

## ردیابی و شبیه‌سازی انتقال نفوذ شیرابه در پایین دست محل دفن زباله با استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

مجتبی خوش روش<sup>۱</sup>، رضا نوروز ولاشدی<sup>۲</sup>، جلیل هلالی<sup>۳</sup>، محمود رائینی سرجاز<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

مقاله پژوهشی برگرفته از طرح پژوهشی

### چکیده

بررسی و شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌های زیست محیطی به خصوص شیرابه‌های حاصل از انباشت پسماند در لندفیل‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. هدف از این پژوهش، ردیابی و شبیه‌سازی مسیر و عمق انتقال شیرابه در پایین‌دست محل دفن زباله با استفاده از تکنولوژی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد. به این منظور در محل تجمع شیرابه حاصل از محل دفن زباله شهرستان همدان، دو سونداژ الکتریکی قائم به همراه دو پروفیل توموگرافی مقاومت ویژه در بخش شمال غربی و جنوب غربی به طول ۵۲ متر با فواصل الکترودی ۲ متری با آرایه ونر برداشت شد. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه از نوع سازندهای آبرفتی، ماسه سنگی و آهکی می‌باشد. همچنین مشخص شد در طول پروفیل الگوی انتشار و نفوذ شیرابه حاصل از محل دفن زباله مشابه نبوده است به طوری که در پروفیل شماره یک، شیرابه در بخش انتهایی در فاصله ۳۰ تا ۴۰ متری به عمق ۳ متر نفوذ کرده است و در سایر بخش‌های پروفیل، نفوذ عمقی مشاهده نشد. این در حالی است که در کل طول پروفیل شماره دو، عمق نفوذ به ۲/۵ متر و در بخش میانی تا ۵ متر و بیشتر رسیده است که نشان‌دهنده عدم یکنواختی نفوذ شیرابه در طول پروفیل است. بنابراین مشخص شد که استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در تصویرسازی دو بعدی انتشار شیرابه حاصل از محل دفن زباله، دقیق‌تر و واقعی‌تر از بررسی‌های نقطه‌ای خواهد بود. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات امکان‌سنجی تعیین محل دفن پسماند، استفاده از روش‌های سونداژ الکتریکی قائم و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به دلیل کم هزینه بودن در بررسی عمق و ناحیه گسترش آلودگی در اولویت قرار گیرد و از سوی دیگر، تاثیر این منابع آلاینده بر کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی پایین-دست مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آرایه ونر، پروفیل، پسماند، شیرابه.

<sup>۱</sup> - دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۰۹۱۱۳۵۲۱۶۵۴  
khoshravesh\_m24@yahoo.com; m.khoshravesh@sanru.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> - استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۰۹۱۱۵۷۰۴۷۶۵  
rezanorooz@yahoo.com

<sup>۳</sup> - دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۰۹۱۸۸۱۸۹۵۴۳  
jalilhelali@gmail.com

<sup>۴</sup> - استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۰۹۱۱۱۵۲۲۴۱۶  
raeini@yahoo.com



## مقدمه

آلودگی‌های زیست محیطی یکی از مهمترین مشکلات در جوامع کنونی است که خود را در اشکال مختلف از قبیل هوا، آب و خاک نشان داده است. منشاء آلودگی‌های زیست محیطی می‌تواند به دلیل پساب‌های رها شده در مناطق صنعتی و یا پساب‌های حاصل از دیپو و دفن زباله‌های شهری<sup>۱</sup> باشد. حفاظت کیفی آب‌های زیرزمینی به دلیل کاربرد فراوان این منابع در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب از اهمیت زیادی برخوردار است. رفع آلودگی آب زیرزمینی بسیار پرهزینه و فرایندی طولانی است و اغلب زمانی آلودگی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آبخوان تقریباً غیرممکن می‌شود (یزدانی و منصوریان، ۱۳۹۸). وجود تغییرات مکانی امری طبیعی است ولی شناخت این تغییرات جهت برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت، امری لازم و مفید می‌باشد (فتحی هفشجانی و همکاران، ۱۳۹۳).

مطالعات متعددی از جنبه‌های مختلف به بحث پیرامون عوارض ناشی از لندفیل‌ها پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به بررسی تاثیر شیرابه بر درختان جنگلی (کاظم‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰)، تعیین پتانسیل آلودگی لندفیل (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۱)، مدل‌سازی انتقال آلودگی ناشی از نشت شیرابه لندفیل (نخعی و همکاران، ۱۳۹۱)، تاثیر شیرابه لندفیل بر کیفیت آب زیرزمینی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۳) اشاره نمود.

در اکثر مطالعات فوق به بررسی نقطه‌ای و آماربرداری از محل دفن زباله پرداخته شده است و ناحیه‌ای که امکان آلودگی دارد به صورت دو بعدی و یا شبکه‌ای انجام نشده است. از طرف دیگر، در تعیین محل دفن پسماند یا لندفیل، موارد زیست محیطی

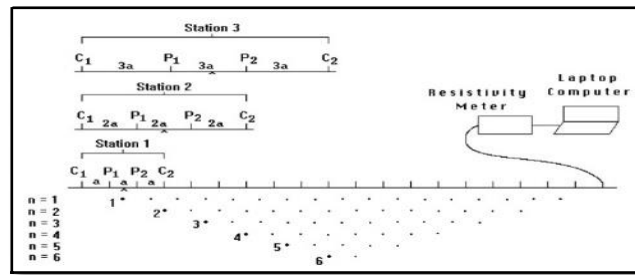
همچون پتانسیل آلاینده‌گی پایین دست و آبخوان در نظر گرفته نشده است. این امر زمانی اهمیت پیدا می‌کند که عدم انتخاب محل مناسب، موجب خسارت جبران‌ناپذیری بر بخش‌های محیطی به ویژه انسانی خواهد شد. این مساله در مناطقی با اقلیم مرطوب مثل مناطق ساحلی دریای خزر که همراه با بارش زیاد، هم از لحاظ مقدار و هم فراوانی می‌باشد، حادث‌تر است؛ زیرا عاملی برای شست و شوی شیرابه‌های حاصل از زباله دیپو شده و انتقال آن به آبخوان و آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

یکی از راه‌های شناسایی جامع و کامل محدوده آلوده شده<sup>۲</sup>، شدت آلودگی و همچنین پتانسیل آلاینده‌گی، استفاده از تکنولوژی‌های غیرتخریبی ژئوفیزیکی به ویژه روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی<sup>۳</sup> می‌باشد. توموگرافی شیوه‌ای برای به دست آوردن تصویری از یک صفحه مسطح و دلخواه از جسمی جامد می‌باشد به طوری که اطلاعات حاصله از این روش می‌تواند برای تولید یا بهبود توزیع دو بعدی کمیت‌های فیزیکی به خصوص مقاومت ویژه و پتانسیل الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. در این روش که به صورت پروفیلی اجرا می‌شود، بسته به طول پروفیل تعداد متعددی الکتروود به وسیله کابل‌هایی به دستگاه اندازه‌گیری و کامپیوتر متصل می‌شوند که در هر لحظه فقط چهار الکتروود به دستگاه اندازه‌گیری متصل می‌شود، که دو الکتروود مربوط به تزریق جریان و دو الکتروود دیگر مربوط به گرفتن اختلاف پتانسیل است. با افزایش فاصله الکتروودهای جریان، عمق نفوذ افزایش پیدا می‌کند ولی در مقابل، قدرت تفکیک و دقت کار پایین می‌آید (Loke, 2006). نتایج به دست آمده به صورت دو بعدی و سه بعدی نمایش داده می‌شود. شکل ۱ نحوه اجرا و قرارگیری الکتروودها را در ERT نشان می‌دهد.

<sup>3</sup> Electerical Resistivity Tomography (ERT)

<sup>1</sup> Landfill

<sup>2</sup> Pulume



شکل (۱): نحوه قرار گرفتن الکترودها و نحوه اندازه‌گیری در پروفیل قائم مقاومت ویژه ظاهری

Giampaolo et al. (2016) ریسک ایجاد فروچاله‌ها در زیر دریاچه Sirino با روش ERT انجام شده و مشخص شد ترکیب داده‌های ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، امکان تشخیص سنگ‌شناسی و ضخامت رسوبات زیر دریاچه را فراهم کرده و بر اساس آن می‌توان الگوهای اصلی جریان‌های سیال زیرسطحی منطقه و شناسایی مسیرهای احتمالی فرار آب را به دست آورد. Wehrer et al. (2016) انتقال نیترات را از طریق ERT سه بعدی یا Time Lapse ERT در زون غیراشباع بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات نیترات خاک را می‌توان با روش TLERT کمی سازی نموده و شبیه‌سازی کرد. همچنین کارایی روش ERT در ترکیب با Mise-a-La-Mass (MALM) توسط Teresa Perri et al. (2018) در زمینه ردیابی جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی در یک آبخوان آبرفتی در ایتالیا مورد ارزیابی قرار گرفت. یکی از خلاءهای موجود که در ایران وجود دارد، عدم استفاده از این فناوری در مطالعات انتشار آلودگی حاصل از شیرابه محل دفن زباله است. هدف از این پژوهش، استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و کارایی آن در مدل‌سازی، شبیه‌سازی و شناسایی گسترش دو بعدی مسیر و عمق نفوذ شیرابه حاصل از لندفیل می‌باشد.

