

برآورد مشخصات آبخوان شمال غرب قم به روش SNMR

بهمن عباسی^۱ و محمد کاظم حفیظی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۱۲/۲۴، پذیرش نهایی: ۸۸/۱۲/۱۸)

چکیده

روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای سطحی یا Surface Nuclear Magnetic Resonance یا به اختصار SNMR یکی از جدیدترین تکنولوژی‌های برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها، آبخوان‌ها و مخازن زیرسطحی است. این روش معادل روش تصویرسازی تشدید مغناطیسی در پزشکی (روش MRI) یا روش طیف نگاری تشدید مغناطیسی در صنایع دارویی و شیمیایی است. در واقع این روش جدیدترین تکنولوژی ژئوفیزیکی ارائه شده در چند دهه اخیر است. روش‌های متداول ژئوفیزیکی نظیر لرزه‌ای، ژئوالکتریکی و الکترومغناطیسی، تنها پس از تفسیرهای پیچیده قادرند شاخص‌هایی از خصوصیات هیدرولیکی زیرسطحی به دست دهند. حال آنکه روش SNMR قادر است آب آزاد درون حفره‌ها را به طور مستقیم تشخیص دهد و دو پارامتر مهم زیرسطحی، یعنی تخلخل و تراوایی را مستقیماً به دست آورد. برآورد مشخصات آبخوان در دهه‌های اخیر یک رویکرد چند جانبه یا Multidisciplinary داشته و اغلب داده‌های مختلفی از روش‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوفیزیکی به طور همزمان در مدل‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه نیز برای مدل‌سازی خصوصیات هیدرولیکی زیرسطحی از داده‌های SNMR همراه با داده‌های سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی به طور همزمان استفاده شده است. به طور کلی جهت به دست آوردن مدل SNMR بهینه از زیرسطح، اطلاع از ساختار مقاومت ویژه زیر سطحی کمک شایانی به وارون سازی دقیق تر داده‌های SNMR می‌کند. قابلیت‌ها و محدودیت‌های این روش، با یک مطالعه موردی اکتشاف آب در استان قم بررسی شده است. آبخوان مورد بررسی یک مخزن با تخلخل ثانویه حاصل از شکستگی می‌باشد که با ترکیب روش سونداژزنی الکتریکی و SNMR، برخی مشخصات هیدروژئولوژیکی و هندسه آن بدست آمده است. همچنین محل حفاری برای استحصال آب پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: تشدید مغناطیسی هسته‌ای سطحی، تخلخل، تراوایی، آبخوان

Aquifer Characterization by SNMR, Northwest Qom, Iran

Abbassi, B.¹ and Hafizi, M. K.²

¹ M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

² Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 14 March 2009, Accepted: 9 March 2010)

Abstract

The objective of this research is to represent applicability of Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR) in aquifer characterization, based on SNMR and Electrical Resistivity Tomography data. SNMR is the only geophysical method that directly detects water. Two important parameters, porosity and permeability are available through inversion of initial amplitude and decay time constant versus pulse moments. Usually, electrical methods are concurrently applied along with SNMR surveys, making it possible to easily manipulate SNMR inversion. A case study is introduced to explain the efficiency of SNMR for aquifer characterizations.

Introduction: Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR) is a new geophysical method currently developed for shallow investigations of aquifers. Compared to the other geophysical methods, SNMR is a water selective method. Therefore, hydraulic properties of media are achievable through SNMR investigations. Relative to classical electrical

methods, SNMR still costs much. In order to reduce the expense of the survey, it would be better to perform a sufficient electrical tomography in the region, and then few SNMR soundings for acquiring aquifer properties.

Basically, in SNMR the response of excited protons is measured as relaxation times in the water content (directly linked to saturated effective porosity) and pore size distribution (linked to permeability). Hydrogen nuclei have a magnetic moment and in an undisturbed manner press about the ambient geomagnetic field vector (Legchenko, et al., 2002). The resonance frequency (f_L) is known as Larmor frequency and is proportional to the strength of the Earth's magnetic field B_0 :

$$\omega_L = 2\pi f_L = \gamma \cdot |B_0| \quad (1)$$

Where, γ is the gyromagnetic ratio for hydrogen nuclei. An SNMR measurement is made by disturbing protons with a secondary magnetic field (B_s) transmitted at the resonant frequency ($f_r \approx f_L$) that causes proton spinning vector (M) to simultaneously tip away from its equilibrium and rotate about B_0 at the resonant frequency. In SNMR, B_s is applied as an alternating magnetic field with a circular or square loop as transmitter at the surface. The loop is energized by a pulse of an alternating current I :

$$I(t) = I_0 \cos(\omega_r t) \quad (2)$$

The degree to which M is tipped is dependent on the transmitter pulse moment q , which is the product of the transmitter current and the duration of the pulse excitation ($q = I \cdot \tau$). The voltage induced in the receiver loop after transmitting a certain pulse moment q is fitted with a function of the form:

$$E(q, t) = E_0(q) \exp(-t / T_2^*) \cos[\omega_L t + \phi_0(q)] \quad (3)$$

Where E_0 = initial signal amplitude; T_2^* = the decay time constant; ω_L = Larmor frequency as equation 1; $\phi_0(q)$ = phase shift between the signal and the excitation current. In 1D distribution of the subsurface, the initial amplitude is a function of q :

$$E_0(q) = \int_0^{\infty} f(z) K(q, z) dz \quad (4)$$

The water content distribution $f(z)$ is related to the sounding curve $E_0(q)$. The magnetic induction field of excitation is defined in the kernel function $K(q, z)$, which is linked with the loop configuration. The excitation field can be varied by changing the pulse moment q . An increase of q leads to an SNMR response from deeper regions.

The inverse problem to obtain the one-dimensional water content distribution can be solved in different ways, which are discussed in several SNMR publications. The sounding curve $E_0(q)$ is available after fitting and extrapolating the envelopes of the response signals at the several pulse moments. Commonly a non-linear least square algorithm estimates the signal parameters T_2^* , ϕ_0 and E_0 . The two parameters obtained as a result of geophysical inversion are free water content, which is porosity in a saturated aquifer (Φ_{SNMR}), determined from E_0 , and permeability revealed from T_2^* inversion (K).

Discussion and Conclusion: The study area is located north-west of Qom, Iran. Thirteen Vertical Electrical Soundings in three profiles and three Magnetic Resonance Soundings are performed over recent river deposits of the area. The studies revealed a fractured aquifer containing a low permeable shallow reservoir with high porosity and a fractured deep permeable one with low porosities.

Fractured aquifers, due to bad sorting of their sediments, have usually low porosities and high permabilities. An electrical tomography also shows a distinct fractured pattern in a

low porosity, high permeable zone, with low amount of resistivity, which is an indication of clay accumulation in the crush zone.

Joint application of SNMR and electrical resistivity methods are important in direct characterization of aquifer parameters including porosity, permeability and electrical resistivity. It is possible to study the relationship between electrical resistivities and porosity/permeability of the aquifer. In this study, qualitative interpretation shows an inverse relationship between electrical resistivity and porosity of the aquifer on the one side, and permeability on the other. Another suggestible approach, which is currently under study, is to explore the complex relationships in a quantitative way, such as using nature inspired algorithms, like Neural Network Estimations.

Key words: Surface Nuclear Magnetic Resonance, Porosity, Permeability, Aquifer

۱ مقدمه

درحکم شاخه‌ای از روش‌های ژئوالکترومغناطیسی، با الهام از تصویربرداری تشدید مغناطیسی در پزشکی (MRI) از سوی روس‌ها کاربردی شد. زمینه اصلی کاربرد این روش، اکتشاف آب و برآورد مشخصات هیدروژئولوژیکی مخازن سطحی است.

اولین دستگاه تجاری SNMR با نام NUMIS را شرکت فرانسوی IRIS Instruments در ۱۹۹۶ به بازار عرضه کرد. در طول چند سال اخیر این دستگاه چندین بار ارتقاء یافته و کارصحرایی با آن راحت‌تر شده است. باین حال نوفه‌های طبیعی و شهری همچنان برداشت داده با این روش را مشکل می‌سازد.

۲ تشدید مغناطیسی پروتون‌ها

پروتون‌ها به دلیل چرخش، مانند یک آهن‌ربای کوچک عمل می‌کنند و بردار اسپین (یا بردار مغناطش) خود را با جهت میدان مغناطیسی زمین B_0 تطبیق می‌دهند. درواقع پروتون‌ها این کار را با حرکت تقدیمی حول محورهایشان (موازی با B_0) عملی می‌سازند (شکل ۱-الف). از طرفی، حالت‌های انرژی چنین پروتون‌هایی گسسته است. درواقع پایین‌ترین و پایدارترین حالت انرژی هنگامی است که بردار اسپین با میدان مغناطیسی موازی باشد. همچنین بالاترین و ناپایدارترین حالت انرژی نیز هنگامی رخ می‌دهد که بردار اسپین با میدان مغناطیسی پادموازی باشد

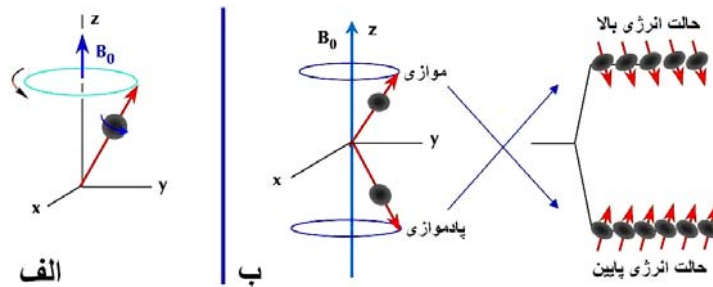
بحران روزافزون کمبود آب در چند دهه اخیر، توجه را به سوی ارزیابی و استخراج آب‌های زیرزمینی جلب کرده است. روش‌های متعددی برای ارزیابی آب‌های زیرزمینی ابداع شده است. تقریباً همه روش‌های ژئوفیزیکی، میزان تخلخل و تراوایی آبخوان را به صورت غیرمستقیم برآورد می‌کنند. به‌علاوه، در همه روش‌های ژئوفیزیکی وجود مسئله نبود یکتایی در تفسیر، منجر به مواجهه با چندین تفسیر زمین‌شناسی متعدد می‌شود. برای مثال محتوی رس سازندها، وجود لایه‌های رسانا در محیط ژئوفیزیکی و یا آب شور درون سازند، هرکدام می‌تواند تفسیر هیدروژئولوژیکی داده‌های ژئوفیزیکی را دچار اغتشاش کند (لاپژینسکی و روی، ۲۰۰۴). این درحالی است که روش SNMR یا تشدید مغناطیسی هسته سطحی (Surface Nuclear Magnetic Resonance)، فقط به آب آزاد درون‌منفذی حساس است و ازاین‌رو تفسیر آن نسبت به دیگر روش‌های هیدروژئوفیزیکی با ابهام کمتری روبه‌رو است. بنابراین با این روش می‌توان تخلخل و تراوایی مخازن را به صورت مستقیم اندازه گرفت.

