



## Investigating the Effect of Transfer Channels and Seasonal Streams on Leachate Pollution Plumes from Landfill Leachate Ponds Using Electrical Resistivity Tomography: A Case Study of the Hamadan Landfill

Yavar Karimi<sup>1</sup> | Nasrollah Kalantari<sup>1</sup> | Amir Saberinasr<sup>1</sup> | Jalil Helali<sup>2</sup>

1. Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

✉Corresponding Author: [A.saberinasr@scu.ac.ir](mailto:A.saberinasr@scu.ac.ir)

Received:  
30 October 2024

Accepted:  
26 November 2026

Published:  
20 December 2024

### Keywords:

Waste,  
Landfill,  
Leachate,  
Electrical Resistivity  
Tomography (ERT).

### Extended abstract

#### Introduction

Waste management resulting from human activities, particularly in urban areas, is one of the most sensitive and critical responsibilities of municipalities. The selection of waste disposal sites involves considering various factors, among which environmental aspects and the prevention of leachate infiltration into aquifers and groundwater are paramount. In this context, municipal waste management systems are required to utilize landfills, a standard and conventional approach to waste disposal (ANZECC, 1994; Tchobanoglous and Kreith, 2002). These structures play a vital role in optimizing waste management and mitigating the environmental impacts of municipal waste. During the transfer of leachate from old ponds to new ones, the transfer method significantly influences the outcome. To prevent leachate leakage, the use of pipes, geomembrane layers, and landfill insulation is recommended (Anouzla & Souabi, 2024). However, the use of open structures or channels that are not properly isolated can contribute to the vertical and lateral spread of leachate in the subsurface. Research indicates that the depth of the pollution plume in a landfill is primarily determined by soil texture and the presence of permeable strata (Karimi et al., 2021). Additionally, investigating seasonal streams is critical due to their high potential for leachate infiltration.

**Cite this article:** Karimi, Y., Kalantari, N., Saberinasr., A. & Helali, J. (2024). Investigating the effect of transfer channels and seasonal streams on leachate pollution plumes from landfill leachate ponds using electrical resistivity tomography: a case study of the Hamadan landfill, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 59-78. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8660.1090>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

To evaluate the potential for leachate infiltration and determine the shape of the pollution plume, cost-effective and efficient approaches, such as geophysical techniques, are necessary. Two-dimensional non-destructive electrical resistivity tomography surveys are particularly effective. Geological and subsurface evaluations of waste sites using geophysical methods have been extensively studied due to their accuracy and cost-effectiveness (Yannah et al., 2019; Ayolabi et al., 2015; Karsli et al., 2024; De Carlo et al., 2023; Karimi et al., 2021; Anouzla & Souabi, 2024; Nguyen et al., 2018).

In these methods, leachate infiltration is identified by the significant electrical resistivity differences between the leachate and the surrounding environment (Gazoty et al., 2012; Ugbor et al., 2021; Belghazal et al., 2013; Bellezoni et al., 2014; Abdulrahman et al., 2016; Helene et al., 2020; Juarez et al., 2023). Based on this understanding, the current study aims to investigate the vertical and lateral spread of leachate at the leachate transfer channel and seasonal streams within the landfill site of Hamadan City.

## Material and Methods

### Study Area

The studied area is located in the northern part of Hamedan city, between coordinates 34.959240° to 34.972384° N latitude and 48.611835° to 48.630663° E longitude, covering an approximate area of 238 hectares. Geologically, the area lies within the Sanandaj-Sirjan zone and comprises marly limestone formations, weathered sandstones, and clay. Geotechnical investigations conducted in the area reveal that the lithological composition includes sandy silt layers with gravel extending to a depth of 20 meters (Ghaem Sazeh Sanjesh Ekbatan Consultant Engineering, 2017).

Vertical electrical sounding in the studied area has identified clay layers (up to a depth of approximately 2.6 meters), clayey marl (reaching depths of around 15 meters), mudstone and marly limestone (up to about 60 meters), as well as mudstone and silt with limestone (extending to a depth of about 160 meters). These findings indicate low permeability, limiting the infiltration and expansion of leachate (Karimi et al., 2021; Helali et al., 2020).

### Methods

Electrical resistivity tomography (ERT) data were collected using an RMT5 device with a transmitter length of 120 m and an electrode spacing of 2 m for three profiles. The distance of profile 1 from the location of the old leachate evaporation pond is 240 m, while the distance of the other two profiles from this pond is approximately 540 m.

Electrical resistivity surveying is based on the distribution of potentials in a homogeneous medium. One pair of electrodes (A and B) is used to introduce the current into the ground, while another pair (M and N) is employed to measure the potential difference of hemispheric equipotential surfaces where the ground surface intersects them. The apparent resistivity value is then calculated using the following equation (1):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

In Equation (1),  $\Delta V$  is expressed in millivolts (mV),  $I$  in milliamperes (mA), and  $K$  in meters (m). Accordingly, the apparent resistivity ( $\rho_a$ ) is expressed in ohm-meters ( $\Omega\text{m}$ ).

In this study, a Wenner electrode array was used for two-dimensional electrical resistivity tomography (ERT) to determine the distribution of apparent resistivity values. More theoretical details are provided in the works of Karimi et al. (2021) and Loke (2006).

After data collection and the removal of outliers, the raw apparent resistivity data were entered into the Res2Dinv software to generate the initial pseudo-sections of resistivity. During the modeling of the collected profiles, the inverse solution was implemented using the Quasi-Newton technique with identical horizontal and vertical filters.

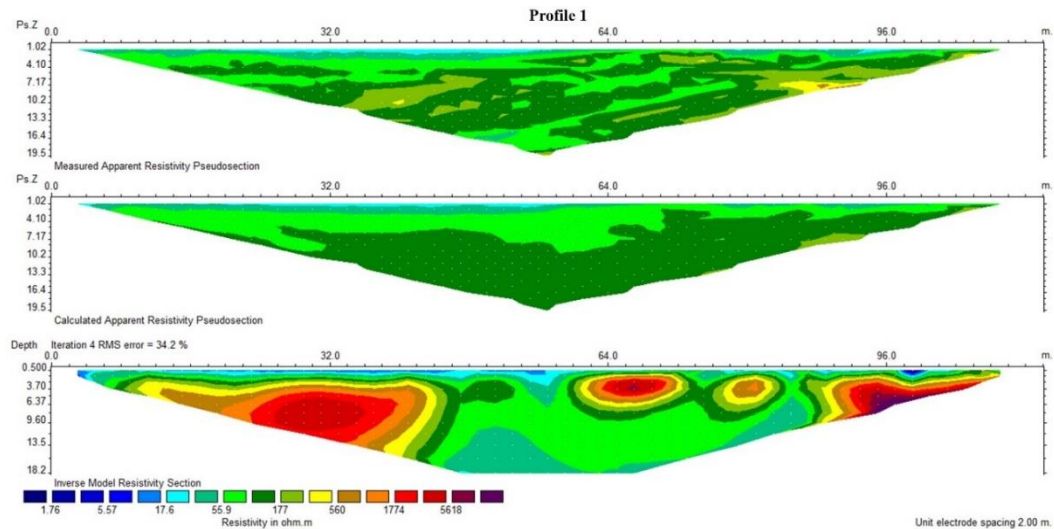
### 3. Result and Discussion

In this study, three ERT profiles were analyzed to investigate leachate contamination and resistivity variations. The findings are summarized as follows:

#### Profile 1

This profile was oriented in the north-south direction, perpendicular to the leachate flow (Fig. 1). High-resistivity layers (177–5600  $\Omega\text{-m}$ ) identified at the start of the profile (up to 42 meters) have inhibited leachate infiltration. However, between 42 and 90 meters, low-resistivity layers (17–177  $\Omega\text{-m}$ ) indicate significant leachate contamination extending to a depth of 18 meters. This contamination

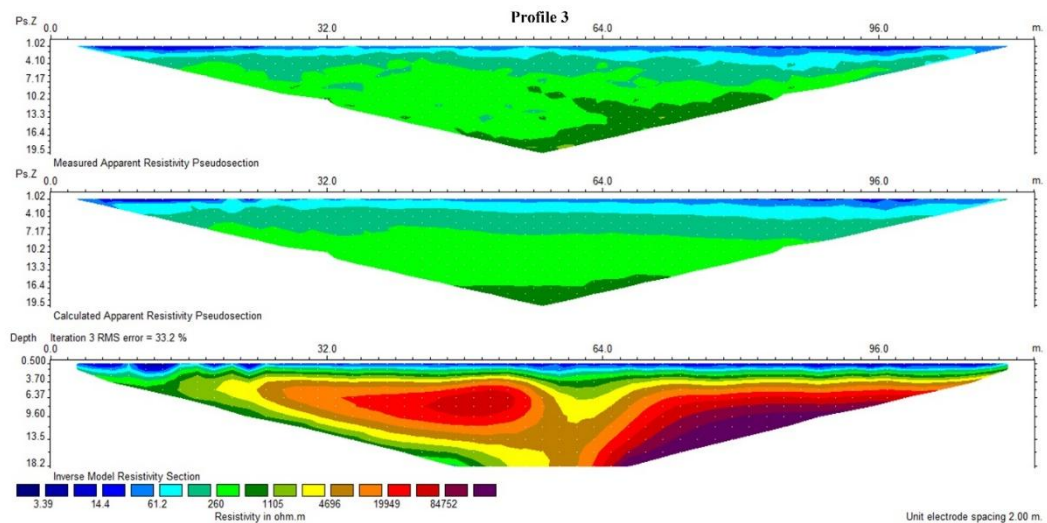
is likely attributed to the leachate transfer channel, which has created an extensive contamination plume. Toward the end of the profile, high-resistivity layers ( $\geq 560 \Omega\text{-m}$ ) are observed, corresponding to impermeable carbonate and metamorphic (especially schist) rocks. Overall, the leachate infiltration pattern in this profile is heterogeneous due to the coexistence of old and new landfill deposits. It is recommended that concrete or pipe channels be utilized to mitigate further contamination.



**Fig 1. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 1 (black lines specifying the plume of pollution caused by leachate)**

### Profile 2

This profile, also aligned in the north-south direction, terminates at a seasonal stream (Fig. 2). From the start of the profile to 78 meters, topsoil and clay layers with low resistivity ( $< 34 \Omega\text{-m}$ ) are dominant. Beyond this point, resistivity values further decrease ( $< 139 \Omega\text{-m}$ ) due to leachate infiltration from the stream. The leachate penetration depth is estimated at up to 11 meters, with a contamination plume width of approximately 30 meters. The presence of clay and mudstone bedrock in this area restricts deeper infiltration. However, the seasonal stream has facilitated lateral contamination spread. A comparative analysis of Profiles 1 and 2 suggests that the leachate transfer channel has a more pronounced impact on contamination than the seasonal stream, owing to its proximity to the leachate pond and the underlying structural differences.