در توموگرافی دو بعدی، فرض می‌شود که مقاومت ویژه زمین تنها در دو جهت قائم و افقی (در امتداد خط پیمایش) تغییر کرده و در جوانب بدون تغییر باقی می‌ماند. اولین نتیجه کیفی یک پیمایش مقاومت ویژه دو بعدی یک شبه مقطع در امتداد نیمرخ مورد پیمایش می‌باشد که تابعی از مکان و فاصله الکترودی هستند. کارایی توموگرافی الکتریکی دو بعدی در شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی عرصه‌های پخش سیلاب توسط رحمانی جوینانی و همکاران (۱۳۹۵) اثبات شده است به طوری که این روش توانست نوع گسل‌های موجود، میزان جابه‌جایی طبقات رسوبی، ضخامت آبرفت را تشخیص داده و مشخص کند که کرانه راست رودخانه فصلی، مناسب‌ترین مکان برای توسعه سامانه پخش سیلاب خواهد بود. در ادامه این نوع مطالعه شریفی و همکاران (۱۳۹۶) نیز کاربرد روش توموگرافی الکتریکی دو بعدی را در آشکارسازی حرکت آب و ارزیابی عملکرد اقدامات آبخیزداری در شمال غرب تهران بررسی نمودند و نشان دادند روش توموگرافی دو بعدی با هزینه کم و در زمان کم، کارایی عملکرد اقدامات آبخیزداری را در نفوذ آب به زیرسطح نشان داده است. Audebert et al. (2016) جریان انتقال شیرابه در لندفیل را با استفاده از روش ERT و مدل‌سازی جریان زیرسطحی مطالعه نمودند که به بررسی حجم زباله‌های خیس شده و میزان خیس شدگی، پولوم و شکل نفوذ شیرابه و حجم منافذ پر شده پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تغییرات کاهش نفوذ شیرابه در طی زمان بوده و یک عدم یکنواختی در الگوی نفوذ شیرابه در لندفیل وجود دارد. در مطالعه



ارایه شده است. با توجه به نقشه زمین شناسی عمده سازندهای تشکیل دهنده محل دفن پسماند همدان، متعلق به دورانهای کواترنری، اولیگومیوسن، مزوزوئیک بوده و شامل نهشتههای آبرفتی در پایین دست، کنگلومرا در بخش جنوب شرقی، و تشکیلات سنگ آهک و ماسهسنگ و گاهی کنگلومرایی در پیرامون خود می باشد

### 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 خصوصیات فنی دقیق می باشد به طوری که دقت اندازه گیری ولت، برابر ۱ میکرو ولت، دقت اندازه گیری آمپر، برابر ۱ میکرو آمپر و توان خروجی ۵۰۰ وات با قابلیت حذف نوفه ها به طور اتوماتیک می باشد. نوفه ها یا پارازیت ها در واقع سیگنال هایی به جز هدف مورد هستند که باید قبل از تحلیل توموگرافی از سیستم چندکاناله استفاده شد که دربرگیرنده ۲۶ الکتروستیل ضد زنگ با طول ۵۰ سانتی متر می باشد.

### برداشت داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

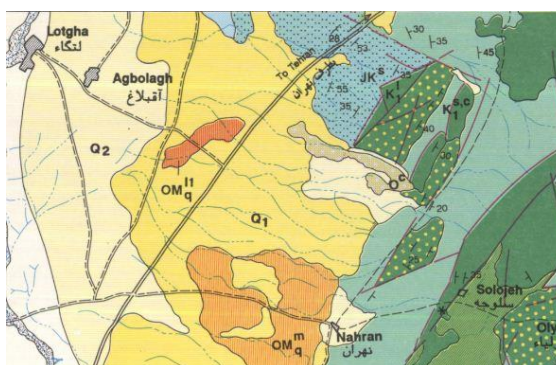
با توجه به احتمال نشت شیرابه در پایین دست، دو پروفیل در بخش های جنوب غربی به طول ۵۲ متر (پروفیل ۱) و شمال غربی (پروفیل ۲) به فواصل الکترودی ۲ متر برداشت شد. انتخاب این دو پروفیل بر اساس وجود شیرابه در سطح زمین بوده است. در این مطالعه از آرایه و نر جهت برداشت توموگرافی مقاومت ویژه استفاده شد (Loke, 2006). محل برداشت توموگرافی به گونه ای انتخاب شد که در نزدیکی شیرابه های حاصل از پسماند بالادست باشد.

### مواد و روش ها محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در بخش شمالی شهرستان همدان و حدود ۲۰ کیلومتری شمال آن قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در تصویر ماهواره ای (شکل ۲) و نقشه زمین شناسی (شکل ۳)



شکل (۲): محدوده منطقه مورد مطالعه: (الف) شهرستان همدان (ب) خط قرمز و خط زرد به ترتیب محدوده کلی لندفیل و محدوده دفن پسماند



شکل (۳): موقعیت زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ همدان) سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی

در روش‌های شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک رورش 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 شبه-نیوتن از معادله به‌روزرسانی به فرم زیر استفاده می‌شود:

(۲)

$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T$$

که در آن

(۳)

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

(۴)

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$$

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  $P_i$  (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 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 شبه-مقطع 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

### تفسیر داده‌های توموگرافی

بعد از برداشت داده‌ها و حذف داده‌های پرت، داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده به منظور ترسیم اولیه شبه مقاطع مقاومت ویژه وارد نرم‌افزار Res2Dinv شدند. قبل از مدل‌سازی داده‌های پرت از محاسبات حذف شدند. مدل‌سازی عمده‌ها به دو صورت مستقیم و معکوس انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا با مدل‌های زمینی دو بعدی با استفاده از روش اجزای محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد که مدل اولیه آن بسته به تجارب کارشناس بهبود می‌یابد. در روش معکوس‌سازی<sup>۱</sup> 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). برای بهبود مدل اولیه عمده‌ها 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:

(۱)

$$(J^T J + uF)d = J^T g$$

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  $J^T$  ترانپوز 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.

<sup>1</sup> Inversion



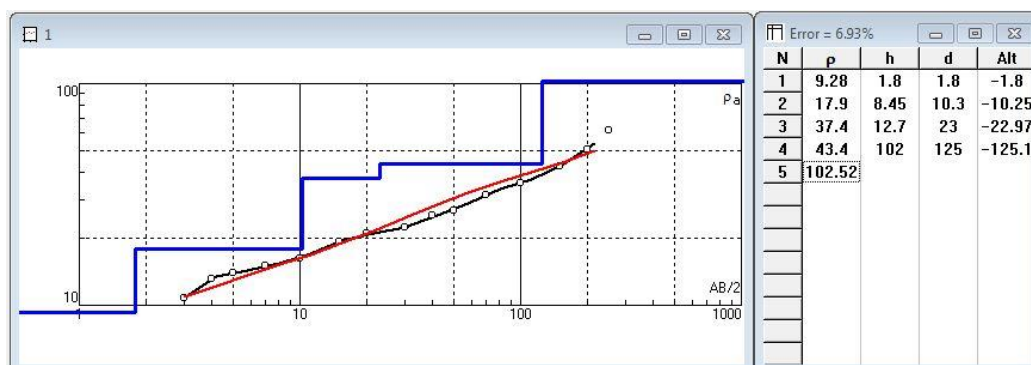
سنگ و تا عمق حدود ۱۲۵ متری، ماسه سنگ آهکی می‌باشد (شکل ۴) که با داده‌های نمونه‌گیری شده تطابق نشان می‌دهد (جدول ۱). در محل پروفیل شماره ۲ نیز برداشت سونداژ الکتریکی قائم نشان می‌دهد که تا عمق حدود ۱ متری، خاک سطحی و رس، تا عمق ۶ متری، رس، تا عمق ۱۰ متری، رس و سیلت، تا عمق ۴۸ متری، سیلت و مادستون و تا عمق ۱۶۱ متری، ماسه سنگ آهکی خواهد بود (شکل ۵) که در نمونه برداشت شده به وسیله مغزه‌گیری تا عمق ۱۰ متری نیز داده‌های فوق تایید می‌شود (جدول ۱). به طور کلی، برداشت داده‌های VES و نمونه‌گیری تا عمق ۱۰ متری، نشان‌دهنده پتانسیل ضعیف نفوذپذیری نسبت به شیرابه می‌باشد.

حل وارون که موقعیت و محل واقعی زون‌های با مقاومت الکتریکی بالا و پایین را بهتر و واقعی نشان می‌دهد (مقاطع پایینی) ارائه شد.

