

بررسی ساختارهای مدفون نزدیک سطح زمین با استفاده از روش‌های GPR و مقاومت ویژه: یک مطالعه موردی

مهدی محمدی ویژه^{۱*} و ابوالقاسم کامکار روحانی^۲

گروه ژئوفیزیک، معاونت اکتشاف، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
گروه اکتشاف و ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۱/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۲۴

چکیده

آب‌های زیرسطحی، حفرات و ساختارهای مجزای دفن شده در ژرفاهای کم، به دلیل تفاوت آشکار در ویژگی‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی با محیط دربرگیرنده خود، به خوبی توسط روش‌های مقاومت ویژه و GPR قابل آشکارسازی هستند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن ۳ پروفیل با شرایط متفاوت بر روی این گونه اهداف، به بررسی پاسخ آنها پرداخته شده است. افزون بر این که استفاده از این روش‌ها در کنار هم، بررسی قابلیت‌ها و محدودیت‌های روش‌های یادشده را ممکن ساخته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش GPR افزون بر سرعت و آسانی در برداشت داده‌ها، در آشکارسازی مرزهایی که ویژگی‌های الکترومغناطیسی در میان دو محیط به صورت ناگهانی تغییر می‌کند، بسیار موفق است. برداشت‌های مقاومت ویژه در این پژوهش که به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ونر صورت گرفته است، نشان از مقاومت ویژه پایین محیط‌های بررسی شده دارد. این امر، سبب ژرفای نفوذ کم روش GPR شده و بررسی اهداف دفن شده در ژرفاهای بیش از ۲ متر به وسیله این روش را غیر ممکن کرده است. بر خلاف روش GPR، روش مقاومت ویژه در آشکارسازی اهداف چندگانه با تفاوت شدید مقاومت ویژه در کنار هم، موفقیت چندانی حاصل نکرده است. این مطلب ناشی از قدرت جدایش پایین تر روش مقاومت ویژه در مقایسه با روش GPR است. در این پژوهش، با انتخاب دو الگوریتم متفاوت پردازش و اعمال آنها بر روی یک سری از داده‌های اولیه GPR، اطلاعات قابل توجهی به دست آمده است. اطلاعات به دست آمده از مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی با استفاده از برداشت‌های مقاومت ویژه، انتخاب صحیح الگوریتم‌های پردازش یادشده را ممکن ساخته است. این پژوهش به خوبی نشان می‌دهد که مناطق با رسانندگی الکتریکی بالا در مقاطع مقاومت ویژه، منطبق بر مناطق با اتلاف (تضعیف) بالای امواج در مقاطع GPR هستند. از این ویژگی می‌توان به خوبی در تفسیر داده‌های GPR بهره برد و روش مقاومت ویژه را مکملی مناسب برای روش GPR عنوان کرد.

کلیدواژه‌ها: رادار نفوذی به زمین (GPR)، مقاومت ویژه، قدرت جدایش، پردازش، قنات

*نویسنده مسئول: مهدی محمدی ویژه

E-mail: m_vizhe@yahoo.com

۱- مقدمه

رادار نفوذی به زمین (Ground Penetrating Radar (GPR)) یکی از روش‌های با قدرت جدایش بالای ژئوفیزیک است. دستگاه‌های GPR با استفاده از امواج الکترومغناطیس بسامد بالا (بسامد مرکزی آنتن‌های GPR موجود در محدوده بسامدی ۱۲/۵ تا ۲۶۰۰ مگاهرتز قرار دارد) ناپیوستگی‌های الکتریکی در ژرفاهای کم را آشکارسازی می‌کنند. کاربردهای این روش بسیار گسترده است و مقالات و پژوهش‌های گوناگونی در این زمینه در حوزه‌های علوم زمین‌شناسی، زیست‌محیطی، آب‌شناسی، باستان‌شناسی، فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی و بسیاری از کاربردهای دیگر، دیده می‌شود. به رغم چنین حجم گسترده‌ای از کاربردها و همچنین توانایی‌های بالای این روش در حوزه علوم مختلف، استفاده از آن در کشورمان مرسوم نیست و در پاره‌ای از موارد نیاز به کارگیری آن به شدت احساس می‌شود.

برای نشان دادن قابلیت‌ها و محدودیت‌های روش GPR و همچنین کاهش ابهام در تفسیر داده‌ها در این پژوهش، از روش مقاومت ویژه (که از روش‌های معمول و موفق در اکتشافات ژئوفیزیک است) در کنار این روش استفاده شده است. به طور کلی موفقیت روش‌های ژئوفیزیک، وابسته به وجود تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی اهداف زیرسطحی با محیط‌های دربرگیرنده آنهاست. در محیط‌هایی که اهداف رسانای غیرعادی و یا مغناطیسی وجود نداشته باشد، کمیتی که پاسخ از این اهداف و آشکارسازی توسط روش GPR را سبب می‌شود، گذردهی دی‌الکتریک (Dielectric permittivity) نام دارد (Van Overmeeren, 1994). به طور عموم این کمیت را به صورت نسبی (نسبت به گذردهی دی‌الکتریک هوا) به صورت نمادین ϵ_r نشان می‌دهند. هر چه تفاوت در گذردهی دو محیط مجاور بیشتر باشد، مرز میان آن دو محیط بهتر آشکارسازی می‌شود. از آنجا که آب‌های زیرسطحی، حفرات و سازه‌های انسانی دفن شده در خاک تفاوت خوبی در گذردهی و همچنین

مقاومت ویژه با محیط دربرگیرنده خود دارند، اهدافی مناسب برای این مطالعه به نظر می‌رسند. از این رو، در یک منطقه در نزدیکی شهر شاهرود با انتخاب قناتی فعال و با در نظر گرفتن پروفیل‌هایی در بخش‌های مختلف آن به بررسی این گونه ساختارها پرداخته شد.

۲- روش انجام پژوهش

در این پژوهش در منطقه مورد مطالعه، داده‌های مقاومت ویژه توسط دستگاه Terrameter SAS1000 ساخت شرکت سوئدی ABEM و برداشت‌های داده‌های GPR توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software صورت گرفت. آنتن مورد استفاده برای فراهم آوردن داده‌های GPR، آنتن پوششی (Shielded) با بسامد مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز بوده است. داده‌های GPR در این پژوهش، با فاصله‌های ایستگاهی ۵ سانتی‌متر و به صورت پروفیل‌زنی پیوسته، برداشت شده‌اند. مقاطع نهایی GPR که در این مقاله آورده شده‌اند، با استفاده از نرم‌افزار Win-EKKO-Pro پردازش شده و توسط نرم‌افزار Transform به نمایش درآمده‌اند. همچنین برای تهیه مقاطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون، نرم‌افزار Res2dinv استفاده شده است.

