

Article Type: Case Study

نوع مقاله: مطالعه موردی

## Interaction of Alluvial and Karstic Aquifers in North of Allah Akbar Highlands Dargaz Using Vertical Electrical Sounding (VES) Method

H. Mohammadzadeh<sup>1\*</sup>, M. GholamkarAliabadi<sup>2</sup>, J. Hashemi<sup>3</sup>

1- Professor, Groundwater and Geothermal Research Center (GRC), Water and Environment Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 1, 2, 3- Professor, M.Sc. in Hydrogeology, and M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\*(Corresponding Author Email: mohammadzadeh@um.ac.ir)

Received: 01-10-2024

Revised: 30-11-2024

Accepted: 06-12-2024

Available Online: 03-03-2025

## برهمکنش آبخوان‌های آبرفتی و کارستی شمال ارتفاعات الله اکبر درگز با روش سوندینگ مقاومت ویژه الکتریکی قائم (VES)

حسین محمدزاده<sup>۱\*</sup>، محمدغلامکار علی‌آبادی<sup>۲</sup>، جعفرهاشمی<sup>۳</sup>

۱. استاد، گروه پژوهشی تحقیقات آب‌های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب)، پژوهشکده آب و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۱ و ۲ و ۳- به ترتیب استاد، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی و دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\*(رایانامه نویسنده مسئول، E-Mail: mohammadzadeh@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

### Abstract

Investigating aquifers and determining the alluvial and karst aquifers interaction, especially in the border areas of the country, is very important. With geoelectrical methods (Vertical Electrical Sounding - VES), it is possible to determine the subsurface geological layering, aquifer layers, the depth to bedrock and the apparent resistivity ( $\rho_a$ ) of the geological layers. In this paper, by performing 40 VES in the northern plain of Dargaz Allah Akbar Heights (DAH), calculating the  $\rho_a$  of the layers and interpreting the geoelectrical sections, the aquifers up to the depth of 350 meters and the relationship between alluvial and Tirgan karstic aquifer (TKA) have been investigated. The results show the presence of alluvial aquifers up to 20 meters depth in the south, east and west of Chapeshlo, north and northwest of Daghdar and west of Dargaz industrial town, as well as the presence of deep karstic aquifers in the southeast of Chapeshlo, northeast of Sugandi, north of Gandab, and west of Daghdar. The changes in  $\rho_a$  and the depth to bedrock show that there is not much relationship between the alluvial and TKA. Considering the absence of highly discharged springs around DAH and the low thickness of the alluvial aquifer, it can be concluded that most groundwater of the TKA, except in limited places at the foot of the DAH (Cheholmir and Cherlaq areas) has little effect on feeding of alluvial aquifer of Dargaz southern plain, and due to the barrier function of the deeper fine-grained layers, the groundwater flow paths are towards the depths or Dorbadam and Shamkhal valleys.

**Keywords:** Vertical Electrical Sounding (VES), Alluvial Aquifer, Karst Aquifer, Allah Akbar Heights, Dargaz.

### چکیده

بررسی آبخوان‌ها و تعیین برهمکنش آبخوان‌های آبرفتی و کارستی، بخصوص در مناطق مرزی کشور، بسیار ضروری و مهم می‌باشد. با روش‌های ژئوالکتریکی (سوندینگ مقاومت ویژه الکتریکی قائم - VES)، می‌توان لایه‌بندی زمین‌شناسی زیرسطحی، لایه‌های آبدار، عمق سنگ کف آبخوان‌ها و مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) لایه‌های زمین‌شناسی را تعیین نمود. در این مقاله، با برداشت ۴۰ سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی با روش شلومبرژره در دشت شمال ارتفاعات الله اکبر درگز، و محاسبه  $\rho_a$  لایه‌ها و تفسیر مقاطع ژئوالکتریکی و لایه‌های آبدار تا عمق حدود ۳۵۰ متری، برهمکنش آبخوان‌های آبرفتی و کارستی بررسی شده است. نتایج وجود آبخوان آبرفتی تا عمق ۲۰ متری را در جنوب، شرق و غرب شهر چاپشلو و شمال و شمال‌غربی روستای داغدار و غرب شهرک صنعتی درگز، و همچنین وجود مکان‌های مستعد آبخوان کارستی عمقی در جنوب‌شرقی شهر چاپشلو و شمال‌شرقی روستای سوگندی و شمال روستای گنداب و در غرب روستای داغدار نشان می‌دهد. بررسی تغییرات  $\rho_a$  لایه‌ها و عمق سنگ کف، نشان می‌دهد برهمکنش چندانی بین آبخوان آبرفتی با آبخوان کارستی تیرگان وجود ندارد. با توجه به عدم ظهور چشمه‌های پرآب در پیرامون ارتفاعات الله اکبر و کم ضخامت بودن آبخوان آبرفتی، می‌توان نتیجه گرفت بیشتر آب زیرزمینی آبخوان کارستی تیرگان، جز در نقاط محدودی در پای ارتفاعات الله اکبر (محدوده چرلاق، چهلمیر) تاثیر چندانی در تغذیه آبخوان آبرفتی دشت جنوبی درگز نداشته و به دلیل عملکرد سدی لایه‌های دانه‌ریز عمقی، مسیرهای جریان آب زیرزمینی به سمت اعماق و یا دره‌های دربادام و شمخال می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** سوندینگ مقاومت ویژه الکتریکی قائم (VES)، آبخوان آبرفتی، آبخوان کارستی، ارتفاعات الله اکبر، درگز.

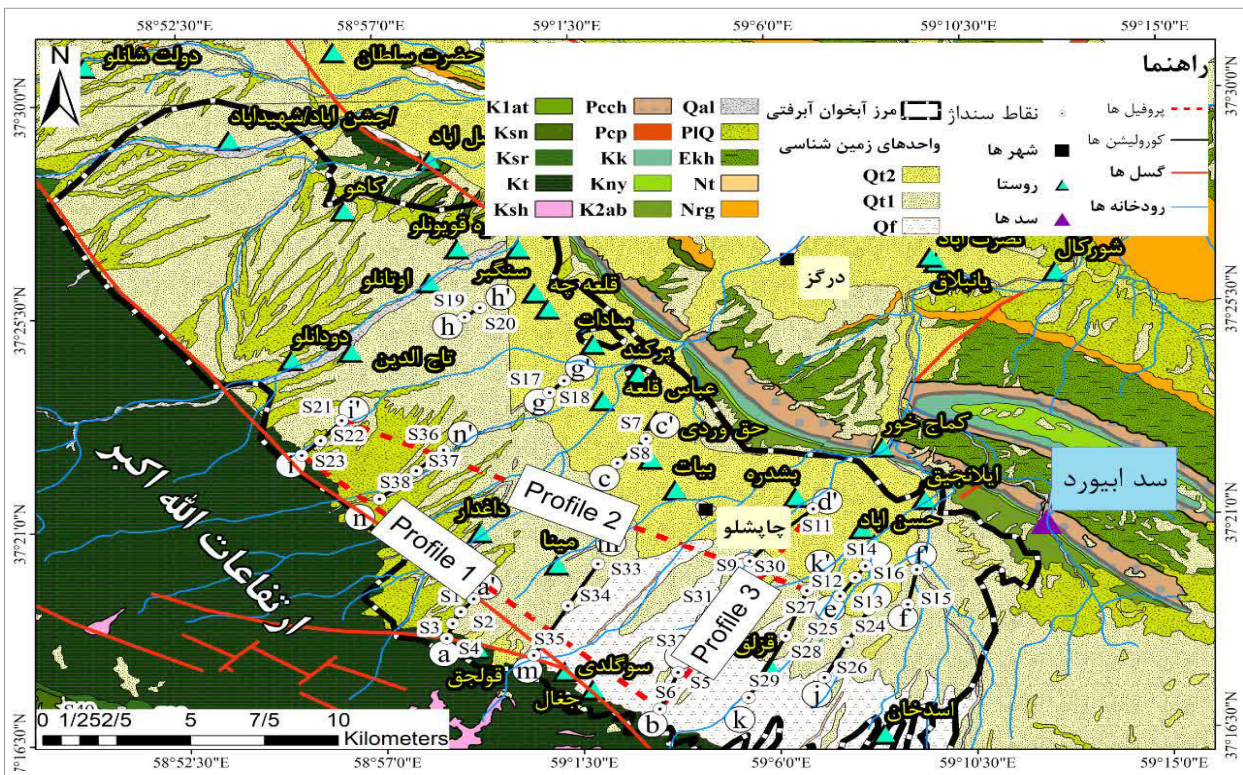
ژئوالکتریکی پراکنده‌ای انجام داده است.

