

کاوش‌های ژئوفیزیکی به روش رادار

چکیده

GPR تکنیکی است که برای دیدن موقعیت مواد کم عمق در خاک و سنگ اهمیت ویژه‌ای دارد. نیاز به دانستن بهتر موقعیت مواد روبار برای فعالیت‌هایی مثل نمونه‌گیری‌های ژئوشیمیایی بررسی‌های ژئوتکنیکی، اکتشاف پلاسمی، و همچنین فاکتورهای کنترل‌کننده‌ی جریان آب‌های زیرزمینی ضروری است و نیاز روزافزون به تکنیک‌هایی که زیر سطح زمین را با تفکیکی بالاتر از قبل به تصویر بکشد، اهمیت پیدا کرده است.

این روش به طور موفقیت‌آمیزی برای به نقشه درآوردن عمق آب در دریاچه‌ها، عمق سنگ بستر، چینه‌شناسی خاک و عمق سطح ایستایی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، برای آشکارسازی منافذ و تشخیص شکل‌های کارستی به کار رفته است. تفکیک بالای چینه‌شناسی خاک و شکستگی‌ها در سنگ، از مقولات مهم کاربرد مؤثر رادار هستند. از رادار برای به نقشه درآوردن سنگ بستر و تعیین فف‌های خاک در اعماق بیش‌تر از ۲۰ متر استفاده شده است. نتایج به دست آمده با رادار، با بررسی‌های درون‌چاهی و نتایج حاصل از برنامه‌های مغزه‌گیری مطابقت می‌کند. این روش استفاده‌ی گسترده‌ای را در آینده به خود خواهد دید.

کلید واژه‌ها: رادار نافذ به داخل زمین (GPR)، تفکیک بالا، گمانه‌زنی، پدیده‌ی آرامش^۱.

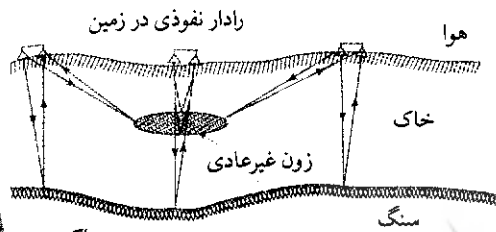
مقدمه

اولین برداشت‌های GPR در سال ۱۹۲۹ برای گمانه‌زنی عمق یک یخچال انجام گرفت [Stern, 1929 and 1930]. از آن زمان به بعد، فناوری استفاده از رادار تقریباً فراموش شد تا این که در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰، زمانی که رادارهای هواپیمای آزمایشی ارتش آمریکا قصد داشتند، یخ‌های سرزمین‌های گرینلند را مطالعه کنند، به علت عدم تشخیص ارتفاعات، هواپیما به داخل یخ‌ها سقوط کرد.

این مقدمه‌ای شد برای بررسی توانایی رادار که از طریق گمانه‌زنی‌هایی در یخ و به نقشه درآوردن خواص مواد، زیر خاک و سطح ایستایی داخل زمین را بینند [Cook 1964; Barringer, 1965; Lundien, 1966]. در سال ۱۹۶۷، سیستمی مشابه گمانه‌زنی «استرن»^۲ پیشنهاد و ساخته شد و برای بررسی خواص الکتریکی سنگ‌های سطحی توسط «آپولو-۱۷» روی ماه، مورد استفاده قرار گرفت [Simmons et al, 1972].

سرانجام در سال ۱۹۷۲، آرت دریک^۳ و رگس موری^۴ ساخت سیستم‌های برداشت ژئوفیزیکی، از جمله GPR را آغاز کردند [Morey, 1974]. بدین گونه انفجاری از کاربرد، انتشار و تحقیق در «سازمان زمین‌شناسی کانادا»، «آزمایشگاه تحقیق و مهندسی ارتش آمریکا» و بسیاری از جاهای دیگر اتفاق افتاد. در حال حاضر، بالغ بر ۳۰۰ مورد ثبت درخصوص GPR در سراسر دنیا، چندین شرکت سازنده‌ی لوازم، چندین شرکت سرویس‌دهنده، و انستیتوهای تحقیق‌کننده‌ی بسیاری مرتبط با GPR وجود دارند.

