

مقایسه و تلفیق نتایج پردازش، مدل سازی و تفسیر داده های توموگرافی الکتریکی و GPR برای شناسایی اهداف و ساختارهای زیر سطحی کم ژرفا

اسماعیل اسحقی^۱، ابوالقاسم کامکار روحانی^۲ و علیرضا عرب امیری^{۳*}

^۱ کارشناسی ارشد، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۳ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۰۶

چکیده

هر روش ژئوفیزیکی مزایا و معایب ویژه خود را دارد. تلفیق نتایج حاصل از برداشت به روش های مختلف ژئوفیزیکی سبب پوشش نقطه ضعف هر روش به وسیله روش های دیگر می شود. به همین دلیل بررسی های مختلف اکتشافی، مهندسی، زیست محیطی و غیره با استفاده از چندین روش مختلف ژئوفیزیکی، معمولاً نتایج معتبرتری را در اختیار قرار می دهند. در این پژوهش نیز سعی شده است تا با تلفیق نتایج برداشت به روش های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) و رادار نفوذی به زمین (GPR) به بررسی نقاط قوت و ضعف هر یک از این دو روش پرداخته و در پایان، در نتیجه تلفیق نتایج، تفسیر دقیق تر و با اطمینان بالاتری ارائه شود. روش ERT یکی از روش های برداشت بهینه از زیر مجموعه های روش مقاومت ویژه است که در مناطق با زمین شناسی پیچیده نتایج قابل اتکایی را در اختیار قرار می دهد. روش GPR نیز از روش های غیر مخرب ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک بالا است که در آن با ارسال امواج الکترومغناطیس بسامد بالا به زمین و ثبت امواج بازتابی از فصل مشترک لایه های زیر سطحی، به بررسی زیر سطح زمین در ژرفای کم پرداخته می شود. در این پژوهش، قنات به عنوان هدفی مناسب برای شناسایی با این دو روش انتخاب و سپس، برداشت های ERT و GPR بر روی منطقه دربرگیرنده هدف مزبور انجام شد. نتایج حاصل از پردازش، مدل سازی و تفسیر داده های برداشت شده نشان داد که از نقطه نظر مقایسه دو روش یادشده، روش GPR قدرت تفکیک بالاتری دارد ولی روش ERT دارای ژرفای نفوذ بیشتری است. این دو روش در نشان دادن پدیده هایی مانند وجود حفرات، تغییرات در ابعاد ذرات و نیز نفوذ رطوبت توافق و همخوانی خوبی دارند. همچنین با تلفیق نتایج حاصل از این دو روش با یکدیگر مشخص شد که دقت و اطمینان تفسیر به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

کلیدواژه ها: توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)، رادار نفوذی به زمین (GPR)، اهداف زیر سطحی، قنات آب، ژرفای نفوذ، قدرت تفکیک.

E-mail: alirezaarabamiri@yahoo.com

*نویسنده مسئول: علیرضا عرب امیری

۱- پیش گفتار

زمین و بررسی بازتاب این امواج، به اکتشاف اهداف زیرزمینی مانند بررسی آب های زیرزمینی، نقشه برداری سطوح سنگ کف و شناسایی اقیانوس های خاک پرداخته می شود (Van Overmeeren, 1994; Doolittle & Collins, 1998; Freeland et al., 1998; Aranha et al., 2002).

در این نوشتار سعی شده است تا با انتخاب هدفی مناسب به بررسی نقاط قوت و ضعف روش های توموگرافی الکتریکی و GPR پرداخته و سپس توانایی ارائه تفسیری معتبرتر را با تلفیق آنها به نمایش گذاشته شود. آب های زیرزمینی به دلیل داشتن گذردهی دی الکتریک بالا در مقایسه با رسوبات و سنگ های سازنده پیرامون، اهداف خوبی برای آشکارسازی توسط روش GPR هستند. این هدف معمولاً مقاومت ویژه متفاوتی نسبت به محیط پیرامون خود دارد، در نتیجه آب زیرزمینی هدفی مناسب برای بررسی با این دو روش است. در این بررسی قنات به عنوان یک ساختار زیر سطحی مشخص و یک هدف خوب برای مقایسه دو روش توموگرافی الکتریکی و GPR مورد استفاده قرار گرفت و با انجام برداشت ها بر روی نمرخ های منظم به بررسی این دو روش و نقاط ضعف و قوت آنها پرداخته شده است.

از مطالعاتی که با تلفیق این دو روش انجام شده است می توان به چند مورد زیر اشاره کرد. (Beauvais et al. (2003 با تلفیق دو روش توموگرافی الکتریکی و GPR به شناسایی سنگ های هوازده در کشور سنگال پرداختند. (Leucci (2005 حفرات زیر ساختی در یک کلیسا را در ایتالیا با تلفیق این دو روش شناسایی کرد. (Qady et al. (2005 با استفاده از این دو روش، حفرات زیر سطحی در شهر العمل در کشور مصر را شناسایی کردند. (Ortiz et al. (2007 با همین روش به شناسایی سنگ های آتشفشانی در جزایر قناری اسپانیا پرداختند. وجود حفرات زیر سطحی و نیز تغییر جنس ساختارها در این ۲ روش هدفی مناسب به شمار می آید. در تمامی این

روش های ژئوفیزیکی به دلیل هزینه کمتر و زمان صرف شده کوتاه تر نسبت به روش های مرسوم زمین شناسی مانند حفاری و بررسی مغزه های گمانه زنی کاربرد روزافزونی پیدا کرده است. ویژگی دیگر روش های ژئوفیزیکی پیوسته بودن تفسیر است. در حفاری و گمانه زنی، داده ها به نقطه خاصی تعلق دارند و تعمیم این داده ها به دیگر بخش ها ممکن است دقیق نباشد و تفسیر صورت گرفته را با مشکل روبه رو کند (Maillet et al., 2005). باید توجه شود که هر یک از روش های مختلف ژئوفیزیکی مورد استفاده، نقاط ضعف و قوت ویژه خود را دارند. در نتیجه نتایج تفسیر داده های برداشت شده با استفاده از تنها یک روش ژئوفیزیکی در مواردی قابلیت اعتماد بالایی دارد. در این موارد، با تلفیق دو یا چند روش ژئوفیزیکی و استفاده از نقاط قوت هر یک از این روش ها می توان به تفسیری دقیق تر با اعتبار بالاتری رسید.

روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه (Electrical Resistivity Tomography) (ERT) از روش های مقاومت ویژه است که معمولاً برای اکتشاف هیدروژئولوژیکی، معدنی، ژئوتکنیکی و نیز مطالعات زیست محیطی مورد استفاده قرار می گیرد. روش های مقاومت الکتریکی زیر سطحی می توانند مواد مدفون و نیز الگوهای مختلف هیدروژئولوژیکی و زمین شناسی پیچیده را به خوبی ثبت کنند (Griffiths & Barker, 1993; Dahlin & Owen, 1998). هدف از توموگرافی الکتریکی ایجاد تصویری از ویژگی های الکتریکی زمین است. امروزه پیشرفت سریع تجهیزات و نرم افزارهای ژئوالکتریکی اجازه استفاده از الگوهای مشاهداتی دویعدی و سه بعدی را فراهم کرده است، بنابراین روش توموگرافی الکتریکی کاربردی روزافزون در موارد مختلف پژوهشی و اکتشافی پیدا کرده است.

روش رادار نفوذی به زمین (Ground Penetrating Radar; GPR) نیز از دیگر روش های ژئوفیزیکی است که در آن با ارسال امواج الکترومغناطیس به درون

گوس- نیوتن ماتریس ژاکوبین در هر تکرار باید محاسبه شود. این عمل باعث افزایش میزان محاسبات و زمان گیر شدن مدل‌سازی می‌شود (Barker & Loke, 1996a). روش‌های شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به‌روزرسانی اجتناب می‌کنند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین J_0 برای مدل اولیه موجود باشد، مشتقات جزئی می‌تواند به طور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن محاسبه شود.

