آن‌ها دشوار است

همچنین نیاز به دقت بالایی دارند روش مقاومت الکترومغناطیسی کارآمد است (ناصری و همکاران، ۱۳۹۱). روش مقاومت الکترومغناطیسی به عنوان یک روش ژئوفیزیکی، در میان روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مورد استفاده در بررسی آب‌های زیرزمینی، بیشترین استقبال را در اکتشاف آب‌های زیرزمینی دارد (Obiora and Ibuot, 2020). روش مقاومت الکترومغناطیسی شامل صداگذاری الکترومغناطیسی عمودی در مطالعه آب‌های زیرزمینی است (Omeje et al. 2021). این روش به دلیل صرف انرژی کمتر در اندازه‌گیری‌های میدانی، ارزش تشخیصی نسبتاً بالا، قابلیت حمل تجهیزات و قابلیت اندازه‌گیری عمق نفوذ بیشتر کارایی بالایی دارد. همچنین این روش در تعیین ضخامت ظاهری مناطق هوازده مقرون به صرفه است (Ezema et al. 2020). روش ژئوالکترومغناطیسی که بر اساس کار برادران شلومبرگر در دهه ۱۹۲۰ با هدف اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل سطحی به دلیل جریان سیال در داخل زمین منشاء گرفت در این روش نقطه مرکزی آرایه الکترومغناطیسی ثابت می‌ماند، اما فاصله بین الکترودها افزایش می‌یابد تا اطلاعات بیشتری در مورد بخش‌های عمیق‌تر زیرسطح به دست آید. الکترودها زمان انجام بررسی‌های صداگذاری مقاومتی، در امتداد یک خط توزیع می‌شوند. موقعیت صداگذاری در نظر گرفته شده در مرکز یک نقطه میانی قرار دارد مقاومت ویژه ظاهری (Resistivity) به دست می‌آید. جمع آوری داده‌ها با آرایه الکترودهای شلومبرگر از نظر کار میدانی به زمان زیادی نیاز دارد (Loke, 2002).

تاکنون محققان به کاربرد عملی روش الکترومغناطیسی به-ویژه در توسعه ابزار و کاربرد این روش در اکتشاف منابع آب زیرزمینی و پلایای آب زیرزمینی توجه زیادی داشته‌اند، اما تحقیقات نظری کمی وجود دارد از جمله: Satarugsa و همکاران (۲۰۰۴) و Radulescu و همکاران (۲۰۰۷)، برتری روش ژئوالکترومغناطیسی را به عنوان یک روش مناسب و کارآمد جهت تشخیص حفرات در مناطقی که کارستی می‌باشند ارائه نمودند. Tizro و همکاران (۲۰۱۲) مقدار تخلخل و ضریب

³ Telluric-Telluric Profiling

¹ Frequency Selection Method

² Audio Magnetotelluric Method

ضرایب هیدرولیکی هیچ تفاوت معنی‌داری بین دو روش لوگ-های حفاری و روش ژئوالکتریک وجود ندارد. شناسایی پتانسیل‌های آبی و نیازهای منطقه نهبوند با توجه به گستردگی پدیده‌ها و عوارض فرآیندهای انحلالی (کارستیک) در منطقه که حجم عظیمی از آب آن جهت در طول سال تخلیه می‌کنند ضروری است. تحقیق حاضر می‌تواند به‌عنوان یک پژوهش پایه برای مدیریت منابع آب در بخش شناسایی و حفاظت از منابع کارستیکی و بهره‌برداری صحیح از این منابع ارزشمند در بخش‌های مختلف به دلیل محدودیت کمی منابع آب مطرح و مطالعه کرد. چشمه‌های فاماسب، فارسبان، قلعه باروداب، گیان و گنبدکبود دشت نهبوند استان همدان به‌عنوان منابع اصلی کشاورزی و شرب در منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی روش اندازه‌گیری ضخامت لایه آبدار است. در این پژوهش با استفاده از روش الکترومغناطیس که روشی نوین در عین حال ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر نسبت به روش ژئوالکتریک به‌منظور تشخیص و تعیین ضخامت لایه آبدار و تفکیک آن می‌باشد. در چشمه‌های نهبوند پرداخته خواهد شد تا به‌منظور مدیریت هر چه بهتر منابع آبی دشت نهبوند به کار گرفته شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت نهبوند با وسعت حوزه آبریز ۱۹۰۲ کیلومترمربع یکی از دشت‌های حوزه علیای رودخانه کرخه محسوب می‌گردد و در شمال‌شرق کوه‌های گرین از سلسله ارتفاعات زاگرس قرار گرفته است. وسعت اراضی مسطح (دشت) نهبوند ۶۴۴ کیلومترمربع و بقیه اراضی که ۱۰۴۶ کیلومترمربع (۶۲ درصد) گسترش دارند شامل ارتفاعات حاشیه دشت می‌باشد. شیب عمومی دشت از جنوب‌شرق به طرف شمال‌غرب بوده، مرتفع‌ترین نقطه حوزه بیش از ۳۴۰۰ متر ارتفاع و پست‌ترین نقطه ۱۴۰۲ متر (منطبق با ایستگاه هیدرومتری دوآب در خروجی حوزه) و ارتفاع متوسط حوزه آبریز ۱۸۹۰ متر از سطح دریا می‌باشد (بی نام، ۱۴۰۱).

موقعیت شهرستان نهبوند به گونه‌ای است که از شمال به شهرهای تویسرکان و همدان، از جنوب به استان لرستان و از