**Fig. 3. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 3**

### Conclusion

The findings from this research on the Hamadan Landfill indicate that the leachate transfer channel and the presence of seasonal streams have significantly influenced the vertical and lateral expansion patterns of leachate. Based on the profiles presented, leachate infiltration and the spread of the pollution plume ranged from 13 to 18 meters vertically and from 30 to 50 meters laterally, which aligns with the findings of research conducted by Helali et al. (2020) and Karimi et al (2021).

To prevent further infiltration of the pollution plume at this landfill, it is recommended to use solid concrete channels or pipes to transfer leachate from the old pond to the new one. Additionally, to manage leachate transfer in seasonal streams, it is necessary to first prevent the entry of leachate into these pathways, and subsequently, to inhibit the seepage of leachate from these pathways downstream of the landfill by creating obstructions.

Furthermore, this study demonstrated the effectiveness of the electrical resistivity tomography technique in tracking and modeling the expansion of leachate infiltration from both artificial channels and natural streams at the landfill site. Given the importance of leachate and its environmental impact, it is proposed that municipal waste management organizations throughout the country incorporate the aforementioned technique into their control and management strategies for leachate in landfills, reducing costs associated with geomembranes in their research agendas.



## بررسی تأثیر کانال انتقال و آبراهه‌های فصلی بر الگوی هاله آلودگی شیرابه حاصل از پسماند حوضچه شیرابه با استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

(مطالعه موردی: لندفیل همدان)

یاور کریمی<sup>۱</sup> | نصرالله کلانتری<sup>۱</sup> | امیرصابری نصر<sup>۱</sup> | جلیل هالالی<sup>۲</sup>

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

✉ نویسنده مسئول: [A.saberinasr@scu.ac.ir](mailto:A.saberinasr@scu.ac.ir)

### چکیده

محل دفن پسماند (لندفیل) به‌عنوان یکی از راهکارهای مدیریت مهندسی پسماند و زباله می‌باشد. شیرابه حاصل از پسماند به‌عنوان عامل تهدیدکننده کیفیت آب‌های زیرزمینی در محل لندفیل و پایین‌دست به‌شمار می‌رود. بررسی عمق و توسعه‌یافتگی جانبی شیرابه در آبخوان یا هاله آلودگی با استفاده از برداشت‌های توموگرافی مقاومت ویژه راهکاری کم‌هزینه و بهینه در پایش و مدل‌سازی انتشار آلودگی می‌باشد. در این مطالعه تلاش گردید هاله آلودگی ناشی از کانال انتقال شیرابه در دو حالت بدون آلودگی و آلوده مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور ۳ پروفیل توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به طول ۱۲۰ متر با فواصل الکترودی ۲ متری در لندفیل همدان برداشت شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد توزیع هاله آلودگی در مسیر انتقال شیرابه تا عمق حدود ۱۸ متری توسعه یافته و توزیع جانبی آن به طول ۵۰ متر نیز رسیده است در حالی که در آبراهه فصلی این توسعه یافتگی عمقی و جانبی کمتر می‌باشد. این مطالعه نشان داد تأثیر کانال انتقال و آبراهه فصلی بر عمق و توسعه یافتگی جانبی شیرابه تأثیرگذار است. بنابراین جهت جلوگیری از ادامه این روند لازم است بحث انتقال شیرابه با لحاظ نمودن راهکاری مدیریتی و از طریق لوله‌های عایق و ایزوله شده انجام گرفته و از خروج شیرابه از محل لندفیل جلوگیری شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

پسماند،

لندفیل،

شیرابه،

توموگرافی مقاومت ویژه.

## مقدمه

آن بالغ بر ۴۰۰ الی ۴۵۰ تن در روز می‌باشد. با توجه به حجم بالای پسماند، حجم شیرابه تولیدی به‌خصوص در فصول مرطوب سال احتمال آلودگی آبخوان وجود خواهد داشت (Vahabian et al., 2019). بنابراین ایجاد حوضچه‌های جدید و انتقال شیرابه به آن می‌تواند در کاهش این خطرات مثرتر باشد. انتقال این شیرابه باید از طریق کانال‌های ایزوله شده بتنی یا فلزی باشد ولی در مواردی مشاهده شده است در هنگام انتقال شیرابه از حوضچه‌های قدیمی به حوضچه‌های جدید از کانال‌های خاکی استفاده شده است که احتمال نفوذ عمقی و جانبی شیرابه را بیشتر خواهد کرد. مشابه کانال‌های خاکی ایجاد شده با توجه به توپوگرافی وجود آبراهه‌های فصلی نیز می‌تواند این امر را تشدید کند. بنابراین انتقال شیرابه در محل لندفیل از محلی به محل دیگر مستلزم استفاده از سازه‌های ایزوله شده یا از طریق لوله‌ها خواهد بود. بررسی‌های نشان داده است عمق توسعه هاله آلودگی در لندفیل عمدتاً با نوع بافت خاک زیرسطحی و وجود لایه‌های نفوذپذیر هم‌بستگی دارد (Karimi et al., 2021; Anouzla & Souabi, 2024). به‌منظور عدم انتشار عمقی و جانبی شیرابه در آبخوان استفاده از سازه‌های ژئوممبران و عایق‌سازی لندفیل پیشنهاد شده است (Anouzla & Souabi, 2024). در مطالعات مکان‌یابی محل دفن پسماند ملاحظات زیست‌محیطی و زمین‌شناختی شامل آلودگی محدوده لندفیل و همچنین آبخوان پایین‌دست در نظر گرفته می‌شود. هر نوع انتقال یا ماندگاری شیرابه در محل پسماند بدون استفاده از سازه‌های ایزوله (استفاده از ژئوممبران) می‌تواند در عمق نفوذ شیرابه مؤثر بوده و آن را تشدید نماید. تشدید این پدیده به لیتولوژی زیرسطحی (Khoshravesh et al., 2022; Anouzla & Souabi, 2024)، غلظت و تنوع املاح موجود در شیرابه (Vahabian et al., 2019) و ماندگاری آن بستگی خواهد داشت. در مناطقی از لندفیل که محل زباله‌های قدیمی بوده انتقال شیرابه به حوضچه‌های تغذیه جدید باید با رعایت اصول مهندسی همراه باشد. به‌طوری که باید از طریق کانال‌های روباز بتنی یا کانال‌های روبسته انجام شده و امکان از توسعه یافتگی شیرابه در مسیر انتقال جلوگیری شود. ارزیابی این گزینه تنها از طریق برداشت‌های دوبعدی غیر تخریبی و کم‌هزینه به‌خصوص روش‌های ژئوفیزیکی

مدیریت زباله حاصل از فعالیت‌های انسان به‌خصوص در مناطق شهری یکی از حساس‌ترین امور اجرایی شهرداری‌ها می‌باشد. مدیریت مقادیر حجیمی از این زباله‌ها باید در مناطق خاصی که اصطلاحاً محل دفن پسماند یا لندفیل نامیده می‌شود انجام شود (Tchobanoglous and Kreith, 2002). لندفیل‌ها به‌عنوان پرکاربردترین روش دفن زباله‌های شهری در نظر گرفته می‌شوند به‌طوری که ۹۵ درصد زبال‌های شهری جمع‌آوری شده در سرتاسر جهان را شامل می‌شوند (Gupta & Paulraj, 2017). با ایجاد این سازه‌ها و بهره‌برداری مناسب از آن‌ها می‌توان جلوی مشکلات ناشی از آلودگی‌ها را گرفت. در این روش دفع پسماندها با کمترین مخاطرات بهداشتی و زیست‌محیطی انجام می‌پذیرد. انتخاب محل لندفیل با در نظر گرفتن گزینه‌های متعددی صورت می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها لحاظ نمودن ملاحظات زیست‌محیطی و عدم انتشار شیرابه حاصل از لندفیل در آبخوان و آب‌های زیرزمینی است (Maurya et al., 2017). این مورد در مناطق صنعتی که شیرابه‌های صنعتی تولید می‌کنند نیز صدق می‌کند. با توجه به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی شیرابه‌های حاصل از پسماند احتمال انحلال و تغییر آبخوان در نتیجه این فرایندهای شیمیایی وجود دارد (Vahabian et al., 2019). از دهه‌های گذشته تلاش شده است زباله‌های شهری به‌صورت 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 زیست‌محیطی خواهد شد (United Kingdom Department of Environment, Helene et al., 2020; Anouzla & Souabi, 2024). لندفیل شهرداری همدان یکی از مهندسی‌ترین لندفیل‌ها کشور می‌باشد که حجم زباله‌های منتقل شده به

شود به طوری که با فاصله گرفتن از محل دفن پسماند غلظت آن‌ها کاهش خواهد یافت. در محل مورد مطالعه، انتقال شیرابه از حوضچه قدیمی به حوضچه‌های جدید با کانال خاکی انجام شده است که احتمال توسعه عمقی و جانبی آلودگی شیرابه در زیر و اطراف کانال انتقال را افزایش می‌دهد. بررسی هلالی و همکاران (Helali et al., 2020) نشان می‌دهد وجود آبراهه‌های فصلی از طریق جریان‌های زیرسطحی موجب انتقال شیرابه به پایین دست لندفیل خواهد شد. بنابراین در این مطالعه تلاش شد تا با استفاده از روش توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به صورت دوبعدی اثر کانال‌های طبیعی (مسیل‌ها) و مصنوعی (کانال انتقال شیرابه) بر نفوذ عمقی و جانبی شیرابه مورد تحلیل قرار گیرد. عدم بررسی چنین مواردی احتمال آلودگی آبخوان‌های پایین دست را افزایش خواهد داد. از طرفی استفاده از این روش می‌توان هزینه‌های ایمن‌سازی لندفیل را از دیدگاه زیست‌محیطی کاهش دهد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده لندفیل همدان در دشت همدان-بهار به فاصله ۲۰ کیلومتری شمال همدان قرار دارد. محل لندفیل طوری انتخاب شده است که از شهرهای مجاور شامل لالچین، بهار، جورقان و همدان حداقل ۱۰ کیلومتر فاصله داشته باشد (شکل ۱). محدوده لندفیل در وسعتی بالغ بر ۲۳ کیلومترمربع در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه، ۵۸ دقیقه و ۱۷ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه و ۵۰ ثانیه شرقی در ارتفاع ۱۷۹۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. از نظر هواشناسی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه از اقلیم نیمه‌خشک با دمای متوسط بین ۱.۹- تا ۲۴.۶ درجه با بارش سالانه ۳۳۰ میلی‌متری برخوردار بوده و عمدتاً در محدوده آبان تا اردیبهشت رخ می‌دهد. رخداد پدیده تغییر اقلیم موجب کاهش بارش‌های این استان و منطقه شده است (Moazzezi et al., 2020; Maryanji et al., 2023). منطقه تحت تأثیر پدیده‌های بزرگ‌مقیاس از جمله ENSO بوده است (Helali et al., 2020; 2021, 2023). کاربری این منطقه نیز عمدتاً متعلق به منابع طبیعی با

به‌همراه نمونه‌برداری‌های نقطه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود (Karimi et al., 2021).