روش شبه‌نیوتن از معادله به‌روزرسانی که در زیر آمده است، استفاده می‌کند

$$B_{i+1} = B_i + u_i p_i^T \quad (2)$$

که در این رابطه

$$u_i = (\Delta y_i - B_i p_i) / p_i^T p_i, \quad (3)$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i. \quad (4)$$

در روابط بالا y_i پاسخ مدل برای آمین تکرار، B_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای آمین تکرار، با استفاده از تقریب ماتریس ژاکوبین B_i و بردار انحراف پارامتر است (Loke & Barker, 1996a).

به طور کلی به دلیل عدم محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، روش شبه نیوتن در مقایسه با روش گوس- نیوتن، روشی سریع‌تر است که فضای حافظه کمتری از کامپیوتر را نیز دربرمی‌گیرد. این مزایا سبب شده تا در معکوس‌سازی، بیشتر روش شبه‌نیوتن استفاده شود (Loke & Barker, 1996a).

۲-۲. روش GPR

رادار نفوذی به زمین یا GPR به طور خلاصه یکی از روش‌های با قدرت تفکیک بالای ژئوفیزیکی است که توسط امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا (۱۲/۵ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) تغییرات خواص الکتریکی در ژرفای کم را به منظور آشکارسازی زیرسطحی اندازه‌گیری می‌کند (Van Dam & Schlager, 2000). روش GPR به منظور تأمین تصاویر ممتد و با جزئیات فراوان زیرسطحی به وسیله نفوذ و بازتاب امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا در زمین به کار گرفته می‌شود (Beres & Haeni, 1991). به طور کلی موفقیت روش‌های ژئوفیزیک وابسته به وجود تباین 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 دی الکتریک (Dielectric permittivity) نام دارد (Van Overmeeren, 1994). عموماً این کمیت را به صورت نسبی، نسبت به گذردهی دی الکتریک هوا، به صورت نمادین ϵ_r نشان می‌دهند. هر چه تباین در گذردهی دو محیط مجاور بیشتر باشد، مرز بین آن دو محیط بهتر آشکارسازی می‌شود.

در حالت ساده آنتن فرستنده درون دستگاه GPR امواج الکترومغناطیسی را به داخل زمین ارسال می‌کند. بخشی از امواج ارسالی در برخورد با فصل مشترک‌های الکتریکی، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در این محل‌ها بازتاب می‌یابند (Parasnis, 1997). آنتن گیرنده در دستگاه این انعکاسات را به صورت یک پیک بالا نشان می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد، موفقیت روش GPR به تباین گذردهی الکتریکی یا ثابت دی الکتریک در زمین بستگی دارد. تباین گذردهی الکتریکی بین مواد گوناگون، دامنه انعکاسات را تعیین می‌کند (Davis & Annan, 1989). در رابطه ۵ می‌توان دید که میزان بازتاب از مرز دو لایه به میزان اختلاف ثابت دی الکتریک آنها بستگی دارد. در این رابطه R ضریب بازتاب، ϵ_{1r} و ϵ_{2r} نیز به ترتیب ثابت دی الکتریک نسبی برای محیط‌های ۱ و ۲ هستند. در اینجا باید گفت ثابت دی الکتریک نسبی از فرمول $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ به دست می‌آید که در آن ϵ_0 و ϵ به ترتیب ثابت‌های دی الکتریک مطلق خلأ برابر $8/85 \times 10^{-12}$ فاراد بر متر و ثابت دی الکتریک محیط مورد بررسی است. ثابت دی الکتریک همچنین بیشترین تأثیر را در سرعت امواج در لایه‌ها دارد، به گونه‌ای که در بیشتر موارد سرعت از رابطه ۶

موارد هر یک از این روش‌ها نقطه ضعف روش دیگر را پوشش داده و با استفاده از تلفیق این دو روش تا حدود زیادی کیفیت و اطمینان تفسیر بالا رفته است. یادآوری چند نمونه تحقیق بالا نشان از به روز بودن این بررسی‌ها در دنیا دارد.

در این پژوهش داده‌های توموگرافی الکتریکی (مقاومت ویژه) توسط دستگاه Terrameter SAS1000 ساخت شرکت سوئدی ABEM و داده‌های GPR توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شدند. آنتن مورد استفاده برای اکتساب داده‌های GPR، آنتن پوششی (Shielded) با بسامد ۲۵۰ مگاهرتز است.

۲- روش‌شناسی

۲-۱. روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه

روش توموگرافی الکتریکی یکی از روش‌های مقاومت ویژه است که آن را می‌توان در دو بخش طراحی شبکه و چگونگی برداشت داده‌ها و نیز مدل‌سازی داده‌های برداشت شده مورد بررسی قرار داد (Zhou & Greenhalgh, 2002).

برداشت‌های مرسوم توموگرافی الکتریکی به دو نوع برداشت دوبعدی (2D) و برداشت سه‌بعدی (3D) خلاصه می‌شوند که برداشت‌های دوبعدی به دلیل سازه اقتصادی مناسبی که دارند بیشتر در برداشت‌های صحرایی مورد استفاده قرار گرفته و برداشت‌های سه‌بعدی همچنان در مراحل پژوهشی قرار دارند (Loke, 2004). برای برداشت‌های توموگرافی الکتریکی آرایش‌های الکترونی مختلفی به کار برده می‌شود. آرایه‌هایی که بیشترین کاربرد را برای برداشت‌های دوبعدی (Electrical Imaging Surveys) دارند (۱، ونر، ۲، دوقطبی-دوقطبی، ۳، ونر-شلومبرژه، ۴ قطبی-قطبی، ۵ قطبی-دوقطبی هستند. انتخاب بهترین آرایه برای یک برداشت صحرایی به نوع ساختار زیرسطحی، حساسیت اندازه‌گیرنده مقاومت ویژه و سطح نوفه (Noise) زمینه بستگی دارد. ویژگی‌های یک آرایه که می‌تواند مهم باشند عبارتند از: الف) ژرفای بررسی؛ ب) حساسیت آرایه به تغییرات جانبی و قائم در مقاومت ویژه زیرسطحی؛ ج) پوشش داده‌های افقی و د) شدت (قدرت) سیگنال (Loke, 2004).

مرحله مهم دیگر در روش توموگرافی الکتریکی مدل‌سازی است که به ۲ صورت انجام گیرد، مدل‌سازی مستقیم یا پیشرو Forward modeling و مدل‌سازی معکوس (وارونه) (Inverse modeling). مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خط (Trial and Error) با مدل‌های زمینی دو بعدی با استفاده از روش اجزای محدود (Finite-element method) یا تفاضل محدود (Finite-difference method) صورت می‌پذیرد. مدل اولیه در این نوع از مدل‌سازی سلیقه‌ای است و بسته به مهارت و تجربه کارشناس ژئوفیزیک بهبود می‌یابد (Loke & Barker, 1996a). در روش معکوس‌سازی برخلاف مدل‌سازی مستقیم با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل زمین برآورد می‌شود. این مدل‌سازی در بررسی‌های ژئوفیزیکی کاربردی‌تر از مدل‌سازی پیشرو است. در مدل‌سازی معکوس در ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز است (Loke & Barker, 1996a). برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه دو روش معمول کمترین مربعات گوس- نیوتن (Gauss-Newton) و روش شبه‌نیوتن (Quasi-Newton) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در روش گوس- نیوتن برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q = J^T g \quad (1)$$

در رابطه ۱، q بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت ویژه و ستبرای لایه‌ها، g بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و محاسباتی، Δq تغییر پارامتری مدل، λ عامل میرایی، J ماتریس مشتقات جزئی و در نهایت J^T ترانهاده ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی است (Loke, 2001). در روش