در این مقاله، با برداشت‌های ژئوالکتریکی (سوندینگ مقاومت ویژه الکتریکی قائم (VES)  $\rho$ ) و محاسبه مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) لایه‌ها و تفسیر برداشت سونداژ ژئوالکتریکی در ۴۰ نقطه از دشت مرزی درگز و دامنه ارتفاعات الله اکبر، ستون‌های زمین‌شناسی<sup>۲</sup>، نمیرخ‌های ژئوالکتریکی<sup>۳</sup> و مقاطع زمین‌شناسی تهیه شده و از روی آنها تغییرات ضخامت لایه‌های زمین‌شناسی تحت‌الارضی، عمق و تراز سنگ کف آبخوان دشت درگز، وجود آب‌های زیرزمینی آبرفتی و کارستی، و همچنین عمق گسترش آبخوان کارستی در زیر دشت درگز و برهمکنش آب‌های زیرزمینی آبخوان آبرفتی با آبخوان کارستی سازند تیرگان ارتفاعات الله اکبر بررسی شده است.

### داده‌ها و روش تحقیق

• **موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت نقاط سونداژهای ژئوالکتریک**  
دشت درگز حوضه‌ای مرزی است و در شمال استان خراسان رضوی و در فاصله ۲۲۰ کیلومتری شمال‌غربی شهر مشهد در محدوده جغرافیایی ۵۸ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۱۱ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱).

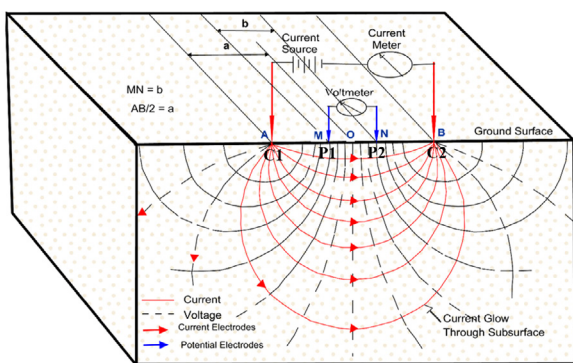
مهمترین مسائل در شناخت آبخوان‌ها، فهم دقیق جریان آب‌های زیرزمینی در درون سازندها و تعیین عمق سنگ کف آبخوان، تعیین خصوصیات لایه‌های زمین‌شناسی، تعیین لایه‌های آبدار آبرفتی، تعیین آبخوان‌های کارستی و بررسی برهمکنش بین آبخوان‌ها می‌باشد. برای پی بردن به خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان و بررسی برهمکنش آبخوان‌های آبرفتی و کارستی نیاز به بررسی زمین‌شناسی تحت‌الارضی با مطالعات آزمایش پمپاژ و ژئوفیزیکی می‌باشد (Kirsch, ۲۰۰۶; Williams و Paillet, ۲۰۲۳; عزیزی و محمدزاده, ۱۳۹۲). از روی اطلاعات ژئوفیزیکی و حفاری‌های ژئوتکنیکی و پمپاژ می‌توان تا حدودی به لایه‌بندی درون زمین، خصوصیات هیدرودینامیکی و نفوذپذیری آبخوان و جریان آب‌های زیرزمینی در درون سازندها پی برد. از این‌رو، روش‌های ژئوالکتریک برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی در جهان و ایران (سوگندی, ۱۳۹۵; Barnie و همکاران, ۲۰۱۴; Jerbi و همکاران, ۲۰۲۲; Seaton و Burbey, ۲۰۲۲; Verecken و همکاران, ۲۰۰۶; Ishola و Olufemi, ۲۰۲۴; Idowu و Ojo, ۲۰۲۴) استفاده شده است. در منطقه مورد مطالعه نیز شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی (۱۳۷۴) و شرکت مهندسی مشاور ست کوپ (۱۳۵۰) به نقل از گزارش شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی (۱۳۸۹)، مطالعات



شکل ۱- موقعیت نقاط سونداژهای ژئوالکتریک و راستاهای خطوط برداشت و نیمرخ‌های انطباق ستون‌های زمین‌شناسی (راستاهای AA'- به موازات ارتفاعات الله اکبر، BB'- در دشت از شمال غرب به جنوب شرق و CC'- در دشت از جنوب به شمال) در آبخوان جنوبی درگز بر روی نقشه یکصد هزار درگز

• روش سوندینگ مقاومت ویژه الکتریکی قائم (VES) و دستگاه بکار گرفته شده

در مطالعات اکتشاف منابع آب زیرزمینی و بررسی برهمکنش آبخوان‌های آبرفتی و کارستی معمولاً از روش سوندینگ مقاومت ویژه ظاهری<sup>۲</sup> (ژئوالکتریک) استفاده می‌شود. اساس روش سوندینگ مقاومت ویژه الکتریکی قائم، تعیین مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری لایه‌های مختلف زیرسطحی زمین، یعنی مقاومت لایه‌ها در مقابل عبور جریان الکتریکی، می‌باشد. در این روش با تزریق جریان با فرکانس کم در خاک و اندازه‌گیری پتانسیل، می‌توان مقاومت ویژه واقعی سازه‌های پیموده شده را حداکثر تا عمق ۵۰۰ متر، که البته در ۲۵۰ متر سطحی دقت بالاتری را نشان می‌دهد، اندازه‌گیری نمود. بدیهی است که مقاومت ویژه به سنگ‌شناسی، محتوای آب و هوا، اندازه ذرات تشکیل‌دهنده خاک، جنس ذرات تشکیل‌دهنده خاک، تخلخل، غلظت یون‌های منافذ، نمک‌های محلول در آب و ... بستگی دارد. در این مقاله روش شلومبرژه<sup>۳</sup>، یکی از کاربردی‌ترین روش‌های ژئوالکتریک در اکتشاف آب‌های زیرزمینی، استفاده شده است که اصول آن بر مبنای القای جریان الکتریکی به درون زمین و ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌باشد. جریان الکتریکی مستقیم یا متناوب با فرکانس پایین (ایجاد شده توسط باتری یا دستگاه مولد از طریق دو الکتروود فولادی (C1, C2) به داخل زمین فرستاده می‌شود (شکل ۳). ولتاژ و پتانسیل حاصل از این جریان در داخل زمین بوسیله دو الکتروود برنجی (P1, P2)، که با فاصله مشخص قرار دارند (PIP2=MN=a)، اندازه‌گیری می‌شود. برای برداشت اعماق زیاد، فواصل الکتروودهای جریان C1 و C2 (C1C2=AB=L) در دو جهت مختلف نسبت به الکتروودهای پتانسیل، P1 و P2 افزایش داده می‌شود.

