



Estimation of hydraulic conductivity of Nahavand karstic springs using Geoelectric method

Rojin Fasihi¹ and Abdollah Taheri Tizro^{2*}

1- Ph.D. student of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article type:

Original Research

Article history:

Received: 2024 October 6

Accepted: 2025 March 12

Keywords:

Karst

Spring

Geo-electric

Hydraulic

Conductivity

ABSTRACT

Hydraulic conductivity is one of these necessary parameters. Nahavand Plain, located in the west of Iran, is one of the most important plains for drinking and agriculture uses, which has limestone and karst formations. In this research, five Geo-electrical soundings were used to investigate and estimate hydraulic conductivity values of five karstic springs in Nahavand plain of Hamadan province. Soundings were measured upstream of each spring. Quantitative interpretation of Geo-electric data was done using IPI2win software. The final results showed that the apparent resistivity of the springs of Famaseb, Faresban, Ghale Baroodab, Giyan and Gonbadkabood are equivalent to 82.3, 81.9, 113.55, 85, and 44.3 Ohm-meters, respectively. The highest value of hydraulic conductivity was estimated by using the investigated relations in Giyan Spring to be 26.40 m/day and the lowest value of this parameter in Ghale Baroodab Spring was estimated to be 4.62 m/day, which is in line with the porosity value (26.74 percent) which has the lowest porosity and hydraulic conductivity among the five investigated springs. The Geo-electric method is one of the most effective methods in determining and diagnosing subsurface layers. These results can be used for better management of water resources in the region.

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.29917.1637>

Corresponding author: Abdollah Taheri Tizro, E-mail: ttizro@basu.ac.ir

Cite this article: Rojin Fasihi and Abdollah Taheri Tizro (2026). Estimation of hydraulic conductivity of Nahavand karstic springs using Geoelectric method, New Findings of Applied Geology, Vol. 20, No. 39, pp: 116-126.



Journal of New Findings of Applied Geology by Bu-Ali Sina University Press is licensed under CC

BY-NC 4.0

Web Site: <https://nfag.basu.ac.ir> E-mail: nfag@basu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Fresh water is a limited and vulnerable resource, and many people still do not have access to sufficient resources for the basic needs. Global increase in economic activities and improvement of living standards has led to increased competition and conflict over limited fresh water resources (Nyaberi, 2010). The ever-increasing population growth and the increase in water demand for domestic and agricultural use have created an urgent need to address the issue of aquifer portability. For this reason, the exploration of geological formations of aquifer units in order to identify potential areas with high hydraulic conductivity is very important. (Omeje et al., 2021) The increase in porosity and hydraulic conductivity leads to a high degree of transmissibility, which confirms the assumption of high permeability (George et al. 2017). These hydrogeological features can be estimated using electrical resistivity method. Electrical resistivity method as a geophysical method, among the different geophysical methods used in groundwater investigation, has the widest acceptance in underground water exploration. (Obiora and Ibuot, 2020) Areas with high hydraulic conductivity can be identified using Electrical resistance explored.

Materials and Methods

Nahavand plain with a catchment area of 1902 Km² is one of the plains of the upper basin of the Karkhe River. The resistivity method originated from the work of the Schlumberger brothers in the 1920s.

Vertical electrical soundings (VESs) were conducted with Schlumberger configuration in the upstream parts of selected springs. The maximum distance of current electrodes was kept ($AB/2 = 75-100$ m). The main purpose of interpreting of data is to determine the true resistivity and thickness of the different layers based on purely theoretical considerations. Apparent resistivity is done with the purpose of measuring the surface potential difference due to the fluid flow inside the ground and as a result the relative estimation of the hydraulic parameters of the area such as porosity and so on. Electrodes are distributed along a line during resistive sounding tests. The intended voicing position is centered on a midpoint. The electrode arrangement used in data collection was the Schlumberger electrode

array because it takes the most time in terms of field work.

Results and Discussion

In Famaseb spring, there are three different depths of 5.48 meters, 21.8 meters and 77.9 meters with different resistivity values. The results of measuring Faresban spring were also similar to Famaseb spring at three depths and with three values of apparent resistivity. In the said spring, the first layer was from the ground to a depth of 6.88 meters (value of apparent resistivity was 334 ohm-meters). The third spring under investigation is the spring of Ghale Baroodab, whose apparent resistivity results show that the apparent resistivity is 213 ohm-meters up to a depth of nearly 2 meters, which is a very consolidated layer, and then there is a clay layer up to a depth of about 10 meter and the apparent specific resistance value is about 1.14-ohm meter. In the Giyan spring, the layer is consolidated and has low permeability up to a depth of about 2 meters, and the apparent resistivity is 85.7 ohm-meters, and then a very hard and impermeable layer is placed. Finally, the results of the analysis of the Gonbadkabood spring show that from the surface of the ground to a depth of 4.69 meters There is a layer with low permeability or medium gravel with an apparent resistivity of 44.3 ohm-meters.

Conclusion

In this research, an attempt was made to estimate the hydraulic conductivity of 5 important springs in the Nahavand plain of Hamadan province using the Geo-electrical method in order to be used for proper management. Nahavand region is a karstic region and therefore karstic springs were investigated. The hydraulic conductivity value of 4.62 m/day was observed as the lowest hydraulic conductivity in the Ghale Baroodab spring, which is in limit value with the porosity. The hydraulic conductivity of the springs has been calculated from the highest to the lowest order in the springs of Giyan, Gonbadkabood, Faresban and Famaseb. The hydraulic conductivity of the Giyan spring is 5.71 times higher than the Ghale Baroodab spring, and the difference in the hydraulic conductivity of the Ghale Baroodab spring is 5.33 times less than the Faresban spring. Giyan spring, which has the highest hydraulic conductivity.



