

Investigation and Detection of Leachate Pool Plume from Landfill Pond in Hamedan Landfill Using Electrical Resistivity Tomography and Vertical Electrical Sounding

YAVAR KARIMI¹, JALIL HELALI^{2*}, BABAK MAHDIAZAD³, AGHDAS KHODAKARAMI³, MOJGAN MIRZAEI⁴, SEYEDEH MARYAM MOHAMMADI⁵

1. Department of Groundwater, Faculty of Geology Sciences, Shahid Chamran University, Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Waste Management Organization of Hamedan Municipality, Hamedan, Iran.

4. Zندهood Environmental Research Center, Esfahan, Iran.

5. Department of Environment, Faculty of Basic Science, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

(Received: June. 23, 2021- Revised: Aug. 7, 2021- Accepted: Aug. 22, 2021)

ABSTRACT

Areas where waste is buried based on engineering design, which is one of the waste disposal methods. Leachate accumulation in landfills can adversely affect downstream groundwater resources by infiltrating the aquifer. In this study, we tried to investigate the potential of leachate penetration and the plume contamination caused by leachate pools inside and outside the landfill, respectively, using two methods of electrical resistivity tomography (ERT) and vertical electric sounding (VES). For this purpose, at a distance of 60 and 580 meters from the leachate basin, VES data were collected with a transmitter length of 200 meters and ERT with a length of 120 meters and electrode distances of 2 meters. Examination of geotechnical and VES data in the study area shows an impermeable layer with an alternation of clay-madstone and calcareous-marl layers at a depth of about 10-15 meters the percentage of the clay were increased. The ERT data in profile number 1 shows that at a distance of 32-76 meters from the beginning of the profile at deptt of 9 meters there are areas with low electrical resistivity, which indicates the area of leachate penetration, but in the other section of profile leachate deep penetration are not visible due to the Madstone and Siltstone impermeable layers. However, in the ERT data in profile number 2, the presence of an impermeable layer prevents the infiltration of leachate to the downstream and lower depths, which indicates the proper selection of the landfill. Therefore, contrary to what can be seen in the VES data, the study area is not homogeneous in terms of permeability to leachate in the two dimensions of ERT, but the presence of an impermeable layer prevents the deep transfer and infiltration of leachate to the aquifer.

Keywords: Landfill, Electrical Resitivity Tomography, Vertical Electrical Sounding, Leachate.

بررسی و ردیابی پولوم آلودگی ناشی از حوضچه شیرابه در مدفن زباله همدان با استفاده از توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و سونداژ الکتریکی قائم

یاور کریمی^۱، جلیل هلالی^{۲*}، بابک مهدی آزاد^۳، اقدس خداکرمی^۴، مژگان میرزایی^۴، سیده مریم محمدی^۵

۱. گروه هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. سازمان مدیریت پسماند شهرداری همدان، همدان، ایران.

۴. مرکز تحقیقات زیست محیطی زنده رود، اصفهان، ایران.

۵. گروه محیط زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۵/۳۱)

چکیده

محل دفن زباله اصطلاحاً مدفن زباله یا پسماند نامیده می‌شود که یکی از روش‌های دفع استاندارد زباله محسوب می‌گردد. تجمع شیرابه در مدفن زباله می‌تواند از طریق نفوذ در آبخوان بر منابع آب‌های زیرزمینی پایین دست تأثیرات منفی بگذارد. در این مطالعه سعی گردید با استفاده از فناوری مقاومت ویژه الکتریکی با دو روش سونداژ الکتریکی قائم و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به ترتیب پتانسیل نفوذ شیرابه و پولوم آلودگی ناشی از حوضچه شیرابه در داخل و بیرون مدفن زباله مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور، در فاصله ۶۰ و ۵۸۰ متری از حوضچه شیرابه اقدام به برداشت داده‌های سونداژ الکتریکی قائم با طول فرستنده ۲۰۰ متر و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به طول ۱۲۰ متر و فواصل الکترودی ۲ متری گردید. بررسی داده‌های ژئوتکنیکی و سونداژ الکتریکی قائم منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده وجود لایه نفوذناپذیر با تناوبی از لایه‌های رسی-مادستونی و آهکی-مارنی است که در اعماق حدود ۱۵-۱۰ متری درصد رُس بیشتر می‌شود. بررسی داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در پروفیل شماره ۱ نشان می‌دهد در فاصله ۳۲ تا ۷۶ متری از ابتدای پروفیل منطقه‌ای با مقاومت الکتریکی پایین تا عمق حدود ۹ متری وجود دارد که نشان‌دهنده ناحیه نفوذ شیرابه است ولی در بخش‌های دیگر پروفیل نفوذ عمقی شیرابه به دلیل لایه نفوذناپذیر مادستونی و سیلت‌استونی دیده نمی‌شود. این در حالی است که در پروفیل شماره ۲ وجود لایه نفوذناپذیر مانع از انتقال شیرابه به پایین دست و اعماق پایین‌تر شده است که این امر نشان‌دهنده انتخاب مناسب محل دفن پسماند است. بنابراین برخلاف آنچه که در برداشت‌های تک‌بعدی دیده می‌شود منطقه مورد مطالعه در حالت دوبعدی از نظر نفوذپذیری به شیرابه همگن نیست ولی وجود لایه نفوذناپذیر مانع از انتقال عمقی شیرابه به آبخوان شده است.

واژه‌های کلیدی: مدفن زباله، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، سونداژ الکتریکی قائم، شیرابه.

مقدمه

وجود زباله و پسماندهای ناشی از فعالیت‌های انسان می‌تواند بر محیط زیست تأثیر منفی بگذارد که خود را در آلودگی‌های هوا، آب و خاک نشان می‌دهد. منشاء این آلودگی‌ها را می‌توان در بخش‌های متعدد صنعتی، فعالیت‌های شهری، کشاورزی و محل دفن پسماندها یا مدفن زباله^۱ جستجو کرد. از دهه‌های گذشته تلاش شده است زباله‌های شهری به صورت منسجم و منظم مدیریت شوند. در این راستا بخش پسماند شهرداری‌ها مکلف به استفاده از سازه‌های مدفن زباله شده‌اند که یکی از روش‌های دفع

استاندارد زباله محسوب می‌شود (ANZECC, 1994)؛ (Tchobanoglous and Kreith, 2002). وجود این سازه‌ها در مدیریت بهینه و کاهش آثار زیست‌محیطی زباله‌های شهری بسیار مهم است. با توجه به تنوع و گوناگونی زباله‌های دفن شده در مدفن زباله و فسادپذیری بالای آن‌ها، در صورت اجرا و طراحی نامناسب، این سازه سودمند مدیریتی، تبدیل به خطری زیست-محیطی خواهد شد (United Kingdom Department of Environment, 1991). یکی از بخش‌های مهم مدفن زباله، بخش خروجی شیرابه است که شامل مواد شیمیایی مختلف، مواد آلی، فلزات سنگین، مواد غیر آلی و باکتری‌های آلوده هستند (Halim

* نویسنده مسئول: jalilhelali@gmail.com

در بحث مدفن زباله و شیرابه به برداشت‌های تک‌بعدی و نمونه-گیری‌های نقطه‌ای معطوف شده است (Kazemi *et al.*, 2012)؛ که عمده هدف آن‌ها به تاثیر شیرابه بر درختان جنگلی، تعیین پتانسیل آلودگی مدفن زباله، مدل‌سازی انتقال آلودگی ناشی از نشت شیرابه لندفیل، تاثیر بر کیفیت آب زیرزمینی و انتشار پولوم آلودگی می‌توان اشاره نمود.