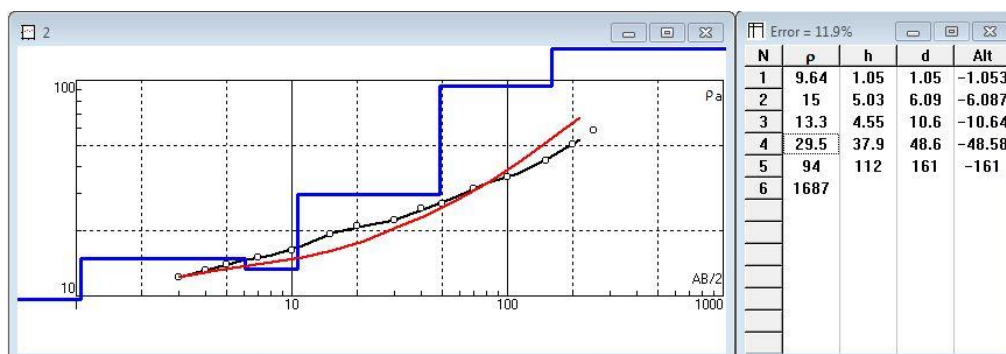
## نتایج و بحث

### برداشت سونداژ الکتریکی قائم و مغزه‌گیری

به‌منظور به دست آوردن ساختار سنگ‌شناسی و سنگ بستر از روش سونداژ الکتریکی قائم با طول فرستنده ۱۵۰ متر با آرایه شلومبرژه به همراه نمونه‌گیری تا عمق ۱۰ متری استفاده شد. تفسیر نتایج با نرم افزار IPI2Win نشان داد که در محل پروفیل شماره ۱، تا عمق ۱/۸ متری، خاک سطحی و رس، تا عمق ۱۰ متری، رس و سیلت، تا عمق ۲۳ متری، سیلت و ماسه



شکل (۴): نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی و منحنی دو بعدی و تفکیک سنگ‌شناسی سونداژ شماره ۱ در پروفیل شماره ۱ (خط آبی: تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق، خط قرمز: منحنی برازش داده شده؛ p: مقاومت ویژه الکتریکی (اهم‌متر)، h: ضخامت هر لایه، d: ضخامت تجمعی و Alt: ارتفاع منفی از سطح زمین (متر))



شکل (۵): نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی و منحنی دو بعدی و تفکیک سنگ‌شناسی سونداژ شماره ۲ در پروفیل شماره ۲ (خط آبی: تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق، خط قرمز: منحنی برازش داده شده؛  $p$ : مقاومت ویژه الکتریکی (اهم‌متر)،  $h$ : ضخامت هر لایه،  $d$ : ضخامت تجمعی و  $Alt$ : ارتفاع منفی از سطح زمین (متر))

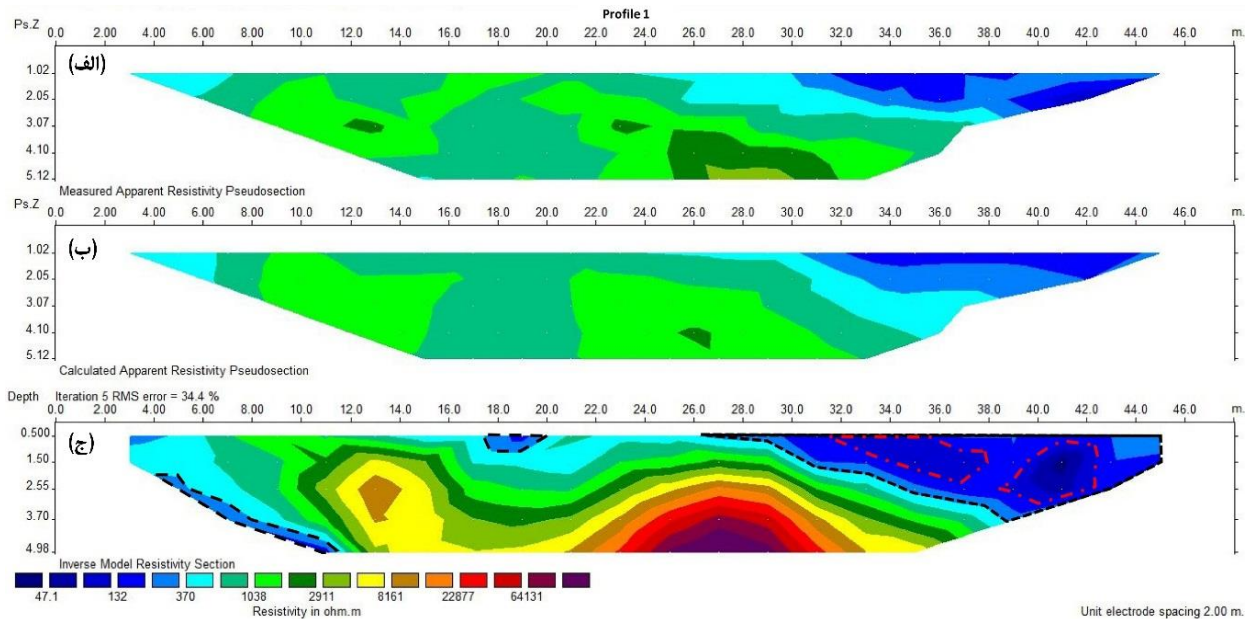
جدول (۱): تغییرات بافت نمونه‌های خاک نسبت به عمق

عمق (سانتی‌متر)	سونداژ VES شماره ۱	سونداژ VES شماره ۲
۰-۲۰۰	رس+شن+سیلت	رس+شن+سیلت
۲۰۰-۴۰۰	رس+سیلت	رس+سیلت
۴۰۰-۶۰۰	رس	رس
۶۰۰-۸۰۰	رس+سیلت	رس+سیلت
۸۰۰-۱۰۰۰	سیلت+رس	سیلت+رس

نیز لایه‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی پایین وجود دارد که نشان‌دهنده آلودگی ناشی از شیرابه می‌باشد (خطوط منقطع سیاه).

با توجه به نمونه‌گیری انجام شده و داده‌های سونداژ الکتریکی قائم، ساختار رسی به همراه مقداری ترکیبات سیلتی که خشک نیز می‌باشد مانع نفوذ شیرابه به عمق‌های پایین‌تر خواهد بود، ولی داده‌های توموگرافی شدت نفوذ شیرابه در طول پروفیل ۵۲ متری را همگن نشان نمی‌دهد به طوری که در فواصل افقی مختلف به-ویژه در فاصله ۳۰ تا ۴۴ متری، عمق نفوذ شیرابه ناهمگن است که به دلیل سنگ‌شناسی متنوع آن می-باشد. بنابراین برخلاف سونداژ الکتریکی قائم که سنگ-شناسی را همگن و یکنواخت تشخیص داده است ولی برداشت توموگرافی در راستای پروفیل این فرض رد شده و نشان می‌دهد پروفیل شماره ۱ در فواصل مختلف به ویژه بخش انتهایی نسبت به نفوذ شیرابه ناهمگن می‌باشد

تفسیر نتایج تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی و شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پروفیل ۱ در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شبه مقطع خام و تصحیح شده نیز مشاهده می‌شود نقاط ناهمگنی زیادتر است. در بخش انتهایی پروفیل (۳۰ تا ۴۰ متری) و تا عمق نزدیک به ۳ متری، افت مقاومت ویژه الکتریکی قابل مشاهده است که نشان‌دهنده نشت آلودگی حاصل از شیرابه می‌باشد (خطوط منقطع سیاه) که دو هسته با غلظت بالاتر را در فاصله افقی ۳۲ تا ۳۸ متری با عمق ۱ تا ۲/۵ متری و یک هسته دیگر در فاصله افقی ۳۸ تا ۴۲ متری در عمق ۱/۵ تا ۳/۵ متری نشان می‌دهد (خطوط نقطه-خط قرمز). در فاصله ۲۴ تا ۳۰ متری از شروع پروفیل (جنوب شرقی) و از عمق ۲/۵ متری به پایین لایه‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی بالا تا ۶۰۰۰ اهم‌متر مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تشکیلات سنگی و رس خشک می‌باشد. همچنین در بخش ابتدایی پروفیل تا فاصله ۶ متری و تا عمق ۳/۵ متری