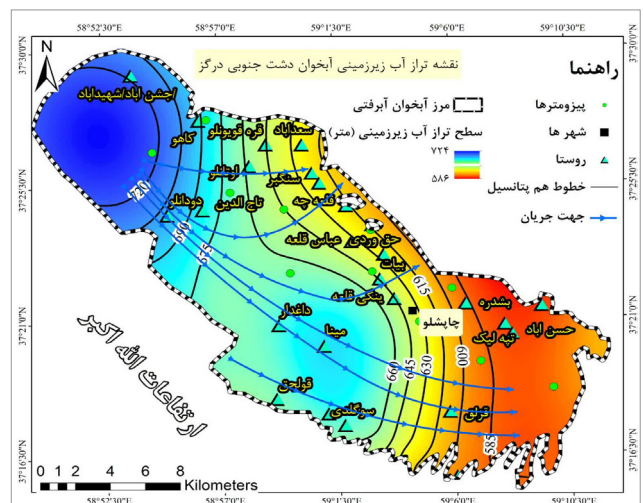


شکل ۳- چگونگی اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین در روش ژئوالکتریک - آرایش شلومبرژه (Corvallis, ۲۰۰۰)

برای رسم نیمرخ‌های ژئوالکتریک و تفسیر داده‌های برداشت شده در هریک از ایستگاه‌ها و به دست آوردن مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و ضخامت لایه‌ها، از منحنی‌های استاندارد و نرم‌افزار Surfer IPI2WIN

وسعت محدوده مطالعاتی ۳۱۲۹ کیلومتر مربع می‌باشد که ۲۲۲۱ آن را ارتفاعات و مابقی محدوده را دشت (با ارتفاع ۴۵۰ متر از سطح دریا) می‌پوشاند. بر اساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۹۸۲) محدوده درگز بخشی از حوضه رسوبی هزار مسجد-کپه داغ می‌باشد و از لحاظ مورفولوژی خصوصیات کوهستانی دارد. دشت درگز بصورت یک حوضه بسته است که از جنوب توسط ارتفاعات آهکی و از شمال و شرق توسط تپه ماهورهای نئوزن محصور شده است. گسل‌های متعددی با روندهای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، شمالی-جنوبی و شمال‌شرقی-جنوب‌غربی در منطقه دیده می‌شوند (ولایتی، ۱۳۶۲). در محدوده مورد مطالعه، چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی متنوعی شامل سازندهای آهکی (تیرگان (Kt)، کلات (Kk)، چهل کمان (Pcch) و خانگیران (Ekh))، سازندهای مارنی و شیلی (سرچشمه (Ksr)، سنگانه (Ksn)، و آب تلخ (Kab))، سازندهای ماسه سنگی (آتامیر (Kat) و نیزار (Kny))، لایه‌های قرمز میوسن-پلیوسن (Ncg, Nrg) و واحد کنگلومرای (PIQ) آبرفتی (Qt1) دیده می‌شود که با توجه به ترکیب کانی‌شناسی و تراکم سنگ‌شناسی هر یک دارای دامنه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری متفاوتی هستند.

با توجه به نقشه تراز آب زیرزمینی به دست آمده از داده‌های پیژومترهای دشت جنوبی در مهر ماه ۱۴۰۲ (شکل ۲)، در آبخوان دشت جنوبی درگز، بیشترین ارتفاع تراز آب زیرزمینی در پیژومتر محدوده روستای کاهو با حدود ۷۲۵ متر در بخش غربی دشت و کمترین ارتفاع تراز آب زیرزمینی در پیژومتر محدوده روستای قزلق با حدود ۵۸۷ متر در بخش شرقی دشت می‌باشد. بطور کلی جهت جریان آب‌های زیرزمینی از بخش‌های غربی و جنوبی دشت به سمت شمال‌شرق و شرق می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه تراز سطح آب و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت جنوبی درگز (مهرماه ۱۴۰۲)

## نتایج و بحث

• بررسی عمق لایه‌های زمین‌شناسی زیرسطحی در محل سونداژها و تهیه نیمرخ ژئوفیزیکی و مقاطع زمین‌شناسی با بررسی و تفسیر مقادیر مقاومت‌های ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) محاسبه شده برای برداشت‌های با فواصل مختلف در محل سونداژهای ژئوالکتریک انجام گرفته در دشت جنوبی درگز (جدول ۱)، ابتدا با توجه به مقادیر مقاومت ویژه لایه‌ها و نمادهای استاندارد لایه‌های زمین‌شناسی (USGS، ۲۰۰۶) و بصورت مدل‌سازی یک بعدی، ستون‌های زمین‌شناسی در هر یک از محل سونداژهای ژئوالکتریکی تهیه شده و سپس با مدل‌سازی دوبعدی، تغییرات جانبی سازندها با تهیه نیمرخ‌ها یا مقاطع زمین‌شناسی در راستاهای مختلف برداشت تا عمق حدود ۴۰۰ متر، مطالعه و تفسیر شده است.

جدول ۱- مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) محاسبه شده برای برداشت‌های با فواصل مختلف در محل هر یک از سونداژها (مقاومت ویژه ظاهری برای کل سونداژها به صورت فایل اکسل تکمیلی مقاله ارائه شده است)

AB/2 (m)	MN/2 (m)	$\rho_a$ ( $\Omega m$ )					
		S2	S8	S9	S29	S32	S37
۳	۰/۵	۳۴۳	۷۳۱	۷۶	۱۳۱	۷۹۳	۳۴۰
۵	۰/۵	۲۱۲	۴۵۹	۶۱۴	۱۲۸	۴۶۶	۲۱۰
۷	۰/۵	۱۸۲	۲۵۹	۴۵۰	۱۲۳	۳۴۷	۱۷۷
۷	۲	۱۵۳	۱۹۸	۳۲۷	۹۲	۲۶۷	۱۴۸
۱۰	۰/۵	۱۷۲	۱۹۶	۳۳۲	۱۲۰	۳۰۲	۱۷۰
۱۰	۲	۱۴۳	۱۳۸	۲۰۹	۸۸	۲۲۱	۱۳۹
۱۵	۲	۱۲۶	۱۱۷	۱۰۶	۹۰	۱۸۸	۱۲۱
۲۰	۲	۹۳	۱۱۳	۷۰	۹۰	۱۷۰	۹۰
۲۰	۶	۷۹	۱۰۰	۸۶	۸۸	۱۶۱	۷۵
۳۰	۲	۷۴	۱۰۶	۲۸	۹۱	۱۱۸	۷۰
۳۰	۶	۵۹	۹۴	۴۴	۹۱	۱۰۹	۵۵
۵۰	۶	۶۹	۱۰۰	۲۷	۸۱	۶۰	۶۳
۷۰	۶	۸۰	۱۰۹	۲۰	۷۳	۳۰	۷۵
۷۰	۲۰	۸۷	۹۷	۱۷	۶۹	۳۴	۸۰
۱۰۰	۶	۸۵	۷۹	۱۸	۴۹	۲۴	۸۰
۱۰۰	۲۰	۹۳	۷۲	۱۵	۴۶	۲۴	۸۷
۱۵۰	۲۰	۱۰۴	۴۹	۱۳	۲۸	۲۸	۱۰۰
۱۵۰	۵۰	۱۰۴	۴۹	۱۵	۳۷	۲۸	۱۰۰
۲۰۰	۲۰	۱۰۵	۲۹	۱۲	۲۶	۲۵	۱۰۰
۲۰۰	۵۰	۱۰۵	۲۹	۱۳	۳۵	۲۴	۱۰۰
۳۰۰	۵۰	۸۱	۲۴	۱۳	۳۱	۳۳	۷۶
۴۰۰	۵۰	۶۷	۲۰	۱۵	۳۹	۴۰	۶۰
۵۰۰	۵۰	۷۴	۱۸	۱۶	۵۲	۶۴	۷۰

استفاده شده است. با دادن اطلاعات سونداژهای ژئوالکتریک برداشت شده ( $\rho_a$ ،  $V/I$ ،  $AB/2$  و  $MN$ )، به نرم‌افزار IPI2WIN، نیمرخ لگاریتمی  $\rho_a$  نسبت به  $AB/2$  رسم و توسط نرم‌افزار تعداد، عمق و ضخامت لایه‌ها، و مقاومت ویژه ظاهری لایه‌ها در هر نیمرخ مشخص گردید. در هر سونداژ (برای  $AB/2$  و  $MN$  مشخص)، دستگاه مقادیر  $V/I$  و سپس ضریب  $K$  (فاکتور هندسی)، که به نوع آرایش الکترودها بستگی دارد را با استفاده از رابطه (۱) برآورد نموده و مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) نیز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$K = \pi a^2 / b = [1 - (b^2 / 4a^2)] \quad a \leq 5b \quad (1)$$

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / I \quad (2)$$

که در آن:  $\rho_a$  مقاومت ویژه ظاهری؛  $\Delta V$  اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین دو الکتروود پتانسیل؛ و  $I$  شدت جریان ترزیق شده به زمین توسط دو الکتروود جریان می‌باشد.