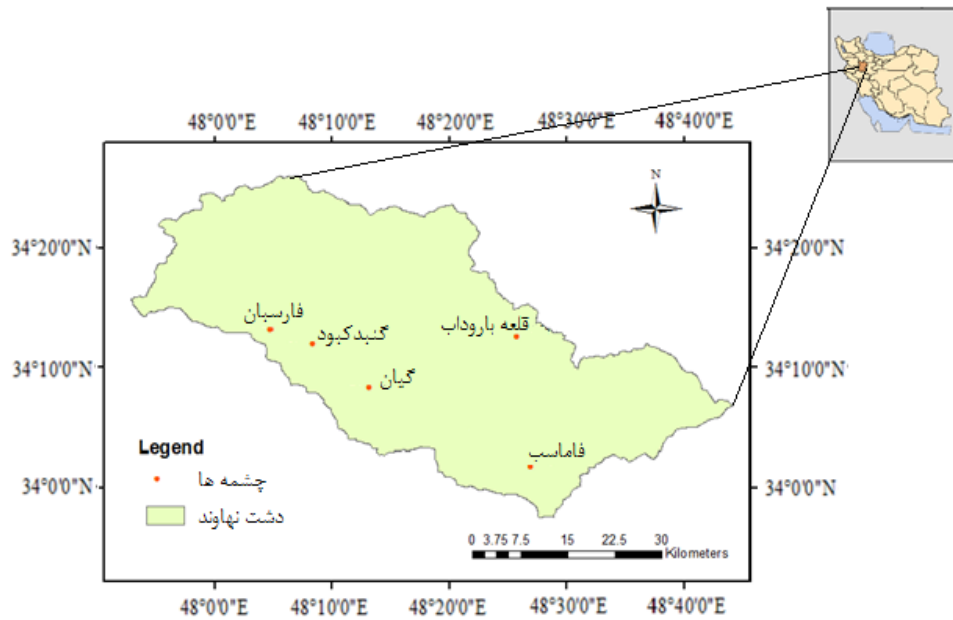
آبدهی ویژه دشت ماهیدشت استان کرمانشاه را با روش ژئوالکتریک برآورد نمودند، در منطقه تخلص از ۰/۱۸ تا ۰/۶۶ متغیر بود و میانگین آبدهی ویژه ۰/۱۵ محاسبه شد، در این پژوهش دقت بالای روش مذکور را نشان دادند. Alarifi و همکاران (۲۰۲۲) در وادی نیسایه ریاض عربستان از روش ژئوالکتریک استفاده نمودند. در این تحقیق پنج لایه ژئوالکتریک آشکار شد که اولین لایه از ماسه خشک با مقادیر مقاومت بیشتر تشکیل شده و عمقی در حدود ۳ متر داشت. سفره آب زیرزمینی در لایه پنجم نشان داده شد که عمیق‌ترین لایه بود، با اعماق بین ۳۷/۸ تا ۵۲/۲۵ متر با مقاومت ویژه ظاهری ۴۷ تا ۱۱۵/۳ اهم-متر. Yulong و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اکتشاف آب در منطقه‌ای در جنوب چین با روش الکترومغناطیس پرداختند و نتایج آنان نشان دهنده اثربخشی آشکار FSM در اکتشاف آب‌های زیرزمینی کم‌عمق (عمق کمتر از ۱۵۰ متر) دارد. همچنین روشی مؤثر برای شناسایی مکان‌های گمانه مناسب آب‌های زیرزمینی در آینده است.

ناصری و همکاران (۱۳۹۱) به اکتشاف آب زیرزمینی در منطقه جنوب باختر ایذه با روش ژئوالکتریک پرداختند و نشان دادند بررسی مقاومت ژئوالکتریک سه‌بعدی با اندازه‌گیری دوبعدی متراکم نیز قابلیت تشخیص گسترش زیرسطحی عوارض زمین‌شناسی و حفرات کارستی را دارد. عباس‌نیا و نوذری (۱۳۹۳) به بررسی اکتشاف آب با روش ژئوالکتریک و الکترومغناطیس پرداختند. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که روش ژئوفیزیک در مطالعات اکتشافی جز روش‌های غیرمستقیم محسوب می‌شود و می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های اکتشافی و افزایش کارایی در زمینه اکتشاف آب زیرزمینی شود. طاهری تیزرو و همکاران (۱۳۹۶) پارامترهای هیدرولیکی دشت چهاردولی کردستان با روش ژئوالکتریک محاسبه گردید و نتایج نشان دهنده صحت آزمایش و تایید یافته‌های سینگال و نیواس است. مجدد در پژوهش طاهری تیزرو و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از روش ژئوالکتریک پارامترهای هیدرولیکی دشت زرین آباد گل تپه زنجان را محاسبه نمودند و نتایج محاسبه شده نشان داد که در تعیین



چون سراب گاماسیاب، گیان، فارسبان، ملوسان، گنبد کبود، کنگاور کهنه، گردکانه، بنفشه و رازانه تمامی منطقه را سیراب و به یک قطب بزرگ کشاورزی تبدیل کرده است (بانزاد و همکاران، ۱۳۹۲). شکل ۱ نقشه منطقه مورد مطالعه و جدول ۱ مختصات لوگ‌های اندازه‌گیری شده در بالادست هر چشمه به‌منظور شناسایی پتانسیل لایه آبدار را نشان می‌دهد.

شرق به ملایر و از غرب به کرمانشاه محدود می‌شود. شهرستان نهاوند با وسعتی قریب به ۱۴۶۱ کیلومتر مربع در جنوب استان همدان و در امتداد رشته کوه‌های زاگرس و مسیر دشت دلتایی نهاوند واقع شده است و به دلیل وجود رشته کوه‌های زاگرس در منطقه، دارای منابع سرشار آب‌های زیرزمینی و آب و هوای مدیترانه‌ای می‌باشد. چشمه‌سارها و سراب‌های کم‌نظیری



شکل (۱): نقشه محدوده مطالعاتی

جدول (۱): مختصات لوگ‌های برداشت شده به دو روش مورد بررسی

لوگ الکترومغناطیس			لوگ ژئوالکتریک		
چشمه	x	y	چشمه	x	y
فاماسب (۱)	۴۸/۴۵۷۲	۳۴/۰۳۴۵	فاماسب	۴۸/۴۵	۳۴/۰۳
فاماسب (۲)	۴۸/۴۵۸۰	۳۴/۰۳۴۳			
فارسبان (۱)	۴۸/۴۳۳۳	۳۴/۲۱۵۱	فارسبان	۴۸/۴۳	۳۴/۲۱
فارسبان (۲)	۴۸/۴۳۳۴	۳۴/۲۱۵۲			
قلعه باروداب (۱)	۴۸/۰۸۲۷	۳۴/۲۲۲۰	قلعه باروداب	۴۸/۰۸	۳۴/۲۲
قلعه باروداب (۲)	۴۸/۰۸۲۵	۳۴/۲۲۲۰			
گیان (۱)	۴۸/۲۲۰۲	۳۴/۱۴۱۶	گیان	۴۸/۲۱	۳۴/۱۴
گیان (۲)	۴۸/۲۲۰۲	۳۴/۱۴۱۵			
گنبدکبود (۱)	۴۸/۱۴۸۵	۳۴/۲۰۷۹	گنبدکبود	۴۸/۱۴	۳۴/۲۰
گنبدکبود (۲)	۴۸/۱۴۸۲	۳۴/۲۰۸۰			

زمین شناسی

محدوده مورد بررسی این پژوهش در زون سنندج - سیرجان و زاگرس مرتفع (کمر بند تراستی زاگرس) قرار دارد. که یکی از فعال ترین پهنه های ساختمانی غرب ایران در دوره - های مزوزوئیک و سنوزوئیک به حساب می آید (Aghanabati, 2004).