روش SNMR در بین ژئوفیزیک‌دانان دنیا به‌منزله موضوعی با بیشترین ارجاع مقالات شناخته شده است (روی و لاپژینسکی، ۲۰۰۴). این روش در دهه ۱۹۸۰ پس از کاربرد موفقیت‌آمیز روش‌های مگنتوتلوریک (در دهه ۱۹۵۰)، TEM (در دهه ۱۹۶۰) و رادارزمین‌کاو (در دهه

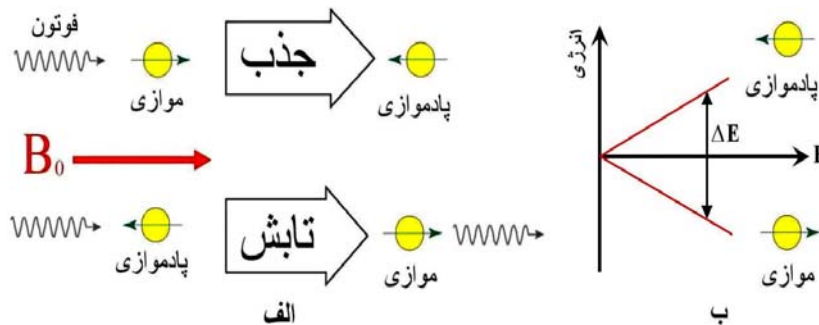
می‌گیرد که انرژی آن دقیقاً برابر با اختلاف انرژی بین دو حالت کوانتومی است (شکل ۲- الف). در میدان مغناطیسی زمین، این اتفاق در بسامد لارمور (Larmor) رخ می‌دهد که برابر است با:

$$f = \frac{1}{2\pi} \gamma |B_0| \quad (2)$$

$|B_0|$ ، بزرگی میدان مغناطیسی زمین در محل تحریک پروتون‌ها است. در اثر تحریک پروتون‌ها با یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه در بسامد لارمور می‌توان آنها را پادموازی کرد. پس از قطع این میدان، پروتون‌ها موازی می‌شوند و در همین حال فوتون‌هایی تابش می‌کنند که می‌توان اثر آنها را اندازه‌گیری کرد (شکل ۲- الف).



شکل ۱. الف) چرخش تقدیمی پروتون به دور خود در میدان مغناطیسی B_0 با بسامد زاویه‌ای $2\pi f_0$ (ب) حالت‌های متفاوت انرژی. باید توجه شود که در حالت پادموازی پروتون‌ها بالاترین انرژی را دارند.



شکل ۲. الف) اختلاف بین دو حالت انرژی برابر است با بسامد زاویه‌ای در ثابت پلانک. ب) سازوکارهای تابش و جذب به‌مثابه دلایل موازی و پادموازی شدن پروتون‌ها. همان‌طور که دیده می‌شود، یک پروتون موازی با میدان مغناطیسی B_0 ، با جذب یک فوتون حاصل از یک میدان الکترومغناطیسی القایی پادموازی می‌شود و به حالت انرژی بالا می‌رود. پس از قطع میدان القایی، پروتون به حالت انرژی پایین برمی‌گردد و یک فوتون آزاد می‌کند. باید توجه داشت که جذب و تابش فقط در یک بسامد الکترومغناطیسی گسسته خاص صورت می‌گیرد (بسامد لارمور). در روش SNMR این فوتون را می‌توان با فناوری خاصی تشخیص داد.

(شکل ۱- ب). هرچه میدان مغناطیسی محیطی قوی‌تر باشد، اختلاف بین این دو حالت انرژی بیشتر می‌شود (شکل ۲- الف). این اختلاف انرژی (ΔE) همچنین به بسامد چرخش پروتون‌ها نیز بستگی دارد. در واقع هرچه حرکت تقدیمی سریع‌تر صورت گیرد، نشان از آن دارد که میدان مغناطیسی محیطی بزرگ‌تر شده است. بنابراین داریم:

$$\Delta E = \hbar \omega = \hbar \gamma |B| \quad (1)$$

که در آن \hbar ثابت پلانک (برابر با $6.626 \times 10^{-34} / 2\pi$) است، ω بسامد زاویه‌ای، γ نسبت ژیرومغناطیسی پروتون‌های هیدروژن، و $|B|$ بزرگی میدان مغناطیسی ایستایی محیط. انتقال از یک حالت انرژی به حالت دیگر از راه جذب و تابش فوتونی صورت

۳ اصول روش SNMR

در حالت یک‌بُعدی، این روش سه منحنی سونداژ به دست می‌دهد: $E_0(Q)$ ، $T_2^*(Q)$ و $\varphi(Q)$. با وارون‌سازی داده‌های $E_0(Q)$ ، می‌توان درصد محتوی آب (تخلخل در حالت اشباع) را به دست آورد. با وارون‌سازی $T_2^*(Q)$ می‌توان تراوایی را با استفاده از روابط تجربی کینون تعیین کرد.

ثابت زمانی واهلش سیگنال تشدید مغناطیسی برای پروتون‌های موجود در حجم آب محصور، بسیار کوچک‌تر از پروتون‌های موجود در حجم آب آزاد است. در واقع روش SNMR به آب آزاد درون حفرات حساس است زیرا پروتون‌های آب در این حالت در اثر تحریک میدان ثانویه قادر به حرکت اند و تشدید صورت می‌گیرد. تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ثابت زمانی واپاشی برای آب‌های محصور، کمتر از ۲۰ الی ۳۰ میلی‌ثانیه است و برای آب‌های آزاد این مقدار بین ۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه قرار دارد (شیروف و همکاران، ۱۹۹۱). در حال حاضر، با دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود نمی‌توان سیگنال‌های کوتاه (کمتر از ۳۰ میلی‌ثانیه) را اندازه‌گیری کرد. بنابراین چیزی که عملاً دستگاه‌هایی نظیر NUMIS (شکل ۵) برای ژئوفیزیک‌دان روشن می‌سازند، آب آزاد درون منافذ است. بنابراین، محتوی آب اندازه‌گیری شده با این روش عبارت است از قسمتی از حجم کل زیرسطح که آب آزاد آن را اشغال کرده است.

زمان واهلش عرضی T_2^* ، مربوط به یک واکنش، در اصطلاح اسپین-اسپین است. در واقع T_2^* زمان لازم برای از دست رفتن هم‌دوسی چرخش پروتون‌ها است. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است که برای آب موجود در منافذ گراول‌ها و ماسه‌های درشت $T_2^* > 300 \text{ ms}$ ، و برای آب موجود در منافذ ماسه‌های رسی $T_2^* < 50 \text{ ms}$ است (شیروف و همکاران، ۱۹۹۱). در شکل ۴، رابطه بین اندازه ذرات، خصوصیات

اندازه‌گیری سیگنال SNMR با استفاده از یک لوپ دایره‌ای یا مربعی صورت می‌گیرد. با عبور جریان الکتریکی متناوب $i(t)$ از داخل لوپ، یک میدان مغناطیسی ثانویه به داخل زمین القا می‌شود. این جریان عبارت است از:

$$i(t) = I \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (۳)$$

f بسامد لارمور است که در نقاط گوناگون زمین مقدار آن از رابطه ۲ قابل محاسبه است (۳۰۰۰ هرتز در بالاترین عرض‌های مغناطیسی تا ۸۰۰ هرتز در نواحی استوایی). این جریان متناوب برای مدت محدودی (τ) در لوپ برقرار می‌شود (شکل ۳). هرچه مدت τ و همچنین شدت جریان I (بیشینه دامنه جریان متناوب) بیشتر باشد، میدان به اعماق بیشتری نفوذ می‌کند. در واقع حاصل ضرب τ و I عبارت است از گشتاور تپ (Pulse moment)، که عمق نفوذ، تابعی از آن است:

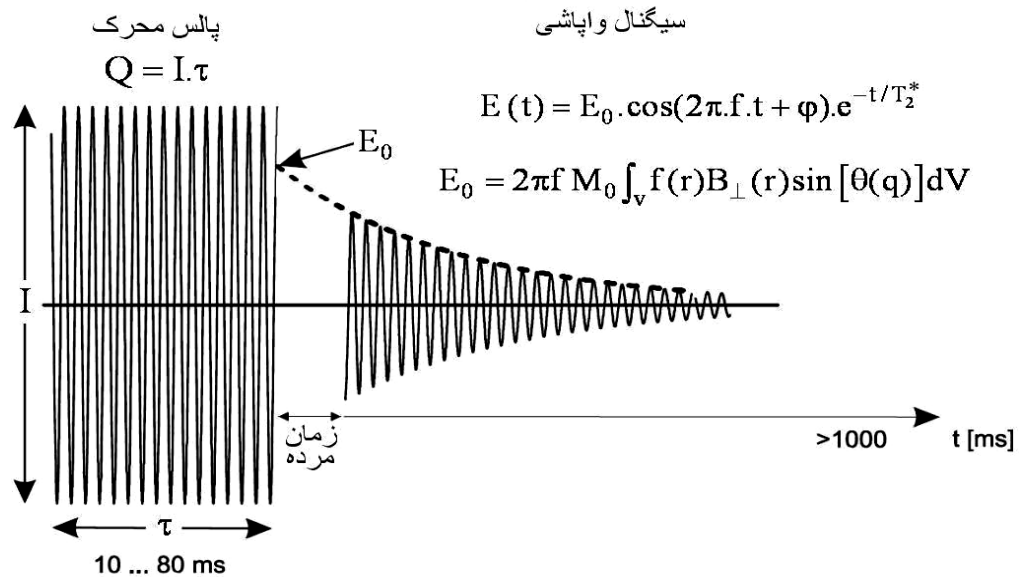
$$Q = I \cdot \tau \quad (۴)$$

پس از آنکه جریان متناوب در داخل لوپ قطع می‌شود، در اثر واهلش پروتون‌ها، یک سیگنال ولتاژ واپاشنده در لوپ القا می‌شود که تابعی از زمان اندازه‌گیری و میزان گشتاور تپ است:

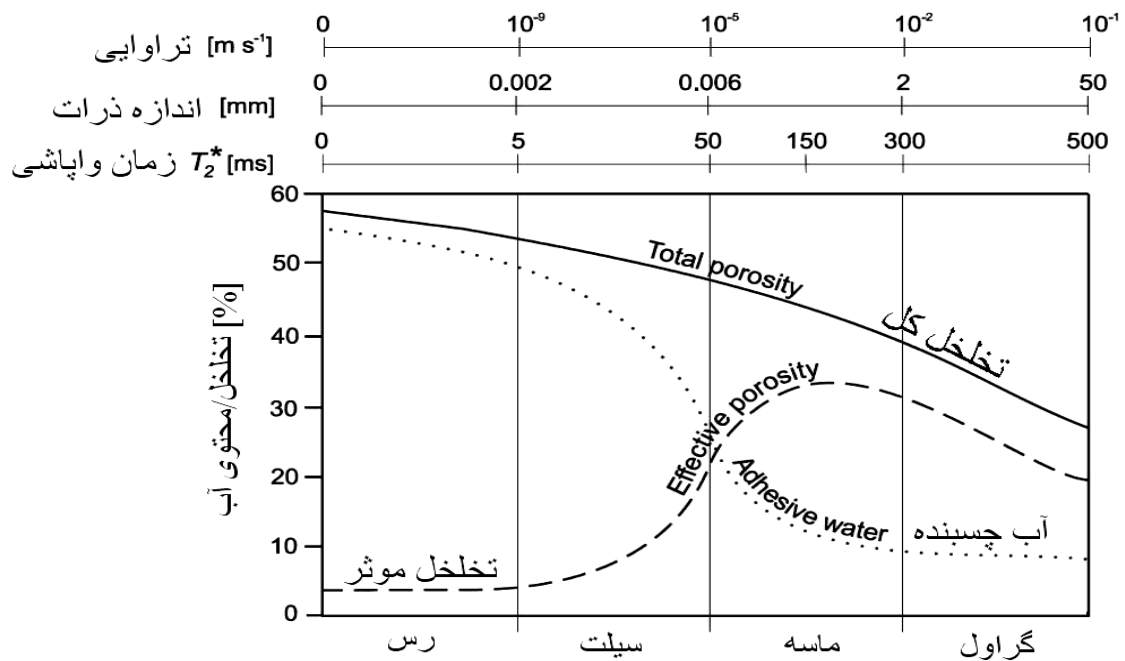
$$E(t, Q) = E_0(Q) \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi(Q)) \cdot e^{-t/T_2^*(Q)} \quad (۵)$$

E_0 عبارت است از دامنه اولیه سیگنال در لحظه‌ی $t = 0$ که به محتوی آب نسبت داده می‌شود. T_2^* عبارت است از ثابت زمان واپاشی که تابعی از اندازه متوسط ذرات است و با استفاده از مجموعه‌ای از روابط تجربی، با تراوایی ارتباط پیدا می‌کند (کینون و همکاران، ۱۹۹۸). بنابراین به ازای هر مقدار گشتاور تپ، یک مقدار E_0 و یک مقدار T_2^* و یک مقدار φ به دست می‌آید. در واقع

هیدرولیکی سنگ‌ها (تراوایی و انواع تخلخل) و واپاشی سیگنال) نشان داده شده است (کنادل و همکاران، پارامترهای حاصل از SNMR (درصد محتوی آب و زمان (۲۰۰۷).



شکل ۳. نمودار زمانی اندازه‌گیری SNMR. برون‌یابی پوش منحنی واپاشی در $t = 0$ ، مقدار دامنه سیگنال اولیه را بدست می‌دهد.



شکل ۴. رابطه بین محتوی آب (تخلخل در حالت اشباع)، تخلخل کل، تخلخل موثر، زمان واپاشی، تراوایی، اندازه و نوع ذرات، برای آب چسبنده به دیواره منافذ آن‌قدر کوچک است که با فناوری‌های موجود نمی‌توان اثر آن را اندازه گرفت (کنادل و همکاران، ۲۰۰۷).

لارمور و شکل آنتن محاسبه می‌کند تا بهینه‌ترین سیگنال ممکن تولید شود.

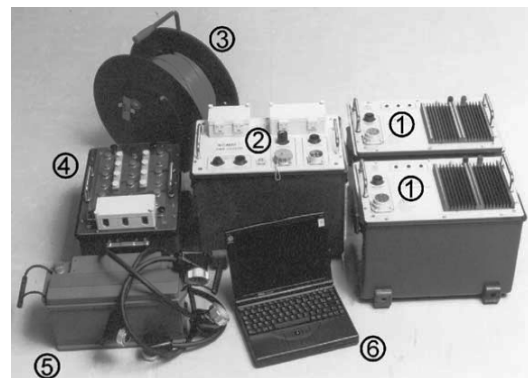
نسبت سیگنال به نوفه (S/N) شاخصی از مناسب بودن محل برای اندازه‌گیری است. از آنجا که سیگنال تولید شده توسط آب زیرزمینی معمولاً بسیار کوچک است، هرچه نسبت S/N بالاتر باشد امکان موفقیت روش بیشتر می‌شود. بهترین مقدار S/N قابل دستیابی با دستگاه NUMIS، ۲۰ است که دستیابی به آن بسیار مشکل است. برای وارون‌سازی مطمئن داده‌های SNMR، نیاز به نسبت‌های بالای ۵ است. داده‌های با نسبت S/N تقریباً ۱، اطلاعاتی در حد مقدار کل آب آبخوان و عمق‌های متوسط را در اختیار قرار می‌دهند. از داده‌های با نسبت S/N کمتر از ۱، بسیار با احتیاط استفاده می‌شود (کنادل و همکاران، ۲۰۰۷). بهترین راه برای افزایش نسبت S/N برانبارش سیگنال است. برای این کار در هر گشتاور تپی، اندازه‌گیری چندین بار تکرار می‌گردد و نتایج با یکدیگر جمع می‌شوند. این کار تا حدود زیادی نوفه‌های اتفاقی را تضعیف می‌کند.

شکل لوپ ممکن است دایره‌ای، مربعی، به شکل ۸ انگلیسی (دو دایره یا دو مربع برای کاهش نوفه) باشد. توجه شود که شکل لوپ ۸ انگلیسی به میزان ۱۰ برابر، نسبت سیگنال به نوفه را بالا می‌برد ولی عمق نفوذ آن نصف حالت عادی است. همچنین می‌توان با افزایش تعداد دورهای لوپ، سیگنال را بهبود داد. در حضور خطوط فشار قوی جریان الکتریکی، می‌توان از شکل لوپ ۸ انگلیسی طوری استفاده کرد که محور آن موازی با خط کابل جریان باشد. این روش به میزان قابل توجهی نوفه هارمونیک را کاهش می‌دهد.

تغییر بسامد لارمور در محدوده کاوش (در سطح لوپ) نباید بیشتر از ۱ هرتز باشد. تغییرات بالاتر از ۱ هرتز باعث به هم ریختن منحنی‌های سونداژ می‌شود. از آنجا که ممکن است این تغییرات در ابتدای کار کمی بیشتر از ۱

۴ روش ثبت سیگنال در دستگاه NUMIS^{PLUS}

در شکل ۵، بخش‌های گوناگون دستگاه NUMIS^{PLUS} با شماره‌های ۱ تا ۶ نشان داده شده است که به ترتیب عبارت‌اند از: (۱) دو مبدل DC/DC، برای تولید گشتاور تپ مناسب. (۲) ژنراتور: قسمت اصلی واحد اندازه‌گیری که هم نقش فرستنده و هم نقش گیرنده را دارد. (۳) قرقره و کابل مسی برای پهن کردن لوپ آنتن. (۴) واحد خازن‌های تیونینگ (معمولاً شامل دوسری که جریان متناوب لازم در بسامد لارمور را تامین می‌کنند). (۵) باتری قابل شارژ با ظرفیت زیاد (یا دو باتری معمولی ۱۲ ولت). (۶) لپ‌تاپ برای کنترل کیفیت و پردازش داده‌ها.



شکل ۵. دستگاه اندازه‌گیری تجاری NUMIS^{PLUS} (لایسنس‌سکی و روی ۲۰۰۴). از مبدل و خازن‌های اضافی در مواقعی که میدان مغناطیسی زمین کوچک است استفاده می‌شود.