از آنجا که در روش GPR از امواج الکترومغناطیس بسامد بالا برای بررسی‌های زیرسطحی استفاده می‌شود، هدف انتخاب شده باید در ژرفای کمی باشد. برای این منظور، قناتی انتخاب شد که دسترسی به مظهر آن و در نقاطی برای برابر کردن (تطبيق) اندازه‌گیری‌ها با نتایج، امکان اندازه‌گیری ژرفای آب آن وجود داشت. این قنات در ۱۸ کیلومتری شمال-شمال‌باختری شاهرود و در محدوده عملیاتی از سوی مادر چاه به سوی مظهر آن امتداد تقریبی $N60^{\circ}E$ دارد. برای دست‌یابی به پاسخ‌های مناسب،

شکل ۲ دیده می‌شود، در محل عبور کانال آب حداقل فصل مشترک‌های افقی زیر قابل تشخیص است که به ترتیب از سطح به سوی ژرفای زمین عبارتند از: مرز مشترک خاک- بتن، بتن- هوا، هوا- آب، آب- بتن و در پایان بتن و خاک مرطوب. توان بازتاب از مرز مشترک‌های مختلف افزون بر تفاوت در ویژگی‌های الکترومغناطیسی در دو سوی مرز (به طور عموم گذردهی دی‌الکتریک)، به اندازه منطقه گذار (Transition zone) نیز وابسته است (Neal, 2004). منطقه گذار، فاصله‌ای است که در آن ضریب گذردهی دی‌الکتریک (ϵ_r) ، در مرز دو محیط تغییر می‌کند. این تغییر در همه این مرزها، ناگهانی است و به خوبی سبب بازتاب امواج می‌شود. مسئله دیگری که باید در نظر گرفت، قدرت جدایش قائم GPR در این لایه‌هاست. این متغیر با در نظر گرفتن طیف بسامد امواجی که در گیرنده دریافت می‌شوند و از روی آن محاسبه بسامد مرکزی بازگشتی، در محیط‌های یکنواخت قابل برآورد است (Neal, 2004). این کمیت به شدت وابسته به سرعت امواج در محیط زیرسطحی است. با توجه به سرعت بالای امواج در هوا، فاصله دو بازتاب از مرز مشترک‌های بتن- هوا و هوا- آب بسیار نزدیک به هم است و باعث در هم شدن (تداخل) این امواج می‌شود. قطبیت (Polarity) این بازتاب‌ها به علت تغییر سرعت (گذردهی دی‌الکتریک) در سوی عکس روی این مرزها، با یکدیگر متفاوت است. اما موج بازتابیده از سطح آب (به علت تفاوت شدید در گذردهی آن با هوا) بزرگ‌تر است و باعث می‌شود که به عنوان پدیده چیره دیده شود. این مسئله در مورد آب به طور کامل وارون است و سرعت پایین امواج GPR در آب احتمال آشکارسازی بتن زیر آب را با وجود ژرفای کم آب، ممکن می‌سازد. البته در اینجا نباید نقش اتلاف کم امواج در عبور از لایه‌های مورد بررسی را فراموش کرد (آب شیرین و هوا جزو مواد کم اتلاف (Low loss) هستند (Davis & Annan, 1989)). در ۲۴/۵ متری از پروفیل، بی‌هنجاری‌های بسیاری دیده می‌شود. در میان این بی‌هنجاری‌ها احتمال حضور چندگانه‌ها (Multiples) در نواحی کم‌اتلاف و بازآوایش (Reverberation) در هوای درون کانال وجود دارد. علت پدیده بازآوایش، بازتاب چندباره امواج درون منطقه کم‌اتلاف هواست و در مقاطع GPR به صورت یک سری از پالس‌های متوالی با دامنه بالا دیده می‌شود. برای ایجاد این پدیده، ابعاد حفره زیرسطحی باید در مقایسه با طول موج بسامد مرکزی مورد استفاده در هوا، بزرگ‌تر باشد (Kofman et al., 2006). همان‌گونه که در مقطع GPR در شکل ۳ دیده می‌شود، پدیده بازآوایش به صورت آشکار در این بخش از پروفیل دیده نمی‌شود. بنابراین می‌توان حدس زد که ابعاد بخش بالایی کانال (بالای سطح آب) که مملو از هوا است، در مقایسه با طول موج بسامد مرکزی آنتن مورد استفاده در هوا (در حدود ۱/۲ متر) کوچک است. با توجه به مقدار آبدی این قنات و مقدار آبی که این کانال انتقال می‌دهد، نتیجه به دست آمده در بالا، نتیجه‌ای منطقی است. دو پدیده دیگری که در شکل ۳ به چشم می‌خورند، وجود هذلولی‌های پراش در ۱۳ و ۴۰ متری پروفیل است. این بی‌هنجاری‌ها با بیضی‌های کوچک‌تر در شکل مشخص شده‌اند. این پاسخ‌ها از لوله‌های بتنی به قطر ۵۰ سانتی‌متر و دفن‌شده در ژرفای تقریبی ۷۰ سانتی‌متری منشأ گرفته‌اند. لوله‌ها برای انتقال آب برای مقاصد کشاورزی ساخته شده و در زمان برداشت داده‌ها بدون آب بوده‌اند. از آنجا که درون این لوله‌ها مملو از هواست، به دلیل بسامد مورد استفاده و قطر به نسبت کم لوله‌ها، پاسخ‌های ناشی از مرز مشترک‌های بالا و پایین لوله‌ها در زمان، بسیار نزدیک هم بوده‌اند و به راحتی قابل جدایش نیستند. این امر، از سرعت بالای امواج GPR در هوا ناشی می‌شود و وابستگی شدید قدرت جدایش قائم GPR به محیط مورد بررسی را نشان می‌دهد.