تخمین هدایت هیدرولیکی چشمه‌های کارستیکی نهاوند با روش ژئوالکتریک

روژین فصیحی^۱ و عبدالله طاهری تیزرو^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدایت هیدرولیکی یکی از این پارامترهای ضروری است. دشت نهاوند واقع در غرب ایران یکی از دشت‌های مهم از نظر استفاده شرب و کشاورزی می‌باشد که دارای سازندهای آهکی و کارستی است. در این پژوهش، از ۵ سونداژ ژئوالکتریک به منظور بررسی و تخمین مقادیر هدایت هیدرولیکی ۵ چشمه کارستیکی دشت نهاوند استان همدان استفاده شد. سونداژها در بالادست هر چشمه اندازه‌گیری شد. تفسیر کمی داده‌های ژئوالکتریک با استفاده از نرم‌افزار IPI2win صورت گرفت. نتایج نهایی نشان داد مقاومت ویژه ظاهری چشمه‌های فاماسب، فارسبان، قلعه باروداب، گیان و گنبدکبود به ترتیب معادل ۸۲/۳، ۸۱/۹، ۱۱۳/۵۵، ۸۵ و ۴۴/۳ اهم متر است. بیشترین مقدار تخلخل با مقدار ۵۵ درصد متعلق به چشمه فارسبان است و چشمه قلعه باروداب با ۲۶ درصد کمترین مقدار تخلخل را دارد. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی با استفاده از روابط مورد بررسی در چشمه گیان ۲۶/۴۰ متر بر روز و کمترین مقدار در چشمه قلعه باروداب معادل ۴/۶۲ متر بر روز تخمین زده شد که با مقدار تخلخل همسو می‌باشد؛ به‌طوری‌که در بین ۵ چشمه مورد بررسی کمترین مقدار تخلخل و هدایت هیدرولیکی را چشمه قلعه باروداب دارد. از این نتایج به‌منظور مدیریت بهینه منابع آب منطقه می‌توان بهره گرفت.
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲	
کلیدواژه‌ها: کارست چشمه ژئوالکتریک هدایت هیدرولیکی	

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.29917.1637>

* نویسنده مسئول: عبدالله طاهری تیزرو، E-mail: ttizro@basu.ac.ir

استناد: روژین فصیحی و عبدالله طاهری تیزرو (۱۴۰۵). تخمین هدایت هیدرولیکی چشمه‌های کارستیکی نهاوند با روش ژئوالکتریک، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۲۰، شماره ۳۹، صفحه ۱۱۶ تا ۱۲۶.

این نشریه علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را براساس لایسنس کپی‌رایت کامنز (CC BY-NC 4.0) به نویسندگان واگذار کرده است.



آدرس وبسایت نشریه: <https://nfag.basu.ac.ir> ایمیل نشریه: nfag@basu.ac.ir

۱- پیشگفتار

آب شیرین یک منبع محدود و آسیب‌پذیر 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 (نیایی، ۲۰۱۰). رشد روزافزون جمعیت جامعه و افزایش تقاضای آب برای مصارف خانگی و کشاورزی، نیاز مبرمی به رسیدگی به موضوع انتقال‌پذیری آبخوان را به وجود آورده است. به همین دلیل، کاوش سازندهای زمین‌شناسی واحدهای آبخوان به منظور شناسایی مناطق بالقوه با هدایت هیدرولیکی بالا بسیار مفید خواهد بود (اومجه و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش تخلخل و هدایت هیدرولیکی منجر به میزان بالایی از انتقال‌پذیری^۱ می‌شود که پیش‌فرض نفوذپذیری بالا را تأیید می‌کند (جورج و همکاران، ۲۰۱۷). این ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی را می‌توان با استفاده از روش مقاومت الکتریکی تخمین زد. روش مقاومت الکتریکی به‌عنوان یک روش ژئوفیزیکی، در میان روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مورد استفاده در بررسی آب‌های زیرزمینی، وسیع‌ترین پذیرش را در اکتشاف آب‌های زیرزمینی دارد (اویورا و ایبوت، ۲۰۲۰). مناطق با هدایت هیدرولیکی بالا را می‌توان با استفاده از روش مقاومت الکتریکی کاوش کرد. روش مقاومت الکتریکی شامل صداگذاری الکتریکی عمودی در مطالعه آب‌های زیرزمینی است (اومجه و همکاران، ۲۰۲۱). روش صداگذاری الکتریکی در مناطق با هدایت هیدرولیکی بالا نیازمند صرف انرژی کمتری در عملیات میدانی است. ارزش تشخیصی نسبتاً بالا، قابلیت حمل تجهیزات و عمق نفوذ بیشتر این روش در تعیین مکان‌هایی با ضخامت ظاهری مناطق هوازده و مکان‌های آبخوان مولد اقتصادی و همه‌کاره است (ازما و همکاران، ۲۰۲۰). پیشرفت در تکنیک‌های ژئوفیزیک با اطلاعات زمین‌شناسی در دسترس، تخمین دقیق تخلخل، نفوذپذیری و سایر پارامترهای هیدرولیکی را از طریق اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی زمینی، که در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقرون‌به‌صرفه هستند، امکان‌پذیر کرد (جورج، ۲۰۲۰). پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه ژئوالکتریک گواه برتری روش الکتریکی عمودی (VES) در بررسی آب‌های زیرزمینی

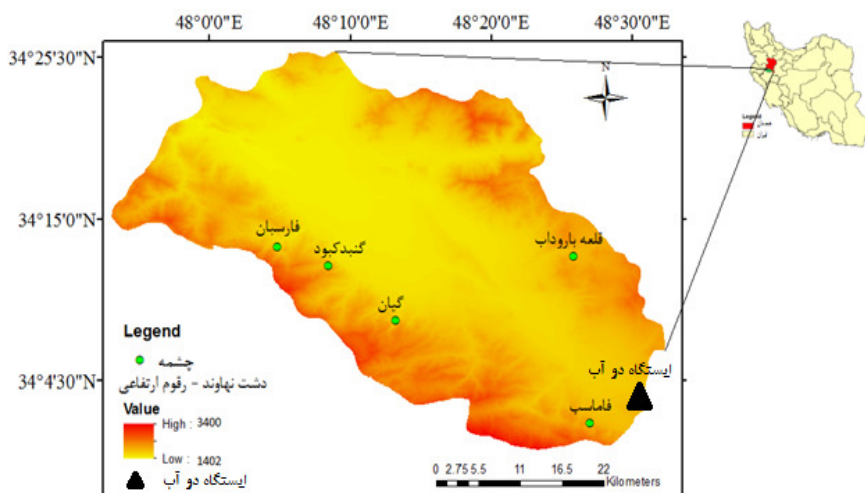
است (اومجه و همکاران، ۲۰۲۱؛ اریلمازتورکان و کورکمز، ۲۰۲۱)