اشکال و پدیده های کارستی گسترش قابل توجهی را به صورت سطحی و زیر سطحی در منطقه نهانند دارند. کارن ها به طور کلی در راستای مه درزه ها به وجود آمده اند که با بیش از یک متر عمق از پدیده های عمومی در سنگ آهک کارستی می باشند. در قسمت برهنه سنگ های آهکی چاه های انحلالی دیده می شوند. پونورها یا چاه های مکنده جز دیگر پدیده های کارستی موجود در منطقه نهانند هستند که در ارتفاعات مربوط به نوار بالایی کوه گرین دیده می شوند. علاوه بر موارد ذکر شده باید یادآور شد محل تشکیل غارها عمدتاً در سنگ آهک های توده ای که دارای ضخامت زیادی هستند، می باشد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰).

گسترش و توسعه آبخوان های کارستی که با ظهور چشمه - های متعدد کارستی با آبدهی متوسط ۴ مترمکعب بر ثانیه در منطقه، دیده می شود از مهم ترین این چشمه های گسله، چشمه یا سراب گیان است که با گسل های منطقه مرتبط هستند (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰). ارتباط مستقیم ویژگی های فیزیکی سنگ ها مانند درصد تخلخل، در ایجاد کارست و میزان گسترش آن نقش مهمی ایفا می کنند. ، اندازه و نوع حفرات موجود در قابلیت انحلال سنگ های کربناته بیشترین میزان تغییرات را دارند که معرف تخلخل سنگ می باشد (Ford Williams 2007).

عوارض کارستی به صورت های گوناگون از جمله: چشمه - های کارستی، فروچاله ها، غارها، پونورها، چاه های کارستی، اشکال برجی، حفرات انحلالی، پنجره های کارستی و انواع کارن ها قابل مشاهده می باشند. اقلیم، ارتفاع زیاد و زمان از جمله مؤثرترین عوامل بیرونی در ایجاد کارست است. زیرا تکتونیک فعال در منطقه وجود دارد و موجب توسعه

شکستگی های منطقه است. همچنین گسترش سنگ های انحلال پذیر نیز موجب شکل گیری انواع متنوعی از اشکال کارستی است (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰).
آبخوان های کارستی که در منطقه وجود دارند و سراب - های متعدد را تغذیه می نمایند، بر تخلخل ناشی از شکستگی (تخلخل ثانویه) و نفوذ پذیری زیاد توده های کربناته دلالت دارند. فراوانی ساختارهای تکتونیکی در منطقه و واحدهای کربناته شرایط مناسبی برای توسعه کارست در منطقه وجود آورده است. پدیده های ژئومورفولوژیکی کارست در منطقه، به خوبی شکل گرفته است و عوارض کارستی به صورت های گوناگون قابل مشاهده می باشند (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰).

روش الکترومغناطیس (FSM)

روش انتخاب فرکانس میدان الکتریکی طبیعی، به اختصار روش انتخاب فرکانس گفته می شود. که در اصل و قاعده برای مطالعه تغییرات میدان زیرزمینی، برای حل مشکلات زمین شناسی یک روش اکتشاف جریان متناوب است که بر اساس تفاوت الکتریکی میدان الکترومغناطیسی طبیعی زمین (فرکانس ۰-۳۰ کیلوهرتز) در چندین فرکانس مختلف از تغییرات میدان الکترومغناطیسی است. جهت محاسبه عمق نفوذ و مقاومت الکتریکی از رابطه ۱ استفاده می شود:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2 \quad (1)$$

در رابطه ρ_s ۱ مقاومت AC را نشان می دهد، f فرکانس عملیاتی، H و E، به ترتیب مولفه میدان مغناطیسی و مولفه میدان الکتریکی است. با توجه به ویژگی های تضعیف موج الکترومغناطیسی سطحی که در سازند منتشر می شود، عمق نفوذ موج الکترومغناطیسی در محیط عبارت است از:

$$\delta = 503.3 \text{ pf} \quad (2)$$

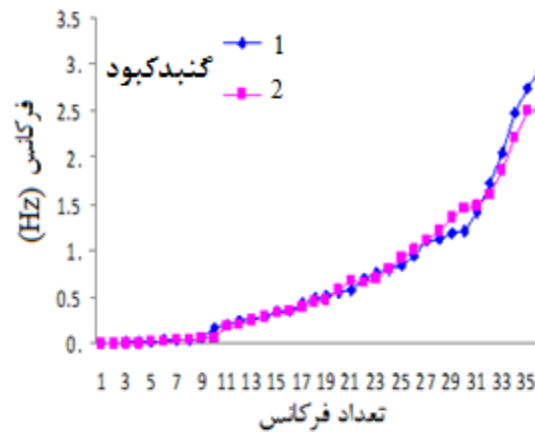
در معادله ۲، δ : عمق نفوذ، f فرکانس عملیاتی می باشد. از موارد فوق، می توان دریافت عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی، فرکانس و مقاومت، قابل مشاهده است. هنگامی که فرکانس ثابت است، هر چه مقاومت بیشتر باشد، عمق نفوذ بیشتر می -



است، از $0/001$ هرتز تا 106 هرتز متغیر است. با این حال، با توجه به مشکلات زمین شناسی واقعی، می توان از فرکانس $15/7$ هرتز - 2520 هرتز از فرکانس 10 استفاده کرد (PQWT, 2022). جهت نشان دادن تغییرات فرکانس یک منحنی انتخابی برای چشمه گنبد کبود در شکل ۲ ارائه گردیده است. جهت نشان دادن تغییرات فرکانس یک منحنی انتخابی برای چشمه گنبد کبود در شکل ۲ ارائه گردیده است.