ممکن برداشت شد. از آنجایی که هدف این مطالعه بررسی ویژگی‌های ۲ روش مورد اشاره و تلفیق نتایج آنها بوده است، در نتیجه سعی شد تا موقعیت هدف (قنات) در هنگام برداشت داده‌ها مشخص باشد. به همین منظور در تمامی نیمرخ‌های برداشتی، قنات تقریباً در وسط نیمرخ قرار دارد. به عبارت بهتر موقعیت قنات در تمامی نیمرخ‌ها مشخص است و تنها قدرت دو روش مورد مطالعه در نمایش بهتر هدف، مورد بررسی قرار گرفت. سعی شد تا با کاهش خطای برداشت صحرائی اعتبار تفسیر تا حد ممکن بالا رود. در ابتدا بر روی هر نیمرخ داده‌های توموگرافی الکتریکی با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی برداشت شد که در آن فاکتور n برای هر جفت الکترودی جریان از ۱ تا ۶ افزایش یافته است. دلیل انتخاب آرایه دوقطبی - دوقطبی، در حساسیت بالای این آرایه تغییرات افقی مقاومت ویژه است که سبب شده این آرایه در به نقشه درآوردن ساختارهای قائم مانند دایک‌ها و حفرات نسبت به دیگر آرایه‌ها قوی‌تر باشد (Loke, 2001). دلیل دیگر این انتخاب پوشش جانبی خوب آرایه دوقطبی - دوقطبی به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی است (Marescot, 2009). فاصله الکترودی مورد استفاده در این برداشت بسته به ژرفای هدف مورد بررسی و میزان قدرت تفکیک مورد نیاز تغییر می‌کند. در نیمرخ‌های ابتدایی که ژرفای آب کمتر است، از فاصله الکترودی ۱ متر برای بالا بردن قدرت تفکیک استفاده شد. با افزایش ژرفای قنات در نیمرخ نهایی برداشت شده، فاصله الکترودی نیز افزایش یافته است. داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی توسط دستگاه Terrameter SAS1000 ساخت شرکت سوئدی ABEM برداشت شدند. در پایان این داده‌ها با نرم‌افزار RES2DINV مدل‌سازی شدند.

پس از برداشت داده‌های مقاومت ویژه، بر روی هر نیمرخ داده‌های GPR نیز برداشت شد. داده‌های GPR در این پژوهش توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شده است. این دستگاه از آنتن پوششی ۲۵۰ مگاهرتز برای ارسال پالس‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌کند. داده‌ها به روش ممتد و نیمرخ‌زنی با فواصل ایستگاهی ۵ سانتی‌متر و پنجره زمانی ۱۰۰ نانو ثانیه برداشت شد. برای حذف نوفه‌های پیشای محیطی و همچنین به دلیل بالا بودن زمان برداشت، تعداد ردهای دسته‌شونده (Stack) برابر با مقدار پایین ۳۲ رد در نظر گرفته شده است. فاصله میان آنتن‌های فرستنده و گیرنده ثابت و برابر با ۰/۲۷۹۴ متر بوده است. برای تبدیل مقاطع بر حسب زمان به مقاطع بر حسب ژرفا نیز با بررسی زمین‌شناسی منطقه و همچنین مشخص بودن تقریبی ژرفای قنات در برخی نیمرخ‌ها که سبب ایجاد هذلولی‌های مشخص در این نیمرخ‌ها شده و با استفاده از برازش هذلولی مدل با هذلولی ناشی از اهداف زیرسطحی، سرعت در محیط زیرسطحی برابر ۰/۱ متر بر نانوثانیه به‌دست آمد. برای پرهیز از یکنواختی بررسی بر روی هر نیمرخ و نمایش اثرات پردازش با بهره‌های مختلف سعی شده تا در این مطالعه بر روی هر نیمرخ از بهره‌ای متفاوت با بهره استفاده شده در دیگر نیمرخ‌ها استفاده شود. داده‌های GPR توسط نرم‌افزار Win_Ekko_Pro پردازش شده و خروجی آنها توسط نرم‌افزار Transform به نمایش درآمده است.

نکته مهمی که در این بخش باید یادآور شد سرعت برداشت داده‌هاست. برای برداشت داده‌های مقاومت ویژه هر نیمرخ، زمانی در حدود ۲ ساعت صرف شد در حالی که برداشت GPR هر نیمرخ به زمان بسیار کمتری (حدود ۵ دقیقه) نیاز داشت. این موضوع برای برداشت‌هایی که مسئله زمان و هزینه اهمیت دارد، باید به عنوان مزیت روش GPR مورد توجه قرار گیرد.

۴- پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های برداشت شده و مقایسه نتایج حاصل

اولین نیمرخ برداشتی در فاصله ۱۵۰ متری مظهر قنات با فاصله الکترودی ۱ متر (a=1m) برای انجام برداشت توموگرافی الکتریکی قرار دارد. مقطع الکتریک این

پیروی می‌کند. بر پایه این رابطه سرعت امواج رادیویی در حالت متوسط به سرعت نور در هوا (c = 0.3 m/ns) و نسبت ثابت دی‌الکتریک k بستگی دارد.

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{1r}} - \sqrt{\epsilon_{2r}}}{\sqrt{\epsilon_{1r}} + \sqrt{\epsilon_{2r}}} \quad (5)$$

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

تغییر در نوع مایع محتوی سازند، تغییرات کوچک در تخلخل، تغییر در نوع و شکل ذرات رسوبی و همچنین جهت‌گیری و چینش (Packing) آنها، تماماً بازتاب‌های خوبی را سبب می‌شوند (Neal, 2004). توان بازتاب نیز به اندازه منطقه گذار بستگی دارد (Annan, 2001). منطقه گذار، منطقه‌ای است که در آن گذردهی الکتریکی تغییر می‌کند. هر چه پهنای این منطقه کمتر و تغییر در گذردهی الکتریکی تند و ناگهانی‌تر باشد، بازتاب امواج رادار شدت بیشتری خواهد داشت و این فصل مشترک راحت‌تر آشکارسازی می‌شود. در صورتی که اگر پهنای این منطقه نسبت به طول موج غالب رادار بزرگ باشد، این فصل مشترک را نمی‌توان به خوبی آشکارسازی کرد و بیشتر انرژی سیگنال در این منطقه میرا می‌شود.

مقاومت ویژه الکتریکی افق‌های زیرسطحی نیز تضعیف سیگنال‌های رادار و در نتیجه ژرفای نفوذ قابل دسترسی را تعیین می‌کند. مناطق دارای مواد با رسانندگی بالا مانند افق‌های دارای زمین رسی به دلیل ویژگی‌های الکتریکی خود، سیگنال‌ها را به سرعت تضعیف می‌کنند (Jol & Smith, 1991). استفاده از GPR در زمین‌هایی که مقاومت خاک‌های آن کمتر از ۱۰۰ اهم متر است، مناسب نیست. تضعیف سیگنال رادار همچنین با افزایش بسامد ارسالی زیاد می‌شود (Davis & Annan, 1989).

بحث مهم دیگر در بررسی روش GPR اعمال پردازش‌های مناسب بر روی داده‌ها به منظور تفسیر معتبر است. از پردازش‌های مهمی که بر روی داده‌ها اعمال می‌شود می‌توان به پردازش تصحیح اشباع سیگنال یا اصطلاحاً Dewow، پردازش صفر زمانی، اعمال انواع بهره‌ها (Gains) و نیز مشخصه پوش منحنی (Envelope) اشاره کرد. پردازش Dewow فرایند حذف بسامدهای پایین ناشی شده از توده‌های موجود در ژرفای کم و نیز پالس‌های مستقیم ارسالی از فرستنده و زمین به گیرنده (که باعث اشباع گیرنده از سیگنال می‌شود) از روی داده‌ها و حفظ سیگنال‌های اصلی را شامل می‌شود (Annan, 2001). بهره‌ها نیز تابعی متغیر با زمان هستند که با هدف تقویت سیگنال‌های ضعیفی که از ژرفاهای بیشتر می‌آیند بر روی داده‌ها اعمال می‌شوند (Sensor & software, 1999) هدف مورد مطالعه نوع و میزان پردازش‌های اعمالی را تعیین می‌کند. برخی از اهداف مورد مطالعه تنها به پردازش‌های اولیه نیاز دارند در حالی که در برخی مطالعات باید پردازش‌های پیشرفته‌ای بر روی داده‌ها اعمال شود.

