

## افزایش تفکیک پذیری در GPR با به کارگیری روش بازگشت زمان و تبدیل موجک پیوسته

سجاد قنبری<sup>1</sup>، محمد کاظم حفیظی<sup>2</sup>، ماکسیم بانو<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری الکترومغناطیس، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [sajjad.ghanbari@ut.ac.ir](mailto:sajjad.ghanbari@ut.ac.ir)

2- استاد گروه ژئوالکتریک، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران [hafizi@ut.ac.ir](mailto:hafizi@ut.ac.ir)

3- دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه استراسبورگ، [maksim.bano@unistra.fr](mailto:maksim.bano@unistra.fr)

### چکیده

در کاوش‌های GPR، زمین به‌عنوان محیط انتشار امواج الکترومغناطیسی باعث پراکنده‌سازی و اتلاف انرژی امواج می‌شود و به‌صورت یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند، برای جبران این عوامل اتلاف و دستیابی به رزولوشن بیشتر، نیاز به روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال وجود دارد. یکی از روش‌های نوین افزایش رزولوشن، تکنیک بازگشت زمان است. با به‌کارگیری تکنیک‌های بازگشت زمان این امکان وجود دارد که با دقت مناسبی موقعیت و عمق اهداف مورد مطالعه را تعیین نمود و اهداف مورد مطالعه را با وجود نزدیکی به پراکنشگر مانند ناهنجاری‌های نامطلوب محلی متمایز ساخت. تبدیل موج پیوسته می‌تواند در رفع محدودیت روش بازگشت زمانی به کار گرفته شود. در این پژوهش، ضمن معرفی تکنیک بازگشت زمان و ترکیب آن با تبدیل موج پیوسته، یک مطالعه‌ی موردی در اکتشاف محل لوله‌های مدفون با GPR انجام شده است. نتایج حاصله نشان از کارایی روش بیان شده در تعیین محل هدف مورد مطالعه دارد.

واژه‌های کلیدی: بازگشت زمان، پردازش سیگنال، تبدیل موجک پیوسته، تفکیک پذیری، رادار نفوذی زمین

### Resolution enhancement in GPR applying TR and CWT

Sajjad Ghanbari<sup>1</sup>, Mohammad Kazem Hafizi<sup>2</sup>, Maksim Bano<sup>3</sup>

1- PH.D. student, Institute of geophysics, University of Tehran, [sajjad.ghanbari@ut.ac.ir](mailto:sajjad.ghanbari@ut.ac.ir)

2- Professor, student, Institute of geophysics, University of Tehran, [hafizi@ut.ac.ir](mailto:hafizi@ut.ac.ir)

3- Associate Professor, Ecole et observatoire Université de Strasbourg, [maksim.bano@unistra.fr](mailto:maksim.bano@unistra.fr)

### Abstract

In the GPR exploration, Earth as an electromagnetic emission environment causes dispersion and loss of energy of waves and acts as a low pass filter, so there is a need for advanced signal processing techniques to compensate for these factors and to achieve better resolution. One of the newest ways to increase resolution is the time reversal technique. By applying time reversal techniques, it is possible to accurately determine and distinguish the position and depth of the study objectives in the vicinity of the clutter, such as local undesirable abnormalities. Continuous wavelet transform can be applied to increase TR applications. In this study, while introducing the time-reversal technique and its combination with continuous wave transform, a case study was done to explore the location of buried pipes with GPR. The results show the effectiveness of the time reversal method in determining the target location of the study.

