

## Determination of empirical relation between electrical resistivity and moisture content of municipal solid waste at a closed landfill in Lali, Khuzestan

Ahmad Neyamadpour<sup>1\*</sup>

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

**Keywords:** Moisture content, Electrical resistivity, Municipal solid waste, Correlation, Landfill

### 1-Introduction

Landfills not only prevent the distribution of wastes through the environment but also are so efficient in the optimization of waste stabilization processes. The moisture content of wastes is an essential factor which affects the operations of landfills, and its sufficiency can create a suitable condition for organic matter decomposition (San and Onay, 2001; Benbelkacem et al., 2010; Doumont et al., 2016). The produced leachates in landfills are considered to be liquid sources of pollution for the environment and have various adverse consequences for groundwater and their surrounding soils (Aziz et al., 2013). Proper monitoring of landfills and their mining operations require estimation of moisture content of wastes and leachate distribution (Fisher, 2013; Feng et al., 2017). Generally, direct drilling and sample analysis methods are used for the estimation of moisture content in laboratories. These methods, apart from being costly, yield accurate information, and not the distribution information of underground moisture content (Grellier et al., 2006a). Therefore, some indirect and nondestructive geophysical methods are determined for the estimation of the moisture content of subsurface materials in landfills (Imhoff et al., 2007). Among affordable and nondestructive geophysical methods, electrical resistivity tomography (ERT) has been widely used by many researchers for estimation of underground moisture content of different matters (Bernstone et al., 2000; Chambers et al., 2004, 2006; Guerin et al., 2004; Grellier, 2005; Grellier et al., 2006b; Imhoff et al., 2007; Doumont et al., 2016; Feng et al., 2017). This paper provides a field study for 3D monitoring of leachates by 3D ERT method, and laboratory analysis resulted from drilling operations in a small landfill located in Lali city, Southwest of Iran.

### 2-Methodology

The electrical resistivities of 54 samples, extracted from 6 boreholes, are measured at the temperature of 26 °C in the laboratory. The temperature of the waste samples was measured in situ immediately after digging boreholes. According to Dumont et al. (2016), the amount of electrical resistivity of samples was corrected in the laboratory as follow:

$$\rho = \rho_{26\text{ }^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + n \cdot (T - 26))$$

Where  $n=2.101\%/^{\circ}\text{C}$ . During the preparation of samples for the electrical resistivity estimation process, compression continues up to a saturation point.

At first, a correlation is found between electrical resistivity and volumetric water content using direct measurements of samples collected from 5 drilled boreholes. Then, the volumetric water content of the sixth borehole samples was estimated for the evaluation of mathematical regression relation and was compared with the corresponding values measured in the laboratory.

### 3- Results and discussion

Quantitative analysis of leachate expansion in landfills was done by developing a correlation between electrical resistivity and moisture content. For this purpose, a separate correlation is created between electrical resistivity

\*Corresponding author: dranpour@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.30422.2019

Received 2019-07-23

Accepted 2020-03-11

and moisture content of samples extracted from each BH-1, BH-2, BH-3, BH-4, and BH-5 boreholes via laboratory measurements. The correlation coefficients of the mathematical relations generated by the regression operation were approximately close to each other in the five boreholes. Therefore, a correlation was developed between electrical resistivity and volumetric water content of all the five borehole data. Therefore:

$$\rho = 0.8847\theta^{-1.598} \quad (1)$$

Where  $R^2 = 0.7869$  indicates efficient correlation of  $\rho$  and  $\theta$  for all the BH-1, BH-2, BH-3, BH-4, and BH-5 boreholes. In order to validate relation (1), values of volumetric water content were estimated for BH-6 borehole samples ( $\theta$ -Estimated), and then the estimated values were compared with the corresponding values measured in the laboratory ( $\theta$ -Measured). The coefficient  $R^2 (= 0.7354)$  indicates a good correlation between the estimated values and the measured values for the volumetric water content of the samples in the BH-6 borehole. If the sample of the 11-meter depth of the BH-6 borehole is ignored, the coefficient  $R^2$  will increase substantially to 0.9644.

#### 4-Conclusions

Using corrected values of electrical resistivity (Temperature and compression corrections) measured in the laboratory resulted in a more accurate estimation of in situ values of electrical resistivity. The increased accuracy of volumetric water content estimation by electrical resistivity values. The results of this study indicate a correlation between electrical resistivity and volumetric water content with  $R^2 = 0.7869$  coefficient.

#### References

- Aziz, H.A., Othman, O.M., Amr, S.S.A., 2013. The performance of electro- Fenton oxidation in the removal of coliform bacteria from landfill leachate. *Waste Management* 33(2), 396–400.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, H., 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: Two pre-excavation surveys. *Environmental Geology* 39, 360– 371.
- Benbelkacem, H., Bayard, R., Abdelhay, A., Zhang, Y., Gourdon, R., 2010. Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in an anaerobic bioreactor. *Bioresource Technology* 101, 5206–5212.
- Chambers, J.E., Meldrum, P., Kuras, O., Ogilvy, R.D., Hollands, J., 2004. Investigation of a former quarry and landfill site using electrical resistivity tomography. In: Presented at the Near Surface 2004–10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, Netherlands.
- Chambers, J., Kuras, O., Meldrum, P., Ogilvy, R., Hollands, J., 2006. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics* 71, 231–239.
- Dumont, G., Pilawski, T., Dzaomuho-Lenieregue, P., Hiligsmann, S., Delvigne, F., Thonart, P., Robert, T., Nguyen, F., Hermans, T., 2016. Gravimetric water distribution assessment from geoelectrical methods (ERT and EMI) in municipal solid waste landfill. *Waste Management* 55, 129-140.
- Fisher, R., 2013. Landfill Mining, Key Issue Paper. International Solid Waste Association, Cranfield University, UK.
- Feng, S.J., Zhen-Bai, Z.B., Ben-Yi Cao, B.Y., Shi-Feng Lu, S.F., Ai, S.G., 2017. The use of electrical resistivity tomography and borehole to characterize leachate distribution in Laogang landfill, China. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 20811-20817.
- Grellier, S., Reddy, K., Gangathulasi, J., Adib, R., Peters, A., 2006a. Electrical resistivity tomography imaging of leachate recirculation in orchard hills landfill. In: Proceedings of the SWANA Conference, Charlotte.
- Imhoff, P., Reinhart, D., Englund, M., Guérin, R., Gawande, N., Han, B., Jonnalagadda, S., Townsend, T., Yazdani, R., 2007. Review of state of the art methods for measuring water in landfills. *Waste Management* 27, 729–745.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Neyamadpour, A., 2021. Determination of empirical relation between electrical resistivity and moisture content of municipal solid waste at a closed landfill in Lali, Khuzestan. *Adv. Appl. Geol.* 11(1), 1-11.