استفاده از تکنولوژی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی^۱ و سونداژ الکتریکی قائم^۲ در بحث آلودگی آب‌های زیرزمینی در ایران به مطالعات محدودی معطوف شده است (Karimi, 2011؛ Nakhaei *et al.*, 2012) ولی در مطالعات دیگر شناسایی تاقدیس (Naseri *et al.*, 2008)، زمین‌لغزش‌ها (Hafizi *et al.*, 2010)، تشخیص انتشار زه‌آب اسیدی (Moradzadeh *et al.*, 2012) و ارزیابی طرح‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب (Rahmani, 2016؛ Jevinani *et al.*, 2018؛ Sharifi *et al.*, 2018) انجام شده است. یکی از خلاءهای موجود که در ایران وجود دارد عدم استفاده از این فناوری در مطالعات انتشار آلودگی حاصل از شیرابه مدفن زباله است هر چند در مطالعات خارجی به وفور انجام شده است (Wilkinson *et al.*, 2001؛ Slater *et al.*, 2002؛ Delaney *et al.*, 2001؛ Sainato *et al.*, 2012؛ Abdullahi *et al.*, 2010؛ Ugbor *et al.*, 2021؛ Schmidt-Hottenberger *et al.*, 2014). مطالعه Omolayo and Tope (2014) با استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و آنالیز شیمیایی مشخص شده است درصد مواد جامد و نیترات در آب‌های زیرزمینی بیشتر از حد مجاز بوده است ولی در مطالعه Wijesekara *et al.* (2014) در سریلانکا با روش مقاومت ویژه الکتریکی مشخص شده است که مسیر و جریان زیرسطحی پساب و شیرابه در آبخوان پایین دست وجود نداشته و هیچ پولوم آلودگی دیده نمی‌شود. در مطالعه Ganiyu *et al.* (2015) ناحیه آلوده شده با نیترات در جنوب غرب نیجریه نشان داده است که هدایت الکتریکی پولوم آلودگی بیشتر از مناطقی بوده است که آلوده نشده‌اند. بنابراین هدف این مطالعه بررسی گستره نفوذ شیرابه حاصل از مدفن زباله در پایین‌دست حوضچه شیرابه با فواصل مختلف در داخل و خارج مدفن زباله است تا بتوان دامنه گسترش شیرابه در آبخوان را به صورت تک-بعدی و دو بعدی مورد تحلیل قرار داد. لازم به یادآوری است که کاربرد روش ژئوالکتریک یا مقاومت ویژه الکتریکی در مناطق با لایه‌های سطحی رُسی، نمکی، سنگلاخی و خیلی خشک با ناهمواری خیلی زیاد محدود می‌شود.

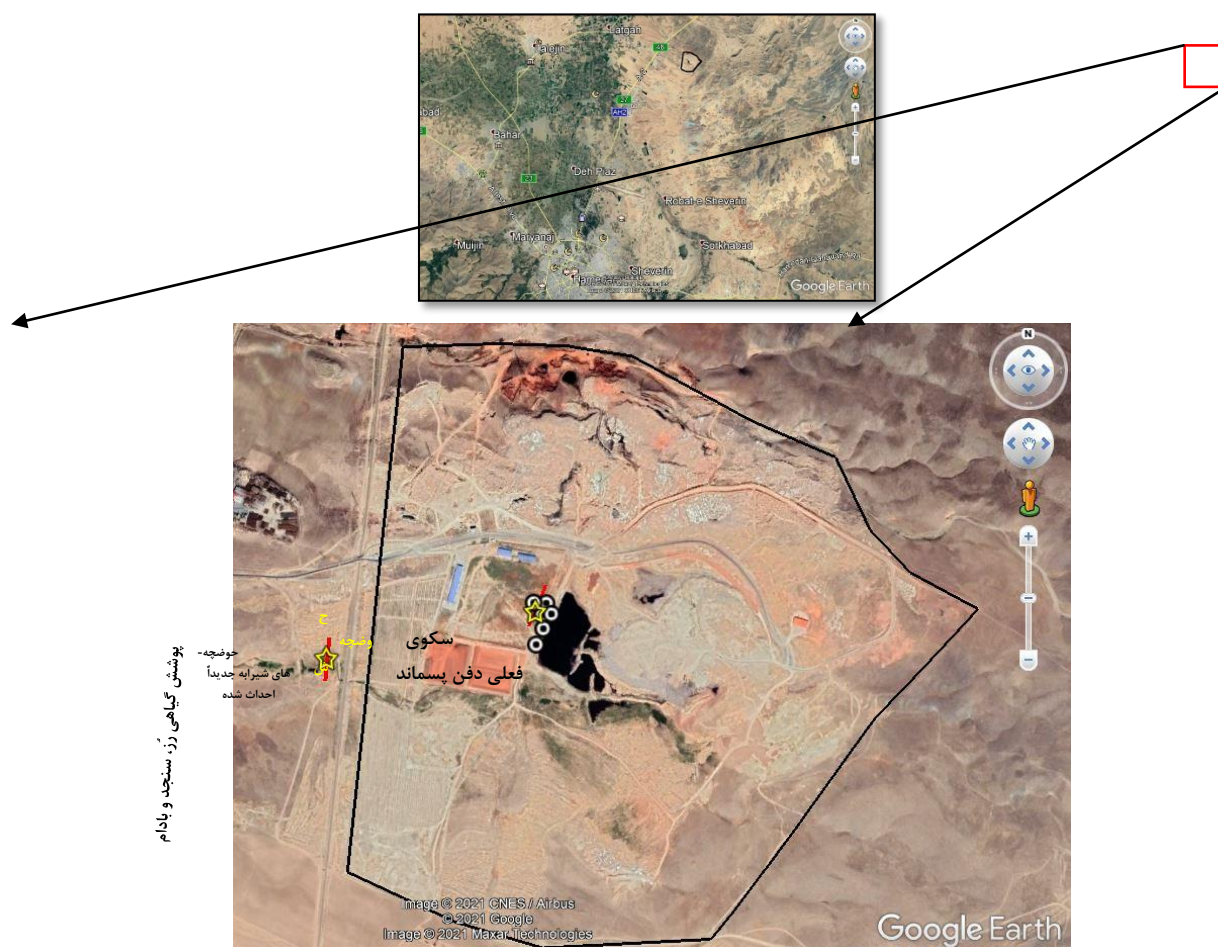
نامناسب می‌تواند آب‌های سطحی و زیرزمینی را آلوده نموده و بر تنوع زیستی و زنجیره غذایی تاثیر بگذارد (Gajski *et al.*, 2012) که در نتیجه به عنوان عامل تهدید کننده محیط زیست و انسان تلقی شود (Ben Salem *et al.*, 2014؛ Bernard *et al.*, 1997). شیرابه حاصل از دفن پسماند می‌تواند به‌عنوان آلاینده خاک و آب‌های زیرزمینی باشد (Weber *et al.*, 2011). رفع آلودگی آب زیرزمینی بسیار پرهزینه و فرآیندی طولانی است و اغلب زمانی آلودگی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آبخوان تقریباً غیرممکن می‌گردد (Yazdani and Mansourian, 2020). با ایجاد محل‌های دفن مهندسی-بهداشتی و بهره‌برداری مناسب از آن‌ها می‌توان جلوی مشکلات ناشی از محل‌های دفن موجود را گرفت. به این منظور سازمان محیط زیست پروتکل‌هایی را جهت مدیریت بهینه مدفن زباله تدوین کرده است (Department of Environment of Iran, 2020). در عمده مطالعات مکان‌یابی محل دفن پسماند ملاحظات زیست‌محیطی و زمین‌شناختی در نظر گرفته می‌شود. بررسی‌های میدانی این نوع مطالعات عمدتاً به نمونه‌گیری‌های نقطه‌ای با تعداد کم و پرهزینه محدود (Radulescu *et al.*, 2007) و نتایج به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داده می‌شود (Frid *et al.*, 2008). برای برطرف نمودن این نقیصه و شناخت دقیق محل مورد مطالعه نیاز به تعداد نقاط برداشت زیاد و همچنین برداشت‌های دو بعدی خواهد بود تا مشخص کند که منطقه از نظر نفوذپذیری به شیرابه همگن می‌باشد یا خیر. در این زمینه می‌توان از تکنولوژی‌های پیشرفته، نوین، غیرتخریبی و در عین حال کم هزینه مثل روش‌های ژئوفیزیکی به خصوص روش مقاومت ویژه الکتریکی استفاده نمود (Arora *et al.*, 2007؛ Naudet, 2003؛ Bichet *et al.*, 2016؛ Vargemezis *et al.*, 2008؛ Grellier *et al.*, 2014؛ Genelle *et al.*, 2014؛ al., 2015). محتوای یونی نسبتاً بالای شیرابه باعث می‌شود مقاومت الکتریکی شیرابه نسبت به محیط پیرامون کمتر شده (Ugbor *et al.*, 2002؛ Kearey *et al.*, 2013؛ Belghazal *et al.*, 2013) و ناحیه آلوده شده را ردیابی نمود. در علم ژئوفیزیک با اندازه‌گیری میدان‌های فیزیکی بر روی سطح زمین به چگونگی عملکرد پدیده‌های فیزیکی و توزیع خصوصیات فیزیکی درون زمین پی برده و تصویری از آن‌ها را بازسازی می‌کنند. مزیت اصلی این روش مطالعاتی، کم هزینه بودن و در عین حال بررسی کامل و با دقت پدیده مورد نظر به خصوص ساختار زمین‌شناختی و وضعیت محل دفن پسماند است. بررسی‌های انجام شده در ایران