برداشت‌های مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ونر و با فاصله‌های میان‌الکترودی (طول آرایه) ۲، ۳، ۴ و ۵ متر، بر روی این پروفیل انجام شد. این پروفیل‌ها به صورت نیمه‌لگاریتمی در شکل ۴- الف، و مقطع دوبعدی مقاومت

پروفیل‌های برداشتی عمود بر امتداد قنات با آزیموت 150° انتخاب شدند. موقعیت پروفیل‌های مورد بررسی در این پژوهش، بر روی عکس هوایی منطقه برداشت، و در شکل ۱ با استفاده از خطوط سفید رنگ مشخص شده است. طرح مربع‌شکل تیره‌رنگ در شکل ۱، استخری را نشان می‌دهد که برای ذخیره آب برای مقاصد کشاورزی پایین‌تر از مظهر قنات، ساخته شده است و ابعادی حدود ۲۵ متر دارد. پس از مظهر قنات، آب توسط یک کانال زیرزمینی به سوی شهر هدایت می‌شود. پروفیل اول برداشت بر روی این کانال در نظر گرفته شده و از حرف P1 برای نشان دادن آن استفاده شده است. موقعیت کانال انتقال آب، مظهر قنات و یکی از میله‌های قنات با نشانگر سبز رنگ در عکس هوایی منطقه در شکل ۱، مشخص شده است. امتداد این سه نقطه با دقت خوبی امتداد قنات را نشان می‌دهد. موقعیت نقاط آغازین و پایانی پروفیل‌ها نیز با نشانگر سرخ‌رنگ در عکس هوایی یادشده مشخص شده است. سطح زمین در طول پروفیل‌های برداشت، توپوگرافی همواری دارد. بنابراین انجام تصحیحات توپوگرافی بر روی داده‌های GPR و مقاومت ویژه لازم نبوده است.

۳- اندازه‌گیری بر روی مرزهای ناگهانی (Sharp boundaries)

این اندازه‌گیری بر روی پروفیل ۱ (P1) به طول ۶۰ متر بر روی کانال انتقال آب صورت پذیرفت. کانال یادشده با ابعاد تقریبی ۱ متر در ۲۴/۵ متری از طول پروفیل و در ژرفای تقریبی ۱ متری واقع است. در شکل ۲ یک مقطع نمادین از ساختارهای موجود در محل این پروفیل به نمایش درآمده است.

دستگاه‌های GPR زمان رسید امواج به گیرنده دستگاه را اندازه‌گیری می‌کنند. برای تعیین موقعیت مکانی بازتاب‌ها، مقاطع زمانی باید به مقاطع ژرفایی تبدیل شوند. مقاطع ژرفایی و زمانی داده‌های GPR برای این پروفیل در شکل ۳ به نمایش درآمده است. مقطع ژرفایی (شکل ۳- ب) با استفاده از سرعت میانگین $\frac{m}{ns} \cdot 0.1$ به دست آمده است. سرعت میانگین به دست آمده با استفاده از شکل هذلولی‌های پراش در منطقه برداشت حاصل شد. تعیین سرعت به این روش در بیشتر دستگاه‌ها و نرم‌افزارهای GPR، امکان‌پذیر است. در تولید این مقطع از بهره خودکار (Automatic) (Auto gain) و همچنین پالایشگر (فیلتر) Dewow استفاده شده است. فاصله‌های زمانی میان پالس‌های ارسالی و پالس‌هایی که به صورت مستقیم از راه هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و همچنین بازتاب‌هایی که از توده‌های کم ژرفا حاصل می‌شوند، بسیار کوتاه است. از این رو، گیرنده دستگاه از سیگنال پر می‌شود. این مسئله سبب به وجود آمدن یک نابودی آهسته بسامد پایین که (به wow معروف است) بر روی رد‌ها (Trace) می‌شود (Neal, 2004). این نابودی بسامد پایین بر روی داده‌ها قرار گرفته و آنها را آشفته می‌کند. از این رو، برای حذف و کاهش اثر این نوفه‌های بسامد پایین از پالایشگر بالاگذر Dewow استفاده شده است. از سوی دیگر، توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد. از جمله مهم‌ترین عوامل تضعیف انرژی سیگنال، تضعیف ناشی از رسانندگی محیط زیرسطحی (Attenuation) و پخش هندسی امواج است (Reynolds, 1997). بنابراین پاسخ دریافتی از توده‌های ژرف، ضعیف‌تر است. برای حل این مشکل و یکسان‌سازی پاسخ ساختارهای واقع در ژرفاهای مختلف با استفاده از بهره‌ها (Gain)، توان سیگنال در ژرفاهای بیشتر افزایش می‌یابد. بهره، یک تابع متغیر با زمان است و از بهره‌های مختلفی برای تصحیح داده‌های GPR استفاده می‌شود. استفاده از پالایشگرها به دلیل پهن‌بند بودن گیرنده‌های GPR و از انواع بهره‌ها به دلیل اتلاف و کاهش انرژی سیگنال نسبت به ژرفا، در بررسی‌های GPR بسیار معمول است.

همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، بی‌هنجاری‌ها و همچنین هذلولی‌های پراش واقع در ۲۴/۵ متری از پروفیل که با بیضی بزرگ در مرکز شکل مشخص‌اند، نشان دهنده بازتاب امواج از مرز مشترک‌های مختلف هستند. همان‌گونه که در

به‌خوبی در عکس هوایی منطقه برداشت در شکل ۱ قابل تشخیص هستند. همان‌گونه که در مقطع مدل‌سازی وارون این پروفیل در شکل ۶ دیده می‌شود، روش مقاومت ویژه قادر به جدایش آب از خاک با رسانندگی بالای منطقه نبوده است. این مسئله ناشی از ابعاد کوچک مجرای قنات آب در مقایسه با ژرفای دفن آن و همچنین نزدیک بودن مقاومت ویژه آب به رسوبات پیرامون مجرای قنات است.

۵- استفاده از روش مقاومت ویژه در کمک به تفسیر داده‌های GPR

پروفیل ۳ که با حرف P3 در شکل ۱ مشخص است، به فاصله ۱۰۰ متر از مظهر قنات و به طول ۴۰ متر بر روی مجرای قنات در نظر گرفته شد. این پروفیل بر روی جاده‌ای گذرنده از روی قنات آب انتخاب شده است. مجرای قنات در محل این پروفیل در فاصله ۱۸ تا ۱۹ متری و در ژرفای تقریبی ۳ متری واقع است. برداشت‌های مقاومت ویژه بر روی این پروفیل همچون دو پروفیل پیشین، به‌روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ونر و با فاصله‌های میان‌الکترودی ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ متر صورت گرفت. در شکل ۷، پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری ونر به‌همراه مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۷-الف دیده می‌شود، با افزایش فاصله میان‌الکترودی، یک روند افزایش مقاومت ویژه نسبت به ژرفا دیده می‌شود. این مطلب نشان‌دهنده وجود رس بالا در لایه‌های بالایی خاک است. در فاصله ۲۴ متری تا ۳۵ متری مقطع مدل‌سازی شده (شکل ۷-ب) که منطبق بر مرکز جاده است یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا در سطح دیده می‌شود. این اثر ناشی از تراکم و سخت‌شدگی خاک در اثر عبور وسایل نقلیه از این بخش است.

