

مدل‌سازی پیشرو در روش سونداژ هسته‌ای مغناطیسی (MRS) پدیده کارست و تأثیر افزایش عمق کارستی در دو حالت اشباع و نیمه‌اشباع بر وارون‌سازی داده‌ها

امین ابراهیمی‌بردر^{۱*} و محمدکاظم حفیظی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۴/۸، پذیرش نهایی: ۹۲/۴/۱۱)

چکیده

مدل‌سازی پیشرو پایه و اساس روش‌های وارون در ژئوفیزیک به شمار می‌آید. روش سونداژ تشدید هسته‌ای مغناطیسی (MRS) یک روش نسبتاً جدید در اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی است. پاسخ این روش نسبت به وجود آب در لایه‌های زیرزمینی وابسته بوده و پارامترهای اساسی آبخوان نیز می‌تواند توسط این روش بدست آیند. کارست‌ها از مهمترین منابع آب به شمار می‌آیند و بررسی آنها در هیدرولوژی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مطالعه مجرای کارستی به عنوان یک پدیده پیچیده بررسی می‌گردد و این مجرا در اعماق مختلف و در دو حالت اشباع و نیمه‌اشباع مدل می‌شود. سپس داده‌ها وارون‌سازی شده و تأثیر افزایش عمق بر تفسیر کیفی و کمی بررسی شد. در این روش مشخص شد که از تفسیر کیفی روش SNMR برای کارست پاسخ مناسب بدست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی پیشرو، سونداژ هسته‌ای مغناطیسی، کارست، مجرای کارستی، اثر افزایش عمق، اثر افزایش نویز

Forward modeling of magnetic resonance sounding (MRS) for karsts and the effect of depth increase and saturation and half-saturation on inversion

Ebrahimibardar, A.¹ and Hafizi, M. K..²

¹Ph.D. Student, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

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

(Received: 29 Jun 2010, Accepted: 02 Jul 2013)

Summary

Forward modeling is regarded as the backbone of inversion methods in geophysics. Magnetic Resonance Sounding (MRS) is a rather new method in the exploration of groundwater water resources. In this method, when an E.M. field induced by Larmor frequency of water hydrogen protons the underground by a transmitter on the surface. Part of its energy is absorbed exclusively by the water molecules. When the excitation field is removed, the absorbed energy acts as a new source and it is released in the form of a new electromagnetic field which can be detected by a receiver at the surface. The response of this method is due to the presence of water in the underground layers and the basic parameters of the aquifer could also be calculated by this method. Karsts are considered as one of the most important water sources in many parts of the world. It is significant to investigate them especially in hydrology. However, the imaging of such targets is generally a difficult task for most geophysical methods. In this study, karsts are considered as complicated phenomena. Depth of karst conduit is the first important parameter and saturation of karst is the second one. They are modeled in different levels

of depth in two cases of saturated and half saturated conditions.

Whilst natural noise within the Larmor frequency range is generally not very large (excepting magnetic storms or other temporary disturbances). But the level of civil noise (electrical power-lines, generators, etc.) may be very high, which depends on region. The depth of investigation and resolution of the MRS method are dependent on signal to noise ratio. If the measured data are ruined by noise, it will have an adverse effect on the precision and validity of MRS results. As a result, the MRS signal has to be measured with an acceptable signal to noise ratio. We can apply different filtering methods to fulfill the best signal to noise ratio. Selection of the filtering plan depends on the noise origin. In any case study, application of the stacking is necessary. The inversion is shown in the main terms as usual, for the geophysical data, with reliance on the main issues of the plan. Data inversion is then performed and finally the effects of depth and saturation on both qualitative and quantitative data interpretation are examined. It was shown that the inversion part has a very important role and recognition of model parameters, and geology is the critical part of inversion. In this way it was shown that the interpretation of MRS Data qualitative methods for karsts appropriate response can be obtained. In addition, proficiency of filtering techniques, inversion tactics and effect of noise on MRS results are discussed.

Keywords: Magnetic resonance sounding, Karst, Depth increase, Saturation

۱ مقدمه

محتوای آب آزاد و تراوایی (میزان آب آزاد) را به صورت مستقیم اندازه گیری کنیم. این روش با نام هایی همچون سونداژ تشدید هسته ای (MRS : Magnetic Resonance Sounding) و تشدید مغناطیسی پروتون (PMR : Proton Magnetic Resonance) نیز شناخته می شود.

در سال ۱۹۸۰ سامانه موثری برای روش پیش گفته طراحی شد و در اکتشافات سطحی ژئوفیزیکی به کار رفت. این روش به صورت گسترده در شرایط متفاوت زمین شناسی و به خصوص در آبخوان های ماسه سنگی و سازندهای رُسی نیز به خوبی مورد سنگ آهک درزه و شکاف دار به کار رفته است (مانکه و یارامانچی، ۲۰۰۲).

اکتشاف و شناخت آب های زیرزمینی، بررسی امکانات بهره برداری از این منابع و بالاخره حفظ منابع آبی نه فقط دارای ارزشی فوق العاده فنی و اقتصادی است، بلکه از دیرباز در زمره مسائلی قرار داشته که توجه کاوشگران را به خود جلب کرده است. تاکنون از روش های ژئوفیزیکی گوناگونی برای اکتشاف آب

سامانه های هیدرولوژیکی و فرایندهای هیدرولوژیکی عین پیچیدگی شامل پدیده هایی هستند که هنوز به صورت کامل درک نشده اند و نیاز به فناوری بسیار پیشرفته برای درک آنها وجود دارد. برای این کار نیاز به مجموعه داده هایی هست که بسیار دقیق باشند، سریع به دست آیند و ارزان باشند. همراه با پیشرفت رایانه ها در زمینه سرعت پردازش و حجم داده ها امکان پردازش سریع تر داده ها با الگوریتم های جدیدتر فراهم آمده است. این پیشرفت ها به صورت توأمان در زمینه های نرم افزار و سخت افزار رخ داده اند و امکان دستیابی به خواص سامانه های هیدرولوژیکی را که قبلاً ممکن نبود فراهم می آورند. در این زمینه یکی از روش هایی که در حال حاضر پس از گذراندن مراحل آزمایشگاهی به صورت یکی از ابزارهای موثر در زمینه تحقیق در مورد سامانه های هیدرولوژیکی در آمده، تشدید هسته ای مغناطیسی سطحی یا به اختصار SNMR نامیده می شود. این روش اولین بار این امکان را فراهم می کند که بتوانیم با یک اندازه گیری سطحی،

آنکه، مولکول آب نیز دارای دو گشتاور قطبی مغناطیسی می‌شود. از همین رو روش MRS به‌منزله روشی ژئوفیزیکی برای تعیین میزان آب زیرزمینی معرفی می‌شود.

در حالت کلی گشتاور مغناطیسی مولکول‌های آب به‌صورت موازی یا پادموازی نسبت به میدان ژئومغناطیسی محلی B_0 قرار می‌گیرند. بسامد زاویه‌ای پروتون‌های هیدروژن بوسیله رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

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

که در آن، f_L بسامد لارمور محلی پروتون‌ها بوده و $\gamma_p = 0.267518 \text{ Hz/nT}$ نسبت ژئومغناطیسی است. با استفاده مقدار میدان ثانویه $\|B_0\| \ll B_{\perp}$ عمود بر B_0 که با بسامد لارمور محلی نوسان می‌کنند، بردار گشتاور مغناطیسی شروع به نوسان می‌کند، تغییر اعمال شده با ω_L حول محور B_0 و بردار گشتاور مغناطیسی شروع به نوسان می‌کند و این نوسان به دور محور B_0 با سرعت زاویه‌ای ω_L میدان پاسخ آن به شمار می‌رود.

با از بین رفتن میدان ثانویه، گشتاورهای مغناطیسی به حالت اولیه خود باز می‌گردند و پاسخ، میدانی با ثابت زمانی T_2^* خواهد بود. برای اندازه‌گیری‌های MRS، این میدان القایی ثانویه با آنتن لوپ با شکل‌های دایره‌ای، مربعی یا 8-شکل تولید می‌شود؛ انرژی این میدان از جریان تناوبی با رابطه (۲) بیان می‌شود:

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

شدت تپ (پالس) القایی با تپ گشتاور $q = I_0 \tau$ شناخته می‌شود که τ مدت زمان القای تپ است. پس از پایان تپ، ولتاژ القا شده در لوپ با توجه به واهلش پروتون‌های هیدروژن برانگیخته، از رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$E(t, q) = E_0(q) e^{-t/T_2^*(q)} \cos[\omega_L t + \varphi(q)] \quad (3)$$

استفاده شده است که این روش‌ها با گذشت زمان، دستخوش تحول شده و دسترسی به آب را با دقت بیشتر امکان‌پذیر ساخته‌اند.