یکی از مؤثرترین عوامل جهت حرکت سیال در زیرزمین تنش‌های درجا اطراف سنگ‌های متخلخل می‌باشد (کنز، ۲۰۱۴؛ کنز و کالیکی، ۲۰۱۸). فاکتور K که در رابطه دارسی ظاهر می‌گردد خاصیتی را از خاک یا سنگ نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی نام‌گرفته است. در حقیقت این پارامتر، از خصوصیات مهم محیط متخلخل و یا خاک بوده و بیانگر سهولت عبور مایعات از این محیط می‌باشد (بای بوردی، ۱۹۸۴). چندین محقق بر روی ماهیت مشخصه واحدهای هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی مختلف مطالعه کرده‌اند. فصیحی و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی بیان نمودند طی دوره‌های آبی کم‌ترین بارش دریافتی دشت نه‌اوند مربوط به بخش شمال شرقی و بیش‌ترین آن به ناحیه جنوب و جنوب شرقی تعلق دارد. تمام مطالعات تحقیقاتی انجام شده بر روی آب‌های زیرزمینی توسط محققان مختلف در مکان‌های مختلف صورت پذیرفته است. از جمله: اومجه و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی ژئوفیزیکی قابلیت انتقال و خواص هیدروژئولوژیکی سیستم آبخوان با استفاده از تکنیک VES در منطقه Edem، نیجریه شرقی پرداختند. نیایی (۲۰۲۲)، پارامترهای هیدرولیکی آبخوان کنیا را با استفاده از صدای الکتریکی عمودی، داده‌های ثبت گمانه و رسانایی آب گمانه بررسی کرد. اریلمازتورکان و کورکمز (۲۰۲۱)، رابطه بین پارامترهای هیدرولیک و ژئوالکتریک در سفره‌های آبرفتی بورس، ترکیه، را بررسی نمودند، طاهری‌تیزرو و همکاران (۲۰۱۷، ۲۰۱۲، ۲۰۱۰) طی سه پژوهش به ترتیب در دشت چهاردولی، ماهیدشت و کنگاور مقادیر پارامترهای هیدرولیکی را با روش ژئوالکتریک ارزیابی نمودند و در تمامی روش‌ها دقت روش مورد استفاده به اثبات رسید. طاهری‌تیزرو و همکاران (۲۰۲۲) پارامترهای هیدرولیکی دشت زرین‌آباد گل‌تپه را با استفاده از روش ژئوالکتریک تخمین زدند نتایج محاسبه شده نشان داد که در تعیین ضرایب هیدرولیکی هیچ تفاوت معنی‌داری بین دو روش لوگ‌های حفاری، و روش ژئوالکتریک وجود ندارد. دشتی و همکاران (۲۰۱۹) آبخوان دشت زوزن را با استفاده از سونداژهای الکتریکی بررسی کردند نتایج این پژوهش نشان داد، مقایسه تفسیر داده‌های ژئوالکتریک با داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل آزمون

^۱ Transmissivity

چشمه‌های موجود در دشت نهاوند استان همدان به‌عنوان منابع اصلی کشاورزی و شرب در منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی این پژوهش: ۱- اندازه‌گیری مقدار مقاومت ویژه ظاهری در بالادست هر چشمه. ۲- اختلاف پتانسیل روی سطح به دلیل جریان در داخل زمین. ۳- محاسبه مقدار هدایت هیدرولیکی چشمه‌های نهاوند با استفاده از روش ژئوالکتریک می‌باشد.

پمپاژ با دقت قابل قبولی با هم انطباق داشتند. در نتایج تمامی پژوهش‌های صورت گرفته به برتری روش‌های ژئوالکتریک به‌منظور تخمین پارامترهای مختلف هیدرودینامیکی و شناسایی شرایط زیرزمینی اشاره شده است. عزیزی و محمدزاده (۲۰۱۳) پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت امامزاده جعفر گچساران را با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه تخمین زدند و نتیجه مطلوب همراه کاهش هزینه‌ها را گزارش نمودند.



شکل ۱. نقشه محدوده مطالعاتی

Fig. 1. Map of the study area

جدول ۱. مختصات جغرافیایی محل سونداژهای ژئوالکتریک بالادست هر چشمه

Table.1 Geographic coordinates of the location of Geo-electric soundings upstream of each spring

چشمه	(m) x	(m) y
فاماسب	۲۶۴۵۶۶/۵۷	۳۷۶۸۴۱۵/۴۰
فارسیان	۲۳۰۹۹۸/۳۵	۳۷۹۰۴۰۶/۴۲
قلعه باروداب	۲۶۳۲۲۲/۲۶	۳۷۸۸۴۲۷/۵۵
گیان	۲۴۳۶۵۷/۴۴	۳۷۸۱۱۷۰/۸۴
گنبدکبود	۲۳۶۴۶۵/۱۹	۳۷۸۸۰۳۰/۷۷