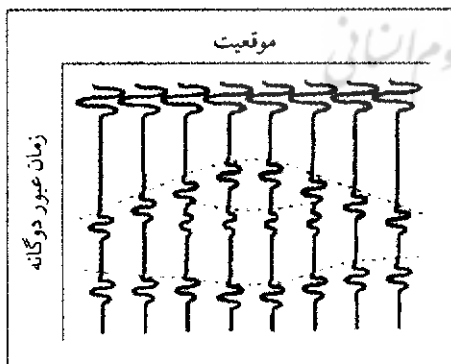
با GPR می‌توان، گمانه‌زنی تفکیک بالا و آشکارسازی شکل‌هایی در حد چند ده میلی‌متر در چند متر را انجام داد. مثلاً، گمانه‌زنی‌هایی تا اعماق ۵۰ متر در موادی با هدایت‌های پائین کم‌تر از ۱ ms/m، مانند ماسه، گراول، سنگ و آب شیرین ممکن است. طیف مذکور، در مواد رسانا، مثل رس‌ها، سیلت‌ها و خاک‌های متخلخل شور، تا چند متر کاهش می‌یابد.



شکل ۱. پروفیل زنی انعکاسی به روش رادار، برای تعیین موقعیت خاک رویار و سنگ بستر

در این مثال، خاک و سنگ‌های اطراف و منطقه‌ی بی‌هنجار، خواص الکتریکی متفاوتی دارند. خواص الکتریکی مواد، تعیین کننده‌ی سرعت سیگنال، رقت و میزان انعکاس امواج راداری است.

شکل ۲. رکورد رادار حاصل از موقعیت مشابه شکل ۱



ب) پارامترهای انتشار امواج رادیویی و خواص الکتریکی
سرعت و رقت، فاکتورهای تعیین کننده‌ی انتشار امواج رادیویی فرکانس بالا در زمین هستند. این فاکتورها به خواص دی الکتریک و هدایت پذیری مواد وابسته‌اند. ثابت دی الکتریک یا قابلیت نفوذپذیری، اصطلاحاتی هستند که برای توصیف

GPR از انتشار امواج الکترومغناطیس و پراکندگی برای به تصویر کشیدن، تعیین موقعیت و تغییرات خواص الکتریکی و مغناطیسی مواد در زمین بهره می‌گیرد و ممکن است از سطح زمین، در داخل چاه، از ماهواره‌ها و غیره انجام شود. در تفسیرهای کمی، برای ارائه‌ی مدل اولیه، از داده‌های GPR، شامل اطلاعاتی نظیر عمق، جهت، اندازه، شکل اجسام مدفون، چگالی و میزان آب خاک و خیلی موارد دیگر استفاده می‌شود. پیشرفت‌های جدید در فناوری GPR، توانایی گمانه‌زنی در اعماق بیش‌تر را افزایش داده است؛ به طوری که این حد تا ۵۴۰۰ متر ارتقا پیدا کرده است. در حال حاضر، وسایل جدید رادار قابل حمل هستند و به سهولت در صحرا می‌توان از آن‌ها استفاده کرد، و توانایی پیمایش‌های کنترل شده‌ای را در شرایط صحرائی دارند.

اصول

الف) مفاهیم GPR

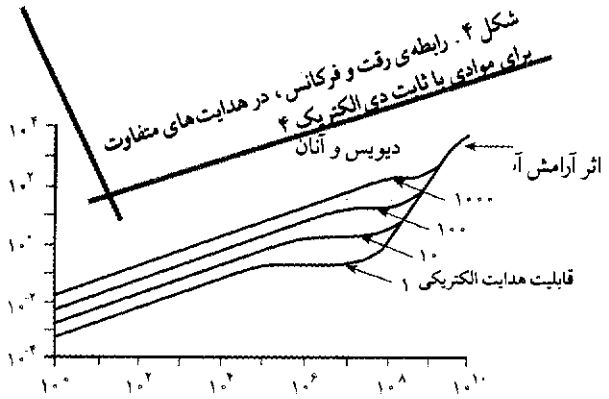
تکنیک GPR، مشابه اصول روش انعکاس لرزه‌ای و سونار کار می‌کند. رادار، یک پالس کوتاه انرژی الکترومغناطیسی فرکانس بالا (10-1000 MHz) ایجاد می‌کند که به داخل زمین ارسال می‌شود.