روش مورد بررسی در این تحقیق، قادر به برآورد پارامترهای زیر است:

- (۱) بررسی بودن یا نبودن آب در اعماق متفاوت؛
- (۲) شناسایی مشخصات فیزیکی آب (شوری و شیرینی آن)؛
- (۳) شناسایی مشخصات هیدرودینامیکی لایه‌های آبدار.

هدف نهایی از این بررسی‌ها آن است که بتوان با شناخت کافی نسبت به برقراری بازده آبی سفره‌های زیرزمینی و امکانات بهره‌برداری منطقی از این منابع اقدام کرد تا این منابع به‌طور مداوم و بدون قرار گرفتن در معرض تهدید نابودی، مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق تاثیر افزایش عمق کارست و اشباع یا نیمه‌اشباع بودن آن روی برداشت MRS، بررسی شده است.

۲ مدل‌سازی داده‌های MRS

۱-۲ اصول بنیادین

روش تشدید مغناطیسی بر این اصل استوار است که بسیاری از اتم‌ها دارای نوعی دو قطبی مغناطیسی هستند که از اسپین آنها ناشی می‌شود. البته در حوزه پژوهشی MRS فقط گشتاور مغناطیسی در هسته‌های اتمی مورد توجه قرار می‌گیرد. در اینجا و در حالت غیر موازی، جفت نوترون‌ها و پروتون‌ها در راستای زاویه گشتاور جهت‌گیری می‌کنند و جفت گشتاور به‌دست آمده برای هسته کوچک، از گشتاور آخرین هسته غیر جفت به‌دست می‌آید. توجه داریم که مولکول آب شامل یک اتم اکسیژن و دو اتم هیدروژن است؛ اتم اکسیژن دارای ۸ پروتون و همچنین ۸ نوترون است و در نتیجه آن، دارای گشتاور مغناطیسی برآیند نیست. بنابراین فقط اتم هیدروژن است که با داشتن یک پروتون دارای گشتاور مغناطیسی خواهد بود. نتیجه

می‌توان با رابطه (۴) بیان کرد:

$$E_0(q)e^{-t/T_2^*(q)} = \omega_1 M_0 \int_V B_{\perp}(r) f(r) e^{-t/T_2^*(q)} \sin[\theta(q)] d^3 r \quad (4)$$

در این رابطه M_0 گشتاور مغناطیسی ماکروسکوپی مولکول‌های آب در شرایط تعادل و قبل از اعمال تب القایی است. باید توجه داشت که رابطه (۳) تنها برآوردی برای قطبیده شدن دایره‌ای میدان‌های مغناطیسی است. ویسمن و همکاران (۲۰۰۰) برای مواد بسیار رسانا، قطبش بیضوی در میدان‌های مشابه را پیشنهاد کرده‌اند. $B_{\perp}(r)$ مولفه میدان برانگیختگی و عمود بر میدان ژئومغناطیسی محلی برای واحد جریان ۱ آمپر است. زاویه انحراف اسپین‌های هیدروژن برای واحد حجم در نقطه Γ از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\theta(q, r) = 0.5 \gamma_p B_{\perp}(r) q \quad (5)$$

$f(r)$ تابعی از محتوای آب است و پارامتر $T_2^*(r)$ بیانگر میانگین ثابت زمانی واهلش (decay time constant) واحد حجم در نقطه Γ در زیر سطح است. اختلاف فاز (phase shift) φ نیز بین سیگنال تحریک که از رابطه ۱ به دست آمده و سیگنال واهلش اندازه‌گیری شده در معادله ۳ در نظر گرفته می‌شود و وابسته به رسانایی الکتریکی محیط است. اگر رسانایی خاک سطحی قابل چشم‌پوشی باشد (برای مثال $\sigma \ll 0.01 S/m$) میدان القایی و میدان پاسخ پروتون‌های هیدروژن فاز مشابهی دارند و بنابراین $\varphi = 0$ خواهد بود. برای محیط‌های بسیار رسانا هر دو پارامتر دامنه و فاز تغییر می‌کند و از همین رو تغییرات φ به ترتیب بیانگر تغییرات رسانایی خاک و آب زیرزمینی هستند. این در حالی است که تفسیر کمی فاز اندازه‌گیری‌های MRS تا کنون توسعه داده نشده است.

در اثر اعمال یک گشتاور تب محرک برابر با $q = i_0 \cdot T$ ، در داخل لوپ فرستنده هر حجم دیفرانسیلی $dv(r)$ از زیر سطح به مرکز Γ ، یک میدان الکترومغناطیسی واپاشنده تولید می‌کند که مربوط به یک دوقطبی مغناطیسی چرخان با گشتاور $dv(r)$ است. این گشتاور دیفرانسیلی، عمود بر میدان مغناطیس ایستای محلی و شدت اولیه آن برابر است با: $dM(r) = M_0 n(r) \sin(\theta) dv(r)$ که در آن $0 \leq n(r) \leq 1$ محتوی آب زیرسطحی (تخلخل در حالتی اشباع از آب) در فضای متخلخل سنگ در واحد حجم dv و در مکان $r(X, Y, Z)$ است؛ M_0 نیز گشتاور مغناطیسی پروتون‌ها و θ نمایانگر زاویه‌ای است که تحت آن بردار مغناطیس از محور Z منحرف می‌شود.

در ابتدای مسیر استفاده از MRS فقط اندازه‌گیری اثر واهلش عرضی میسر بوده است، اما با ابزارهای کنونی، می‌توان اثر مغناطیس عرضی و طولی را با هم اندازه گرفت. به علت ناهمگنی ذاتی میدان مغناطیسی زیرسطحی (به سبب خودپذیری غیر صفر سنگ‌ها)، زمان واهلش عرضی قابل اندازه‌گیری، عددی کوچک‌تر از مقدار اصلی، یعنی T_2 است که آنرا معمولاً با T_2^* نشان می‌دهند. بنابراین، T_2^* یک برآورد حداقلی از زمان واهلش عرضی T_2 است. دامنه ابتدایی E_0 در $t = 0$ (زمان پایان تب) مستقیماً به محتوی آب بستگی دارد و ثابت زمانی decay T_2^* وابسته به میانگین اندازه حفره‌ها و در نتیجه مرتبط با اندازه دانه‌بندی ماده است (کنیون، ۱۹۸۹). مقادیر T_2^* در بازه از ۶۰ میلی‌ثانیه برای رُس و ماسه رُسی تا حداکثر ۶۰۰-۱۰۰۰ میلی‌ثانیه برای آب خالص متغیرند که در نتیجه مقادیر ۶۰-۳۰۰ میلی‌ثانیه برای ماسه و ۳۰۰-۶۰۰ میلی‌ثانیه برای شن در نظر گرفته می‌شود (شیروف و همکاران، ۱۹۹۱).

با توجه به پژوهش ویسمن و همکاران (۱۹۹۹، ۲۰۰۰) و منکه و یارامانچی (۱۹۹۹) پوش سیگنال واهلش را

تپ گشتاورهای متفاوت q_k برای اعماق سونداژزنی متفاوت و برای N لایه اصلی با مقادیر ثابت f و T_2^* معادله (۶) به صورت معادله ماتریسی زیر نوشته می شود (بوران و یارامانچی، ۲۰۰۷):

$$A \cdot \chi = e \quad (10)$$

۲-۳ گسسته سازی

حاصل تقسیم محتوای آب و پارامترهای واهلش زمین لایه ای از رابطه $\chi = f_1 e^{-\frac{z}{T_{21}^*}}, \dots, f_n e^{-\frac{z}{T_{2n}^*}}$ به دست می آید. سری سیگنال های واهلش به صورت $e = (E_0(q_1) e^{-\frac{z}{T_{21}^*(q_1)}}, \dots, E_0(q_n) e^{-\frac{z}{T_{2n}^*(q_n)}})^T$ به دست می آید و T علامت ترانواده است. هر یک از عنصرهای $a_{kn} = K(q, \tilde{z})(z_n - z_{n-1})$ ماتریس توزیع سیگنال، شامل سهم فرضی ای از پاسخ سیگنال MRS لایه اصلی n برای تپ گشتاور فرضی q_k هستند. این جزء در محدوده ای که بردار میدان مغناطیسی ثابت باشد، مقدار ثابتی به خود می گیرد. محاسبات عددی نشان می دهد که پروتون های عمیق، سیگنال های ضعیفی تولید می کنند و می توان انتگرال فوق را به شکل زیر محدود کرد (لگچنکو و والا، ۲۰۰۲):

$$x^2 + y^2 \leq L^2 \quad (11)$$

رابطه (۱۱)، در مورد شکل لوپ القای میدان الکترومغناطیسی است که نشان دهنده شکل دایره ای و یا با تقریب مشخصی، شکل لوپ مربعی آنتن است؛ زیرا همه شار الکترومغناطیسی ورودی از لوپ به زمین وارد می شود و وابسته به شکل و گسترش لوپ است و L می تواند عبارت از حداکثر عمق نفوذ که بین $D/2$ و D باشد. D نیز عبارت از قطر آنتن در حالت دایره ای و یا یک ضلع آن در حالتی مربعی است. باین حال بررسی ها نشان می دهد که برای شبیه سازی شرایط واقعی صحرائی، بهترین نتایج با $L=D$ به دست می آید (لابرینسکی و روی، ۲۰۰۴)؛