۳- عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها

به علت محدودیت‌های روش‌های یادشده و به‌ویژه روش GPR، منطقه و هدف مورد بررسی و نیز برداشت صحرائی باید ویژگی‌های مشخصی مانند ژرفای کم هدف (قنات) و نیز توپوگرافی سطحی ناچیز داشته باشد. در نهایت با توجه به این موضوع و با بررسی مناطق مختلف و شرایط آنها، قناتی در منطقه درخانیاب مجن شهرستان شاهرود مناسب برای این پژوهش شناخته شد. توپوگرافی منطقه بسیار کم بوده و به منظور موفقیت روش GPR، برداشت‌ها در نزدیکی مظهر قنات که آب ژرفای کمتری دارد، انجام شد. شیب کم سطح زمین سبب شد که تا فاصله طولانی از مظهر قنات، آب در ژرفای کمی قرار داشته باشد و بتوان برداشت‌ها را با موفقیت و نتایج مناسب انجام داد. زمین‌شناسی این منطقه نیز نشان از آبرفتی بودن منطقه تا ژرفای زیادی دارد (Vaziri & Majidifard, 2001).

داده‌های ابتدایی بر روی ۴ نیمرخ مشخص عمود بر امتداد قنات با بیشترین دقت

بوته‌های خار، گیاهان صحرایی و با عدم برداشت صحیح، باشد که باعث می‌شود تا بازتاب‌های زیرسطحی در موقعیت دیگری برای نیمرخ ثبت شود.

دلیل بالاتر بودن ژرفای نفوذ در بخش ابتدایی قنات را می‌توان در جابه‌جایی لایه‌های خاک به علت شخم زدن آنها و در نتیجه تبخیر بیشتر آب و کاهش رطوبت در مقایسه با نیمه دوم نیمرخ دانست. این افزایش ژرفای نفوذ می‌توانست به افزایش ابعاد ذرات نسبت داده شود که با بررسی مقطع مقاومت ویژه این احتمال رد شد. همان‌گونه که دیده شد در این نیمرخ داده‌های توموگرافی الکتریکی سبب تصحیح خطاهای موجود در تفسیر داده‌های GPR مانند موقعیت صحیح قنات و نیز ژرفای نفوذ بیشتر در نیمه اول نیمرخ شد.

برای شناسایی لایه‌بندی زیرسطحی در زمین کشاورزی در این نیمرخ و شناسایی اثر شخم زدن بر روی این لایه‌ها یک بار دیگر بر روی داده‌های GPR این نیمرخ، فیلتر Dewow، بهره‌اتوماتیک و مشخصه پوش منحنی را اعمال کرده تا بتوان لایه‌بندی زیرسطحی را برای این نیمرخ بررسی کرد. مقطع حاصل از اعمال این پردازش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.

به‌هم‌خوردگی لایه‌های زیرسطحی در ابتدای این نیمرخ به دلیل وجود زمین کشاورزی و شخم زدن خاک به روشنی دیده می‌شود که با تفسیر مقطع مقاومت ویژه همخوانی خوبی دارد. در انتهای این نیمرخ نیز مانند ابتدای نیمرخ به‌هم‌خوردگی لایه‌های زیرسطحی دیده می‌شود که در بازدید دوباره از منطقه مشخص شد در این بخش نیز زمین کشاورزی وجود داشته که در زمان برداشت داده‌های توموگرافی الکتریکی و GPR این زمین‌ها بایر بوده است.

پس از برداشت نیمرخ‌های یاد شده در بالا به منظور مقایسه این دو روش از نظر ژرفای نفوذ، سعی شد تا در فاصله بیشتری از مظهر قنات، در جایی که قنات ژرفای بیشتری دارد نیمرخ دیگری با فاصله الکترودی مناسب برداشت شود. برداشت توموگرافی این نیمرخ با دو فاصله الکترودی ۱/۵ و ۲ متر و در فاصله تقریبی ۵۰۰ متر از مظهر قنات انجام پذیرفت. فاصله الکترودی کمتر با هدف اکتساب داده‌های با قدرت تفکیک بالاتر و فاصله الکترودی بزرگ‌تر نیز برای بررسی ژرفایی بیشتر قنات انجام شد.

شبه‌مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه این نیمرخ با فاصله الکترودی ۱/۵ متر در شکل ۸ به نمایش درآمده است. توزیع مقاومت ویژه به صورت منظم و شبه‌لایه‌ای در این نیمرخ دیده می‌شود. قنات نیز در فاصله ۱۹/۵ تا ۲۱ متری و از ژرفای ۱/۸۰ متری با تغییرات مقاومت ویژه از ۲۳۰ تا ۴۰۰ اهم متر به روشنی مشخص است. در موقعیت ۱۳/۵ متری این نیمرخ نیز یک افزایش مقاومت ویژه بسیار مشابه با اثرات قنات دیده می‌شود که به دلیل وجود مسیر انحرافی برای قنات در این بخش است. افزایش مقاومت ویژه در فاصله ۲۷ تا ۳۰ متری این نیمرخ به دلیل وجود جاده خاکی در این بخش به خوبی توسط مقطع مقاومت ویژه با فاصله الکترودی ۱/۵ متر مشخص شده است.

شکل ۹ مقطع مدل‌سازی نیمرخ ۵ با فاصله الکترودی ۲ متر را نشان می‌دهد. در این مقطع نیز بازه مقاومت ویژه زمینه، محل قنات، موقعیت محل افزایش مقاومت ویژه مشابه با قنات و میزان افزایش مقاومت ویژه در محل قنات انطباق خوبی با مقطع مقاومت ویژه به‌دست آمده با فاصله الکترودی ۱/۵ متر دارد.

به واسطه افزایش فاصله الکترودی و افزایش ژرفای نفوذ سطح بیشتر و واضح‌تری از قنات مشخص می‌شود. اما قدرت شناسایی جاده خاکی در این مقطع به دلیل کاهش قدرت تفکیک، به مراتب کاهش یافته است.

شکل ۱۰ مقطع ژرفای داده‌های GPR برای نیمرخ ۴ است که با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره‌اتوماتیک به‌دست آمده است. ژرفای نفوذ کم برای امواج رادار در این مقطع نشان‌دهنده ریزدانه بودن نسبی لایه‌های زیرسطحی و یا وجود رطوبت در خاک در زمان برداشت است. ژرفای نفوذ کم GPR در این نیمرخ باعث شده تا هیچ اثری

نیمرخ در شکل ۱ نشان داده شده است، قنات در محل ۱۹ تا ۲۰ متری نیمرخ و در ژرفای ۰/۴ تا ۱ متر با بازه مقاومت ویژه ۵۰۰ - ۲۰۰ اهم متر مشخص شده است. بازه مقاومت ویژه بین ۱۰۰ - ۲۰۰ اهم متر نشان از آبرفتی بودن زمین دارد. کاهش بالای مقاومت ویژه در سمت راست قنات نشان از بیشتر بودن رطوبت و یا رس در این بخش نسبت به طرف دیگر قنات دارد.

مقطع GPR نیمرخ ۱ نیز در شکل ۲ دیده می‌شود. در این نیمرخ بر روی داده‌ها فیلتر Dewow و بهره AGC با بیشینه تقویت ۵۰۰ اعمال شده است. موقعیت قنات در این مقطع همخوانی خوبی با داده‌های مقاومت ویژه دارد. به‌گونه‌ای که قنات در پیش از ۲۰ متری نیمرخ و از ژرفای ۰/۵ متر شروع می‌شود.

ژرفای نفوذ کمتر امواج در سمت راست قنات نسبت به سمت چپ آن نشان‌دهنده نفوذ بیشتر آب و یا وجود مقادیر بالاتر رس در این بخش است. این نتیجه‌گیری در داده‌های مقاومت ویژه نیز دقیقاً به دست آمد. نکته دیگر ژرفای نفوذ بالای امواج GPR در ابتدای نیمرخ بوده که تا حدود ۲ متر می‌رسد که نشان از دانه‌بندی بزرگ‌تر ذرات و کمتر بودن میزان رس در این بخش دارد و در مقطع مقاومت ویژه نیز با افزایش نسبی مقاومت ویژه همراه است.

