

Research Article

Application of joint inversion of electrical resistivity data to determine the geometric distribution of municipal sewage leaks

Ahmad Neyamadpour^{1*}

1- Department of Geophysics, Masjed- Soleiman Branch, Islamic Azad University, Masjed- Soleiman, Iran

Keywords: Wenner, Dipole-dipole, Electrode array, Joint inversion, Electrical resistivity.

1-Introduction

The results of a two-dimensional electrical resistivity tomography to determine the possible urban sewage leaks beneath building foundations in the city of Masjid Sulaiman, Khuzestan province, Iran, are presented in this paper.

2-Material and methods

Two-dimensional electrical resistivity topography to investigate and compare the efficiency of two electrode arrays of Wenner and dipole-dipole, as well as the effect of joint inversion of data obtained from these two arrays using CMO (Combined Marquardt and Occam) and RC (Robust Constraint) inversion algorithms was studied. Several published sources have reviewed mathematical relationships related to these algorithms (Loke and Barker, 1996; Tomas, 2004). Also, three boreholes up to a depth of 7 meters were drilled in the location of the data collection profile to interpret the results of the two-dimensional electrical resistivity tomography with appropriate and reliable accuracy.

3-Results and discussions

This work demonstrated that the joint inversion of data recorded by Wenner and dipole-dipole arrays offers a subsurface electrical resistivity model that is more accurate than the individual inversion of data obtained from each electrode array separately. The combination of the results obtained from digging three boreholes (BH1, BH2, and BH3) and the joint inversion of data gathered by Wenner and dipole-dipole arrays demonstrates the existence and extent of the geometric spread of sewage leaks under the studied building in Masjid Suleiman.

4-Conclusion

The results presented in this study show the superiority of the model provided by the CMO algorithm compared to the RC algorithm in the study area for separate and joint inversion of data measured by Wenner and dipole-dipole arrays to identify the possible location of urban sewage leaks beneath building foundations.

5-References

- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44 131-152. <https://doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Thomas, G., 2004. Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of resistivity Structures from DC Measurements. Ph.D thesis, University of Freiberg.

* Corresponding author: a.npou@yahoo.com

DOI: 10.22055/AAG.2023.44627.2402

Received: 2023-08-24

Accepted: 2023-12-29

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Neyamadpour. A., 2024. Application of joint inversion of electrical resistivity data to determine the geometric distribution of municipal sewage leaks. Adv. Appl. Geol. 13(4), 1105-117.

DOI: 10.22055/AAG.2023.44627.2402

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_18891.html

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

کاربرد روش برگردان ترکیبی داده‌های مقاومت الکتریکی به منظور تعیین گسترش هندسی نشت فاضلاب‌های شهری (مطالعه موردی شهرستان مسجد سلیمان)

احمد نیامدپور

گروه ژئوفیزیک، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی، مسجد سلیمان، ایران

a.npou@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۸

چکیده

جهت تشخیص احتمال نفوذ فاضلاب‌های شهری به پی ساختمان‌ها، دو آرایه الکترودی ونر و دوقطبی - دوقطبی در عملیات توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در شهر مسجد سلیمان، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از دو الگوریتم Robust Constraint و Combined Marquardt and Occam داده‌های اندازه گیری شده ظاهری به صورت مجزا و همچنین ترکیبی به مقادیر مقاومت الکتریکی حقیقی برگردانده شدند. جهت تفسیر دقیق نتایج، سه گمانه در امتداد پروفیل مقاومت الکتریکی ویژه حفر گردید. الگوریتم Combined Marquardt and Occam نسبت به Robust Constraint برای ارائه مدل مقاومت الکتریکی ویژه زیر سطحی نتایج مناسب تری را ارائه داد. همچنین مدل مقاومت الکتریکی ویژه ناشی از برگردان ترکیبی داده‌های دو آرایه ونر و دوقطبی - دوقطبی نسبت به برگردان مجزای داده‌های مربوط به هر آرایه سازگاری بیشتری با واقعیت دارد. نتایج این پژوهش کارایی برگردان ترکیبی در شناسایی گسترش هندسی نشت فاضلاب‌ها در شهر مسجد سلیمان را تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: ونر، دوقطبی - دوقطبی، آرایه الکترودی، وارون سازی ترکیبی، مقاومت الکتریکی ویژه

۱- مقدمه

توموگرافی دو بعدی مقاومت ویژه الکتریکی یک روش اکتشافی ژئوفیزیکی بسیار محبوب است زیرا دارای اصول فیزیکی ساده ای بوده و جمع آوری داده‌های صحرائی در این تکنیک بسیار آسان می‌باشد. اندازه گیری‌های مرسوم مقاومت ویژه الکتریکی توسط یک آرایه الکترودی معین بر روی سطح زمین انجام می‌گیرند و نتیجه آن تهیه منحنی‌های سونداژ الکتریکی ویا شبه مقطع‌های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برای نمایش تغییرات افقی و قائم مقاومت الکتریکی مواد زیر سطحی می‌باشد. این تکنیک بطور گسترده ای در تحقیقات مربوط به آب‌های زیر زمینی، مهندسی عمران و همچنین در مطالعات زیست محیطی کاربرد دارد (Gmail et al., 2004; Chambers et al., 2006). در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل ملاحظه در سیستم‌های برداشت خودکار داده‌ها و نرم افزارهای برگردان دوبعدی و سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی باعث شده است تا توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به عنوان یک تکنیک اکتشافی ژئوفیزیکی کارآمد مورد توجه ویژه قرار گیرد (Dahlin and Zhou, 2004). محققان بسیاری نشان داده اند که تهیه

یک مقطع مقاومت ویژه الکتریکی دقیق از ساختارهای زیر سطحی با استفاده از تعداد زیادی از داده‌های اندازه گیری شده مقاومت الکتریکی مواد زیر سطح زمین امکان پذیر می‌باشد (Daily and Owen, 1991; Park and Van, 1991; Shima, 1992; Li and Oldenberg, 1992; Sasaki, 1994; Loke and Barker, 1995, 1996; Labrecque et al., 1996).