جنوب‌شرق به طرف شمال‌غرب بوده، مرتفع‌ترین نقطه حوضه با بیش از ۳۴۰۰ متر ارتفاع در قسمت جنوب غربی دشت قرار دارد. پست‌ترین نقطه ۱۴۰۲ متر (منطبق با ایستگاه هیدرومتری دوآب در خروجی حوضه) در قسمت شمال غربی دشت واقع شده است. ارتفاع متوسط حوضه آبریز ۱۸۹۰ متر از سطح دریا می‌باشد (بی‌نام، ۲۰۲۳). در شکل ۱ موقعیت چشمه‌های مورد بررسی ارائه گردیده همچنین مختصات محل هر سونداژ ژئوالکتریک در بالادست هر چشمه در جدول ۱ ارائه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

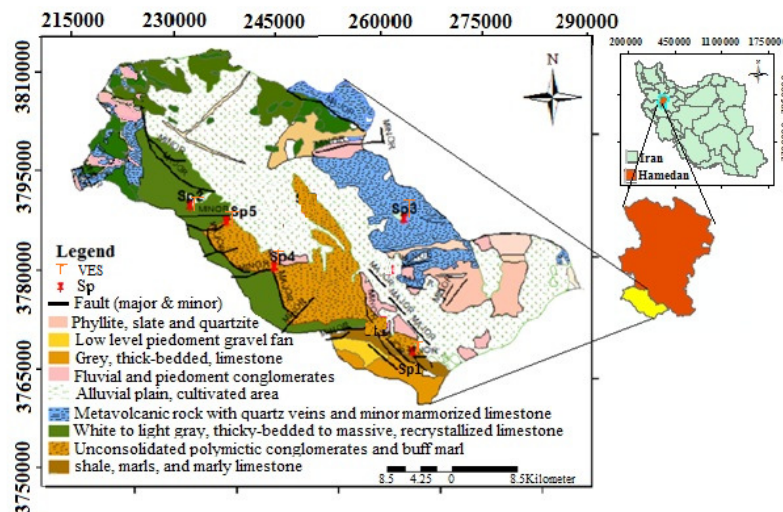
منطقه مورد مطالعه

دشت نهاوند با وسعت حوضه آبریز ۱۹۰۲ کیلومترمربع یکی از دشت‌های حوضه علیای رودخانه کرخه محسوب می‌گردد و در شمال‌شرق کوه‌های گرین از سلسله ارتفاعات زاگرس قرار گرفته است. وسعت اراضی (دشت) نهاوند ۶۴۴ کیلومترمربع و مساحت ارتفاعات حاشیه دشت ۱۰۴۶ کیلومترمربع (۶۲ درصد) می‌باشد. شیب عمومی دشت از

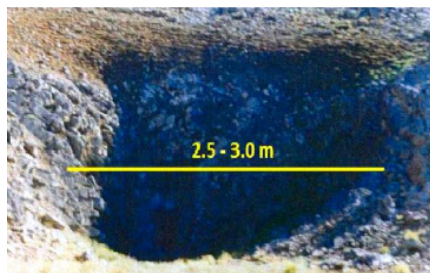
۳- زمین‌شناسی منطقه

بررسی‌ها نشان داد که اشکال و پدیده‌های کارستی گسترش قابل‌توجهی را به‌صورت سطحی و زیرسطحی در منطقه دارند. کارن‌ها^۲ به‌طور کلی در راستای درزه‌ها^۳ به وجود آمده‌اند که با عمقی بیش از یک متر، از پدیده‌های عمومی در سنگ‌آهک کارستی می‌باشند (شکل ۲-د). در

قسمت برهنه سنگ‌های آهکی چاه‌های انحلالی^۴ دیده می‌شوند که در شکل ۲-ج نشان داده شده است. پونورها یا چاه‌های مکنده^۵ از دیگر پدیده‌های کارستی موجود در منطقه هستند که در ارتفاعات مربوط به نوار بالایی کوه گرین دیده می‌شوند. علاوه بر موارد ذکر شده، باید یادآور شد که محل تشکیل غارها عمدتاً در سنگ‌آهک‌های توده‌ای با ضخامت زیاد قرار دارد (قبادی و همکاران، ۲۰۱۱).



(الف)



(ج)



(ب)



(د)

شکل ۲. الف- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه همراه موقعیت سونداژ ژئوالکتریکی. ب- پونور. ج- چاه انحلالی. د- کارن (قبادی و همکاران، ۲۰۱۱).

Fig. 2. A- Geological map of the study area with the location of the geo-electric sounding. B- Ponor. C- Dissolution well. D- Karren (Ghobadi et al., 2011)

^۴ Dissolution well

^۵ Ponor

^۲ karren

^۳ joints

مقدار آن در سنگ‌های با تخلخل بین‌دانه‌ای، کمتر از یک، در سنگ‌های با تخلخل درزه‌ای و کربنات‌ها $1 \geq$ و در بیشتر رسوبات سخت نشده برابر یک در نظر گرفته می‌شود. جهت محاسبه نفوذپذیری از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$k_f = \frac{d^2}{180} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه k_f نفوذپذیری ذاتی (m^2) و d قطر ذرات (m) می‌باشد و ϕ معادل تخلخل (بدون بعد). سپس هدایت هیدرولیکی بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید.

$$K = \frac{\delta_w g}{\mu} k_f \quad (\text{رابطه ۵})$$

که طبق رابطه ۵، K ، هدایت هیدرولیکی (m/s)، δ_w دانسیته آب (1000 kg/m^3)، g شتاب جاذبه (9.81 m/s^2) و μ ویسکوزیته دینامیک آب (0.0014 kg/m.s) است (دشتی و همکاران، ۲۰۱۹).

۴-۱- نرم‌افزار IPI2win

به‌منظور تفسیر کمی ابتدا داده‌ها به‌صورت 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 با نتایج بازدید میدانی 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 همراه با به‌کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی منطقه فراهم می‌شود. نتایج حاصل از روش ژئوالکتریک می‌تواند سیمای بهتری از ساختارهای زمین‌شناسی منطقه برای بالادست هر چشمه و لایه آبدار در اختیار پژوهشگر بگذارد (الکسی و بوباچو، ۱۹۹۰-۲۰۰۱).

۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی به کمک روش ژئوالکتریک برای ۵ چشمه دشت نهاوند به‌صورت خلاصه در شکل ۳ ارائه شده است. مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در نظر گرفته شده برای سه لایه در هر چشمه با روش ژئوالکتریک و نوع و جنس لایه‌های زیرین بالادست هر

شکل ۲- الف زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و موقعیت هر چشمه با نماد Sp در شکل مشخص شده است. مقطع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲- ب ارائه گردیده، در این مقطع می‌توان لایه‌ای از سنگ‌آهک و سنگ‌آهک دولومیتی و سنگ‌های پیروکلاستیک همراه با سنگ‌آهک را به‌عنوان سنگ بستر در زیر رسوبات شنی مشاهده نمود.

۴- ژئوالکتریک

مقاومت ویژه ظاهری^۶ با هدف اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل سطحی به دلیل جریان سیال در داخل زمین و در نتیجه تخمین نسبی پارامترهای هیدرولیکی منطقه همچون تخلخل و غیره انجام می‌شود. 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. آرایش الکترودی مورد استفاده در جمع‌آوری داده‌ها آرایه الکترودهای شلومبرگر^۷ بود زیرا از نظر کار میدانی بیشترین زمان را دارد.

حداکثر فاصله الکترودهای جریان (AB) بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر ($AB/2=75-100$ متر) اندازه‌گیری شد. هدف اصلی از تفسیر داده‌های مقاومت، تعیین مقاومت واقعی و ضخامت لایه‌های مختلف صرفاً براساس ملاحظات نظری است. آرچی^۸ سال ۱۹۴۲ فرمول تجربی را طبق روابط ۱ تا ۳ برای تخمین تخلخل پیشنهاد کرد:

$$\rho_w = \frac{10^4}{EC} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$FF = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$FF = a \phi^m \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این روابط ρ مقاومت ویژه ظاهری توده‌سنگ (اهم متر)، ρ_w مقاومت ویژه آب سازند (اهم‌متر)، EC هدایت الکتریکی ویژه آب (میکروموس بر سانتی‌متر)، FF فاکتور مقاومتی سازند (بدون بعد)، ϕ معادل تخلخل (بدون بعد)، m ضریب سیمان‌شدگی که برای سنگ مشخص نسبتاً ثابت و مستقل از سیال است، a فاصله طی شده توسط جریان الکتریکی را مشخص می‌کند و معادل چیزی است که به آن پیچاپیچی مسیر جریان گفته می‌شود. این ضریب به شکل منافذ، ارتباط بین آن‌ها و نوع سنگ بستگی دارد.

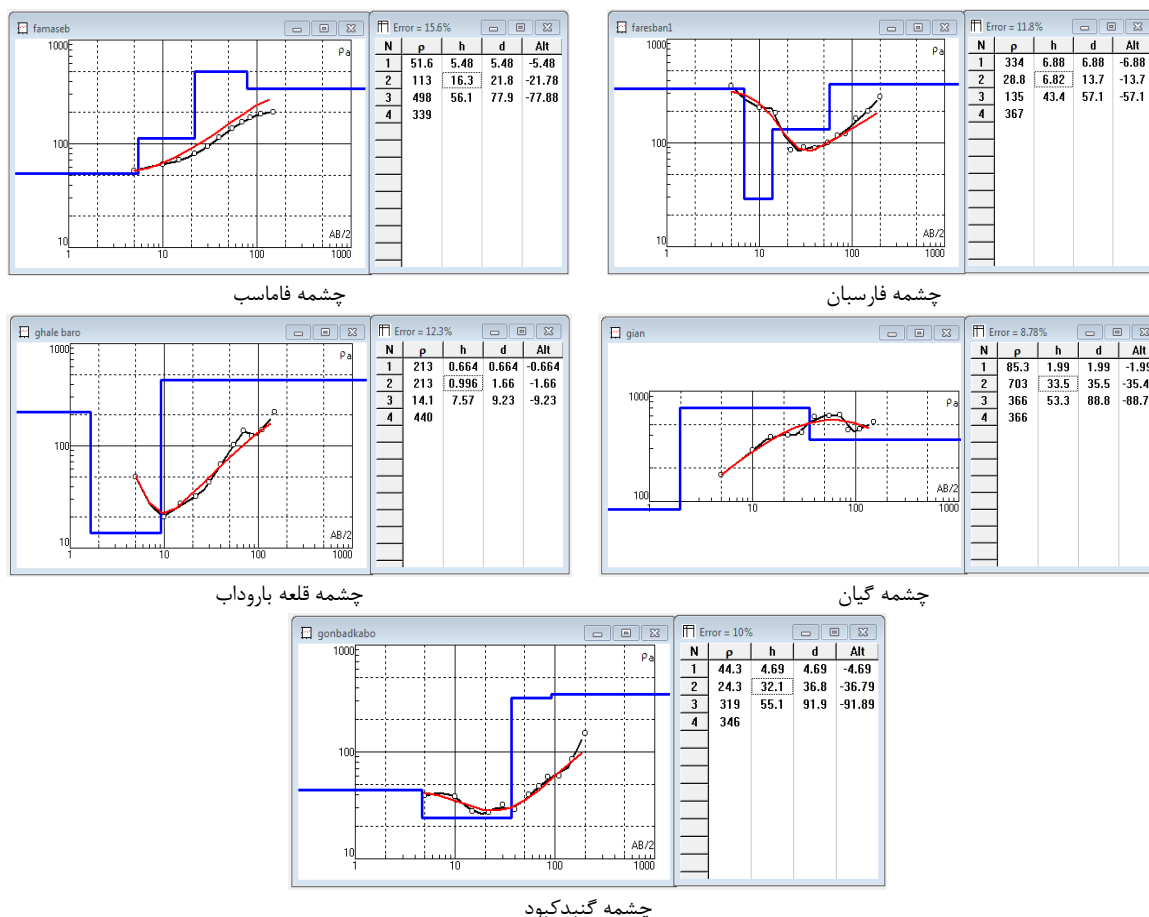
^۸ Archie

^۶ Resistivity

^۷ Schlumberger

روش ژئوالکتریک گواه اندازه‌گیری دقیق روش در مناطق مورد بررسی است.

