

مدل سازی دوبعدی و سه بعدی داده های توموگرافی الکتریکی به منظور بررسی قنات ها و ساختارهای زیرسطحی کم عمق

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

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک، دانشگاه صنعتی شاهرود، es_eshaghi@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، kamkarr@yahoo.com

۳- استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، alirezaarabamiri@yahoo.com

(دریافت ۵ دی ۱۳۸۹، پذیرش ۲۶ شهریور ۱۳۹۱)

چکیده

روش توموگرافی الکتریکی یک روش برداشت شبکه بهینه با استفاده از آرایه های مناسب در شناسایی اهداف زیرزمینی است. داده های اکتسابی در برداشت با استفاده از روش های مختلف بهینه سازی مانند روش های گوس- نیوتن، شبه نیوتن مورد مدل سازی و تفسیر قرار می گیرند. در این تحقیق قنات آب به دلیل دارا بودن تباین مقاومت ویژه کافی با محیط پیرامون، به عنوان هدف مناسب جهت بررسی مزایا و معایب روش توموگرافی الکتریکی انتخاب شد. برداشت ها به دو صورت دوبعدی و سپس سه بعدی در یک شبکه منظم برداشت شد. به ترتیب از نرم افزارهای RES2DINV و RES3DINV برای مدل سازی داده های دوبعدی و سه بعدی استفاده شد و در نهایت برای نمایش بهتر نتایج سه بعدی از نرم افزار Voxler استفاده شد. در نتایج، موقعیت قنات در مقاطع دوبعدی و سه بعدی حاصل از مدل سازی، تا حدی مبهم بوده و به وضوح کامل دیده نمی شود اما می توان موقعیت آن را از روی کاهش مقاومت ویژه ناشی از نفوذ رطوبت به اطراف به صورت واضح مشخص کرد. وضعیت دانه بندی نسبی ذرات و وجود رس را نیز می توان به صورت کیفی در مقاطع به دست آمده تخمین زد.

کلمات کلیدی

توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، قنات، مدل سازی دوبعدی و سه بعدی داده های مقاومت ویژه، آرایه الکترودی دوقطبی- دوقطبی

۱- مقدمه

در این تحقیق داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی توسط دستگاه Terrameter SAS1000 ساخت شرکت سوئدی ABEM برداشت شدند. در برداشت داده‌ها سعی شد تا داده‌ها با دقت و کیفیت بالا و میزان خطا یا انحراف معیار کم در هر بار اندازه‌گیری برداشت شوند تا تفسیرهای نهایی دارای اعتبار بالایی باشند.

۲- روش شناسی

روش توموگرافی الکتریکی یک روش به نسبت جدید با برداشت بهینه بوده که به منظور افزایش دقت و نیز بهبود قدرت تفکیک عمقی (قائم) و جانبی (افقی) در شناسایی اهداف زیرزمینی است [۸]. این روش را می‌توان در دو بخش طراحی شبکه و چگونگی برداشت داده‌ها و نیز مدل‌سازی داده‌های برداشت شده مورد بررسی قرار داد [۹].

برداشت‌های مرسوم توموگرافی الکتریکی به دو نوع دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) خلاصه می‌شوند. برداشت‌های دوبعدی به دلیل سازه اقتصادی مناسب بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و برداشت‌های سه بعدی در مراحل تحقیقاتی قرار دارند [۱۰].

مرحله مهم دیگر در این روش مدل‌سازی است که به دو صورت مدل‌سازی مستقیم (پیشرو) و مدل‌سازی معکوس (وارونه) انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا با مدل‌های زمینی دو بعدی با استفاده از روش اجزاء محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد. مدل اولیه در این نوع از مدل‌سازی سلیقه‌ای بوده و بسته به تبحر و تجربه کارشناس ژئوفیزیک بهبود می‌یابد. در روش معکوس‌سازی بر خلاف مدل‌سازی مستقیم با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل زمین تخمین زده می‌شود و روشی پرکاربردتر در بررسی‌های ژئوفیزیکی است. در مدل‌سازی معکوس در ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز است [۱۱]. برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه دو روش معمول کمترین مربعات گوس - نیوتن و روش شبه نیوتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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

$$(J^T J + uF)d = J^T g, \quad (1)$$

در رابطه (۱)، q بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها، g بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و

روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه (ERT) به عنوان یک روش مقاومت ویژه الکتریکی با دقت بالا، کاربرد فراوانی در بخش‌های معدنی، زیست محیطی، عمرانی و ... پیدا کرده است [۱]. قابلیت‌های این روش شامل صرفه جویی زمانی، کاهش هزینه و نیز تفسیر آسان باعث شده تا در طول چندین دهه، این روش همچنان پرکاربرد باقی بماند. از این جمله می‌توان به چندین مورد مطالعات ذیل که همگی در سالهای اخیر انجام گرفته، اشاره کرد. در همین سال Sikiru و همکارانش میزان شوری منابع آب در لایه‌های مختلف زیرسطحی را با کمک این روش مورد بررسی قرار دادند [۲]. در سال ۲۰۰۷ این روش به وسیله Jung-Ho Kim و همکارانش به منظور بررسی زیرساخت‌های سدی و مسائل ایمنی مورد استفاده قرار گرفت [۳]. Aziz Berge و Drahur در سال ۲۰۱۱ با استفاده از این روش به مدل‌سازی چند لایه‌ای به منظور شناسایی مناطق باستانی پرداختند [۴]. این روش در کشورمان ایران بیشتر به منظور اکتشافات آب در منابع کارستی استفاده می‌شود. در سال ۱۳۸۷ "ناصری" و همکارانش با استفاده از این روش به اکتشاف آب‌های زیرسطحی در آهک‌های کارستی منطقه جنوب شرق مسجد سلیمان پرداختند [۵].

توموگرافی الکتریکی سه بعدی نیز کاربردهای فراوانی در آینده نه چندان دور خواهد داشت. به طوری که در چند سال اخیر نیز مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است. این روش در حال طی کردن مختلف همچون یافتن روش‌های جدید مدل‌سازی بهینه است. Plattner و همکارانش در سال ۲۰۱۲ بخشی از یافته‌های خود رابطه با معکوس‌سازی مدل‌های عددی منتشر کردند [۶].

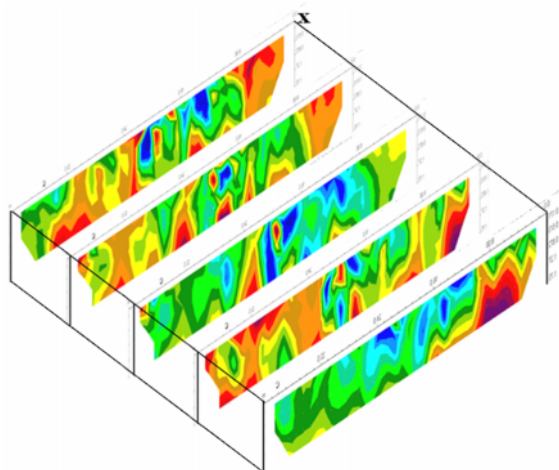
هدف این تحقیق، بررسی روش توموگرافی الکتریکی و مزایا و معایب آن است. بنابراین پیش از هر چیز قنات آب به عنوان هدفی مناسب جهت مطالعه انتخاب شد. قنات به صورت مجموعه‌ای از هوا، آب و پوشش حفره قنات (کول، سنگ چین و یا بلوک سیمان) با مقاومت ویژه بالاتر نسبت به اطراف خود آشکارسازی می‌شود. قنات انتخاب شده در منطقه درخانیاب مجن شهرستان شاهرود در زمین‌های آبرفتی به وجود آمده از فرسایش این ارتفاعات قرار گرفته است. سطح زمین محدوده یا محل قنات مورد مطالعه از رسوبات کواترنری جدید شامل نهشته‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌های جوان پوشیده شده است [۷].

در آن مضرب صحیح n در برداشت‌ها از ۱ تا ۶ افزایش یافته است. دلیل انتخاب آرایه دوقطبی- دوقطبی، در حساسیت بالای این آرایه به تغییرات افقی مقاومت ویژه بوده که باعث شده این آرایه در به نقشه درآوردن ساختارهای قائم مانند دایک‌ها و حفرات نسبت به دیگر آرایه‌ها قوی‌تر باشد [۱۱]. دلیل دیگر این انتخاب پوشش جانبی خوب آرایه دوقطبی- دوقطبی به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی است [۱۲]. پروفیل‌های برداشت شده در حالت دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب به وسیله نرم افزار RES2DINV و RES3DINV مدل‌سازی شده‌اند.