ارزیابی زمین‌شناسی و زیرسطحی محل پسماند با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل دقت و کم‌هزینه بودن موضوع مطالعات متعدد بوده است (Di Maio et al., 2018; Juarez et al., 2023; Karsli et al., 2024; Anouzla & Souabi, 2024). در این روش‌ها نفوذ شیرابه از طریق اختلاف مقاومت الکتریکی بین محدوده آلودگی و محیط پیرامون مشخص می‌شود (Gazoty et al., 2012; Ughor et al., 2021; Juarez et al., 2023). همچنین، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به‌خصوص روش مقاومت ویژه در مطالعات متعدد از جمله زمین‌لغزش‌ها (Hafizi et al., 2020)، طرح‌های تغذیه مصنوعی (Sharifi et al., 2018)، و مطالعات محل پسماند و شیرابه حاصل از لندفیل در مناطق مختلف جهان انجام شده است (Gazoty et al., 2012; De Donno and Cardarelli, 2017; Isunza Manrique et al., 2023; Lu et al., 2023). بر اساس مطالعات انجام شده در لندفیل‌ها منطقه اشباع از شیرابه دارای مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم‌متر می‌باشند (Park et al., 2016; Moretto et al., 2021; Ansari et al., 2017). هر چند این مقدار می‌تواند با توجه به لیتولوژی و رطوبت خاک نوسانات بیشتری داشته باشند (Helali et al., 2020).

برخلاف دیگر مناطق جهان مطالعات داخلی انجام شده در مورد کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در لندفیل محدود به چندین مطالعه موردی می‌باشد که عمدتاً با تأکید بر معرفی روش ژئو الکتریک در مطالعات لندفیل (Helali et al., 2022; Khoshravesh et al., 2020; al., 2022) و هاله آلودگی حاصل نفوذ شیرابه در آبخوان و محل لندفیل (Karimi et al., 2021) بوده است. به عقیده کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) و خوش‌روش و همکاران (Khoshravesh et al., 2021) محل لندفیل همدان به تغییرات نفوذ شیرابه حاصل از حوضچه شیرابه همگن نبوده و ضرورت استفاده از این روش در مطالعات امکان‌سنجی تعیین محل لندفیل تأکید شده است. همچنین وهابیان و همکاران (Vahabian et al., 2019) تأکید کرده‌اند که غلظت بالای املاح در شیرابه حاصل از لندفیل می‌تواند به صورت عمقی و به پایین دست منتشر

است. در حال حاضر محدوده مورد استفاده ۲.۳ کیلومتر مربع بوده و در آینده به ۴۰۰ هکتار توسعه داده خواهد شد.

پوشش گیاهی چندساله از جمله گون می‌باشد که در محدوده لندفیل تغییر کاربری داده شده است. تأسیس لندفیل با مساحت ۱۰ هکتاری در سال ۱۳۷۹ انجام شده

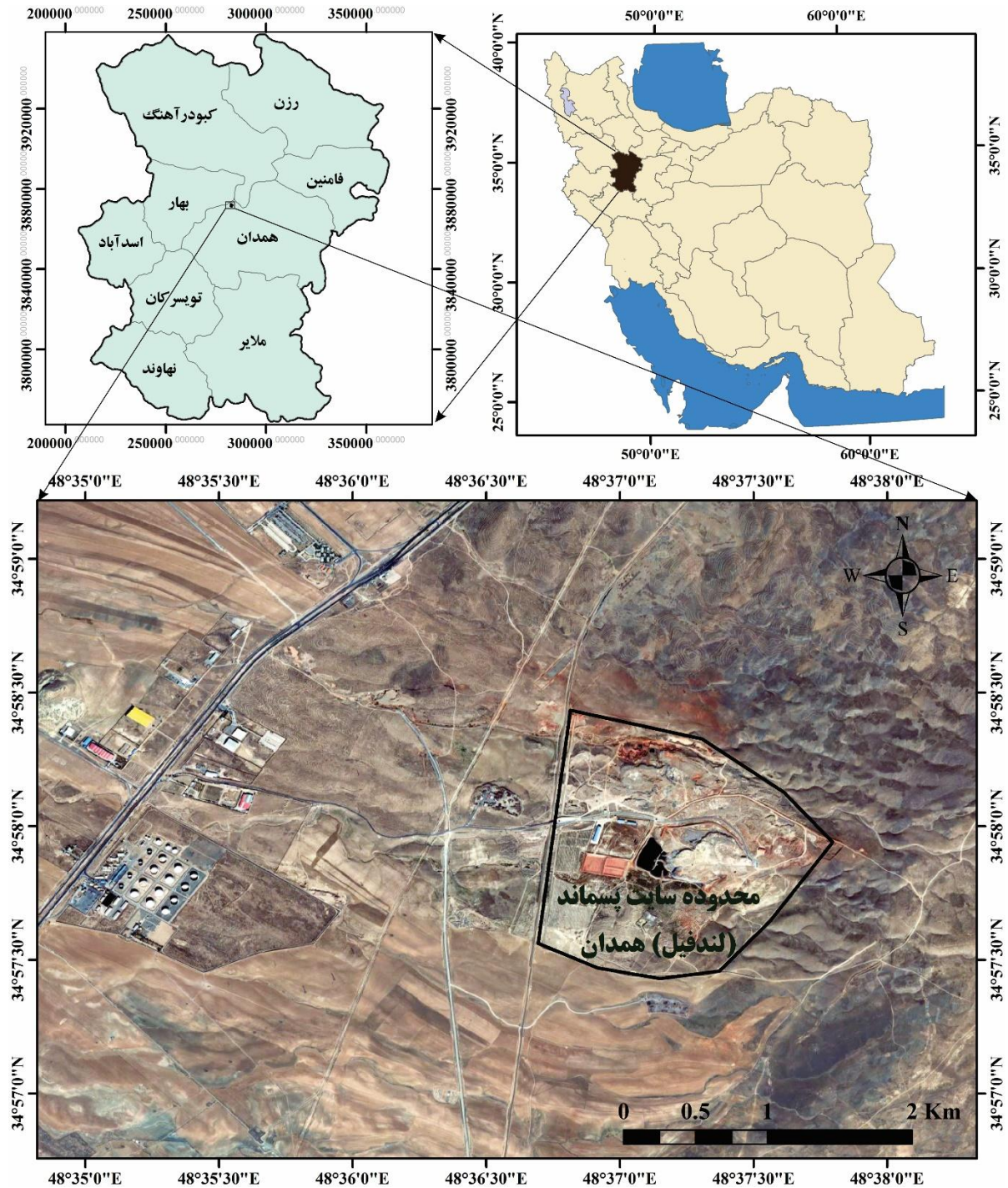


Fig. 1. The study area and its location in Hamadan province



## زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

آلودگی منتقل شده به عمق و پایین‌دست بوده است (Helali et al., 2020).

### وضعیت شیمیایی و فیزیکی لندفیل

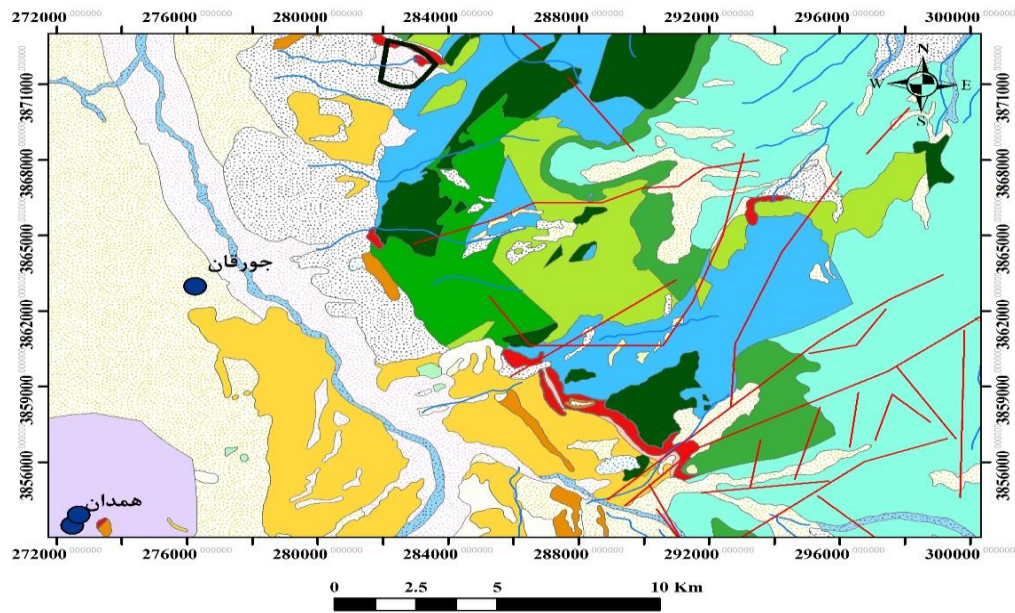
بررسی مطالعات پیشین نشان داده است اسیدپتیه این منطقه بین ۷.۳ تا ۷.۸۹، هدایت الکتریکی ۲۶۵۲۰ تا ۴۲۰۴۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، کل مواد جامد محلول (TDS)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD5)، کلر، نیترات، پتاسیم و کربن آلی کل (TOC) به ترتیب بین ۱۷۵۰۰ تا ۲۸۱۰۰، ۶۲۴۰ تا ۱۷۹۴۰، ۴۷۴۲ تا ۱۲۱۱۰، ۱۶۴۰ تا ۴۲۰۰، ۵۹.۲ تا ۵۲۵، ۴۵۰۰ تا ۶۰۰۰ و ۱۳۰۰ تا ۲۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده است (Vahabian et al., 2019). این مطالعه نشان داده است غلظت شیرابه با فاصله گرفتن از لندفیل کاهش یافته و همچنین احتمال آلودگی آبخوان را توسط شیرابه حاصل از لندفیل تایید کرده است.