DOI: 10.22055/AAG.2019.28141.1919

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_15495.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15495.html?lang=en)

## برآورد رابطه تجربی بین مقاومت الکتریکی و محتوای رطوبت پسماندهای جامد شهری در جایگاه انباشت زباله غیرفعال در شهر لالی، استان خوزستان

احمد نیامدپور\*

گروه ژئوفیزیک، واحد مسجدسلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی، مسجدسلیمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱

\*dranpour@gmail.com

### چکیده

در این پژوهش رابطه تجربی بین مقاومت الکتریکی و محتوای رطوبت زباله‌های جامد شهری در یک جایگاه انباشت زباله‌های غیر فعال برآورد شد. نمونه‌های بدست آمده از گمانه‌های حفر شده، برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی آنها مورد بررسی قرار گرفتند. پس از انجام تصحیحات اثر دما و فشرده‌سازی بر روی داده‌های مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، یک همبستگی بالا بین مقاومت الکتریکی و محتوای رطوبت نمونه‌ها توسعه داده شد. برای ارزیابی اعتبار رابطه ریاضی بدست آمده، از این رابطه برای تخمین مقدار محتوای رطوبت نمونه‌های مربوط به یک گمانه جدید استفاده شد. داده‌های این گمانه در تعیین رابطه تجربی بدست آمده بین مقاومت الکتریکی و محتوای رطوبت نمونه‌ها استفاده نشده بودند. مقایسه محتوای رطوبت تخمین زده شده با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، نشان دهنده یک همبستگی بسیار قوی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** محتوای رطوبت، مقاومت الکتریکی، زباله جامد شهری، همبستگی، محل انباشت زباله

### مقدمه

از میان روش‌های مقرون به صرفه و غیر تهاجمی ژئوفیزیکی، توموگرافی مقاومت الکتریکی (Electrical Resistivity Tomography; ERT) بوسیله بیشتر پژوهشگران برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت مواد زیرسطح زمین مورد استفاده قرار گرفته است (Bernstone et al., 2000; Chambers et al., 2004, 2006; Guérin et al., 2004; Grellier, 2005; Grellier et al., 2006b, 2007; Imhoff et al., 2007; Dumont et al., 2016; Feng et al., 2017).

توموگرافی مقاومت الکتریکی بطور گسترده‌ای برای برآورد توزیع شیرابه در محل‌های انباشت زباله استفاده شده است (Ogilvy et al., 2002; Grellier et al., 2007; Ling et al., 2013; Ayolabi et al., 2015; André et al., 2016; De Donno and Cardarelli, 2017).

Clément و همکاران (2011) و Audebert و همکاران (۲۰۱۴) برای ارزیابی کارایی سیستم‌های بازچرخش شیرابه و Degueurce و همکاران (۲۰۱۶) برای نمایش دینامیک جابجایی شیرابه در محل‌های انباشت زباله از روش ERT استفاده کردند.

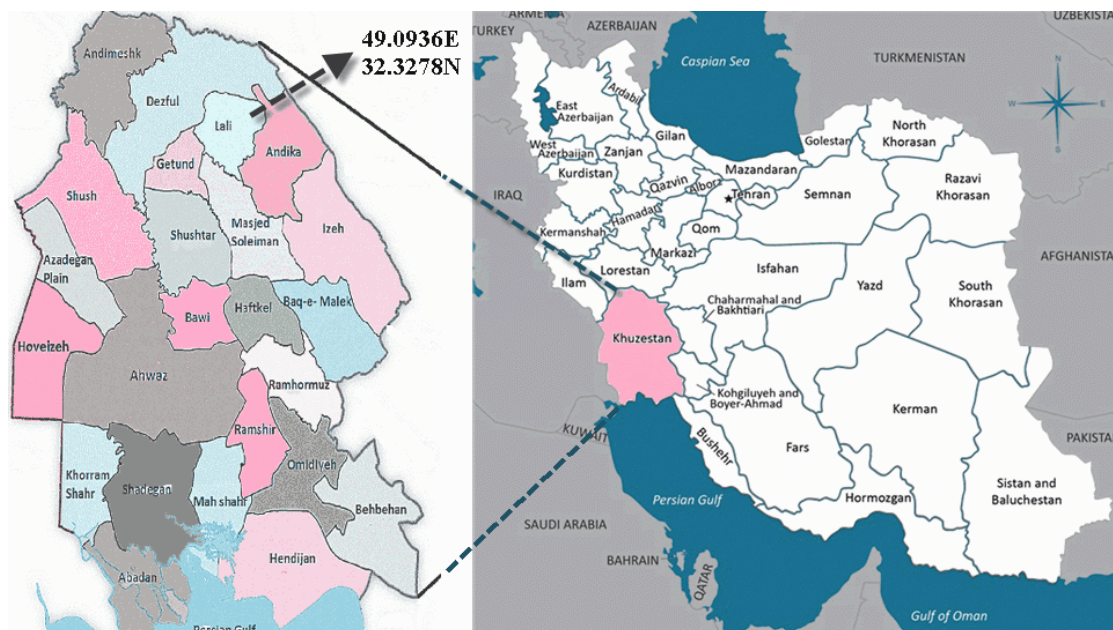
این پژوهش ارائه‌دهنده یافته‌های یک مطالعه میدانی برای برآورد رابطه تجربی بین مقاومت الکتریکی و محتوای رطوبت نمونه‌های زباله-های جامد شهری در محل انباشت قدیمی و غیرفعال زباله در شهر لالی خوزستان در جنوب غرب ایران است (شکل ۱). با استفاده از اندازه-گیری‌های مستقیم روی ۵۴ نمونه بدست آمده از شش عدد گمانه حفر

جایگاه‌های انباشت پسماند نه تنها مانع از پراکندگی زباله‌ها در محیط زیست می‌شود، بلکه برای کنترل و بهینه سازی فرایندهای تثبیت پسماند بسیار کار آمد است. محتوای رطوبت زباله‌ها یک شناسه مهم در عملکرد محل‌های انباشت پسماند است و مقدار مناسب آن می-تواند محیط مطلوبی را برای تسریع در تجزیه مواد آلی ایجاد نماید (Šan and Onay, 2001; Benbelkacem et al., 2010; Dumont et al., 2016). شیرابه تولید شده در جایگاه‌های انباشت پسماند، یک مایع آلاینده محیط زیست است و تاثیرات زیان‌آوری روی آب‌های زیر زمینی و خاک‌های پیرامون جایگاه انباشت زباله دارد (Aziz et al., 2013). کنترل مناسب محل انباشت زباله نیازمند بررسی محتوای رطوبت زباله‌ها و برآورد توزیع و انتشار شیرابه‌ها است (Fisher, 2013; Feng et al., 2017).

برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت مواد در محل‌های انباشت زباله، بیشتر از روش حفاری مستقیم و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها در آزمایشگاه استفاده می‌شود. این روش افزون بر هزینه زیاد تنها داده‌های نقطه‌ای را ارائه داده و نمی‌تواند توزیع محتوای رطوبت زیرسطح زمین را نمایش-دهد (Grellier et al., 2006a). از این رو روش‌های غیر مخرب و غیر مستقیم ژئوفیزیکی برای تعیین محتوای رطوبت مواد مخصوصا در محل‌های انباشت زباله‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Imhoff et al., 2007).

یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای کنترل و ارزیابی عملکرد درست محل‌های انباشت زباله‌های شهری مورد استفاده شهرداری‌ها و دیگر ادارات مرتبط با محیط زیست قرار گیرد. همچنین می‌توان با بررسی‌های سب‌بعدی امکان انتشار احتمالی شیرابه‌ها به خارج از محل انباشت زباله‌ها و تزریق آنها به منابع آب‌های زیرزمینی را بررسی نمود و در زمان مناسب، از آلودگی منابع آب زیر زمینی بوسیله شیرابه‌ها جلوگیری نمود.

شده، نخست یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب حجمی نمونه‌های ۵ گمانه توسعه داده می‌شود. سپس برای ارزیابی رابطه ریاضی بدست آمده از عملیات رگرسیون، مقادیر محتوای آب حجمی برای نمونه‌های گمانه ششم بوسیله این رابطه تخمین زده شده و با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان لالی در استان خوزستان.

Fig. 1. Geographical location of Lali city in Khuzestan Province.

یک متر و بعد از آن تا عمق ۱۳ متری به اندازه ۲ متر می‌باشد. بطور همزمان دمای نمونه‌ها ( $T_{in situ}$ ) اندازه‌گیری شد. از هر گمانه ۹ نمونه و در مجموع ۵۴ نمونه زباله که حجم هر کدام  $0.02 m^3$  بود، تهیه گردید. سپس هر کدام از نمونه‌ها به دو قسمت برابر به حجم  $0.01 m^3$  تقسیم شد. یک قسمت از هر نمونه برای اندازه‌گیری محتوای آب گرانشی در محل ( $W_{in situ}$ ) و همچنین چگالی حالت مرطوب در محل ( $D_{wet in situ}$ ) بکار برده می‌شود. قسمت دیگر از نمونه نخست، بصورت دستی تا رسیدن به مرحله اشباع فشرده گردید. این بخش از نمونه برای اندازه‌گیری چگالی حالت مرطوب ( $D_{wet Lab}$ ) و مقاومت الکتریکی نمونه ( $P_{Lab}$ ) در شرایط آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفت.

### اندازه‌گیری محتوای آب گرانشی ( $W$ )

برای اندازه‌گیری محتوای آب گرانشی، نمونه‌ها به مدت ۵ روز در دمای  $65^{\circ}C$  خشک شدند و با اندازه‌گیری جرم کاهش یافته در اثر خشک شدن مقدار  $W$  از رابطه زیر محاسبه شد:

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه یک جایگاه کوچک پسماندهای شهری است که در شمال شهر لالی، استان خوزستان در جنوب غرب ایران جای دارد. مساحت این محل انباشت زباله، کم‌وبیش برابر  $3000$  مترمربع است و به مدت تقریباً ۱۲ سال زباله‌های شهری بصورت روزانه در آن جمع‌آوری می‌شود. در سال ۱۳۸۰ این محل بوسیله یک پوشش به ضخامت ۶۰ سانتیمتر متشکل از خاک‌های سطحی، رس و مارن پوشانده شد. با توجه به اینکه میانگین بارش سالانه در محل مورد مطالعه کمتر از  $350$  میلیمتر بوده و جنس مواد پوشاننده زباله‌ها بیشتر از خاک رس و مارن است، از این رو جریان آب قابل ملاحظه‌ای که ناشی از بارندگی باشد به درون زباله‌های انباشت شده قابل تصور نخواهد بود.

### اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

در منطقه مورد پژوهش، تعداد ۶ گمانه حفر شد (شکل ۱). عمق هر گمانه ۱۳ متر می‌باشد. نمونه‌گیری بوسیله دستگاه حفاری Auger انجام گرفت. فواصل اندازه‌گیری نمونه‌ها تا عمق ۵ متری از سطح زمین،

$$\frac{\theta}{w} = \frac{\frac{V_w}{V_t}}{\frac{M_w}{M_t}} = \frac{\frac{M_t}{V_t}}{\frac{M_w}{V_w}} = \frac{D_{wet}}{D_w} = D_{wet} \quad (3)$$

$$w = \frac{M_t - M_d}{M_t} = \frac{M_w}{M_t} \quad (1)$$

در این رابطه  $D_{wet}$  چگالی حالت مرطوب نمونه در شرایط محیط مورد مطالعه است. همچنین  $D_w$  چگالی آب (مایع) است که تقریباً معادل  $1000 \text{ Kg/m}^3$  می باشد.