۳ مدل سازی پیشرو

۱-۳ حل مسئله پیشرو

در حال حاضر اندازه گیری های MRS به روش سونداژزنی صورت می گیرد. بنابراین وارون یابی داده ها به صورت یک بُعدی خواهد بود و این بدین معنی است که محتوای آب و زمان واهلش، فقط به صورت تابعی از عمق در می آید. این نتایج از رابطه یک بُعدی (۶) به دست می آید:

$$E_0(q) e^{-t/T_2^*(q)} = \int_0^\infty K(q, z) f(z) e^{-t/T_2^*(q)} dz \quad (6)$$

در این رابطه تابع کرنل $K(q, z)$ از رابطه (۷) به دست می آید:

$$K(q, z) = \omega_1 M_0 \int_{-\omega}^{\omega} B_{\perp}(x, y, z) \sin[\theta(q)] dx dy \quad (7)$$

برای تحلیل عددی معادلات فوق، تابع های $f(z)$ و T_2^* در معادلات (۶) و (۷) را گسسته و پارامتری می نویسیم:

$$\begin{aligned} z \in [0, \infty) &\rightarrow z \in \{z_0, \dots, z_n, \dots, z_N\} \\ f(z) &\rightarrow f \in \{f_0, \dots, f_n, \dots, f_N\} \\ T_2^*(z) &\rightarrow T_2^* \in \{T_{20}^*, \dots, T_{2n}^*, \dots, T_{2N}^*\} \end{aligned} \quad (8)$$

در حالت یک بُعدی تابع محتوای آب $f(z)$ و ثابت زمانی T_2^* در هر لایه با بازه $z \in [z_{n-1}, z_n]$ دارای مقادیر ثابتی هستند. بنابراین معادله (۶) به صورت زیر نوشته می شود:

$$E_0(q) e^{-t/T_2^*(q)} = \sum_{n=1}^N \left\{ \int_{z_{n-1}}^{z_n} K(q, z) f_n e^{-t/T_{2n}^*} dz \right\} \quad (9)$$

برای لایه های به اندازه کافی کوچک، تابع کرنل $K(q, z)$ را می توان در عمق $z \in [z_{n-1}, z_n]$ ثابت فرض کرد. با توجه به کامل بودن سونداژ MRS با استفاده از K

MRS به آن رسید، $2L$ است (لابژینسکی و روی، ۲۰۰۴).
 با این حال در شرایط واقعی، نتایج مطلوب فقط برای اعماق L موجود هستند (ایریس اینسترومنتس، ۲۰۰۷). برای بیشینه عمق ماتریس (MDM) معمولاً از مقادیر کمتر از $2L$ برای MDM استفاده می‌شود. البته در محیط رسانای الکتریکی به علت تضعیف سیگنال (تراشکین، ۱۹۹۵)، عمق نفوذ کاهش می‌یابد و بنابراین MDM مقادیر کمتری می‌گیرد که بستگی به رسانایی محیط دارد. چنین شرایطی با استفاده از مدل مقاومت ویژه الکتریکی منطقه در مدل‌سازی MRS به وارون‌سازی بهینه کمک زیادی می‌کند. خاصیت فیزیکی استفاده شده در روش سونداژ تشدید مغناطیسی، بر پایه اسپین پروتون‌های هیدروژن مولکول‌های آب استوار است. باید توجه داشت که اسپین بدون اینکه چرخش فیزیکی داشته باشد دارای یک گشتاور زاویه‌ای و یک گشتاور مغناطیسی است. بزرگی این گشتاور مغناطیسی و جهت‌گیری تعادل آن و همچنین بسامد زاویه‌ای نوسان با روابط (۱۲) و (۱۳) با میدان مغناطیسی ایستا ارتباط دارند:

$$\bar{\mu}_0 = \frac{\gamma^2 \hbar \bar{B}_0 N}{3 K T V} \quad (12)$$

$$\omega_L = \gamma \cdot \bar{B}_0 \quad (13)$$

γ نسبت ژیرومغناطیسی برای پروتون‌های هیدروژن و $\frac{N}{V}$ تعداد اسپین‌ها در واحد حجم هستند و هر دو در زمره ثابت‌های فیزیکی قرار دارند؛ همچنین K ثابت بولتزمن و T دمای مطلق است. با ایجاد یک میدان مغناطیسی ثانویه با بسامد لارمور که عمود بر میدان مغناطیسی ایستا باشد، گشتاور مغناطیسی اسپینی منحرف می‌شود و حول میدان مغناطیسی ایستا یک حرکت نوسانی می‌کند (شکل ۱-ا). در حین برانگیختگی، بزرگی اسپین تغییر نمی‌کند و فقط جهت آن عوض می‌شود و یک مسیر مارپیچی شکل را روی کره واحد طی می‌کند (شکل ۱).

هرچه L کوچک‌تر باشد قدرت تفکیک بیشتر است. محیط رسانای الکتریکی، عمق نفوذ را کاهش می‌دهد و همان‌طور که گفته شد، مقاومت ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر روی سیگنال MRS اثر می‌گذارد (پارامانچی و همکاران، ۱۹۹۸). تحقیقات لگچنکو و همکاران (۲۰۰۲) نشان می‌دهد، که اثر لایه‌های رسانا برای مقادیر مقاومت ویژه تقریباً کمتر از ۵۰ اهم‌متر اهمیت بیشتری می‌یابد و بنابراین اطلاع از ساختار مقاومت ویژه زمین به مدل‌سازی بهینه کمک شایانی می‌کند.

در MRS، ماتریس کرنل با نرم‌افزار تحت DOS، NMR.EXE صورت می‌گیرد. در این نرم‌افزار، ماتریسی با توجه به پارامترهایی به شرح زیر ساخته می‌شود:

- ۱) نوع آنتن: هر آنتن یک شماره دارد که با توجه به نوع آن شماره مختص آن وارد می‌شود؛
- ۲) اندازه آنتن: برای لوپ مربعی و هشت‌مربعی اندازه یکی از اضلاع و برای لوپ دایره‌ای و هشت‌دایره‌ای اندازه قطر به کار می‌رود؛
- ۳) تعداد دور کابل استفاده شده برای آنتن؛
- ۴) بسامد لازم (برابر با بسامد لارمور در نظر گرفته می‌شود)؛

۵) بیشینه عمق ماتریس MDM؛

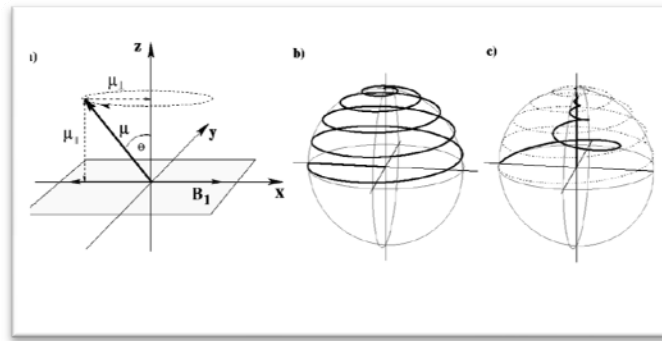
۶) زاویه میل میدان ژئومغناطیس؛

۷) بیشینه تعداد گشتاور Q ؛

۸) تعداد لایه‌های رسانا و مقدار مقاومت ویژه آنها (تعریف یک مقطع ژئوالکتریک یک‌بُعدی با حداکثر ۶ لایه).

حاصل محاسبه نرم‌افزار فوق یک ماتریس کرنل است که فقط به خصوصیات مغناطیسی و مقاومت ویژه زمین وابستگی دارد. این ماتریس در مدل‌سازی پیشرو به کار می‌رود و در واقع همان ماتریس کرنل اشاره شده در رابطه ۲-۲ است. فرمت فایل آن NAME.MDM است.

بیشینه عمقی که در شرایط ایدئال می‌توان با روش



شکل ۱. (a) مؤلفه های بردار مغناطیدگی پس از ایجاد میدان مغناطیس ثانویه، (b) چرخش مؤلفه ها در مدت زمان برانگیختگی و (c) بازگشت مؤلفه ها به حالت اول در مدت زمان واهلش.

ایستا، کم و در حد میدان مغناطیس زمین فرض می شود، در نتیجه، این دو مقدار مساوی یکدیگر در نظر گرفته می شوند و مدت زمان واهلش برای هر دو مؤلفه از روابط (۱۶) و (۱۷) به دست می آید:

$$\mu_{\perp}(t) = \mu_{\perp}(\tau_p) e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (16)$$

$$(17)$$

$$\mu_{\parallel}(t) = \mu_{\parallel}(\tau_p) [1 - e^{-\frac{t}{T_2}}]$$

در این تحقیق، نرم افزار مدل سازی پیشرو، نرم افزار SAMAGON با نگارش پرفسور لگچنکو و متعلق به شرکت ایریس اینسترومنتس فرانسه است.