### برداشت داده

برداشت‌های داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) با استفاده از دستگاه RMT5 (شکل ۴) با طول فرستنده ۱۲۰ متر با فواصل الکترودی ۲ متری در سه پروفیل انجام شد که موقعیت آن‌ها در شکل ۳ و همچنین جدول ۱ ارائه شده است. در این مطالعه از آرایه ونر استفاده شد که دلیل آن تفکیک عمقی و جانبی بهتر و همچنین سهولت و سرعت برداشت بالاتر داده‌ها نسبت به سایر آرایه‌ها بوده است. این دستگاه ساخت ایران (شرکت زمین سولار سیستم) و کاملاً بومی شده می‌باشد که علاوه بر داشتن قابلیت برداشت توموگرافی، دارای دقت اندازه‌گیری ولتاژ تا ۱ میکروولت، شدت جریان تا ۱ میکرو آمپر و توان خروجی ۵۰۰ وات با قابلیت حذف نوفه‌ها به‌طور اتوماتیک می‌باشد. لازم به یادآوری است اختلاف پتانسیل ایجاد شده به توان و قدرت دستگاه، وضعیت خشکی یا مرطوب بودن زمین و آرایه‌های مورد استفاده بستگی خواهد داشت با این حال در برداشت‌های ژئوالکتریک اختلاف پتانسیل ایجاد شده نباید کمتر از ۱ میلی ولت باشد. در این دستگاه نوفه‌ها یا پارازیت‌ها به‌صورت خودکار از طریق فیلترهای دیجیتال حذف می‌شوند.

از نظر زمین‌شناسی محل مورد مطالعه در زون سندج-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 به‌طور کلی ترکیبات رُسی نیز در آن دیده می‌شود (شکل ۲). همچنین در اطراف محل مورد مطالعه بیرون‌زدگی‌های مربوط به ژوراسیک شامل شیست و اسلیت به همراه آهک‌های دگرگون شده نیز قابل مشاهده می‌باشد (Vahabian et al., 2019). بررسی مطالعات انجام شده نشان دهنده عمق آبرفتی حدود ۵ متری گراولی ماسه‌ای همراه با رُس و سیلت می‌باشد که به طرف شمال تا عمق حدود ۳۰ متر می‌رسد. نوع نوع رُس این منطقه از نوع کائولینیت (۸۵ درصد)، ایلیت (۱۰ درصد) و مونت موریلونیت (۵ درصد) می‌باشد (Vahabian et al., 2019). مطالعات انجام شده ژئوتکنیک در این منطقه نشان می‌دهد لیتولوژی محل تا عمق ۲۰ متری از نوع لایه‌های لای ماسه‌دار همراه با شن می‌باشد (Ghaem Sazeh, 2017). برداشت سونداژ الکتریکی قائم در محل مورد مطالعه وجود لایه‌های رُسی (تا عمق حدود ۲/۶ متری)، مارنی رُسی (تا عمق حدود ۱۵ متری)، آهک مارنی و مادستونی (تا عمق حدود ۶۰ متری) و مادستون و سیلت به همراه آهک (تا عمق حدود ۱۶۰ متری) را نشان داده است که نشان‌دهنده عمق نفوذ پایین به شیرابه هستند (Karimi et al., 2021; Vahabian et al., 2019). با توجه به نزدیکی این منطقه به سازنده‌ای باتولیت الوند مشخص شده است که این سازند فرایند کارست‌شدگی را کاهش داده است.

در شکل ۳ نمایی از منطقه مورد مطالعه شامل نوع پوشش گیاهی (عمدتاً رُز، سنجد و بادام)، محدوده لندفیل (خطوط سیاه‌رنگ)، موقعیت سونداژهای توموگرافی مقاومت ویژه (خطوط قرمز)، کانال انتقال شیرابه (خط زردرنگ) و آبراهه فصلی (خط سبز) مشخص شده است. پوشش گیاهی عمدتاً به‌صورت کشت شده به‌منظور جذب شیرابه ناشی از حوضچه‌ها بوده است. هدف از کشت این‌گونه‌ها جذب املاح موجود در شیرابه با هدف کاهش



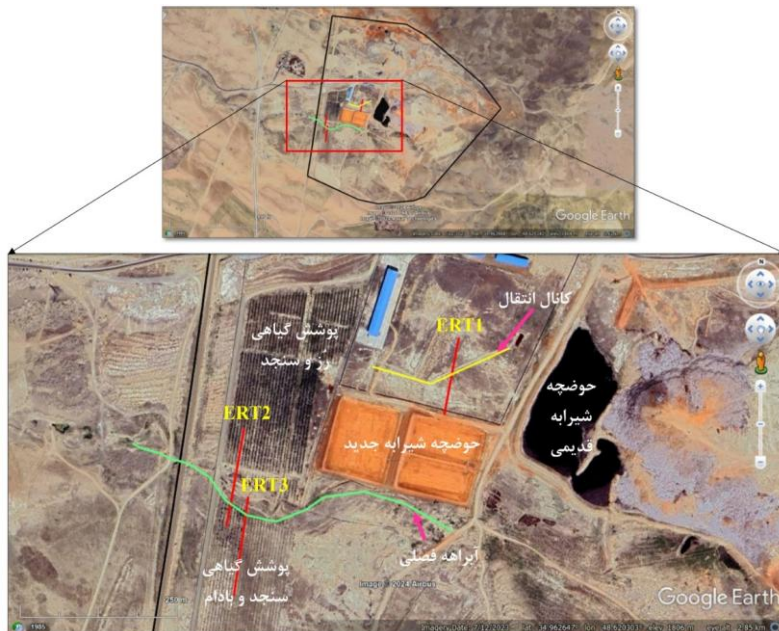
**Legend**

**Geology**

- |   |   |            |
|---|---|------------|
| Q1: Old alluvial fans and terraces                                  | Oc: Red Conglomerate                      | Fault      |
| Q2: Young alluvial fans and terraces                                | JKs: Sandstone                            | River      |
| Q3: Low level alluvial Deposits                                     | K11: Thick Limestone                      | City       |
| Qal: Recent alluvium  | K1m.l: Marly Limestone                    | study area |
| Qtr: Fresh water limestone and travertine                           | K1s,c: Quartzitic Sandstone, Conglomerate |            |
| K: Marly Limestone, Massive Limestone, Sandy Limestone and Dolomite | Jsh.s: Shale, Slate, Metasandstone        |            |
| OMqm: Alternation of Marl, Shally marl, Siltstone, Sandstone        | OMql1: Sandy Limestone with Marl          |            |

شکل ۲. مشخصات منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ همدان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی)

Fig. 2. Schematic diagram of the study stages for prone areas of underground dam construction



شکل ۳. محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت سونداژهای توموگرافی مقاومت ویژه، حوضچه‌های شیرابه، کانال انتقال شیرابه و آبراهه فصلی

(ERT1, ERT2 , ERT3 به ترتیب پروفیل‌های شماره ۱، ۲ و ۳)

Figure 3. The studied area along with the location of special resistance tomography soundings, leachate ponds, leachate transfer channel, and seasonal waterway. (ERT 1, ERT2, and ERT3 define profiles 1, 2, and 3, respectively)

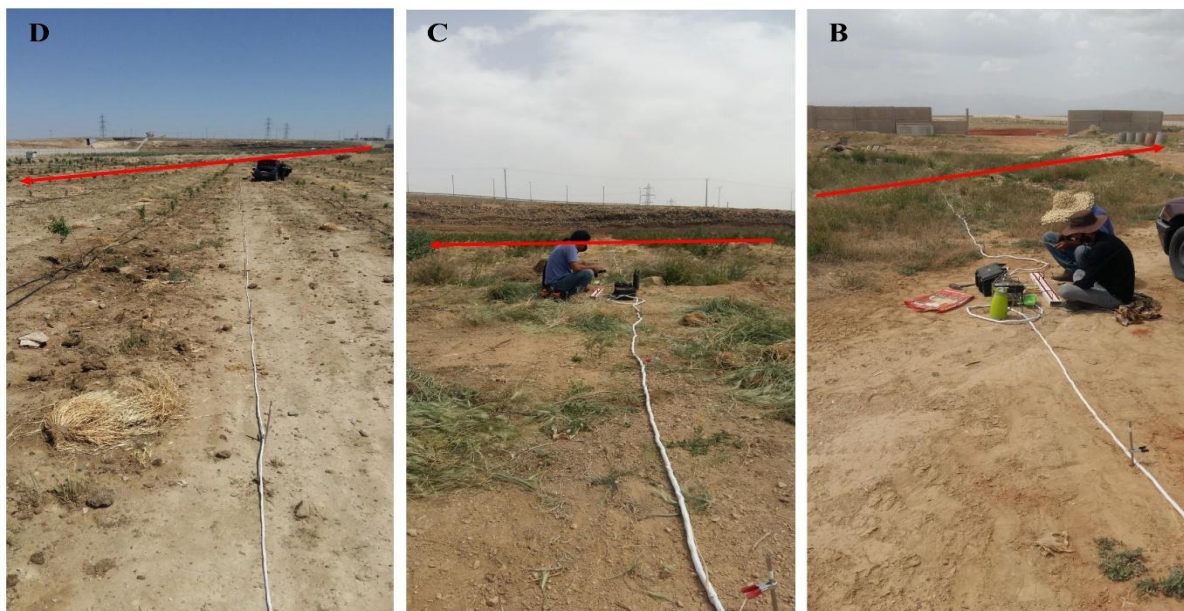
برداشت شده شماره ۱ (B)، ۲ (C) و ۳ (D) ارائه شده است. فاصله پروفیل ۱ نسبت به محل حوضچه شیرابه قدیمی، ۲۴۰ متر و فاصله دو پروفیل دیگر از محل این حوضچه حدود ۵۴۰ متر بوده است.