نیمرخ دوم مورد بررسی نیز با فاصله الکترودی ۱ متر برای برداشت‌های مقاومت ویژه در فاصله ۴۰ متری از نیمرخ اول قرار گرفته است. مقطع مدل‌سازی شده این نیمرخ در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مقطع به دلیل ابعاد کم قنات، روش توموگرافی الکتریکی قدرت تفکیک کافی برای تشخیص هدف در این نیمرخ را ندارد. البته باید توجه کرد در اطراف قنات به دلیل حضور رسوبات رسی - سیلتی ناشی از لای‌رویی متناوب قنات و نفوذ رطوبت در بخش‌های پایین دست قنات مقاومت ویژه پایین‌تری دیده می‌شود.

داده‌های برداشت GPR نیمرخ ۲ در شکل ۴ نشان داده شده است. بر روی داده‌های مقطع ژرفایی این نیمرخ به ترتیب فیلتر Dewow و بهره AGC با بیشینه تقویت ۳۰۰ اعمال شده است.

قنات در این نیمرخ در موقعیت ۲۰ متری و در ژرفای ۰/۵ متری اثر خود را به روشنی نشان می‌دهد. با توجه به این نکته که قنات در مقطع مقاومت ویژه این نیمرخ نمایش داده نشده است، می‌توان قدرت تفکیک به مراتب بالاتر روش GPR را نسبت به روش توموگرافی الکتریکی در این نیمرخ به روشنی دید.

نفوذ بالاتر امواج GPR در ابتدا و انتهای این نیمرخ با مقادیر بالاتر از میانگین مقاومت ویژه در مقطع الکتریک همخوانی دارد و نشان از افزایش دانه‌بندی و یا کاهش رطوبت در این بخش‌ها دارد. مقاطع مقاومت ویژه و GPR در این بخش‌ها همخوانی خوبی با یکدیگر دارند.

نیمرخ سوم نیز با فاصله الکترودی ۱ متر برداشت شد و مقطع مقاومت ویژه آن در شکل ۵ دیده می‌شود. به هم‌ریختگی مقطع مقاومت ویژه در نیمه ابتدایی این نیمرخ به دلیل وجود زمین کشاورزی و به هم‌ریختگی سطوح خاک ناشی از شخم زدن زمین است. افزایش مقاومت ویژه در نیمه دوم نیمرخ نیز به دلیل افزایش ابعاد ذرات و همچنین عدم هوازدهی و رطوبت کمتر خاک‌های زیرسطحی نسبت به زمین کشاورزی است.

قنات در این نیمرخ نیز در موقعیت ۱۹ تا ۲۰ متری و ژرفای ۱ - ۰/۵ متری، با مقاومت ویژه ۴۵۰ - ۲۶۰ اهم متر مشخص است. عدم افت مقاومت ویژه در اطراف قنات نشان از ناچیز بودن رسوبات ریزدانه ناشی از لای‌رویی در این بخش دارد.

شکل ۶ مقطع داده‌های رادار برای نیمرخ ۳ را نشان می‌دهد. بر روی این نیمرخ فیلتر Dewow و بهره ثابت ۲۰۰ اعمال شده است. تغییر موقعیت قنات در این نیمرخ ناشی از چرخش نامناسب چرخ گاری حامل دستگاه و تأخیر در موقعیت هندل‌های پراش است که باعث شده تا قنات در فاصله بیش از ۲۰ متری از ابتدای نیمرخ نشان داده شود. دلایل این اتفاق می‌تواند عواملی همچون توپوگرافی زمین، وجود

مقاومت ویژه، قنات به شکل مجموعه‌ای متشکل از بتن (لایه پوششی)، هوا و آب با مقاومت ویژه‌ای بالاتر از اطراف ظاهر می‌شود و در داده‌های GPR نیز قنات به واسطه تفاوت خواص دی‌الکتریک با محیط اطراف قابل تشخیص است.

در حالت مقایسه نیز قدرت تفکیک بالاتر روش GPR و نیز سرعت برداشت نسبتاً بیشتر این روش نسبت به روش دیگر مزیت به حساب می‌آید در حالی که ژرفای نفوذ بالاتر روش توموگرافی الکتریکی در تمامی نیمرخ‌ها به روشنی قابل مشاهده است. در مقابل، میزان مقاومت ویژه به راحتی می‌تواند جنس لایه‌های زیرزمینی را تا حدود زیادی مشخص کند به گونه‌ای که در این نوشتار روش توموگرافی الکتریکی به وضوح وجود آبرفت دانه متوسط را به عنوان پوشش زمینه منطقه نمایش می‌دهد در حالی که روش GPR توانایی تعیین جنس لایه‌های زیرسطحی را ندارد.

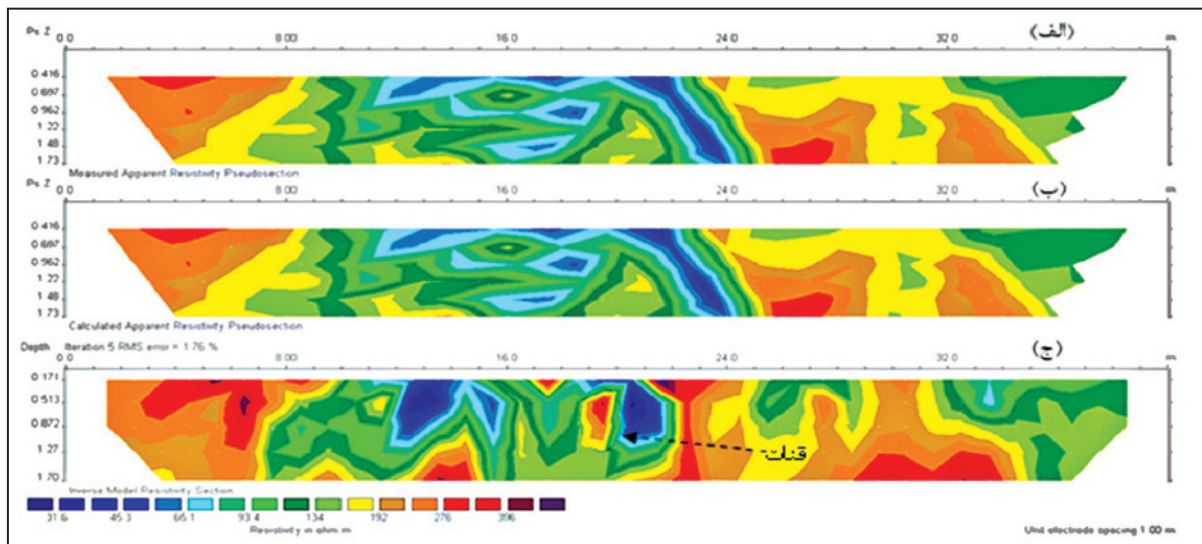
سپاسگزاری

بدین وسیله نگارندگان لازم می‌دانند که از آقایان دکتر دولتی و دکتر قوامی به دلیل همکاری و هماهنگی‌های لازم برای تسهیل مقدمات برداشت صحرائی و آقایان مهندس زارعی و مهندس کبیریان به خاطر همکاری و کمک در برداشت‌های صحرائی، سپاسگزاری کنند.