۴- مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها

۴-۱- مدل‌سازی دوبعدی و تفسیر نتایج

مقاطع مدل دوبعدی در یک شکل شبه سه‌بعدی (شکل ۱) نمایش داده شده است. با وجود تفاوت بازه‌ای کم مقاومت ویژه در هر پروفیل با دیگر پروفیل‌ها و یکنواختی کلی محدوده برداشت، می‌توان تفسیری قابل قبول با توجه به این شکل ارائه کرد.



شکل ۱: مقطع حاصل از کنار هم قرار گرفتن مدل‌های دوبعدی (2-D)

در تمامی این پروفیل‌ها مقاومت ویژه زمینه در بازه ۱۵۰ تا ۴۰۰ اهم متر متغیر است که نشان از آبرفتی بودن محدوده دارد. حضور رس و یا رطوبت در بعضی قسمت‌ها باعث کاهش مقاومت ویژه شده است. باید توجه کرد در اطراف قنات به دلیل حضور رسوبات رسی-سیلنتی ناشی از لای رومی متناوب و نفوذ رطوبت در قسمت‌های پایین دست قنات، مقاومت ویژه پایین‌تری مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ذکر شد، سعی شده تا با برداشت داده‌های با دقت بالا کیفیت مدل‌سازی را بالا برد.

محاسباتی، Δq تغییر پارامتری مدل، i ماتریس وجودی، λ عامل میرایی، J ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی و در نهایت J^T ترانپاده ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی است [۱۲]. در روش گوس- نیوتن ماتریس ژاکوبین در هر تکرار باید محاسبه شود. این عمل باعث افزایش میزان محاسبات و زمان‌گیر شدن مدل‌سازی می‌شود [۱۱]. روش‌های شبه نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به روز رسانی اجتناب می‌کنند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین J_0 برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد. مشتقات جزئی می‌تواند بطور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن بعنوان مدل اولیه، محاسبه شوند.

روش شبه نیوتن از معادله به روزرسانی 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 $(i+1)$ امین تکرار، با استفاده از تقریب ماتریس ژاکوبین B_i و بردار انحراف پارامتر است [۱۱].

به‌طور کلی به دلیل عدم محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، روش شبه نیوتن در مقایسه با روش گوس- نیوتن، روشی سریع‌تری است و در معکوس‌سازی بیشتر روش شبه نیوتن استفاده شود [۱۱].

۳- عملیات صحرایی و برداشت داده‌ها

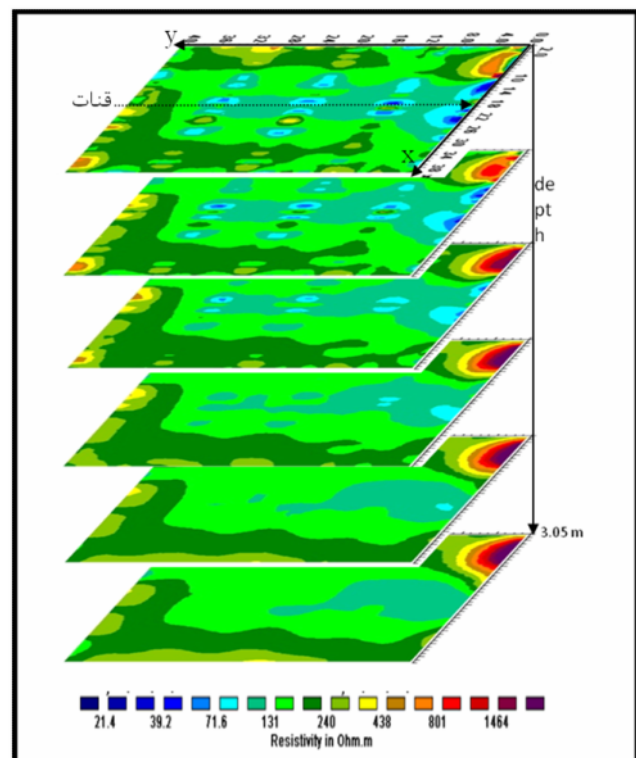
برداشت‌ها با هدف انجام هر دو نوع مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی بر روی یک شبکه بر روی قنات انجام پذیرفت. ابتدا ۵ پروفیل موازی و با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر عمود بر مسیر قنات، به منظور دستیابی به حداکثر پاسخ‌ها، برداشت شد. در تمام این پروفیل‌ها قنات در موقعیت ۱۹ تا ۲۰ متری پروفیل قرار دارد. پس از برداشت پروفیل‌های عمود بر قنات، و به منظور انجام مدل‌سازی سه‌بعدی معتبرتر پروفیل‌های ۶ و ۷ به موازات قنات و عمود بر پروفیل‌های اول به‌گونه‌ای برداشت شد که پروفیل ۶ ابتدای پروفیل‌های عمود بر قنات و پروفیل دیگر انتهای این پروفیل‌ها را قطع کند