نوفه‌ها در واقع سیگنال‌هایی به جز هدف مورد مطالعه هستند. الگوریتم مورد استفاده در حذف نوفه‌ها استفاده از میانگین داده‌های با فراوانی بیشتر است به صورتی که اثر تک داده‌های پرت در میانگین ناچیز می‌گردد. در شکل ۴ تجهیزات مورد استفاده (A)، نمایی از پروفیل‌های

جدول ۱- موقعیت ابتدایی و انتهایی پروفیل‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده

Table 1- ERT Profile Start and End Locations

شماره پروفیل	ابتدای پروفیل			انتهای پروفیل			جهت برداشت پروفیل
	Z	Y	X	Z	Y	X	
شماره ۱	۱۷۹۵	۳۸۷۱۸۹۰	۲۸۲۳۲۱	۱۷۹۵	۳۸۷۱۷۷۱	۲۸۲۲۸۸	شمالی-جنوبی
شماره ۲	۱۷۹۱	۳۸۷۱۷۳۹	۲۸۲۱۱۹	۱۷۹۰	۳۸۷۱۶۱۷	۲۸۲۱۰۲	شمالی-جنوبی
شماره ۳	۱۷۸۹	۳۸۷۱۵۵۷	۲۸۲۰۹۳	۱۷۹۱	۳۸۷۱۴۳۷	۲۸۲۰۷۸	شمالی-جنوبی



شکل ۴. نمایی از تجهیزات مورد استفاده (A) و پروفیل‌های توموگرافی برداشت شده (پروفیل‌های شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب B، C و D) (فلش‌های قرمز موقعیت کانال و آبراهه‌های فصلی)

Fig. 4. A view of the employed equipment (A) and the taken tomographic profiles (profiles No. 1, 2, and 3 correspondingly labeled B, C, and D) (red arrows indicate the locations of the channel and seasonal stream)

### مبانی روش 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 الکترود A و B به زمین فرستاده‌شده، سپس اختلاف پتانسیلی که در اثر عبور این جریان بین دو الکترود M و N حاصل می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. آنگاه با استفاده از رابطه زیر مقدار مقاومت ویژه به دست می‌آید:

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (1)$$

مقاومت ویژه الکتریکی که بدین طریق به دست می‌آید را مقاومت ویژه ظاهری می‌گویند. در رابطه (1)  $\Delta V$  برحسب میلی‌ولت، I برحسب میلی‌آمپر و K برحسب متر یا واحد طول بیان می‌گردد و بدین ترتیب مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری ( $\rho_a$ ) نیز برحسب اهم‌متر بیان می‌شود. با توجه به جنبه‌های نظری مسئله، ممکن است وضعیت الکترودهای پتانسیل M و N نسبت به الکترودهای جریان A و B غیر مشخص باشد، ولی نظر به سهولت انجام کارهای صحرائی و همچنین محاسبات مربوط همیشه MN را در امتداد AB، بین دو الکترود A و B اختیار می‌نمایند و بر حسب وضع قرار گرفتن چهار الکترود نسبت به یکدیگر آرایش‌ها یا آرایه‌های گوناگونی حاصل می‌شود. سونداژهای الکتریکی در واقع بیان نموداری تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری ( $\rho_a$ ) بر حسب عمق می‌باشند که با استفاده از سیستم چهار قطبی یا چهار الکترودی در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. عمق مورد بررسی، یا به عبارت دیگر عمق نفوذ جریان، با تغییر فاصله الکترودها تنظیم می‌گردد. هر قدر این فاصله بیشتر شود عمق نفوذ جریان، و بالطبع عمق کاوش، نیز بیشتر می‌گردد. مقاومت ویژه ظاهری یک مفهوم کاملاً صوری است و نباید به صورت مقاومت‌های متوسط در سازه‌ای زیرسطحی غیر همگن تلقی شود. برای تفسیر کمیت مقاومت ویژه ظاهری باید آرایش نقاط چشمه جریان و پتانسیل مورد توجه باشد، زیرا مقدار این کمیت تابع فاکتور هندسی نقاط چشمه و پتانسیل (K) است. به طور کلی هدف از پیمایش‌های مقاومت ویژه تعیین تغییرات مقاومت ویژه ظاهری بر حسب عمق یا به طور جانبی است. در این

مطالعات از آرایه ونر برای برداشت‌های دوبعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) توزیع مقادیر مقاومت ویژه ظاهری استفاده شده است. جزئیات بیشتر در مطالعات کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) و لوک (Loke, 2006) ارائه شده است.

### پردازش داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

به منظور تفسیر داده‌های توموگرافی بعد از برداشت داده‌ها و حذف داده‌های پرت، داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری برداشت‌شده 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 دوبعدی با استفاده از روش اجزای محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد که مدل اولیه آن بسته به تجارب کارشناس بهبود می‌یابد. در روش معکوس‌سازی 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, 1997, 2006). برای بهبود مدل اولیه عمدتاً از دو روش کمترین مربعات گوس-نیوتن و روش شبه‌نیوتن استفاده می‌شود. در روش گوس-نیوتن برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می‌شود (۲).

$$(J^T J + uF) d = J^T g \quad (2)$$

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

می‌شود. در مدل‌سازی پروفیل‌های برداشت‌شده از روش شبه‌نیوتن با فیلترهای افقی و عمودی یکسان استفاده شد. به‌طور کلی، برای هر پروفیل برداشت‌شده، 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 شبه‌مقطع حل وارون که موقعیت و محل واقعی زون‌های با مقاومت الکتریکی بالا و پایین را بهتر و واقعی‌تر نشان می‌دهد (مقاطع پایینی) ارائه شد. قبل از مدل‌سازی، داده‌های پرت از محاسبات حذف می‌شوند (شکل ۵). طریقه حذف این داده‌های با توجه به میانگین مقدار مقاومت ویژه هر لاین انجام می‌شود (Karimi et al., 2021). جزئیات بیشتر در مطالعات لوک (Loke, 1997; 2006) و کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) ارائه شده است.

محاسبه شود. در روش شبه‌نیوتن از معادله به‌روزرسانی به فرم زیر استفاده می‌شود:

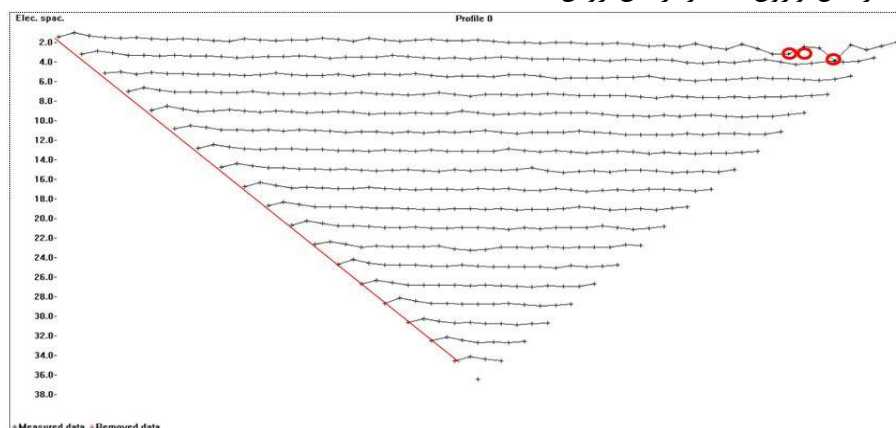
$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T \quad (3)$$

که در آن

$$u_i = \frac{(\Delta y_i - B_i P_i)}{P_i^T P_i} \quad (4)$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (5)$$

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  $P_i$  (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



شکل ۵. نمونه داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده قبل از تفسیر (نقاط قرمز رنگ داده‌های پرت)

Fig. 5. A sample of raw data (electrical resistivity data) before the processes (red points of outlier data)

اشباع و آلودگی ناشی از شیرابه و منطقه اشباع از شیرابه می‌باشد که تا عمق ۱۸ متری و پایین‌تر ادامه دارد (Meju, 2006; Chambers et al., 2006; Vahabian et al., 2019). بررسی‌ها نشان می‌دهد عامل این نفوذ و پخش هاله آلودگی کانال انتقال شیرابه است که از قسمت میانی پروفیل می‌گذرد بنابراین تداوم انتقال شیرابه از طریق این کانال ناحیه‌ای با مقاومت پایین یا رسانش بالا ایجاد کرده است. بررسی‌های نشان می‌دهد وجود املاح با غلظت بالا و همچنین تداوم انتقال شیرابه در کانال خاکی مسبب این امر بوده است. از طرفی، وجود شیب رو به پایین بر تشدید این آلودگی در پایین‌دست افزوده است (Vahabian et al., 2019). همچنین

## نتایج و بحث

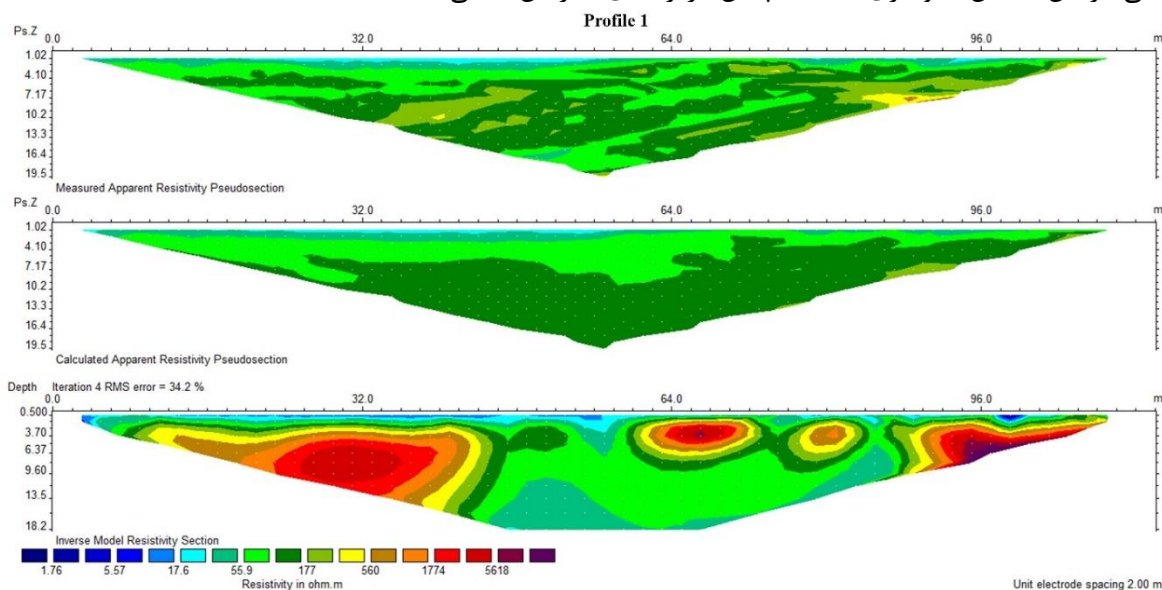
### تحلیل شبه‌مقطع هم‌مقاومت پروفیل شماره ۱

این پروفیل در جهت شمالی جنوبی لندفیل و عمود بر جهت جریان و کانال انتقال برداشت شده است. نتایج نشان می‌دهد ابتدای این پروفیل نسبت به نفوذ عمقی مقاوم می‌باشد به‌طوری که در فاصله ۴۲ متری از ابتدای پروفیل لایه‌ای با مقاومت بالای بین ۱۷۷ تا ۵۶۰۰ اهم‌متر از عمق حدود ۳ متری به پایین دیده می‌شود که مانع نفوذ شیرابه شده است. از فاصله ۴۲ تا ۹۰ متری از ابتدای پروفیل لایه‌هایی با مقاومت الکتریکی پایین (رسانش بالا) بین ۱۷ الی ۱۷۷ اهم‌متر نسبت به پیرامون دیده می‌شود که نشان دهنده رس

بررسی تأثیر کانال انتقال و آبراهه‌های فصلی بر الودگی هاله آلودگی شیرابه حاصل از پسماند حوضچه شیرابه ... / کریمی و همکاران