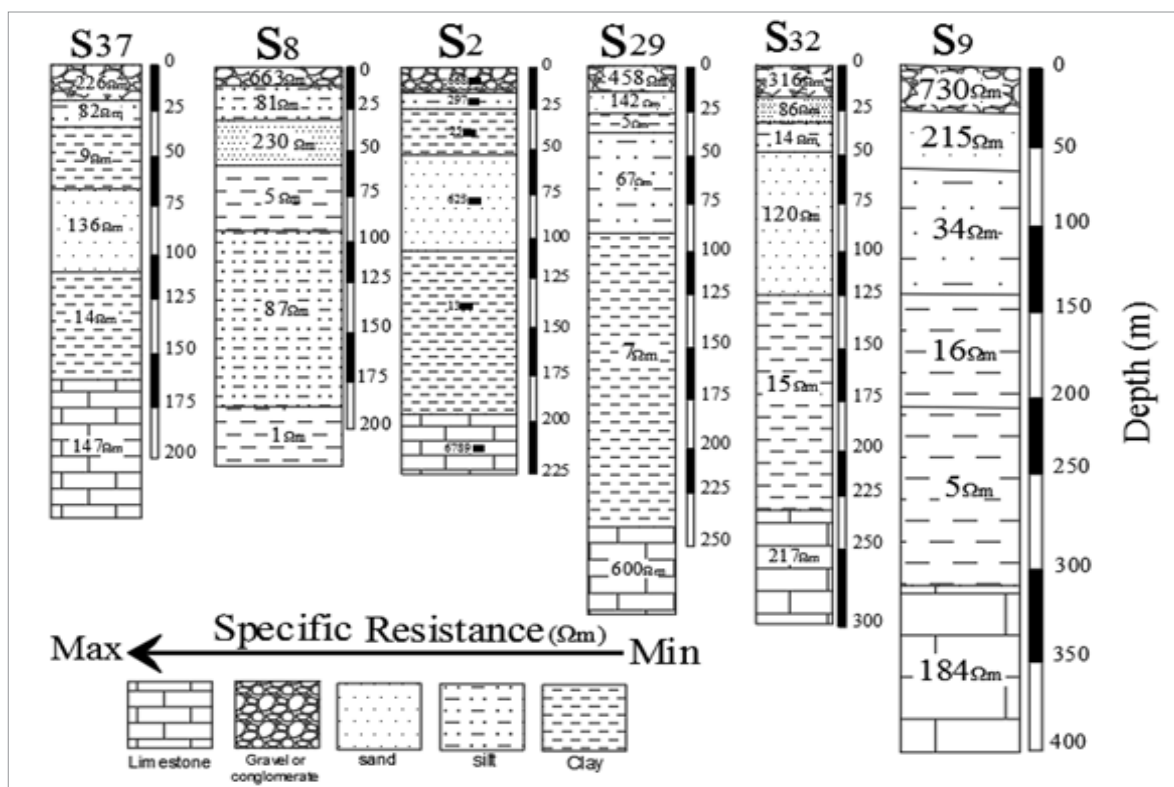
به‌منظور سوندینگ مقاومت ویژه الکتتریکی قائم، از دستگاه ژئوالکتریک (پتانسیلومتر) مدل Kgmeter 0.2 (شکل ۴) استفاده و در ۴۰ ایستگاه (شکل ۱) اقدام به سونداژ ژئوالکتریک با طول  $AB$  حدود ۱۰۰۰ متر گردید و مقاومت ویژه ظاهری زمین برای اعماق مختلف محاسبه شد. در هر سونداژ ابتدا سیم‌های جریان  $AB$  و سیم‌های پتانسیل  $MN$  روی زمین پهن و سپس الکترودهای فولادی جریان و الکترودهای برنجی پتانسیل در محل‌های مشخص و با فواصل مشخص درون زمین کوبیده شدند (شکل ۴). بعد از برداشت مقاومت ویژه‌های مختلف مربوط به یک سونداژ ژئوالکتریک، اعداد در جدول مخصوص که بر روی کاغذهای لگاریتمی به نام "برگه‌های سونداژ" آمده است، وارد و منحنی مربوطه رسم شد. به‌منظور تهیه نیمرخ ژئوفیزیکی و مقطع زمین‌شناسی، سونداژهای الکتتریکی که در یک خط برداشت شده‌اند بررسی و با هم‌تراز کردن لایه‌های حاصل از تفسیر این سونداژها، نیمرخ لایه‌بندی تا سنگ کف در نرم‌افزار AtuoCAD رسم شد. همچنین با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه ظاهری، نقشه‌های پهنه‌بندی عمق و تراز سنگ کف آبخوان آبرفتی دشت جنوبی درگز تهیه گردید.



شکل ۴ - دستگاه ژئوالکتریک (پتانسیلومتر) Kgmeter 0.2 و متعلقات آن (الکترودهای فولادی و برنجی و سیم‌های جریان) برای برداشت‌های سونداژهای ژئوالکتریک و اندازه‌گیری مقاومت ویژه در منطقه

ستون‌های زمین‌شناسی حاصل از تفسیر مقادیر مقاومت ویژه ظاهری به‌دست آمده از تفسیر برداشت‌های سونداژ ژئوالکتریکی در برخی از ایستگاه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. با تفسیر ستون‌های زمین‌شناسی حاصل می‌توان به لایه‌بندی زیرسطحی و وجود آبخوان پی برد. به‌عنوان مثال لاگ زمین‌شناسی S29 در نیمرخ klk نشان می‌دهد، لایه اول دارای مقاومت ویژه ۴۵۸ اهم متر را می‌توان به رسوبات دانه درشت نسبت داد که ضخامت آن حدود ۳ متر می‌باشد. لایه دوم دارای مقاومت ویژه ۱۴۲ اهم متر را می‌توان به رسوبات دانه متوسط نسبت داد که ضخامت آن حدود ۴ متر می‌باشد. لایه سوم دارای مقاومت ویژه ۵ اهم متر را می‌توان به

رسوبات دانه ریز نسبت داد که ضخامت آن حدود ۳ متر می‌باشد. لایه چهارم دارای مقاومت ویژه ۶۷ اهم متر را می‌توان به رسوبات دانه متوسط نسبت داد که ضخامت آن حدود ۱۰ متر می‌باشد. لایه پنجم با مقاومت ویژه ۷ اهم متر را می‌توان به رسوبات دانه ریز و ضخامت آن ۱۳۶ متر می‌باشد. لایه آخر با مقاومت ویژه ۶۰۰ اهم متر است و طبق مقاطع زمین‌شناسی موجود در نقشه زمین‌شناسی منطقه، مربوط به سنگ کف آهکی تیرگان می‌باشد. تفسیر ستون‌های زمین‌شناسی حاصل از برداشت‌های سونداژ ژئوالکتریکی در سایر ایستگاه‌ها (S37, S8, S2, S32, S9) تغییراتی نشان می‌دهد که در شکل (۵) قابل مشاهده است.