تمام برداشت‌های مقاومت ویژه با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی و با فاصله الکترودی ۱ متر انجام گرفت که

در نتیجه مجموع مربعات خطا (RMS error) در این مدل‌ها بین ارقام نسبتاً پایین ۳ تا ۸ درصد تغییر کرده است.

۴-۲- مدل‌سازی سه‌بعدی و تفسیر نتایج

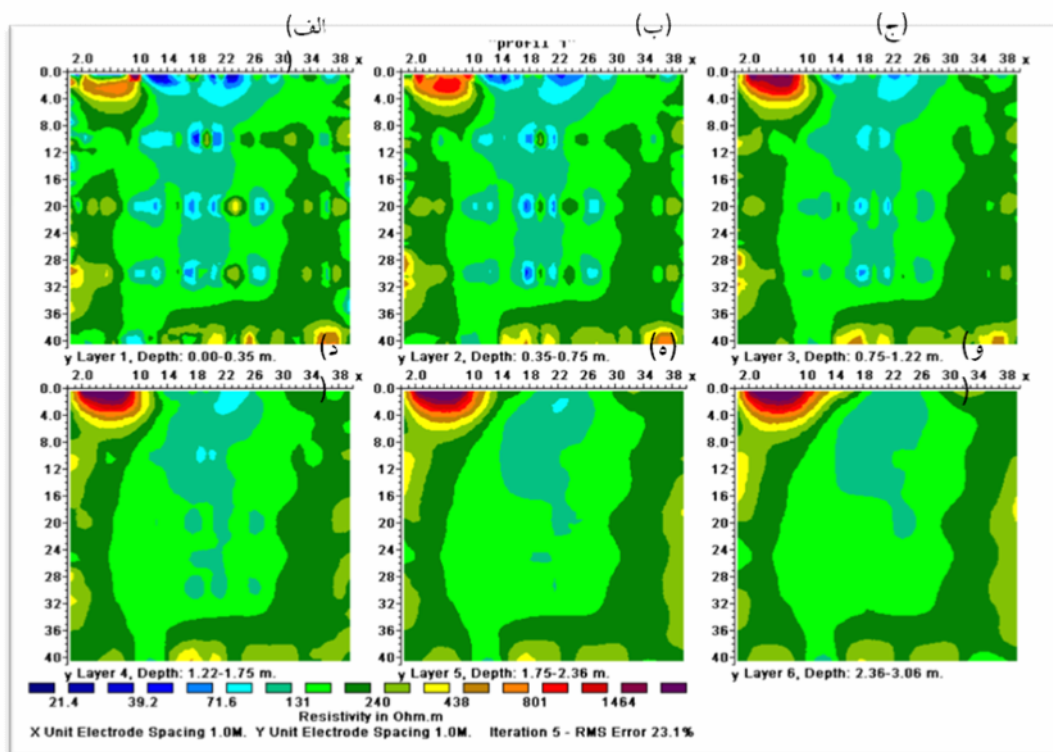
همان‌طور که ذکر شد، پس از برداشت پروفیل‌های ۶ و ۷ مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از نرم افزار RES3DINV انجام گرفت که مقطع حاصل از مدل‌سازی آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. مقطع مدل‌سازی به دست آمده شامل ۷ مقطع عمقی بوده که لایه‌های مختلف آن به ترتیب میانگین مقاومت ویژه در محدوده عمقی ۰/۳۵ - ۰، ۰/۷۵ - ۰/۳۵، ۱/۲۲ - ۱/۷۵، ۲/۳۶ - ۱/۷۵ و در نهایت ۳/۰۶ - ۲/۳۶ متر را نشان می‌دهند.