**Keywords:** Time reversal, signal processing, Continuous wavelet transform, Resolution, GPR

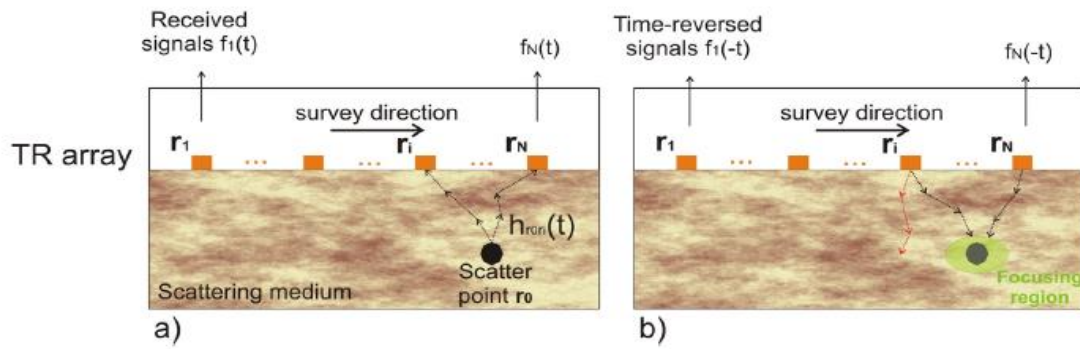
## 1 مقدمه

امواج نفوذی زمین (Ground Penetrating Radar)، روشی ژئوفیزیکی بر پایه انتشار امواج الکترومغناطیسی است که به عنوان یک روش غیر مخرب و سریع برای به تصویر در آوردن سطوح زیرزمینی استفاده می شود (دانیل، 2007). به طور کلی موفقیت در روش GPR، به عواملی هم چون جنس خاک منطقه، نوع آنومالی هدف مورد مطالعه، طراحی صحیح عملیات برداشت، انتخاب درست آنتن و در نهایت به کارگیری پارامترهای پردازشی مناسب و متناسب با شرایط برداشت وابسته است. هدف از پردازش، غلبه بر محدودیت‌های ذاتی داده‌ها، برای دستیابی اطلاعات واقعی تر از پدیده های زیرسطحی است. نوع پردازش‌هایی که بر روی داده‌های GPR به کار می‌روند، توسط هدف مورد مطالعه تعیین می‌شوند. از آنجایی که معادله موج حاکم بر انتشار امواج در محیط‌های بدون اتلاف نسبت به اعمال بازگشت زمانی ناورداست؛ داده‌های جمع‌آوری شده توسط گیرنده‌ها می‌توانند از لحاظ زمانی برگردان شده و با بازسازی و به عقب رانده شدن جبهه‌های موج، به‌طور خودکار بر اهداف بازتابنده یا ناهنجاری‌ها تمرکز نمایند (یاوز، 2009). ویژگی ناوردایی TR می‌تواند با وضوح بالا برای تشخیص و موقعیت‌یابی اهداف مبهم در محیط‌هایی با پراکندگی بالا و پر نوفه، مورد استفاده قرار گیرد. محدودیت عمده روش TR به‌مانند بقیه روش‌های تصویربرداری ماکروویو مربوط به پراکندگی و اتلاف انرژی موج الکترومغناطیسی است که منجر به شکسته شدن ناوردایی TR در محیط انتشار می‌شود. اگرچه جابجایی فازی که توسط پراکندگی به سیگنال تحمیل می‌شود با کمک اعمال پردازش TR رفع می‌شود اما اتلاف انرژی میرایی جبران نخواهد شد. یکی از روش‌های جبران میرایی که اخیراً (یاوز و تکسیرا، 2014) معرفی شده است به کارگیری تبدیل فوریه زمان-کوتاه می‌باشد. در این روش با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی میرایی سعی می‌شود تفکیک پذیری فوکوسینگ روی هدف در محیط‌های پراکنده ساز و دارای اتلاف انرژی بهبود پیدا کند. اگرچه STFT گزینه‌ی خوبی برای جبران میرایی می‌باشد اما صافی معکوسی که در این روش استفاده می‌شود موجب تقویت یک سری نوسانات و اغتشاشات ناخواسته نیز خواهد شد که کارایی روش TR را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عبدالجبار و همکاران (2017) در مقاله خود با کار بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی، نتایج روش تصویربرداری الکترومغناطیسی با روش بازگشت زمان را برای تشخیص و مکان‌یابی تومور سرطانی در ریه انسان بهبود بخشیدند. آن‌ها روشی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته و با استفاده از پنجره زمانی قابل تنظیم برای جبران میرایی و پراکندگی امواج الکترومغناطیسی در محیط انتشار ارائه دادند. در این روش پنجره‌های زمانی بلند برای فرکانس‌های پایین و پنجره‌های زمانی کوتاه برای فرکانس‌های بالا استفاده شده است بنابراین نیازی به بهینه‌سازی طول پنجره زمانی نیست. در این پژوهش میزان اثربخشی تکنیک بازگشت زمان و ترکیب آن با تبدیل موجک پیوسته بر اساس روش بیان شده در تعیین محل لوله های مدفون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## 2 روش تحقیق