شکل ۵- ستون‌های زمین‌شناسی مربوط به سونداژهای ژئوالکتریکی S32 و S9, S37, S8, S29, S2 (اعداد بر حسب اهم متر می‌باشند)

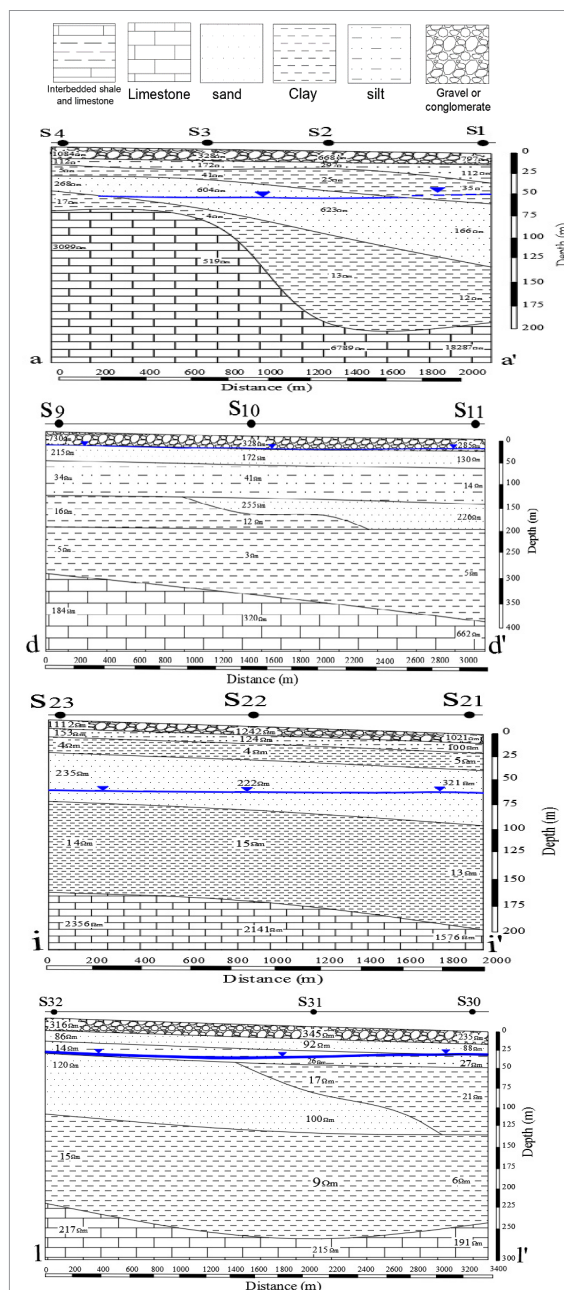
برخی از نیمرخ‌ها و مقاطع زمین‌شناسی تهیه شده در دشت جنوبی درگز، بخصوص در دامنه ارتفاعات الله اکبر، با استفاده از روش سوندینگ مقاومت ویژه الکتریکی قائم پیوسته (CVES)<sup>۱</sup>، یعنی در نظر گرفتن داده‌های تعدادی سونداژ الکتریکی در طول خط برداشت و مدل‌سازی دوبعدی داده‌ها (Pederson و Muiuane، ۱۹۹۹؛ Molano و همکاران، ۱۹۹۰)، در شکل (۶) نشان داده شده است. براساس توصیف تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در هر دو جهت قائم و افقی (تغییرات عمودی و جانبی سازندها) در طول خطوط برداشت راستاهای مختلف (aa', dd', ii', و II')، نتایج خصوصیات و مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی زیرسطحی دشت درگز در جدول (۲) ارائه شده است. با تفسیر نیمرخ‌ها و

مقاطع زمین‌شناسی تهیه شده می‌توان تغییرات عمقی و جانبی لایه‌بندی‌های زیرسطحی و گسترش لایه‌ها و آبخوان موجود را مشاهده نمود. به‌عنوان مثال در نیمرخ aa' (شکل ۶) در فاصله بین سونداژهای ۱ تا ۴، که در نزدیکی چشمه آبگرم قلجق در پای ارتفاعات الله اکبر زده شده است، بازه مقاومت ویژه ۴ تا ۱۸۲۷۸ اهم متر بوده و در اعماق پایین‌تر، مقاومت ویژه تغییر می‌کند (جدول ۲). بطور کلی، لایه‌های سطحی حاوی آبرفت‌های درشت دانه (مانند گراول و ماسه درشت) و به عمق تناوب رسوبات دانه‌ریز و دانه متوسط دیده می‌شود. از سمت جنوب (ارتفاعات الله اکبر) به سمت شمال (دشت)، ضخامت لایه‌های آبرفتی زیاد شده و سنگ کف آهکی (آهک‌های سازند تیرگان) در اعماق

جدول ۲ - خصوصیات و مشخصات لایه‌بندی تحت‌الارضی دشت درگز با توجه به تغییرات مقاومت ویژه واقعی در طول خطوط برداشت در راستاهای مختلف (aa', dd', ii', و II')

لایه‌ها	ضخامت تقریبی (m)	مقاومت ویژه ظاهری (Ωm)	مشخصات لایه‌های تحت‌الارضی
راستای aa' (در نزدیکی چشمه آبگرم قلجق در پای ارتفاعات الله‌اکبر)			
اول	۲	۳۲۸ تا ۱۰۸۴	آبرفت‌های درشت دانه (گراول و ماسه درشت)
دوم	۲ تا ۱۶	۲۹۷ تا ۱۱۲	رسوبات دانه متوسط
سوم	۸ تا ۱۷	۴۱ تا ۵	رسوبات دانه ریز
چهارم	۱۲ تا ۵۰	۶۲۳ تا ۱۶۶	رسوبات دانه متوسط
پنجم	۱۰ تا ۱۵۰	۱۷ تا ۴	رسوبات دانه ریز
ششم	سنگ‌کف آهکی	۵۱۹ تا ۱۸۲۸۷	لایه آهکی با تراکم زیاد (سازند تیرگان)
راستای dd' (بالای روستای حسن آباد)			
اول	۴	۷۳۰ تا ۲۵۸	رسوبات دانه درشت
دوم	۵ تا ۱۲	۲۱۵ تا ۱۳۰	رسوبات دانه متوسط
سوم	۴ تا ۲۶	۴۱ تا ۱۴	رسوبات دانه ریز
چهارم	۲۶ تا ۱۰۸	۲۵۵ تا ۲۲۶	وجود رسوبات دانه درشت بصورت میان لایه
پنجم	۲۴۳ تا ۳۱۹	۲۵ تا ۳	رسوبات دانه ریز
ششم	سنگ‌کف آهکی	۶۶۲ تا ۱۸۴	آهک تیرگان، احتمال وجود پتانسیل آبی در محل سونداژ ۹
راستای ii' (در نزدیکی چهلمیر)			
اول	۵ متر	۱۰۲۱ تا ۱۲۴۲	درشت بودن قطر و دانه‌بندی رسوبات
دوم	۲ تا ۱۲	۱۵۳ تا ۱۰۰	رسوبات دانه متوسط
سوم	۶ تا ۱۷	۵ تا ۴	رسوبات دانه ریز
چهارم	۱۱ تا ۵۶	۲۳۵ تا ۲۲۲	رسوبات دانه متوسط
پنجم	۱۷ تا ۱۱۰	۱۵ تا ۱۳	رسوبات دانه ریز
ششم	سنگ‌کف آهکی	۱۵۷۶ تا ۲۳۵۶	آهک تیرگان
راستای II' (بالای روستای اولیا چاپشلو)			
اول	۵ تا ۷	۳۴۵ تا ۳۳۵	درشت بودن قطر و دانه‌بندی رسوبات
دوم	۱۰ تا ۱۹	۹۲ تا ۸۶	رسوبات دانه متوسط
سوم	۵ تا ۲۳	۲۷ تا ۱۴	رسوبات دانه ریز
چهارم	۴۴ تا ۱۵۵	۱۲۰ تا ۱۷	رسوبات دانه ریز و وجود لنز رودخانه مدفون
پنجم	۱۰۵ تا ۱۲۴	۱۵ تا ۶	رسوبات دانه ریز، سنگ کف رسی سازند سرچشمه
ششم	سنگ‌کف آهکی	۲۱۷ تا ۱۹۱	آهک تیرگان و احتمال وجود پتانسیل آبی