برداشت داده با دستگاه NUMIS^{PLUS}، کاملاً خودکار و با رایانه صورت می‌گیرد. از این رو انتخاب پارامترهای اولیه اندازه‌گیری، اهمیت خاصی دارد. بهترین شرایط تشدید هنگامی رخ می‌دهد که تپ فرستنده در بسامد لارمور فرستاده شود. بنابراین اولین قدم در اندازه‌گیری، به دست آوردن بسامد لارمور محلی است. برای این کار از یک مغناطیس سنج پروتون برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی کل استفاده می‌شود. طبق معادله ۲، بسامد لارمور با نرم‌افزار داده برداری محاسبه می‌شود. سپس نرم‌افزار بهترین آرایه خازنی ممکن را با توجه به بسامد

که در آن $M_0 = 3.29 \times 10^{-3} B_0 [J / (T.m^3)]$ عبارت است از مغناطش هسته‌ای پروتون‌ها در دمای تعادل (۲۹۳ درجه کلوین) و زمان $t = 0$. $n(r)$ عبارت است از کسر آب آزاد موجود در فضای متخلخل سنگ در واحد حجم dV و در مکان $r(x, y, z)$ ، که عددی بین صفر تا یک است. B_{\perp} عبارت است از مولفه‌ای از میدان مغناطیسی القایی که عمود بر میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرد. B_{\perp} تابعی از r ، گسترش مقاومت ویژه $(\rho(r))$ و زاویه انحراف ژئومغناطیسی (α) است. f بسامد لارمور است و γ نسبت ژئومغناطیسی پروتون‌ها. $\theta(Q)$ نیز عبارت است از زاویه انحراف گشتاور مغناطیسی پروتون‌ها از میدان مغناطیسی زمین که برابر است با:

$$\theta(Q) = \frac{1}{2} \gamma B_{\perp}(r) \cdot Q \quad (۷)$$

با فرض لایه‌بندی افقی زمین و معلوم بودن لایه‌بندی مقاومت ویژه زمین $(\rho(r) = \rho(z))$ ، می‌توان دامنه سیگنال را به صورت یک معادله انتگرال خطی فردهولم از مرتبه اول نشان داد:

$$E_0(Q) = \int_0^L K(Q, z) \cdot n(z) \cdot dz \quad (۸)$$

که در آن $K(Q, z)$ یک تابع کرنل به شکل زیر است:

$$K(Q, z) = 2\pi \cdot f \cdot M_0 \int_{x,y} B_{\perp}(r, \rho(r), \alpha) \cdot \sin[\theta(Q)] \cdot dx dy \quad (۹)$$

محاسبات عددی نشان می‌دهد که پروتون‌های عمیق، سیگنال‌های ضعیفی تولید می‌کنند و می‌توان انتگرال فوق را به شکل زیر محدود کرد:

$$x^2 + y^2 \leq (L)^2$$

هرگز باشد، ابتدا یک اندازه‌گیری آزمون با تعداد برانبارش و گشتاور تپ کم صورت می‌گیرد تا مقدار بسامد لارمور بهینه به دست آید. برای شروع کار می‌توان با تعداد برانبارش‌های کم (۴ برانبارش) شروع کرد تا به میزان نوفه زمینه پی برد. سپس می‌توان بر این اساس تعداد برانبارش‌های مورد نظر را انتخاب کرد. انتخاب پارامترهای اولیه برای اندازه‌گیری سیگنال، بیشتر به تجربه وابسته است تا یک قاعده کلی.

انتخاب تعداد گشتاورهای تپ نیز اهمیت خاصی دارد. هرچه تعداد گشتاورهای تپ بالاتر باشد، منحنی سونداژ صاف‌تری به دست می‌آید. معمولاً از ۴ تا ۴۰ گشتاور تپ استفاده می‌شود (بین ۳۰ تا ۳۰۰۰۰ آمپرمیلی ثانیه)، ولی بهینه‌ترین توصیه‌ای که در راهنمای دستگاه آمده، استفاده از ۱۶ گشتاور تپ است.

همچنین در طول اندازه‌گیری SNMR می‌توان از سونداژزنی الکتریکی قائم (VES) نیز استفاده کرد. محققان دانشگاه برلین به‌طور تجربی دریافته‌اند که استفاده هم‌زمان VES و SNMR اثر نامطلوبی در اندازه‌گیری‌های یکدیگر ندارند. بنابراین پس از تعیین پارامترهای اولیه اندازه‌گیری SNMR، می‌توان با اطمینان از برداشت خودکار SNMR، یک (یا چند) سونداژ الکتریکی نیز در داخل لوپ عملی کرد (کنادل و همکاران، ۲۰۰۷).

۵ مدل پیشرو

تراشکین (۱۹۹۵) روشن ساخت که مقدار E_0 برای هر جزء دیفرانسیلی dV در مکان زیرسطحی $r(x, y, z)$ برابر است با:

$$E_0(Q) = 2\pi \cdot f \cdot M_0 \int_V n(r) \cdot B_{\perp}(r, \rho(r), \alpha) \cdot \sin[\theta(Q)] \cdot dV(r) \quad (۶)$$

است (این موضوع هنوز در دست بررسی است). وارون‌سازی عرضه شده لگچنکو (۱۹۹۸)، مبنای کار نرم‌افزار Samovar است که در این تحقیق از آن استفاده شده است. در این روش وارون‌سازی، یک مدل یک‌بعدی پیشرو به صورت عددی برای تعداد لایه‌هایی برابر با تعداد Qها، با فواصل لگاریتمی از سطح زمین تا حداکثر عمق تعیین شده محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از یک برازش کمترین مربعات از راه یک عملگر هموارکننده، بهترین مدل قابل انطباق با داده‌های تجربی به دست می‌آید.

بیشینه عمقی که در شرایط آرمانی می‌توان با روش SNMR به آن رسید حدود $2L$ است (لبلیش، ۱۹۹۴). باین حال در شرایط واقعی، نتایج مطلوب فقط برای اعماق IL موجوداند (روی و لایبزنسکی، ۲۰۰۴). در نرم‌افزار مدل‌سازی آیریس، عمق بیشینه وارون‌سازی، با پارامتری به نام بیشینه عمق ماتریس (Maximum Depth of the Matrix یا به اختصار MDM). تعریف می‌شود. برای MDM معمولاً از مقادیر کمتر از $2L$ استفاده می‌شود.

مقادیری نظیر $2L, \sqrt{2}L$ و L معمولاً برای MDM استفاده می‌گردند. مقادیر کوچک‌تر MDM، قدرت تفکیک وارون‌سازی را بیشتر می‌کنند. باین حال اگر MDM خیلی کوچک باشد (آبخوان عمیق‌تر از حداکثر عمق ماتریس باشد)، وارون‌سازی تحت تاثیر آب عمیق قرار گرفته و درصد آب کمی بیشتر از آنچه هست به دست می‌آید. در محیط‌های دارای مقاومت ویژه الکتریکی زیاد، کاوش با روش SNMR حتی در نسبت‌های کم S/N موفقیت آمیز است. در محیط‌های رسانای الکتریکی، سیگنال معمولاً تضعیف می‌شود (تراشکین، ۱۹۹۵). این امر باعث کاهش عمق نفوذ می‌شود. اثر لایه‌های رسانای الکتریکی در مقاومت ویژه‌های کمتر از ۵۰ اهم متر بیشتر نمایان می‌شود (لگچنکو، ۲۰۰۲). در چنین شرایطی، استفاده از یک مدل

طول L عبارت است از حداکثر عمق نفوذ، که می‌تواند بین $D/2$ تا $2D$ باشد. مقدار D نیز عبارت است از قطر آنتن در حالت دایره‌ای (یا یک ضلع آن در حالت مربعی). به نظر لبلیش (۱۹۹۴)، در بهترین شرایط اندازه‌گیری، می‌توان از مقدار $L = 2D$ استفاده کرد. با این حال تحقیقات نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی شرایط واقعی صحرائی، بهترین نتایج با $L = D$ به دست می‌آید (روی و لایبزنسکی، ۲۰۰۴). هرچه میزان L کمتر باشد، قدرت تفکیک بیشتر می‌شود. محیط رسانای الکتریکی، عمق نفوذ را کاهش می‌دهد. تحقیقات لگچنکو و همکاران (۲۰۰۲) نشان می‌دهد که اثر لایه‌های رسانا برای مقادیر مقاومت ویژه تقریباً کمتر از ۵۰ اهم متر اهمیت می‌یابد. در چنین شرایطی اطلاع داشتن از ساختار مقاومت ویژه زمین رسانا، و به دست آوردن شکل صحیح تابع کرنل، به مدل‌سازی بهینه سیگنال SNMR بسیار کمک می‌کند.

۶ وارون‌سازی

روش‌های گوناگونی برای وارون‌سازی داده‌های SNMR عرضه شده است. لگچنکو در ۱۹۹۸ از روش بهنجارسازی تیخونوف (Tikhonov Regularization) برای وارون‌سازی داده‌های دامنه اولیه استفاده کرد. روش بهینه‌سازی لگچنکو بر پایه گرادیان مزدوج (Conjugate Gradient) است و مبنای روش وارون‌سازی در این مقاله قرار دارد.

هدف از وارون‌سازی داده‌های SNMR، به دست آوردن سه پارامتر است: (۱) درصد محتوی آب (تخلخل در حالت اشباع ۱۰۰ درصد) از راه وارون‌سازی داده‌های مربوط به دامنه اولیه سیگنال SNMR. (۲) تراوایی، که تابعی از نتیجه وارون‌سازی زمان واپاشی و تخلخل محاسبه شده از راه وارون‌سازی دامنه اولیه است. (۳) مقاومت ویژه، که از روی مدل‌سازی وارون داده‌های فاز قابل استخراج

مقاومت ویژه الکتریکی از منطقه، در مدل‌سازی SNMR، به وارون‌سازی بهینه آن کمک زیادی می‌کند. مدل مقاومت ویژه را می‌توان با استفاده از روش‌های مقاومت ویژه DC یا روش‌های TEM به دست آورد.

۷ محتوی آب آزاد حاصل از روش SNMR

محتوی آب آزاد SNMR، به صورت درصد آب در برابر عمق بیان می‌شود. در واقع محتوی آب آزاد SNMR، $n_{SNMR}(Z)$ ، پارامتر خروجی وارون‌سازی دامنه اولیه (E_0) است. برای هر عمقی (بر اساس گشتاور تپ فرستنده) مقدار E_0 مستقیماً با تعداد هسته‌های هیدروژن آزاد مرتبط است. تعداد هسته‌های هیدروژن نیز با محتوی آب آزاد، $n_f(Z)$ در حجم آبخوان مورد بررسی (مارسیلی، ۱۹۸۶) مرتبط است. با فرض ناچیز بودن مقدار آب در حفره‌های بسته، $n_{SNMR}(Z)$ در زون اشباع برابر با تخلخل موثر ($n_{SNMR}(Z) = n_e(Z)$) خواهد بود.