گردد، زمانی که مقاومت ثابت باشد، فرکانس کمتر، عمق نفوذ بیشتر است. بنابراین با تغییر فرکانس کاری می توان به هدف تغییر عمق دست یافت. از آنجایی که مولفه میدان مغناطیسی اساساً در منطقه کوچک ناحیه تاثیر پایدار است، می توان از رابطه کیفی بین مؤلفه میدان الکتریکی و مقاومت برای قضاوت در مورد ویژگی های مقاومت بالا و پایین ساختار زمین شناسی استفاده کرد.

ابزار مورد استفاده فرکانس الکترومغناطیس را اندازه گیری می کند. طیف میدان الکترومغناطیسی زمین بسیار گسترده

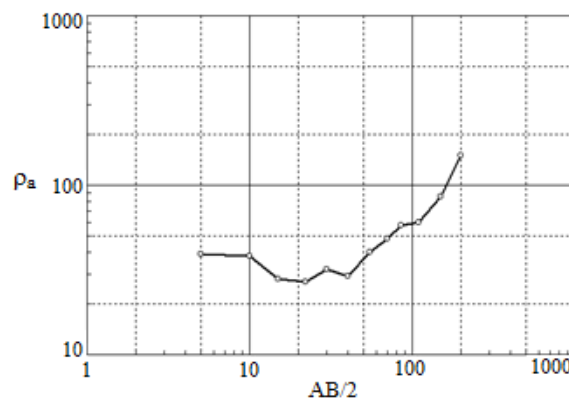


شکل (۲): منحنی تغییرات فرکانس روش الکترومغناطیس چشمه گنبد کبود

آید. نتایج حاصل از روش الکترومغناطیس می تواند سیمای بهتری از ساختارهای زمین شناسی منطقه برای بالادست هر چشمه و لایه آبدار در اختیار ما بگذارد (Alexei and Bobachev, 1990-2001). در شکل ۳ نوسانات مقاومت ویژه ظاهری چشمه گنبد کبود به عنوان یک نمونه اراده شده است.

روش ژئوالکتریک

اصل اساسی کاربرد روش های ژئوالکتریک در هیدروژئولوژی، استفاده از وابستگی مقاومت سنگ ها به سنگ شناسی آن ها و کانی سازی آب پرکننده منافذ است. به منظور تفسیر کمی اطلاعات به دست آمده در پیمایش صحرایی برای روش ژئوالکتریک از نرم افزار IPI2win استفاده می شود تا مقاومت ویژه هر لایه و ضخامت آن لایه به دست



شکل (۳): منحنی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری چشمه گنبد کبود

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \quad (۴)$$

که در این روابط O_i مقادیر عمق اندازه‌گیری شده (متر)، \bar{O} میانگین عمق اندازه‌گیری شده (متر)، P_i مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در روش ژئوالکتریک و فرکانس در روش الکترومغناطیس، \bar{P} میانگین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در روش ژئوالکتریک و فرکانس در روش الکترومغناطیس و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی به کمک دو روش ژئوالکتریک و الکترومغناطیس برای ۵ چشمه دشت نهاوند به صورت خلاصه در شکل‌های ۴ تا ۸ ارائه شده است. مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در نظر گرفته شده برای سه لایه در هر چشمه با روش ژئوالکتریک (شکل الف) و نوع و جنس لایه‌های زیرین بالادست هر چشمه با روش الکترومغناطیس (شکل ب و ج، با دو مختصات متفاوت در بالادست چشمه) بر اساس مقدار فرکانس و عمق به تفکیک مشخص گردید. روش ژئوالکتریک نتایج را براساس مقدار مقاومت ویژه ظاهری به-

نرم‌افزار IPI2win

همانگونه که ذکر شد به منظور تفسیر کمی ابتدا داده‌ها به صورت مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و $\frac{AB}{2}$ (نصف فاصله الکترودهای جریان) به عنوان ورودی وارد نرم‌افزار IPI2win می‌شود و سپس منحنی اندازه‌گیری شده صحرائی (مشابه شکل ۳) با نتایج روش الکترومغناطیس برای هر چشمه تطبیق داده می‌شوند. در نهایت مقاومت ویژه هر لایه و ضخامت آن لایه خروجی این نرم‌افزار می‌باشد. پس از تفسیر کمی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری، مقاطع مقاومت ویژه واقعی از تفسیر حاصل از برازش داده‌های مقاومت ویژه ظاهری با نتایج الکترومغناطیس همراه با به کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی منطقه فراهم می‌گردد.

در این پژوهش به منظور ارزیابی دقت دو روش مورد استفاده از شاخص‌های خطاسنجی ریشه مربع میانگین خطای نرمال^۱ (NRMSE)، و ضریب همبستگی^۲ (r) استفاده شد.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{O} \quad (۳)$$

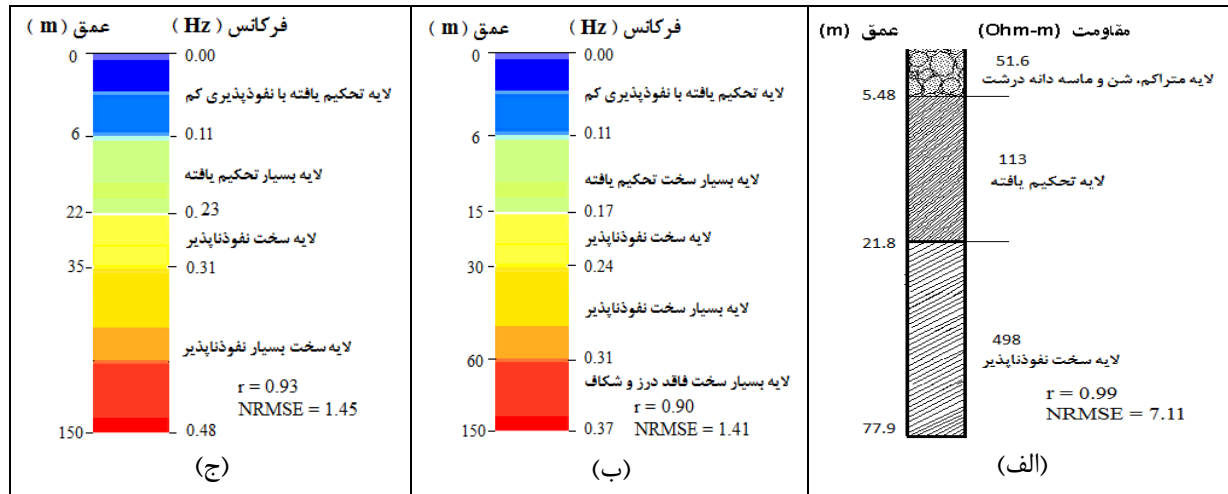
^۱ Normal Root Mean Square Error

^۲ Coefficient Of Correlation



در هر لایه زیرسطحی که با روش الکترومغناطیس به ثبت رسیده با تغییر در مقدار مقاومت ویژه ظاهری همان لایه‌ها در روش ژئوالکتریک نیز ثبت شده که گواه اندازه‌گیری دقیق هر دو روش در مناطق مورد بررسی است. جهت بررسی دقت دو روش مقادیر شاخص r و $NRMSE$ بر روی هر شکل به تفکیک ارائه شده است.