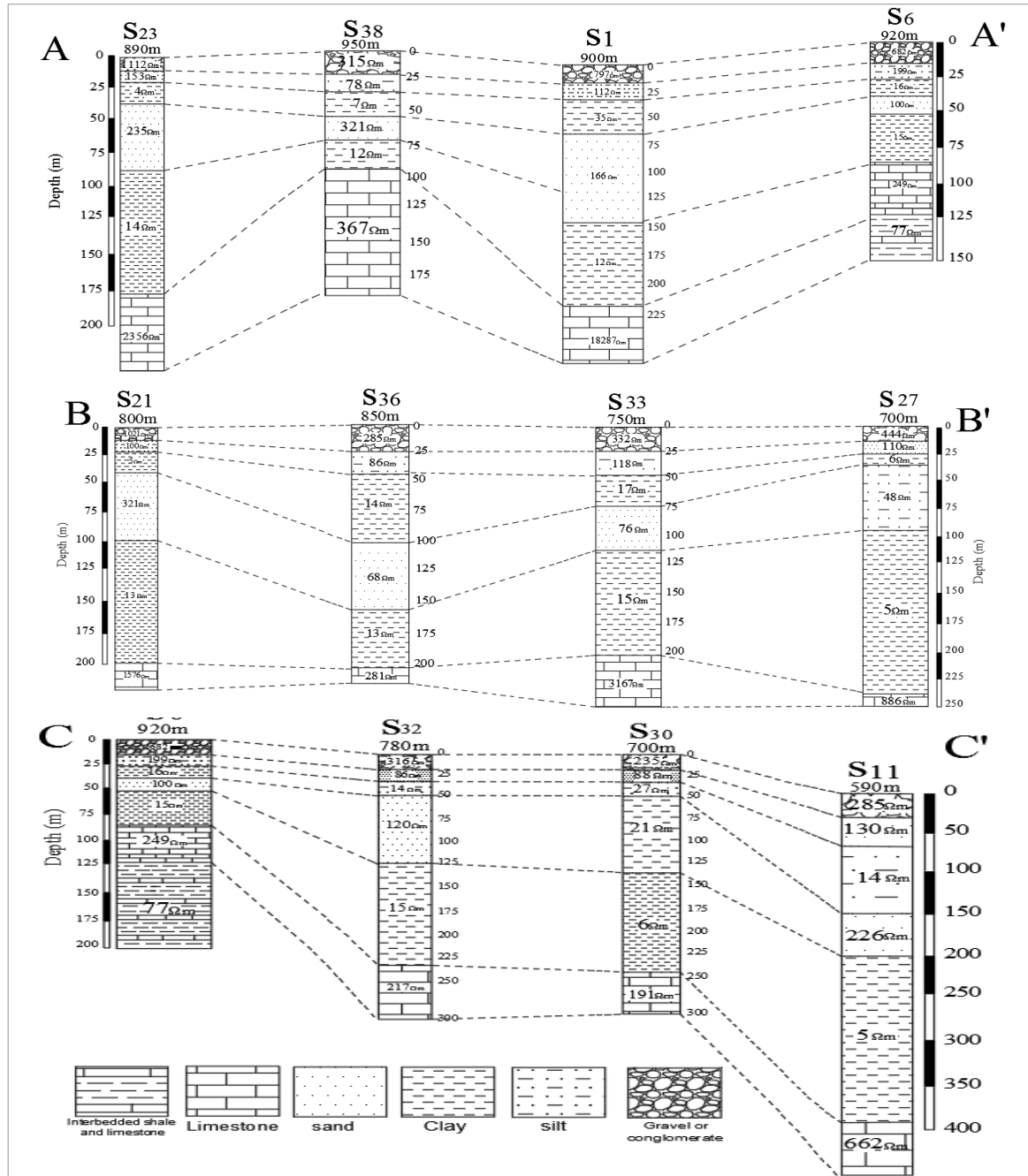
دیده می‌شود. به سمت ارتفاعات جنوب میزان مقاومت ویژه ظاهری افزایش می‌یابد که این امر گویای وجود لایه آهکی و تراکم بسیار زیاد آن است. با توجه به مقادیر مقاومت ویژه ظاهری (حداقل ۱۸۴ و ۱۹۱ اهم متر) احتمال وجود پتانسیل آبی در لایه آهکی تیرگان زیرین در راستای II' (بالای روستای چاپشلو) و راستای dd' (بالای روستای حسن آباد) وجود دارد.



شکل ۶- نیمرخ‌ها و مقاطع زمین‌شناسی تهیه شده براساس تغییرات مقاومت ویژه ظاهری (اعداد بر حسب اهم متر می‌باشند) در طول خطوط برداشت راستاهای مختلف (aa', dd', ii', و II') در دشت جنوبی درگز

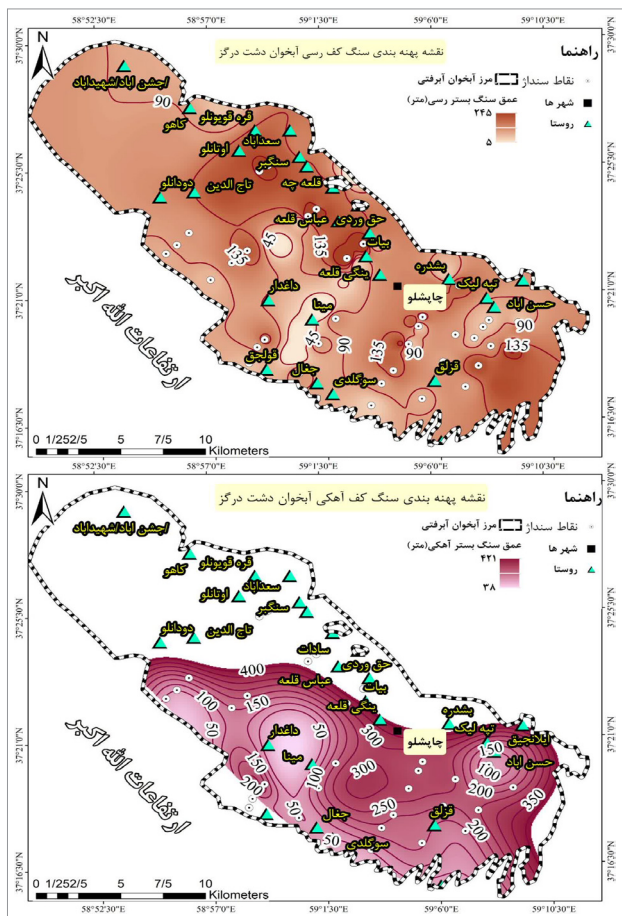
• انطباق ستون‌های زمین‌شناسی و تغییرات کلی لایه‌های زمین‌شناسی تحت‌الارضی از ارتفاعات الله اکبر به سمت دشت هم‌ترازی و انطباق ستون‌های زمین‌شناسی و توالی لایه‌های زمین‌شناسی در سه راستای AA' (به موازات ارتفاعات الله اکبر)، BB' (در دشت از شمال غرب به جنوب شرق) و CC' (در دشت از جنوب به شمال) در شکل (۷) نشان داده شده است. در هر سه راستا عمیق‌ترین لایه، سنگ آهک تیرگان است و آبرفت با دانه‌بندی

مختلف بر روی آن‌ها قرار گرفته‌اند. اما به موازات ارتفاعات الله اکبر (در راستای AA' - شکل ۱) به دلیل نزدیکی به ارتفاعات، آهک تیرگان در عمق کمتری دیده می‌شود. در حالیکه از شمال غرب به جنوب شرق (در راستای BB') و از جنوب به شمال (در راستای CC') دشت درگز، با توجه به فاصله‌دار شدن نقاط سونداژ از ارتفاعات، سنگ آهک تیرگان در اعماق پایین‌تر و ضخیم‌تر شدن آبرفت‌ها (با ضخامتی حدود ۴۰۰ متر) دیده می‌شود.