قابلیت ذخیره (Storativity)، S یک آبخوان طبق تعریف فیتز (۱۹۹۴) عبارت است از حجم آبی که از ذخیره آبخوان خارج یا به آن داخل می‌شود، بر واحد مساحت سطح، بر واحد تغییر در مولفه هد هیدرولیک عمود بر آن سطح. منطبق با نوع آبخوان دو نوع قابلیت ذخیره وجود دارد: قابلیت ذخیره محبوس (Confined)، S_c و قابلیت ذخیره نامحبوس (Unconfined)، S_u . در آبخوان‌های نامحبوس با ذخیره کشسان ناچیز، قسمت عمده ذخیره آبخوان، ذخیره گرانشی است که با آبدهی ویژه (Specific yield)، S_y بیان می‌شود. با استفاده از روش SNMR، می‌توان S_y را از راه کم کردن نگهداشت ویژه (Specific retention)، S_r از n_{SNMR} به دست آورد (روی و لایزینسکی، ۲۰۰۳):

$$S_y = n_{SNMR} - S_r \quad (10)$$

نگهداشت ویژه عبارت است از کسری از آب کل آبخوان که پس از پمپاژ بالاتر از سطح ایستابی آبخوان قرار می‌گیرد. مقدار S_r را می‌توان هم از راه تست‌های در محل و هم از جدول‌های متداول به دست آورد. در شکل ۷ مقدار تقریبی نگهداشت ویژه، آبدهی ویژه و تخلخل برای انواع ماسه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با دانه‌ریزتر شدن، مقدار آبدهی کاهش می‌یابد. همچنین، در هیدروژنولوژی کارست‌ها، آهک و کالک، مقدار S_r را بالا می‌برد و آبدهی کاهش می‌یابد (گلدشایدنر و درو، ۲۰۰۷). از آنجا که فناوری کنونی SNMR به زمان‌های واپاشی زیر ۳۰ میلی‌ثانیه حساس نیست، آب محصور در حفره‌های بسته را نمی‌توان با روش SNMR تشخیص داد. بنابراین n_{SNMR} و S_y حاصل از این روش برآوردهای حداقلی از واقعیت هستند.

در آبخوان‌های محبوس، S_c ترکیب شده است از یک بخش کشسان به نام قابلیت ذخیره کشسان (S_e) که به طور مستقیم نمی‌توان آن را با SNMR اندازه گرفت، و یک بخش گرانشی که عبارت است از حجم آبی که به صورت طبیعی می‌تواند از آبخوان خارج شود (وقتی سطح پیرومتری زیر لایه محبوس کننده باشد). در آبخوان‌های محبوس، مشابه پارامتر آبدهی ویژه، پارامتری دیگر به نام زهکشی ویژه (S_d) تعریف می‌شود:

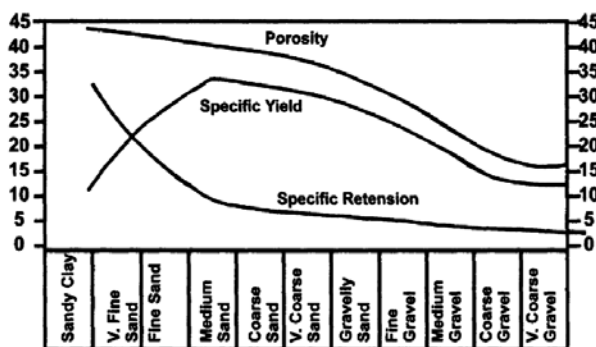
$$S_d = n_{SNMR} - S_r \quad (11)$$

۸ محاسبه تراوایی از روی ثابت زمانی واپاشی
هنوز رابطه‌ای کلی برای محاسبه تراوایی از روی ثابت زمانی واپاشی (T_2^*) عرضه نشده است. با این حال کنیون، رابطه‌ای تجربی برای این منظور پیشنهاد کرده است:

$$K_{SNMR} = C(n_{SNMR})^a (T_2^*)^b \quad (12)$$

SELECTED VALUES OF POROSITY, SPECIFIC YIELD, AND SPECIFIC RETENTION
[Values in percent by volume]

Material	Porosity	Specific yield	Specific retention
Soil	55	40	15
Clay	50	2	48
Sand	25	22	3
Gravel	20	19	1
Limestone	20	18	2
Sandstone (semiconsolidated)	11	6	5
Granite	.1	.09	.01
Basalt (young)	11	8	3

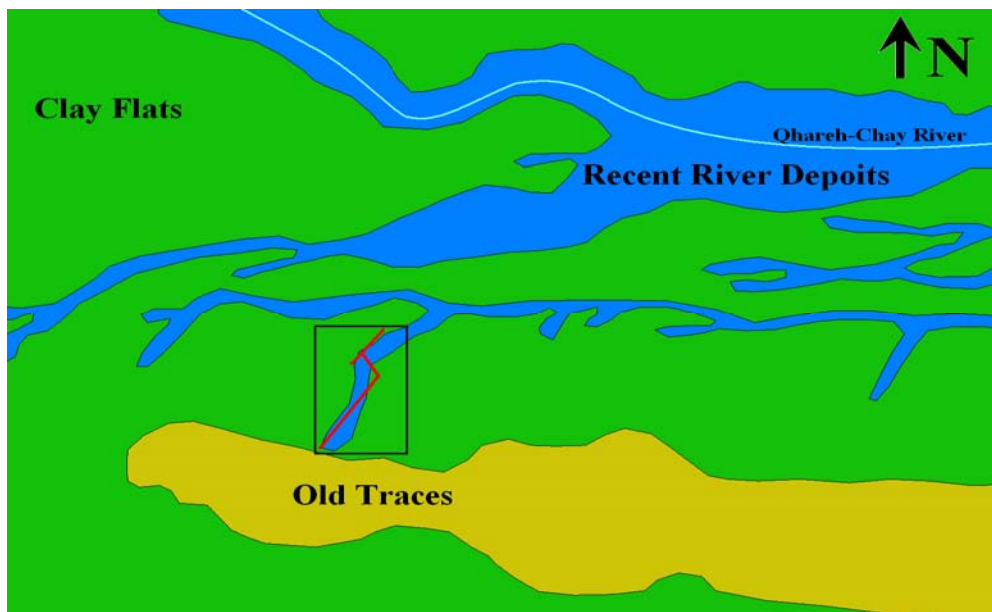


شکل ۶. رابطه نگهداشت ویژه، آبدهی ویژه و تخلخل برای انواع ماسه (سمت راست) و لیتولوژی‌های (سمت چپ) آبخوان‌های نامحبوس (ویت، ۲۰۰۸).

۸ داده‌های صحرایی

منطقه مورد بررسی در شمال غرب قم (الویر آباد) واقع شده است. در نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۷)، سه واحد لیتولوژیکی متفاوت نشان داده شده است. رسوبات رودخانه‌ای عهدحاضر (Recent River Deposits) در اطراف کانال رودخانه‌ای تجمع یافته‌اند. تراس‌های آبرفتی قدیمی (Old Traces) ارتفاع‌ساز هستند. کفه‌های رسی (Clay Flats) نیز قسمت عمده منطقه را پوشانده‌اند.

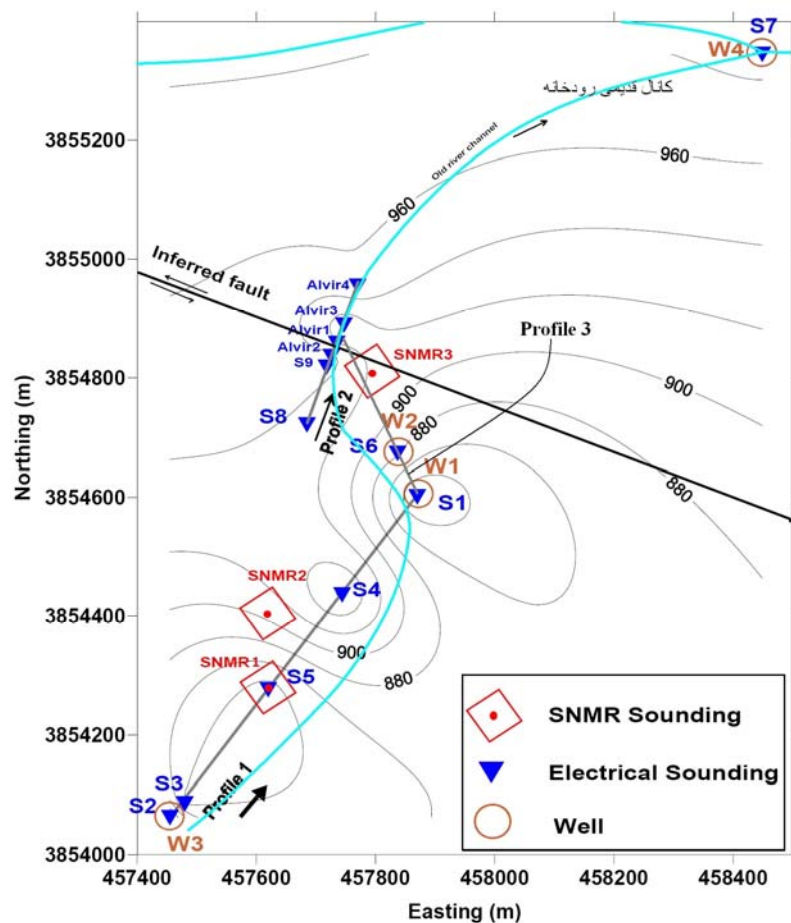
که در آن C ، a و b ثابت‌های تجربی هستند. برای هر محل خاص، از مقایسه با نتایج آزمایش پمپاژ به دست می‌آید. سیور (۱۹۶۶) مقادیر ۱ و ۲ را به ترتیب برای a و b پیشنهاد داده است. کنیون (۱۹۹۷) مقادیر ۲ و ۴ را به ترتیب برای a و b مناسبتر دانسته است. نرم‌افزار وارون‌سازی نومیس (Samovar) از مقادیر ۲ و ۴ به ترتیب برای a و b و مقدار $11-10 \times 7$ برای C استفاده می‌کند (آیریس اینسترومنت، ۲۰۰۲).