همان‌گونه که در پروفیل‌های مقاومت ویژه در شکل ۷-الف دیده می‌شود، یک اثر افزایش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات (۱۸ تا ۱۹ متری پروفیل) نسبت به پیرامون آن دیده می‌شود. همانند کانال آب در پروفیل ۱، مجرای قنات به‌صورت توده‌ای مقاوم در مقایسه با رسوبات پیرامون آن قابل تشخیص است.

همان‌گونه که گفته شد این پروفیل بر روی جاده‌ای گذرنده از روی قنات آب انتخاب شد. ارتفاع شانه این جاده در بخش‌های مختلف پروفیل متغیر است و در بخش‌های پایانی پروفیل حتی به ۱ متر نیز می‌رسد. با توجه به محدودیت‌های دستگاه GPR مورد استفاده در مکان‌های ناهموار، طول پروفیل GPR از پروفیل مقاومت ویژه متناظر آن کوتاه‌تر و برابر ۳۰ متر در نظر گرفته شد. شکل ۸، مقاطع ژرفایی GPR با استفاده از دو نوع الگوریتم پردازش متفاوت بر روی این پروفیل را نشان می‌دهد. این مقاطع با به‌کارگیری پردازش‌های یکسان Dewow و مهاجرت (Migration) با استفاده از سرعت ۰/۱ متر بر نانوثانیه به‌دست آمده‌اند. دلیل تفاوت در شکل این مقاطع استفاده از دو نوع بهره مختلف است. برای نمایش شکل ۸-الف از بهره AGC، یا کنترل بهره خودکار (Automatic Gain Control) با مقدار بیشینه بهره ۳۰۰ و پهنای پنجره برابر ۱ طول پالس و برای نمایش شکل ۸-ب از بهره SEC یا جبران گسترش خطی و نمایی (Spreading and Exponential Compensating) به ازای ثابت اتلاف ۵ و مقدار ابتدای ۱ و مقدار بیشینه ۵۰۰، استفاده شده است. مقادیر یادشده متغیرهای مستقل برای هر یک از بهره‌های یادشده هستند. این متغیرها با توجه به هدف مورد مطالعه، اطلاعات جانبی و نتایج مورد انتظار توسط پردازش‌گر تعیین می‌شوند. برای نمونه در تعیین متغیرهای مربوط به بهره SEC، ثابت اتلاف با توجه به مقاومت ویژه پایین محیط زیرسطحی و به‌واسطه آن، تضعیف بالای امواج GPR، برابر با مقدار یادشده در نظر گرفته شده است. از این رو، به‌نظر می‌رسد بدون استفاده از اطلاعات مربوط به پروفیل مقاومت ویژه متناظر، تهیه مقطع شکل ۸-ب بسیار دشوار باشد. از آنجا که دامنه بسیار گسترده‌ای از انتخاب‌ها موجود است، انتخاب صحیح این متغیرها از وظایف مهم پردازش‌گر در تولید مقاطع صحیح از داده‌ها است. انتخاب صحیح این متغیرها نه فقط بهره‌ها، بلکه در همه پردازش‌ها، برای رسیدن به مقطع پایانی

ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون مربوط به این پروفیل در شکل ۴-ب به نمایش درآمده‌اند. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مجموعه هوا، بتن و آب موجود در کانال (واقع در ۲۴/۵ متری پروفیل) در مقایسه با خاک پیرامون آن که مقاومت ویژه پایین دارد، به‌صورت توده‌ای مقاوم دیده می‌شود. این در صورتی است که در استفاده از روش GPR در شکل ۳، بی‌هنجاری‌های بسیاری در این منطقه دیده می‌شود. مقاومت ویژه پایین خاک از وجود رس فراوان موجود در خاک منشأ می‌گیرد و مشاهدات صحرائی در محل، این مطلب را به‌خوبی تأیید می‌کند. اثر لوله بتنی در فاصله ۱۳ متری به‌خوبی بر روی پروفیل‌های مقاومت ویژه با فاصله‌های میان‌الکترودی ۲ و ۳ متری و همچنین در مقطع مدل‌سازی شده به‌صورت توده‌ای مقاوم از سطح به ژرفا قابل تشخیص است. این در صورتی است که اثری از لوله‌ای به‌همین ابعاد و در ژرفای یکسان در فاصله ۴۰ متری از طول پروفیل مشاهده نمی‌شود. شواهد امر نشان می‌دهد که از لوله واقع در فاصله ۱۳ متری مدت‌ها است آبی عبور نکرده، اما از لوله واقع در ۴۰ متری، برای آب‌رسانی به زمین‌های کشاورزی به تناوب استفاده شده است. مرطوب بودن لوله و خاک پیرامون آن باعث تعدیل مقاومت ویژه بالای هوا در فاصله ۴۰ متری و پاسخ ندادن از لوله بتنی در این مکان می‌شود. با در نظر گرفتن آرایش‌های متفاوت مقاومت ویژه و کوچک کردن مقیاس اندازه‌گیری‌ها (فاصله‌های میان‌الکترودی)، در جدایش چنین ساختارهایی با مقاومت ویژه متفاوت، در نزدیک سطح می‌توان به موفقیت‌های احتمالی دست یافت. اما در صورتی که چنین ساختارهایی در ژرفاهای بیشتر واقع شوند، برای آشکارسازی آنها، افزایش فاصله‌های میان‌الکترودی اجتناب‌ناپذیر است و منجر به کاهش قدرت جدایش روش مقاومت ویژه می‌شود. این مطلب تأکیدی بر قدرت جدایش بالای روش GPR در مقایسه با روش مقاومت ویژه (برداشت‌شده با آرایش یادشده) است.

۴- قابلیت روش GPR در آشکارسازی حفرات زیرسطحی

مقطع ژرفایی حاصل از اندازه‌گیری‌های GPR بر روی پروفیل ۲ که با استفاده از سرعت $0.1 \frac{m}{ns}$ و با به‌کارگیری پالایشگر Dewow و بهره خودکار به‌دست آمده، در شکل ۵ آورده شده است. این پروفیل به‌فاصله ۴۰ متر از مظهر قنات و به‌طول ۵۰ متر در نظر گرفته شد. یکی از میله‌های قنات در فاصله ۲۲ متری از ابتدای این پروفیل و سطح آب در مجرای قنات در ژرفای ۲/۵ متری واقع است. میله قنات در سطح، توسط یک لایه سطحی خاک پوشیده شده است. اثر میله قنات در فاصله ۲۲ متری پروفیل در شکل ۵ به‌خوبی قابل تشخیص است. پالس‌های با دامنه بالا و متوالی در این محل ناشی از عبور امواج GPR از هوای درون میله قنات و بازآوایش امواج درون این منطقه کم‌اتلاف هستند. بر خلاف پروفیل پیشین، ابعاد ناحیه مملو از هوا در بالای سطح آب درون میله قنات بزرگ‌تر از طول موج بسامد مرکزی آنتن مورد استفاده است. به‌همین دلیل مشاهده چنین پدیده‌ای در این ناحیه دور از انتظار نیست. همان‌گونه که از این پروفیل دیده می‌شود، روش GPR پتانسیل بالایی در آشکارسازی حفرات زیرسطحی دارد.