شکل ۷- انطباق ستون‌های زمین‌شناسی و توالی لایه‌های زمین‌شناسی در راستاهای AA' (Profile 1 - به موازات ارتفاعات الله اکبر)، BB' (Profile 2 - از شمال غرب به جنوب شرق) و CC' (Profile 3 - از جنوب به شمال)

جنوبی حوضه افزایش یافته و با افزایش عمق از میزان درز و شکاف و تخلخل ثانویه آن کاسته می‌شود و در عمق به آهک متراکم بدون درز و شکاف تبدیل می‌شود.



شکل ۸- نقشه‌های پهنه‌بندی عمق سنگ‌کف رسی (بالا) و سنگ‌کف آهکی (پایین) آبخوان دشت درگز

بررسی مطالعات پیشین ژئوالکتیک در دشت درگز (شرکت مهندسی مشاور ست کوپ (۱۳۵۰) به نقل از گزارش شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی (۱۳۸۹))، نشان می‌دهد آبرفت‌های دشت شمالی درگز، که به دلیل بالآمدگی سنگ‌کف نئوژن از دشت جنوبی جدا شده است، با دانه‌بندی شن، ماسه رسی و رس، دارای مقاومت ویژه ظاهری بین ۶۰ تا ۵۰۰ اهم متر و ضخامت لایه مطالعات ژئوالکتیک آبرفتی حاوی آب شیرین، بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر متغیر است که آبخوان آبرفتی اصلی محدوده مطالعاتی درگز را تشکیل می‌دهد. رسوبات این ناحیه در اثر فعالیت‌های دراز مدت رودخانه درونگر بر روی سنگ کف میوسن که دارای فرورفتگی می‌باشد، تشکیل شده‌است. این رسوبات دانه درشت بوده و از نظر ذخیره آب زیرزمینی قابل توجه می‌باشند. براساس نتایج به‌دست آمده، دامنه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری تقریبی سازندهای مختلف زمین‌شناسی منطقه به‌صورت جدول (۳) است.

• تهیه نقشه پهنه‌بندی عمق و تراز سنگ‌کف آبخوان آبرفتی و بررسی میزان گسترش آبخوان کارستی در دشت درگز از روی نقشه پهنه‌بندی هم‌عمق سنگ کف آبخوان، می‌توان عمیق‌ترین و کم‌عمق‌ترین مناطق آبخوان را شناسایی نمود. با توجه نتایج مقاومت ویژه ظاهری لایه‌های زمین‌شناسی زیرسطحی، می‌توان گفت سنگ‌کف در مناطق جنوبی دشت، نزدیک ارتفاعات الله‌اکبر هزار مسجد، آهکی می‌باشد که تا بخش‌هایی از مرکز دشت نیز دیده می‌شوند؛ اما سنگ‌کف در مرکز دشت رسی است. از این‌رو، دو نقشه پهنه‌بندی هم‌عمق سنگ‌کف رسی و سنگ‌کف آهکی (شکل ۸) برای آبخوان دشت جنوبی درگز تهیه شده است. دامنه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای سنگ‌کف رسی از ۳ اهم متر تا ۲۰ اهم متر متغیر است و دامنه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای سنگ‌کف آهکی از ۷۰ اهم متر تا ۳۵۰۰ اهم متر متغیر است. با توجه به نقشه پهنه‌بندی هم‌عمق سنگ‌کف رسی (شکل ۸)، عمیق‌ترین مناطق دشت، قسمت‌های مرکزی و جنوب‌شرقی دشت (با عمق ۱۸۵ متر تا ۲۲۵ متر) و بدیهی است که به طرف ارتفاعات، عمق کاهش یافته و در حاشیه دشت در مرز بین دشت و کوه، ضخامت آبرفت‌ها صفر می‌باشد. اما سنگ‌کف آهکی آبخوان به سمت مرکز دشت افزایش یافته و تا ۴۰۰ متر نیز می‌رسد، اما مجدد به سمت مرکز دشت در جهت جنوب‌شرق سنگ‌کف بالا می‌آید و در محدوده اروستای حسن‌آباد به ۱۰۰ متر نیز می‌رسد.

• تعیین لایه‌های آبدار (آبخوان آبرفتی) زیرسطحی دشت جنوبی درگز و تداخل آنها با آبخوان کارستی الله‌اکبر

براساس نتایج تفسیر برداشت سونداژهای ژئوالکتیکی در ۴۰ نقطه از دشت جنوبی درگز، مقاومت ویژه ظاهری لایه‌های رسوبی زیرسطحی آبخوان دشت جنوبی درگز بسته به دانه‌بندی آن بین ۳ تا ۱۰۰۰ اهم متر متغیر است. لایه آبرفتی دانه درشت و دانه متوسط فوقانی (حداکثر ۲۰ متر) می‌تواند آبخوان آبرفتی مناسبی باشد، اما لایه‌های رسوبی تحتانی به علت دانه‌ریز بودن، آبدهی بسیار کمتری دارند. هر چند لایه با رسوبات دانه متوسط در اعماق پایین‌تر دیده می‌شود، اما به دلیل تغذیه کم، آبخوان مناسبی نیست. در دشت جنوبی درگز، حداکثر ضخامت آبرفت‌ها دانه‌ریز، متوسط و درشت، و لایه‌های مارنی در بالای سنگ‌کف سازند آهکی تیرگان حدود ۳۰۰ متر (در پایین دشت نزدیک روستای حسن‌آباد) می‌باشد. سنگ‌کف آبخوان را می‌توان لایه مارن و کنگلومرای نئوژن (با مقاومت ویژه ظاهری ۳ تا ۲۵ اهم متر) و یا آهک‌های سازند تیرگان، که بسته به میزان آب و تراکم دارای مقاومت ویژه ظاهری بین ۱۸۰ تا ۱۸۰۰۰ اهم متر می‌باشد، در نظر گرفت. ضخامت لایه آبرفتی به طرف ارتفاعات الله‌اکبر (به طرف جنوب) به دلیل بالآمدن سنگ کف به کمترین حد ممکن می‌رسد. ضخامت سازند آهکی تیرگان در قسمت‌های



جدول ۳ - مقاومت ویژه ظاهری سازندهای زمین‌شناسی منطقه

مقاومت ویژه ظاهری ( $\Omega m$ )	سازندها
۷۰-۱۰۰۰۰	تیرگان (Kt)
۱۰-۲۵	سرچشمه (Ksr)
۱۵-۲۵	سنگانه (Ksn)
۵۰-۵۰۰۰	آتامیر (Kat)
۲۰-۵۰۰	آبدراز (Kad)
۱۵-۳۵	آب تلخ (Kab)
۵۰-۵۰۰	نیزار (Kny)
۵-۱۰۰	کلات (Kk)
۱۰۰-۱۰۰۰۰	پسته لیق (Pcp)
۴۰-۹۰	چهل کمان (Pcch)
۵۰-۱۰۰	خانگیران (Ekh)
۵۰-۵۰۰	لایه‌های قرمز میوسن-پلیوسن (Ncg, Nrg)
۵۰-۱۰۰۰	واحد کنگلومرا-رس سنگ (PIQ)
۳۰-۲۰۰	واحد آبرفت‌های قدیمی (Qt1)
۵۰۰-۵۰	واحد آبرفت‌های جوان (Qt2)
۱۰۰-۱۰۰۰۰	واحد مخروطه‌افکنه (Qf)
۱۰۰-۱۰۰۰۰	واحد پرکننده مسیل (Qal)