بخش انتهایی پروفیل از فاصله ۹۰ متری به بعد با مقاومت الکتریکی بالا (۵۶۰ اهم‌متر و بالاتر) دیده می‌شود که نشان‌دهنده لایه‌هایی با نفوذپذیری کم که عمدتاً به دلیل وجود سازنده‌ای آهکی و شیبستی می‌باشد. بررسی محققان نشان می‌دهد مقاومت‌های کمتر از ۱۰ اهم‌متر نشان‌دهنده مناطق اشباع از شیرابه است (Park et al., 2016; Moretto et al., 2021; Ansari et al., 2017) در حالی که در این پروفیل دامنه منطقه اشباع از شیرابه بین ۱/۷۶ تا ۱۷۷ اهم‌متر بوده است. دلیل این تغییرات زیاد ناحیه اشباع از شیرابه با غلظت بالای عناصر تشکیل دهنده موجود در شیرابه (Vahabian et al., 2019) و ترکیب از لندفیل قدیمی و جدید می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد با توجه به عرض ۱ متری کانال انتقال شیرابه هاله آلودگی شیرابه بسیار گسترده‌تر بوده است. با توجه به وجود ترکیبات رسی و بالا بودن غلظت بالای املاح در زیرسطح توسعه شیرابه این امر نشان داد ایجاد کانال انتقال شیرابه از نوع بتنی یا لوله‌ای می‌توانست از انتشار هاله آلودگی در این مقیاس جلوگیری کند. همچنین در راستای

پروفیل ناهمگنی در انتشار هاله آلوده دیده می‌شود (شکل ۶). این ناهمگنی ناشی از ترکیبات مختلف در راستای پروفیل (Helali et al., 2020) و تغییرات شدت یون شیرابه (Maurya et al., 2017; Vahabian et al., 2019) می‌باشد. به‌طور کلی در این پروفیل سلول‌هایی با مقاومت بالاتر از ۵۶۰ اهم‌متر دیده می‌شود (۱ تا ۴۴ متری، ۶۰ تا ۷۲ متری، ۸۲ تا ۸۸ متری و ۹۲ تا ۱۰۸ متری) که ناحیه جداکننده زون آلوده با زون غیر آلوده می‌باشد. این امر نشان می‌دهد در راستای پروفیل برداشت شده الگوی نفوذ شیرابه همگن نیست که با مطالعات انجام شده خوش‌روش و همکاران (Khoshravesh et al., 2021)، کریمی و همکاران (Karimi et al., 2021) و بیجت و همکاران (Bichet et al., 2016) تطابق نشان می‌دهد. این محققین بر این باور هستند که ناهمگنی در الگوی پراکنش شیرابه در لندفیل می‌تواند ناشی از عمر لندفیل (قدیم یا جدید بودن لندفیل)، غلظت املاح موجود در شیرابه (Vahabian et al., 2019) و یا ناهمگنی سازنده‌ای زمین‌شناسی باشد.



شکل ۶. شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل بالا)، شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (شکل وسط)، مقطع حل وارون مدل به‌دست آمده (شکل پایین) در امتداد پروفیل شماره ۱ (خطوط سیاه مشخص کننده هاله آلودگی ناشی از شیرابه)

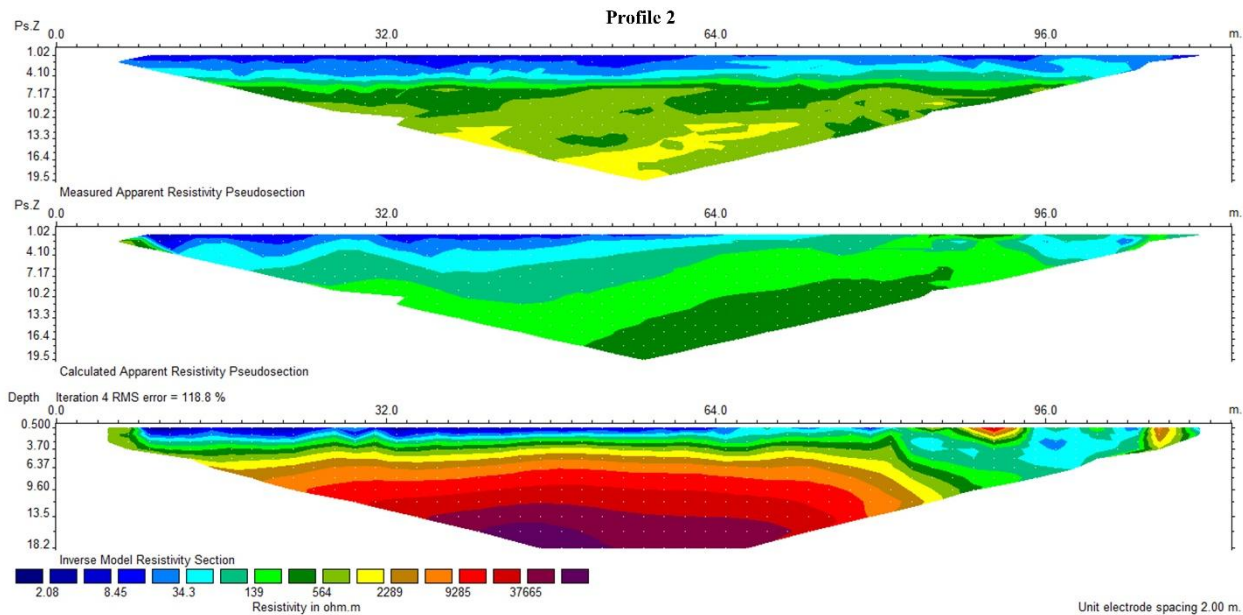
**Fig. 6. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 1 (black lines specifying the plume of pollution caused by leachate)**

بررسی پروفیل نشان می‌دهد از نقطه شروع تا فاصله ۷۸ متری ابتدای پروفیل تا عمق ۳/۵ متری از خاک سطحی و رس تشکیل شده (با رسانش بالا یا مقاومت الکتریکی کمتر از ۳۴ اهم‌متر) ولی در اعماق پایین‌تر لایه‌ها و منطقه‌ای با

تحلیل شبه مقطع هم مقاومت پروفیل شماره ۲  
راستای برداشت این پروفیل شمالی-جنوبی بوده و در انتهای آن کانال آبراهه فصلی یا مسیل قرار گرفته است (شکل ۷).

شیرابه (پروفیل ۱ کانال مصنوعی و پروفیل شماره ۲ طبیعی) دانست. همچنین در انتهای این پروفیل ناحیه‌ای با مقاومت ۱۳۹ تا ۵۶۴ اهم‌متر دیده می‌شود (سبز پررنگ) که ناحیه آلوده ولی غیراشباع از شیرابه می‌باشد چرا که مقاومت الکتریکی آن نسبت به ناحیه فوقانی (کمتر از ۱۳۹ اهم‌متر) بالاتر است. این منطقه در واقع ناحیه بین زون اشباع و غیراشباع از آلودگی ناشی از شیرابه و رواناب فصلی است. نتایج نشان می‌دهد تأثیر کانال انتقال شیرابه بر توسعه هاله آلودگی شدیدتر از آبراهه فصلی است. دلیل این امر را می‌توان در دو عامل ناحیه زیرین متفاوت در دو پروفیل ۱ و ۲ (پروفیل شماره ۱ عمدتاً آبرفتی رُسی، پروفیل شماره ۲ عمدتاً رُسی و مادستونی)، شدت یا تداوم جریان شیرابه (پروفیل ۱ متداوم‌تر از پروفیل ۲)، و دوری یا نزدیکی به حوضچه شیرابه (پروفیل ۱ نزدیک‌تر از پروفیل ۲) دانست (Grellier et al., 2007; Vahabian et al., 2019; Karimi et al., 2021). عامل دیگر این موضوع را می‌توان به دلیل خودپالایی بیشتر شیرابه توسط ترکیبات آبرفتی و رُسی موجود در آبخوان که در مسیر انتقال قرار دارند دانست (Helali et al., 2020). در این پروفیل تا حدودی در سرتاسر راستای برداشت همگنی از نظر نفوذ به شیرابه دیده می‌شود (به‌استثنای بخش انتهایی پروفیل). نتیجه نهایی این پروفیل نشان دهنده نفوذ عمقی و جانبی شیرابه در انتهای پروفیل است که به دلیل جریان‌ات رواناب فصلی و ادغام آن با شیرابه است. شیرابه موجود در این پروفیل عمدتاً ناشی از زباله‌های بخش قدیمی لندفیل می‌باشد. بنابراین احتمال آلودگی پایین‌دست آبخوان این پروفیل به دلیل نفوذ عمقی وجود خواهد داشت که در مطالعات متعدد در سایر مناطق جهان این عامل اثبات و بررسی شده است (Casado et al., Matsui et al., 2000). (2015).

مقاومت الکتریکی بالا (مقاومت الکتریکی بیشتر از ۲۲۸۹ اهم‌متر) دیده می‌شود که نشان‌دهنده لایه‌های متراکم سنگی و نفوذناپذیر از نوع رُسی و مادستونی می‌باشد. از فاصله ۷۸ متری به بعد تا بخش انتهایی پروفیل منطقه‌ای با آفت مقاومت الکتریکی قابل مشاهده است (مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۳۹ اهم‌متر) که نشان‌دهنده نفوذ نسبی شیرابه به دلیل وجود آبراهه و کانال زهکش‌کننده عبوری شیرابه از بخش انتهایی پروفیل است (شکل ۷). عرض کانال یا آبراهه فصلی ۲/۵ متر بوده است در حالی که عمق نفوذ شیرابه ۱۱ متر به عرض ۳۰ متر (از فاصله ۸۰-۱۱۰ متری ابتدای پروفیل) ایجاد شده است. بررسی مطالعات انجام شده از طریق سونداژهای الکتریکی قائم (Helali et al., 2020) و برداشت نمونه‌های مغزه‌گیری (Ghaem Sazeh Sanjesh, Ekbatan Consultant Engineering, 2017; Vahabian et al., 2019) وجود سازنده‌ای نفوذناپذیر شامل رُس، مارن، آهک مارنی و مادستون را در این پروفیل نشان می‌دهد که مانع نفوذ عمقی شیرابه می‌گردد. ولی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد وجود آبراهه فصلی که رواناب فصلی و شیرابه به صورت دائمی در آن جریان داشته است بستر لازم برای نفوذ را مهیا نموده است. این نتایج نشان می‌دهد هرچند سنگ بستر این پروفیل از نوع رُسی و مادستونی است ولی تداوم جریان رواناب فصلی و ادغام آن با شیرابه باعث نفوذپذیر شدن سنگ بستر به شیرابه شده و در نتیجه به صورت جانبی نیز توسعه هاله را شدت بخشید است. بنابراین وجود این آبراهه مشابه با کانال انتقال شیرابه که در پروفیل شماره ۱ برداشت شده است موجب توسعه عمقی و جانبی شیرابه شده است. نکته قابل توجه وسعت کمتر این هاله نسبت به پروفیل شماره ۱ است. دلیل این امر را می‌توان به لایه زیرین یا سنگ بستر متفاوت دو پروفیل، فاصله متفاوت از حوضچه شیرابه (پروفیل ۱ حدود ۲۴۰ متر و پروفیل ۲ حدود ۵۴۰ متر) و همچنین نوع مسیر انتقال