تکنیک TR استاندارد شامل چهار مرحله اولیه است و در طرح شماتیک شکل 1 نشان داده شده است (سانتوس، 2017):

- 1) یک پالس سیگنال از یک یا چند فرستنده به محیط مورد نظر با ویژگی پراکندگی گسیل می‌شود.
- 2) سیگنال منتقل شده در محیط منتشر شده و توسط یک یا چند هدف یا آنومالی بازتاب می‌شود.
- 3) سیگنال‌های بازتاب شده توسط فرستنده‌ها دریافت می‌شوند (شکل 1-الف).
- 4) بازگشت زمانی در هر کدام از این سیگنال‌ها اعمال شده و سپس دوباره توسط گیرنده‌های همان محیط (در حالت آخرین سیگنال دریافتی به جای اولین سیگنال بازگشتی) ارسال می‌شوند. (شکل 1-ب).



شکل 1. اصول روش TR، الف: پراکنش موج ارسالی در یک ناهنجاری ب: سیگنال‌های باز گسیل شده مصنوعی (سانتوس، 2017).

ویژگی نوردایی TR در معادله موج نشان می‌دهد که در محیط‌های ثابت و کم اتلاف، سیگنال‌های باز ارسالی به‌طور خودکار در اطراف منبع اصلی (هدف) پراکنده می‌شوند. برای درک بیشتر این واقعیت، توجه داشته باشید که پاسخ معادله موج برای میدان الکتریکی  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  در یک محیط بدون اتلاف برابر است با:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) - \mu(\vec{r}) \varepsilon(\vec{r}) \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

که در آن بردار موقعیت و  $\mu$  و  $\varepsilon$  به ترتیب نفوذپذیری الکتریکی و تراوایی مغناطیسی محیط است (یاوز و تکسیرا، 2009). بر اساس قضیه کانولوشن خواهیم داشت:

$$p_i(t) = s(-t) * h_{r_0 r_i}^-(t) * h_{r_i r_0}^-(t) = s(-t) * h_{r_0 r_i}^-(t) * h_{r_0 r_i}^-(t) \quad (2)$$

که در آن  $h(t)$  بیانگر اندرکنش آنتن‌های واقع شده در  $\vec{r}_0$  و  $\vec{r}_i$  است. در نهایت، سیگنال بازگشت زمانی به‌دست آمده در محل اصلی آنتن برابر خواهد بود با:

$$p_i(t) = s(-t) * h_{r_0 r_i}^-(t) * h_{r_i r_0}^-(t) = s(-t) * h_{r_0 r_i}^-(t) * h_{r_0 r_i}^-(t) \quad (3)$$