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تفسیر سونداژهای ژئوالکتریک انجام شده در دشت جنوبی درگز و بررسی عمقی لایه‌های زمین‌شناسی در محل سونداژها و در راستای نیمرخ‌های ژئوفیزیکی و مقاطع زمین‌شناسی تهیه شده، می‌توان علائمی از وجود لایه‌های آبدار و مکان‌های مستعد آبخوان آبرفتی تا عمق ۲۰ متر در جنوب، شرق و غرب شهر چاپشلو و شمال و شمال‌غربی روستای داغدار و غرب شهرک صنعتی درگز، در محل سونداژهای ۷، ۸، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۳۱، ۳۳ و ۳۶ مشاهده نمود. همچنین می‌توان وجود آبخوان کارستی عمقی را در محل برخی از نیمرخ‌ها ( $ll'$ ،  $dd'$ ،  $bb'$  و  $nn'$ ) تعیین نمود. با توجه به مقادیر مقاومت ویژه ظاهری سنگ‌کف آهکی، محل سونداژهای ۵، ۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲ و ۳۷ می‌توانند مکان‌های مستعد آبخوان کارستی باشند، که عمق آبخوان کارستی در محل این سونداژها به ترتیب حدود ۱۸۷، ۲۷۲، ۲۵۸، ۲۸۰، ۲۰۶ و ۱۵۰ متر می‌باشد. میزان گسترش آبخوان کارستی بیشتر در محل جنوب‌شرقی شهر چاپشلو و شمال‌شرقی روستای سوگندی و شمال روستای گنداب است و علائمی هم در قسمت غربی دشت در حدود ۳/۵ کیلومتری غرب روستای داغدار مشاهده شده است. بررسی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری ( $pa$ ) لایه‌ها و

عمق سنگ‌کف و تفکیک لایه‌های زیرزمینی دشت درگز، نشان می‌دهد برهمکنش چندانی بین آبخوان آبرفتی جنوبی درگز با آبخوان کارستی سازند تیرگان ارتفاعات الله‌اکبر وجود ندارد. به عبارت دیگر، با توجه به عدم ظهور چشمه‌های پرآب در دامنه شمالی ارتفاعات الله‌اکبر و کم ضخامت بودن لایه دانه درشت آبرفتی دشت، می‌توان نتیجه گرفت به‌طور کلی جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان آبرفتی از بخش‌های غربی و جنوبی دشت به سمت شمال‌شرق و شرق می‌باشد. همچنین بیشتر آب آبخوان کارستی سازند آهکی تیرگان، جز در برخی نقاط محدود در پای ارتفاعات الله‌اکبر (محدوده چرلاق، چهلمیر و ...) تأثیر چندانی در تغذیه آبرفت‌های درشت دانه لایه فوقانی دشت جنوبی درگز نداشته و به‌دلیل موانع طبیعی لایه‌های دانه‌ریز تحتانی، مسیرهای جریان آب زیرزمینی به سمت اعماق و یا دره دربادام و شمخال می‌باشد.

### سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد و همچنین از دفتر مطالعات شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی و مدیریت امور منابع آب شهرستان درگز بابت همکاری برای اجرایی شدن برداشت‌های صحرائی و در اختیار قرار دادن گزارشات و داده‌های مورد نیاز تشکر می‌شود.

### پی‌نوشت‌ها

- 1-Vertical Electrical Sounding
- 2-Geological Logs
- 3-Geoelectrical Profiles
- 4-Apparent Resistivity ( $\rho a$ )
- 5-Schlumberger
- 6-Geometric Factor (K)
- 7-U.S. Geological Survey
- 8-Continuous Vertical Electrical Sounding

### منابع

سوگندی، رسول. (۱۳۹۵). شناسایی مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های ژئوالکتریک و مقایسه نتایج با داده‌های حفاری - مطالعه موردی دشت مشهد، پایان‌نامه، کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی. (۱۳۷۴). گزارش ژئوفیزیکی دشت درگز منطقه نوخندان، مشهد، ایران.

- Muiuane, E.A., & Pederson, L.B. (1999). Automatic 1D interpretation of DC resistivity sounding data. *Journal of Applied Geophysics*, 42(1), 35-45. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00015-4)
- Kirsch, R. (2006). *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, Germany. <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-29387-6>
- Seaton, W.J., & Burbey, T.J. (2002). Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. *Journal of Applied Geophysics*, 51(1), 21-41. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00212-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00212-4)
- U.S. Geological Survey. (2006). *FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization*, Technical Report FGDC-STD-013-2006, Federal Geographic Data Committee, USGS.
- Vereecken, H., Binley, A., Cassiani, G., Revil, A., & Titov, K. (2006). *Applied Hydrogeophysics*. NATO Science Series, (volume 71). Springer, Dordrecht, Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4912-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4912-5_1)
- Williams, J.H., & Paillet, F.L. (2023). *Geophysical Logging for Hydrogeology*. The Grounwater Project, Guelph, Ontario, Canada. <https://doi.org/10.21083/UQGA6966>
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی. (۱۳۸۹). گزارش نهایی بهنگام سازی مطالعات منابع آب حوزه آبریز قره قوم، جلد دوم: بررسی‌ها و مشخصات عمومی. شرکت مهندسين مشاور طوس آب. مشهد. ایران.
- عزیزی، فرزانه، و محمدزاده، حسین. (۱۳۹۲). تخمین پارامترهای هیدروژئولوژیکی با روش‌های ژئوالکتریک و برآورد حجم تقریبی و حجم آب قابل استحصال از آبخوان دشت امامزاده جعفر گچساران. *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۲۱، ۱۷۹-۱۹۵. <https://doi.org/10.22067/geography.v11i21.36344>
- ولایتی، سعدالله. (۱۳۶۲). گزارش مقدماتی منابع آب دشت درگز (حوضه آبریز رودخانه درونگر). امور مطالعات منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، وزارت نیرو.
- Barnie, S., Geophrey, K., Anornu, G.K., & Kortatsi, B.K. (2014). Determination of Shallow Groundwater Aquifer Geometry using Geo-Electrical Techniques in the Atankwidi Sub-Basin of the White Volta Basin, Ghana. *Journal of Environment and Earth Science*, 4(14), 20-31. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JEES/article/view/14499>
- Corvallis, O.R. (2000). D.C. Resistivity methods, Northwest Geophysical Associates, Inc.
- Ishola, S.A., & Olufemi, S.T. (2024). Groundwater Exploration using Geoelectric Technique in Oru-Ijebu, South-West Nigeria. *Nigerian Journal of Theoretical and Environmental Physics*, 2(1), 49-66. <https://doi.org/10.62292/njptep.v2i1.2024.20>
- Idowu, I. O., & Ojo, A. O. (2024). Exploring groundwater resources in southwestern Nigeria: An integrated geophysical approach. *HydroResearch*, 7, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.hydrres.2024.04.002>
- Jerbi, H., Sebai, A., Hamlaoui, I., Hamdi, M., & Hmida, N. (2022). Assessment of aquifer geometry and groundwater storage using three-dimensional hydrostratigraphic modeling and geophysical survey: The case study of Nefza massive dunes (Northern Tunisia). *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1416479/v1>
- Molano, C.E., Salamanca, M., & Van Overmeeren, R.A. (1990). Numerical Modelling of Standard and Continuous Vertical Electrical Soundings. *Geophysical Prospecting*, 38(7), 705-718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1990.tb01870.x>