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

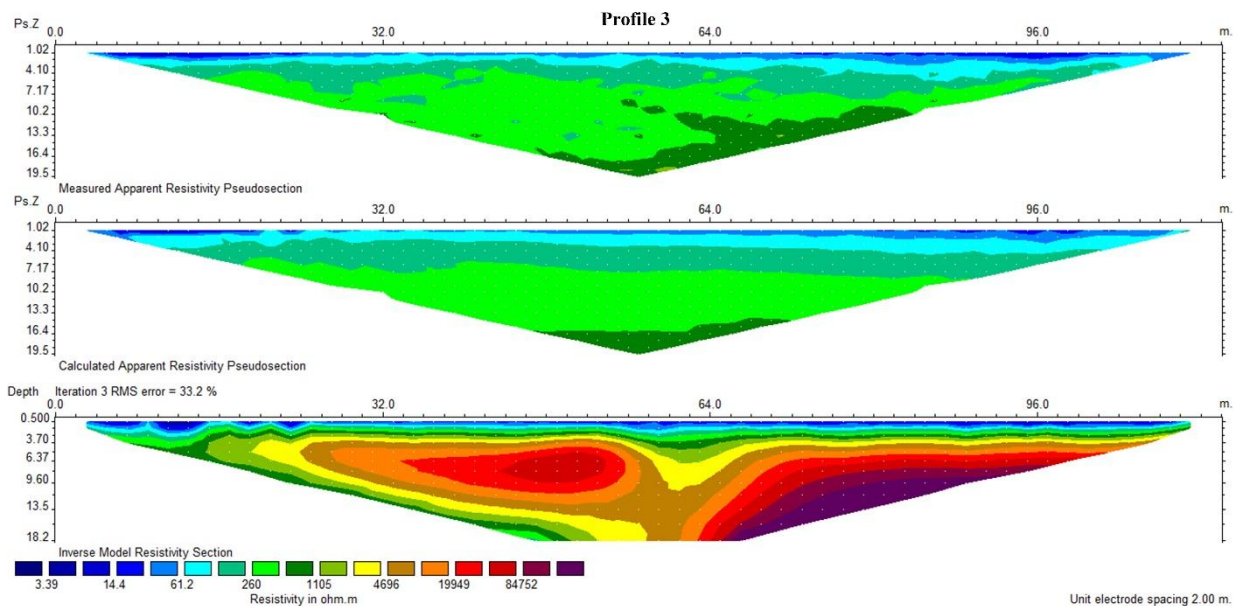
**Fig. 7. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 2**

از ۱۱۰۵ اهم‌متر) که از نظر لیتولوژیکی از مادستون و سیلت‌استون بوده و نفوذ شیرابه در آن دیده نمی‌شود (شکل ۸). بنا به این نتایج الگوی توسعه هاله آلودگی ناشی از شیرابه توسط آبراهه فصلی تنها بر بخش ابتدایی پروفیل تأثیرگذار بوده، باقیمانده پروفیل نفوذ عمقی شیرابه را تجربه نکرده و الگوی لیتولوژیکی و نفوذ شیرابه در سرتاسر پروفیل (به استثنای ابتدای پروفیل) همگن می‌باشد. نتایج این پروفیل شباهت بسیاری به پروفیل شماره ۲ (شکل ۷) داشته است. بنابراین با هم‌پوشانی انتهای پروفیل شماره ۲ و ابتدای پروفیل شماره ۳ تا حدودی مشخص می‌شود آبراهه فصلی توانسته است موجب نفوذ بیشتری و توسعه جانبی هاله آلودگی شود.

### تحلیل شبه مقطع هم مقاومت پروفیل شماره ۳

راستای این پروفیل شمالی-جنوبی بوده و در سمت جنوبی آبراهه فصلی قرار دارد به طوری که ابتدای پروفیل نزدیک آبراهه فصلی و امتداد پروفیل ۲ بوده است (شکل ۸). برداشت‌های توموگرافی دوبعدی نشان می‌دهند از نقطه شروع پروفیل تا فاصله ۲۰ متری منطقه‌ای با مقاومت الکتریکی پایین (مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۲۶۰ اهم‌متر) قابل مشاهده است که ناشی از نشت و نفوذ شیرابه حاصل از آبراهه و کانال زهکشی است. در این بخش ناحیه اشباع از شیرابه محدود به عمق ۱/۵ متری است (مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۴/۴ اهم‌متر) در حالی که تا عمق ۶ متری از شدت اشباع شدگی کاسته شده است (مقاومت الکتریکی ۱۴/۴ تا ۲۶۰ اهم‌متر). بر اساس مطالعات انجام شده نواحی با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم‌متر ناحیه اشباع از شیرابه است (Park et al., 2016; Maurya et al., 2017; Moretto et al., 2021; Chu et al., 2017; Ansari et al., 2021) در حالی که در این مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی در مناطق اشباع بین ۳/۳۹ تا ۲۶۰ اهم‌متر نوسان می‌کند که ناشی از خشک بودن این منطقه می‌باشد. از فاصله ۲۰ متری ابتدای پروفیل تا انتهای پروفیل از عمق حدود ۳/۵ متری به بعد لایه‌ای با مقاومت الکتریکی بالا دیده می‌شود (مقاومت الکتریکی بالاتر





شکل ۸. شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل بالا)، شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (شکل وسط)، مقطع حل وارون مدل به دست آمده (شکل پایین) در امتداد پروفیل شماره ۳

**Fig. 8. Measured apparent resistivity pseudo section (upper), calculated apparent resistivity pseudo section after removing noises (middle), and inverse model resistivity section (lower) along profile number 3**

### نتیجه‌گیری

جریان‌ات زیرسطحی موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی پایین‌دست می‌شود. مطالعه کنونی نشان داد کانال انتقال شیرابه موجب انتشار گسترده عمقی هاله آلودگی حدود ۳۰ الی ۵۰ متر و جانبی ۱۳ الی ۱۸ متری شده است که لزوم استفاده از کانال‌های بتنی یا لوله‌ای را نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد تغییرات مقاومت الکتریکی ناحیه اشباع از شیرابه بر خلاف مطالعات صورت گرفته قبلی که کمتر از ۱۰ اهم‌متر بوده است در این مطالعه بین ۲/۳ الی ۲۶۰ اهم‌متر نوسان می‌کند که دلیل آن را می‌توان به خشک بودن منطقه مورد مطالعه و همچنین غلظت بالای املاح موجود در شیرابه مرتبط نمود که نیازمند مطالعات بیشتر از نظر آنالیزهای شیمیایی است. بررسی‌های متعدد همچنین نشان داده است تغییرات جانبی زیاد بافت خاک در لندفیل که به خصوصیت ذاتی خود ساختار لایه‌ها مرتبط است موجب ایجاد الگوی ناهمگن نفوذ شیرابه در آبخوان و هاله آلودگی ناهمگن نیز می‌گردد (Karimi et al., 2021). این مطالعه نیز نشان داد تغییرات جانبی بافت خاک در راستای پروفیل‌ها موجب الگوی ناهمگن نفوذ شیرابه شده است که وجود کانال انتقال شیرابه این امر را تشدید کرده است. جود آبراهه‌های فصلی یا مسیل‌ها که جهت خروج رواناب ناشی از بارندگی‌ها ضروری است از طریق نفوذ زیرسطحی

لندفیل به‌عنوان سازه‌ای مهم و مهندسی شده در مدیریت پسماند و عوارض ناشی از آن نقش مهمی ایفا می‌کند. ایجاد این سازه در مناطقی که احتمال نفوذ شیرابه به آبخوان وجود دارد از ریسک بالایی برخوردار است. بنابراین تلاش می‌شود در احداث لندفیل این مهم در نظر گرفته شود (Khoshravesht et al., 2021). یکی از عوامل مهم در شدت نفوذ شیرابه در آبخوان خصوصیات ترکیبات شیمیایی و همچنین نوع سازنده‌های زمین‌شناسی تشکیل دهنده آن است (Karimi et al., 2021; Vahabian et al., 2019). وجود ترکیبات شیمیایی متنوع در شیرابه حاصل از لندفیل به دلیل خاصیت تغییر اسیدیته، نفوذپذیری آن را در آبخوان تشدید می‌کند. بنابراین لزوم توجه به این امر در مدیریت لندفیل و شیرابه بسیار اهمیت دارد. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از کانال‌های خاکی و ایزوله نشده انتقال شیرابه از حوضچه قدیمی به حوضچه‌های جدید موجب انتشار عمقی و جانبی هاله آلودگی شده است که از نظر عمقی و جانبی متغیر است که دلیل آن نوع سازنده‌ای آبرفتی ماسه‌ای و رس و همچنین بالا بودن غلظت املاح شیرابه است (Helali et al., 2020; Vahabian et al., 2019). از سوی دیگر، وجود مسیل‌ها یا آبراهه‌های فصلی طبیعی نیز در انتقال شیرابه از طریق

ضرایب هیدرو دینامیکی و در نتیجه سرعت نفوذ شیرابه در آبخوان پیشنهاد می‌شود.