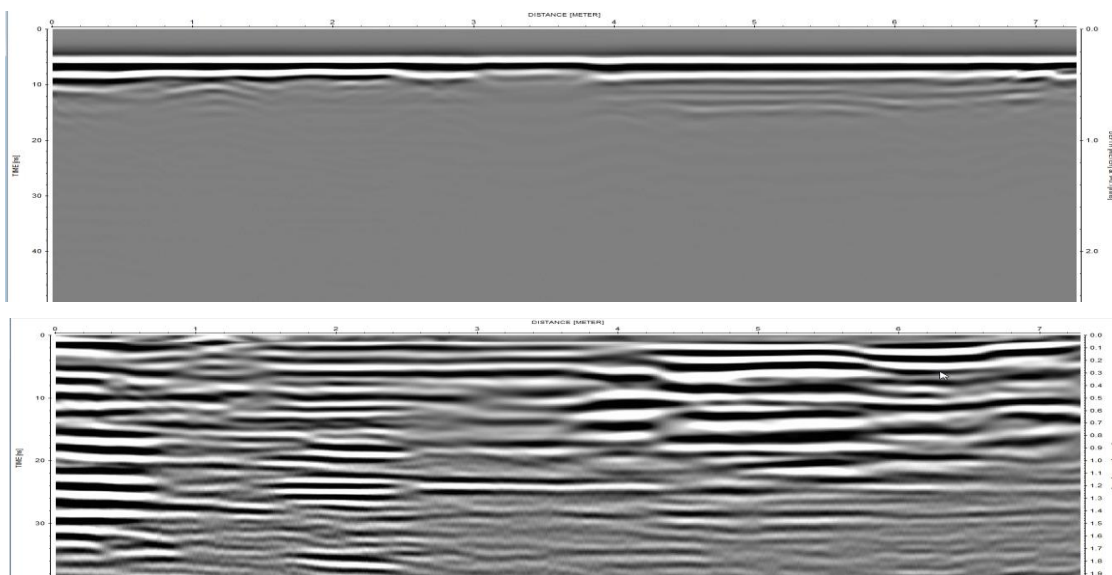
که می‌تواند به‌عنوان یک عملگر فیلتر همگام در هر دو حوزه‌ی فضا و زمان، بدون وابستگی به پاسخ خاص کانال در نظر گرفته شود. این عملگر فیلتر همگام، تمرکز فضایی و فشرده‌سازی زمانی را به‌صورت هم‌زمان انجام می‌دهد. به‌گونه‌ای تقریباً شگفت‌آور هر دو ویژگی‌ها در محیط‌های سرشار از پراکنندگی افزایش می‌یابد (یاوز، 2005). تابع موجک مورد استفاده CWT در این کار موجک مورلت (مورلت، 1982) است. موجک مادر مورلت در حوزه زمان به‌صورت زیر است (تورنس، 1998):

$$\Psi_0[n] = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} e^{j f \Psi n \Delta t} e^{-\frac{(n \Delta t)^2}{2}} \quad (4)$$

که در آن  $n$  نماگر زمان،  $\Delta t$  گام زمانی برحسب ثانیه و  $f_\Psi$  فرکانس مرکزی موجک مادر است.

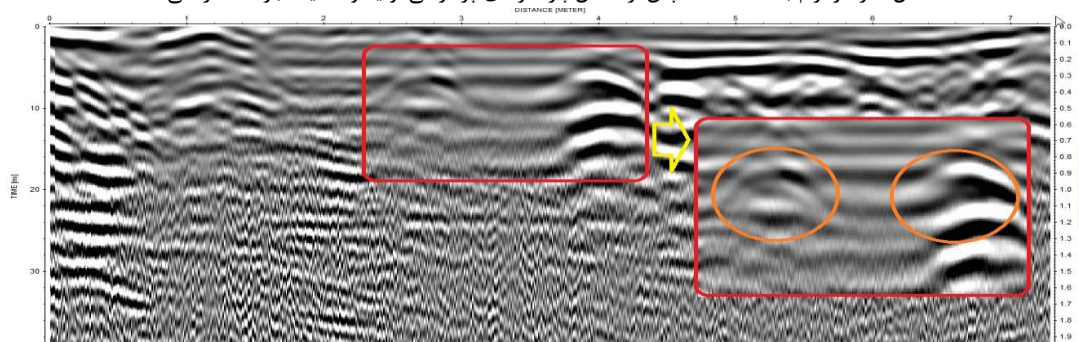
### 3 برداشت و تفسیر داده ها

شکل 2 رادارگرام اولیه به دست آمده از برداشت داده ها که در آن به سختی می توان نشانه ای از اهداف مورد مطالعه را یافت نشان می دهد. رادارگرام شکل 3 با اعمال پارامترهای پردازشی اولیه و تکنیک بازگشت زمان به دست آمده است.