مزیت اصلی توموگرافی مقاومت الکتریکی نسبت به سایر روش‌های ژئوالکتریکی، بررسی همزمان تغییرات جانبی و قائم مقاومت الکتریکی، قدرت تفکیک زیاد، قابلیت برداشت سریع داده‌ها و هزینه اندک می‌باشد. (به عنوان مثال: Loke, 2016; Dahlin, 2001; Pavel and Yulia, 2022; Adrian et al., 2023). در این روش جریان الکتریکی (I) توسط دو الکتروود فلزی (C1 و C2) در سطح زمین مورد مطالعه تزریق می‌شود و اختلاف پتانسیل الکتریکی (Δv) ایجاد شده در سطح زمین توسط دو الکتروود فلزی دیگر (P1 و P2) اندازه گیری می‌شود (شکل ۱). در مطالعات صحرائی با افزایش فاصله الکتروودها جریان الکتریکی، عمق کاوش نیز افزایش می‌یابد. با انتخاب

شده مقایسه می‌کند؛ (i) قدرت سیگنال، (ii) پوشش افقی داده-ها، (iii) حساسیت آرایه نسبت به ساختارهای افقی، (iv) حساسیت آرایه نسبت به ساختارهای قائم و (v) عمق کاوش (Hesse et al., 1989; Griffiths and Barker, 1993; Loke, 2014; Abdullah et al., 2019; Rani and Cassiani, 2022; Martorana et al., 2023).

قدرت سیگنال بطور معکوس با فاکتور هندسی K متناسب است. هنگامیکه کاوشی در مناطق با نوفه زمینه زیاد انجام می‌گردد، قدرت سیگنال یک فاکتور بسیار مهم است که بایستی مورد توجه قرار بگیرد. پیکربندی الکترودی تأثیر بسیار شدیدی روی پوشش افقی داده‌ها، وضوح، حساسیت و عمق کاوش دارد (Seaton and Burbey, 2002; Costanzo et al., 2021). در بعضی موقعیت‌ها استفاده از چندین آرایه مختلف به تفسیر بهتر داده‌ها کمک نموده و ساختارهای زیر زمینی را با جزئیات بیشتری نمایش می‌دهد (Hesse et al., 1989).

۱-۱- آرایه ونر

آرایه ونر یک نوع پیکربندی الکترودی خاص است که مطالعات انجام شده توسط محققان دانشگاه بیرمنگام معرفی شده است (Griffiths and Turnbull, 1985; Griffiths et al., 1990). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، آرایه ونر دارای فاصله ثابتی بین الکترودها می‌باشد. این آرایه در نشان دادن تغییرات قائم خوب اما در نمایش تغییرات افقی نسبتاً ضعیف است (Loke, 2014). برای آرایه ونر سه نوع پیکربندی وجود دارد (Carpenter and Habberjam, 1956).

مقادیر مختلف برای فاصله الکترودهای جریان و پتانسیل می‌توان مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری تعداد زیادی از نقاط زیر سطحی را با استفاده از رابطه زیر تعیین نمود:

رابطه ۱

$$\rho = K \times \frac{\Delta v}{I}$$

در این رابطه K به نحوه قرار گرفتن الکترودها و فاصله آن‌ها از همدیگر وابسته است و به آن فاکتور هندسی گفته می‌شود. مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده توسط رابطه ۱ بر این فرض استوار است که مواد تشکیل دهند زیر سطحی همگن می‌باشند. با توجه به نا همگن بوده مواد زیر سطحی در طبیعت، داده‌های مقاومت الکتریکی ظاهری باید توسط عملیات وارون سازی وبا استفاده از نرم افزارهای مختلف نظیر RES2DINV یا RES3DINV به مقاومت الکتریکی حقیقی برگردانده شوند. آرایش‌های الکترودی که معمولاً برای کاوش‌های مقاومت ویژه الکتریکی ویژه بکار برده می‌شوند، دارای مزیت‌ها و محدودیت‌های ویژه ای هستند. سهولت استفاده در کارهای صحرائی و قدرت تفکیک یا وضوح داده‌ها برای نا همسانگردی- های زیر سطحی نقش اساسی در انتخاب نوع آرایه مناسب برای یک کاوش بخصوص بازی می‌کنند. آرایه‌هایی که در عمل برای کاوش‌های تصویرسازی دو - بعدی کاربرد بیشتری دارند عبارتند از؛ ونر (W)، دوقطبی - دوقطبی (DD)، ونر - شلمبرژه (WS)، قطبی - قطبی (PP) و قطبی - دو قطبی (PD) (Dahlin, 1996; Chambers et al., 1999; Zhou and Dahlin, 2003; Dahlin and Zhou 2004; Guinea, 2022). جدول ۱ مشخصه‌های زیر را برای آرایه‌های نام برده

جدول ۱- اعداد درون جدول که از ۱ تا ۴ طبقه بندی شده‌اند بیان کننده حساسیت ضعیف تا حساسیت زیاد برای آرایه‌های مختلف هستند.

Table 1. Numbers ranging from 1 to 4, represent low sensitivity to high sensitivity for different electrode configurations.

Array Type	Signal Strength	Horizontal Data Coverage	Array sensitivity to horizontal	Array sensitivity to vertical structures	Depth of Exploration
W	4	1	4	1	1
WS	3	2	2	2	2
DD	1	3	1	4	3
PD	2	3	2	1	3
PP	4	4	2	2	4

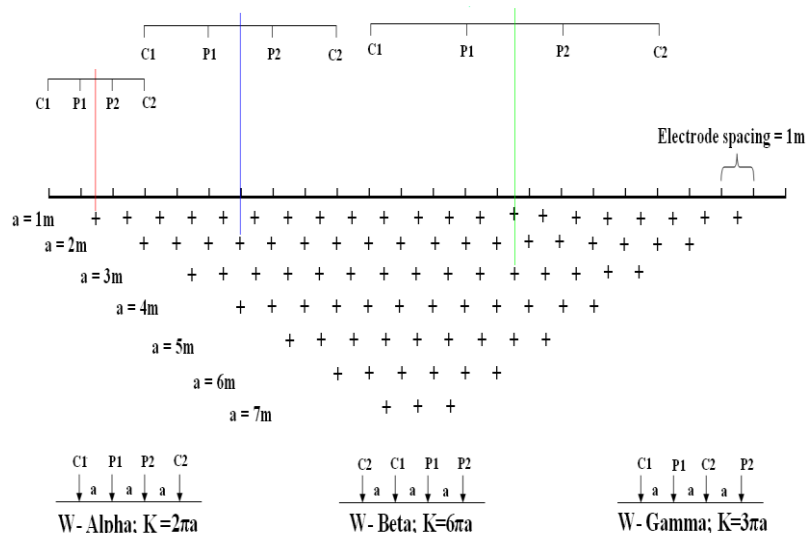
جریان الکتریکی C1-C2 و همچنین جفت الکترودهای پتانسیل الکتریکی P1-P2 با پارامتر "a" نشان داده شده است. آرایه دوقطبی - دو قطبی دارای یک فاکتور دیگر نیز می باشد که با "n" نشان داده می شود (شکل ۲). این فاکتور نسبت فاصله بین الکترودهای C1 و P1 به طول دوقطبی C1-C2 یا P1-P2 یعنی "a" می باشد. در کاوش هایی که از آرایه دوقطبی - دوقطبی استفاده می شود، ابتدا فاصله "a" در کمترین مقدار خود ثابت نگه داشته می شود تا اینکه فاکتور "n" از ۱ تا ۶ افزایش یابد و عمق قابل بررسی را زیادتر نماید. این آرایه در نمایش ساختارهای قائم مانند دایکها بسیار خوب عمل می کند اما برای نمایش ساختارهای افقی مثل لایه های رسوبی نسبتاً ضعیف است (Loke, 2014).