برداشت‌های مقاومت ویژه همانند پروفیل پیشین به‌روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ونر و با فاصله‌های میان‌الکترودی ۲، ۳، ۴ و ۵ متر بر روی این پروفیل نیز انجام شد. در مقطع مقاومت ویژه دوبعدی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل (شکل ۶)، اثر میله قنات به‌صورت یک منطقه با مقاومت ویژه نسبی بالاتر در موقعیت ۲۲ متری پروفیل قابل تشخیص است. به‌فاصله چند متری پیرامون میله قنات یادشده، مناطق با مقاومت ویژه پایین به‌خوبی در مقطع مدل‌سازی شده و در نزدیک سطح قابل تشخیص هستند. در این بخش از پروفیل، رسوبات ریزدانه رسی ناشی از لای‌روبی و بازسازی قنات و به‌احتمال‌تمركز رسوبات رسی به‌علت توپوگرافی کم‌ارتفاع این منطقه نسبت به پیرامون، به‌خوبی قابل تشخیص هستند. این رسوبات که دارای رس به‌نسبت بالایی هستند به‌صورت یک خاکریز بر روی مسیر قنات انباشته شده‌اند و

مطالعاتی که نواحی با مقاومت ویژه پایین مناطق با تضعیف بالای امواج GPR را سبب شده‌اند، مقطعی همچون شکل ۷-ب هدف پایانی در چنین مطالعاتی هستند. از آنجا که نواحی آلوده در بررسی‌های زیست‌محیطی بیشتر، مقاومت ویژه پایینی دارند، در این گونه مطالعات از چنین رویکردی می‌توان بهره برد.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

برداشت‌های مقاومت ویژه در منطقه مورد مطالعه نشان از مقاومت ویژه پایین (در پاره‌ای از موارد کمتر از ۱۰۰ اهم متر) در رسوبات نزدیک سطح دارد. مقاومت ویژه پایین، ناشی از گسترش رسوبات رسی در لایه‌های بالایی زمین است. از آنجا که مقاومت ویژه نقش به‌سزایی در نفوذ امواج GPR در ساختارهای زیرسطحی ایفا می‌کند، استفاده از روش GPR در این گونه محیط‌ها، مگر در شرایطی که هدف در ژرفاهای کمی دفن شده است، توصیه نمی‌شود. هرچند در این پژوهش، از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی تنها در اندازه‌گیری‌های GPR و از آرایش ونر در اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه استفاده شده است، اما با همگانی کردن این نتایج می‌توان به‌راحتی چنین استنباط کرد که روش GPR در مقایسه با روش مقاومت ویژه قدرت جدایش بالاتری دارد. این مطلب به‌خوبی با مقایسه مقاطع حاصل از روش‌های یادشده در پروفیل ۱ قابل درک است.

یکی از اهداف این پژوهش مقایسه دو روش GPR و مقاومت ویژه بوده است. در صورتی که نتایج حاصل نشان‌دهنده این مطلب است که دو روش یادشده می‌توانند مکمل یکدیگر باشند. چنانچه در بررسی مقاطع ۸-الف و ۸-ب دیده شد، با به‌کارگیری دو الگوریتم مختلف پردازش بر روی یک سری از داده‌های اولیه دو مقطع قابل تفسیر به‌دست آمد. از هر یک از این مقاطع اطلاعات مستقلی قابل دستیابی بوده است. دامنه پردازش‌ها و روند به‌کارگیری آنها بر روی داده‌های GPR، با توجه به هدف مورد مطالعه، محیط برداشت داده‌ها، اطلاعات جانبی و متغیرهای دیگر کنترل می‌شود. در این پژوهش، آگاهی از پراکندگی مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی ناشی از برداشت‌های مقاومت ویژه، دست‌یابی به اطلاعات جانبی و ویژگی‌های هدف مورد مطالعه برای پردازش داده‌های GPR را ممکن ساخته است.

پروفیل‌های مقاومت ویژه در این پژوهش، به‌دلیل نبود تفاوت کافی در مقاومت ویژه آب قنات و رسوبات پیرامون آن و همچنین کوچک بودن ابعاد قنات نسبت به ژرفای دفن آن قادر به آشکارسازی آب قنات نیستند و تنها بتن و هوای درون مجرای قنات و کانال آب را در مقایسه با رسوبات پیرامون آن به نقشه درآورده‌اند.

سپاسگزاری

نگارندگان لازم می‌دانند که از آقایان دکتر محسن اویسی مؤخر و دکتر ایرج پیروز (اعضای محترم هیئت علمی دانشگاه‌های رازی کرمانشاه و صنعتی شاهرود) به‌دلیل راهنمایی‌های ارزنده‌شان، از آقای مهندس محمد کبیریان، کارشناس محترم آزمایشگاه‌های ژئوفیزیک اکتشافی دانشگاه صنعتی شاهرود و نیز دانشجویان محترم کارشناسی معدن، کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، معدن و آب‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود بویژه آقایان محسن جهانین، مسعود حسینی، احمد سمنانی‌نژاد، داریوش شکری، محسن محمودی و علی جعفری برای کمک در برداشت داده‌های مورد نیاز این پژوهش، تشکر ویژه‌ای کنند.