شکل ۲: نمایش سه‌بعدی مقطع توموگرافی الکتریکی

یکنواختی نسبی مقاومت ویژه تا عمق مورد بررسی که در محدوده ۲۵۰ - ۱۶۰ متر است نشان از پوشش این منطقه به وسیله آبرفت‌های دانه متوسط دارد. مشاهدات صحرایی و تفسیر دوبعدی پروفیل‌های مقاومت ویژه در بخش قبلی این موضوع را تأیید کرده است.

شکل ۳ مقاطع مدل‌سازی را به صورت جداگانه نمایش می‌دهد. در این مقاطع نفوذ آب از قنات به محیط اطراف به وضوح قابل مشاهده است. ابعاد کم قنات، فواصل برداشت زیاد در جهت Y و عدم تباین بالای مقاومت ویژه قنات با محیط اطراف باعث شده تا در این مقاطع قنات با وضوح بالایی مشخص نباشد. در این شکل نفوذ رطوبت در مقاطع با وضوح بیشتری نسبت به قنات مشخص شده است. همچنین می‌توان نفوذ کمتر رطوبت را در عمق‌های بیشتر از ۱،۵ متر در این مقاطع به وضوح مشاهده کرد. با توجه به مقدار مناسب خطای کمترین مربعات (۰/۲۳، ۱) در مدل‌سازی سه‌بعدی، می‌توان تفسیری با اعتبار بالا ارائه کرد.

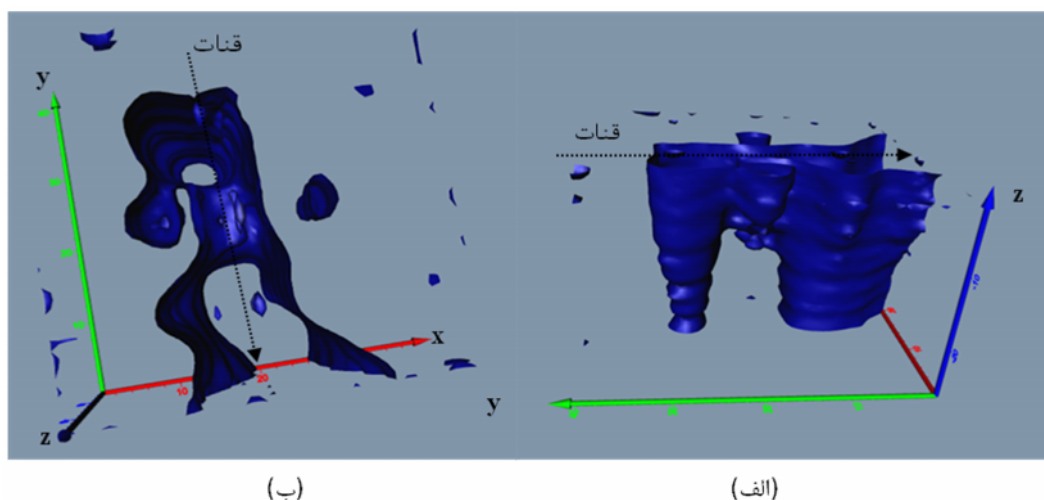


شکل ۳: مقاطع حاصل از مدل سازی سه بعدی مقاومت ویژه در منطقه مورد مطالعه

ویژه آن با مقاومت ویژه زمینه در این محدوده این نرم افزار نیز نتوانست قنات را به خوبی نمایش دهد. اما نفوذ آب قنات به محیط اطراف به خوبی قابل مشاهده است. شکل ۴ نفوذ رطوبت از قنات به اطراف را از دو دید بالا و پهلو نشان می دهد. در وسط قسمتی که نفوذ رطوبت را نمایش می دهد، یک حجم با وضوح و البته پراکندگی فراوان مشاهده می شود. این حجم همان اثر قنات در این شکل است.

افزایش شدید مقاومت ویژه در فاصله ۲ تا ۱۰ متری جهت X و ۰ تا ۵ متری جهت Y می تواند ناشی از وجود سنگ هوازه نشده و یا حفرات هوا باشد.