از این رو:

$$\theta = w \times D_{wet} \quad (4)$$

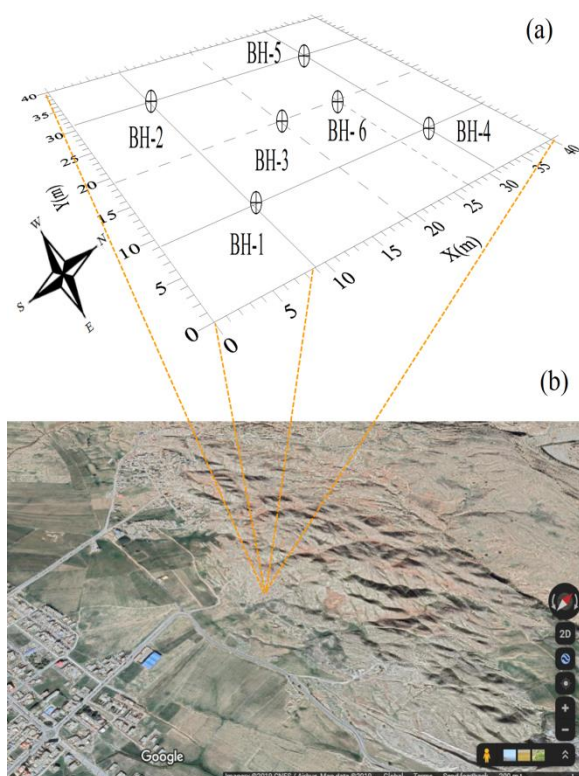
در این رابطه  $M_d$  جرم نمونه پس از خشک شدن،  $M_w$  جرم آب موجود در نمونه و  $M_t$  جرم نمونه قبل از خشک شدن می باشد.

### اندازه گیری محتوای آب حجمی ( $\theta$ )

میزان محتوای آب مواد زیر سطحی بیشتر با محتوای آب حجمی ( $\theta$ ) تعیین می شود. این پارامتر بصورت نسبت حجم آب ( $V_w$ ) به حجم کل نمونه ( $V_t$ ) تعریف می گردد:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (2)$$

رابطه بین دو پارامتر  $\theta$  و  $w$  را می توان بصورت زیر نشان داد:



شکل ۲- (a) نمای شماتیک از موقعیت گمانه‌های حفر شده در محل انباشت زباله‌های مورد مطالعه. مختصات جغرافیای گوشه جنوب شرقی یعنی نقطه (۰، ۰) عبارت است از  $49.0936E$  و  $32.3278N$  و (b) تصویر ماهواره‌ای از منطقه مورد مطالعه.

Fig. 2. Schematic illustration of the location of boreholes drilled in the landfill site. Longitude and latitude of the south – East corner (0, 0) are  $32.3278N$  and  $49.0936E$ , respectively.

فلزی مس می باشد. در پژوهش‌های صحرائی با افزایش فاصله الکترودها، عمق کاوش نیز افزایش می یابد. با انتخاب مقادیر مختلف برای فاصله الکترودهای جریان و پتانسیل می توان مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری تعداد زیادی از نقاط زیر سطحی را با استفاده از رابطه زیر تعیین نمود:

$$\rho = K \times \frac{\Delta v}{I} \quad (5)$$

در این رابطه  $K$  به نحوه جای گرفتن الکترودها و فاصله آن‌ها از همدیگر وابسته است و به آن فاکتور هندسی گفته می شود. مقدار فاکتور

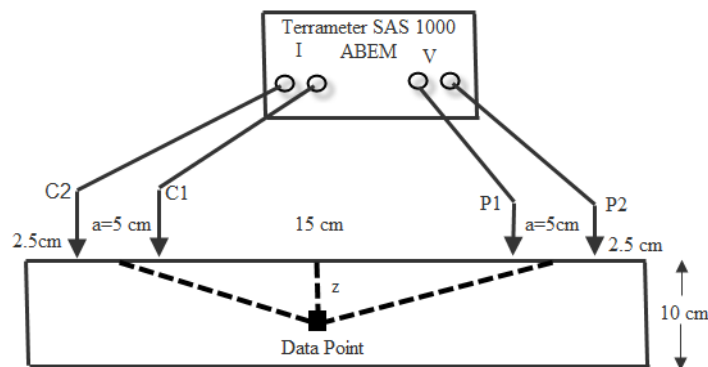
### اندازه گیری مقاومت الکتریکی

روش توموگرافی مقاومت الکتریکی بطور گسترده‌ی بوسیله پژوهشگران بیان شده است (e.g., Loke, 2016; Dahlin, 2001). در این روش جریان الکتریکی ( $I$ ) بوسیله دو الکتروود فلزی ( $C1$  and  $C2$ ) در سطح زمین مورد مطالعه تزریق می شود و اختلاف پتانسیل الکتریکی ( $\Delta v$ ) بدست آمده در سطح زمین بوسیله دو الکتروود فلزی دیگر ( $P1$  and  $P2$ ) اندازه گیری می شود (شکل ۳). جنس الکترودهای

همبستگی پارامترها، لازم است که مدل سازی معکوس بوسیله نرم افزار- های مربوط مانند RES2DINV انجام شود

### آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی

این آرایش الکترودی بطور گسترده در پژوهش های توموگرافی مقاومت الکتریکی دو بعدی و سه بعدی مورد استفاده است (Loke, 2016). شیوه آرایش الکترودها در شکل ۳ نشان داده شده است. بازه بین جفت الکترودهای جریان الکتریکی (C1 and C2) با حرف a نشان داده می شود که با بازه بین جفت الکترودهای پتانسیل الکتریکی (P1 and P2) هم اندازه است. فاکتور n در این آرایش الکترودی بصورت نسبت فاصله بین الکترودهای C1 و P1 به مقدار a تعریف می شود. برای اندازه گیری با این آرایه الکترودی، ابتدا اندازه a ثابت نگه داشته می شود و مقدار فاکتور n از عدد ۱ تا حداکثر عدد ۶ افزایش می یابد تا عمق کاوش افزایش یابد. این آرایه دارای پوشش داده های نسبتا خوب در ابتدا و انتهای پروفیل می باشد و دارای وضوح افقی بسیار مناسبی است.



شکل ۳- نمای شماتیک از دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه های زباله در آزمایشگاه از آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی.

Fig. 3. Schematic illustration of device to measure electrical resistivity of waste samples in laboratory using dipole-dipole array.

در این رابطه  $a$  و  $m$  پارامترهای تجربی،  $\rho_w$  مقاومت الکتریکی فاز مایع و  $\rho$  مقاومت الکتریکی زباله برحسب واحد  $\text{Ohm.M}$  می باشد. پارامتر  $\theta$  محتوای آب حجمی زباله می باشد.

### اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه ها در آزمایشگاه

برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه های زباله در آزمایشگاه از آرایه الکترودی دوقطبی- دوقطبی استفاده شده است (شکل ۳). الکترودهای C1، C2، P1 و P2 از جنس سوزن های مسی با قطر ۱ میلی متر و طول ۳ سانتی متر بوسیله سوراخ های تعبیه شده در روکش از جنس PVC در تماس با نمونه قرار گرفتند. حداکثر میزان جریان الکتریکی تزریق شده بوسیله دستگاه Terrameter SAS 1000 ساخت شرکت ABEM کشور سوئد به الکترودهای جریان الکتریکی برابر با ۱۰ میلی آمپر انتخاب شد. مقادیر  $a$  و  $n$  نیز بترتیب ۵ سانتی متر و ۳ انتخاب شدند بطوریکه فاصله C1-P1 برابر ۱۵ سانتی متر و فاصله

هندسی به نحوه قرار گرفتن الکترودهای جریان و پتانسیل الکتریکی نسبت به همدیگر بستگی دارد. در این مطالعه از آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی در آزمایشگاه استفاده شد. دلیل انتخاب این آرایه الکترودی، پوشش داده های نسبتا خوب در ابتدا و انتهای پروفیل است. همچنین نتایج اندازه گیری با این آرایه دارای وضوح افقی بسیار مناسب می باشد.

با توجه به کوچک بودن نمونه های برداشتی، ناهمگنی مورد بحث در بیشتر منابع، پیرامون داده های صحرایی در چنین مقیاسی مورد نظر نمی باشد. از این رو مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده برای روی نمونه های آزمایشگاهی، همان مقدار مقاومت الکتریکی واقعی بوده و داده های مقاومت ویژه الکتریکی اندازه گیری شده به همین شکل قابل استفاده در ایجاد همبستگی با پارامترهای مقاومت برشی خاک مربوط به نمونه های آزمایشگاهی هستند. در برداشت صحرایی و اندازه گیری خصوصیات الکتریکی زمین باید توجه داشت که مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده مقاومت ظاهری می باشد و قبل از بکارگیری در روابط بدست آمده از

### مقاومت الکتریکی زباله های جامد شهری

مقاومت الکتریکی زباله های انباشت شده تحت تاثیر پارامترهایی همانند محتوای رطوبت، دما، محتوای یونی، اندازه ذرات و مقاومت الکتریکی فاز مایع است (Clément et al., 2011; Feng et al., 2017). در میان پارامترهای یاد شده، اثر محتوای رطوبت بسیار زیاد می باشد (Dumont et al., 2016). با افزایش محتوای رطوبت، مقاومت الکتریکی زباله ها کاهش می یابد. Grellier (۲۰۰۵) و Grellier و همکاران (۲۰۰۷) قانون آرچی را برای نمایش رابطه بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب حجمی زباله ها بصورت زیر ساده سازی کردند:

$$\rho = a\rho_w\theta^{-m} \quad (6)$$

باشند و  $D_{in\ situ}^{wet}$  و  $D_{Lab}^{wet}$  نیز چگالی فاز مایع در شرایط محیطی و آزمایشگاه هستند  $\theta_{in\ situ}$  و  $\theta_{Lab}$  نیز بترتیب محتوای آب حجمی در شرایط محیطی و شرایط آزمایشگاه می‌باشند.

### نتایج و بحث

بررسی کمی گسترش شیرابه در محل انباشت زباله‌ها با توسعه یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی و محتوای رطوبت امکان پذیر می‌شود. برای این منظور، نخست با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای نمونه‌های بدست آمده از هر کدام از گمانه‌های BH-1، BH-2، BH-3، BH-4 و BH-5 بصورت جداگانه یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب انجام شد (شکل ۴). ضریب  $R^2$  برای همه آن‌ها بین ۰٫۶۹ تا ۰٫۸۴ می‌باشد که نشان دهنده همبستگی بسیار خوب می‌باشد. ضرایب مربوط به روابط ریاضی ناشی از عملیات رگرسیون در مورد ۵ گمانه کم و بیش نزدیک به هم بودند (شکل ۴). از این رو یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب حجمی برای کلیه داده‌های ۵ گمانه (BH-1، BH-2، BH-3، BH-4، BH-5) توسعه داده شد (شکل ۵). در نتیجه رابطه:

$$\rho = 0.8847\theta^{-1.598} \quad (9)$$

با ضریب  $R^2 = 0.7869$  بدست آمد که بیانگر همبستگی بسیار خوب  $\rho$  و  $\theta$  برای داده‌های حاصل از گمانه‌های BH-1، BH-2، BH-3، BH-4 و BH-5 می‌باشد.

با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم، مقاومت ویژه الکتریکی فاز مایع زباله‌ها دارای مقدار ۱٫۱۴ اهم متر می‌باشد. از این رو از مقایسه رابطه ۹ با رابطه آرچی (رابطه ۶) پارامترهای  $m$  و  $a$  بترتیب دارای مقادیر ۱٫۵۹۸ و ۰٫۷۸ می‌باشند.

شکل ۶ نتایج پژوهش‌های انجام شده بوسیله Grellier و همکاران (۲۰۰۷)، Ling و همکاران (۲۰۱۳)، Dumont و همکاران (۲۰۱۶) و Feng و همکاران (۲۰۱۷) را در مقایسه با نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بیانگر گستره قابل قبول یافته‌های بدست آمده در این مطالعه می‌باشد.

برای اعتبار سنجی رابطه ۹ مقادیر محتوای آب حجمی برای نمونه‌های بدست آمده از گمانه BH-6 تخمین زده شدند ( $\theta_E$ ) سپس اعداد بدست آمده با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ( $\theta_M$ ) مقایسه شدند (جدول ۱). نتیجه عملیات همبستگی در شکل ۷ نشان داده شده است. ضریب  $R^2 = 0.7354$  نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر تخمین زده شده و مقادیر اندازه‌گیری شده برای محتوای آب حجمی نمونه‌ها در گمانه BH-6 است. اگر نمونه مربوط به عمق ۱۱ متری گمانه BH-6 که در شکل ۷ دور آن دایره‌ای بصورت خط - نقطه کشیده شده است نادیده گرفته شود، ضریب  $R^2$  بسیار افزایش یافته و به مقدار ۰٫۹۶۴۴ خواهد رسید (شکل ۷b). با مشاهده مستقیم مواد تشکیل دهنده نمونه مربوط به عمق ۱۱ متری

C1-C2 برابر ۵ سانتیمتر است. در آرایه دوقطبی - دوقطبی زمانی که فاکتور  $n$  معادل ۳ باشد، مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده مربوط به نقطه میانی طول آرایه و در عمق ۰٫۹۶۲ برابر فاصله  $a$  است. در شکل ۳ این عمق ( $Z$ ) برابر ۴٫۸۱ سانتیمتر بوده که کم‌وبیش روی محور ظرف استوانه‌ای شکل حاوی نمونه قرار دارد.