۳-۳ روش سونداژ تشدید مغناطیس

در ابتدا لویی در حکم آنتن روی سطح زمین پهن می شود که می تواند شکل های متنوعی داشته باشد (شکل ۲) و بسته به عمق بررسی اندازه های گوناگونی دارد. به منظور بهبود نسبت سیگنال به نوفه، معمولاً از لوپ ۸ شکلی استفاده می شود (تراشکین و همکاران، ۱۹۹۵). تپ حاصل از جریان متناوب با رابطه (۶) درون آنتن فرستاده می شود. بسامد جریان برابر با بسامد لارمور حاصل از پروتون ها است که از میدان ژئومغناطیس محلی به دست می آید. γ نسبت ژیرومغناطیس برای پروتون ها و یک ثابت فیزیکی

مؤلفه های بردار مغناطیدگی که موازی و عمود بر میدان مغناطیس ایستا هستند و به صورت تابع هایی هماهنگ از بزرگی میدان مغناطیسی ثانویه و مدت زمان تپ بیان می شوند:

$$\mu_{\perp}(\tau_p) = \mu_0 \sin\left(\frac{1}{2} \tau_p B_1(\vec{r})\right) \quad (14)$$

$$\mu_{\parallel}(\tau_p) = \mu_0 \cos\left(\frac{1}{2} \tau_p B_1(\vec{r})\right) \quad (15)$$

مؤلفه قائم به طور پیوسته با بسامد لارمور در صفحه عمود بر میدان مغناطیسی ایستا نوسان می کند، در حالی که مؤلفه موازی نوسانی ندارد. زمان واپاشی هر دو مؤلفه، مستقل از بزرگی های مغناطیدگی است که در مدت زمان تپ به وجود آمده اند. مؤلفه عمودی مغناطیدگی با ثابت زمانی T_2 به سمت صفر واپاشی می شود و مؤلفه افقی به طور نمایی افزایش می یابد تا با ثابت زمانی T_1 به تعادل برسد؛ در نتیجه بزرگی مغناطیدگی در مدت زمان واهلش ثابت نیست.

مقدار اولیه مغناطیدگی در غیاب تپ، μ_0 و مقدار نهایی در پایان واهلش دوباره μ_0 است. اما در حین فرایند واهلش گذرا، بزرگی مؤلفه ها به صورت کاهش μ_{\perp} و افزایش μ_{\parallel} تغییر می کند. تصویر متناظر در یک کره واحد در شکل ۱ نشان داده شده است.

عموماً T_1 بزرگ تر از T_2 است اما چون شدت میدان

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 است (و هنوز تحت بررسی قرار دارد). روش‌های گوناگونی برای وارون‌سازی وجود دارد. لگچنکو و شوشاکف (۱۹۹۸) از روش بهنجارسازی تیخونوف برای وارون‌سازی داده‌های دامنه اولیه استفاده کرد؛ روش بهینه‌سازی لگچنکو بر مبنای گرادیان مزدوج استوار است. مقایسه‌ای نیز بین روش مونت کارلو و SVD در وارون‌سازی داده‌های MRS صورت گرفته است (ویچمن و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین، وارون‌سازی اشتراکی MRS و سونداژ قائم VES را نیز مورد تحقیق قرار داد (هرتریچ و یارامانچی، ۲۰۰۲). ژویلن و لگچنکو نیز به وارون‌سازی به روش برنامه‌ریزی خطی پرداخته‌اند (ژویلن و لگچنکو، ۲۰۰۲).

۵ کارست

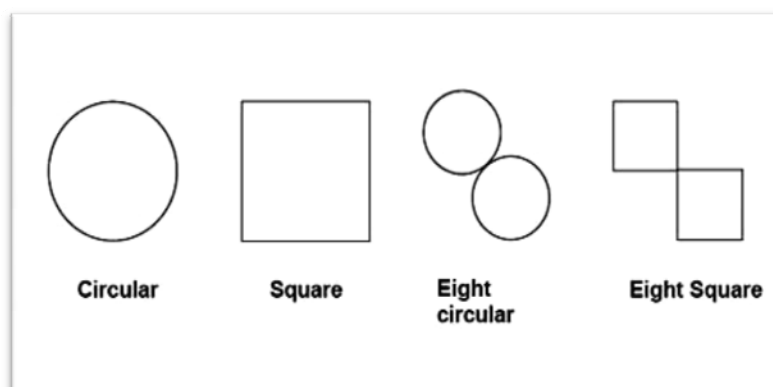
جریان آب در درز و شکاف‌ها و یا شکستگی سنگ‌های قابل انحلال در آب (عموماً سنگ‌های آهکی و دولومیتی) تغییراتی در سنگ‌ها به وجود می‌آورد که تا اعماق زیاد ادامه دارد. بیشترین این تغییرات در سطح و به صورت دگرگونی‌هایی در ظاهر سنگ‌ها پدیدار می‌شود. این مناطق را کارستی و این پدیده را کارست می‌نامند.

است. تب ایجاد شده باعث حرکت تقدیمی پروتون‌ها حول میدان ژئومغناطیسی می‌شود و با قطع جریان و از بین رفتن تب در آنتن، یک ولتاژ واهلش ایجاد می‌شود که لوپ درنقش گیرنده، آن را دریافت می‌کند. شکل تب فرستاده شده و سیگنال دریافت شده در شکل ۳ نشان داده شده است. توجه داریم که E_0 دامنه اولیه سیگنال تشدید مغناطیسی هسته‌ای، T_2^* زمان واهلش سیگنال تشدید مغناطیسی هسته‌ای و ϕ_0 فاز سونداژ تشدید مغناطیسی است. رابطه بین مؤلفه‌های سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی و پارامترهای آب‌خوان نیز به قرار زیر است.

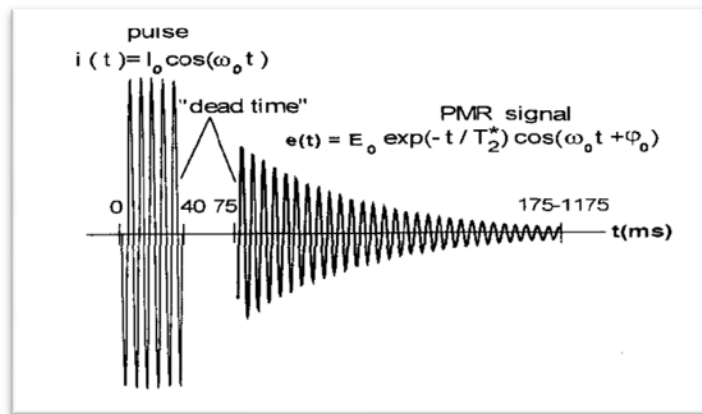
- (۱) با توجه به دامنه سیگنال، حجم آب موجود در آب‌خوان به دست می‌آید (تخلخل).
- (۲) با توجه به زمان واپاشی، اندازه متوسط درز و شکاف حاصل می‌شود (نفوذپذیری).
- (۳) ϕ_0 ، حساس به رسانایی ساختار زیرسطحی است.

۴ وارون‌سازی

هدف از وارون‌سازی داده‌های تشدید مغناطیسی هسته‌ای، به دست آوردن سه پارامتر است که عبارت‌اند از: (۱) درصد محتوای آب (تخلخل در حالتی اشباع ۱۰۰٪) که از راه وارون‌سازی داده‌های مربوط به دامنه اولیه سیگنال MRS به دست می‌آید. (۲) تراوایی که تابعی از نتیجه

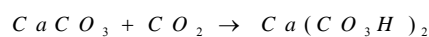


شکل ۲. انواع لوپ‌های مورد استفاده در MRS (از چپ به راست دایره‌ای، مربع‌ای، هشت دایره‌ای، هشت مربعی).



شکل ۳. شکل تب فرستاده شده و سیگنال دریافتی لوب (آیریس اینسترومنتس، ۲۰۰۷).