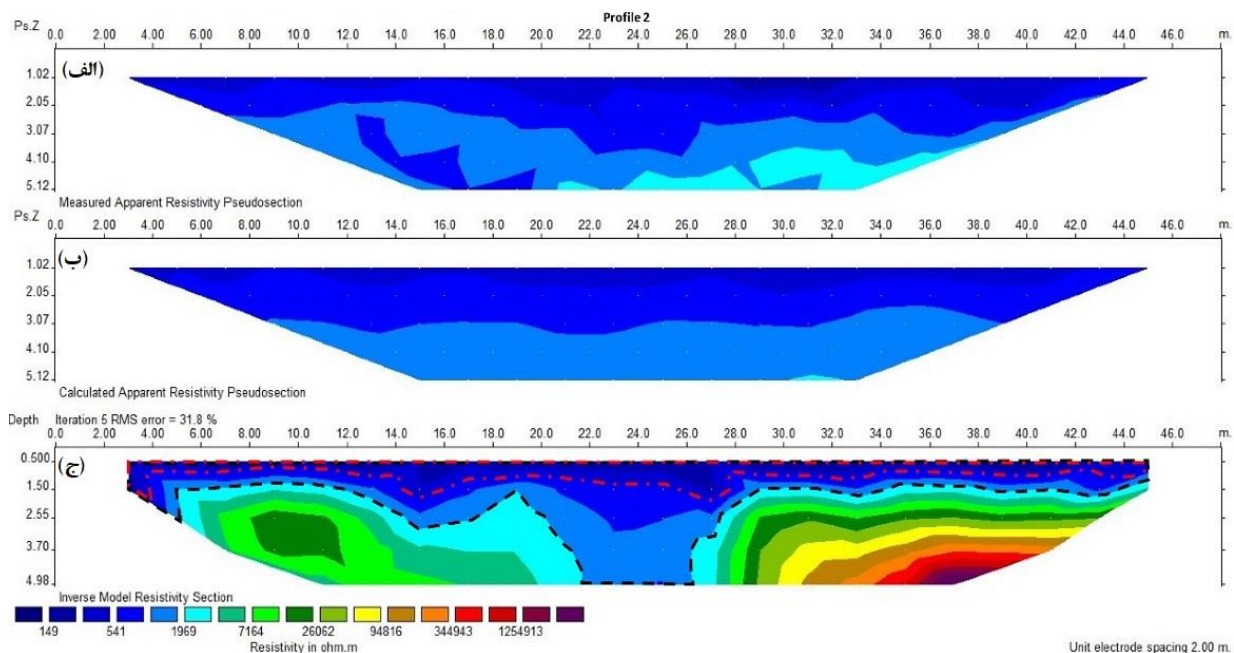


شکل (۶): (الف) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (ب) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (ج) مقطع حل وارون مدل به‌دست آمده در امتداد پروفیل شماره ۱

مقاومت ویژه الکتریکی پایین دیده می‌شود که ناشی از نشت آلودگی تا اعماق زیادتر است. بنابر نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود کل طول پروفیل شماره ۲، از لحاظ نفوذپذیری نسبت به شیرابه، ساختار همگنی نداشته و در فاصله افقی ۲۰ تا ۲۶ متری، عمق نفوذ شیرابه بیشتر است در صورتی که در سایر فواصل افقی پروفیل، این عمق حداکثر ۳ متر بوده است. این نتایج با تحلیل سونداژ الکتریکی قائم و نمونه برداشت شده که محل را نسبت به نفوذ شیرابه با نفوذپذیری ضعیف برآورد کرده است، متفاوت است. بنابراین با استفاده از توموگرافی دو بعدی مشخص شد که خاصیت نفوذپذیری پروفیل انتخاب شده به نفوذ شیرابه رفتار مشابهی ندارد. بنابراین استفاده از روش توموگرافی، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی را در راستای افقی بهتر نشان داده و مشخص می‌کند کل طول پروفیل نسبت به نفوذ شیرابه حداقل در بخش میانی همگن نبوده است

تفسیر نتایج تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی و شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پروفیل ۲ در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شبه مقطع خام و تصحیح شده نیز مشاهده می‌شود، در این پروفیل یک لایه با مقاومت ویژه الکتریکی نزدیک به ۲۰۰-۱۰۰ اهم‌متری (عمق ۳ متری در سرتاسر پروفیل) و یک لایه زیرین با مقاومت ویژه الکتریکی بالای حدود ۶۰۰-۳۰۰ اهم‌متری مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، اختلاف مقاومت ویژه الکتریکی بین لایه بالایی و پایینی که از نفوذ شیرابه تا عمق حدود ۳ متری به‌وجود آمده است، مشاهده می‌شود. با بررسی مقطع حل وارون در دو انتهای پروفیل (۶-۱۲ متری) و (۳۰-۴۰ متری) در عمق‌های ۲/۵ تا ۵ متری، لایه‌های متراکم‌تر با مقاومت ویژه الکتریکی بالای ۳۰۰۰-۷۰۰۰ اهم‌متر دیده می‌شود که نشان‌دهنده سازندهای سخت و خشک می‌باشد؛ در حالی که در بخش میانی پروفیل در فاصله افقی ۲۷-۲۰ متری تا عمق حدود ۵ متری و بیشتر با





شکل (۷): (الف) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (ب) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (ج) مقطع حل وارون مدل به دست آمده در امتداد پروفیل شماره ۲

## نتیجه‌گیری

نمونه‌گیری نشان‌دهنده وجود لایه نفوذناپذیر در کل عمق مورد مطالعه است (به دلیل ساختار رسی خشک به همراه درصد کمی سیلت) و بنابراین بر اساس این دو روش، منطقه مورد مطالعه از ساختار نفوذناپذیر نسبت به شیرابه برخوردار است. برداشت داده‌های سونداژ الکتریکی قائم و مغزه‌گیری نشان داد که محل مورد مطالعه نسبت به نفوذ شیرابه از پتانسیل خیلی ضعیفی برخوردار است و امکان نفوذ شیرابه حاصل از پسماند به لایه‌های پایین‌تر و نفوذ به آبخوان پایین دست ضعیف خواهد بود ولی برداشت‌های توموگرافی مقاومت ویژه نشان داد که در طول پروفیل، الگوی نفوذ از همگنی برخوردار نخواهد بود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات امکان‌سنجی تعیین محل دفن زباله با استفاده از روش‌های ژئوالکتریکی (سونداژ الکتریکی قائم برای بررسی سنگ شناسی و سنگ بستر و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به منظور بررسی نحوه توزیع دو بعدی آلودگی) همراه با داده‌های چاهک‌ها استفاده شود.

با توجه به وجود آلودگی‌های متعدد در مناطق مختلف کشور و بررسی‌های جامع این آلودگی‌ها، به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های غیرتخریبی در این مطالعات ضروری باشد. این نوع مطالعات عمدتاً از دیدگاه نقطه‌ای و نمونه‌برداری‌های چاهک‌های موجود بوده و به صورت دو بعدی یا سه بعدی، تصویری از ناحیه انتشار آلاینده ارائه نکرده‌اند و به عبارتی الگوی انتشار را در کل لندفیل، یکنواخت و همگن در نظر گرفته‌اند. با توجه به تغییرات شدید در پروفیل‌های موجود، این امکان وجود دارد که الگوی نفوذ شیرابه در آبخوان یا عمق‌های پایین‌تر یکنواخت و همگن نباشد. به این منظور نیاز به شبیه‌سازی و مدل‌سازی دو بعدی یا سه بعدی مسیر و عمق نفوذ آلاینده است که یکی از روش‌های مورد استفاده برای این منظور، استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی است. در این مطالعه ارزیابی صورت گرفته بر مبنای سونداژ الکتریکی قائم و



## تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به دلیل تامین هزینه‌های طرح پژوهشی با کد قرارداد ۰۳-۱۳۹۹-۰۲، کمال تشکر را دارند. همچنین از شرکت زمین سولار سیستم بابت مشاوره فنی تقدیر و تشکر می‌شود.

## منابع

- جمشیدی، ا.، ع. تاج‌امیری و س. ا. میرباقری. ۱۳۹۳. تاثیر شیرابه محل دفن زباله‌های شهر یاسوج بر کیفیت منبع آبی پایین‌دست (چاه شماره ۶ تنگ‌کناره). ارمغان دانش، جلد ۸۷، ص ۳۶۰-۳۴۷.
- رحمانی جوینانی، م.، ر. کاظمی و س. ر. امام جمعه. ۱۳۹۵. توموگرافی الکتریکی دو بعدی، روشی مناسب در شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی عرصه‌های پخش سیلاب، مطالعه موردی: ایستگاه هرات-یزد. مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد هشتم، شماره اول، ص ۱-۱۲.
- شریفی، ف.، م. رحمانی جوینانی و ح. داودی. ۱۳۹۶. معرفی و کاربرد روش کمی توموگرافی الکتریکی دو بعدی در آشکارسازی حرکت آب و ارزیابی عملکرد اقدامات آبخیزداری، مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز وردیج. شمال غرب تهران، مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد نهم، شماره چهارم، ص ۴۶۵-۴۷۸.
- صمدی، ل. ۱۳۹۷. بررسی تنش‌های وارده بر خاک و نشست احتمالی پایه‌های پل با استفاده از لرزه‌نگاری و توموگرافی ژئوالکتریکی. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۲، شماره اول، ص ۸۵-۱۰۲.
- فتحی هفشجانی، ا.، ح. بیگی هرچگانی، ع. داودیان دهکردی و س. ح. طباطبایی. ۱۳۹۳. مقایسه چند روش درون‌یابی مکانی و انتخاب مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد. مهندسی آبیاری و آب ایران، سال چهارم، شماره ۱۵، ص ۶۳-۵۱.
- کاظم‌نژاد، ف.، ت. احمدی، ع. شیخ‌الاسلامی، ح. زال‌نژاد و ع. بهجو. ۱۳۹۰. بررسی اثر شیرابه بر درختان جنگلی (مطالعه موردی: محل دپوی زباله شهرستان چالوس، پلهم‌کوتی). فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی، سال ششم، شماره ۳، ص ۴۳-۵۲.
- کاظمی، ع.، ح. یونسی و ن. بهرامی‌فر. ۱۳۹۱. تعیین پتانسیل آلودگی شیرابه مکان‌های دفن پسماند شهرهای تالش، رودسر و فریدونکنار با استفاده از شاخص پتانسیل آلودگی شیرابه (LPI). مجله شیلات، سال ششم، شماره ۴، ص ۵۰-۴۳.
- کریمی، ی. ۱۳۹۰. بررسی سه‌بعدی هاله آلودگی در ناحیه غیراشباع با استفاده از روش ژئوالکتریک. دانشگاه خوارزمی تهران، ۱۵۰ ص.
- نخعی، م.، ح. ناصری و و. امیری. ۱۳۹۱. مدل‌سازی انتقال آلودگی ناشی از نشت شیرابه محل دفن زباله‌های شهر رشت. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، جلد سوم، شماره اول، ص ۸۲-۶۹.
- یزدانی، و. و ح. منصوریان. ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین و تحلیل حساسیت حذف پارامترها با بکارگیری GIS. مهندسی آبیاری و آب ایران، سال دهم، شماره ۳۸، ص ۱۴۵-۱۲۷.
- Audebert, M., R. Clément, S. Moreau, C. Duquennoi, S. Loisel and N. Touze-Foltz. 2016. Understanding leachate flow in municipal solid waste landfills by combining time-lapse ERT and subsurface flow modelling— Part I: Analysis of infiltration shape on two different waste deposit cells. *Waste Management*, 55: 165-175.
- Giampaolo, V., L. Capozzoli, S. Grimaldi and E. Rizzo. 2016. Sinkhole risk assessment by ERT: The case study of Sirino Lake (Basilicata, Italy). *Geomorphology*, 253: 1-9.
- Loke, M. H. 2006. RES2DINV ver. 3.55, Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Software Manual*, 139pp.