شکل ۷. نقشه رقومی ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی الویرآباد، متشکل از سه واحد لیتولوژیکی کواترنری. منطقه مورد تحقیق در امتداد رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر انتخاب شده است (مستطیل، بالای تراس‌های قدیمی).

منطقه‌ای که سونداژهای الکتریکی در آن صورت گرفته تعمیم داده می‌شود. بر این اساس، با دانستن اینکه سطح آب زیرزمینی در محل چاه W1 برابر با ۱۵ متر است، با ثابت نگه‌داشتن این پارامتر در وارون‌سازی الکتریکی، مدل‌سازی بهینه شده است. سپس نتیجه وارون‌سازی سونداژ S1 (پارامترهای مدل الکتریکی وارون زمین در محل سونداژ S1)، به‌منزله مدل اولیه، به سونداژ مجاورش انتقال داده شده است. وارون‌سازی سونداژ S2 براساس این اطلاعات اولیه صورت گرفته است. برای همه این سونداژهای الکتریکی امتداد مرز آبخوان به همین نحو مشخص می‌شود.

تعداد ۱۳ سونداژ الکتریکی در قالب سه نیم‌رخ و سه سونداژ تشدید مغناطیسی (MRS) در منطقه صورت گرفته است. تعداد ۴ حلقه چاه آب در منطقه وجود دارد. چاه W3 (شکل ۸) خشک است و W1 و W2 در مرکز نقشه (شکل ۸) آبدهی اندکی را نشان می‌دهند. داده‌های حاصل از سونداژهای الکتریکی، به صورت یک‌بُعدی مورد تفسیر قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱). بررسی‌های هیدرولوژیکی و عملی ساختن یک سونداژ الکتریکی (S7)، شرایط آبدهی چاه W4 در شمال منطقه را بسیار خوب نشان می‌دهند. اولین مرحله در تفسیر، استفاده از اطلاعات چاه‌ها است. با استفاده از عمق سطح ایستابی چاه‌ها، یک مرز آبخوانی مشخص، به کل



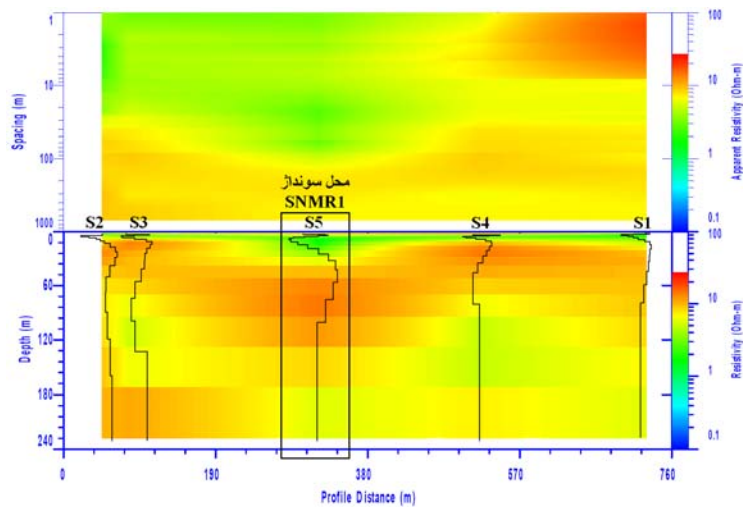
شکل ۸. طرحوار منطقه الویرآباد. خط آبی مسیر رودخانه خشک شده را نشان می‌دهد. از خاک منطقه اطراف رودخانه در زراعت استفاده می‌شود. پربندها نشانگر توپوگرافی هستند. گسل نشان داده شده در نقشه، نتیجه تفسیرهای ژئوالکتریکی است.

جدول ۱ دیده می‌شود به دلیل کم بودن تراوایی و از آنجا بالا بودن نگهداشت ویژه، میزان آبدهی ویژه به واسطه صرفاً این تخلخل چندان بالا نخواهد بود. در واقع در این محل یک آبخوان سطحی شور وجود دارد. البته داده‌های الکتریکی (شکل ۱۰) یک آبخوان عمیق را در اعماق زیر ۱۶۰ متر نشان می‌دهند، ولی عمق نفوذ روش SNMR در این محل بیشتر از ۱۰۰ متر نبوده است.

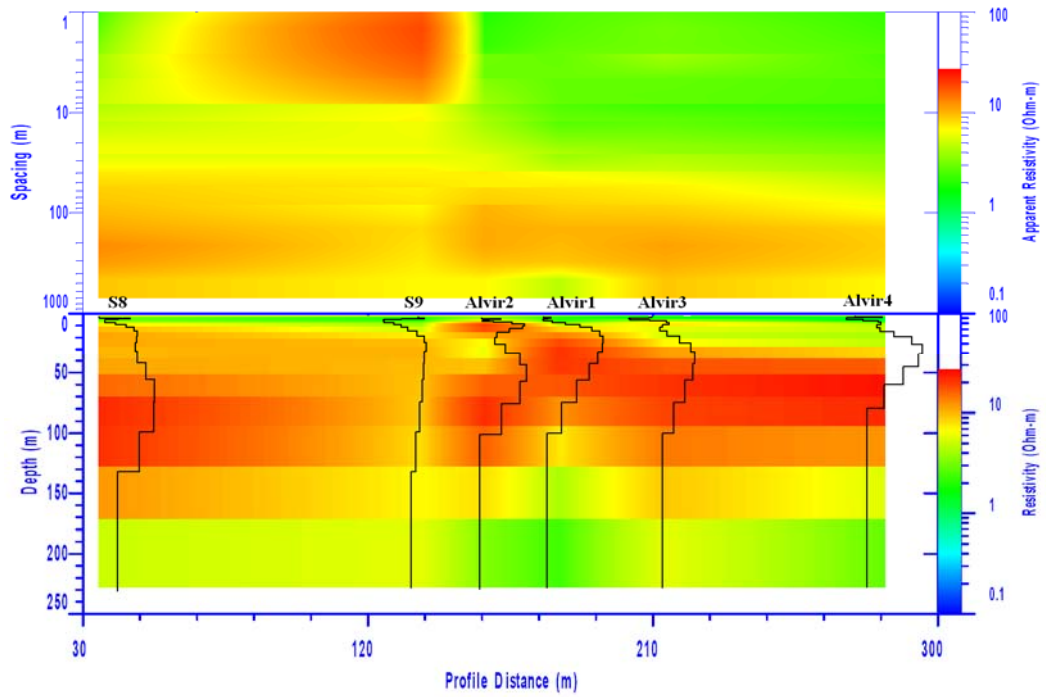
از آنجا که در نیم‌رخ ژئوالکتریکی ۲، وجود یک گسل محرز است، با توجه به شیب گسلش که به سمت جنوب است، احتمالاً یک آبخوان گسله در امتداد شیب گسل وجود دارد. از آنجا که به سمت شمال سونداژ SNMR1، عمق زون شکستگی باید کمتر شود، سونداژ SNMR2 (شکل ۱۳) برای تایید این فرضیه طراحی شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، دو آبخوان عمیق و سطحی در این محل وجود دارد. آبخوان سطحی با تخلخل نسبتاً زیاد ۷ درصد و تراوایی متوسط شاخص یک آبخوان آبرفتی معمولی است. آبخوان عمیق با تخلخل اندک (زیر ۱ درصد) و تراوایی بالا نیز شاخص یک آبخوان گسله است.

سپس با استفاده از مدل الکتریکی به دست آمده در محل سونداژهای S5 و S9 (منطبق بر محل سونداژهای ۱ و ۳ SNMR)، ماتریس کرنل محلی سونداژهای SNMR ساخته شده است. با توجه به شدت میدان مغناطیسی و زاویه انحراف آن و همچنین ساختار الکتریکی زمین و نوع لوپ به کاررفته، برای هر محل سونداژ SNMR، یک ماتریس تهیه شده است. نسبت S/N در سونداژ SNMR1 ابتدا بسیار کم بوده است. برای بالا بردن این نسبت، تهیه دقیق ماتریس کرنل و همچنین حذف برخی نقاط نامطلوب و استفاده از فیلتر ناچ (برای فیلتر کردن سیگنال‌های هارمونیک سوار بر سیگنال SNMR) مفید است. با استفاده از روش‌های افزایش نسبت S/N، برای سونداژ SNMR1 نسبت S/N به مقدار حدوداً ۳ بهبود یافته است. همچنین برای سونداژ SNMR2 این مقدار به حدود ۲ رسیده است. همچنین بیشترین میزان S/N برای سونداژ SNMR3 است که برابر با تقریباً ۴ است.