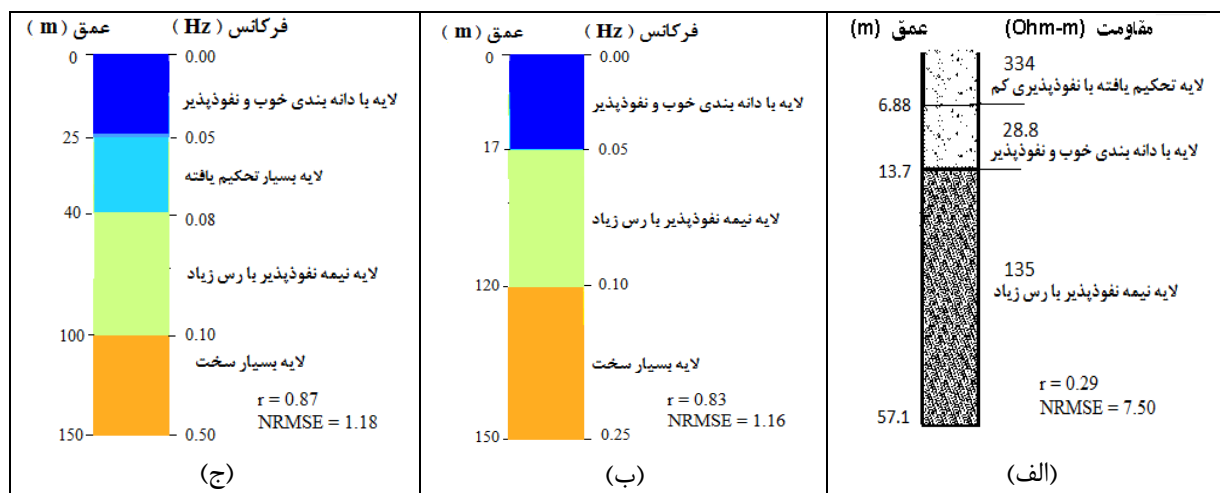
دست آمده از نرم‌افزار IPI2win عمق و جنس لایه را تفسیر می‌نماید اما در روش الکترومغناطیس بر اساس فرکانس ارسالی اطلاعات خروجی بررسی می‌گردد. نتایج کلی دو روش به کار برده شده نشان می‌دهد در تمامی چشمه‌های مورد بررسی روند تغییرات مقاومت ویژه ظاهری با فرکانس همسو بوده است. همچنین تغییرات موجود



شکل (۴): نتایج ژئوالکتریک (الف) و الکترومغناطیس (ب، ج) چشمه فاماسب

صفر تا ۰/۱۱ هرتز با عمق ۶ متر و فرکانس لایه دوم از ۰/۱۱ تا ۰/۱۷ هرتز تحکیم یافته است و لایه زیرین سه بازه با محدوده فرکانس از ۰/۱۷ تا ۰/۳۷ هرتز دارد که لایه‌های بسیار سخت نفوذناپذیر هستند (از ۱۵ متر تا ۱۵۰ متر). نتایج شکل (ج) نیز مشابه شکل (ب) تا عمق ۶ متری نفوذپذیری کم و سپس از ۶ متر تا ۲۲ متر دارای لایه تحکیم یافته (فرکانس ۰/۱۱ تا ۰/۲۳ هرتز) بعد لایه‌های زیرین تا ۱۵۰ متر لایه‌هایی سخت و نفوذناپذیر هستند (۰/۲۳ تا ۰/۴۸ هرتز).

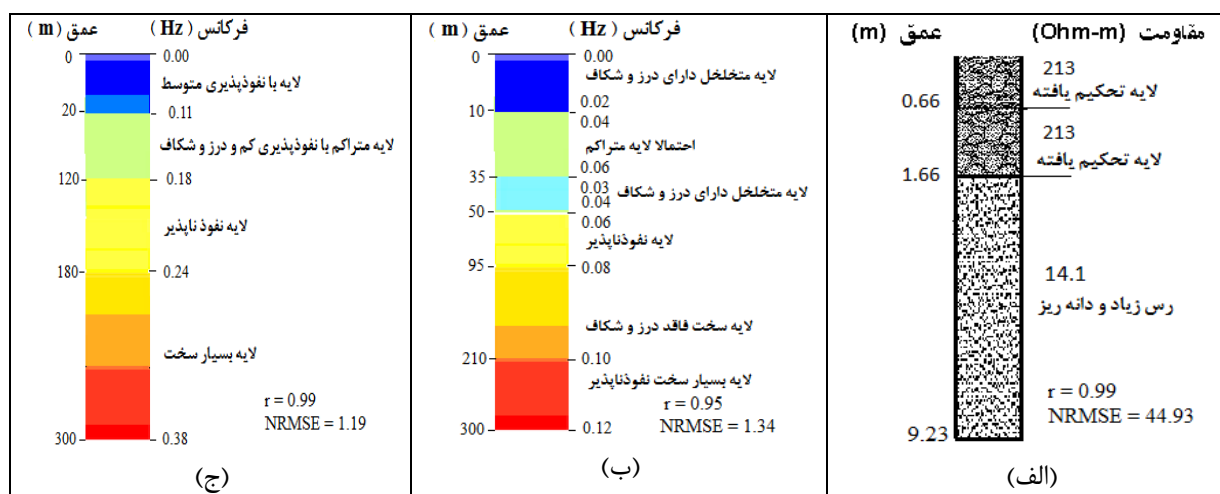
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، آنالیز روش ژئوالکتریک نشان می‌دهد در چشمه فاماسب لایه بالایی متشکل از شن و ماسه دانه درشت با عمق ۵/۴۸ متر و دارای مقاومت ویژه ظاهری ۵۱/۶ اهم متر است. لایه با نفوذپذیری بسیار کم تا عمق ۲۱/۸ متر با مقدار مقاومت ویژه ظاهری ۱۱۳ اهم متر لایه زیرین می‌باشد، تا عمق ۷۷/۹ متری با مقاومت ویژه ظاهری ۴۹۸ اهم متر لایه‌ای سخت نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود. روش الکترومغناطیس چشمه در دو نقطه (ب و ج) ارزیابی شد در شکل (ب)، فرکانس لایه اول از