انتشار سیگنال‌های رادار بستگی به خواص الکتریکی مواد در زمین دارد. خواص الکتریکی مواد از لحاظ زمین‌شناسی توسط میزان آب کنترل می‌شود [Topp, Davis and Annan, 1980]. تغییر در خواص الکتریکی خاک، معمولاً همراه است با تغییر میزان آب که باعث انعکاسات رادار می‌شود.

رادار در سنگ به تغییرات نوع سنگ و شکستگی‌های پرآب یا خشک حساس است. تغییر در خواص الکتریکی زمین باعث می‌شود، قسمتی از سیگنال ارسالی منعکس شود.

سیگنال منعکس شده توسط گیرنده‌ای دریافت، تقویت، رقمی و روی یک ثابت مغناطیسی دیجیتالی انتخاب و آماده برای پردازش و نمایش می‌شود.

دی الکتریک آب ۸۰، و بیش تر مواد زمین شناسی خشک، در طیف ۴-۸ است. این اختلاف زیاد توضیح می دهد که چرا سرعت



شکل ۴. رابطه ی رقت و فرکانس، در هدایت های متفاوت برای موادی با ثابت دی الکتریک ۴ دیویس و آنال اثر آرامش آب

خواص الکتریکی فرکانس بالای مواد (10-1000MHZ) مورد استفاده قرار می گیرند. در این فرکانس ها، خاصیت پلاریزاسیون بر خواص هدایت پذیری، در بسیاری از مواد زمین شناسی غلبه می کند.

ثابت دی الکتریک مختلط به صورت زیر بیان می شود:

$$k^* = k' + ik'' \quad (1)$$

بخش حقیقی و k'' بخش مجازی ثابت دی الکتریک هستند.

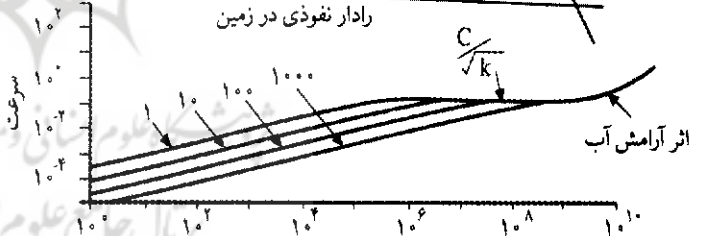
تفکیک k'' به مؤلفه های فرکانس بالا و هدایت پذیری d.c بخش مجازی، به فرم زیر صورت می گیرد:

$$k^* = k' + i \left[k'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon} \right]$$

فرکانس زاویه ای $(2\pi f)$ ، ϵ نفوذپذیری خلأ $(\lambda/\lambda^* 10^{-12} F/m)$ ، و k'' افت وابسته به فرکانس بخش مجازی و مربوط به پاسخ «پدیده ی آرامش» است.

شکل ۳، رابطه ی بین سرعت و فرکانس در رسانایی های متفاوت را نشان می دهد. سرعت بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز، در هدایت های کم تر از ۱۰۰ میلی سایمونز بر متر، ثابت باقی می ماند. سرعت در فرکانس های بیش تر از ۱۰۰۰ مگاهرتز، به خاطر پدیده ی آرامش مولکول آب، افزایش می یابد.

شکل ۳. رابطه ی بین سرعت و فرکانس در هدایت های متفاوت



سیستم های GPR در طیف فرکانسی ۱۰-۱۰۰۰ مگاهرتز کار می کنند. تحت این شرایط، سرعت ثابت و سیگنال به وسیله ی سرعت وابسته به فرکانس، دیسپرسیون ایجاد نمی کند. سرعت سیگنال های راداری در مواد زمین شناسی با سستی کم، که در گمانه زنی راداری عامل مهمی هستند، مربوط به بخش حقیقی ثابت دی الکتریک (k') بوده که:

$$V = \frac{c}{(k')^{\frac{1}{2}}}$$

$C = 3 \times 10^8$ m/s و سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ است.