مواد و روش‌ها

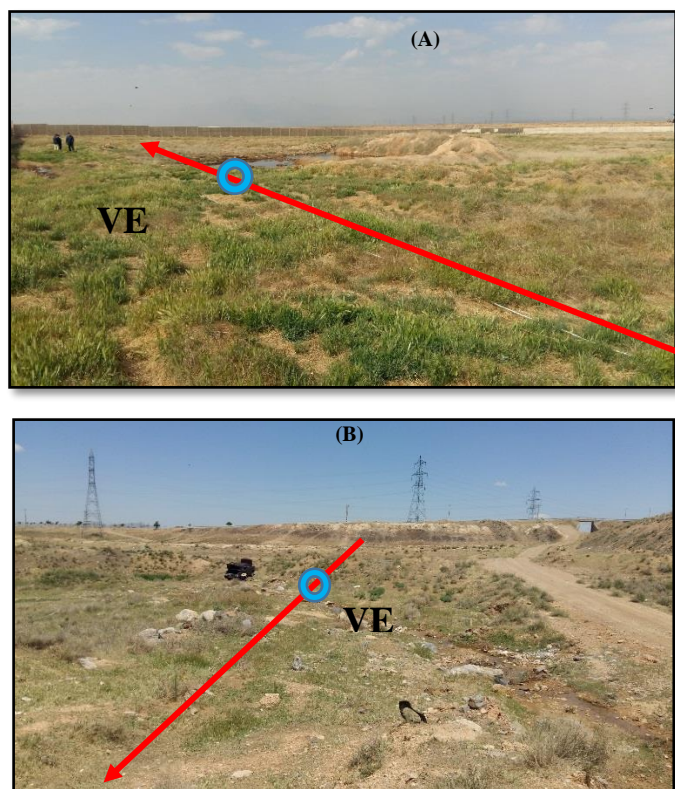
محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در بخش شمالی شهر همدان در مسیر همدان-تهران و بخش جنوب شرقی پلیس راه همدان-تهران واقع شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در تصویر ماهواره‌ای در شکل (۱) مشخص شده است. سایت مدفن زباله در محدوده ۳۴/۹۵۹۲۴۰ تا ۳۴/۹۷۲۳۸۴ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸/۶۱۱۸۳۵ تا ۴۸/۶۳۰۶۶۳ درجه شرقی به مساحت تقریبی ۲۳۸ هکتار قرار گرفته است. محل برداشت‌های سونداژ الکتریکی قائم (VES) و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) به همراه رخ‌نمون‌هایی از نشت شیرابه نیز در شکل (۱) نشان داده شده است. در بخش جنوب غربی حوضچه شیرابه قدیمی، حوضچه شیرابه رُسی با زیرسازی ژئوممبران جدیداً احداث شده دیده می‌شود. سونداژهای VES و ERT در بخش غربی و پایین دست حوضچه شیرابه قدیمی در راستای شمالی

جنوبی و به فواصل ۶۰ و ۵۸۰ متری از حوضچه قرار دارند که مشخصات مکانی آن‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. از نظر زمین‌شناسی محل مورد مطالعه در زون سنندج-سیرجان قرار گرفته است که متعلق به دوران‌های سنوزوئیک و مزوزوئیک و دوره‌های ژوراسیک، کرتاسه، ترشیاری و کواترنری می‌باشد. از نظر لیتولوژیکی این منطقه از سازندهای آهکی مارنی، ماسه‌سنگ‌های هوازده و رُس بوده که به طور کلی ترکیبات رُسی نیز در آن دیده می‌شود. مطالعات انجام شده ژئوتکنیک در این منطقه نشان می‌دهد لیتولوژی محل تا عمق ۲۰ متری از نوع لایه‌های لای ماسه‌دار همراه با شن می‌باشد (Sanjesh Ekbatan Consultant Engineering, 2017). پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه عمدتاً از نوع گیاهان خودرو یکساله است ولی در بخش پایین دست نیز پوشش گیاهی رُز، سنجد و بادام کشت شده است. در شکل ۲ نمایی از موقعیت‌های سونداژهای VES و ERT نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سایت دفن پسماند همدان (خط مشکی: محدوده مدفن زباله؛ ستاره‌های زرد: برداشت VES؛ خطوط قرمز: برداشت‌های ERT، دایره-های سفید: رخ‌نمون‌های تجمع شیرابه)



شکل ۲- نمایی از محل برداشت‌های سونداژهای الکتریکی قائم (VES) و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)، A، پروفیل شماره ۱، B پروفیل شماره ۲

اندازه‌گیری ولتاژ ۱ تا میکروولت، شدت جریان تا ۱ میکروآمپر و توان خروجی ۵۰۰ وات با قابلیت حذف نوفه‌ها به‌طور اتوماتیک می‌باشد. نوفه‌ها یا پارازیت‌ها در واقع سیگنال‌هایی به جز هدف مورد مطالعه هستند که به وسیله فیلترهای دیجیتال حذف می‌شوند.

روش اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی

اساس اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در زمین بر پایه توزیع پتانسیل‌ها در یک محیط همگن است. در کاوش‌های الکتریکی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی معمولاً از یک ترکیب چهار قطبی یا چهار الکترودی AMNB استفاده می‌شود. بدین ترتیب که جریانی توسط دو الکترودی A و B به زمین فرستاده شده، سپس اختلاف پتانسیلی که در اثر عبور این جریان بین دو الکترودی M و N حاصل می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. آنگاه با استفاده از رابطه زیر مقدار مقاومت ویژه بدست می‌آید:

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (\text{رابطه ۱})$$

مقاومت ویژه الکتریکی که بدین طریق بدست می‌آید را مقاومت ویژه ظاهری می‌گویند. در رابطه (۱) ΔV برحسب میلی‌ولت، I برحسب میلی‌آمپر و K برحسب متر یا واحد طول بیان می‌گردد و بدین ترتیب مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی پروفیل‌های توموگرافی مقاومت ویژه برداشت شده

	انتها			ابتدا		
	Z	Y	X	Z	Y	X
پروفیل ۱	۱۸۰۰	۳۸۷۱۷۸۰	۲۸۲۴۷۴	۱۸۰۱	۳۸۷۱۸۹۰	۲۸۲۵۲۵
پروفیل ۲	۱۷۸۴	۳۸۷۱۶۵۱	۲۸۱۹۰۸	۱۷۸۶	۳۸۷۱۷۷۱	۲۸۱۹۲۳

جدول ۲- موقعیت سونداژهای الکتریکی قائم و رخ‌نمون‌های تجمع شیرابه

	Z	Y	X
سونداژ ۱	۱۸۰۰	۳۸۷۱۸۲۰	۲۸۲۴۹۴
سونداژ ۲	۱۷۸۵	۳۸۷۱۷۱۳	۲۸۱۹۱۳
رُخ‌نمون ۱	۱۸۰۱	۳۸۷۱۸۳۲	۲۸۲۴۹۶
رُخ‌نمون ۲	۱۸۰۱	۳۸۷۱۷۷۴	۲۸۲۵۱۷
رُخ‌نمون ۳	۱۸۰۲	۳۸۷۱۸۱۴	۲۸۲۵۴۱
رُخ‌نمون ۴	۱۸۰۱	۳۸۷۱۸۱۱	۲۸۲۵۱۵
رُخ‌نمون ۵	۱۸۰۱	۳۸۷۱۸۴۲	۲۸۲۵۲۹
رُخ‌نمون ۶	۱۸۰۰	۳۸۷۱۸۴۶	۲۸۲۴۹۱

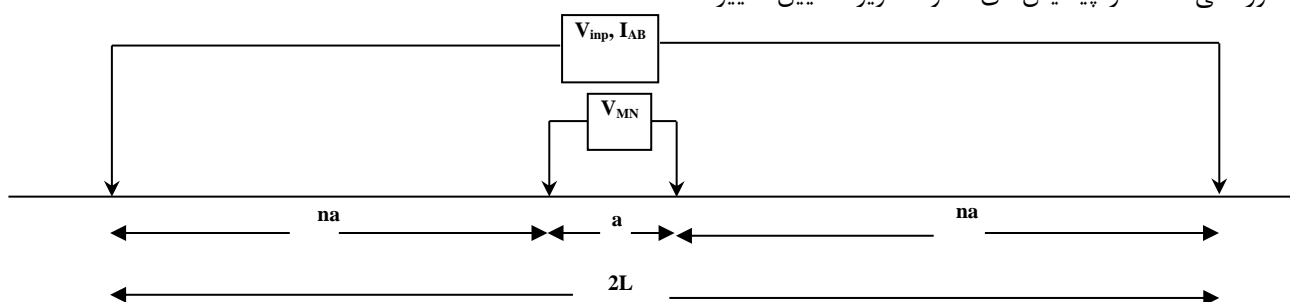
تجهیزات ژئوفیزیکی مورد استفاده

با توجه به اینکه در این مطالعه نیاز به دستگاه ژئوالکتریک با قابلیت برداشت توموگرافی بود، از دستگاه ژئوالکتریک مدل RMT5 ساخت شرکت زمین سولار سیستم استفاده شد. این دستگاه علاوه بر داشتن قابلیت برداشت توموگرافی، دارای دقت

مقاومت ویژه ظاهری بر حسب عمق یا به طور جانبی است. در این مطالعات از دو روش شلومبرژه برای برداشت‌های سونداژ الکتریکی قائم (VES) و ونر برای برداشت‌های دوبعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) توزیع مقادیر مقاومت ویژه ظاهری استفاده شده است. در ادامه شرح مختصری از روش‌های مورد استفاده در این مطالعات آورده شده است.