میان عمق کاوش توسط آرایه دوقطبی - دوقطبی به هر دو پارامتر "a" و "n" بستگی دارد. این آرایه عموماً دارای عمق کاوش کمتری نسبت به آرایه ونر می باشد. شبه مقطع الگوی داده ها برای آرایه دوقطبی - دوقطبی با ۲۴ الکترود در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل دو عدد نشان داده شده در سمت چپ هر تراز داده ها بترتیب معرف مقادیر "n" و "a" می باشند. فاکتور هندسی برای این آرایه نیز در بالای شکل نشان داده شده است.

آرایه ونر معمولی، ونر - آلفا نام دارد (شکل ۱). در مقایسه با آرایه های دیگر آرایه ونر - آلفا دارای عمق کاوش متوسط می باشد. فاکتور هندسی این آرایه از آرایه های دیگر کوچکتر است. بنابراین این آرایه بیشترین قدرت سیگنال را داراست. اگر کاوش در مناطق با نوفه زیاد انجام شود این موضوع فاکتور بسیار مهمی خواهد بود. پوشش افقی داده های این آرایه در مواقعی که فاصله الکترودی افزایش می یابد نسبتاً ضعیف می باشد (Loke, 2014). این موضوع یکی از معایب این آرایه می باشد. دو نوع دیگر آرایه ونر، ونر - گاما و ونر - بتا هستند (شکل ۱). آرایه ونر - گاما دارای یک پیکربندی الکترودی غیر معمول بوده بطوریکه الکترودهای جریان و پتانسیل الکتریکی بصورت یک درمیان قرار می گیرند. آرایه ونر - بتا نوع خاصی از آرایه دوقطبی - دوقطبی می باشد که فواصل بین الکترودی آن یکسان می باشد.

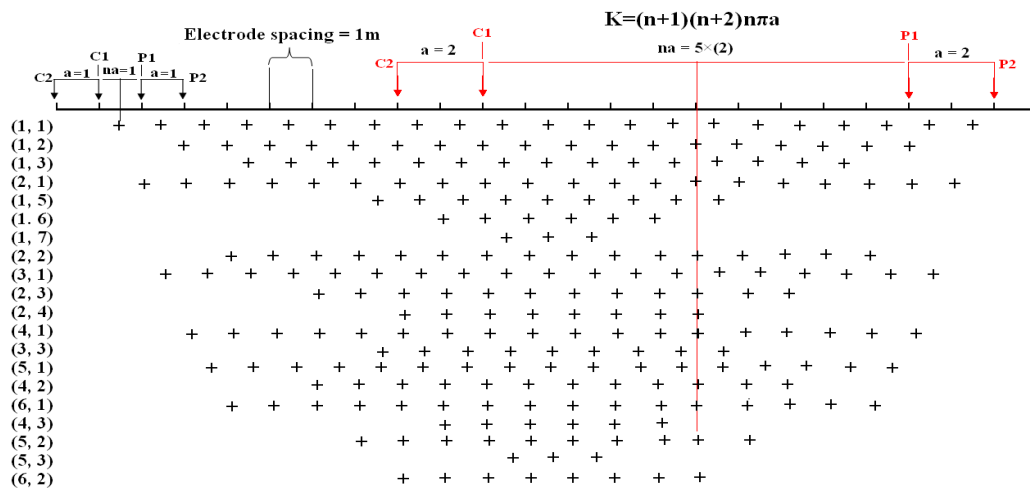
۱-۲- آرایه دوقطبی - دو قطبی

آرایه دوقطبی - دوقطبی بطور گسترده ای در کاوش های مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد زیرا نسبت به جفت شدگی های الکترومغناطیسی اثرات جریان و پتانسیل الکتریکی حساسیت کمتری دارد. آرایش الکترودها در این آرایه در شکل ۲ نشان داده شده است. فاصله بین جفت الکترودهای



شکل ۱- شبه مقطع الگوی داده ها برای آرایه ونر با ۲۴ الکترود. سه نوع آرایه ونر با فاکتورهای هندسی مربوط به آن ها نیز در زیر این شبه مقطع نشان داده شده است.

Fig.1. Schematic representation of a Wenner electrode array using 24 electrodes. Three Wenner configuration types has been shown at the bottom of this figure



شکل ۲- شبه مقطع الگوی داده‌ها برای آرایه دو قطبی - دو قطبی با ۲۴ الکترود؛ در این شکل دو عدد نشان داده شده در سمت چپ هر تراز داده‌ها به ترتیب معرف مقادیر "n" و "a" می‌باشند.

Fig. 2. Schematic representation of a Dipole-Dipole electrode array using 24 electrodes. Numbers in the left side of each data point level represent 'n' and 'a' values.

در آرایه دو قطبی - دو قطبی پوشش افقی داده‌ها نسبت به آرایه ونر بهتر می‌باشد (شکل ۲). این موضوع یکی از مزیت‌های این آرایه است مخصوصاً وقتی که تعداد الکترودهای در دسترس محدود و کم می‌باشد. قدرت سیگنال بسیار کم برای مقادیر بزرگ "n" یکی از معایب آرایه دو قطبی - دو قطبی می‌باشد. همگام استفاده از این آرایه باید اتصال خوبی بین الکترودها و زمین وجود داشته باشد.