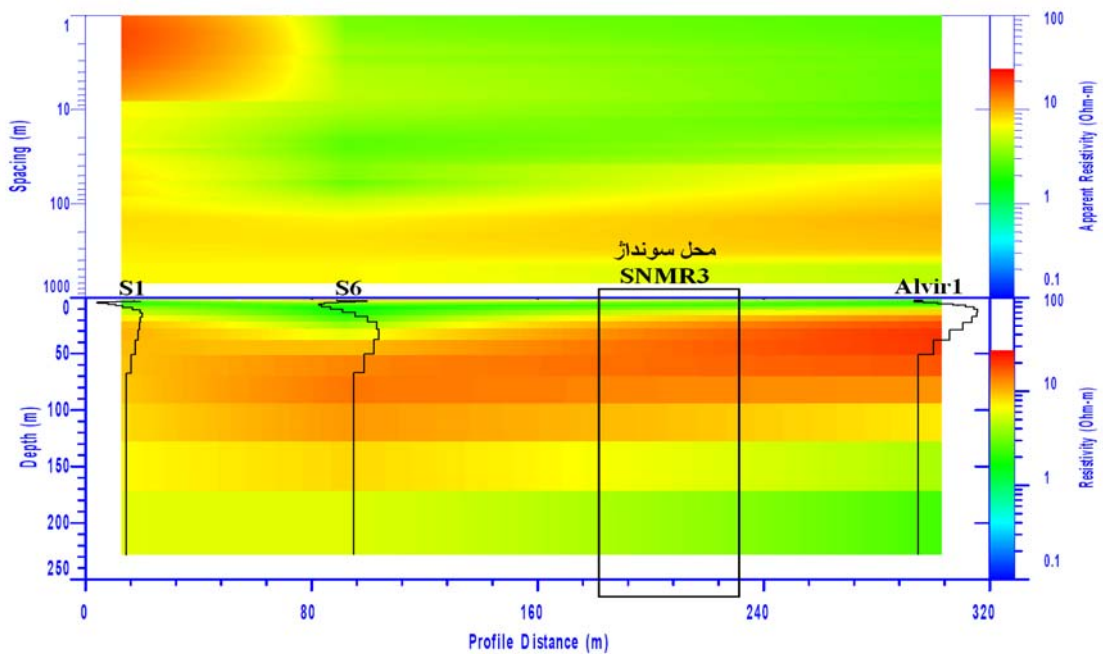
وارون‌سازی SNMR در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. سونداژهای SNMR1 و SNMR2، آبخوان سطحی با تراوایی اندک و تخلخل نسبتاً زیاد (حدود ۵ درصد) را نشان می‌دهد. ولی همان‌طور که در



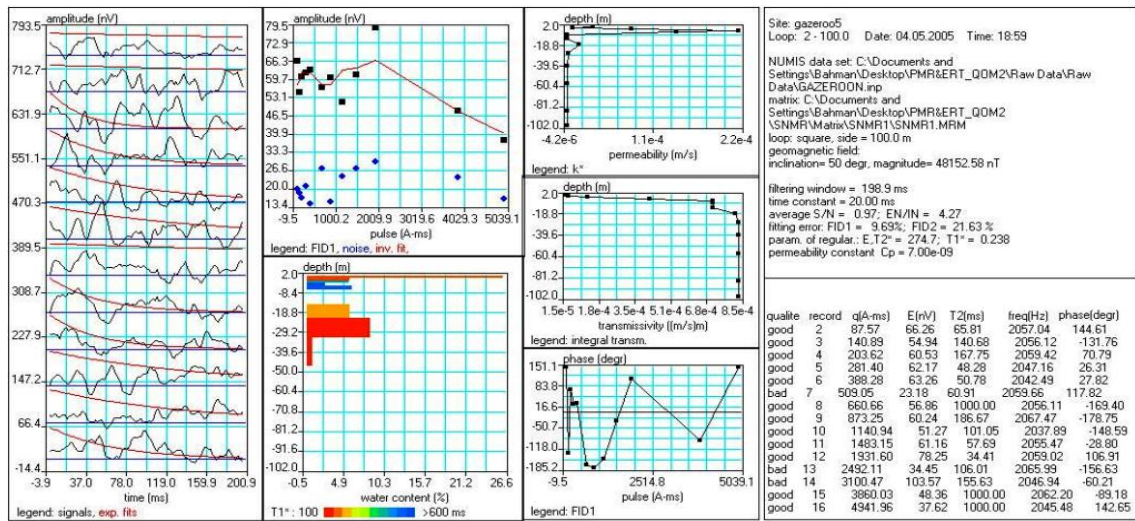
شکل ۹. نتایج وارون‌سازی داده‌های الکتریکی یک‌بُعدی در نیم‌رخ ۱، شامل ۵ سونداژ الکتریکی و دو سونداژ SNMR1 و SNMR2 (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). سونداژ SNMR2 حدود ۱۰۰ متر بالاتر از SNMR1 اجرا شده است.



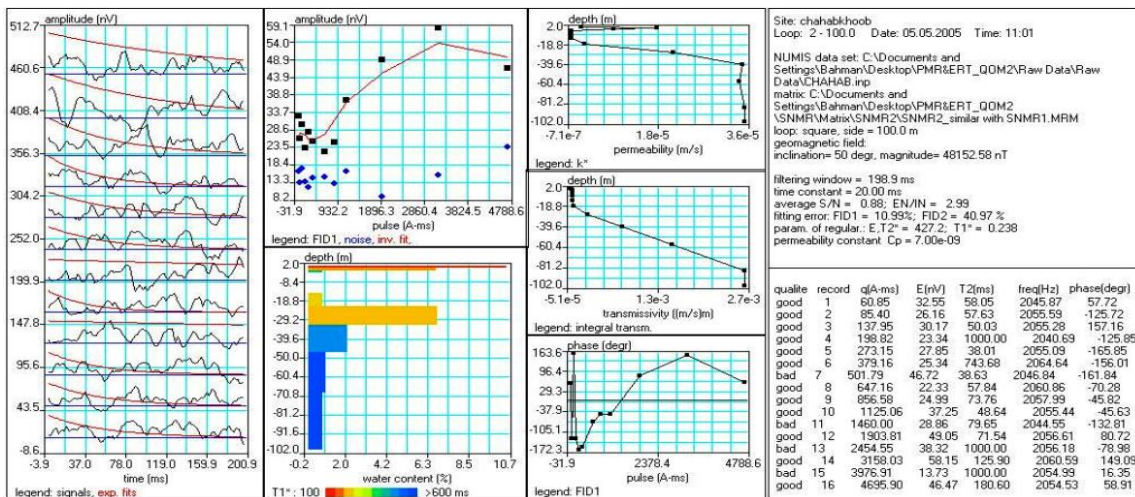
شکل ۱۰. نتایج وارون سازی داده‌های الکتریکی یک‌بُعدی در نیم‌رخ ۱ (ERT line 1)، شامل ۶ سونداژ الکتریکی. تغییرات جانبی مقاومت ویژه در محل سونداژهای Alvir1 و Alvir3 نشانگر وجود یک زون شکسته است.



شکل ۱۱. برای مشخص کردن ساختار الکتریکی زمین در محل سونداژ SNMR3، بین سونداژهای S1، S6 و Alvir1 نیز نیم‌رخ ۳ در نظر گرفته شده است.



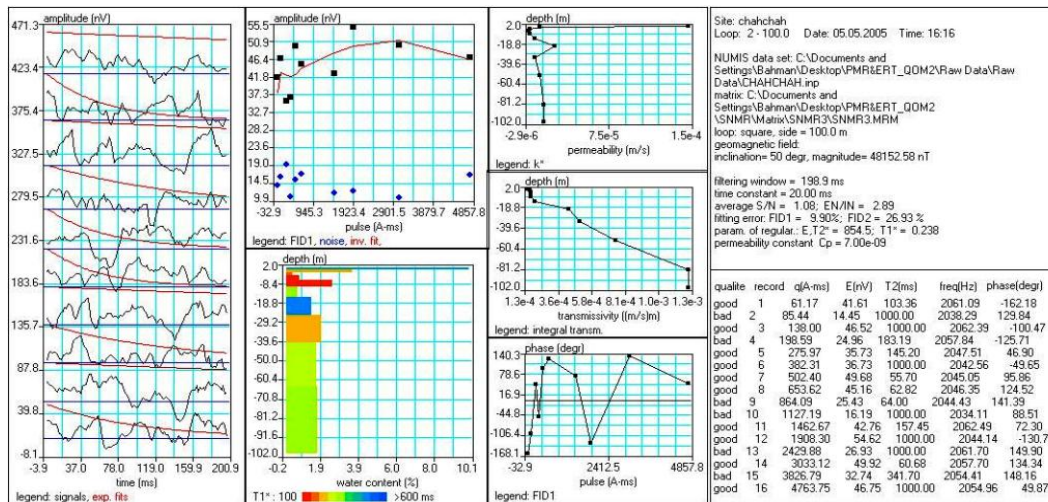
شکل ۱۲. داده‌های سونداژ SNMR1. در سمت چپ، نمودار واپاشی برای گشتاورهای تپ متفاوت نشان داده شده است. نمودار سونداژ SNMR به صورت دامنه برحسب گشتاور تپ نشان داده شده است. نتیجه وارون‌سازی نیز در زیر آن، به صورت درصد آب برحسب عمق آمده است. مقادیر رنگی میزان زمان واپاشی را نشان می‌دهد. نمودارهای تراوایی و گذردهی نیز برحسب عمق محاسبه و نشان داده شده‌اند. نمودار آخر، میزان اختلاف فاز بین فرستنده و گیرنده را برحسب گشتاور تپ نشان می‌دهد. در سمت راست هم پارامترهای اولیه اندازه‌گیری و داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داده شده است.



شکل ۱۳. داده‌های سونداژ SNMR2.

اعمق ۱۶ (سطح ایستابی) و ۲۵ متر، یک زون به شدت تراوا دیده می‌شود که احتمالاً میزان زیادی از خردشدگی را نشان می‌دهد. از این عمق به پایین کاهش در تراوایی دیده می‌شود. همچنین میزان تخلخل نیز زیر ۲ درصد است که شاخص یک آبخوان گسله است. محل سونداژ SNMR3 بهترین محل برای حفاری در نظر گرفته شده است.

حرکت هرچه بیشتر به سمت شمال، عمق آبخوان گسله را کمتر می‌کند. در سونداژ SNMR3 (شکل ۱۴)، عمق سطح ایستابی ۱۶ متر به دست آمده است که با داده‌های الکتریکی در مرز مقاومت ویژه ۱۲ اهم‌متر همخوانی دارد. در اینجا به دلیل کم شدن عمق زون خرد شده، آبخوان گسله خود را بالا کشیده است و آبخوان سطحی جایش را به یک زون خرد شده داده است. بین



شکل ۱۴. داده‌های سونداژ SNMR3.