آرایه شلومبرژه^۲

این سیستم اندازه‌گیری، رایج‌ترین آرایه در برداشت‌های مقاومت ویژه سونداژ الکتریکی قائم است. در این روش الکترودها در امتداد یک خط قرار می‌گیرند و نقطه O مرکز مشترک خطوط AB و MN است. معمولاً نسبت AB/MN در روش شلومبرژه بزرگ انتخاب می‌گردد. به طور کلی، نتایج سونداژهای الکتریکی را طوری ارائه می‌دهند که ρ_a تابعی از طول OA یا AB/2 باشد و نمودار مربوط نیز در سیستم مختصات لگاریتمی- لگاریتمی ترسیم می‌گردد. در این روش فاصله بین الکترودهای پتانسیل (MN) ثابت بوده و با افزایش فاصله الکترودهای جریان (AB)، عمق کاوش نیز افزایش می‌یابد. شکل (۳) نحوه چیدمان الکترودهای جریان و پتانسیل را در این روش نشان می‌دهد.



شکل ۳- آرایه شلومبرژه جهت اندازه‌گیری مقاومت ویژه

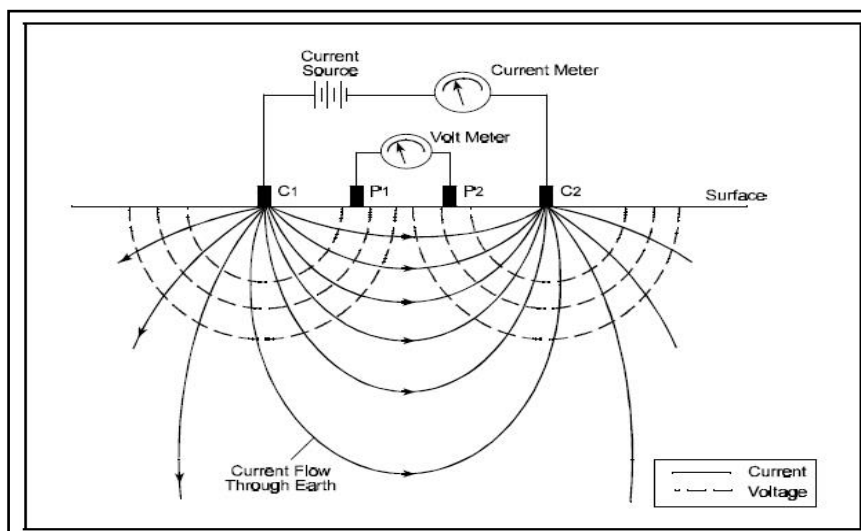
آرایه ونر

این آرایش برای اولین بار توسط یک گروه تحقیقاتی از دانشگاه بیرمنگام به کار گرفته شد. بسیاری از پیمایش‌های مقاومت ویژه به خصوص پیمایش‌های دوبعدی توموگرافی توسط این آرایش صورت می‌گیرد. این آرایش به تغییرات قائم در مقاومت زیرسطحی نسبتاً حساس است. به طور کلی آرایش ونر توان آشکارسازی تغییرات قائم (ساختارهای افقی) را دارد، اما برای شناخت تغییرات افقی (ساختارهای باریک قائم) ضعیف می‌باشد. عامل دیگری که باید در رابطه با خصوصیات آرایش‌ها بررسی شود قدرت سیگنال است که نسبت عکس با فاکتور هندسی مورد استفاده برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری دارد. آرایش ونر

کمترین فاکتور هندسی $(2\pi a)$ (a فاصله بین الکترودها) و قوی-ترین قدرت سیگنال را در مقایسه با سایر آرایش‌ها دارد. قدرت سیگنال بالا فاکتوری مناسب برای پیمایش در مناطق با نوفه بالا به حساب می‌آید. در این آرایه فاصله بین الکترودها برابر می‌باشد، این آرایه بیشتر برای پروفایلینگ یا توموگرافی استفاده می‌شود. در این آرایه نسبت به روش شلومبرژه، خطای ناشی از کوپل الکترودهای پتانسیل بیشتر است (شکل ۴). در روش توموگرافی دوبعدی، فرض می‌شود که مقاومت ویژه زمین تنها در دو جهت قائم و افقی (در امتداد خط پیمایش) تغییر می‌کند و مقاومت ویژه در جهت افقی (عمود بر خط پیمایش) بدون تغییر باقی می‌ماند.

پیمایش می‌باشد. شبه‌مقاطع مقاومت ویژه ظاهری به عنوان تابعی از مکان و فاصله الکترودی، توصیف می‌شوند. شبه‌مقاطع مقاومت ویژه یک تصویر اولیه از زمین‌شناسی زیرسطحی فراهم می‌کند. یک وارون‌سازی دو بُعدی از داده‌های اندازه‌گیری شده به منظور تفسیر نهایی لازم است. این فرآیند مقاومت ویژه ظاهری و عمق-های غیرواقعی را به یک مدل دو بُعدی تبدیل می‌کند.

در بسیاری از جاها، به ویژه برای پیمایش بر روی توده‌های زمین-شناسی توسعه یافته این فرض معقول می‌باشد و به طور کلی در حال حاضر، پیمایش‌های دو بُعدی بیشترین سازش عملی، اقتصادی را از نظر نتایج بسیار دقیق کسب شده و پائین آوردن هزینه‌های پیمایش دارند. اولین نتیجه کیفی یک پیمایش مقاومت ویژه دو بُعدی یک شبه‌مقطع در امتداد نیم‌رخ مورد



شکل ۴- آرایش الکترودهای جریان و پتانسیل در آرایه ورنر و نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل جهت اندازه‌گیری مقاومت ویژه

شده است. در این تفسیرها تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در راستای قائم تحلیل شده و لیتولوژی منطقه مورد مطالعه به صورت تک بُعدی نمایش داده می‌شود. به منظور تفسیر داده‌های توموگرافی بعد از برداشت داده‌ها و حذف داده‌های پرت، داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده به منظور ترسیم اولیه شبه‌مقاطع مقاومت ویژه وارد نرم‌افزار Res2Dinv شدند. قبل از مدل‌سازی، داده‌های پرت از محاسبات حذف شدند. مدل‌سازی عمدتاً به دو صورت مستقیم و معکوس انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا با مدل‌های زمینی دو بُعدی با استفاده از روش اجزای محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد که مدل اولیه آن بسته به تجارب کارشناس بهبود می‌یابد. در روش معکوس سازی^۱ بر خلاف روش مستقیم با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل زمین برآورد می‌شود. در این روش ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز است (Loke, 2006, 1997). برای بهبود مدل اولیه عمدتاً از دو روش کمترین مربعات گوس-نیوتن و روش شبه نیوتن استفاده می‌شود. در روش گوس-نیوتن برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (\text{رابطه ۲})$$

برداشت داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

با توجه به احتمال نشست شیرابه در پایین دست، پروفیل شماره ۱ در بخش غربی به طول ۱۲۰ متر به فاصله ۶۰ متری از حوضچه شیرابه قدیمی (داخل سایت مدفن زباله) و پروفیل شماره ۲ به فاصله ۵۸۰ متری از حوضچه شیرابه قدیمی به طول ۱۲۰ متر به فواصل الکترودی ۲ متر برداشت شد. انتخاب این دو پروفیل بر اساس وجود شیرابه در سطح زمین بوده است. در این مطالعه از آرایه ورنر جهت برداشت توموگرافی مقاومت ویژه استفاده شد (Loke, 2006). محل برداشت توموگرافی به گونه‌ای انتخاب شد که نمونه تیپیک از داخل و خارج مدفن زباله باشد.