جدول ۱، فهرست برخی از مواد زمین شناسی با ثابت های دی الکتریک، سرعت، هدایت و رقت در فرکانس های راداری را نشان می دهد. شایان توجه است که بخش حقیقی ثابت

جدول ۱. ثابت های دی الکتریک، هدایت الکتریکی سرعت و رقت مشاهده ای در مواد زمین شناسی معمول در فرکانس ۱۰۰ Hz

مواد	K	σ (mS / m)	V(m/s)	α (db / m)
هوا	۱	۰	۰/۳۰	۰
آب مقطر	۸۰	۰/۰۱	۰/۰۳۳	2×10
آب شیرین	۸۰	۰/۵	۰/۰۳۳	۰/۱
آب دریا	۸۰	3×10^4	۰/۰۱	10^3
آب خشک	۳-۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱
ماسه اشباع شده	۲۰-۳۰	۰/۱-۱/۰	۰/۰۶	۰/۰۳-۰/۳
سنگ آهک	۴-۸	۰/۵-۲	۰/۱۲	۰/۴-۱
شیل	۵-۱۵	۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰
سیلت	۵-۳۰	۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰
رس	۵-۴۰	۲-۱۰۰۰	۰/۰۶	۱-۳۰۰
گرانیت	۴-۶	۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱
نمک خشک	۵-۶	۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱
یخ	۳-۴	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱

سیگنال های راداری شدیداً وابسته به میزان آب موجود در خاک است. رادارها در فرکانس هایی که خواص ظرفیتی بر خواص هدایت پذیری غالب باشد، کار می کنند و در این صورت رقت در هدایت های متفاوت ثابت باقی می ماند. رقت سریعاً در فرکانس های بالای ۱۰۰ MHZ به خاطر پدیده ی آرامش آب که در ۱۰ گیگاهرتز ایجاد می شود، افزایش می یابد. اثر پراکندگی سیگنال توسط ناهمگنی های مقیاس کوچک می تواند، با افزایش فرکانس افزایش یابد. در محیطی با سستی کم، رقت به صورت زیر بیان می شود:

$$\alpha = \frac{1/69 \times 10^3 \sigma}{(k')^{\frac{1}{2}}} \text{ db/m} \quad (4)$$

که:

۴. طبیعت نسبتاً پیوسته‌ی گمانه‌زنی رادار، وسیله‌ی با ارزشی برای اکتشاف در برنامه‌های حفاری محسوب می‌شود. از رادار، یا برای بهینه کردن محل چاه‌ها قبل از حفاری، یا برای توسعه‌ی افقی چاه‌ها پس از حفاری استفاده می‌شود.

۵. روش رادار در طیف گسترده‌ای از محیط‌ها، یا در سطح یا در تونل‌ها به کار می‌رود. در معادن، برای نمایان کردن و به نقشه درآوردن اطراف و سینه‌ی کارهای معدنی می‌توان از آن استفاده کرد.