آرایه ونر - شلمبرژه یک ترکیب جدید از دو آرایه ونر و شلمبرژه می‌باشد (Pazdirek and Blaha, 1996). قدرت سیگنال برای این آرایه ضعیف تر از آرایه ونر و قوی تر از آرایه دو قطبی - دو قطبی می‌باشد (Loke, 2014). استفاده از آرایه قطبی - قطبی به اندازه آرایه‌های ونر و دو قطبی - دو قطبی نیست. یکی از عیب‌های این آرایه فاصله بسیار زیاد بین جفت الکترودهای پتانسیل می‌باشد. این موضوع می‌تواند نوفه‌های تلوریک بزرگی را بوجود آورد. نوفه‌های تلوریک می‌توانند داده‌های اندازه گیری شده را تخریب نمایند. اگرچه آرایه قطبی - قطبی دارای گسترده ترین پوشش افقی و عمیقترین عمق کاوش را داراست، این آرایه دارای ضعیفترین وضوح داده‌ها در مقایسه با آرایه‌های دیگر می‌باشد. آرایه قطبی - دو قطبی دارای یک الکترود جریان حذفی می‌باشد که باید بطور کافی در فاصله دور از خط کاوش قرار گرفته باشد. تاثیرات منفی الکترود حذفی روی این آرایه کمتر از آرایه قطبی - قطبی می‌باشد (Loke,

2014). آرایه قطبی - دو قطبی یک آرایه نامتقارن است و در بعضی مواقع، نامتقارنی در مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری می‌تواند مدل محاسبه شده ای که پس از مراحل برگردانی داده‌ها بدست می‌آید را تحت تاثیر منفی قرار می‌دهد. آرایه قطبی - دو قطبی همانند آرایه دو قطبی - دو قطبی نسبت به ساختارهای قائم حساسیت زیادی دارد. این آرایه بخاطر پوشش افقی خوب داده‌هایش، برای کاوش‌هایی که تعداد الکترودهای کمی دارد بسیار مفید می‌باشد. قدرت سیگنال این آرایه بیشتر از آرایه دو قطبی - دو قطبی بوده اما نسبت به آرایه ونر کمتر است (Loke, 2014). باتوجه به مطالب ذکر شده دو آرایه ونر و دو قطبی - دو قطبی جهت برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در عملیات صحرائی انتخاب شدند.

از جمله مهمترین آلودگی زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های مختلف انسان، می‌توان به فعالیت‌های صنعتی، شیمیایی، دفن زباله‌ها، شهری، دفع پسماندها یا مواد زائد و راه یافتن آن‌ها به فاضلاب‌ها، نشت خطوط انتقال نفت به خاک و آب‌های زیرزمینی اشاره کرد. روش ژئوالکتریک مناسبترین روش ژئوفیزیکی برای بررسی آلودگی‌های زیرزمینی است. مناطق آلوده زیرزمینی عمدتاً دارای خصوصیات الکتریکی متفاوت از لایه‌های دربرگیرنده خود می‌باشند و در نتیجه در اغلب موارد با کاربرد روش‌های ژئوالکتریک به خوبی می‌توان گسترش آلودگی زیرزمینی را مشخص نمود.

این مطالعه نتایج یک عملیات توموگرافی دو بعدی مقاومت ویژه الکتریکی جهت بررسی و مقایسه کارایی دو آرایه الکترونی و نر و دوقطبی - دوقطبی و همچنین اثر برگردان ترکیبی داده-های بدست آمده از این دو آرایه با استفاده از الگوریتم‌های برگردان داده‌های CMO (Combined Marquardt and) جهت شناسایی نشت احتمالی فاضلاب‌ها در شهر مسجد سلیمان واقع در استان خوزستان را ارائه می‌دهد (شکل ۲). همچنین تعداد سه گمانه تا عمق ۷ متر در محل پروفیل برداشت داده‌ها حفر گردید تا تفسیر نتایج توموگرافی دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی با دقت مناسب و اطمینان بیشتری صورت گیرد.

این مطالعه نتایج یک عملیات توموگرافی دو بعدی مقاومت ویژه الکتریکی جهت بررسی و مقایسه کارایی دو آرایه الکترونی و نر و دوقطبی - دوقطبی و همچنین اثر برگردان ترکیبی داده-های بدست آمده از این دو آرایه با استفاده از الگوریتم‌های برگردان داده‌های CMO (Combined Marquardt and) جهت شناسایی نشت احتمالی فاضلاب‌ها در شهر مسجد سلیمان واقع در استان خوزستان را ارائه می‌دهد (شکل ۲). همچنین تعداد سه گمانه تا عمق ۷ متر در محل پروفیل برداشت داده‌ها حفر گردید تا تفسیر نتایج توموگرافی دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی با دقت مناسب و اطمینان بیشتری صورت گیرد.

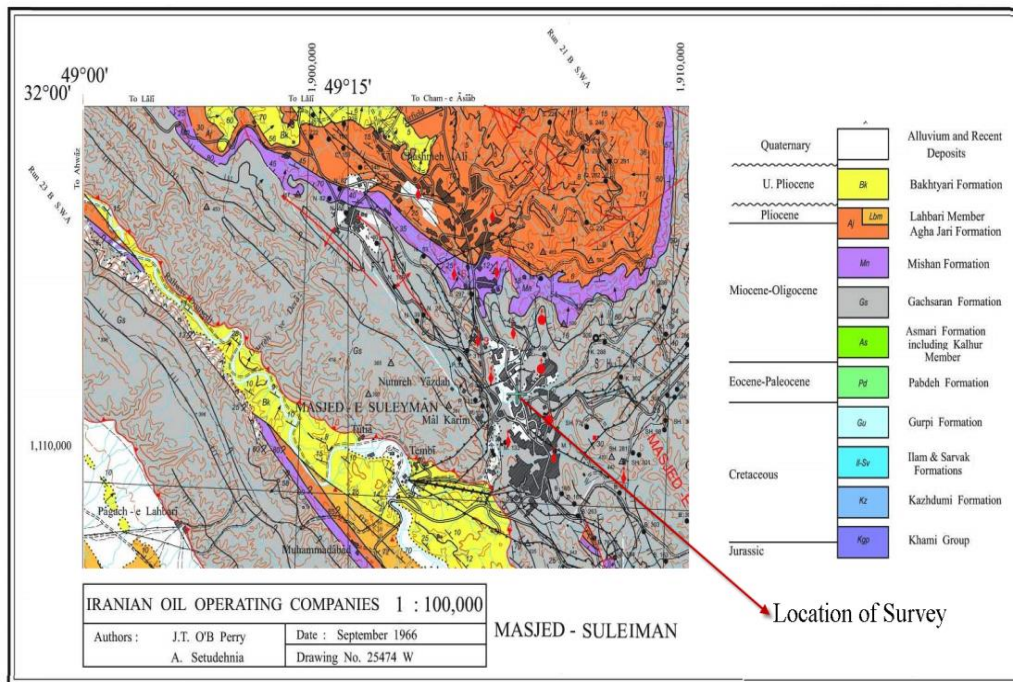


شکل ۳- موقعیت جغرافیایی محل مورد مطالعه در شهرستان مسجدسلیمان در استان خوزستان
Fig. 3. Geographical location of the study area in Masjed-Soleiman city, Khuzestan province