برداشت سونداژهای الکتریکی قائم

این نوع برداشت به صورت تک بُعدی بوده و برای شناخت سنگ کف، لیتولوژی و ساختار زمین‌شناسی به کار می‌رود. در این مطالعه در بخش میانی هر پروفیل توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی از سونداژ الکتریکی قائم با طول فرستنده ۲۰۰ متر استفاده گردید.

تفسیر داده‌ها

تفسیر داده‌های سونداژ الکتریکی قائم توسط مدل IPI2Win انجام

در این بخش تحلیل دوبعدی و تفکیک لایه‌بندی سونداژهای الکتریکی قائم در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید لیتولوژی سونداژ شماره ۱ از سطح زمین تا عمق ۲/۶ متری از رُس (با مقاومت ویژه الکتریکی ۲/۱۹ تا ۳/۰۲ اهم‌متر)، تا عمق حدود ۱۵ متری از مارن و رُس (مقاومت ویژه الکتریکی ۹/۲۷ اهم‌متر)، تا عمق حدود ۱۶/۴ متری از سیلت و مادستون (با مقاومت ویژه الکتریکی ۱۴۱ اهم‌متر)، تا عمق حدود ۶۸ متری از آهک مارنی و مادستون (مقاومت ویژه الکتریکی ۲۱/۱ اهم‌متر) و تا عمق حدود ۱۷۴ متری از مادستون و سیلت به همراه آهک (مقاومت ویژه الکتریکی ۳۵۵ اهم‌متر) تشکیل شده است (شکل ۵A). لیتولوژی سونداژ شماره ۲ نشان می‌دهد تا عمق ۲/۶ متری از خاک سطحی (مقاومت ویژه الکتریکی ۵/۷۴ تا ۸۹/۶ اهم‌متر)، تا عمق حدود ۱۴/۹ متری تناوبی از لایه‌های رُسی و آهکی مارنی (مقاومت ویژه الکتریکی ۹/۱۷ تا ۶۹/۴ اهم‌متر)، تا عمق حدود ۵۲ متری از آهک و مادستون (مقاومت ویژه الکتریکی ۱۳۰ اهم‌متر)، و تا عمق حدود ۱۵۰ متری از رُس (مقاومت ویژه الکتریکی ۵/۵۲ اهم‌متر)، تشکیل شده است (شکل ۵B).

سونداژهای توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

در این بخش شبه‌مقاطع هم‌مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها و مقطع حل وارون تحلیل گردیده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد در پایین‌دست پروفیل شماره ۱ در فاصله ۴۰ متری از ابتدای پروفیل و به فاصله ۳ متر پایین‌تر رخ‌نمون و تجمع شیرابه دیده می‌شود (شکل ۶). بررسی پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی که در فاصله ۶۰ متری از حوضچه شیرابه قدیمی قرار دارد نشان می‌دهد در فاصله ۳۲ تا ۷۶ متری منطقه‌ای با مقاومت الکتریکی پایین تا عمق حدود ۹ متر دیده می‌شود که نشان‌دهنده ناحیه نفوذ شیرابه است و در عین حال سطح ایستایی در عمق ۳ متری تشخیص داده می‌شود. در فاصله ۷۵ تا ۱۰۰ متری نفوذ شیرابه کمتری قابل مشاهده است ولی در فاصله ۵۸ تا ۷۰ متری غلظت بیشتر شیرابه قابل تشخیص است (منطقه نقطه‌چین سیاه). لایه زیرین این پروفیل از نوع مادستونی و سیلت‌استونی بوده (رنگ زرد، قهوه‌ای و قرمز) که نسبت به نفوذ شیرابه نفوذپذیری کمتری دارد که در سمت انتهایی پروفیل در اعماق کم عمق‌تر واقع شده و واضح‌تر دیده می‌شود (شکل ۶). بنابر نتایج به دست آمده در برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی پتانسیل نفوذپذیری پروفیل شماره ۱ بر خلاف آنچه که در برداشت سونداژ الکتریکی قائم شماره ۱ به دست آمده است همگن نیست.

که در آن d بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها، g بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و محاسباتی، u عامل کنترلی، F تابع فیلترهای افقی و عمودی، J ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی و J^T ترانزپوز ماتریس مشتقات جزئی است. در این روش ماتریس ژاکوبین در هر تکرار محاسبه می‌شود که این امر باعث افزایش میزان محاسبات و وقت‌گیر بودن مدل‌سازی می‌گردد. در روش‌های شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به‌روزرسانی شده اجتناب می‌شود به طوری که برای تکرارهای بعدی ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین J_0 برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد مشتقات جزئی می‌تواند به تحلیلی با استفاده از مدل زمین همگن به عنوان مدل اولیه محاسبه شود. در روش شبه‌نیوتن از معادله به‌روزرسانی به فرم زیر استفاده می‌شود:

$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن

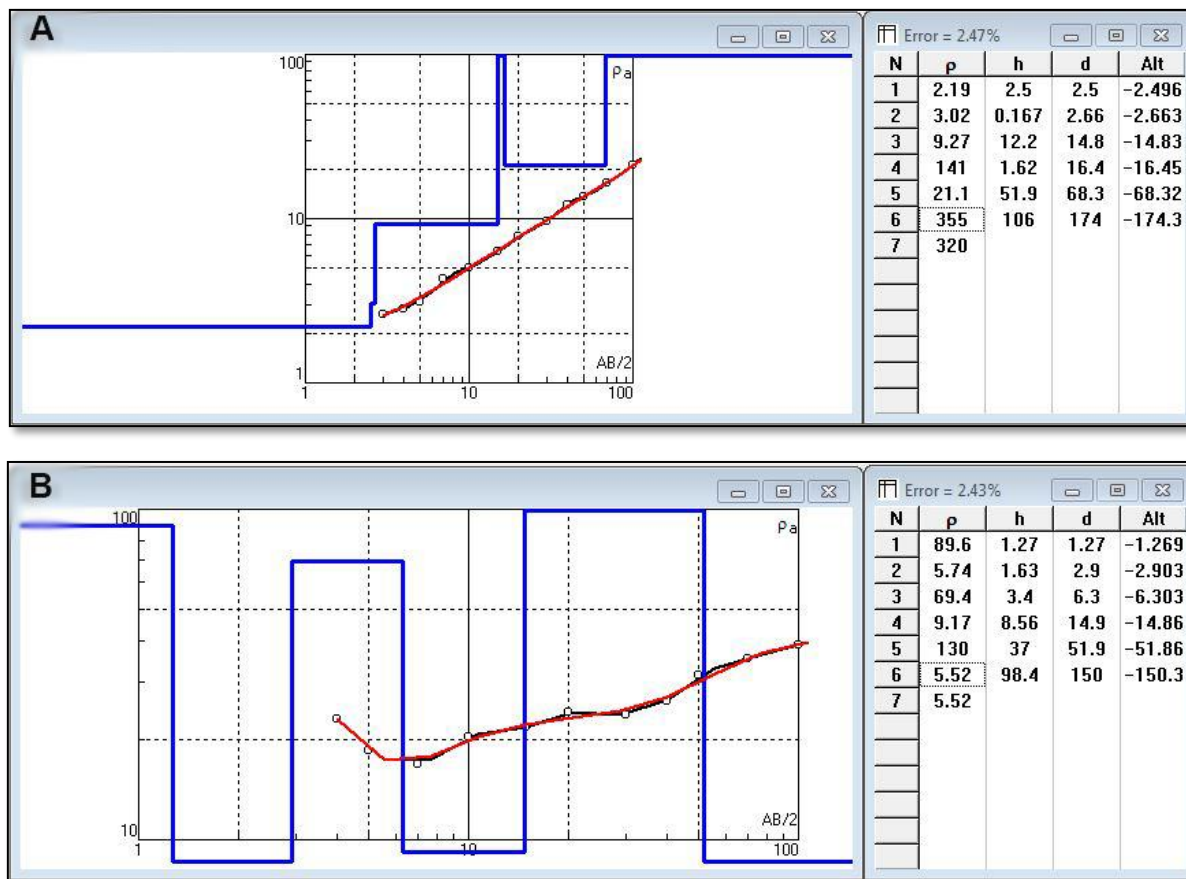
$$u_i = \frac{(\Delta y_i - B_i P_i)}{P_i^T P_i} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (\text{رابطه ۵})$$