Teresa Perri, M., P. De Vita, R. Masciale, I. Portoghese, G. Battista Chirico and G. Cassiani. 2018. Time-lapse Mise-à-la-Masse measurements and modeling for tracer test monitoring in a shallow aquifer. *Journal of Hydrology*, 561: 461–477.

Wehrer, M., A. Binley and L. D. Slater. 2016. Characterization of reactive transport by 3D electrical resistivity tomography (ERT) under unsaturated conditions. *Water resources research*, 52(10): 8295-8316.



## Tracing and Simulation of Leachate Penetration Transfer at Downstream of Landfill Using Special Electrical Resistivity Tomography Method

Mojtaba Khoshravesh<sup>1</sup>, Reza Norooz Valashedi<sup>۲</sup>, Jalil Helali<sup>۳</sup>, Mahmoud Raeini-Sarjaz<sup>۴</sup>

### Abstract

It is very important to study and simulate the transfer of environmental pollutants, especially leachate from waste accumulation in landfills. The aim of this study was to trace and simulate the path and depth of leachate transfer at downstream of Landfill using special electrical resistivity tomography. For this purpose, at the leachate accumulation site from the landfill of Hamadan city, two special resistance tomographic profiles in the northwest and southwest parts with a length of 52 m were taken at 2 meters electrode distances with a Wenner array. The results showed that the study area is of alluvial, sandstone and calcareous formations. Also, it was found that during the profile, the pattern of diffusion and infiltration of leachate from landfill was not similar, so that in profile 1, the leachate penetrated to the end at a distance of 30 to 40 meters to a depth of 3 meters, and in other parts of the profile, no deep penetration was observed. However, in the total length of profile 2, the penetration depth has reached to 2.5 meters and in the middle part up to 5 meters and more, which indicates the nonuniformity of leachate penetration along the profile. Therefore, it was found that the use of special electrical resistivity tomography method in two-dimensional imaging of landfill leachate diffusion will be more accurate and realistic than point studies. It is suggested that in feasibility studies to determine the landfill, the use of vertical electrical sounding methods and special electrical resistivity tomography should be prioritized due to low cost in the study of the depth and area of contamination and on the other hand, the effect these pollutants should be analyzed on the quality of downstream groundwater resources.

**Keywords:** Leachate, Profile, Waste, Wenner array.

<sup>1</sup> Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: khoshravesh\_m24@yahoo.com; m.khoshravesh@sanru.ac.ir (Corresponding author)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: rezanorooz@yahoo.com

<sup>3</sup> PhD, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran, Iran, Email: jalilhelali@gmail.com

<sup>4</sup> Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: raeini@yahoo.com

## ردیابی و شبیه‌سازی انتقال نفوذ شیرابه در پایین دست محل دفن زباله با استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

مجتبی خوش روش<sup>۱</sup>، رضا نوروز ولاشدی<sup>۲</sup>، جلیل هلالی<sup>۳</sup>، محمود رائینی سرجاز<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

مقاله پژوهشی برگرفته از طرح پژوهشی

### چکیده

بررسی و شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌های زیست محیطی به خصوص شیرابه‌های حاصل از انباشت پسماند در لندفیل‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. هدف از این پژوهش، ردیابی و شبیه‌سازی مسیر و عمق انتقال شیرابه در پایین‌دست محل دفن زباله با استفاده از تکنولوژی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد. به این منظور در محل تجمع شیرابه حاصل از محل دفن زباله شهرستان همدان، دو سونداژ الکتریکی قائم به همراه دو پروفیل توموگرافی مقاومت ویژه در بخش شمال غربی و جنوب غربی به طول ۵۲ متر با فواصل الکترودی ۲ متری با آرایه ونر برداشت شد. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه از نوع سازندهای آبرفتی، ماسه سنگی و آهکی می‌باشد. همچنین مشخص شد در طول پروفیل الگوی انتشار و نفوذ شیرابه حاصل از محل دفن زباله مشابه نبوده است به طوری که در پروفیل شماره یک، شیرابه در بخش انتهایی در فاصله ۳۰ تا ۴۰ متری به عمق ۳ متر نفوذ کرده است و در سایر بخش‌های پروفیل، نفوذ عمقی مشاهده نشد. این در حالی است که در کل طول پروفیل شماره دو، عمق نفوذ به ۲/۵ متر و در بخش میانی تا ۵ متر و بیشتر رسیده است که نشان‌دهنده عدم یکنواختی نفوذ شیرابه در طول پروفیل است. بنابراین مشخص شد که استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در تصویرسازی دو بعدی انتشار شیرابه حاصل از محل دفن زباله، دقیق‌تر و واقعی‌تر از بررسی‌های نقطه‌ای خواهد بود. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات امکان‌سنجی تعیین محل دفن پسماند، استفاده از روش‌های سونداژ الکتریکی قائم و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به دلیل کم هزینه بودن در بررسی عمق و ناحیه گسترش آلودگی در اولویت قرار گیرد و از سوی دیگر، تاثیر این منابع آلاینده بر کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی پایین-دست مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آرایه ونر، پروفیل، پسماند، شیرابه.

<sup>۱</sup> - دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۰۹۱۱۳۵۲۱۶۵۴  
khoshhravesh\_m24@yahoo.com; m.khoshhravesh@sanru.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> - استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۰۹۱۱۵۷۰۴۷۶۵  
rezanorooz@yahoo.com

<sup>۳</sup> - دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۰۹۱۸۸۱۸۹۵۴۳  
jalilhelali@gmail.com

<sup>۴</sup> - استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۰۹۱۱۱۵۲۲۴۱۶  
raeini@yahoo.com



## مقدمه

آلودگی‌های زیست محیطی یکی از مهمترین مشکلات در جوامع کنونی است که خود را در اشکال مختلف از قبیل هوا، آب و خاک نشان داده است. منشاء آلودگی‌های زیست محیطی می‌تواند به دلیل پساب‌های رها شده در مناطق صنعتی و یا پساب‌های حاصل از دیپو و دفن زباله‌های شهری<sup>۱</sup> باشد. حفاظت کیفی آب‌های زیرزمینی به دلیل کاربرد فراوان این منابع در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب از اهمیت زیادی برخوردار است. رفع آلودگی آب زیرزمینی بسیار پرهزینه و فرایندی طولانی است و اغلب زمانی آلودگی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آبخوان تقریباً غیرممکن می‌شود (یزدانی و منصوریان، ۱۳۹۸). وجود تغییرات مکانی امری طبیعی است ولی شناخت این تغییرات جهت برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت، امری لازم و مفید می‌باشد (فتحی هفشجانی و همکاران، ۱۳۹۳).

مطالعات متعددی از جنبه‌های مختلف به بحث پیرامون عوارض ناشی از لندفیل‌ها پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به بررسی تاثیر شیرابه بر درختان جنگلی (کاظم‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰)، تعیین پتانسیل آلودگی لندفیل (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۱)، مدل‌سازی انتقال آلودگی ناشی از نشت شیرابه لندفیل (نخعی و همکاران، ۱۳۹۱)، تاثیر شیرابه لندفیل بر کیفیت آب زیرزمینی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۳) اشاره نمود.