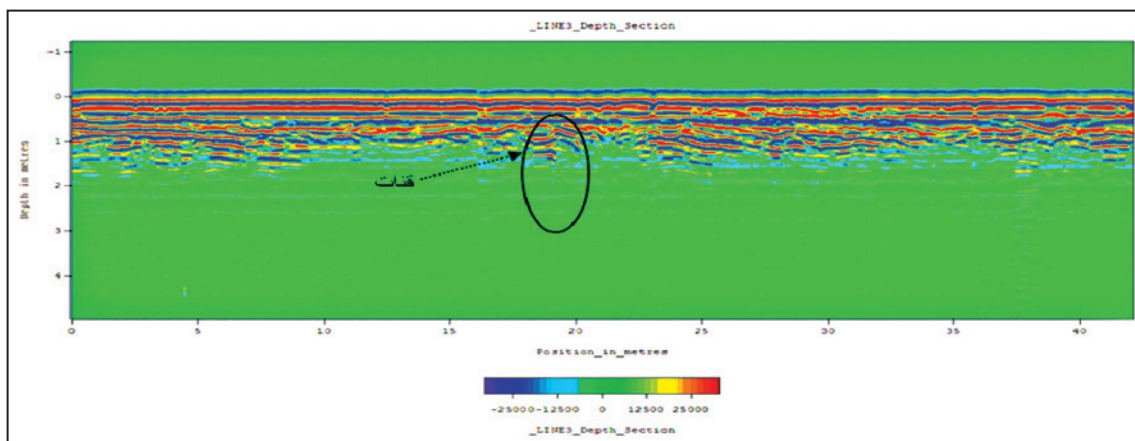
از قنات دیده نشود و در نتیجه روش توموگرافی الکتریکی به منظور شناسایی قنات در این نیمرخ کاملاً موفق‌تر از روش GPR عمل کرده است. در فاصله ۲۸ تا ۳۰ متری نیمرخ، افزایش ژرفای نفوذ به روشنی مشخص شده است. این افزایش ژرفای نفوذ می‌تواند ناشی از پدیده مضاعف شدن امواج (multiple) باشد. این احتمال نیز می‌رود که به دلیل حضور زباله‌های فلزی امواج رینگگی (Ringing) شده باشند. این محل منطبق بر جاده خاکی است در نتیجه به احتمال زیاد افزایش ابعاد رسوبات زیرسطحی در زیر آن به دلیل عبور وسایل نقلیه باعث افزایش ژرفای نفوذ امواج GPR شده باشد.

۵- نتیجه‌گیری

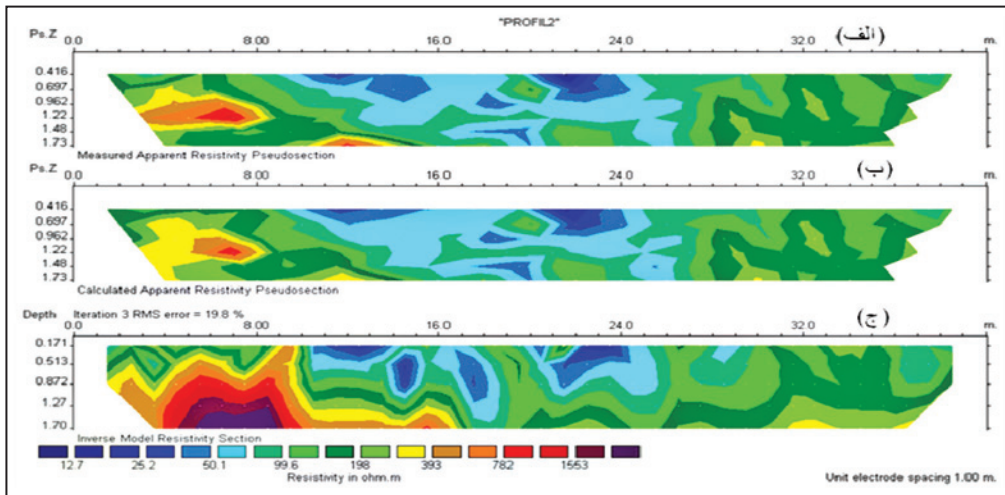
با تلفیق دو روش توموگرافی الکتریکی و GPR می‌توان تفسیری کامل‌تر با اطمینان بیشتری به دست آورد. این دو روش به خوبی پدیده‌هایی مانند وجود حفرات و دانه‌بندی را نشان می‌دهند و در نشان دادن آنها با یکدیگر انطباق خوبی دارند. روش توموگرافی الکتریکی وجود حفرات هوا و افزایش دانه‌بندی را با افزایش مقاومت ویژه مشخص می‌کند. این پدیده‌ها در روش GPR به واسطه افزایش ژرفای نفوذ قابل تشخیص است. همچنین وجود رس و یا نفوذ رطوبت در برخی بخش‌ها نیز سبب کاهش مقاومت ویژه در روش توموگرافی الکتریکی و نیز کاهش ژرفای نفوذ در روش GPR می‌شود. هر دو روش یادشده در بالا به نوعی اثر قنات را نمایش می‌دهند. در برداشت‌های



شکل ۱- شبه‌مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه نیمرخ ۱ با فاصله الکترودی ۱ متر؛ الف) شبه‌مقطع داده‌های دیده شده؛ ب) شبه‌مقطع حاصل از مدل‌سازی؛ ج) مدل معکوس

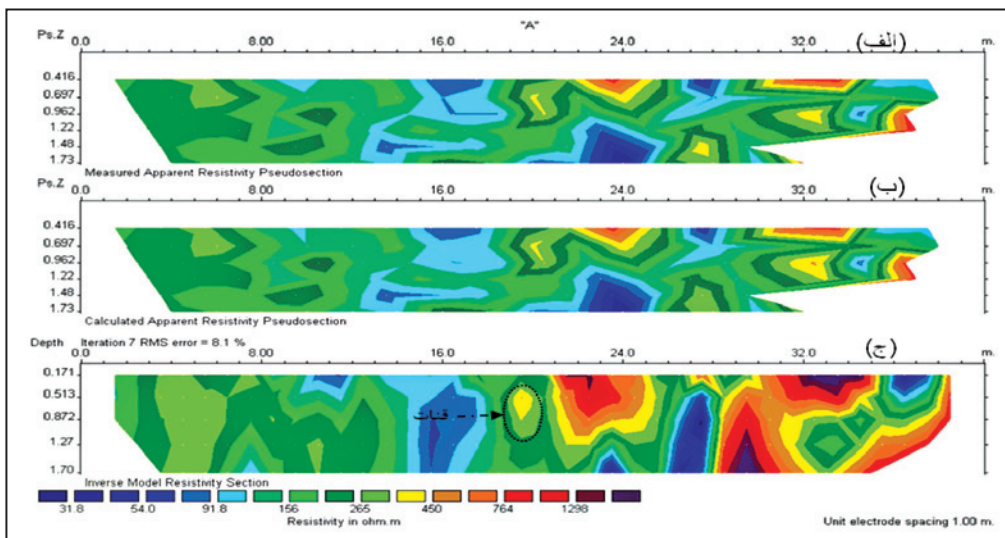
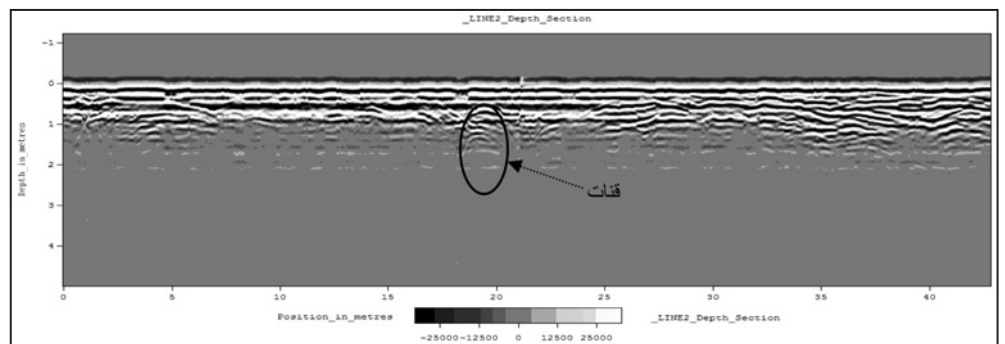


شکل ۲- ژرفای عمقی GPR نیمرخ ۱ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC



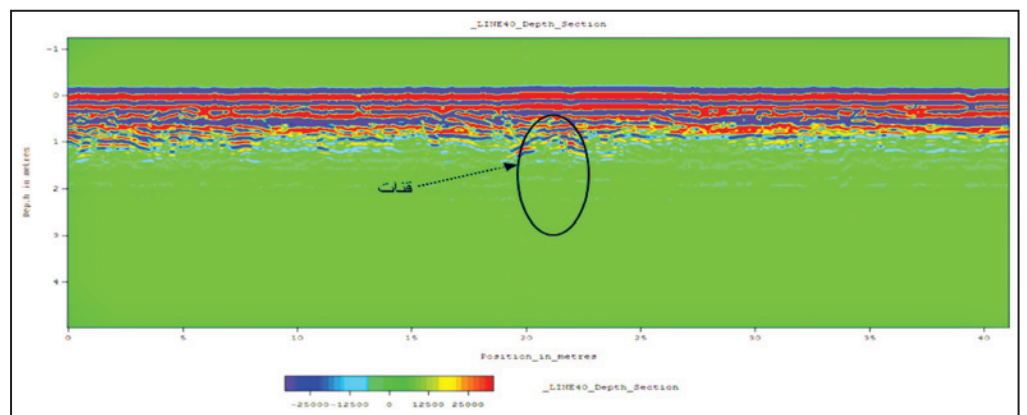
شکل ۳- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه نیمرخ ۲ با فاصله الکترودی ۱ متر؛ الف) شبه مقطع داده های دیده شده؛ ب) شبه مقطع حاصل از مدل سازی؛ ج) مدل معکوس

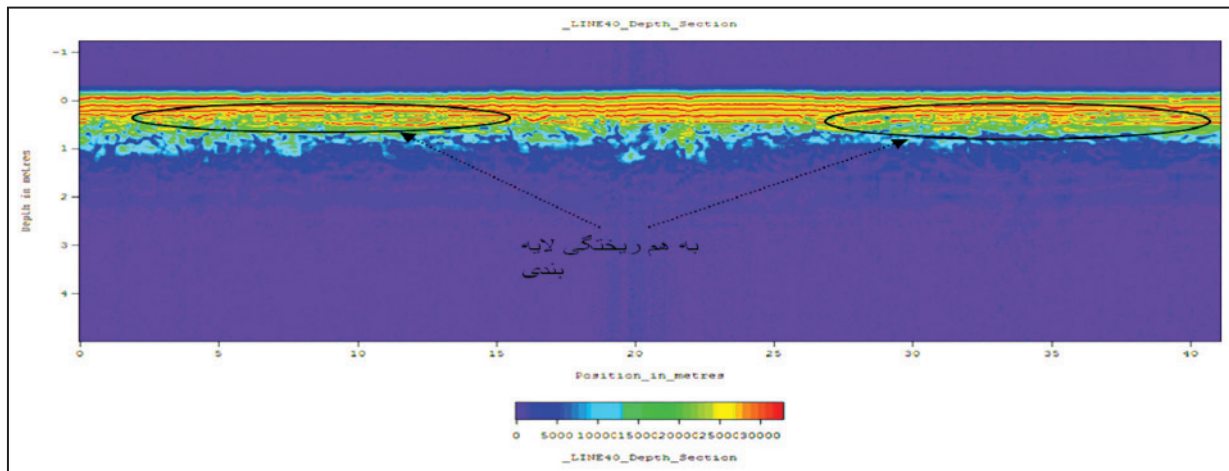
شکل ۴- مقطع عمقی GPR نیمرخ ۲ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC



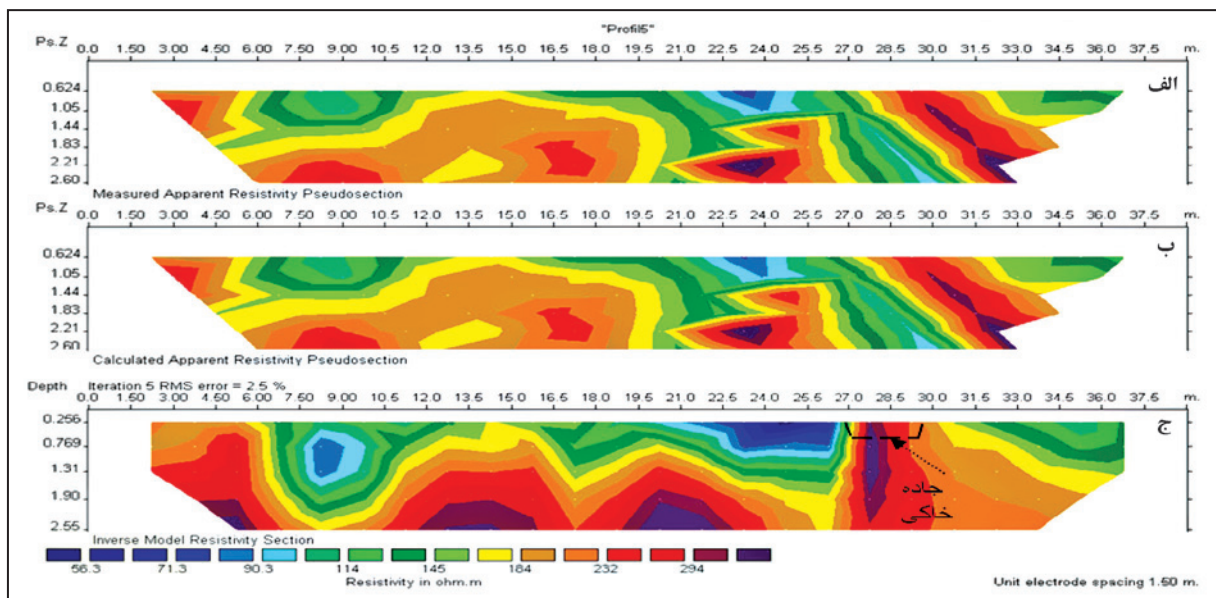
شکل ۵- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه نیمرخ ۳ با فاصله الکترودی ۱ متر؛ الف) شبه مقطع داده های دیده شده؛ ب) شبه مقطع حاصل از مدل سازی؛ ج) مدل معکوس

شکل ۶- مقطع ژرفی GPR نیمرخ ۳ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره ثابت