### تصحیح اثر دما بر مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در آزمایشگاه برای ۵۴ نمونه تهیه شده از ۶ گمانه حفاری شده در دمای ۲۶ درجه سانتیگراد انجام شد. دمای نمونه‌های زباله که در محل و بلافاصله بعد از حفاری اندازه‌گیری شدند دارای گستره ای بین ۲۶ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کمترین دما مربوط به عمق ۱ متر و بیشترین دما مربوط به عمق ۱۲ متر از سطح زمین می‌باشد. Grellier و همکاران (۲۰۰۶) و Dumont و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌های زباله‌ها با افزایش هر یک درجه سانتی‌گراد به اندازه ۰٫۲٪ کاهش می‌یابد. از این رو در این مطالعه مقدار مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در دمای ۲۶ درجه سانتی‌گراد در آزمایشگاه با توجه به دمای اندازه‌گیری شده نمونه‌ها در محل مورد تصحیح قرار گرفت.

### تصحیح اثر فشرده‌سازی بر مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

در هنگام آماده‌سازی نمونه‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی آنها در آزمایشگاه، فرایند فشرده‌سازی نمونه‌ها تنها تا زمانی ادامه پیدا می‌کرد که نمونه‌ها به حالت اشباع برسند. با فرض ثابت بودن مقدار محتوای آب گرانشی ( $w$ ) در حین عملیات فشرده‌سازی، می‌توان از رابطه ۴ نتیجه گرفت که محتوای آب حجمی ( $\theta$ ) و چگالی حالت مرطوب نمونه‌ها دارای نسبت مستقیم هستند (Dumont et al., 2016). از این رو با نگرش به قانون آرچی برای شرایط آزمایشگاه و شرایط واقعی محیطی خواهیم داشت:

$$\frac{\rho_{in\ situ}}{\rho_{Lab}} = \frac{a\rho_w\theta_{in\ situ}^{-m}}{a\rho_w\theta_{Lab}^{-m}} = \left(\frac{\theta_{in\ situ}}{\theta_{Lab}}\right)^{-m} = \left(\frac{D_{in\ situ}^{wet}}{D_{Lab}^{wet}}\right)^{-m} \quad (7)$$

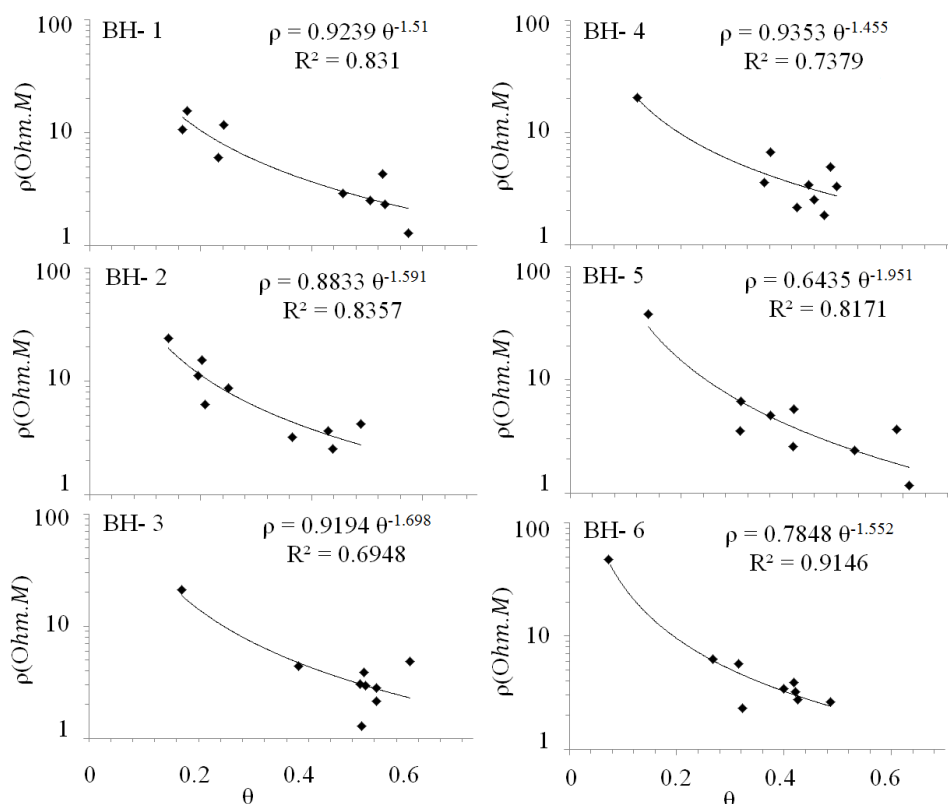
از این رو می‌توان مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌های تحت شرایط فشرده‌سازی در آزمایشگاه را با توجه به رابطه زیر به مقادیر مقاومت الکتریکی واقعی در شرایط محیطی تبدیل کرد:

$$\rho_{in\ situ} = \left(\frac{D_{in\ situ}^{wet}}{D_{Lab}^{wet}}\right)^{-m} \times \rho_{Lab} \quad (8)$$

در رابطه بالا  $\rho_{in\ situ}$  و  $\rho_{Lab}$  به ترتیب مقادیر مقاومت الکتریکی در شرایط محیطی و شرایط آزمایشگاه هستند.  $m$  پارامترهای تجربی می‌-

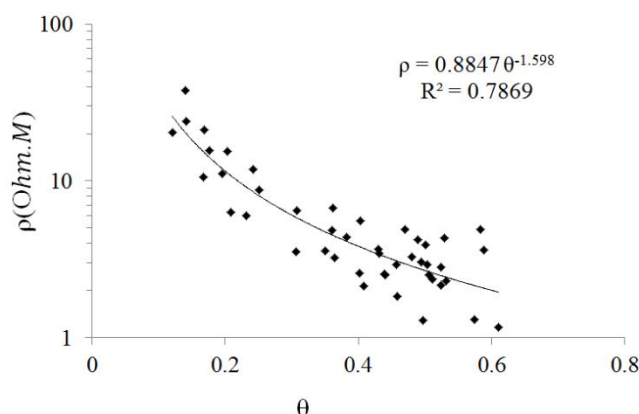
رابطه ۹ و مقادیر مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده بوسیله عملیات 3D ERT یا 2D ERT مقادیر محتوای آب حجمی متناظر و گسترش هندسی آنها قابل محاسبه می‌گردد.