در این منطقه در عمق حدودا ۲۰ متر می‌باشد. برای تفسیر بهتر و بررسی نتایج مطالعات توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی سه عدد گمانه در فواصل ۲۵، ۲۹ و ۳۴ متری از ابتدای پروفیل تا عمق ۷ متر حفر گردید. این گمانه‌ها توسط دستگاه نمونه گیری Koken (core drilling Rig) مدل RPD-30C-A2 حفر شدند. تغییرات لیتولوژی نسبت به عمق برای هر سه گمانه در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این نتایج در محل گمانه BH2 وجود رس غیر متراکم مرطوب و آلوده به فاضلاب از عمق ۱،۸۰ تا ۰/۷ متر از سطح زمین در نمونه‌ها قابل تشخیص است. وجود فاضلاب در این نمونه‌ها احتمالاً بخاطر نفوذ و یا انتشار زیر زمینی فاضلاب از چاه‌های سپتیک مربوط به سیستم فاضلاب شهری نشان داده شده در شکل ۵ می‌باشد. چاه‌های سپتیک مربوط به فاضلاب شهری در شمال پروفیل و در بالا دست شیب شمال به جنوب لایه ای زمین می‌باشد که در سطح زمین نیز قابل تشخیص است.

۲- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

کمر بند زاگرس بخشی از کمر بند کوهزایی آلپ- هیمالیا است که در حاشیه شمال خاوری صفحه عربستان قرار گرفته است (Berberian and King, 1981). این کمر بند کوهزایی شامل ۹ تا ۱۴ کیلومتر از رسوبات کامبرین تا عهد حاضر می‌باشد که بر روی پی سنگ کامبرین قرار گرفته اند. در محل مورد مطالعه، سازندهای گچساران، بختیاری و تاحدودی آغاچاری دارای رخنمون می‌باشد (شکل ۴). بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی که توسط شرکت مهندسی مشاور بنیان پی در بهار ۲۰۰۸ برای ساخت سالن ورزشی قدس در این محل انجام شد، لیتولوژی محل مورد نظر از خاک‌های هوازده پراکنده سطحی، ماسه‌های رس دار نرم، گراول، ماسه، سنگ ماسه، شیل و در برخی نقاط تا عمق ۱۰ متر از سنگ آهک تشکیل شده است. بر اساس مطالعات شرکت مهندسی مشاور بنیان پی سطح آب زیر زمینی



شکل ۴- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین ایران)
 Fig. 4. Geological map of the study area (National Geoscience Database of Iran: <http://www.ngdir.ir/>)



شکل ۵- نمایی از موقعیت جغرافیایی پروفیل مربوط به مقاومت ویژه الکتریکی. A: شرکت بهره برداری نفت و گاز مسجدسلیمان، B: منطقه سبزآباد. E: سالن ورزشی قدس. D: منطقه مالکریم و F: محل چاه‌های سپتیک مربوط به فاضلاب شهری می‌باشد.

Fig.5. An overview of geographical location of the electrical resistivity profile. A: Masjed Soleiman Oil and Gas Production Company, B: Sabzabad Neighborhood, E: Qods Sport Hall and D: Malkarim Neighborhood and F: sewerage system holes.

جدول ۲- تغییرات لیتولوژی نسبت به عمق برای سه گمانه BH1, BH2 و BH3 که در امتداد پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی حفر شده‌اند.

Table 2. Vertical changes in lithology for three boreholes (BH1, BH2 and BH3) along the electrical resistivity profile

BH1: X=25M		BH2: X=29M		BH3: X=34M	
Depth(M)	Lithology	Depth(M)	Lithology	Depth(M)	Lithology
0.0-0.50	Grey Marle	0.0-0.50	Grey Marle	0.0-1.20	Soft Clay + Clayey sand
0.50-1.10	Soft Clay + Clayey sand	0.50-1.80	Clayey sand+ Compacted Clay	1.20-3.40	Soft Clay
1.10-1.90	Grey Marle Clayey sand		Noncompacted clay (wet and contaminated with sewage)		
1.90-3.30	+ Compacted Clay	0.0-1.80		.00 ^v 3.40-	Clayey sand
3.30-7.00	Soft Clay				

ترکیب این دو مجموعه داده، مجموعه جدیدی با تعداد ۱۴۹۲ داده جهت برگردان ترکیبی داده‌های ونر و دوقطبی - دوقطبی بدست آمد.

استفاده از تنظیمات بهینه جهت انجام برگردان داده‌ها توسط این نرم افزار نیاز به تجربه کافی و اطلاعات دقیق از نحوه عملکرد آن و تسلط کامل بر تئوری برگردان سازی داده‌ها دارد. در غیر اینصورت نتیجه عملیات برگردان سازی با واقعیت سازگار نخواهد بود. همچنین در مرحله پیش پردازش داده‌های خام (به عنوان مثال: حذف داده‌های با درصد نوفه بسیار زیاد)، تجربه و مهارت در استفاده از این نرم افزار، جهت همگرایی الگوریتم برگردان سازی و حصول کمترین مقدار خطای عملیات برگردان سازی، بسیار موثر می‌باشد. در صورتیکه مقدار خطای عملیات برگردان سازی کوچکتر یا مساوی ۵ درصد باشد، نتیجه عملیات برگردان سازی بسیار قابل اعتماد خواهد بود. با این وجود مقدار خطای عملیات برگردان سازی تا ۱۰ درصد نیز نتایج قابل قبولی را در اختیار می‌گذارد.