در اکثر مطالعات فوق به بررسی نقطه‌ای و آماربرداری از محل دفن زباله پرداخته شده است و ناحیه‌ای که امکان آلودگی دارد به صورت دو بعدی و یا شبکه‌ای انجام نشده است. از طرف دیگر، در تعیین محل دفن پسماند یا لندفیل، موارد زیست محیطی

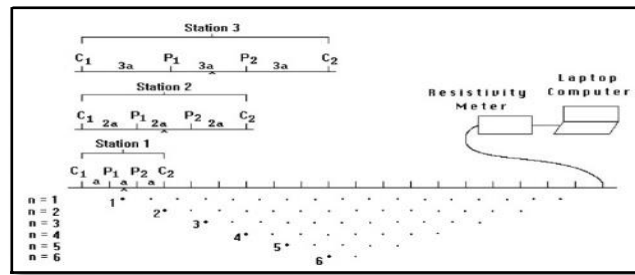
همچون پتانسیل آلاینده‌گی پایین دست و آبخوان در نظر گرفته نشده است. این امر زمانی اهمیت پیدا می‌کند که عدم انتخاب محل مناسب، موجب خسارت جبران‌ناپذیری بر بخش‌های محیطی به ویژه انسانی خواهد شد. این مساله در مناطقی با اقلیم مرطوب مثل مناطق ساحلی دریای خزر که همراه با بارش زیاد، هم از لحاظ مقدار و هم فراوانی می‌باشد، حادث‌تر است؛ زیرا عاملی برای شست و شوی شیرابه‌های حاصل از زباله دیپو شده و انتقال آن به آبخوان و آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

یکی از راه‌های شناسایی جامع و کامل محدوده آلوده شده<sup>۲</sup>، شدت آلودگی و همچنین پتانسیل آلاینده‌گی، استفاده از تکنولوژی‌های غیرتخریبی ژئوفیزیکی به ویژه روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی<sup>۳</sup> می‌باشد. توموگرافی شیوه‌ای برای به دست آوردن تصویری از یک صفحه مسطح و دلخواه از جسمی جامد می‌باشد به طوری که اطلاعات حاصله از این روش می‌تواند برای تولید یا بهبود توزیع دو بعدی کمیت‌های فیزیکی به خصوص مقاومت ویژه و پتانسیل الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. در این روش که به صورت پروفیلی اجرا می‌شود، بسته به طول پروفیل تعداد متعددی الکتروود به وسیله کابل‌هایی به دستگاه اندازه‌گیری و کامپیوتر متصل می‌شوند که در هر لحظه فقط چهار الکتروود به دستگاه اندازه‌گیری متصل می‌شود، که دو الکتروود مربوط به تزریق جریان و دو الکتروود دیگر مربوط به گرفتن اختلاف پتانسیل است. با افزایش فاصله الکتروودهای جریان، عمق نفوذ افزایش پیدا می‌کند ولی در مقابل، قدرت تفکیک و دقت کار پایین می‌آید (Loke, 2006). نتایج به دست آمده به صورت دو بعدی و سه بعدی نمایش داده می‌شود. شکل ۱ نحوه اجرا و قرارگیری الکتروودها را در ERT نشان می‌دهد.

<sup>3</sup> Electerical Resistivity Tomography (ERT)

<sup>1</sup> Landfill

<sup>2</sup> Pulume



شکل (۱): نحوه قرار گرفتن الکترودها و نحوه اندازه‌گیری در پروفیل قائم مقاومت ویژه ظاهری

Giampaolo et al. (2016) ریسک ایجاد فروچاله‌ها در زیر دریاچه Sirino با روش ERT انجام شده و مشخص شد ترکیب داده‌های ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، امکان تشخیص سنگ‌شناسی و ضخامت رسوبات زیر دریاچه را فراهم کرده و بر اساس آن می‌توان الگوهای اصلی جریان‌های سیال زیرسطحی منطقه و شناسایی مسیرهای احتمالی فرار آب را به دست آورد. Wehrer et al. (2016) انتقال نیترات را از طریق ERT سه بعدی یا Time Lapse ERT در زون غیراشباع بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات نیترات خاک را می‌توان با روش TLERT کمی سازی نموده و شبیه‌سازی کرد. همچنین کارایی روش ERT در ترکیب با Mise-a-La-Mass (MALM) توسط Teresa Perri et al. (2018) در زمینه ردیابی جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی در یک آبخوان آبرفتی در ایتالیا مورد ارزیابی قرار گرفت. یکی از خلاءهای موجود که در ایران وجود دارد، عدم استفاده از این فناوری در مطالعات انتشار آلودگی حاصل از شیرابه محل دفن زباله است. هدف از این پژوهش، استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و کارایی آن در مدل‌سازی، شبیه‌سازی و شناسایی گسترش دو بعدی مسیر و عمق نفوذ شیرابه حاصل از لندفیل می‌باشد.

در توموگرافی دو بعدی، فرض می‌شود که مقاومت ویژه زمین تنها در دو جهت قائم و افقی (در امتداد خط پیمایش) تغییر کرده و در جوانب بدون تغییر باقی می‌ماند. اولین نتیجه کیفی یک پیمایش مقاومت ویژه دو بعدی یک شبه مقطع در امتداد نیمرخ مورد پیمایش می‌باشد که تابعی از مکان و فاصله الکترودی هستند. کارایی توموگرافی الکتریکی دو بعدی در شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی عرصه‌های پخش سیلاب توسط رحمانی جوینانی و همکاران (۱۳۹۵) اثبات شده است به طوری که این روش توانست نوع گسل‌های موجود، میزان جابه‌جایی طبقات رسوبی، ضخامت آبرفت را تشخیص داده و مشخص کند که کرانه راست رودخانه فصلی، مناسب‌ترین مکان برای توسعه سامانه پخش سیلاب خواهد بود. در ادامه این نوع مطالعه شریفی و همکاران (۱۳۹۶) نیز کاربرد روش توموگرافی الکتریکی دو بعدی را در آشکارسازی حرکت آب و ارزیابی عملکرد اقدامات آبخیزداری در شمال غرب تهران بررسی نمودند و نشان دادند روش توموگرافی دو بعدی با هزینه کم و در زمان کم، کارایی عملکرد اقدامات آبخیزداری را در نفوذ آب به زیرسطح نشان داده است. Audebert et al. (2016) جریان انتقال شیرابه در لندفیل را با استفاده از روش ERT و مدل‌سازی جریان زیرسطحی مطالعه نمودند که به بررسی حجم زباله‌های خیس شده و میزان خیس شدگی، پولوم و شکل نفوذ شیرابه و حجم منافذ پر شده پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تغییرات کاهش نفوذ شیرابه در طی زمان بوده و یک عدم یکنواختی در الگوی نفوذ شیرابه در لندفیل وجود دارد. در مطالعه



ارایه شده است. با توجه به نقشه زمین شناسی عمده سازندهای تشکیل دهنده محل دفن پسماند همدان، متعلق به دورانهای کواترنری، اولیگومیوسن، مزوزوئیک بوده و شامل نهشتههای آبرفتی در پایین دست، کنگلومرا در بخش جنوب شرقی، و تشکیلات سنگ آهک و ماسهسنگ و گاهی کنگلومرایی در پیرامون خود می باشد

### 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 خصوصیات فنی دقیق می باشد به طوری که دقت اندازه گیری ولت، برابر ۱ میکرو ولت، دقت اندازه گیری آمپر، برابر ۱ میکرو آمپر و توان خروجی ۵۰۰ وات با قابلیت حذف نوفه ها به طور اتوماتیک می باشد. نوفه ها یا پارازیت ها در واقع سیگنال هایی به جز هدف مورد هستند که باید قبل از تحلیل توموگرافی از سیستم چندکاناله استفاده شد که دربرگیرنده ۲۶ الکتروستیل ضد زنگ با طول ۵۰ سانتی متر می باشد.

### برداشت داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

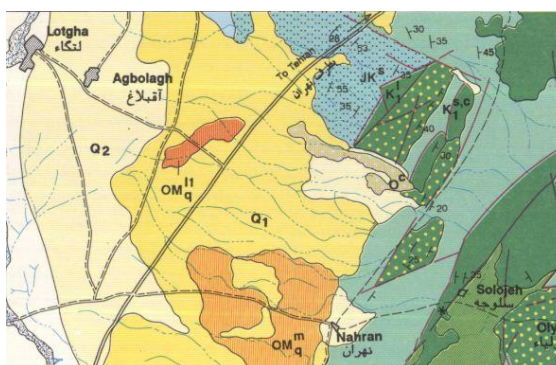
با توجه به احتمال نشت شیرابه در پایین دست، دو پروفیل در بخش های جنوب غربی به طول ۵۲ متر (پروفیل ۱) و شمال غربی (پروفیل ۲) به فواصل الکترودی ۲ متر برداشت شد. انتخاب این دو پروفیل بر اساس وجود شیرابه در سطح زمین بوده است. در این مطالعه از آرایه و نر جهت برداشت توموگرافی مقاومت ویژه استفاده شد (Loke, 2006). محل برداشت توموگرافی به گونه ای انتخاب شد که در نزدیکی شیرابه های حاصل از پسماند بالادست باشد.