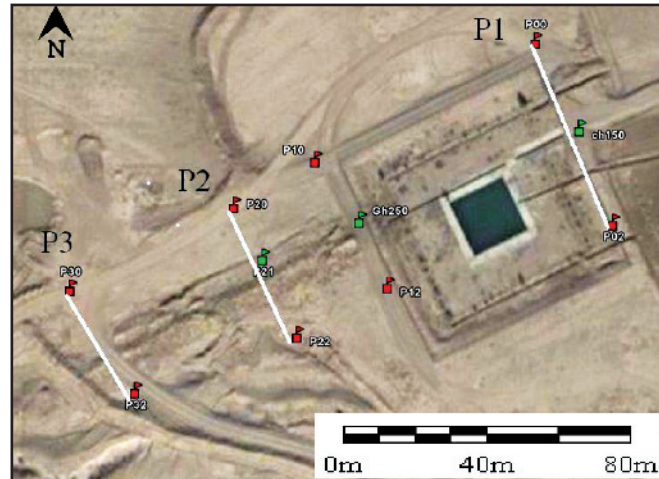
مورد نظر بسیار با اهمیت است. در بررسی‌هایی (مانند بررسی‌های رسوب‌شناسی) که به نقشه درآوردن تمام مرز مشترک‌ها (مرز مشترک‌های رسوبی) اهمیت دارد، بیشتر از بهره AGC استفاده می‌شود. این بهره به نسبت وارون با توان سیگنال متناسب است و بهره را در حدود تعریف کاربر، بر روی داده‌ها به کار می‌گیرد. از این رو، این بهره سعی در یکسان‌سازی تمام سیگنال‌ها دارد و در نتیجه، به‌کارگیری این بهره بر روی داده‌ها، تمامی بازتاب‌ها را یکسان می‌کند. اما از سوی دیگر، از آن‌جا که مرز مشترک‌های مختلف توان‌های بازتاب متفاوتی دارند و هر یک مقداری از سیگنال ورودی را بازتاب می‌کنند، با به‌کارگیری بهره AGC، اطلاعات به‌دست آمده از دامنه نسبی سیگنال‌ها از میان خواهند رفت. این اطلاعات در برخی از کاربردها بسیار ارزشمند است و برای حفظ آنها از انواع مختلف بهره‌ها که از جمله مهم‌ترین آنها بهره SEC است، استفاده می‌شود. این بهره از اطلاعات مربوط به اتلاف سیگنال در محیط بهره می‌برد. بهره SEC با توجه به محدودیت‌هایی که کاربر تعریف می‌کند و با استفاده از اطلاعات مربوط به تضعیف سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج GPR در محیط برداشت، سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد. در استفاده از این بهره، متغیرهایی که کاربر برای استفاده از آن در نظر می‌گیرد، بسیار اهمیت دارد. این متغیرها از جمله بیشترین مقدار بهره‌ای که بر روی داده‌ها به‌کارگیری خواهد شد و همچنین میزان اتلاف امواج در محیط، برای بازسازی شکل بازتاب‌ها بسیار با اهمیت هستند.

اثر پی‌جاده از آغاز تا پایان پروفیل در هر دو مقطع در شکل ۸ به‌صورت یک بازتاب پیوسته دیده می‌شود. این پاسخ به‌دلیل افزایش تدریجی بلندی جاده نسبت به پیرامون، از ۲۰ متری تا پایان پروفیل به‌صورت یک بازتاب با شیب بیشتر دیده می‌شود. رسانندگی بالای خاک، ژرفای نفوذ روش GPR را محدود می‌کند و به‌دلیل واقع شدن مجرای قنات در ژرفاهای بیشتر از ژرفای نفوذ این روش، اثری از آن در طول این پروفیل مشاهده نمی‌شود.

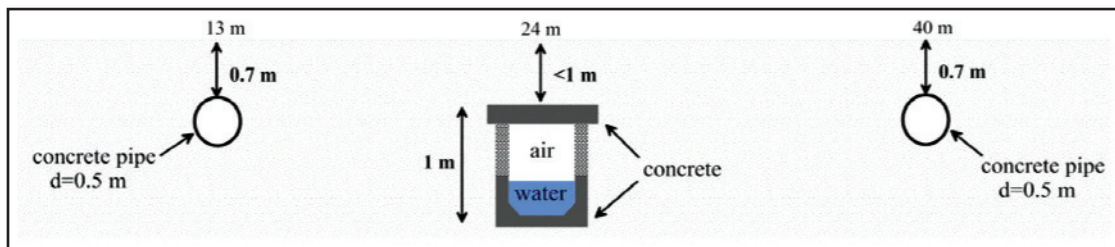
۶- اهمیت پردازش داده‌های GPR

در شکل ۸ با به‌کارگیری دو الگوریتم متفاوت پردازش بر روی یک سری از داده‌های اولیه، دو مقطع قابل تفسیر حاصل شده است. از ۱۷ تا ۲۱ متری شکل ۸-الف که منطبق بر محل عبور قنات آب است، بازتاب‌ها پیوستگی خود را از دست می‌دهند. این اثر را می‌توان به انباشته‌های خاک حاصل از بازسازی و لای‌روبی قنات در زیر جاده نسبت داد. جاده یادشده در بخشی از مسیر خود، این نهشته‌ها را قطع می‌کند. همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد، این نهشته‌ها به‌صورت خاکریزی بر روی مسیر قنات از مظهر تا زیر جاده یادشده در شکل ۱ قابل تشخیص هستند. مسئله قابل توجه در شکل ۸-ب نمایش نداشتن بازتاب‌ها (بازتاب‌ها به‌زحمت قابل تشخیص‌اند) در فاصله ۱۰ تا ۲۳ متری پروفیل و در ژرفای بیش از ۰/۵ متر است. نمایش نداشتن بازتاب‌ها در این منطقه به سبب اتلاف بیشتر امواج در این ناحیه است. با توجه به پروفیل‌های مقاومت ویژه در شکل ۷، این منطقه منطبق بر نواحی با مقاومت ویژه پایین است. این امر از حضور رسوبات ریزدانه (بیشتر رسی) در نهشته‌های انباشته شده بر روی مسیر قنات منشأ گرفته است.

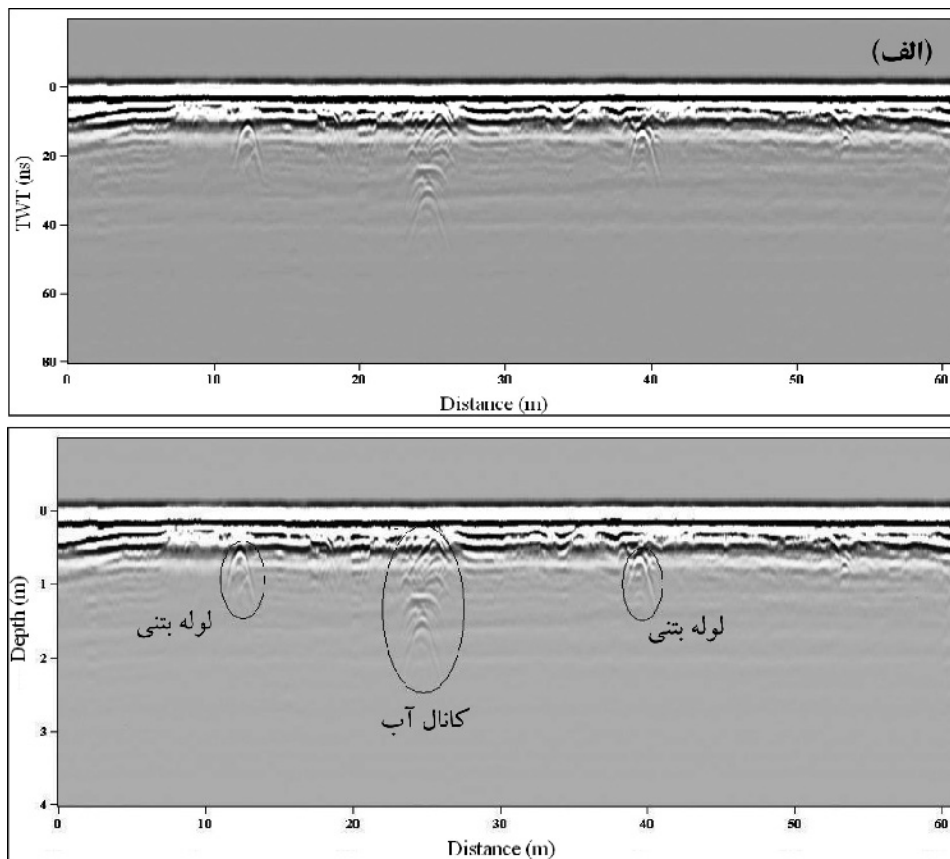
مسئله‌ای که اهمیت خود را در شکل ۸ نشان می‌دهد استفاده از پردازش مناسب در جستجوی هدف مورد مطالعه است. در شرایطی که نمایش پیوستگی بازتاب‌های حاصل از مرز مشترک‌های زیرسطحی اهمیت دارد، استفاده از پردازش‌هایی که منجر به تولید مقطع نشان داده شده در شکل ۸-الف شد، بسیار مفیدتر است. اما در