غیر قابل حل است، ولی هرگاه آب حاوی گاز کربنیک باشد، این گاز قابلیت انحلال کربنات کلسیم و کربنات منیزیم در آب را افزایش خواهد داد. قطرات باران حین عبور از جو مقداری از گاز کربنیک محیط را در خود حل می‌کنند، یا آنکه ترکیبات آلی موجود در خاک به تدریج تجزیه می‌شوند و گاز کربنیک حاصل از این تجزیه در درز و شکاف خاک باقی می‌ماند و به مرور زمان این گاز در آب‌های نفوذی حل می‌شود. عمل انحلال کربنات کلسیم را می‌توان به صورت واکنش زیر نشان داد:



دو عامل بر این واکنش تاثیر دارد. نخستین عامل، تغییر فشار گاز کربنیک هوا است که در سازوکار انحلال نقش مهمی دارد. این مسئله به گونه‌ای است که میزان انحلال آهک در حالتی که حجم گاز کربنیک یک دهم درصد حجم هوا باشد، دو برابر زمانی است که حجم گاز یک صدم درصد حجم هوا باشد. عامل دوم نیز درجه حرارت است، به طوری که میزان انحلال کربنات کلسیم با درجه حرارت نسبت عکس دارد؛ این بدان معنی است که هرچه درجه حرارت آب کمتر باشد، انحلال آهک بیشتر خواهد بود. برای مثال، درجه انحلال آهک در آب صفر درجه دو برابر درجه انحلال در آب ۲۵ درجه سلسیوس است. عمل انحلال همان‌طور که گفته شد یک واکنش دو

۱-۵ پدیده کارستی شدن (Karstification)

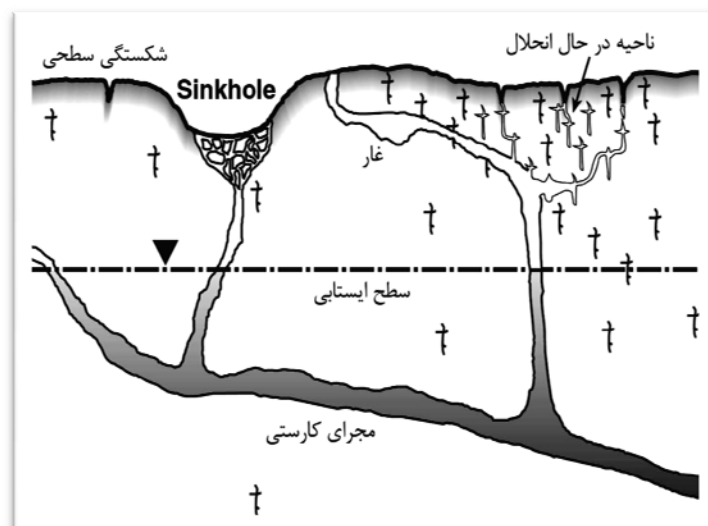
جریان آب در داخل درز و شکاف سنگ‌های قابل انحلال با گذشت زمان باعث گسترش منطقه حل شده می‌شود. از سنگ‌های عمده‌ای که قابلیت حل شدن در آب دارند می‌توان برحسب درجه انحلال، نمک، انیدریت، گچ، دولومیت و آهک را نام برد. در سنگ‌های نمکی، انیدریت و گچ به علت انعطاف‌پذیر بودن، درز و شکاف‌ها گسترش کمتری پیدا می‌کنند. به همین علت آب در آنها کمتر نفوذ می‌کند و فقط قسمت‌های سطحی این سنگ‌ها در آب حل می‌شود. همچنین به علت نرم بودن این سنگ‌ها، تغییر شکل سطحی در آنها دوام ندارد. این سنگ‌ها دارای رُس هستند و شسته شدن سطح باعث می‌شود که لایه‌ای رُسی روی آنها باقی بماند که به نوبه خود مانع از نفوذ آب به درونشان می‌شود. از طرفی چون کیفیت آب‌هایی که با این سنگ‌ها در تماس هستند، به علت افزایش املاح کم شده است، برای مصرف مناسب نیستند. از این رو، این سنگ‌ها بنا به علت‌های گفته شده، دارای منابع مناسبی نخواهند بود.

همان‌طور که گفته شد، عامل اصلی در پدیده کارستی شدن، انحلال سنگ‌ها در آب است. کربنات کلسیم موجود در این سنگ‌ها (چه به صورت کلسیت و چه به صورت دولومیت) در آب‌های عاری از گاز کربنیک تقریباً

عموماً سخت هستند و آب امکان نفوذ در آنها را ندارد، فقط در صورت وجود درز و شکاف در آنها است که آب توانایی نفوذ در آنها را پیدا می‌کند. این درز و شکاف‌ها ممکن است از پیش در سطح بین طبقات متفاوت وجود داشته باشند. به علت سخت بودن سنگ آهک و نیز این مسئله که در مقابل فشارها و حرکات زمین‌ساختی قابلیت انعطاف ندارند، شکستگی‌هایی در آنها ایجاد می‌شود. این شکستگی‌ها معمولاً در تقادیس‌ها بیشتر از بقیه نقاط دیده می‌شود. آب در این شکستگی‌ها، چه به صورت درزه‌های مویینه و چه به صورت درزه‌های بزرگ، نفوذ می‌کند و عمل انحلال صورت می‌پذیرد. بنابراین می‌توان گفت که در تشکیلات آهکی که تحت‌تأثیر فشارهای زمین‌ساختی قرار گرفته باشند، کارست توسعه بیشتری خواهد داشت. تغییراتی که در وضع ظاهری منطقه در اثر کارستی شدن ایجاد می‌شود، عامل مهمی در شناسایی منطقه کارستی و رژیم جریان آب در آن منطقه هستند. ویژگی‌های ظاهری مناطق کارستی ممکن است به صورت درزه‌های کوچک و بزرگ، دره‌ها، غارها و مانند آن باشد.

طرفه است و جهت آن با تغییر فشار گازکربنیک هوا و درجه حرارت محیط تغییر می‌کند. از همین رو در بعضی محل‌ها آب گازدار، آهک را حل می‌کند و در پاره‌ای از مناطق، آهک محلول به صورت‌های متفاوت رسوب می‌کند که هر یک از این حالت‌ها تغییراتی در شکل ظاهری منطقه به وجود می‌آورد. شرط لازم برای ایجاد منطقه کارستی علاوه بر وجود تشکیلات آهکی در منطقه، امکان جاری شدن آب در آهک است. برای اینکه آب بتواند در سنگ‌های آهکی نفوذ کند، باید این سنگ‌ها یا مستقیماً در تماس با نزولات جوی و جریان‌های سطحی قرار گیرند و یا اینکه در زیر طبقات قابل نفوذ قرار داشته باشند.

عمل کارستی شدن ممکن است طی دوران‌های متفاوت زمین‌شناسی صورت گرفته باشد. در این دوران‌ها، سنگ‌های آهکی منطقه در شرایطی قرار داشته‌اند که جریان آب امکان تماس با آنها را داشته‌اند و این امر منجر به کارستی شدن آنها شده است. با وجود این، در دوران‌های بعدی، تشکیلات غیر قابل نفوذ روی این سنگ‌ها را پوشانده است. از آنجا که سنگ‌های آهکی



شکل ۴. شکل طرحوار مجرای کارستی.

کارست مدل می‌شود. برنامه مورد استفاده برای مدل‌سازی SAMOGON نگارش پروفیسور لگچنکو در ۲۰۰۱ (ایریس اینسترومنتس، ۲۰۰۷) در انستیتو BRGM فرانسه و متعلق به شرکت ایریس اینسترومنتس است.

مجاری کارستی معمولاً دارای جهت‌یافتگی مشخص و گسترش در یک بُعد است. بنابراین می‌توان با فرض گسترش یک‌بُعدی، مدل آن را به شکل یک لایه با ضخامت ۳ متر فرض کرد. پارامترهای متغیر در این تحقیق عبارت‌اند از:

(۱) عمق کارست

(۲) اشباع یا نیمه‌اشباع بودن

در این بررسی اعماق مجرا به ترتیب عبارت‌اند از:

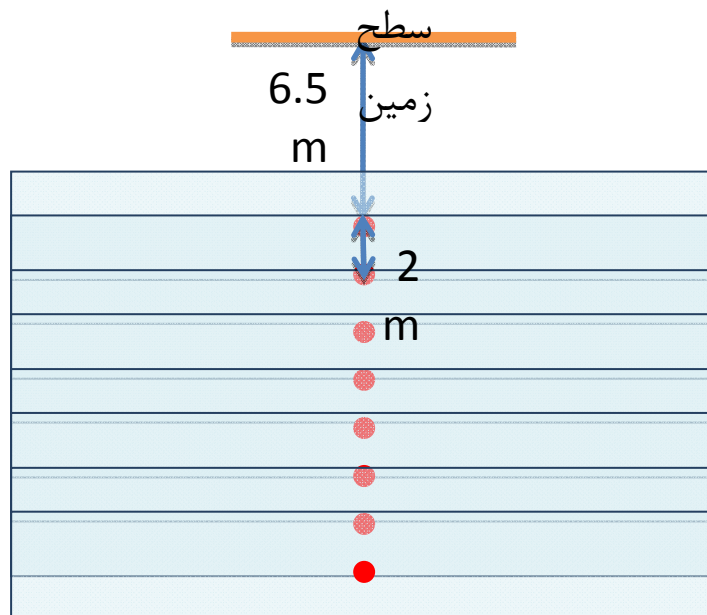
۶/۵ متر، ۸/۵ متر، ۱۰/۵ متر، ۱۲/۵ متر، ۱۴/۵ متر و ۱۶/۵

متر. در این اعماق کارست در حالت اشباع در نظر گرفته می‌شود. در حالت اشباع کامل فرض می‌شود که کارست کاملاً از آب اشباع است و تماماً دارای آب است. در حالت نیمه‌اشباع، فرض می‌شود که نیمی از کارست آبدار است و عمق سطح ایستابی در مرکز کارست است.