در جدول ۱، برخی از پارامترهای محاسبه شده آبخوان، در محل سونداژهای SNMR1، SNMR2 و SNMR3 نشان داد شده است. مقدار نگهداشت ویژه آبخوان برای محاسبه آبدهی ویژه در دسترس نیست. به‌رحال نگهداشت ویژه رابطه معکوس با تراوایی دارد. بنابراین بیشترین میزان نگهداشت ویژه در سونداژ SNMR1 واقع است. لذا مقدار آبدهی ویژه آن احتمالاً خیلی کمتر از ۵ درصد خواهد بود و در حدود بقیه سونداژها است. با این تفاوت که آبخوان در محل SNMR1 شوری بیشتری دارد و همچنین سطحی است و ضخامت اندکی دارد. آبخوان در محل SNMR2 نیز عمیق و احتمالاً اندکی شور است. همچنین تراوایی در محل سونداژ ۲، بیشتر از سونداژ ۳ به‌دست آمده است، ولی باید توجه کرد که ضخامت کل لایه آبدار در سونداژ ۲ کمتر است. از این‌رو باید اثر ضخامت لایه را نیز در نظر داشت. برای تعیین بهترین محل، استفاده از گذردهی، روش خوبی است. گذردهی عبارت است از حاصل‌ضرب ضخامت آبخوان در تراوایی آن. گذردهی سونداژهای SNMR2 و SNMR3 بر این اساس تقریباً یکسان است و فقط به دلیل بالاتر بودن تخلخل در SNMR3، بهترین محل برای حفاری به نظر مکان SNMR3 است.

در سونداژ SNMR3 تغییرات تراوایی با عمق اندک است ولی میزان آن در همه اعماق نسبتاً زیاد است. سطح آب در این سونداژ به‌نظر کم عمق‌تر شده (۱۵ متر) و تخلخل آبخوان به زیر ۲ درصد رسیده است. چنین مشخصاتی از خصوصیات یک آبخوان گسله است (میر و همکاران، ۲۰۰۶). آبخوان‌های گسله، معمولاً با تخلخل ظاهراً اندک و تراوایی نسبتاً زیاد در داده‌های SNMR نشان داده می‌شوند. هنوز دلیل قطعی برای این پدیده ذکر نشده است. ساختمان یک آبخوان گسله از مواد متخلخلی تشکیل می‌شود، ولی ذرات تشکیل دهنده این تخلخل جورشدگی ضعیفی دارند. به‌علاوه چنین آبخوانی مانند یک آبخوان معمولی، لایه‌بندی نشان نمی‌دهد، بلکه یک کشیدگی بعضاً قائم تا نیمه قائم را آشکار می‌کند. بنابراین احتمالاً بتوان با تصحیح معادلات پیشرو که برای زمین یک‌بُعدی و یک آبخوان معمولی تدارک دیده شده‌اند تا حدودی این مشکل را در فرایند وارون‌سازی برطرف ساخت. گرچه مشکل کم بودن قدرت سیگنال برای چنین مواردی همچنان باقی است، زیرا حجم آبی که به روش SNMR روی یک آبخوان گسله اندازه‌گیری می‌شود، هر چقدر هم که زیاد باشد، با این حال به دلیل هندسه کشیده آبخوان، سیگنال اندکی را در لوپ گیرنده القا می‌کند.

جدول ۱. پارامترهای آبخوان در محل سه سونداژ تشدید مغناطیسی. با توجه به رابطه ۱۱، می‌توان به صورت کیفی در مورد آبدی ویژه قضاوت کرد. این امر مستلزم شناخت کافی از زمین‌شناسی زیرسطحی است.

سونداژ	مقاومت ویژه معادل	تخلخل موثر	آبدی ویژه	تراوایی	گذردهی	ملاحظات آبخوان
SNMR1	8.8 Ωm	~ 5 %	کمتر از ~5%	~ 4× 10 ⁻⁶ m/s	~ 10 ⁻⁴ m ² /s 8.5	سطحی متخلخل و شور
SNMR2	احتمالاً بین 8.8 و 10.3 Ωm	~ 1 %	کمتر از ~1%	~ 3.6× 10 ⁻⁵ m/s	~ 1× 10 ⁻³ m ² /s	عمیق، تراوا و شکسته (احتمالاً شور)
SNMR3	10.3 Ωm	~ 2 %	کمتر از ~2%	~ 1.7× 10 ⁻⁵ m/s	~ 1× 10 ⁻³ m ² /s	کم عمق تا عمیق، تراوا و شکسته

۹ نتیجه‌گیری

کل در محل سونداژ است. علاوه بر این توجه به ساختمان الکتریکی زمین برای تعیین عمق نفوذ و همچنین ساخت دقیق ماتریس کرنل برای وارون‌سازی امر بسیار مهمی است که تا حدود زیادی قدرت تفکیک این روش را افزایش می‌دهد. قبل از هرگونه پردازشی، نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های مورد استفاده در این تحقیق نسبتاً کم بوده است (زیر ۱)، که دلیل آن ممکن است به نوع آبخوان مربوط باشد که آبخوانی گسله، با جهت‌گیری صفحه ای زون آبدار با حالت قائم تا نیمه قائم است. به‌علاوه، مقاومت ویژه الکتریکی زمین نیز در محدوده اندازه‌گیری نسبتاً کم بوده (زیر ۵۰ اهم‌متر) و نسبت S/N را تحت تاثیر قرار داده است. از این جهت در ساخت ماتریس کرنل SNMR به ساختار الکتریکی زمین در محل هر سونداژ SNMR توجه شده است. همچنین به دلیل واقع شدن آبخوان در یک ناحیه صنعتی - کشاورزی، نوفه‌های هماهنگ (هارمونیک) موجود در منطقه، به مقدار زیادی نسبت S/N را کاهش داده است. برای افزایش این نسبت از یک فیلتر ناچ به‌منظور حذف هارمونیک‌های شهری (۵۰ هرتز و ضرایب آن، تا سه مضرب) استفاده شده است. همچنین برخی نقاط داده‌ای بد که منحنی سونداژ را به هم ریخته و وارون‌سازی را نامتعادل می‌کنند، حذف شده‌اند. این نقاط مربوط به نوفه‌های اسپایکی هستند که روش‌های

روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای سطحی (SNMR)، جدیدترین روش ابداعی در ژئوفیزیک است. مهم‌ترین مزیت روش SNMR قابلیت تشخیص مستقیم آب با آن است. سه پارامتر تخلخل، تراوایی و مقاومت ویژه مخزن را می‌توان با وارون‌سازی داده‌های دامنه اولیه، زمان واپاشی و اختلاف فاز فرستنده و گیرنده مشخص کرد. وارون‌سازی داده‌های اختلاف فاز هنوز موضوع بحث است و تحقیقات روی آن ادامه دارد. باین‌حال، از نظر هیدروژئولوژیکی در حال حاضر می‌توان در سه مورد از این روش استفاده کرد: تعیین هندسه آبخوان، تعیین مشخصات آبخوان در محل چاه و تعیین نقطه به‌منظور حفاری. آبخوان‌های گسله، معمولاً با تخلخل ظاهراً اندک و تراوایی نسبتاً زیاد در داده‌های SNMR نشان داده می‌شود. هنوز دلیل قطعی برای این پدیده ذکر نشده است، ولی شکل هندسی آبخوان‌های گسله در این امر بی‌تاثیر نیستند. مهم‌ترین مسئله موجود در کاربرد روش SNMR در ایران، شناخت دقیق جغرافیای نوفه‌ای در کشور است. تجربه نگارندگان این مقاله در کاربرد این روش تاکنون، در بایست‌های بسیاری را برای عملی کردن SNMR نشان داده است. مهم‌ترین نکته در این راستا، اندازه‌گیری دقیق سطح نوفه محل کاوش و همچنین بزرگی میدان مغناطیسی

- Portselan, A., 1994, Surface nuclear magnetic resonance experiments to detect subsurface water at Haddam Meadows. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Vol. 2, Boston, MA, USA, 717-736.
- Marsily, G., 1986, Quantitative Hydrology, New York, Academic Press.
- Roy, J. and Lubczynski, M.W., 2004, Magnetic Resonance Sounding, New Method for Ground Water Assessment. GROUNDWATER, Vol. 42, No. 2, 291-303.
- Schirov, M., Legchenko, A., Creer, G., 1991, A new direct non-invasive groundwater detection technology for Australia. Exploration Geophysics, 22, 333-338.
- SeEVERS, D.O., 1966, A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstones. Annual Logging Symposium Transactions, Society of Professional Well Log Analysts.
- Trushkin, D.V., Shushakov, O.A., Legchenko, A.V., 1995, Surface NMR applied to an electroconductive medium. Geophysical Prospecting, 43, 623-633.
- Weight, W., D., 2008, Hydrogeology Field Manual. McGraw-Hill.
- فیلترکردن آنها هم‌اکنون یکی از شاخه‌های تحقیقاتی روش SNMR است. بنابراین با استفاده از روش‌های پردازشی موجود، این نسبت سیگنال به نوفه، به میزان ۳ تا ۴ برابر بهبود یافته است. مخزن مورد تحقیق در بررسی موردی، شامل یک آبخوان سطحی با تراوایی اندک و تخلخل نسبتاً زیاد (حدود ۵ درصد) در قسمت جنوب منطقه و یک آبخوان عمیق گسله در قسمت مرکز ناحیه و یک آبخوان کم‌عمق تا عمیق در شمال ناحیه (محل سونداژ SNMR3) است.

تشکر و قدردانی

از مهندس حسین ثنایی کمال از بخش اکتشاف موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، دکتر گرهارد لانگ و دکتر اوگور یارامانسی از دانشگاه برلین به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان نهایت قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

- Fetter, C.W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd edition, Englewood Cliffs, New York, Prentice Hall.
- Goldscheider, N., 2008, Methods in Karst Hydrogeology, Taylor & Francis Group.
- IRIS Instrument, 2004, <http://www.iris-instruments.com>
- Kenyon, W.E., Day, P.I., Straley, C., Willemsen, J.F., 1998, A three part study of NMR longitudinal relaxation properties of water saturated sandstones. SPE Formation Evaluation, 3, 622-636.
- Knödel, K., Lange, G., Voigt, H., 2007, Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies. Springer, 403-430.
- Legchenko, A.V., Baltassat, J.M., Beauce, A., Bernard, J., 2002, Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. Journal of Applied Geophysics, 50, 21-46.
- Legchenko, A.V., Shushakov, O.A., 1998, Inversion of surface NMR data. Geophysics, 63 (1), 75-84.
- Lieblich, D.A., Legchenko, A., Haeni, F.P.,