شکل (۵): نتایج ژئوالکتریک (الف) و الکترومغناطیس (ب، ج) چشمه فارسبان

روش ژئوالکتریک در چشمه فارسبان نیز نشان داد اولین لایه از یک لایه یکپارچه با نفوذپذیری کم با عمق ۶/۸۸ متر و مقدار مقاومت ویژه ظاهری ۳۳۴ اهم متر تشکیل شده است. لایه دوم تا عمق ۱۳/۷ متر (مقاومت ویژه ظاهری ۲۸/۸ اهم متر) لایه‌ای با دانه‌بندی خوب و نفوذپذیر است و لایه سوم از عمق ۱۳/۷ تا ۵۷ متر لایه‌ای نیمه نفوذپذیر با رس زیاد (۱۳۵

اهم متر) قرار دارد. با توجه به خروجی الکترومغناطیس تا فرکانس ۰/۰۵ هرتز لایه رویی مشابه روش ژئوالکتریک نفوذپذیر است و بعد آن در شکل (ب) تا عمق ۱۲۰ متر نیمه نفوذپذیر و در شکل (ج) تا عمق حدود ۱۰۰ متر نیمه نفوذپذیر می‌باشد (تا فرکانس ۰/۱۰ هرتز)، زیر دو لایه شکل‌های خروجی الکترومغناطیس لایه‌ای بسیار سخت قرار دارد.



شکل (۶): نتایج ژئوالکتریک (الف) و الکترومغناطیس (ب، ج) چشمه قلعه باروداب

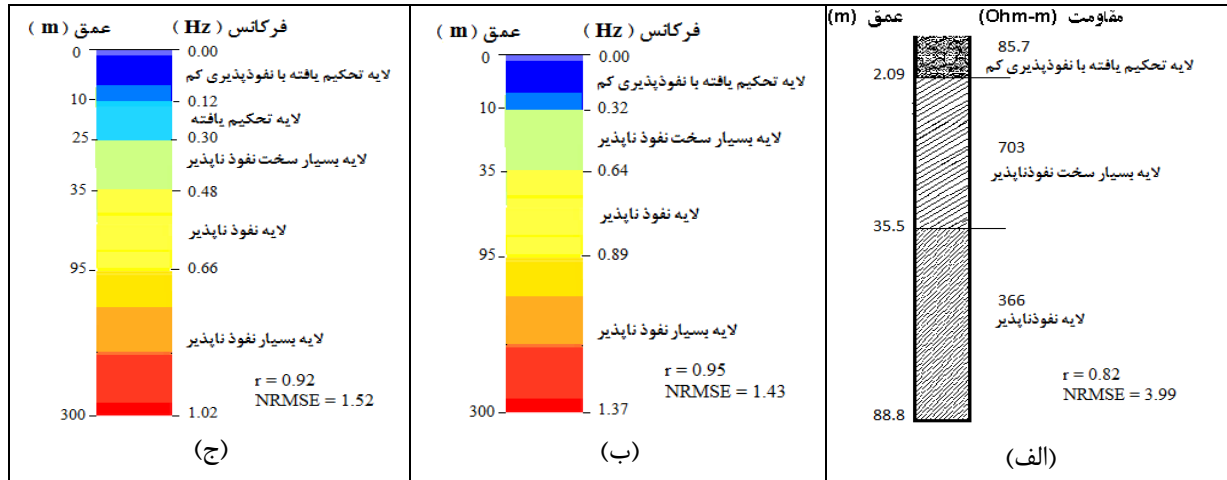
نتایج ژئوالکتریک قلعه باروداب که سومین چشمه مورد بررسی می‌باشد نشان داد لایه‌های بالایی با عمق نزدیک به ۲ متر و مقاومت ویژه ظاهری ۲۱۳ اهم متر لایه‌ای تحکیم یافته است و لایه‌ای با رس زیاد و دانه ریز تا عمق حدود ۱۰ متر

(مقاومت ظاهری حدود ۱۴/۱ اهم متر) لایه سوم است. لوگ-های الکترومغناطیس این چشمه (ب) تخلخل و وجود درز و شکاف تا عمق حدود ۱۰ متر در بازه فرکانس‌های ۰ تا ۰/۰۲ و ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ هرتز (عمق ۵۰ متر) را نشان می‌دهد و سایر



شکاف قرار دارد تا عمق ۱۲۰ متری و بعد لایه نفوذناپذیر و سخت تا عمق ۱۵۰ متر.

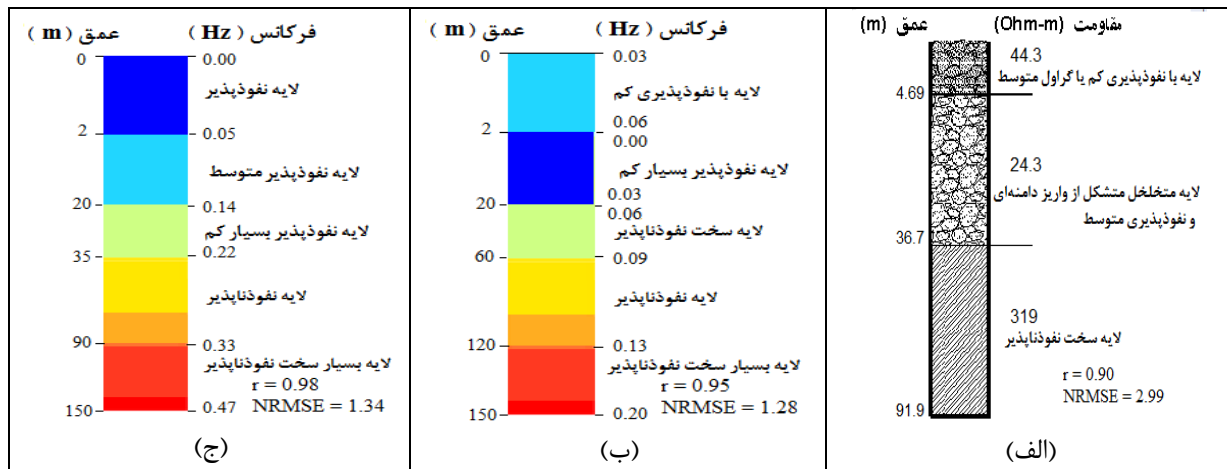
لایه‌ها تحکیم یافته و نفوذناپذیر هستند در نتایج لوگ سوم (ج) از فرکانس ۰ تا ۰/۱۸ لایه با نفوذپذیری متوسط و درز و