مهم‌ترین بخش کارست که هدف اصلی این پژوهش نیز بررسی آن است، مجرای کارستی (Karst Conduit) به شمار می‌رود. همان‌طور که در شکل ۴ پیدا است، مجرای کارستی یک تونل طبیعی یا غار است که بر اثر شست‌وشوی آهک در اعماق پدید می‌آید. از به هم پیوستن درزه و شکاف‌ها به یکدیگر و گسترش آنها، آب به اعماق بیشتری نفوذ می‌کند و در آنجا با انحلال مداوم، مجرای کارستی را پدید می‌آورد. مجرای کارستی دارای بخش عمده آب کارستی است و در زمره منابع مهم آب و نیز به‌منابۀ مهم‌ترین هدف اکتشافی پژوهش مطرح است. نمونه طبیعی این مجراها غار علیصدر همدان واقع در ایران است.

۶ روش تحقیق و بحث

در این تحقیق سعی بر این است که تاثیر افزایش عمق و نوفه روی تفسیر کمی و کیفی کارست بررسی شود. همان‌طور که گفته شد کارست از اجزای متفاوتی تشکیل شده است که به علت پیچیده بودن آنها، فقط مجرای



شکل ۵. مدل کارست در حالت اشباع و اعماق آن.

۱-۶ پارامترهای مدل‌سازی

در این مدل‌سازی مقاومت ویژه آهک و زمینه ۱۵۰ اهم‌متر در نظر گرفته شده است که به صورت میانگین در مورد آهک‌ها صدق می‌کند (تلفورد، ژئوفیزیک کاربردی). همچنین مقاومت ویژه آب (با فرض بسیار شیرین بودن آب) در سازند آهکی نیز ۵۰ اهم‌متر در نظر گرفته می‌شود (تلفورد، ژئوفیزیک کاربردی). بیشینه عمق ماتریس نیز با توجه به مقاومت ویژه منطقه و در نظر گرفتن حد آستانه

سامانه نوامیس تعیین می‌شود (لگچنکو و شوشاکف، ۱۹۹۸) که در این حالت ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. همچنین پارامترهای $T_2^* = 2000ms$ برای آب، و برای آهک $T_2^* = 100ms$ در نظر گرفته شد (آیریس اینسترومنتس، ۲۰۰۷).

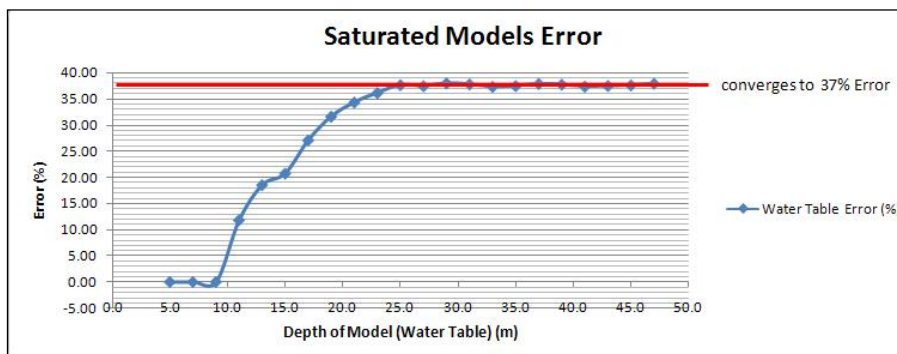
پس از مدل‌سازی، نتایج به دست آمده وارون‌سازی و نتایج حاصل از آن با مدل اصلی مقایسه می‌شود. جداول ۱ و ۲ نمایش‌دهنده نتایج است.

جدول ۱. نتایج تغییرات خطا در حالت اشباع برحسب افزایش عمق مدل.

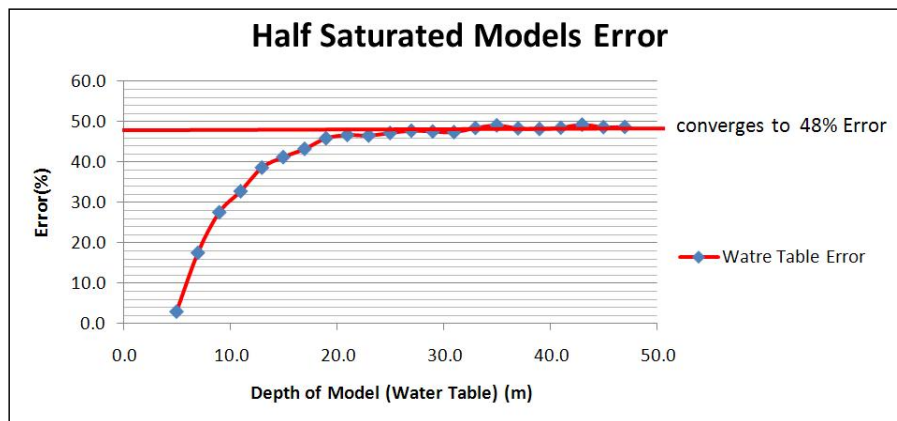
| Model | | | Inversion Results | |
|--------|------------|---------|-------------------|-----------------|
| Number | Center (m) | top (m) | Top (m) | Model Error (%) |
| 1 | 6.5 | 5.0 | 5.0 | 0.00 |
| 2 | 8.5 | 7.0 | 7.0 | 0.00 |
| 3 | 10.5 | 9.0 | 9.0 | 0.00 |
| 4 | 12.5 | 11.0 | 9.7 | 11.80 |
| 5 | 14.5 | 13.0 | 10.6 | 18.50 |
| 6 | 16.5 | 15.0 | 11.6 | 20.70 |
| 7 | 18.5 | 17.0 | 12.4 | 27.06 |
| 8 | 20.5 | 19.0 | 13.0 | 31.58 |
| 9 | 22.5 | 21.0 | 13.8 | 34.29 |
| 10 | 24.5 | 23.0 | 14.7 | 36.09 |
| 11 | 26.5 | 25.0 | 15.6 | 37.60 |
| 12 | 28.5 | 27.0 | 16.4 | 39.26 |
| 13 | 30.5 | 29.0 | 18.0 | 37.93 |
| 14 | 32.5 | 31.0 | 19.3 | 37.74 |
| 15 | 36.5 | 33.0 | 20.7 | 37.27 |
| 16 | 38.5 | 35.0 | 21.9 | 37.43 |
| 17 | 40.5 | 37.0 | 23.0 | 37.84 |
| 18 | 42.5 | 39.0 | 24.3 | 37.69 |
| 19 | 44.5 | 41.0 | 25.7 | 37.32 |
| 20 | 46.5 | 43.0 | 26.9 | 37.44 |
| 21 | 48.5 | 45.0 | 28.1 | 37.56 |
| 22 | 50.5 | 47.0 | 29.2 | 37.87 |

جدول ۲. تغییرات خطا در حالت نیمه‌اشباع برحسب افزایش عمق مدل.

| Model | | | | Inversion Results | |
|--------|------------|-----------------------|--------|-----------------------|-----------------|
| Number | Center (m) | Water Table Depth (m) | top(m) | Water Table Depth (m) | Model Error (%) |
| 1 | 6.5 | 6.5 | 5.0 | 6.3 | 3.1 |
| 2 | 8.5 | 8.5 | 7.0 | 7.0 | 17.6 |
| 3 | 10.5 | 10.5 | 9.0 | 7.6 | 27.6 |
| 4 | 12.5 | 12.5 | 11.0 | 8.4 | 32.8 |
| 5 | 14.5 | 14.5 | 13.0 | 8.9 | 38.6 |
| 6 | 16.5 | 16.5 | 15.0 | 9.7 | 41.2 |
| 7 | 18.5 | 18.5 | 17.0 | 10.5 | 43.2 |
| 8 | 20.5 | 20.5 | 19.0 | 11.1 | 45.9 |
| 9 | 22.5 | 22.5 | 21.0 | 12.0 | 46.7 |
| 10 | 24.5 | 24.5 | 23.0 | 13.1 | 46.5 |
| 11 | 26.5 | 26.5 | 25.0 | 14.0 | 47.2 |
| 12 | 28.5 | 28.5 | 27.0 | 14.9 | 47.7 |
| 13 | 30.5 | 30.5 | 29.0 | 16.0 | 47.5 |
| 14 | 32.5 | 32.5 | 31.0 | 17.1 | 47.4 |
| 15 | 36.5 | 34.5 | 33.0 | 17.8 | 48.4 |
| 16 | 38.5 | 36.5 | 35.0 | 18.6 | 49.0 |
| 17 | 40.5 | 38.5 | 37.0 | 19.9 | 48.3 |
| 18 | 42.5 | 40.5 | 39.0 | 21.0 | 48.1 |
| 19 | 44.5 | 42.5 | 41.0 | 21.9 | 48.5 |
| 20 | 46.5 | 44.5 | 43.0 | 22.6 | 49.2 |
| 21 | 48.5 | 46.5 | 45.0 | 23.9 | 48.6 |
| 22 | 50.5 | 48.5 | 47.0 | 24.9 | 48.7 |



شکل ۶. تغییرات میزان خطای وارون‌سازی مدل با افزایش عمق در حالت اشباع.