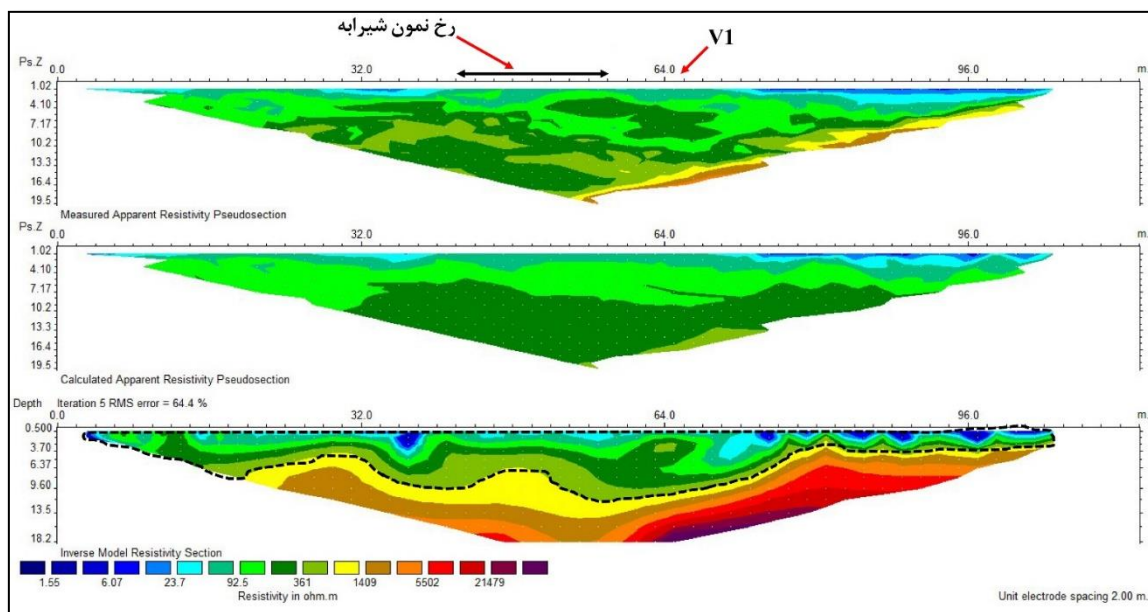
که در آن‌ها، y_i پاسخ مدل برای i امین تکرار، B_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای $(i+1)$ امین تکرار، با استفاده از ماتریس ژاکوبین B_i و بردار انحراف است (Loke, 2006). با توجه به معادلات فوق به دلیل عدم محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، روش شبه‌نیوتن در مقایسه با روش گوس-نیوتن روش سریع‌تری است و در حل وارون بیشتر از این روش استفاده می‌شود. در مدل‌سازی پروفیل‌های برداشت شده از روش شبه‌نیوتن با فیلترهای افقی و عمودی یکسان استفاده شد. به‌طور کلی، برای هر پروفیل برداشت شده، ابتدا شبه‌مقطع هم‌مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده خام، بدون هیچ‌گونه دخل و تصرفی تهیه شد (مقاطع بالایی). سپس نوفه‌ها با استفاده از فیلترهای خاص نرم‌افزاری از سایر داده‌ها حذف شده (مقاطع میانی) و شبه مقطع حل وارون که موقعیت و محل واقعی زون‌های با مقاومت الکتریکی بالا و پایین را بهتر و واقعی نشان می‌دهد (مقاطع پایینی) ارایه شد.

نتایج و بحث

تفسیر نتایج سونداژهای الکتریکی قائم



شکل ۵- منحنی دوبعدی و تفکیک لایه‌بندی سونداژ شماره ۱ (A) و ۲ (B)



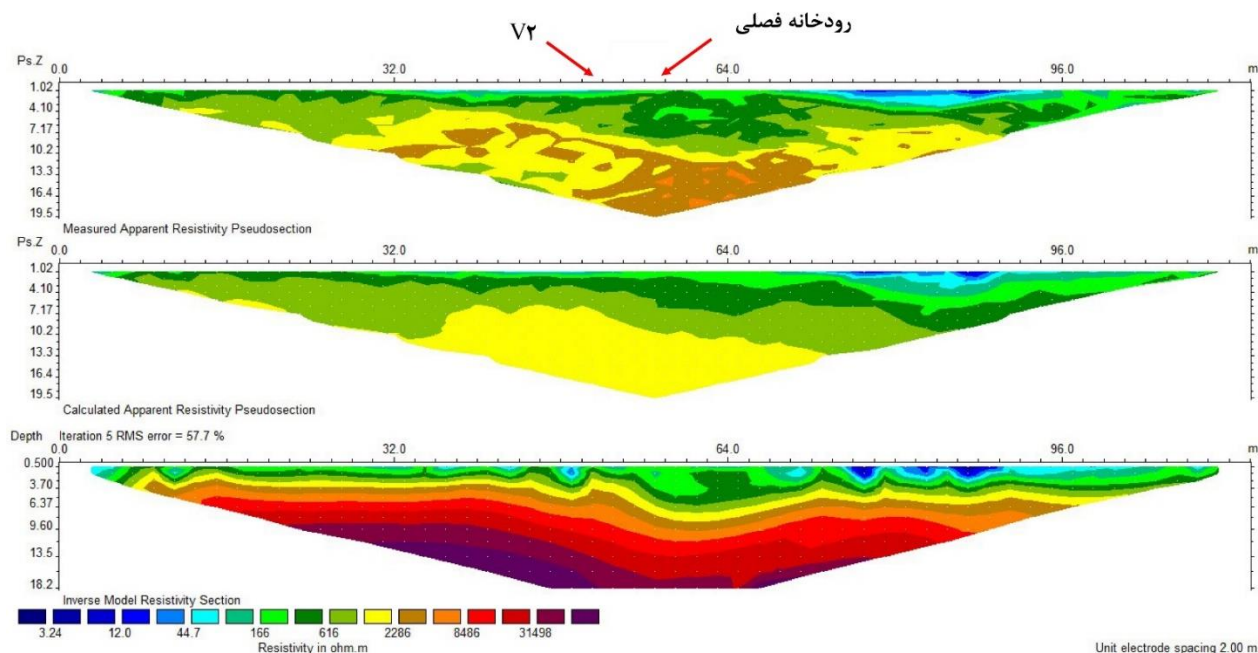
شکل ۶- شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل بالا)، شبه‌مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (شکل وسط)، مقطع حل وارون مدل بدست آمده (شکل پایین) در امتداد پروفیل شماره ۱

پایین‌دست تجمع رطوبت دیده می‌شود. در بخش میانی این پروفیل نیز سونداژ الکتریکی قائم شماره ۲ برداشت شده است. در حالی که برداشت سونداژ الکتریکی قائم این منطقه را از نظر

نتایج تحلیل شبه‌مقاطع هم‌مقاومت ویژه پروفیل شماره ۲ در شکل (V) ارائه شده است. لازم به یادآوری است که از بخش میانی این پروفیل رودخانه فصلی عبور کرده و به فاصله ۳۰ متری

مقاومت دیده می‌شود که در فاصله ۵۰ تا ۶۴ متری بارزتر و مشخص است (شکل ۷). این نتایج با تحلیل‌های تک‌بعدی به دست آمده توسط سونداژ الکتریکی قائم شماره ۲ تطابق دارد ولی پراکنش آن در راستای افقی و پروفیل همگن نیست.