### مواد و روش ها محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در بخش شمالی شهرستان همدان و حدود ۲۰ کیلومتری شمال آن قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در تصویر ماهواره ای (شکل ۲) و نقشه زمین شناسی (شکل ۳)



شکل (۲): محدوده منطقه مورد مطالعه: (الف) شهرستان همدان (ب) خط قرمز و خط زرد به ترتیب محدوده کلی لندفیل و محدوده دفن پسماند



شکل (۳): موقعیت زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ همدان) سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی



در روش‌های شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک رورش 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 شبه-نیوتن از معادله به‌روزرسانی به فرم زیر استفاده می‌شود:

(۲)

$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T$$

که در آن

(۳)

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

(۴)

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$$

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  $P_i$  (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 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 شبه-مقطع 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

### تفسیر داده‌های توموگرافی

بعد از برداشت داده‌ها و حذف داده‌های پرت، داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده به منظور ترسیم اولیه شبه مقاطع مقاومت ویژه وارد نرم‌افزار Res2Dinv شدند. قبل از مدل‌سازی داده‌های پرت از محاسبات حذف شدند. مدل‌سازی عمده‌ها به دو صورت مستقیم و معکوس انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا با مدل‌های زمینی دو بعدی با استفاده از روش اجزای محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد که مدل اولیه آن بسته به تجارب کارشناس بهبود می‌یابد. در روش معکوس‌سازی<sup>۱</sup> 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). برای بهبود مدل اولیه عمده‌ها 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:

(۱)

$$(J^T J + uF)d = J^T g$$

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  $J^T$  ترانپوز 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.

<sup>1</sup> Inversion



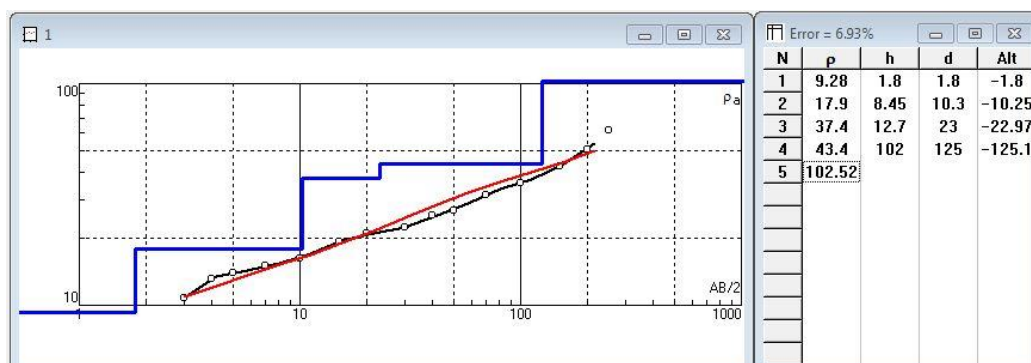
سنگ و تا عمق حدود ۱۲۵ متری، ماسه سنگ آهکی می‌باشد (شکل ۴) که با داده‌های نمونه‌گیری شده تطابق نشان می‌دهد (جدول ۱). در محل پروفیل شماره ۲ نیز برداشت سونداژ الکتریکی قائم نشان می‌دهد که تا عمق حدود ۱ متری، خاک سطحی و رس، تا عمق ۶ متری، رس، تا عمق ۱۰ متری، رس و سیلت، تا عمق ۴۸ متری، سیلت و مادستون و تا عمق ۱۶۱ متری، ماسه سنگ آهکی خواهد بود (شکل ۵) که در نمونه برداشت شده به وسیله مغزه‌گیری تا عمق ۱۰ متری نیز داده‌های فوق تایید می‌شود (جدول ۱). به طور کلی، برداشت داده‌های VES و نمونه‌گیری تا عمق ۱۰ متری، نشان‌دهنده پتانسیل ضعیف نفوذپذیری نسبت به شیرابه می‌باشد.

حل وارون که موقعیت و محل واقعی زون‌های با مقاومت الکتریکی بالا و پایین را بهتر و واقعی نشان می‌دهد (مقاطع پایینی) ارایه شد.

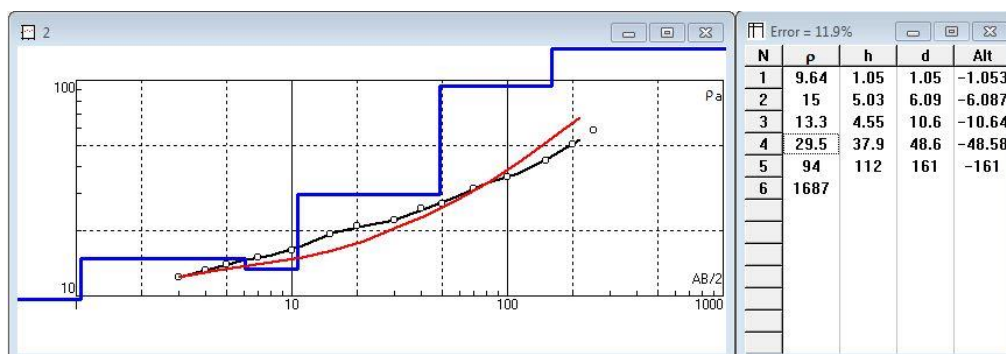
## نتایج و بحث

### برداشت سونداژ الکتریکی قائم و مغزه‌گیری

به‌منظور به دست آوردن ساختار سنگ‌شناسی و سنگ بستر از روش سونداژ الکتریکی قائم با طول فرستنده ۱۵۰ متر با آرایه شلومبرژه به همراه نمونه‌گیری تا عمق ۱۰ متری استفاده شد. تفسیر نتایج با نرم افزار IPI2Win نشان داد که در محل پروفیل شماره ۱، تا عمق ۱/۸ متری، خاک سطحی و رس، تا عمق ۱۰ متری، رس و سیلت، تا عمق ۲۳ متری، سیلت و ماسه



شکل (۴): نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی و منحنی دو بعدی و تفکیک سنگ‌شناسی سونداژ شماره ۱ در پروفیل شماره ۱ (خط آبی: تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق، خط قرمز: منحنی برازش داده شده؛ p: مقاومت ویژه الکتریکی (اهم‌متر)، h: ضخامت هر لایه، d: ضخامت تجمعی و Alt: ارتفاع منفی از سطح زمین (متر))



شکل (۵): نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی و منحنی دو بعدی و تفکیک سنگ‌شناسی سونداژ شماره ۲ در پروفیل شماره ۲ (خط آبی: تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق، خط قرمز: منحنی برازش داده شده؛  $p$ : مقاومت ویژه الکتریکی (اهم‌متر)،  $h$ : ضخامت هر لایه،  $d$ : ضخامت تجمعی و  $Alt$ : ارتفاع منفی از سطح زمین (متر))

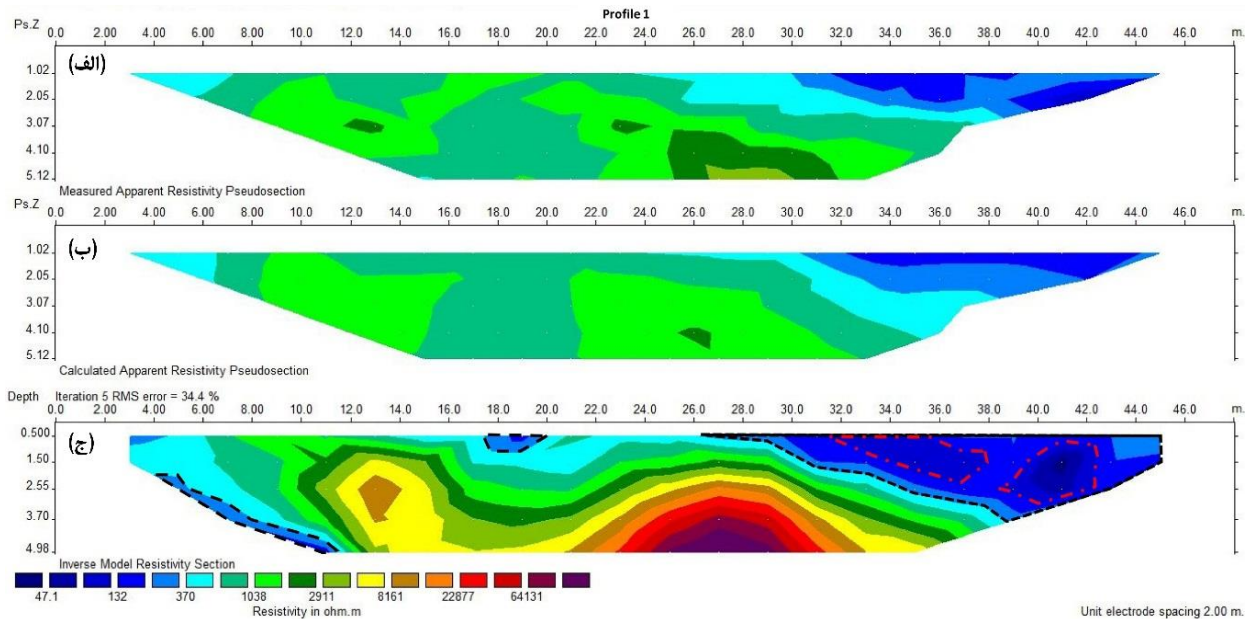
جدول (۱): تغییرات بافت نمونه‌های خاک نسبت به عمق

عمق (سانتی‌متر)	سونداژ VES شماره ۱	سونداژ VES شماره ۲
۰-۲۰۰	رس+شن+سیلت	رس+شن+سیلت
۲۰۰-۴۰۰	رس+سیلت	رس+سیلت
۴۰۰-۶۰۰	رس	رس
۶۰۰-۸۰۰	رس+سیلت	رس+سیلت
۸۰۰-۱۰۰۰	سیلت+رس	سیلت+رس

نیز لایه‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی پایین وجود دارد که نشان‌دهنده آلودگی ناشی از شیرابه می‌باشد (خطوط منقطع سیاه).