قطعات ریز فلزی در آن مشاهده شد که نبود تناسب مقاومت الکتریکی (2.31 Ohm.M) را با مقدار محتوای آب حجمی اندازه‌گیری شده (۰,۳۲۲) توجیح می‌کند. مقدار محتوای آب حجمی تخمین زده شده برای این نمونه بوسیله رابطه ۹ معادل ۰,۵۴۸ می‌باشد. با استفاده از



شکل ۴- رابطه بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب حجمی داده‌های مربوط به هر کدام از گمانه‌های BH-1, BH-2, BH-3, BH-4, BH-5 و BH-6 بصورت جداگانه.

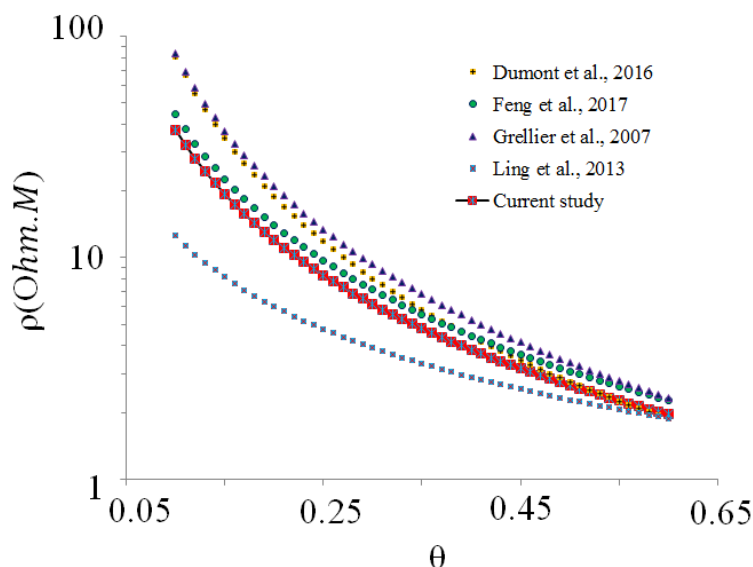
Fig. 4. The relation between the electrical resistivity and the volumetric water content of the data for each of the BH-1, BH-2, BH-3, BH-4, BH-5 and BH-6 boreholes separately.



شکل ۵- رابطه بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب حجمی داده‌های مربوط به ۵ گمانه BH-1, BH-2, BH-3, BH-4 و BH-5

Fig. 5. The relation between the electrical resistivity and the volumetric water content of the data for all the BH-1, BH-2, BH-3, BH-4 and BH-5 boreholes.





شکل ۶- مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق با چند مطالعه مشابه انجام شده در سال‌های اخیر.

Fig. 6. Comparing the results obtained in this study with several similar studies conducted in recent years.

جدول ۱- مقادیر محتوای آب حجمی تخمین زده شده بوسیله رابطه ۹ و مقادیر محتوای آب حجمی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای نمونه های تهیه شده از گمانه ۶-BH.

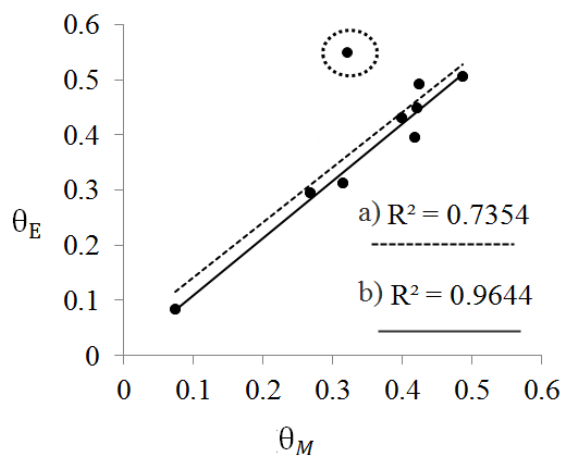
Table 1. Volumetric water content values estimated by relation 9 and volumetric water content values measured in laboratory for BH-6 borehole samples.

Depth (M)	$\rho$ (Ohm.M)	$\theta_M$	$\theta_E$
-1	47.85	0.074	0.082
-2	5.69	0.316	0.312
-3	6.28	0.268	0.293
-4	3.92	0.418	0.394
-5	3.41	0.399	0.43
-7	2.64	0.487	0.505
-9	2.75	0.425	0.492
-11	2.31	0.322	0.548
-13	3.2	0.421	0.447

که سبب شد تا مقادیر مقاومت الکتریکی حقیقی نقاط زیر سطحی در محل انباشت زباله‌ها با دقت بیشتری محاسبه شدند. همچنین تصحیحات اثر دما و فشرده سازی بر روی داده‌های مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه صورت گرفت. این موضوع در هنگام محاسبه مقادیر محتوای آب حجمی بوسیله مقادیر مقاومت الکتریکی سبب افزایش دقت محاسبه آنها گردید. نتایج این مطالعه وجود یک همبستگی بسیار خوب با ضریب  $R^2 = 0.7869$  بین مقاومت الکتریکی و محتوای آب حجمی زباله های انباشت شده را نشان می‌دهد.