### تشکر و قدردانی

این مطالعه بر اساس طرح پژوهشی شماره ۲۱۲۱۴۰۰۲۵ انجام شده است که به این وسیله از مدیریت پسماند شهرداری همدان تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

- Ansari, S., Norooz, R., Zeynolabedin, A., Foadi, H., & Ghiassi, R. (2021). Experimental investigation of correlations between electrical resistivity, moisture content, and voltage values for leachate-contaminated clayey sand. *Journal of Applied Geophysics*, 193, 104391. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104391
- ANZECC. (1994). *National Hazardous Waste Classification System*, Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Canberra.
- Bichet, V., Grisey, E., & Aleya, L. (2016). Spatial 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.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.026
- Casado, I., Mahjoub, H., Lovera, R., Fernández, J., & Casas, A. (2015). Use of electrical tomography methods to determine the extension and main migration routes of uncontrolled landfill leachates in fractured areas. *Science of the Total Environment*, 506, 546-553. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.068
- Chambers, J. E., Kuras, O., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., & Hollands, J. (2006). Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 71(6), B231-B239. doi.org/10.1190/1.2360184
- De Donno, G., & Cardarelli, E. (2017). VEMI: a flexible interface for 3D tomographic inversion of time-and frequency-domain electrical data in EIDORS. *Near Surface Geophysics*, 15(1), 43-58. doi.org/10.3997/1873-0604.2016037
- De Donno, G., Melegari, D., Paoletti, V., Piegari, E. (2024). *Electrical and Electromagnetic Prospecting for the Characterization of Municipal Waste Landfills: A Review*. In: Anouzla, A., Souabi, S. (eds) *Technical Landfills and Waste Management*. Springer Water. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-52633-6-1
- Di Maio, R., Fais, S., Ligas, P., Piegari, E., Raga, R., & Cossu, R. (2018). 3D geophysical imaging for site-specific characterization plan of an old landfill. *Waste Management*, 76, 629-642. doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.004
- Dumont, G., Robert, T., Marck, N., & Nguyen, F. (2017). Assessment of multiple geophysical techniques for the characterization of municipal waste deposit

شیرابه موجب آلودگی آبخوان پایین دست خواهد شد. بنابراین مسدود کردن مسیر خروجی لندفیل از طریق آبراهه‌ها می‌تواند پتانسیل آلودگی پایین دست را کاهش دهد که این امر نیازمند مطالعات بیشتر است. این بررسی نشان می‌دهد در موارد مشابه در سایر لندفیل‌ها بحث مدیریت انتقال شیرابه باید با لحاظ نمودن امکان آلودگی عمقی و جانبی مد نظر قرار گیرد به طوری که از انتقال رواناب بارش‌های رگباری از طریق مسیل‌ها یا آبراهه‌های فصلی داخل لندفیل به پایین دست ممانعت به عمل آید. بنابراین جهت جلوگیری از توسعه بیشتر هاله آلودگی استفاده از کانال‌های بتنی یا لوله‌ها جهت انتقال شیرابه از حوضچه قدیمی به جدید پیشنهاد می‌گردد. از طرفی دیگر، برای مدیریت انتقال شیرابه در آبراهه‌های فصلی لازم است در وهله اول از ورود شیرابه به این مسیرها ممانعت به عمل آمده و در وهله دوم اجازه زهکشی شیرابه از مسیرها به پایین دست لندفیل از طریق مسدودسازی آن‌ها داده نشود.

نتایج به دست آمده کارایی روش غیر تخریبی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در ردیابی و مدل‌سازی توسعه هاله آلودگی شیرابه حاصل از کانال‌های مصنوعی و آبراهه‌های طبیعی را نشان داد. با توجه به ساختار آبرفتی و آهکی در منطقه مورد مطالعه استفاده از سونداژ توموگرافی عمیق پیشنهاد می‌شود. همچنین به دلیل اهمیت شیرابه و تأثیر آن بر محیط زیست لازم است پروتوکول‌های استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به عنوان روش‌های نوین در مطالعات امکان‌سنجی محل لندفیل تدوین و از طریق سازمان محافظت از محیط زیست الزامی گردد. در نتیجه این امر، می‌توان هزینه‌های ناشی از ایجاد سازه‌های ایزوله (استفاده از ژئوممبران) در لندفیل‌های در حال احداث یا احداث شده را مدیریت نموده و کاهش داد.

استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در این مطالعه با هدف بررسی تأثیر کانال‌های انتقال طبیعی و مصنوعی بر انتشار هاله آلودگی بود بنابراین تأکید می‌شود در مطالعات آتی برداشت‌های توموگرافی در امتداد شیب منطقه انجام شده و روند تغییرات هاله آلودگی و همچنین ارتباط آن با نوع آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اهمیت ضریب نفوذ شیرابه در آبخوان، استفاده از مطالعات تغییرات زمانی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT Time Lapse) به صورت سه‌بعدی در جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی

- approach. *Geophysics*, 88(3), B151-B165. doi.org/10.1190/geo2022-0133.1
- Juarez, M. B., Mondelli, G., & Giacheti, H. L. (2023). An overview of in situ testing and geophysical methods to investigate municipal solid waste landfills. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 24779-24789. doi.org/10.1007/s11356-023-25203-5
- Karimi, Y., Helali, J., MahdiAzad, B., Khodakarami, A., Mirzaei, M., & Mohammadi, S. M. (2021). Investigation and Detection of Leachate Pool Plume from Landfill Pond in Hamedan Landfill Using Electrical Resistivity Tomography and Vertical Electrical Sounding. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(9), 2471-2483. (In Persian). doi.org/10.22059/IJSWR.2021.326050.669003
- Karsli, H., Babacan, A. E., Sayil, N., Çoban, K. H., & Akin, Ö. (2024). An assessment of seismicity and near-surface geophysical characteristics of potential solid waste landfill sites in the Eastern Black Sea Region of Türkiye. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 14156-14177. doi.org/10.1007/s11356-024-31964-4
- Khoshravesh, M., Norooz Valashedi, R., Helali, J., & Raeini-Sarjaz, M. (2021). Tracing and Simulation of Leachate Penetration Transfer at Downstream of Landfill Using Special Electrical Resistivity Tomography Method. *Irrigation and Water Engineering*, 12(2), 449-463. (In Persian). doi.org/10.22125/IWE.2021.142425
- Loke, M. H. (1997). Rapid 2D resistivity inversion using the least-squares method RES2DINV. *Program Manual*.
- Loke, M. H. (2006). RES2DINV ver. 3.55, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Software manual*, 139.
- Lu, Y., Tao, J., Cao, C., Liu, H., Liu, Y., & Ge, Z. (2023). Detection of Landfill leakage based on ERT and OCTEM. *Water*, 15(9), 1778. doi.org/10.3390/w15091778
- Maryanji, Z., toulabi nejad, M. and dolatshahi, Z. (2023). The effect of climate change on snowfall and its prediction in Hamadan County. *Physical Geography Research*, 55(1), 113-129. doi.org/10.22059/JPHGR.2023.358026.1007765
- Matsui, T., Park, S. G., Park, M. K., & Matsuura, S. (2000, November). Relationship between electrical resistivity and physical properties of rocks. In *ISRM International Symposium* (pp. ISRM-IS). ISRM.
- Maurya, P. K., Rønne, V. K., Fiandaca, G., Balbarini, N., Auken, E., Bjerg, P. L., & Christiansen, A. V. (2017). Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography with correlation to ionic strength measured in screens. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 1-8. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.019
- Meju, M. (2006). Geoelectrical characterization of covered landfill sites: a process-oriented model and investigative approach. In *Applied hydrogeophysics* (pp. sites. *Journal of Applied Geophysics*, 145, 74-83. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.013
- Frid, V., Doudkinski, D., Liskevich, G., Shafran, E., Averbakh, A., Korostishevsky, N., & Prihodko, L. (2010). Geophysical-geochemical investigation of fire-prone landfills. *Environmental Earth Sciences*, 60, 787-798. doi.org/10.1007/s12665-009-0216-0
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2012). Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 575-586. doi.org/10.3997/1873-0604.2012046
- Ghaem Sazeh Sanjesh Ekbatan Consultant Engineering, (2017). *Geotechnical Investigation of Hamedan Landfill*, Hamedan Municipality, 55 pp (In Persian)
- Gupta, A., & Paulraj, R. (2017). Leachate composition and toxicity assessment: an integrated approach correlating physicochemical parameters and toxicity of leachates from MSW landfill in Delhi. *Environmental technology*, 38(13-14), 1599-1605. doi.org/10.1080/09593330.2016.1238515
- Hafizi, M. K., Abbassi, B., & 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. (In Persian)
- Helali, J., Karimi, Y. & Mirzaei, M. (2020). *Geophysical (Goelectrical) investigations of Hamedan City Landfill*, Hamedan Municipality, 71 pp (In Persian)
- Helali, J., Momenzadeh, H., Salimi, S., Hosseini, S. A., Lotfi, M., Mohamadi, S. M., Maghami Moghim, G., Pazhoh, F. & Ahmadi, M. (2021). Synoptic-dynamic analysis of precipitation anomalies over Iran in different phases of ENSO. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), 2322. doi.org/10.1007/s12517-021-08644-5
- Helali, J., Nouri, M., Mohammadi Ghaleni, M., Hosseni, S. A., Safarpour, F., Shirdeli, A., Paymard, P. & Kalantari, Z. (2023). Forecasting precipitation based on teleconnections using machine learning approaches across different precipitation regimes. *Environmental Earth Sciences*, 82(21), 495. doi.org/10.1007/s12665-023-11191-9
- Helali, J., Salimi, S., Lotfi, M., Hosseini, S. A., Bayat, A., Ahmadi, M., & Naderizarneh, S. (2020). Investigation of the effect of large-scale atmospheric signals at different time lags on the autumn precipitation of Iran's watersheds. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-24. doi.org/10.1007/s12517-020-05840-7
- Helene, L. P. I., Moreira, C. A., & Bovi, R. C. (2020). Identification of leachate infiltration and its flow pathway in landfill using electrical resistivity tomography (ERT). *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-10. doi.org/10.1007/s10661-020-8206-5
- Isunza Manrique, I., Caterina, D., Nguyen, F., & Hermans, T. (2023). Quantitative interpretation of geoelectric inverted data with a robust probabilistic

- 319-339). Dordrecht: Springer Netherlands. doi.org/10.1007/978-1-4020-4912-5\_11
- Moazzezi, F., Yavari, G., Mosavi, S. and Bagheri, M. (2020). Assessing the Impact of Climate Change on Agriculture in Hamedan-Bahar Plain with Emphasis on Water Productivity and Food Security. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 34(3), 305-323. doi.org/10.22067/jead.2020.17793.0
- Moretto, R. L., Siqueira Neto, A. C., Elis, V. R., & Miguel, M. G. (2017). Detection of leachate pockets in the experimental cell of municipal solid waste with the aid of geophysics. *Margherita di Pula, Proceedings Sardinia*.
- Park, S., Yi, M. J., Kim, J. H., & Shin, S. W. (2016). Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. *Journal of Applied Geophysics*, 135, 1-7. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004
- Sharifi, F., Rahmani Jevinani, M., & Davoodi, H. (2017). Introducing and applying a two-dimensional electrical tomography method in the detection of water movement and evaluating the effects of watershed management measures, case study: Vardij Catchment. *Watershed Engineering and Management*, 9(4), 465-478. (In Persian). doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109286.1263
- Tchobanoglous, G. & Kreith, F., 2002. *Solid Waste Handbook, 2nd ed.* McGraw-Hill, New York
- Ugbor, C. C., Ikwaugwu, I. E., & Ogboke, O. J. (2021). 2D inversion of electrical resistivity investigation of contaminant plume around a dumpsite near Onitsha expressway in southeastern Nigeria. *Scientific Reports*, 11(1), 11854. doi.org/10.1038/s41598-021-91019-3
- United Kingdom Department of the Environment, (1991). *Landfill gas waste management paper No. 27*, London, Crown.
- Vahabian, M., Hassanzadeh, Y., & Marofi, S. (2019). Assessment of landfill leachate in a semi-arid climate and its impact on the groundwater quality case study: Hamedan, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-19. doi.org/10.1007/s10661-019-7215-8.