چشمه به تفکیک مشخص گردید. نتایج کلی روش به کار برده شده نشان می‌دهد. مقدار مقاومت ویژه ظاهری در



شکل ۳. نتایج ژئوالکتریک به تفکیک چشمه‌های مورد بررسی
Fig. 3. Geo-electrical results according to the investigated springs

ظاهری ۴۹۸ اهم‌متر، قرار دارد که همسو با نتایج پژوهش فصیحی و همکاران (۲۰۲۴) می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری چشمه فارسبان نیز مشابه چشمه فاماسب در سه عمق و با سه مقدار مقاومت ویژه ظاهری بررسی شد. در چشمه مذکور لایه اول از سطح زمین تا عمق ۶/۸۸ متر (مقدار مقاومت ویژه ظاهری ۳۳۴ اهم‌متر) بود. لایه دوم نیز از عمق ۶/۸۸ متر تا عمق حدود ۱۳/۷ متر با مقاومت ویژه ظاهری ۲۸/۸ اهم‌متر قرار دارد که لایه‌ای با دانه‌بندی خوب و نفوذپذیر است. در نهایت لایه پایانی، لایه‌ای نیمه نفوذپذیر با رس زیاد (تا عمق ۱۳۵ متر) و لایه‌ای بسیار سخت می‌باشد. سومین چشمه مورد بررسی چشمه قلعه باروداب است. نتایج مقاومت ویژه ظاهری آن نشان می‌دهد، تا عمق نزدیک به ۲ متر مقاومت ویژه ظاهری ۲۱۳ اهم‌متر

همان‌گونه که در شکل ۳ نمایان است نقاط روی نمودار بیانگر تعداد برداشت‌های صحرائی می‌باشد که در بخش مواد و روش‌ها ذکر گردید مقدار نصف فاصله الکتروود جریان (AB/2) بر حسب متر در برابر مقاومت ویژه ظاهری (ρ) بر حسب اهم‌متر رسم گردیده است. خط آبی تغییرات دامنه مقاومت ظاهری (اهم‌متر) نسبت به عمق نفوذ (متر) را نشان می‌دهد. خط قرمز نیز گویای بهترین برازش است. بر اساس نتایج شکل ۴ چشمه فاماسب دارای سه عمق مختلف می‌باشد: ابتدا عمق ۵/۴۸ متر، با مقدار مقاومت ویژه ظاهری ۵۱/۶ اهم‌متر که لایه تحکیم یافته با نفوذپذیری کم است. عمق دوم از ۵/۴۸ تا ۲۱/۸ متر (مقاومت ویژه ظاهری معادل ۱۱۳ اهم‌متر) لایه‌ای بسیار تحکیم یافته می‌باشد. لایه‌ای سخت و نفوذناپذیر تا عمق ۷۷/۹ متر و مقاومت ویژه

دارای مقاومت ویژه ظاهری ۲۴/۳ اهم متر است، لایه‌ای متخلخل متشکل از واریز دامنه‌ای و نفوذپذیری متوسط است. لایه سوم که سخت و نفوذناپذیر است از عمق ۳۷ متر تا ۹۱/۲ متر با مقاومت ویژه الکتریکی ۳۱۹ اهم متر ثبت شده است.

۵-۱- خروجی محاسبات تخلخل و هدایت هیدرولیکی

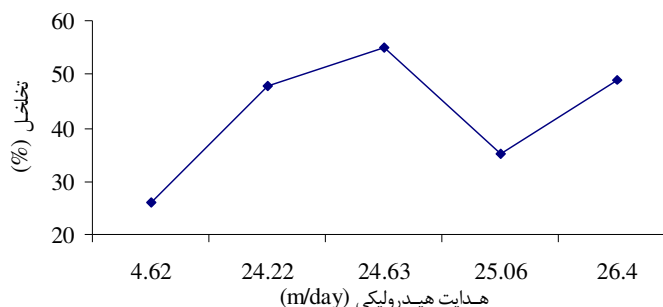
به منظور محاسبه تخلخل و هدایت هیدرولیکی از معادلاتی که در بخش مواد و روش‌ها ذکر گردید استفاده شد. با توجه به جنس طبقات لایه آبدار در منطقه مورد مطالعه و بازدید میدانی مقدار m با توجه به پژوهش دووتون (۱۹۸۶) و کاروترز (۱۹۶۸)، برای رسوبات تحکیم نیافته برابر ۱/۳ در نظر گرفته شد. در این پژوهش، با استفاده از مقدار مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده برای لایه اشباع و خشک در بالادست ۵ چشمه دشت نهاوند مقدار دو پارامتر هیدرودینامیکی محاسبه شد و در جدول ۲ ارائه شده است.

می‌باشد، لایه مذکور بسیار تحکیم یافته است. سپس لایه رس تا عمق حدود ۱۰ متر و مقدار مقاومت ویژه ظاهری حدود ۱۴/۱ اهم متر قرار دارد. لایه زیرین نیز که مقاومت ویژه ظاهری بیش از ۴۰۰ اهم متر دارد، لایه‌ای بسیار متراکم و نفوذناپذیر است. بررسی اطلاعات کیفی روش‌های ژئوالکتریک در چشمه گیان نشان‌دهنده لایه تحکیم یافته و نفوذپذیری کم تا عمق حدود ۲ متر و مقاومت ویژه ظاهری ۸۵/۷ اهم متر است. بعد لایه بسیار سخت و نفوذناپذیر از عمق ۲ تا ۳۵/۵ متر قرار گرفته، که مقدار مقاومت ویژه ظاهری آن ۷۰۳ اهم متر می‌باشد. لایه زیرین (از عمق حدود ۳۵ متر تا ۸۸ متر) نیز که مقاومت ویژه ظاهری بیش از ۳۶۶ اهم متر را دارد به عنوان لایه‌ای نفوذناپذیر نشان داده شده است. در نهایت نتایج آنالیز چشمه گنبد کبود گویای این است که از سطح زمین تا عمق ۴/۶۹ متر لایه‌ای با نفوذپذیری کم یا گراول متوسط با مقاومت ویژه ظاهری ۴۴/۳ اهم متر قرار دارد. لایه دوم تا عمق حدود ۳۷ متر