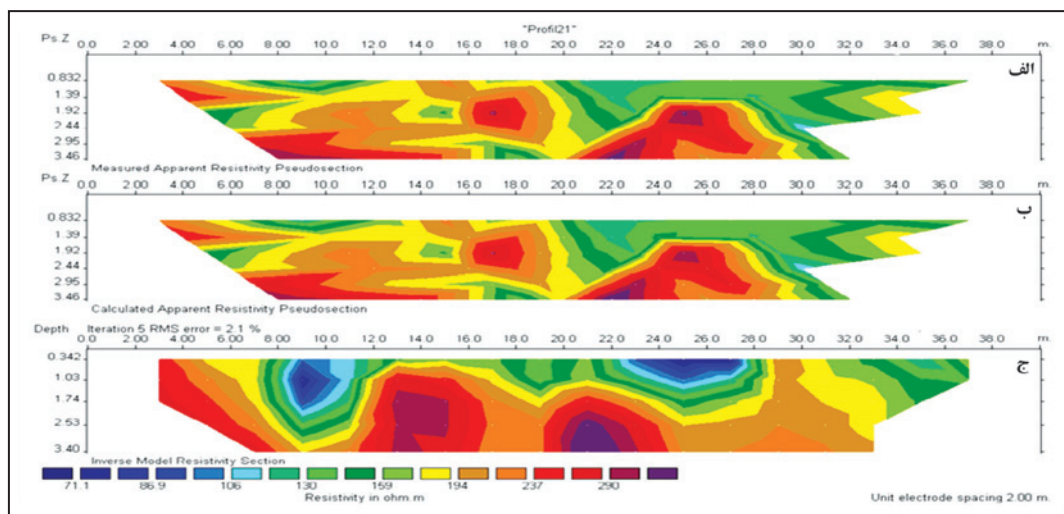




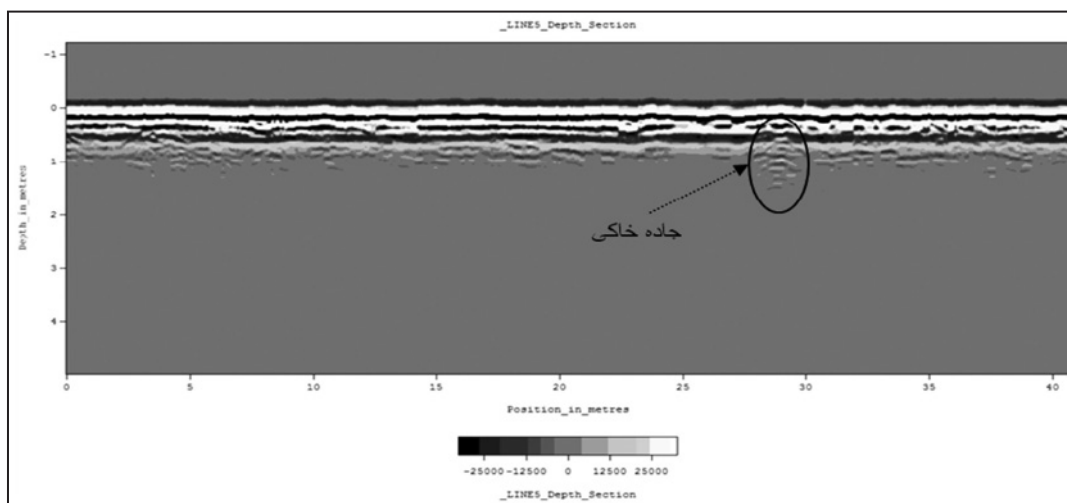
شکل ۷- مقطع عمقی GPR نیمرخ ۳ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک و ویژگی پوش منحنی



شکل ۸- شبهمقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه نیمرخ ۴ با فاصله الکترودی برداشت ۱/۵ متر؛ الف) شبهمقطع داده‌های دیده شده؛ ب) شبهمقطع حاصل از مدل‌سازی؛ ج) مدل معکوس



شکل ۹- شبهمقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه نیمرخ ۴ با فاصله الکترودی برداشت ۲ متر؛ الف) شبهمقطع داده‌های دیده شده؛ ب) شبهمقطع حاصل از مدل‌سازی؛ ج) مدل معکوس



شکل ۱۰- مقطع ژرفی GPR نیمرخ ۴ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک که محل جاده خاکی در آن مشخص شده است.

References

- Annan, A. P., 2001- Ground penetrating radar workshop note: Sensors and software.
- Aranha, P. R. A., Augustin, C. H. R. R. & Sobeira, F. G., 2002- The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics. *J. Appl. Geophys.* 49, 195-210.
- Beauvais, A., Ritz, M., Parisot, J. C., Bantsimba, C. & Dukhan, M., 2003- Combined ERT and GPR method for Investigation two-stepped lateritic weathering systems, *Geoderma* 119, 121-132.
- Beres, M. & Haeni, F. P., 1991- Application of ground penetrating radar methods in hydrogeological studies. *Ground Water*. 29, 375-386.
- Dahlin, T. & Owen, R., 1998- Geophysical investigation of alluvial aquifers in Zimbabwe. *Proceedings of the 4th EEGS Meeting*. Barcelona, 14-17 September 1998, pp. 151-154.
- Davis, J. L. & Annan, A. p., 1989- Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prospect.* 37, 531-551
- Doolittle, J. A. & Collins, M. E., 1998- A comparison of EM induction and GPR method in areas of Karst. *Geoderma* 85, 83-102.
- Freeland, R. S., Yoder, R. E. & Ammons, J. T., 1998- Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. *J. Appl. Geophys.* 40, 19-27.
- Griffiths, D. H. & Barker, R. D., 1993- Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. Appl. Geophys.* 29, 211-226.
- Jol, H. M. & Smith, D. G., 1991- Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Can. J. Earth Sci.* 28, 1939-1947.
- Leucci, G., 2005- Contribution of Ground Penetrating radar and Electrical Resistivity Tomography to identify the cavity and fractures under the main Church in Botrugno (Lecce, Italy), *Journal of Archaeological Science*, 33, 1194-1204.
- Loke, M. H., 2001- Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, *A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys: RES2DINV Manual*, IRIS Instruments, www.iris-instrument.com.
- Loke, M. H., 2004- 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.Geoelectrical.com.
- Maillet, G. M., Rizzo, E., Revil, A. & Vella, C., 2005- High resolution electrical resistivity tomography (ERT) in a transition zone environmental: application for detailed internal architecture and infilling processes study of a Rhone River paleo-channel. *Marine Geophysical Researches*, 26, 317-328.
- Marescot, L., 2009- Electrical Surveying [Part 2], Course given at the University of Fribourg, www.tomoquest.com.
- Neal, A., 2004- Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress: *Earth-science reviews*, 66, 261-330.
- Ortiz, D. G., Velazquez, S. M., Crespo, T. M., Marquez, A., Lillo, J., Lopez, I., Carreno, F., Gonzalez, F. M., Herrera, R. & De Pablo, M. D., 2007- Joint application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging to investigation volcanic materials and structures in Tenerife (Canary Islands, Spain), *Journal of Applied Geophysics*, 62, 287-300.
- Parasnis, D. S., 1997- Principles of applied geophysics, 5th edition: Chapman and Hall.
- Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M. A. & Ushijima, K., 2005- Imaging subsurface cavities using geoelectrical tomography and ground penetrating radar, *Journal of Cave and Karst Studies*, 67, 174-181.
- Sensor and Software, 1999- Win_EKKO User's Guide, Version 1.0.
- Van Dam, R. L. & Schlager, W., 2000- identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses, *sedimentology*, 47, 435-449.
- Van Overmeeren, R. A., 1994- Georadar for hydrogeology. *First Break* 8, 401-408.
- Vaziri, S. H. & Majidifard, M. R., 2001- Geological map of 1:100000 of Shahrood., Geological Survey of Iran.
- Zhou, B. & Greenhalgh, S. A., 2002- Rapid 2D/3D cross hole resistivity imaging using the analytic sensitivity function, *Geophysics*, 67, 755-765.

Comparison and Integration of the Results Obtained from Processing, Modeling and Interpretation of Electrical Tomography and GPR Data for Detection of Subsurface Shallow Targets and Structures

E. Eshaghi ¹, A. Kamkar-Rouhani ² & A. Arab-Amiri ^{3*}

¹ M.Sc., Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

² Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³ Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2011 May 03

Accepted: 2012 May 26

Abstract

Every geophysical method has its own advantages and disadvantages. The integration of the results obtained from surveys using various geophysical methods causes the weaknesses of a particular geophysical method to be covered by the other geophysical methods. For this, different exploratory, engineering, environmental investigations and so on using various geophysical methods usually provide more reliable results. In this research work, it is attempted to integrate the results of electrical resistivity tomography (ERT) and ground-penetrating radar (GPR) surveys in order to examine the advantages and weaknesses of each of the two methods, and finally, to present more accurate and more reliable interpretation as a result of this integration. The ERT method that is, in fact, one of the optimal resistivity survey methods, renders acceptable results in areas with complex geology. The GPR method as a high resolution non-destructive geophysical method, which is based on transmission of electromagnetic waves in the ground and recording the reflected waves from the interfaces of the subsurface layers, is used for shallow subsurface investigations. In this research work, a water qanat was selected as a suitable target for detection by these two geophysical methods, and the, ERT and GPR surveys were carried out in an area enclosing the target. The results obtained from processing, modeling and interpretation of the acquired data indicated that the GPR method, compared to the ERT method, had higher resolution. However, the ERT method, compared to the GPR method, had higher depth of penetration. The results of both methods were mainly in good agreement with each other in depicting features such as subsurface cavities, variation of the grain sizes of the subsurface sediments and water percolation from the qanat to its surroundings. Furthermore, following the integration of the results of these two methods, it was revealed that the accuracy and reliability of the interpretation were considerably enhanced.

Keywords: Electrical resistivity tomography (ERT), Ground penetrating radar (GPR), Subsurface targets, Water qanat, Depth of penetration, Resolution

For Persian Version see pages 3 to 10

*Corresponding author: A. Arab-Amiri; E-mail: alirezaarabamiri@yahoo.com