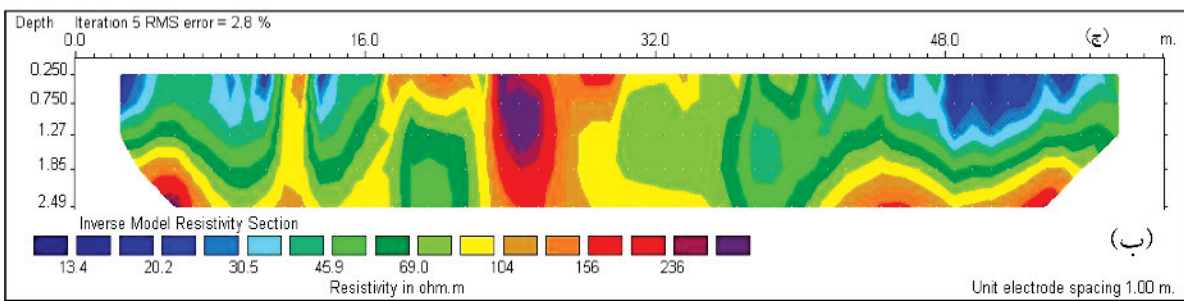
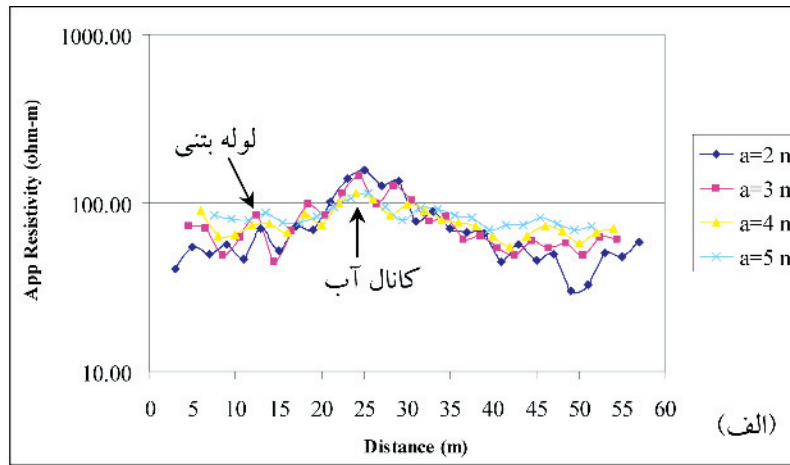
شکل ۱ - عکس هوایی (برگرفته از سایت Google Earth از محل برداشت داده‌ها، به همراه پروفیل‌های برداشت و نقاط اندازه‌گیری مختصات مکانی (GPS).



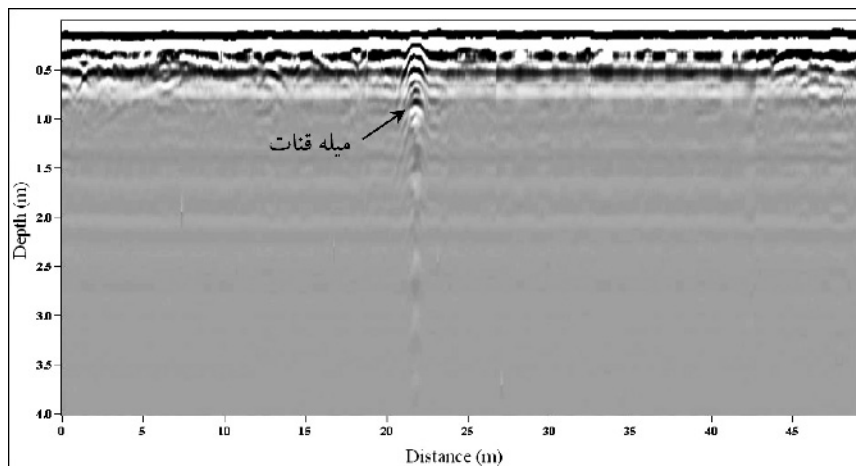
شکل ۲- مقطع نمادین از محل برداشت داده‌ها در محل پروفیل ۱.



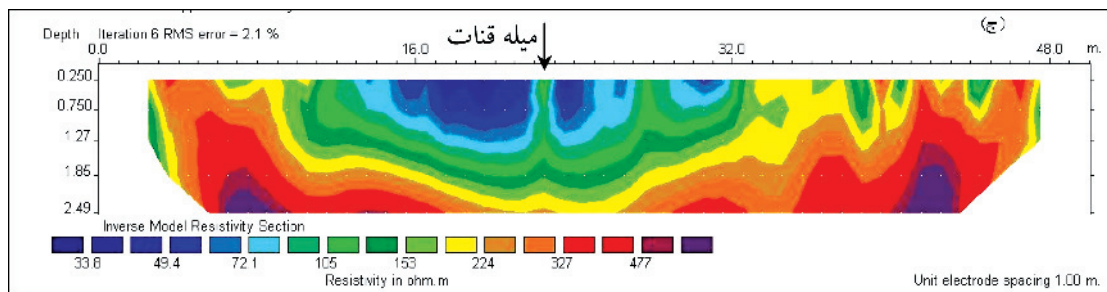
شکل ۳- مقطع پردازش یافته پروفیل ۱ (P1) با به کارگیری پالایشگر Dewow و استفاده از بهره خودکار. (الف) مقطع زمانی، (ب) مقطع ژرفایی.