* کارشناس ارشد زمین‌شناسی

زیرنویس

1. Relaxation
2. Stern
3. Art Drake
4. Rex Morey

منابع

1. Annan, A.P. and Davis, J.L. (1976). Impules radar soundings in permafrost. Radio Science 11. 383-394.
2. Annan A.P. and Davis, J.L. (1977). Radar range analysis for geological materials. Report of Activities. Geological Survey of Canada. Paper 77-1B. 117-124.
3. Annan A.P. and Davis, J.L. (1978) Methodology for radar transillumination experiments. Report of Activities. Geological Survey of Canada. paper 78-1B. 107-110.
4. Arcone, S.A. (1984). Field observation of electromagnetic pulse propagation in dielectric slabs. Geophysiss 49. 1763-773.
5. Benson, R.C, Glaccum, R.A. and Noel, M. R (1984). Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. US EPA Contract. No. 68-03-3053. Environmental Monitoring System Laboratory. Office of R & D. US EPA. Las Vegas. Nevada 89114.236p.
6. Davis A.P, Annan, J.L. and Vaughan, C.J. (1985). Placer exploration using radar and siesmic methods. Canadian Institute of Mining Bulletin 80 (898). 67-72.
7. Davis. J.L, Killey, R.W,D, Annan, A.P. and Vaughan, C.J. (1984). Surface and borehole ground penetrating radar surveys for mapping geological structure. National Water Well Associational/Environmental Protection Agency Conference on Surface and Borehole Geophysical Methods in Groundwater Investigation. san Antonio. Texas. 681-721.
8. Morey, R.M. (1974). Continioius subsurface profiling by impulse radar. Proceeding of Engineering Foundations Conference on Subsurface Explorations for Underground Excavations and Heavy Construction. Henniker. New Hampshire. 213-232.
9. Olhoeft, G.R. (1975) the electrical properties of permafrost. Unpublished Ph.D.thesis, University of Toronto.
10. Olsson, o., Falk, L., Forslund, O, Lundmark, L. and Sandberg, E. (1987). Crosshole investigations- results from borehole radar investigations. Stripa Project TR 87.
11. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Stockholm.
12. Topp, G.C, Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurments in coaxial transmission lines. Water Resources Research 16(3). 574-582.
13. Ulruksen, C.P.F. (1982). Application of impulse radar to civil engineering. Unpublished ph.D. thesis, Department of Engineering Geology. University of Technology. Lund.
14. Von Hippel, A.R. ed. (1954). Dielectric Materials and Applications. John Wiely and Sons.

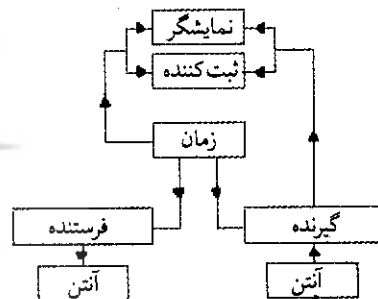
www. sensoft.ca/applications.

$$\sigma = \sigma_{dc} + \omega k'' \epsilon.$$

و لازم است که $\frac{\sigma}{\omega k'' \epsilon} < 1$ باشد.

لوازم

لوازم مورد نیاز در سیستم‌های GPR شامل چهار واحد اصلی است: فرستنده، گیرنده، کنترل و نمایش. شکل ۵، بلوک دیاگرامی ساده از سیستم GPR را نشان می‌دهد. تغییراتی نیز می‌توان در این سیستم داد تا برای کاربردهای متفاوت عملی‌تر شود. فرستنده، یک پالس با کم‌ترین زمان و ولتاژ بالا ایجاد می‌کند. آنتن فرستنده، پالس را به داخل زمین می‌فرستد. این سیگنال به زمین ارسال و به صورت سیگنال منعکس شده به آنتن گیرنده برمی‌گردد. گیرنده، سیگنال‌ها را تقویت و توسط واحد کنترل به فرمت مشخصی برای نمایش می‌فرستد. بیش‌تر سیستم‌های GPR در فرکانس‌های متفاوت کار می‌کنند. آنتن‌ها وسایل محدودکننده‌ی عرض باند هستند و معمولاً از لوازم الکترونیکی فرستنده و گیرنده‌ی مشابهی در بسیاری از آنتن‌ها



شکل ۵. بلوک دیاگرامی از یک سیستم GPR

- ### نتایج
۱. استفاده از وسایل رادار نسبت به چندین سال گذشته، به طور قابل ملاحظه‌ای با حصول نتایجی بالغ بر ۲۰ متر، ارتقا پیدا کرده‌اند.
 ۲. تکنیک‌های راداری برای گمانه‌زنی‌های تفکیک بالا، در محیط‌های با هدایت الکتریکی، تا بالای ۴۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. سطوح لایه‌بندی و مناطق درز و شکاف دار در سنگ و لایه‌بندی خاک که چند ده متر ضخامت دارند، در چنین محیط‌هایی آشکار می‌شوند.
 ۳. طیف و تفکیک GPR، با وجود مواد هادی مثل رس، سیلت یا خاک‌های با آب منفذی رسانا، کاهش می‌یابد.