شکل ۷. تغییرات میزان خطای وارون‌سازی مدل با افزایش عمق در حالت نیمه آبدار.

۲-۶ کارست آبدار اشباع کامل

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای سه مدل اول که عبارت‌اند از: مدل ۶/۵ متر، مدل ۸/۵ متر و مدل ۱۰/۵ متر، میزان خطای وارون‌سازی برای سطح آب صفر است (جدول ۱) و میزان جابه‌جایی آن از حالت مدل شده برابر صفر است و نتایج کاملاً بر مدل انطباق دارند. برای سه مدل بعد که عبارت‌اند از: مدل ۱۲/۵ متر، مدل ۱۴/۵ متر، مدل ۱۶/۵ متر میزان خطای سطح بالا افزایش می‌یابد و به ترتیب مقادیر ۱۱/۸ درصد، ۱۸/۵ درصد و ۲۰/۷ درصد به دست می‌آید.

این نتایج نشان‌دهنده آن هستند که تفسیر کمی آنها تا حد قابل قبول است و در مورد کارهای دقیق و مهندسی این اعداد تا حدودی قابل قبول هستند و فقط می‌توان آنها را تفسیر کیفی کرد و به حدود آن تا اندازه‌ای پی برد. در مورد سطح بالای کارست این نکته قابل توجه است که خطای آن قابل قبول است و حداکثر تا ۲۰/۷ درصد افزایش می‌یابد. برای این روش، عمق ۱۶/۵ متر است که کارست‌های پس از این عمق دارای خطای بیش از ۳۵٪ هستند. البته در همه مدل‌های عرضه شده، میزان آب شناسایی شده (ضخامت لایه آبدار × درصد آب) برابر با مقدار مدل شده است. نکته قابل توجه این است که از عمق

قدم اول در این روش حذف نوفه است زیرا این روش بسیار به نوفه حساس است و تغییرات سطح نوفه روی تفسیر و وارون‌سازی داده‌ها تاثیر بسیار منفی دارد. اگر با یک اندازه‌گیری صحرائی روبه‌رو بودیم برای حذف نوفه با توجه به حساس بودن روش سونداژ تشدید مغناطیسی، دامنه سیگنال آن نسبت به دامنه نوفه‌های الکترومغناطیسی طبیعی و مصنوعی کوچک‌تر و نسبت سیگنال به نوفه کم می‌شد. برای غلبه بر این مشکل و بالا بردن نسبت سیگنال به نوفه، استفاده از روش برانبارش و همچنین فیلتر مناسب توصیه می‌شود. از جمله عواملی که روی سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی اثر می‌گذرد، مقاومت ویژه زمین و مقطع ژئوالکتریک منطقه و بیشینه عمق ماتریس (MDM) است. بیشینه عمق ماتریس نیز با توجه به مقاومت ویژه منطقه و در نظر گرفتن حد آستانه سامانه نومیس تعیین می‌شود. در این تحقیق از دو روش فیلتر ناچ و میانگین متحرک استفاده شده است. فیلتر ناچ برای حذف هماهنگ‌های برق شهری به کار می‌رود. این فیلتر هماهنگ‌های بسامد 50 Hz را که به بسامد لارمور نزدیک هستند حذف می‌کند. فیلتر میانگین متحرک نیز برای حذف میخه (اسپایک)ها به کار می‌رود. دو نوع مدل کارست داده شده و نتایج آن به شرح زیر است:

قرار دارد. با توجه به فسیل‌های موجود، سن آن ائوسن میانی تا بالایی تعیین شده است. گسترش جغرافیایی سازند شهبازان به‌طور عمده محدود به شمال شرقی لرستان است. تغییرات جانبی این سازند درخور توجه است. از لرستان به سوی جنوب شرقی، کربنات‌های شهبازان به تدریج با آواری‌های سازند کشکان جانشین می‌شود و سرانجام در زاگرس مرتفع، سازند شهبازان به قسمت‌های بالایی سازند جهرم می‌پیوندد. بدین‌سان سازند شهبازان، با سازندهای کشکان، تله‌زنگ، پابده و سازند جهرم ارتباط بین‌انگشتی دارد.

سازند آهکی آسماری جوان‌ترین سنگ مخزن پهنه زاگرس است و به همین علت، تحقیقات گسترده‌ای روی خواص سنگ‌چینه‌ای این سازند صورت گرفته است.

در بیشتر نقاط، مرز پایینی آسماری به سازند شیلی پابده است ولی در لرستان مرکزی، این سازند با سازند کربناتی شهبازان و در فارس داخلی با سازند جهرم، به‌طور ناپیوستگی پیوسته‌نما (پاراکانفورمیتی)، همبر است. در همه‌جا، سازند آسماری با سازند انیدریتی گچساران پوشیده می‌شود.

در این منطقه ابتدا برداشت مقاومت ویژه صورت گرفت و در نهایت سونداژ MRS به انجام رسید. نتایج سونداژ به‌دست آمده به‌صورت زیر است:

شکل ۸ سونداژ یک لایه آبدار را در عمق بین ۴۷ تا ۵۰ متر با ضخامت حدودا ۴۰ متر نشان می‌دهد. میزان محتوای آب این لایه به‌صورت متوسط در حدود ۱۵٪ است و تراوایی زیاد که در شکل با T_1^* نمایش داده شده، مقادیر بزرگ ms ۶۰۰ نشان‌دهنده تراوایی بسیار زیاد آن است و در نهایت می‌توان این نتیجه را گرفت که یک آب‌خوان با تخلخل و تراوایی بسیار زیاد در منطقه وجود دارد. میزان آب (ضخامت لایه آبدار \times درصد آب) در جدول ۳ آمده است.

۲۴/۵ متر خطای عمق به سمت ۳۷٪ میل می‌کند، بدین ترتیب که هرچه عمق ساختار زیاد شود، میزان خطا ثابت می‌ماند.

۳-۶ کارست آبدار نیمه‌اشباع

در این روش هیچ‌یک از مدل‌ها خطای صفر ندارند ولی خطای وارون‌سازی سطوح بالای مدل‌های ۶/۵ متر، ۸/۵ متر، ۱۰/۵ متر و مدل ۱۲/۵، دارای خطای قابل قبول و کوچکی هستند و این بدین معنی است که تفسیر کمی و کیفی آن قابل قبول است. نتیجه نهایی آن است که به علت میزان آب کمتر آب این حالت، نسبت به حالت اشباع کامل، شدت سیگنال ضعیف‌تر است و در نتیجه خطای بیشتری ایجاد می‌شود. در این مورد نیز از عمق ۲۰/۵ متر میزان خطا به سمت ۴۸٪ میل می‌کند و میزان خطا تقریباً ثابت می‌ماند.

نتایج فوق موید این نظر است که سونداژ MRS قادر به تعیین وجود و یا فقدان آب در این ساختار و تا حدودی عمق ساختار هست و می‌توان از آن برای اکتشاف منابع کارستی استفاده کرد. البته برای منابع سطحی دقت روش برای هر دو حالت بسیار زیاد است.

۴-۶ بررسی موردی

براساس نقشه زمین‌شناسی، منطقه پیش‌گفته از نظر زمین‌شناسی در کربنات‌های سازند آسماری-شهبازان قرار دارد. نام سازند کربناتی شهبازان از روستای شهبازان (در کنار راه آهن اندیمشک - دورود) گرفته شده و بُرش الگوی آن در ادامه سازند تله‌زنگ در تنگ دو، در ۴/۵ کیلومتری جنوب غربی ایستگاه تله‌زنگ قرار دارد.

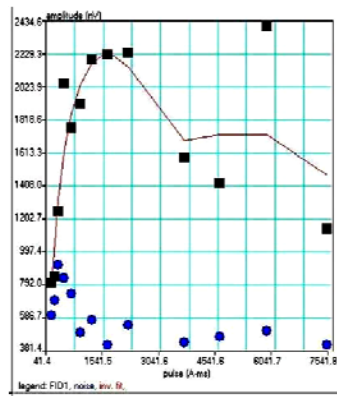
سازند شهبازان شامل ۳۳۳/۸ متر دولومیت و آهک‌های دولومیتی با رنگ هوازده سفید تا قهوه‌ای با سیمای ضخیم لایه است که به‌طور پیوسته روی سازند آواری کشکان و به‌طور ناپیوسته در زیر سازند آسماری

جدول ۳. ضخامت لایه آبدار و درصد آب آنها.