در هنگام عملیات وارون سازی داده‌های سه مجموعه (داده-های مربوط به آرایه ونر، آرایه دوقطبی-دوقطبی و مجموعه حاصل از ترکیب داده‌های دو آرایه ونر و دوقطبی-دوقطبی) از دو الگوریتم CMO و RC بصورت جداگانه استفاده شد تا نتایج حاصل از اثر این دو الگوریتم نیز مقایسه گردند. روابط ریاضی مربوط به این الگوریتم‌ها در منابع چاپ شده متعددی مورد بررسی قرار گرفته است (Loke and Barker, 1996; Thomas, 2004; Loke, 2014). الگوریتم CMO برای مناطقی که احتمال وجود ساختارهای زیرسطحی تحکیم یافته با ابعادی کمتر از عمق آن‌ها وجود دارد، مدل‌های زیر سطحی

۳- برداشت، پردازش و برگردان داده‌های مقاومت الکتریکی ویژه

عملیات برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی توسط دستگاه Terrameter LS ساخت کشور سوئد انجام گرفته است که در نوع خود در زمره پیشرفته ترین دستگاه‌های دنیا می‌باشد. این دستگاه توانایی انجام عملیات ژئوالکترونیک در دمای محیطی بین ۲۰- الی ۷۰ درجه سانتی گراد با استفاده از تعداد ۴ کابل چند هسته ای و ۸۱ الکتروود فولادی ضد زنگ را دارد. نصب الکتروود-های فولادی بر روی سطح زمین نیاز به دقت زیاد دارد تا امکان تزریق جریان الکتریکی به لایه‌های زیر سطحی بخوبی فراهم گردد. برای اطمینان از صحت انجام کار از محلول آب - نمک جهت تزریق بهتر جریان الکتریکی درون سوراخ‌های محل قرارگیری الکتروودها استفاده شد. در این مطالعه آرایه‌های الکتروودی ونر و دوقطبی-دوقطبی مورد استفاده قرار گرفتند. پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی در راستای شرق - غرب و در جنوب ساختمان سالن ورزشی قدس قرار دارد. امتداد این پروفیل بر راستای شیب شمال - جنوب سطح زمین عمود می-باشد تا امکان نشت و نفوذ فاضلاب جمع آوری شده در چاه‌های سپتیک واقع در شمال ساختمان سالن قدس بررسی گردد (شکل ۵). طول این پروفیل ۴۸ متر می‌باشد بطوریکه ۸۱ الکتروود با فاصله بین الکتروودی ۶۰ سانتی متر مورد استفاده قرار گرفت. فاصله پروفیل از دیوار جنوبی سالن ورزشی قدس ۳ متر می‌باشد. با انجام عملیات توموگرافی دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی توسط آرایه‌های الکتروودی ونر و دوقطبی-دوقطبی در این پروفیل، دو مجموعه داده با تعداد ۴۴۵ و ۹۴۷ داده بترتیب برای آرایه‌های ونر و دوقطبی - دوقطبی بدست آمد. سپس از

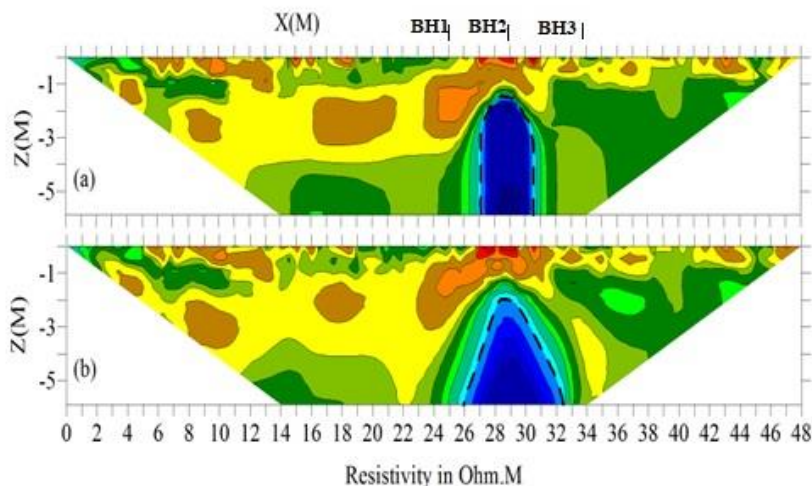
۱۰ تا ۱۵ اهم - متر می‌باشند (جدول ۲). عمده ترین تفاوت مقاطع مربوط به این الگوریتم‌های وارونسازی به منطقه آبی رنگ با مقاومت الکتریکی کمتر از ۴/۵ اهم - متر مربوط می‌شود که از رس غیرمترکم مرطوب و آلوده به فاضلاب تشکیل شده است (جدول ۲). در مقطع قائم مربوط به الگوریتم RC این منطقه دارای ضخامت یکسان ۴ متر از عمق ۲ تا ۷ متری بین فواصل ۲۷ تا ۳۱ متر گسترش یکنواخت دارد اما در مقطع مقاومت الکتریکی مربوط به الگوریتم CMO هرچند که دارای گسترش قائم مشابه با نتایج الگوریتم RC دارد اما عرض آن در عمق ۲ متری حدود ۱ متر و در عمق ۷ متری حدود ۶ متر می‌باشد و در فواصل ۲۶ تا ۳۲ متری گسترش دارد. برای متر-های بیشتر از ۳۲ متر مدل ارائه شده توسط هر دو الگوریتم تقریباً مشابه می‌باشد با این تفاوت که در مدل مربوط به الگوریتم RC این منطقه کاملاً از رس نرم و مرطوب تشکیل شده است در صورتیکه در مدل مربوط به الگوریتم CMO وجود یک منطقه با مقاومت الکتریکی بین ۳۵ تا ۵۵ اهم - متر (رنگ زرد) بین متر-های ۳۲ تا ۳۶ متر دیده می‌شود. براساس اطلاعات بدست آمده از گمانه BH3 در این محل شن رس دار مشاهده شده است (جدول ۲). بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که مدل مربوط به الگوریتم CMO نسبت به مدل مربوط به الگوریتم RC به واقعیت نزدیکتر می‌باشد.

مناسب‌تری را ارائه خواهد داد. بعنوان مثال در کاوش‌های مربوط به تشخیص حفره‌های زیرسطحی یا توده‌های معدنی دفن شده استفاده از الگوریتم CMO انتخاب مناسبی می‌باشد. الگوریتم RC به داده‌های با نوفه زیاد حساسیت کمتری دارد. بنابراین در صورتیکه داده‌های با نوفه غیر تصادفی (خطاهای انسانی یا دستگاهی) زیادی در عملیات صحرایی تهیه شوند استفاده از الگوریتم RC انتخاب بهتری می‌باشد. همچنین اگر احتمال وجود تغییرات ناگهانی مقاومت الکتریکی ویژه در مرزهای ساختارهای زیر سطحی وجود داشته باشد، استفاده از الگوریتم RC در برگردان داده‌های مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهد.