نفوذپذیری ضعیف نشان می‌دهد ولی داده‌های توموگرافی تا حدودی نتایج متفاوتی به دست می‌دهد. به طور کلی از اعماق حدود ۶ متر به پایین در سرتاسر پروفیل لایه‌های نفوذناپذیر دیده می‌شود. از فاصله ۵۰ متری تا انتهای پروفیل تا عمق ۶ متری افت



شکل ۷- شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل بالا)، شبه‌مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (شکل وسط)، مقطع حل وارون مدل بدست آمده (شکل پایین) در امتداد پروفیل شماره ۲

نتیجه‌گیری

آماري و کيفي تحليل شده است که می‌توان به مطالعات Nakhaei *et al.* (2012) و Beheshtian Ardakani and Ebadi (2016) اشاره نمود. بررسی نتایج به دست آمده سونداژ الکتریکی قائم در این مطالعه وجود لایه‌هایی با نفوذپذیری کم را نشان داد که با نتایج به دست آمده از مغزه‌گیری‌های ژئوتکنیکی انجام شده تطابق نشان می‌دهد (Ghaem Sazeh Sanjesh Ekbatan Consultant Engineering, 2017). به طوری که منطقه را از نظر نفوذپذیری به شیرابه نفوذناپذیر تشخیص داده است. این در حالی است که نتایج تحلیل‌های شبه‌مقاطع دوبعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی وجود ناهمگنی در پروفیل‌های برداشت شده را اثبات می‌کند و به عبارتی نشان می‌دهد در راستای پروفیلی شمالی-جنوبی الگوی نفوذپذیری به شیرابه همگن و یکنواخت نیست که با نتایج حاصل از سونداژهای الکتریکی قائم و مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده تطابق ندارد. این نتایج با تحلیل‌های انجام شده توسط Rahmani Jevinani *et al.* (2016) و Sharifi *et al.* (2018) که کارایی فناوری توموگرافی مقاومت ویژه را در طرح‌های پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی انجام داده‌اند تطابق دارد. بنابراین استفاده از فناوری‌های نوین و غیرتخریبی دوبعدی توموگرافی

لزوم توجه به محل‌های مهندسی شده دفن پسماند یا مدفن زباله از نظر تاثیرگذاری بر محیط زیست به خصوص آبخوان پایین‌دست لازم و ضروری است. با توجه به نفوذناپذیری بالای تشکیلات زمین‌شناسی در محل مدفن زباله که در مطالعات ژئوتکنیک نیز نشان داده شده است از نظر رعایت پروتکل‌های محیط‌زیستی مناسب انتخاب گردیده است (Ghaem Sazeh Sanjesh Ekbatan Consultant Engineering, 2017). هدف اصلی این مطالعه، بررسی جانبی و عمقی (دو بعدی) تشکیلات زمین‌شناسی محل و امکان نفوذپذیری لایه‌های زیرسطحی به شیرابه حاصل از مدفن زباله می‌باشد. بنابراین تلاش گردید با کمک روش‌های غیرتخریبی ژئوفیزیکی به خصوص روش مقاومت ویژه الکتریکی تک‌بعدی سونداژ الکتریکی قائم (VES) و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) پتانسیل نفوذپذیری محل دفن زباله به شیرابه حاصل از مدفن زباله در پایین‌دست حوضچه شیرابه قدیمی و همچنین نحوه توسعه و گسترش آن در اعماق مختلف و خارج از مدفن زباله مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد. در مطالعاتی که پیشتر انجام شده است وضعیت و معضلات ناشی از مدفن زباله از نظر

مختلف و ارتباط آن در گستره مکانی متعدد خواهد بود. به دلیل گسترده‌گی منطقه مورد مطالعه لازم است برداشت‌های دُبعدی و سه‌بعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی با تراکم بیشتر پروفیل‌ها در مطالعات آتی صورت گیرد. این مطالعه نشان می‌دهد محل مورد مطالعه از نظر زیست‌محیطی و زمین‌شناختی منطقه-ای مناسب برای دفن پسماند بوده و لازم است آنالیزهای شیمیایی در مغزه‌گیری‌ها و اعماق متعدد جهت بررسی وضعیت خودپالایی مدفن زباله از نظر تصفیه ذرات موجود در شیرابه انجام شود. از سوی دیگر، با توجه به عدم نفوذ عمقی شیرابه حاصل از محل دفن پسماند می‌توان در این زمینه راهکارهای مدیریتی کوتاه‌مدت (احداث حوضچه‌های شیرابه با ایزوله کردن توسط ژئوممبران)، و بلندمدت (فرآوری و تصفیه پسماند به منظور پایین آوردن املاح و عناصر مضر در حد استاندارد برای تغذیه آب‌های زیرزمینی) را پیشنهاد نمود. هدف این مطالعه بررسی کارایی روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و سونداژ الکتریکی قائم در تعیین پتانسیل پخش و گسترش پلوم آلودگی در محل دفن پسماند بود. با توجه به کارایی بالای این فناوری می‌توان آن را به حوضه‌های دیگر از جمله امکان‌سنجی طرح‌های تغذیه مصنوعی، تعیین عمق زهکش‌ها، سرعت شستشوی نیترات و آلودگی ناشی از کودهای شیمیایی در مزارع و مطالعات ژئوتکنیک نیز تعمیم داد.

سپاس‌گزاری

این مطالعه بر اساس طرح پژوهشی شماره ۲۵۰۲۱۴۰۲۱۴۰۲۵ انجام شده است که به این وسیله از مدیریت پسماند شهرداری همدان تشکر و قدردانی می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abdullahi, N.K., Osazuwa, I.B. and Onugba, A., 2010. Detecting municipal solid waste leachate plumes through electrical resistivity survey and physico-chemical analysis of groundwater samples, *J. Am. Sci.*, 6, 540-548.
- ANZECC, 1994. National Hazardous Waste Classification System, *Australian and New Zealand Environment and Conservation Council*, Canberra.
- Arora, T., Linde, N., Revil, A. and Castermant, J., 2007. Non-intrusive characterization of the redox potential of landfill leachate plumes from self-potential data, *J Contam Hydrol*, 92 (3-4):274-292. DOI:10.1016/j.jconhyd.2007.01.018
- Beheshtian Ardakani, M. and Ebadi, T., 2016. Landfill leaching contaminated groundwater remediation by permeable reactive barrier, *Journal of Environmental Science and Technology*, 69, 83-94.
- Belghazal, H., Piga, C., Loddo, F., Stitou El Messari, J. and Ouazani Touhami, A., 2013. Geophysical Surveys for the Characterization of Landfills, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 4 (2), 254-263.
- Ben Salem, Z., Capelli, N., Grisey, E., Baurand, P.E., Ayadi, H. and Aleya, L., 2014. First evidence of fish genotoxicity induced by heavy metals from landfill leachates: the advantage of using the RAPD-PCR technique, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 101, 90-96.
- Bernard, C., Persoone, G., Janssen, R.C. and Le Dû-Delepierre, A., 1997. Estimation of the hazard of landfills through toxicity testing of leachates-2. Comparison of physico-chemical characteristics of landfill leachates with their toxicity determined with a battery of tests, *Chemosphere*, 35, 2783-2796.
- Bichet, V., Grisey, E. and Lotfi, A., 2016. Spatial

مقاومت ویژه الکتریکی در مطالعات مدفن زباله هم از لحاظ تغییرات مکانی و هم هزینه‌ای توجیه اقتصادی داشته و به‌صرفه هستند. این هزینه‌ها بر مبنای تعداد سونداژها و پروفیل‌های توموگرافی مقاومت ویژه، عمق و طول پروفیل مورد بررسی و همچنین تفکیک لایه‌ها تعیین می‌شود که به مراتب بسیار باصرفه‌تر از برداشت‌های مغزه‌گیری ژئوتکنیک نقطه‌ای است و در عین حال می‌توان تفسیری دُبعدی از وضعیت انتقال و نفوذ پلوم آلودگی را به دست آورد که در برداشت‌های تک‌بعدی سونداژ الکتریکی قائم و مغزه‌گیری‌های ژئوتکنیکی به راحتی و با هزینه کمتر قابل استخراج نیست. بررسی دو پروفیل توموگرافی برداشت شده نشان می‌دهد نفوذ عمقی شیرابه در داخل مدفن زباله تا حدودی در بخشی از پروفیل شماره ۱ دیده می‌شود که ناشی از نشت حوضچه شیرابه قدیمی می‌باشد ولی در خارج از مدفن زباله نفوذ عمقی شیرابه دیده نمی‌شود. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود شیرابه موجود در حوضچه قدیمی به حوضچه‌های جدید منتقل بشود تا از این طریق بحث نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی کنترل گردد (به عنوان راهکار مدیریتی بلندمدت). از سوی دیگر ارائه دید بهتر از جهت مقاطع انتشار پلوم آلودگی و شناسایی مناطق نفوذ توسط این روش اثبات گردید که کارایی آن را نسبت به روش‌های نقطه‌ای بهتر نشان می‌دهد (Sainato *et al.*, 2012; Karimi, 2011; Schmidt-Hottenberger *et al.*, 2014; Wijesekara *et al.*, 2014; Omolayo and Tope, 2014; Ugbor *et al.*, 2021; Ganiyu *et al.*, 2015). با توجه به وجود املاح مختلف در شیرابه‌ها می‌توان آن‌ها را فراوری کرده و بعد از میکروبی‌زدایی به عنوان منابع سرشار از کودهای آلی بهره‌برداری نمود که این امر مستلزم آنالیزهای شیمیایی دقیق در نقاط