جدول ۲. نتایج محاسبات تخمین تخلخل و هدایت هیدرولیکی

Table. 2 Calculation results of porosity and hydraulic conductivity estimation

K (m/day)	Φ (%)	Φ (-)	FF (-)	ρ_{dry} (Ω -m)	ρ_{sat} (Ω -m)	ρ_w (Ω -m)	P (Ω -m)	d (mm)	EC (μ mhos/cm)	چشمه
۲۴/۲۲	۴۸	۰/۴۸	۲/۵۵	۴۸۹	۸۲/۳	۳۲/۱۵	۵۱/۶	۱/۷	۳۱۱	فاماسب
۲۴/۶۳	۵۵	۰/۵۵	۲/۱۴	۳۳۴	۸۱/۹	۳۸/۱۶	۳۳۴	۱/۳۳	۲۶۲	فارسبان
۴/۶۲	۲۶	۰/۲۶	۲/۵۵	۲۱۳	۱۱۳/۵۵	۲۰/۴۴	۲۱۳	۲	۴۸۹	قلعه باروداب
۲۶/۴۰	۴۹	۰/۴۹	۲/۴۸	۵۳۴/۵	۸۵	۳۴/۲۴	۸۵	۱/۷	۲۹۲	گیان
۲۵/۰۶	۳۵/۱۷	۰/۳۵	۳/۸۸	۳۱۹	۴۴/۳	۳۳/۴۴	۴۴/۳	۳	۲۹۹	گنبدکبود



شکل ۴. مقایسه تخلخل و هدایت هیدرولیکی چشمه‌های مورد بررسی

Fig. 4. Comparative of porosity and hydraulic conductivity of the investigated springs

محدوده با سازند سنگ‌آهک متبلور سفید تا خاکستری روشن، با بستر ضخیم قرار دارد، که می‌تواند در افزایش آبدهی چشمه مؤثر باشد. مقدار هدایت هیدرولیکی با میزان ۴/۶۲ متر بر روز در چشمه قلعه باروداب به عنوان کمترین هدایت هیدرولیکی مشاهده گردید که بر اساس معادلات

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، مقدار تخلخل از ۲۶ تا ۵۵ درصد در ۵ چشمه مورد بررسی متغیر بوده است. بیشترین تخلخل در چشمه فارسبان و کمترین در چشمه قلعه باروداب محاسبه شد. با توجه به زمین‌شناسی چشمه‌های مورد بررسی می‌توان گفت چشمه فارسبان در

نهایند یک منطقه کارستیک می‌باشد و چشمه‌های کارستی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی در چشمه گیان و در مقابل کمترین مقدار پارامتر ذکر شده در چشمه قلعه باروداب (تخلخل ۲۶ درصد و هدایت هیدرولیکی ۴/۶۲ متر بر روز) تخمین زده شد که همسو با میانگین مقادیر دبی اندازه‌گیری شده چشمه‌ها است. با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان بیان نمود که به اهداف ذکر شده در این پژوهش دست یافته شد. از نتایج این پژوهش می‌توان در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب منطقه بهره گرفت، زیرا چشمه‌های مورد بررسی، منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه به شمار می‌روند؛ از این رو، مدیریت صحیح و بهره‌برداری پایدار از آن‌ها برای تأمین نیازهای بلندمدت ضروری است.

References

- Alexei, A., and Bobachev, F. (1990-2001) Designed for automated and interactive semi-automated interpreting of magnetotelluric sounding data. Pub Moscow State, University Geological faculty. Dep. of Geophysics, 151.
- Anonymous (2023) Annual report western regional water, Hamedan, Iran. (in Persian).
- Archie, G. E. (1942) The Electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. American Instrument of Mining and Metallurgical Engineering, 146: 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.
- Ayers, J. F. (1990) Conjunctive use of Geophysical and Geological Data in the Study of an Alluvial Aquifer. Ground water, 27(5): 625- 632.
- Azizi, F., and Mohammadzadeh, H. (2013) Estimation of hydrogeological parameters by geoelectric method and estimation of approximate volume and extractable volume of Imamzadeh Jafar Gachsaran aquifer. Journal of geography and regional development, 21(11): 179-195. (in Persian).
- Baybordi, M. (1984) Principles of Irrigation Engineering, first volume, water and soil relations, Tehran University Press, third edition, 205-220. (in Persian).
- Dannowski, G., and Yaramanci, U. (1999) Estimation of Water Content and Porosity Using Combined Radar and Geoelectrical Measurements. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, (4): 1-13.
- Dashti, Z., Rezaei, M., Azadi, A., and Arjmand Sharif, M. (2019) Estimation of Hydrodynamic Coefficients of Zouzan Plain Aquifer Using of Electrical Sounding Data. Iranian journal of watershed management science, 13 (44): 38-47. (in Persian).