۳-۱- مقاطع قائم مربوط به برگردان داده‌های اندازه

گیری شده توسط آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی

مقاطع قائم داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی مربوط به آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی، توسط دو الگوریتم RC و CMO در شکل ۶ نشان داده شده است. از ابتدا تا متر-۲۶ متر هر دو الگوریتم RC و CMO مدل مقاومت الکتریکی تقریباً مشابهی را برای مواد زیر سطح زمین ارائه کردند بطوریکه غالباً از رس نرم با مقاومت الکتریکی ۲۵ تا ۵۵ اهم - متر (رنگ زرد تا سبز کم رنگ) تشکیل شده است. در بعضی نقاط نیز رس نرم مرطوب (سبز تیره) دیده می‌شود که دارای مقاومت الکتریکی



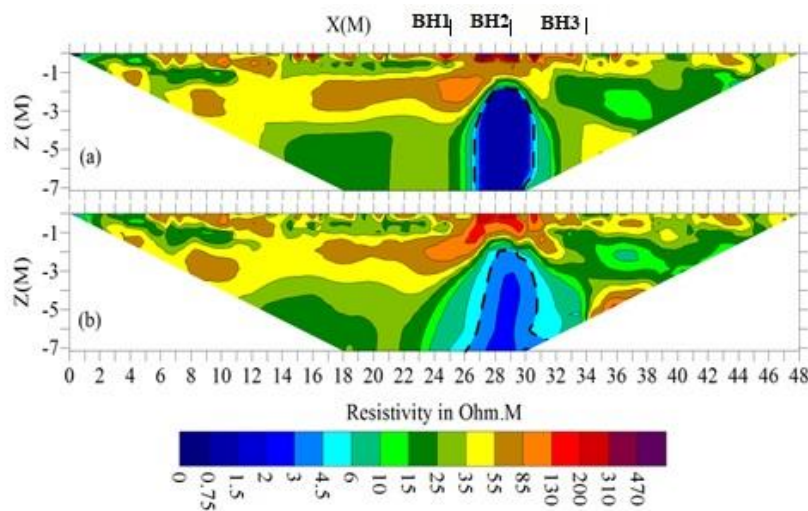
شکل ۶- مقاطع قائم مربوط به داده‌های مقاومت الکتریکی ویژه اندازه گیری شده توسط آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی. فاصله الکترودی در این پروفیل ۶۰ سانتی متر می‌باشد. (a) مقطع قائم مربوط به الگوریتم RC (RC_ Abs.Error = 1.66%) و (b) مقطع قائم مربوط به الگوریتم CMO (CMO_ Abs.Error = 3.0%)

Fig. 6. Electrical resistivity cross-sections of data gathered by the dipole - dipole array. The electrode spacing for this profile is 0.6m. (a) Electrical resistivity cross-section resulted by RC inversion (RC_ Abs.Error = 1.66%) , (b) Electrical resistivity cross-section resulted by CMO inversion (CMO_ Abs.Error = 3.0%).

۲-۳- مقاطع قائم مربوط به برگردان ترکیبی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آرایه‌های الکترودی ونر و دوقطبی - دوقطبی

داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده توسط دو آرایه الکترودی ونر و دوقطبی - دوقطبی با هم ترکیب شدند و سپس توسط دو الگوریتم RC و CMO به مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی برگردانده شدند. مقاطع قائم بدست آمده در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. هر دو الگوریتم RC و CMO برای مترهای کمتر از ۲۶ متر مدل مقاومت الکتریکی یکسانی را برای مواد زیر سطحی ارائه دادند. همچنین هر دو الگوریتم منطقه مشتمل بر رس غیر متراکم مرطوب و آلوده به فاضلاب (رنگ آبی) را از نظر ابعاد و گسترش مکانی تقریباً مشابه همدیگر نمایش داده‌اند. با وجود این، الگوریتم CMO مقاومت الکتریکی (۲ تا ۴/۵ اهم - متر) بیشتری نسبت به الگوریتم RC

(کمتر از ۲ اهم - متر) را برای این ناحیه تعیین نموده است. در مورد مترهای بیشتر از ۳۲ متر نیز هر دو الگوریتم برای اکثر نقاط رس نرم و مرطوب را بعنوان لیتولوژی غالب تعیین کرده‌اند (جدول ۲) با این تفاوت که مدل ارائه شده توسط الگوریتم CMO یک ناحیه کوچک مشتمل بر رس غیر متراکم مرطوب و آلوده به فاضلاب با ضخامت حدود ۱ متر بین مترهای ۳۲ تا ۳۸ متر نمایش می‌دهد که در مدل مربوط به الگوریتم RC دیده نمی‌شود. همچنین این مدل وجود یک منطقه با مقاومت الکتریکی بین ۳۵ تا ۲۰۰ اهم - متر (رنگ زرد تا قرمز) در مترهای ۳۴ تا ۳۸ متر و بین ترازهای ۴ تا ۷ متر را نشان می‌دهد که می‌توان آن را به منطقه شامل شن رس دار که در اطلاعات بدست آمده از گمانه BH3 وجود دارد (جدول ۲) مرتبط دانست. این منطقه در مدل ارائه شده توسط الگوریتم RC مشاهده نمی‌شود.



شکل ۷- مقاطع قائم مربوط به ترکیب داده‌های مقاومت الکتریکی ویژه اندازه‌گیری شده توسط آرایه‌های الکترودی ونر و دوقطبی - دوقطبی. فاصله الکترودی در این پروفیل ۶۰ سانتی متر می‌باشد. (a) مقطع قائم مربوط به الگوریتم RC (RC_Abs.Error = 1.86%) و (b) مقطع قائم مربوط به الگوریتم CMO (CMO_Abs.Error = 3.71%)

Fig.7. Electrical resistivity cross-sections of mixed data gathered by the Wenner and the dipole - dipole array. The electrode spacing for this profile is 0.6m. (a) Electrical resistivity cross-section resulted by RC inversion (RC_Abs.Error = 1.86%) , (b) Electrical resistivity cross-section resulted by CMO inversion (CMO_Abs.Error = 3.71%).

۴- نتیجه گیری

نتایج ارائه شده در این مطالعه برتری مدل ارائه شده توسط الگوریتم CMO نسبت به الگوریتم RC در محل مورد مطالعه برای برگردان مجزا و همچنین برگردان ترکیبی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آرایه‌های ونر و دوقطبی - دوقطبی را نشان

می‌دهد. همچنین این مطالعه نشان داد که برگردان ترکیبی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آرایه‌های ونر و دوقطبی - دوقطبی مدل مقاومت الکتریکی زیر سطحی را ارائه می‌دهد که نسبت به برگردان مجزای داده‌های بدست آمده از هر آرایه الکترودی به واقعیت نزدیک تر می‌باشد. ترکیب نتایج حاصل از

۵-قدر دانی

هزینه‌های انجام این تحقیق توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان براساس طرح پژوهشی برون دانشگاهی به شماره ۱۱۱۱۷-۸۱-۸۶/۹۷۵۱/۵-۲۰-۲۰ مورخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۱ تامین شده است که مورد تقدیر و سپاس می‌باشد.