### نتیجه گیری

در این پژوهش رابطه تجربی بین مقاومت الکتریکی و محتوای رطوبت نمونه‌های پسماند جامد شهری در یک جایگاه کوچک انباشت زباله در شهر لالی واقع در جنوب غرب ایران بررسی شد. ویژگی فیزیکی ۵۴ نمونه زباله بدست آمده از ۶ گمانه حفر شده با حداکثر ژرفای ۱۳ متر در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. بهره‌گیری از آرایه الکترونی دوقطبی - دوقطبی که در عملیات توموگرافی مقاومت الکتریکی کاربرد بسیار زیاد دارد، برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی زباله‌ها در آزمایشگاه و حفر تعداد مناسب گمانه‌ها برای تهیه نمونه های بیشتر از جمله کارهایی بود



شکل ۷- رابطه بین محتوای آب تخمین زده شده ( $\theta_E$ ) و محتوای آب اندازه گیری شده ( $\theta_M$ ) برای نمونه‌های مربوط به گمانه ۶-BH؛ (a) نمونه مربوط به عمق ۱۱ متری را شامل می‌شود:

$$(\theta_E = 0.9967\theta_M + 0.0426) \text{ و (b) نمونه مربوط به عمق ۱۱ متری حذف شده است: } (\theta_E = 1.0411\theta_M + 0.0039).$$

Fig. 7. The relationship between estimated water content ( $\theta_E$ ) and measured water content ( $\theta_M$ ) for samples related to BH-6 borehole; (a) It includes the sample related to the depth of 11 meters: ( $\theta_E = 0.9967\theta_M + 0.0426$ ) and (b) It does not include the sample related to the depth of 11 meters: ( $\theta_E = 1.0411\theta_M + 0.0039$ ).

#### منابع

- Aziz, H.A., Othman, O.M., Amr, S.S.A., 2013. The performance of electro-Fenton oxidation in the removal of coliform bacteria from landfill leachate. *Waste Management* 33(2)396–400.
- Audebert, M., Clément, R., Grossin-Debattista, J., Günther, T., Touze-Foltz, N., Moreau, S., 2014. Influence of the geomembrane on time-lapse ERT measurements for leachate injection monitoring. *Waste Management* 34(4), 780–790.
- Ayolabi, E.A., Oluwatosin, L.B., Ifekwuna, C.D., 2015. Integrated geophysical and physicochemical assessment of Olushosun sanitary landfill site, southwest Nigeria. *Arab Journal of Geosciences* 8(6), 4101–4115.
- André, L., Lamy, E., Lutz, P., Pernier, M., Lespinard, O., Pauss, A., Ribeiro, T., 2016. Electrical resistivity tomography to quantify in situ liquid content in a full-scale dry anaerobic digestion reactor. *Bioresource Technology* 201, 89–96.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, H., 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: Two pre-excitation surveys. *Environmental Geology* 39, 360–371.
- Benbelkacem, H., Bayard, R., Abdelhay, A., Zhang, Y., Gourdon, R., 2010. Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor. *Bioresource Technology* 101, 5206–5212.
- Chambers, J.E., Meldrum, P., Kuras, O., Ogilvy, R.D., Hollands, J., 2004. Investigation of a former quarry and landfill site using electrical resistivity tomography. In: Presented at the Near Surface 2004–10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, Netherlands.
- Chambers, J., Kuras, O., Meldrum, P., Ogilvy, R., Hollands, J., 2006. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics* 71, 231–239.
- Clément, R., Oxarango, L., Desclotres, M., 2011. Contribution of 3-D time lapse ERT to the study of leachate recirculation in a landfill. *Waste Management* 31(3), 457–467.
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computer Geosciences* 27, 1019–1029.
- Dumont, G., Pilawski, T., Dzaomuh-Lenieregue, P., Hiligsmann, S., Delvigne, F., Thonart, P., Robert, T., Nguyen, F., Hermans, T., 2016. Gravimetric water distribution assessment from geoelectrical methods (ERT and EMI) in municipal solid waste landfill. *Waste Management* 55, 129–140.
- Degueurce, A., Clément, R., Moreau, S., Peu, P., 2016. On the value of electrical resistivity tomography for monitoring leachate injection in solid state anaerobic digestion plants at farm scale. *Waste Management* 56, 125–136.

- De Donno, G., Cardarelli, E., 2017. Tomographic inversion of time-domain resistivity and chargeability data for the investigation of landfills using a priori information. *Waste Managements* 59, 302–315.
- Fisher, R., 2013. Landfill Mining, Key Issue Paper. International Solid Waste Association, Cranfield University, UK.
- Feng, S.J., Zhen-Bai, Z.B., Ben-Yi Cao, B.Y., Shi-Feng Lu, S.F., Ai, S.G., 2017. The use of electrical resistivity tomography and borehole to characterize leachate distribution in Laogang landfill, China. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 20811-20817.
- Guérin, R., Munoz, M.L., Aran, C., Laperrelle, C., Hidra, M., Drouart, E., Grellier, S., 2004. Leachate recirculation: moisture content assessment by means of a geophysical technique. *Waste Management* 24, 785–794.
- Grellier, S., 2005. Suivi hydrologique des centres de stockage de déchet-bioréacteurs par mesures géophysiques. Université Paris VI, Paris, France.
- Grellier, S., Reddy, K., Gangathulasi, J., Adib, R., Peters, A., 2006a. Electrical resistivity tomography imaging of leachate recirculation in orchard hills landfill. In: *Proceedings of the SWANA Conference*, Charlotte.
- Grellier, S., Robain, H., Bellier, G., Skhiri, N., 2006b. Influence of temperature on the electrical conductivity of leachate from municipal solid waste. *Journal of Hazard Material* 137, 612–617.
- Grellier, S., Reddy, K., Gangathulasi, J., Adib, R., Peters, C., 2007. Correlation between electrical resistivity and moisture content of municipal solid waste in bioreactor landfill. *Geotechnical Special Publication* 1–14.
- Imhoff, P., Reinhart, D., Englund, M., Guérin, R., Gawande, N., Han, B., Jonnalagadda, S., Townsend, T., Yazdani, R., 2007. Review of state of the art methods for measuring water in landfills. *Waste Management* 27, 729–745.
- Ling, C., Zhou, Q., Xue, Y., Zhang, Y., Li, R., Liu, J., 2013. Application of electrical resistivity tomography to evaluate the variation in moisture content of waste during 2 months of degradation. *Environmental Earth Science* 68(1), 57–67.
- Loke, M. H., 2016. *Geoelectrical Imaging 2D and 3D, GEOTOMO SOFTWARE*. Malaysia.
- Ogilvy, R., Meldrum, P., Chambers, J., Williams, G., 2002. The use of 3D electrical resistivity tomography to characterise waste and leachate distribution within a closed landfill, Thriplow, UK. *Journal of Environmental Engineering Geophysics* 7(1), 11–18.
- Šan, I., Onay, T.T., 2001. Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation. *Journal of Hazardous Material* 87, 259–271.