برای نمایش بهتر قنات در این بررسی از نرم افزار Voxler استفاده شد. برای نمایش جزئی تر، داده های عمقی ۱۰ برابر شد تا بتوان عمق را با وضوح بالاتری مورد بررسی قرار داد. به دلیل کوچک بودن مقطع قنات و عدم تباین بالای مقاومت



شکل ۴: نمایش سه بعدی داده ها (الف) دید از پهلو. (ب) دید از بالا

۵- نتیجه‌گیری

تفسیر داده‌های برداشتی نشان از آبرفتی بودن منطقه دارد. قنات آب بصورت توده‌ای با وضوح کم و مقاومت ویژه بالاتر نسبت به اطراف مشخص شده است. نفوذ رطوبت به اطراف قنات به وضوح قابل تشخیص بوده و تغییر در ابعاد ذرات و یا میزان رطوبت در قالب تغییر مقدار مقاومت ویژه به وسیله این روش قابل شناسایی است.

روش توموگرافی الکتریکی در این تحقیق نشان داده است که توانایی کافی برای شناسایی با وضوح بالای اهداف با ابعاد کم (قنات) را ندارد و بهتر است از روش‌های دیگر ژئوفیزیکی مانند روش GPR برای این منظور استفاده کرد. با این وجود این روش اثرات پیرامون هدف (نفوذ رطوبت) را به خوبی نمایش داده است. برای اطمینان از وجود حفرات نشان داده شده با این روش نیز روش‌های مکمل ژئوفیزیکی دیگر مانند روش Microgravimetry می‌تواند اعتماد تفسیر را بالا ببرد. این روش در شناخت نوع مواد زیرسطحی روشی توانمند است به‌طوری که در این تحقیق با داشتن اطلاعات مختصر زمین شناسی و بررسی بازه مقاومت ویژه به راحتی نوع رسوبات و تغییرات ابعاد ذرات و رطوبت را تشخیص داده شده است.

همچنین مشاهده شده که برداشت‌های با دقت بالا می‌تواند منتج به مدل‌سازی‌های بهینه با قابلیت اتکای قابل قبول شود. میزان خطای پایین مدل‌ها فاکتوری مهم در تفسیر مطمئن است.

در نهایت مدل‌سازی سه بعدی با کیفیت مناسب توانسته شمایی کامل‌تر و با درون‌یابی مناسب از لایه‌بندی و وضعیت زیرسطحی هدف در اختیار قرار دهد تا بتوان با تکیه بر مدل آن، نتایج را به فواصل بین بلوک‌ها نیز تعمیم داد.

۶- تقدیر و تشکر

بدین وسیله نگارندگان لازم می‌دانند که از کلیه دوستان و همکارانی که در تسهیل و انجام برداشت‌های صحرائی، همکاری داشته‌اند، به ویژه آقایان مهندس زارعی و مهندس کبیریان، قدردانی و تشکر کنند.

منابع

- [1] Chamber, J. E., Kuras, O., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., Hollands, J., 2006., Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site: case history. *Geophysics*, 71., 231-239
- [2] Tsourlos, P., Kim, J. H., Vargemezis, G., Yi, M. J., 2008., *ERT Monitoring of Recycled Water Injection in a Confined Aquifer.*, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems., vol 21, pp 1132-1137
- [3] Kim, J. H., Myeong, Y., Yoonho, S. J., Seog, K. S., 2007., *Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam.*, Journal of Environmental and Engineering Geophysics., Vol 12., pp 221-235
- [4] Aziz Berge, M., Göktuğ Drahor, M., 2011., *Electrical Resistivity Tomography Investigations of multilayered archaeological Settlements: Part 1 - modelling.*, *Archaeological Prospection.*, 18., 159-171
- [5] A. Plattner, A., Maurer, H. R., Vorloeper, J., Blome, M., 2012., 3-D electrical resistivity tomography using adaptive wavelet parameter grids., *Geophysical Journal International.*, 189, 317-33
- [6] Chambers, J.E., Kuras, O., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., Hollands, J., 2006, *Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site*, *Geophysics*, 71, B231-B239.
- [7] Zhou, B., Greenhalgh, S.A., 2002, *Rapid 2-D/3-D crosshole resistivity imaging using the analytic sensitivity function*, *Geophysics*, 67, 755-765.
- [8] Loke, M.H., 2004, *2-D and 3-D electrical imaging surveys*. www.Geoelectrical.com
- [9] Loke M.H., Barker, R.D., 1996. *Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method*, *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- [10] 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
- [11] Loke, M.H., 2004, *2-D and 3-D electrical imaging surveys*. www.Geoelectrical.com
- [12] Marescot, L., 2009, *Electrical surveying: Part2, Course given at the University of Fribourg*