شکل 2: رادارگرام خام به دست آمده از برداشت

شکل 3: رادارگرام به دست آمده پس از اعمال پارامترهای پردازشی اولیه و تکنیک بازگشت زمانی



شکل 4: رادارگرام به دست آمده پس از اعمال پارامترهای پردازشی اولیه و تکنیک بازگشت زمانی به همراه تبدیل موجک پیوسته

برای تبدیل محور زمان رسید به عمق بر اساس تحلیل سرعت و مقدار کمیت فیزیکی گذردهی الکتریکی سرعت 0.7 متر بر نانوثانیه به عنوان میانگین سرعت سیر موج الکترومغناطیسی در نظر گرفته شد. اگرچه به کارگیری تکنیک بازگشت زمانی تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی رادارگرام اولیه داشته و تا حدودی تفکیک پذیری را افزایش داده است اما به دلیل وجود میرایی موج الکترومغناطیسی نیاز به استفاده از روش های جبران میرایی برای موفقیت به کارگیری تکنیک بازگشت زمانی وجود دارد. ازین رو ابزار ریاضی تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک صافی جبران میرایی مورد اعمال و نتیجه ی به کارگیری آن در شکل 4 نمایان شده است. همان گونه که در این رادارگرام پیداست؛ به وضوح تفکیک پذیری در آن به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. پدیده های و لایه های مختلف زمین در این پروفایل هشت متری با دقت خوبی قابل تشخیص هستند. در میانه ی پروفیل و در کادر قرمز، هذلولی های مشخص شده نمایانگر حضور لوله ها با فاصله ای در حدود یک متر از هم است. محل این پدیده ها در کادر دیگری بزرگنمایی شده است.

### 3 نتیجه گیری

دراین پژوهش، به منظور به کارگیری و بررسی اثربخشی تکنیک بازگشت زمان و تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک روش نوین پردازش سیگنال، برداشت داده های GPR برای تعیین محل لوله های مدفون انجام پذیرفت. پردازش رادارگرام اولیه پس از اعمال تکنیک بازگشت زمان اگرچه لایه های بالایی زمین را پدیدار ساخت اما محل دقیق لوله ها پس از به کارگیری تبدیل موجک پیوسته به منظور رفع محدودیت روش بازگشت زمانی مشخص گردید. کارایی موثر

این تکنیک توانایی روش GPR را در مطالعات مشابه به خوبی نشان داد. پژوهش های مشابه با اهداف مطالعاتی گوناگون به ویژه اعمال تکنیک TR در مقاطع سه بعدی می تواند کاربردهای دیگر این روش را پدیدار نماید.

#### منابع

- Daniels, D.J., 2007. Ground Penetrating Radar. 2nd Edition. IET Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series
- Yavuz, M.E., Teixeira, F.L., 2009. Ultrawideband microwave sensing and imaging using time-reversal techniques: a review. *Remote Sens.* 9, 466–495.
- Yavuz, M.E., Fouda, A.E., Teixeira, F.L., 2014. GPR signal enhancement using slidingwindow space-frequency matrices. *Prog. Electromagn. Res.* 145, 1–10.
- Abduljabbar, A.M., Yavuz, M.E., Costen, F., Himeno, R. and Yokota, H. 2017. Continuous Wavelet Transform Based Frequency Dispersion Compensation Method for Electromagnetic Time-Reversal Imaging, *IEEE Trans.*
- Santos, V.R.N., Texeira, F.L., 2017. Study of time-reversal-based signal processing applied to polarimetric GPR detection of elongated targets. *J. Appl. Geophys.* 139, 257–268.
- Santos, V.R.N., Texeira, F.L., 2017. Application of time-reversal based processing techniques to enhance detection of GPR targets *Journal of Applied Geophysics* Volume 146, November 2017, Pages 80-94.
- Yavuz, M.E., Teixeira, F.L., 2005. Frequency dispersion compensation in time reversal techniques for UWB electromagnetic waves, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 233–237.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E. and Giard, D. 1982. Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayered media, *Geophysics*, vol. 47, No. 2, pp. 203–221.
- Torrence C. and Compo, G. P., 1998. A practical guide to wavelet analysis, *Bulletin of the American Meteorological Soc.*, vol. 79, No.1, pp.