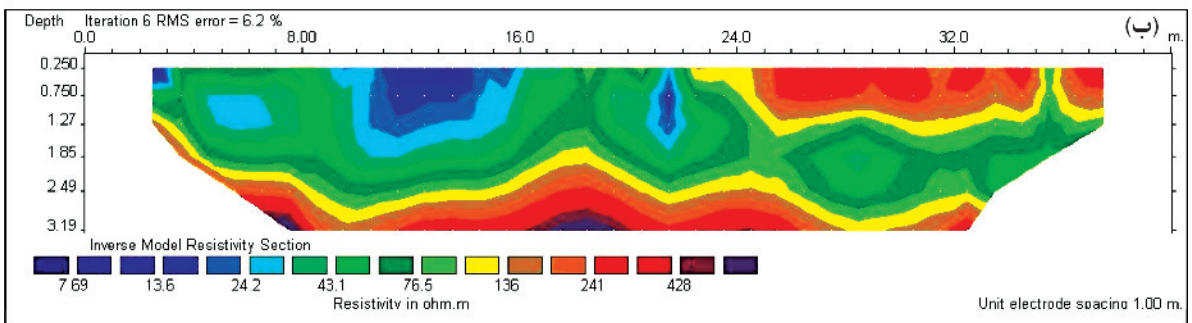
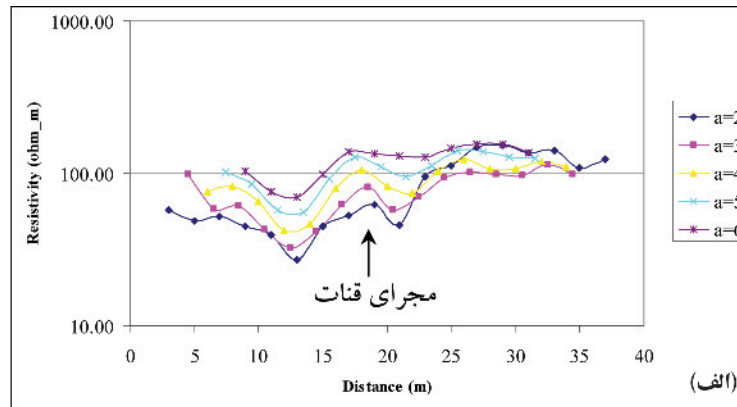
شکل ۴- الف) پروفیل های مقاومت ویژه ظاهری و نثر به ازای فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۱ و ب) مقطع پایانی حاصل از مدل سازی وارون.



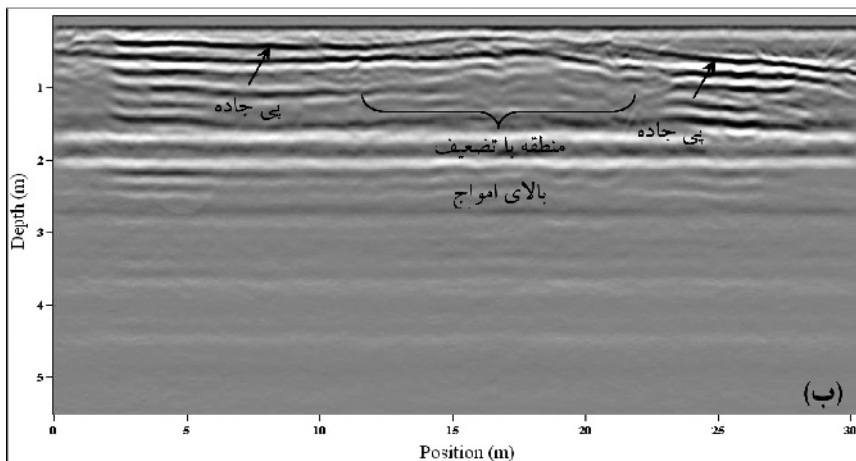
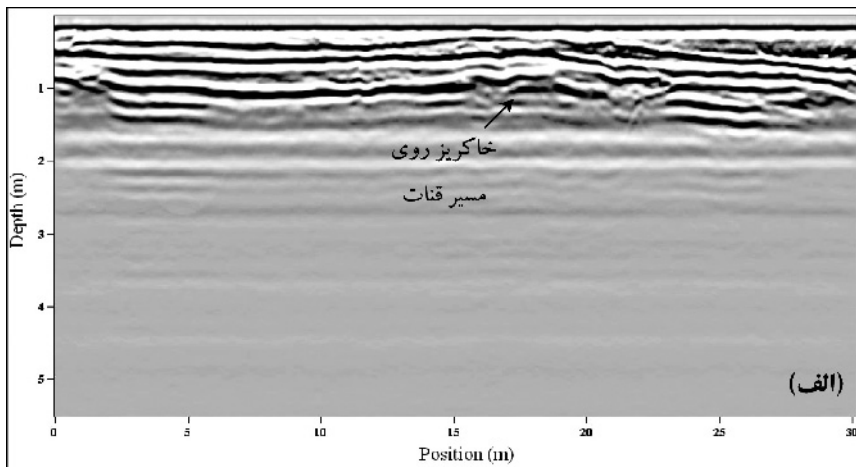
شکل ۵- مقطع ژرفایی داده های GPR برای پروفیل ۲ (P2) با به کارگیری پالایشگر Dewow و استفاده از بهره خودکار.



شکل ۶- مقطع مقاومت ویژه دوبعدی حاصل از مدل سازی وارون برای پروفیل ۲.



شکل ۷-الف) پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازای فواصل میان‌الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۳، (ب) مقطع پایانی حاصل از مدل‌سازی وارون.



شکل ۸-الف) مقطع ژرفایی داده‌های GPR بروی پروفیل ۳ با به‌کارگیری پالایشگر Dewow، پردازش مهاجرت و بهره AGC و (ب) همان مقطع با به‌کارگیری پردازش‌های مربوط به بخش الف و با به‌کار بردن بهره SEC به‌جای بهره AGC.

References

- Davis, J. L. & Annan, A. P., 1989- Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 3: 531-551.
- <http://earth.google.com>
- Knight, R., 2001- Ground penetrating radar for environmental applications, *Annual Review Earth Planet Science*, 29: 229–255.
- Kofman, R., Ronen, A. & Frydman, S., 2006- Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records, *Journal of Applied Geophysics*, 59: 284-299.
- Neal, A., 2004- Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-science reviews*, 66: 261-330.
- Reynolds, J. M., 1997- *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley, 691 p.
- Van Overmeeren, R. A., 1994- Georadar for hydrogeology, *First break*, 8: 401-408.