- characterization of leachate plume using electrical resistivity tomography in a landfill composed of old and new cells (Belfort, France), *Engineering Geology*, 211, 61-73. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.06.026
- Delaney, A.J., Paige R. Peapples, Steven A. Arcone, 2001. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil, *Cold Regions Science and Technology*, 32, 107-119.
- Department of Environment of Iran, 2020. Instructions for monitoring the groundwater pollution of landfills, *Department of Environment Organization*, 13 pp.
- Frid, V., Liskevich, G., Doudkinski, D. and Korostishevsky, N., 2008. Evaluation of landfill disposal boundary by means of electrical resistivity imaging. *Environ. Geol.*, 53, 1503-1508.
- Gajski, G., Orescanin, V. and Garaj-Vrhovac, V., 2012. Chemical composition and genotoxicity assessment of sanitary landfill leachate from Rovinj, Croatia, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 78, 253-259.
- Ganiyu, S. A., Badmus, B. S., Oladunjoye, M. A., Aizebeokhai, A. P. and Olurin, O. T., 2015. Delineation of leachate plume migration using electrical resistivity imaging on Lapite Dumpsite in Ibadan, Southwestern Nigeria. *Geosciences* , 5(2), 70-80. DOI:10.5923/j.geo.20150502.03,pp70-80
- Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., Naudet, V., Dabas, M. and Bégassat, P., 2014. Detection of landfill cover damage using geophysical methods, *Near Surf Geophys*, 12 (2036), 599-611. DOI: 10.3997/1873-0604.2014018
- Grellier, S., Guerin, R., Robain, H., Bobachev, A., Vermeersch, F. and Tabbagh, A., 2008. Monitoring of leachate recirculation in a bioreactor landfill by 2-D electrical resistivity imaging, *J Environ Eng Geophys*, 13(4), 351-359. DOI:10.2113/JEEG13.4.351
- Hafizi, M.K., Abbasi, B. and Ashtari Talkhestani, A., 2010. Safety assessment of landslides by electrical tomography: A case study from Ardabil, Northwestern Iran, *Journal of Earth and Space Physics*, 36 (1):17-28.
- Halim, C.E., Amal, R., Beydoun, D., Scott, J.A. and Low, G., 2005. Evaluating the applicability of regulatory leaching tests for assessing the hazards of Pb-contaminated soils, *Journal of Hazardous Materials*, 120, 101-111.
- Jamshidi, A., Tajamiri, A. and Mirbagheri, S.A., 2014. Investigation of Yasuj landfill leachate and its impacts on lower water resource quality (No. 6 Tangkonareh well), *Armaghan Danesh*, 87, 347-360.
- Karimi, Y., 2011. 3D investigation of contaminated Plume in unsaturated zone using geoelectric method, *MSc thesis in Hydrogeology*, Kharazmi University, 150 pp.
- Kazemi, A., Younesi, H. Bahramifar, N., 2012. Determination the leachate pollution potential in landfills of Talesh, Roudsar and Ferydunkenar cities using of leachate pollution index (LPI), *Quarterly new technologies in Aquaculture development (Journal of Fisheries)*, 24, 43-50.
- Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I., 2002. An Introduction to Geophysical Prospecting 3rd edn, 262, *Blackwell Science Limited*.
- Loke, M.H., 1997. Rapid 2D resistivity inversion using the least-squares method, *RES2DINV Program manual*, Penang, Malaysia.
- Loke, M.H., 2006. RES2DINV ver. 3.55, Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Software Manual*: 139pp.
- Matejczyk, M., Plaza, G., Nałecz-Jawecki, G., Ulfig, K. and Markowska-Szczupak, A., 2011. Estimation of the environmental risk posed by landfills using chemical, microbiological and ecotoxicological testing of leachates, *Chemosphere*, 82, 1017-1023.
- Moradzadeh, A., Zare, M. and Doulati Ardejani, F., 2012. Recognition of the pollution zone related to acid mine drainage using three-dimensional modeling of geoelectrical data at Alborz-e-Sharghi coal washing plant area, Semnan Province, Iran, *Iranian Journal of Geophysics*, 6 (2):95-111.
- Nakhaei, M., Nassery, H. and Amiri, V., 2012. Contaminant Transport Modeling due to Leachate Leaking of Rasht waste disposal site, *Journal of Advanced Applied Geology*, 3, 69-82.
- Nasari, H.R., Alijani, F. and Mirzaei S.Y., 2008. Geoelectrical tomography of karst in Asmari anticline (Southeast of Masjed Soleiman), *Shahid Chamran University Journal of Science*, 19, 100-110.
- Naudet, V., 2003. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater, *Geophys Res Lett.*, 30 (21), 1-4. DOI:10.1029/2003GL018096
- Omolayo, D. and Tope, F. J., 2014. 2D electrical imaging surveys for leachate plume migration at an old dump site in Ibadan south western Nigeria: A case study. *Int. J. Geophys*. Article ID 879530. DOI:10.1155/2014/879530
- Radulescu, M., Valerian, C. and Yang, J., 2007. Time-lapse electrical resistivity anomalies due to contaminant transport around landfills, *Ann. Geophys.*, 50, 453-468.
- Rahmani Jevinani, M., Kazemi, R. and Emam Jomeh, S. R., 2016. The two-dimensional electrical tomography, suitable method for recognizing geological characteristics of flood spreading areas, case study: Herat-Yazd station, *Journal of Watershed Engineering and Management*, 8 (1):1-12.
- Sainato, C.M., Beatriz, N. Losinno, Horacio J. Malleville, 2012. Assessment of contamination by intensive cattle activity through electrical resistivity tomography, *Journal of Applied Geophysics*, 76, 82-91.
- Schmidt-Hattenberger, C., P. Bergmann, T. Labitzke, F. Wagner, 2014. CO2 migration monitoring by means of electrical resistivity tomography (ERT) -

- Review on five years of operation of a permanent ERT system at the Ketzin pilot site, *Energy Procedia*, 63, 4366-4373.
- Sharifi, F., Rahmani Jevinani, M. and Davoodi, H., 2018. Introducing and applying a two-dimensional electrical tomography method in detection of water movement and evaluating the effects of watershed management measures, case study: Vardij Catchment, *Journal of Watershed Engineering and Management*, 9, 465-478.
- Slater, L., A. Binley, R. Versteeg, G. Cassiani, R. Birken, S. Sandberg, 2002, A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank, *Journal of Applied Geophysics*, 49, 211-229.
- Tchobanoglous, G. and Kreith, F., 2002. Solid Waste Handbook, 2nd edn. *McGraw-Hill*, New York
- Ugbor, C. C., Ikwuagwu, I. E. and Ogboké, O. J., 2021. 2D inversion of electrical resistivity investigation of contaminant plume around a dumpsite near Onitsha expressway in southeastern Nigeria, *Nature Scientific Reports*, 11, 11854. DOI: 10.1038/s41598-021-91019-3
- United Kingdom Department of the Environment, 1991. Landfill gas waste management paper No. 27, London, Crown.
- Vargemezis, G., Tsourlos, P., Giannopoulos, A. and Trilyrakis, P., 2015. 3D electrical resistivity tomography technique for the investigation of a construction and demolition waste landfill site, *Stud Geophys Geod*, 59(3), 461-476. DOI: 10.1007/s11200-014-0146-5
- Weber, R., Watson, A., Forter, M. and Oliaei, F., 2011. Persistent organic pollutants and landfills: a review of past experiences and future challenges, *Waste Manag. Res.*, 29, 107-121.
- Wijesekara, H. R., De Silva, S. N., De Silva Wijesundara, D. T., Basnayake, B. F. A. and Vithanage, M. S., 2014. Leachate plume delineation and lithologic profiling using surface resistivity in an open municipal solid waste dumpsite, Sri Lanka. *Environ. Technol.*, 36(23):2936-2943. DOI:10.1080/09593330.2014.963697
- Wilkinson, P.B., Meldrum, P.I., Kuras, O., Chambers, J.E., Holyoake, S.J. and Ogilvy, R.D., 2010. High-resolution electrical resistivity tomography monitoring of a tracer test in a confined aquifer, *J. Appl. Geophys.*, DOI:10.1016/j.jappgeo.2009.08.001.
- Yazdani, V. and Mansourian, H., 2020. The assessment vulnerability of Qazvin-plain aquifer, sensitivity analysis removing parameters by using GIS, *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 38,127-145. DOI: 10.22125/IWE.2019.100746