شکل (۷): نتایج ژئوالکتریک (الف) و الکترومغناطیس (ب، ج) چشمه گیان

روش الکترومغناطیس (شکل ب و ج) تا فرکانس حدود ۰/۳۰ هرترز است. لایه‌های سخت و نفوذناپذیر با مقاومت ویژه ظاهری بالاتر از ۳۶۶ اهم متر و فرکانس حدود ۰/۳۰ تا ۱ هرترز در هر دو روش لایه‌های زیرین قرار گرفته‌اند.

تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوالکتریک و الکترومغناطیس چشمه گیان در شکل ۷ (الف) لایه اول تحکیم یافته با نفوذپذیری کم (عمق حدود ۲ متر) و مقاومت ویژه ظاهری ۸۵/۷ اهم متر اندازه‌گیری شد که همسو با نتایج مستخرج از



شکل (۸): نتایج ژئوالکتریک (الف) و الکترومغناطیس (ب، ج) چشمه گنبدکبود

دقت در روش الکترومغناطیس بالاتر از روش ژئوالکتریک بود علاوه بر پایین تر بودن مقدار شاخص NRMSE نسبت به روش ژئوالکتریک مقدار ضریب همبستگی نیز در روش الکترومغناطیس بالاتر از روش ژئوالکتریک با مقدار حدود ۰/۹ می باشد. کمترین اختلاف اندازه گیری بین دو روش در چشمه گنبدکبود مشاهده شد در واقع می توان گفت مقدار اختلاف شاخص NRMSE در این چشمه بین دو روش مورد استفاده حدود ۱/۶ است. در نهایت می توان اظهار نمود هر دو روش به کار برده شده برای ۵ چشمه کارستیکی موجود در منطقه جهت تعیین لایه آبدار و اکتشاف آب نشان داد که روش الکترومغناطیس دقت بالایی در برآورد ضخامت لایه های زیرین مشابه روش ژئوالکتریک دارد و روش الکترومغناطیس با سرعت بالاتر و هزینه کمتر نسبت به سایر روش ها لایه های زیرین را تا عمق ۱۵۰ متر و ۳۰۰ متر بررسی می کند. دقت روش الکترومغناطیس و برتری آن در پژوهش Yulong و همکاران (۲۰۲۲) ارائه شده است که همسو با نتایج این تحقیق می باشد.

با توجه به اینکه تشکیل مخزن در زیر زمین به ویژگی فیزیکی و شرایط سنگ شناسی هر منطقه بستگی دارد و آزمون پمپاژ جهت تشخیص ضخامت لایه آبدار و پتانسیل آن دشوار و پرهزینه می باشد در این پژوهش سعی شد با استفاده از روش ژئوالکتریک و الکترومغناطیس ضخامت لایه آبدار ۵ چشمه مهم دشت نهاوند استان همدان تخمین زده شود تا جهت مدیریت مناسب به کار گرفته شود. منطقه نهاوند یک منطقه کارستیک می باشد و چشمه های کارستیکی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد گنبدکبود، فارسبان، قلعه باروداب، فاماسب و گیان به ترتیب از بیشترین تا کمترین میزان ضخامت لایه ابدار را در منطقه دارند. بیشترین مقدار ضخامت لایه آبدار در چشمه گنبدکبود با ۳۶ متر و در مقابل کمترین در چشمه گیان با عمق ۲ متر تخمین زده شد از نتایج ارائه شده در این پژوهش می توان به منظور استفاده در بخش مدیریت آب استفاده نمود، زیرا چشمه های مورد بررسی منبع اصلی تامین آب کشاورزی و شرب منطقه می باشد و لزوم

نتایج تجزیه و تحلیل روش ژئوالکتریک چشمه گنبد کبود نشان می دهد که لایه های رویی با نفوذپذیری کم، تخلخل و وجود درز و شکاف تا عمق حدود ۳۶ متر (مقاومت ویژه ظاهری ۴۴/۳ و ۲۴/۳ اهم متر) قرار دارد و لایه زیرین آن سخت و نفوذناپذیر است. در روش الکترومغناطیس همانگونه که در شکل (ب) نمایان است در محدوده فرکانس ۰ تا ۰/۰۶ هرتز و عمق حدود ۲۰ متر و در شکل (ج) تا عمق حدود ۳۵ متر (فرکانس ۰ تا ۰/۲۲ هرتز) لایه با نفوذپذیری کم تا متوسط وجود دارد. سپس لایه های نفوذناپذیر قرار گرفته اند.

بحث و نتیجه گیری

برای ۵ چشمه کارستی نهاوند مقدار ضخامت لایه آبدار با دو روش ژئوالکتریک و الکترومغناطیس اندازه گیری شد. در روش ژئوالکتریک یک سونداژ و روش الکترومغناطیس دو سونداژ الکتریکی در بالادست هر چشمه برداشت شد. سونداژ ژئوالکتریک در بین دو سونداژ الکترومغناطیس قرار گرفت و دقت دو روش بررسی گردید. همانگونه که در شکل های ۴ تا ۸ نیز مشخص می باشد، بر اساس نتایج شاخص NRMSE دقت روش الکترومغناطیس بالاتر از روش ژئوالکتریک است. در چشمه فاماسب مقدار ضریب NRMSE در روش الکترومغناطیس ۱/۴۱ و ۱/۴۵ می باشد در حالی که در روش ژئوالکتریک این ضریب ۷/۱۱ به دست آمد. بالا بودن این ضریب نشان از دقت پایین آن نسبت به روش الکترومغناطیس دارد. بررسی دقت روش های مورد بررسی در چشمه فارسبان نیز اختلاف ۶/۴ را بین دو روش نشان می دهد و دقت بالاتر روش الکترومغناطیس را نشان می دهد، در این چشمه مقدار ضریب همبستگی نیز در روش ژئوالکتریک حدود ۰/۲ و در روش الکترومغناطیس ۰/۸ می باشد که بالا بودن این ضریب (r) نیز موید برتری روش جدید الکترومغناطیس است. در بین چشمه های مورد بررسی قلعه باروداب دارای بیشترین مقدار اختلاف دقت بین دو روش مورد بررسی بود به طوریکه در روش ژئوالکتریک مقدار شاخص NRMSE حدود ۴۴ و در روش الکترومغناطیس در دو سونداژ ۱/۱۹ و ۱/۳۴ بود. در دو چشمه گیان و گنبدکبود نیز مشابه نتایج سه چشمه دیگر

مدیریت بهره‌برداری برای استفاده در طولانی مدت ضروری است.