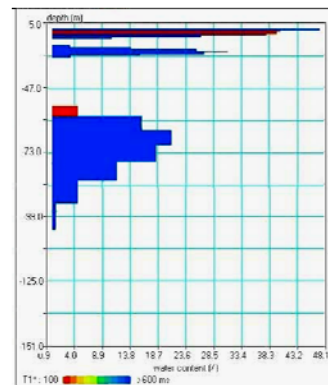
| ضخامت لایه (متر) | درصد آب |
|------------------|---------|
| ۸۵-۹۵ | ۵٪ |
| ۷۳-۸۵ | ۱۰٪ |
| ۶۶-۷۳ | ۱۸٪ |
| ۵۳-۶۶ | ۲۲٪ |
| ۴۷-۵۳ | ۱۰٪ |

که این ساختار، کارستی است و از آنجا که شواهد زمین‌شناسی منطقه و برداشت مقاومت ویژه بیانگر وجود سنگ رسوبی با تراکم و مقاومت ویژه زیاد است، در مجموع می‌توان بیان کرد که آب‌خوان یک ساختار کارستی است و تعیین ضخامت و عمق این ساختار آبدار به صورت کمی با دقت بسیار زیاد مقدور نیست، ولی به صورت کیفی موید این نظر است که ساختار موردنظر، کارست آبدار است. بنابراین هدف اکتشاف که تعیین آبدار یا بدون آب بودن منطقه و تعیین میزان آب کارستی بود، تامین شده است.

به صورت معادل ۶/۲ متر ضخامت لایه با میزان آب ۱۰۰٪. به دست می‌آید که نشان‌دهنده ساختار کارستی اشباع با این ضخامت است. در مورد سطح بالای لایه با توجه به شیب تغییرات و بررسی مدل‌های قبلی، فقط می‌توان گفت

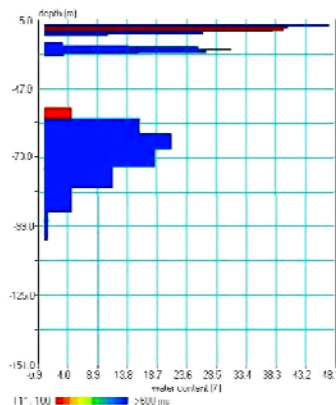


(ب)

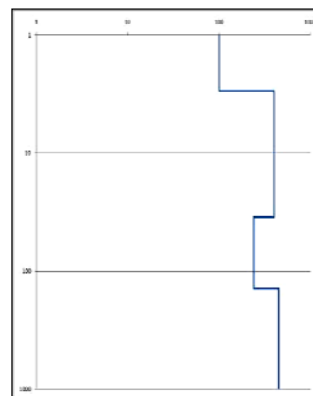


(الف)

شکل ۸. سونداژ MRS. (الف) نتیجه وارون سازی داده‌ها و (ب) دامنه سیگنال و نوفه برای هر پالس.



(ب)



(الف)

شکل ۹. مقایسه (الف) سونداژ مقاومت ویژه و (ب) سونداژ MRS. از این سونداژ در ساخت ماتریس کرنل استفاده شد.

۷ نتیجه‌گیری

دارای کارست با میزان مشخص آب است.

تشکر و قدردانی

نگارندگان از جناب آقای دکتر علی اکبر باغوند استادیار محترم دانشکده محیط زیست که در تهیه منابع بخش کارست مساعدت کرده‌اند و همچنین جناب آقای مهندس امیر سالاری، کمال تشکر را دارند.

مراجع

تلفورد، ژئوفیزیک کاربردی، ترجمه ح.، زمردیان - ح.، حاجب حسینه، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

Braun, M., Yaramanci, U., 2007, Inversion of resistivity in Magnetic Resonance Sounding, *Journal of Applied Geophysics* **66**, 151-164.

Guillen, A. and Legchenko, A., 2002, Application of linear programming techniques the surface, *Journal of Applied Geophysics*, **50**, 149-162.

Hertrich, M. and Yaramanci, U., 2002, Joint inversion of surface nuclear magnetic resonance and vertical electrical sounding, *Journal of Applied Geophysics*, **50**, 179-191.

IRIS Instrument, 2007, NUMIS MRS (Magnetic Resonance Sounding) System NUMIS Plus-NUMIS Lite: User's manual, Orleans, France.

Kenyon, W. E., 1989, Petrophysical principles of applications of NMR logging, *The Log Analyst*, March-April, 21-43.

Legchenko, A. V. and Shushakov, O. A., 1998, Inversion of surface NMR data, *Geophysics*, **63**(1), 75-84.

Legchenko, A.V. and Valla, P., 1998, Processing of surface proton magnetic resonance signals using non-linear fitting, *Journal of Applied Geophysics*, **39**, S. 77-84.

Legchenko, A. V. and Valla, P., 2002a, One-dimensional modeling for proton magnetic resonance sounding measurements over an electrically conductive medium, *Journal of Applied Geophysics*, **50**, 217-229.

Legchenko, A. V., Baltassat, J. M., Beauce, A. and Bernard, J., 2002, Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologist, *Journal of Applied Geophysics*, **50**, 21-46.

Lubczynski, M. W. and Roy, J., 2004, Magnetic resonance sounding, New Method for Ground Water Assessment, *Groundwater*, **42**(2), 291-303.

در این تحقیق، برداشت‌های ژئوفیزیکی از آن رو صورت می‌گیرد که تاییدی بر وجود یا فقدان، و همچنین در صورت وجود مشخصات یک ساختار کارستی باشد. هدف از این تحقیق، بررسی عمق یک ساختار کارستی آبدار اشباع و نیمه‌اشباع و وارون‌سازی داده‌های آن در حالت یک‌بُعدی است و مدل مورد اشاره دارای بالاترین کیفیت پاسخ است و این مدل به صورت مبنا در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، وارون‌سازی پارامتر سطح بالای کارست بررسی شده است. در حالت اشباع، خطای وارون‌سازی کمتر از حالت غیر اشباع است و وارون‌سازی را برای عمق بیشتری نیز می‌توان به کار برد. علت خطای بیشتر حالت نیمه‌اشباع این است که حجم آب در این حالت کمتر است و این روش مستقیماً به میزان آب آزاد حساس است.

این تحقیق نشان می‌دهد که همانطور که انتظار می‌رود با افزایش عمق مدل یاد شده، میزان خطای آن افزایش می‌یابد و براساس آن از عمق ۱۶/۵ متر، برای مدل اشباع و از عمق ۱۲/۵ متر برای مدل نیمه‌اشباع تفسیر کمی عمق به‌دست آمده از وارون‌سازی خطای بیش از ۳۵٪ دارد ولی در هر دو مورد، با افزایش عمق میزان خطا، با توجه به اشباع یا غیر اشباع بودن ساختار، به سمت میزان خطای خاصی میل می‌کند. با توجه به میزان آب به‌دست آمده و اینکه در اطلاعات اولیه شواهدی بر کارستی بودن منطقه وجود دارد، تفسیر کیفی مقدور است و می‌توان لایه آبدار و حجم آب و نوع ساختار را بیان کرد و در نهایت این روش بیانگر وجود یا فقدان، میزان آب و تا حدودی عمق ساختار کارستی است. در بررسی موردی صورت گرفته در جنوب غربی ایران عملاً نظرات به‌دست آمده از مدل‌سازی تایید شد و نتایج به‌دست آمده از وارون‌سازی داده حقیقی روشن ساخت که منطقه موردنظر آبدار و

- applied to an electroconductive medium, *Geophysical Prospecting*, **43**, 623pp.
- Wichman, P. B., Lavelly, E. M. and Ritzwoller, M. H., 1999, Surface nuclear magnetic resonance imaging of large systems, *Physical Review Letters*, **82**, 4102-4105.
- Weichman, P. B., Lun, D. R., Ritzwoller, M. H. and Lavelly, E. M., 2002, Study of surface nuclear magnetic resonance inverse problems, *J. Appl. Geophys.*, **50**, 129-147.
- Yaramanci, U., Lange G. and Knödel K., 1998, Effects of regularisation in the inversion of surface NMR measurements, *Extended abstracts of 60th EAGE Conference and Technical Exhibition (10-18)*, Leipzig.
- Monke, O. and Yaramanci, U., 2002, Smooth and block inversion of surface NMR amplitudes and decay times using simulated annealing, *Jornal of Applied Geophysics*, **50**, 163-177.
- Mohnke, O. and Yaramanci, U., 1999, A new inversion scheme for surface NMR amplitudes using simulated annealing. 61st Conference of European Association of Geoscientists and Engineers, Helsinki.
- Schirov, M., Legchenko, A. and Creer, G., 1991, New direct non-invasive ground water detection technology for Australia, *Exploration Geophysics*, **22**, 333-338.
- Trushkin, D. V., Shushakov, O. A. and Legchenko, A. V., 1995, Surface NMR