مربوطه و شکل ۴ مقدار هدایت هیدرولیکی همسو با مقدار تخلخل است. به‌طوری‌که با افزایش یا کاهش هریک دیگری نیز به تبع افزایش یا کاهش می‌یابد. میزان هدایت هیدرولیکی چشمه‌ها از بیشترین به کمترین به‌ترتیب در چشمه‌های گیان (۲۶/۴۰ متر بر روز)، گنبدکبود (۲۵/۰۶ متر بر روز)، فارسبان (۲۴/۶۳ متر بر روز) و فاماسب (۲۴/۲۲ متر بر روز) محاسبه شده است. هدایت هیدرولیکی چشمه گیان ۵/۷۱ برابر بیشتر از چشمه قلعه باروداب است و همچنین اختلاف هدایت هیدرولیکی چشمه قلعه باروداب ۵/۳۳ برابر کمتر از چشمه فارسبان می‌باشد. چشمه‌گیان که بیشترین میران هدایت هیدرولیکی را دارد از نظر زمین‌شناسی در محدوده کنگلومرای چند آمیختی غیرتحکیم‌یافته و خاک آهک‌دار (مارل) قرار گرفته است. سپس چشمه گنبد کبود با هدایت هیدرولیکی ۲۵/۰۶ متر بر روز که دارای تخلخل ۳۵/۱۷ درصد می‌باشد. در واقع زمین‌شناسی چشمه گنبدکبود مشابه گیان است. از نظر زمین‌شناسی چشمه فاماسب ناحیه اطراف آن شیل (سنگ رس)، مارل (خاک آهک‌دار) و سنگ‌آهک رسی می‌باشد. با توجه به مقدار دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط آب منطقه‌ای همدان (۱۴۰۱) بیشترین دبی متعلق به چشمه‌های گیان با میانگین مقادیر ۹۳۶/۱۸ لیتر در ثانیه ثبت شده است. در مقابل دبی چشمه قلعه باروداب با مقدار میانگین ۴۸/۸۳ لیتر در ثانیه کمتر از سایر چشمه‌های ذکر شده می‌باشد این نتایج همسو با هدایت هیدرولیکی بالای چشمه گیان و هدایت هیدرولیکی پایین چشمه قلعه باروداب می‌باشد. بالا بودن مقدار هدایت هیدرولیکی در چشمه‌های مورد بررسی گواه این است که چشمه‌ها کارستی بوده و عبور آب از بین ذرات به‌راحتی صورت می‌پذیرد. ۵ چشمه مورد بررسی در منطقه کارستیک قرار گرفته و دارای تخلخل و هدایت هیدرولیکی بالا می‌باشند.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تشکیل مخزن در زیرزمین به ویژگی‌های فیزیکی و شرایط سنگ‌شناسی هر منطقه بستگی دارد و آزمون پمپاژ جهت تشخیص ویژگی‌های هیدرودینامیکی دشوار و پرهزینه می‌باشد. در این پژوهش سعی شد با استفاده از روش ژئوالکتریک مقدار هدایت هیدرولیکی پنج چشمه مهم دشت نهایند استان همدان تخمین زده شود تا جهت مدیریت مناسب مورد استفاده قرار گیرد. منطقه

- Dovetone, J. H. (1986) Log analysis of subsurface geology. New York: Wiley & Sons. 10. Edem, Southeastern Nigeria, using vertical electrical sounding. *Arabian Journal of Geosciences*, 14: 421.
- Eryılmaz Türkkan, G., and Korkmaz, S. (2021) Relationship between hydraulic and geoelectrical parameters for alluvial aquifers in Bursa, Turkey—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21): 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08614-x>.
- Ezema, O. K., Ibout, 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: 100485. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100458>.
- Fasihi, R., Taheri Tizro, A., and Marof, S. (2024) Comparative studies of electromagnetic and geoelectrical methods to estimate the porosity and specific yield of karst aquifer, West of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83(16): 469. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11767-z>.
- Fasihi, R., Taheri Tizro, A., and Marof, S. (2023) Investigating the spatial distribution of future precipitation in Nahavand plain, Hamedan province. *New Findings in Applied Geology*, 19. (in Persian).
- George, N. J., Ibuot, J. C., Ekanem, A. M. and George, A. M. (2018) Estimating the indices of inter-transmissibility magnitude of active surficial hydrogeologic units in Itu, Akwa Ibom State, southern Nigeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(134): 1-16.
- George, N. J. (2020) Appraisal of hydraulic flow units and factors of the dynamics and contamination of hydrogeological units in the littoral zones: a case study of Akwa Ibom State University and its environs, Mkpate Enin L.G.A, Nigeria. *Journal of the International Association for Mathematical Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09673-9>.
- Ghobadi, M. H., Abdilor, Y., and Mohebi, Y. (2011) The Importance of recognition of morphology, Lithology and physical properties in development of karst in Nahavand area. *Journal of Geotechnical Geology (Applied Geology)*, 7(4): 299-310. (in Persian).
- Knez, D. (2014) Stress State Analysis in Aspect of Well bore Drilling Direction. *J. Arch. Min. Sci.* 59: 71–76. [CrossRef].
- Knez, D., and Calicki, A. (2018) Looking for a New Source of Natural Proppants in Poland. *J. Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, 66: 3–8. [CrossRef]. <https://doi.org/10.24425/119052>.
- Nyaberi, D. M. (2022) Determination of the Aquifer and Its Hydraulic Parameters Using Vertical Electrical Sounding, Borehole Log Data and Borehole Water Conductivity: A Case Study of Olbanita Menengai Area, Nakuru, Kenya. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10(11): 204-224. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.1011014>.
- Nyaberi, D. M. (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). Masters' Dissertation, University of Nairobi.
- 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: 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06769-1>.
- Taheri Tizro, A., Voudouris, K. S., Salehzade, M., and Mashayekhi, H. (2010) Hydrogeological framework and estimation of aquifer hydraulic parameters using geoelectrical data: a case study from West Iran. *Hydrogeology Journal*, 18(4): 917-929.
- Taheri Tizro, A., 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.
- Taheri Tizro, A., Aabedini, Sh., and Kamali, M. (2017) Estimating of the hydraulic parameters of aquifers using geo-electrical method (Case study: Chahardoli Plain, Kurdistan). *Hydrogeology*, 2(1): 85-101. <https://doi.org/10.22034/hydro.2017.5004>
- Taheri Tizro, A., Abdollahi, A. R., and Fasihi, R. (2022) Application of geo-electric method in the study of hydraulic parameters of ground water. *Journal of new findings in Applied Geology*, 16 (31): 149 – 161. (in Persian).