منابع

- بائزاد، ح.، محب زاده، ح.، و علیایی، ا. ۱۳۹۲. کاربرد شبکه های عصبی مصنوعی و GIS در تخمین پارامترهای موثر در تعیین الگوی کشت (مطالعه موردی شهرستان نهاوند). علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۱۵، شماره ۱، ص ۲۳-۳۵.
بی نام. ۱۴۰۱. دفتر مطالعات پایه آب منطقه‌ای، همدان.
عباس نیا، م.، و نوذری، ه. ۱۳۹۳. ژئوفیزیک و اکتشاف آب‌های زیرزمینی. همایش ملی راهکارهای پیشروی بحران آب در ایران و خاورمیانه. شیراز. ۱-۵.
طاهری تیزرو، ع.، عبدالمهی، ع.، و فصیحی، ر. ۱۴۰۱. کاربرد روش ژئوالکتتریک در بررسی پارامترهای هیدرولیکی آب زیرزمینی. یافته‌های نوین زمین شناسی کاربردی، دوره ۶، شماره ۳۱، ص ۱۴۹-۱۶۲.
طاهری تیزرو، ع.، عابدینی، ش.، و کمالی، م. ۱۳۹۶. برآورد پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های آبدار با روش ژئوالکتتریک (مطالعه موردی: دشت چهاردولی). هیدروژئولوژی، سال دوم، شماره ۱، ص ۸۵-۱۰۱.
قبادی، م ح.، عبدی لر، ی.، و محبی، ی. ۱۳۹۰. اهمیت شناخت خصوصیات ژئومورفولوژیکی، سنگ شناسی و فیزیکی سنگ های کربناته، جهت ارزیابی توسعه کارست در منطقه نهاوند. فصلنامه زمین شناسی کاربردی، سال ۷، شماره ۴، ص ۲۹۹-۳۱۰.
ناصری، ح ر.، علیجانی، ف.، و نخعی، م. ۱۳۹۱. اکتشاف آب زیرزمینی در مناطق کارستی جنوب باختر ایذه با استفاده از ترموگرافی ژئوالکتتریک. مجله علوم زمین. سال ۲۲، شماره ۸۶، ص ۱۰۷ - ۱۱۸.
Alarifi, S.S., Abdelrahman, K. and Hazaea, B.Y. 2022. Near-surface groundwater exploration using the geoelectrical resistivity method: A case study of Wadi Nisah, Riyadh, Saudi Arabia. Journal of King Saud University-Science, 34(6): 102207.
Aghanabati, A. 2004. Geology of Iran. Geological survey of Iran, 606 pp. (In Persian)
Alexei, A., and Bobachev, F. 1990-2001. Designed for automated and interactive semi-automated interpreting if magnetotelluric sounding data. Pub Moscow State, University Geological faculty. Dep. of Geophysics, 151.
Berdychevsky, M.H. 1962. Telluric Current Prospecting; China Industrial Press: Beijing, China.
Ezema, O. K., Ibut, J. C. and Daniel, N. O. 2020. Geophysical investigation of aquifer repositories in Ibagwa Aka, Enugu State, Nigeria, using electrical resistivity method. Groundwater for Sustainable Development 11: 100458
Ford, D. C., and Williams, P. 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley & Sons, 576 PP.
Loke, M. H. 2002. 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, Online Tutorial edition, (drmhloke@hotmail.com).
Mogaka, D.N. 2010. Geophysical Characterization of the Lithology and Structure of the Olobanita Well Field, Lower Lake Baringo Basin, Kenya Rift: Implication on Groundwater Occurrence (p. 118). Doctoral dissertation, University of Nairobi.
Omeje, E. T., Ugbor, D. O., Ibut, J. C. and Obiora, D. N. 2021. Assessment of groundwater repositories in Edem, Southeastern Nigeria, using vertical electrical sounding. Arabian Journal of Geosciences 14: 421. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06769-1>.
Obiora, D. N. and Ibut, J. C. 2020. Geophysical assessment of aquifer vulnerability and management: a case study of University of Nigeria, Nsukka, Enugu State. Applied Water Science 10: 29. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1113-7>.



PQWT. 2022. Hunan Puqi Geological Exploration Equipment Research Institute of Changsha, Hunan, China.

Radulescu, V., Radulescu, F., Diacopolos, C. and Popescu, M. 2007. Geoelectrical study for delineating underground cavities in karst areas, Coastal Zone Processes and Management. Environmental Legislation, GEO-ECO-MARINA. 89-95.

Satarugsa, P., Meesawat, N., Manjai, D., Yangsanpoo, S. and Arjwech, R. 2004. Man-made cavity imaging with 2D resistivity technique, International Conference on Applied Geophysics, Chiang Mai, Thailand, pp. 203-210.

Tizro, A.T., Voudouris, K. and Basami, Y. 2012. Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method—a case study in western Iran. Journal of hydrology, 454: 160-172.

Wang, P.F., Tan, X.H., Zhang, L.Y., Li, Y.J., and Liu, R.H. 2019. Influence of particle diameter on the wettability of coal dust and the dust suppression efficiency via spraying. Process Saf. Environ. Prot., 132: 189–199.

Yang, T.C., Xia, D.L.; Wang, Q.R., and Fu, G.H. 2017. Theoretical Research and Application of Natural Electric Field Frequency Selection Method; Central South University Press: Changsha, China.

Yulong, L., Tianchun, Y., Tizro, A T., and Yang, L. 2022. Fast Recognition on Shallow Groundwater and Anomaly Analysis Using Frequency Selection Sounding Method. Water, 15(1): 96.