حفر سه گمانه (BH1، BH2 و BH3) و برگردان ترکیبی داده-های برداشت شده توسط آرایه‌های ونر و دوقطبی - دوقطبی وجود و میزان گسترش هندسی نشت فاضلاب در زیر ساختمان مربوط به سالن ورزشی قدس را نشان می‌دهد.

مراجع

- Abdullah, F.M., Loke, M.H., Nawawi, M., Abdullah, K., 2019. Improving the resolution of 3-D resistivity surveys along the perimeter of a confined area using optimized arrays. *Pure and Applied Geophysics* 176, 1701-1715. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2061-0>
- Adrian, W., Paul, W., James, B., James, W., John, M.K., Andrew, B., Timothy, G., Jonathan, C., 2023. Combined electrical resistivity tomography and ground penetrating radar to map Eurasian badger (*Meles Meles*) burrows in clay-rich flood embankments (levees). *Engineering Geology* 323, 107-198. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107198>.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265 <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/e81-019>
- Carpenter, E.W., Habberjam, G.M., 1956. A tri-potential method of resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting* 29, 128-143. <https://doi.org/10.1190/1.1438247>
- Chambers, J., Ogilvy, R., Meldrum, P., Nissen, J., 1999. 3D resistivity imaging of buried oil- and tar-contaminated waste deposits. *European journal of environmental and engineering geophysics* 4, 3-15. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/14187>
- Chambers, J. E., Kuras, O., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., Hollands, J., 2006. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeological, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics* 71(6), 231-239. <https://doi.org/10.1190/1.2360184>
- Costanzo, A., Pisciotta, A., Pannaccione Apa, M.I., Bongiovanni, S., Capizzi, P., et al., 2021. Integrated use of unmanned aerial vehicle photogrammetry and terrestrial laser scanning to support archaeological analysis: The Acropolis of Selinunte case (Sicily, Italy). *Archaeological Prospecting* 28, 153-165. <https://doi.org/10.1002/arp.1804>
- Dahlin, T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break* 14, 275-283. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1996014>
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computer and Geosciences* 27, 1019-1029. [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00160-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00160-6)
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2d resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379-398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- Daily, W., Owen, E., 1991. Crosshole resistivity tomography. *Geophysics* 56, 1228-1235. <https://doi.org/10.1190/1.1443142>
- Gemail, K., Samir, A., Oelsner, C. Mousa, S.E., Ibrahim, S., 2004. Study of saltwater intrusion using 1d, 2d and 3d resistivity surveys in the coastal depressions at the eastern part of matruh area, Egypt. *Near Surface Geophysics* 2(2), 103-109. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2004007>
- Griffiths, D. H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics* 29, 211-226. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90005-J](https://doi.org/10.1016/0926-9851(93)90005-J)
- Griffiths, D.H., Turnbull, J., 1985. A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break* 3(7), 16 - 20. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1985013>
- Griffiths, D. H., Turnbull, J., Olayink, A.I., 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break* 8, 121-129. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1990008>
- Guinea, A., Bicknell, J., Cox, N., Swan, H., Simmons, N., 2022. Characterization of legacy landfills with electrical resistivity tomography; a comparative study. *Journal of Applied Geophysics* 203, 104716. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104716>

- Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A., 1989. New prospects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological applications. *Geophysics* 51, 585–594. [https:// doi:10.1190/1.1442599](https://doi.org/10.1190/1.1442599)
- Labrecque, D., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A., Owen, E., 1996. The effects of ‘occam’ inversion of resistivity tomography data. *Geophysics* 61, 538–548. [https:// doi:10.1190/1.1443980](https://doi.org/10.1190/1.1443980)
- Li, Y.G., Oldenburg, D.W., 1992. Approximate inverse mapping in dc resistivity problems. *Geophysical Journal International* 109, 343–362. [https://doi:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00101.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00101.x)
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1995. least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* 60, 1682–1690. [https:// doi:10.1190/1.1443900](https://doi.org/10.1190/1.1443900)
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid Least-squares inversion of apparent Resistivity pseudosections by a quasi-newton method. *Geophysical prospecting* 44, 131–152. [https://doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x)
- Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-d electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics* 34, 182–187. [https://doi:10.1071/EG03182](https://doi.org/10.1071/EG03182)
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131-152. [https://doi:10.1111/j.13652478.1996.tb00142.x](https://doi.org/10.1111/j.13652478.1996.tb00142.x)
- Loke, M.H., 2014. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.goelectrical.com
- Martorana, R., Capizzi, P., Pirrera, C., 2023. Unconventional Arrays for 3D Electrical Resistivity and Induced Polarization Tomography to Detect Leachate Concentration in a Waste Landfill. *Applied Sciences* 13, 7203. <https://doi.org/10.3390/app13127203>
- Pazdirek, O., Blaha, V., 1996. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Amsterdam. [https:// doi:10.3997/2214-4609.201408817](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201408817)
- Park, S.K., Van, G.P., 1991. Inversion of pole-pole data for 3D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics* 56, 951–960. [https:// doi:10.1190/1.1443128](https://doi.org/10.1190/1.1443128)
- Pavel, R., Yulia, D., 2022. Electrical resistivity tomography for characterization of carbon-rich rocks (shungites). *Journal of Applied Geophysics*, 203, 104667. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104667>.
- Rani, P., Cassiani, G., 2022. Tracking contaminant transport using time-lapse geophysics: A review on applications of electrical methods. *Water Secured*. 17, 100127. [https:// DOI:10.1016/j.wasec.2022.100127](https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100127)
- Sasaki, Y., 1994. 3D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics* 59, 1839–1848. [https:// doi:10.1190/1.1443571](https://doi.org/10.1190/1.1443571)
- Seaton, W. J., Burbey, T.J., 2002. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. *Journal of Applied Geophysics* 51, 21–41. [https:// doi:10.1016/S0926-9851\(02\)00212-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00212-4)
- Shima, H., 1992. 2D and 3D resistivity imaging reconstruction using cross hole data. *Geophysics* 55, 682–694. <https://doi.org/10.1190/1.1443195>
- Thomas, G., 2004. Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements, Ph.D thesis, University of Freiberg.
- Zhou, B., Dahlin, T., 2003. Properties and effects of measurement errors on 2d resistivity Imaging. *Near Surface Geophysics* 1, 105– 117. [https:// doi:10.3997/1873-0604.2003001](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2003001)