با توجه به نمونه‌گیری انجام شده و داده‌های سونداژ الکتریکی قائم، ساختار رسی به همراه مقداری ترکیبات سیلتی که خشک نیز می‌باشد مانع نفوذ شیرابه به عمق‌های پایین‌تر خواهد بود، ولی داده‌های توموگرافی شدت نفوذ شیرابه در طول پروفیل ۵۲ متری را همگن نشان نمی‌دهد به طوری که در فواصل افقی مختلف به-ویژه در فاصله ۳۰ تا ۴۴ متری، عمق نفوذ شیرابه ناهمگن است که به دلیل سنگ‌شناسی متنوع آن می‌باشد. بنابراین برخلاف سونداژ الکتریکی قائم که سنگ‌شناسی را همگن و یکنواخت تشخیص داده است ولی برداشت توموگرافی در راستای پروفیل این فرض رد شده و نشان می‌دهد پروفیل شماره ۱ در فواصل مختلف به ویژه بخش انتهایی نسبت به نفوذ شیرابه ناهمگن می‌باشد

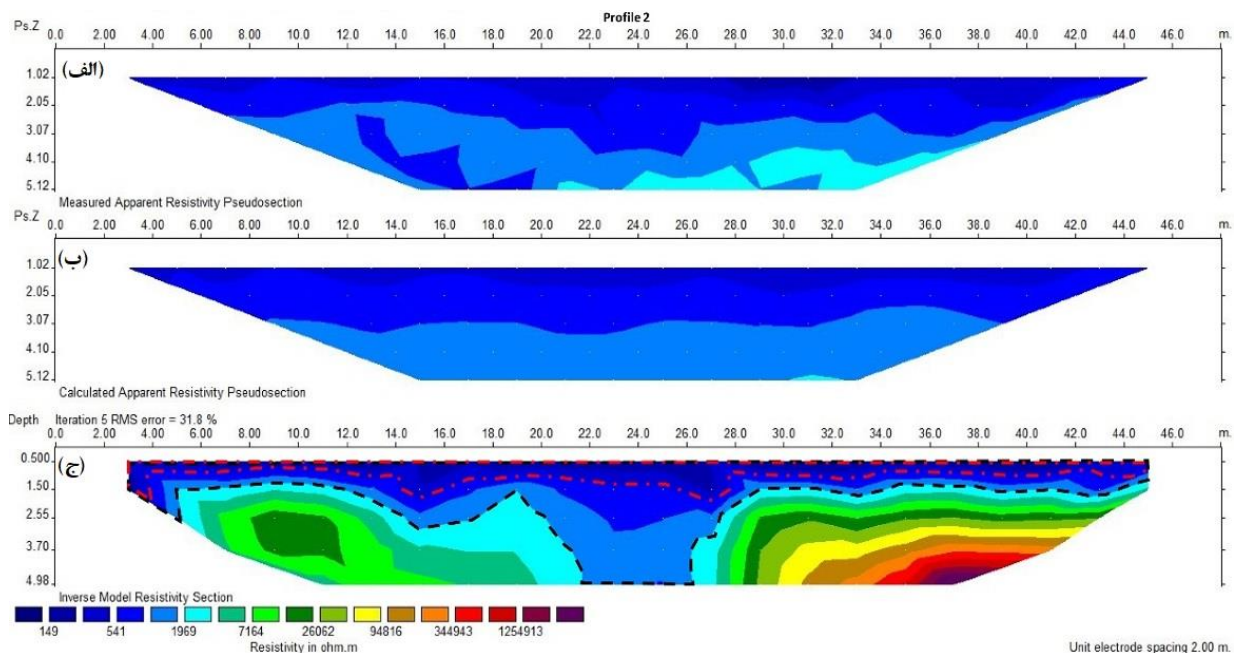
تفسیر نتایج تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی و شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پروفیل ۱ در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شبه مقطع خام و تصحیح شده نیز مشاهده می‌شود نقاط ناهمگنی زیادتر است. در بخش انتهایی پروفیل (۳۰ تا ۴۰ متری) و تا عمق نزدیک به ۳ متری، افت مقاومت ویژه الکتریکی قابل مشاهده است که نشان‌دهنده نشت آلودگی حاصل از شیرابه می‌باشد (خطوط منقطع سیاه) که دو هسته با غلظت بالاتر را در فاصله افقی ۳۲ تا ۳۸ متری با عمق ۱ تا ۲/۵ متری و یک هسته دیگر در فاصله افقی ۳۸ تا ۴۲ متری در عمق ۱/۵ تا ۳/۵ متری نشان می‌دهد (خطوط نقطه-خط قرمز). در فاصله ۲۴ تا ۳۰ متری از شروع پروفیل (جنوب شرقی) و از عمق ۲/۵ متری به پایین لایه‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی بالا تا ۶۰۰۰ اهم‌متر مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تشکیلات سنگی و رس خشک می‌باشد. همچنین در بخش ابتدایی پروفیل تا فاصله ۶ متری و تا عمق ۳/۵ متری



شکل (۶): (الف) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (ب) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (ج) مقطع حل وارون مدل به‌دست آمده در امتداد پروفیل شماره ۱

مقاومت ویژه الکتریکی پایین دیده می‌شود که ناشی از نشت آلودگی تا اعماق زیادتر است. بنابر نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود کل طول پروفیل شماره ۲، از لحاظ نفوذپذیری نسبت به شیرابه، ساختار همگنی نداشته و در فاصله افقی ۲۰ تا ۲۶ متری، عمق نفوذ شیرابه بیشتر است در صورتی که در سایر فواصل افقی پروفیل، این عمق حداکثر ۳ متر بوده است. این نتایج با تحلیل سونداژ الکتریکی قائم و نمونه برداشت شده که محل را نسبت به نفوذ شیرابه با نفوذپذیری ضعیف برآورد کرده است، متفاوت است. بنابراین با استفاده از توموگرافی دو بعدی مشخص شد که خاصیت نفوذپذیری پروفیل انتخاب شده به نفوذ شیرابه رفتار مشابهی ندارد. بنابراین استفاده از روش توموگرافی، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی را در راستای افقی بهتر نشان داده و مشخص می‌کند کل طول پروفیل نسبت به نفوذ شیرابه حداقل در بخش میانی همگن نبوده است

تفسیر نتایج تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی و شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پروفیل ۲ در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شبه مقطع خام و تصحیح شده نیز مشاهده می‌شود، در این پروفیل یک لایه با مقاومت ویژه الکتریکی نزدیک به ۲۰۰-۱۰۰ اهم‌متری (عمق ۳ متری در سرتاسر پروفیل) و یک لایه زیرین با مقاومت ویژه الکتریکی بالای حدود ۶۰۰-۳۰۰ اهم‌متری مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، اختلاف مقاومت ویژه الکتریکی بین لایه بالایی و پایینی که از نفوذ شیرابه تا عمق حدود ۳ متری به‌وجود آمده است، مشاهده می‌شود. با بررسی مقطع حل وارون در دو انتهای پروفیل (۶-۱۲ متری) و (۳۰-۴۰ متری) در عمق‌های ۲/۵ تا ۵ متری، لایه‌های متراکم‌تر با مقاومت ویژه الکتریکی بالای ۳۰۰۰-۷۰۰۰ اهم‌متر دیده می‌شود که نشان‌دهنده سازندهای سخت و خشک می‌باشد؛ در حالی که در بخش میانی پروفیل در فاصله افقی ۲۷-۲۰ متری تا عمق حدود ۵ متری و بیشتر با



شکل (۷): (الف) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (ب) شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پردازش شده پس از حذف نوفه‌ها (ج) مقطع حل وارون مدل به دست آمده در امتداد پروفیل شماره ۲

## نتیجه‌گیری

نمونه‌گیری نشان‌دهنده وجود لایه نفوذناپذیر در کل عمق مورد مطالعه است (به دلیل ساختار رسی خشک به همراه درصد کمی سیلت) و بنابراین بر اساس این دو روش، منطقه مورد مطالعه از ساختار نفوذناپذیر نسبت به شیرابه برخوردار است. برداشت داده‌های سونداژ الکتریکی قائم و مغزه‌گیری نشان داد که محل مورد مطالعه نسبت به نفوذ شیرابه از پتانسیل خیلی ضعیفی برخوردار است و امکان نفوذ شیرابه حاصل از پسماند به لایه‌های پایین‌تر و نفوذ به آبخوان پایین دست ضعیف خواهد بود ولی برداشت‌های توموگرافی مقاومت ویژه نشان داد که در طول پروفیل، الگوی نفوذ از همگنی برخوردار نخواهد بود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات امکان‌سنجی تعیین محل دفن زباله با استفاده از روش‌های ژئوالکتریکی (سونداژ الکتریکی قائم برای بررسی سنگ شناسی و سنگ بستر و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به منظور بررسی نحوه توزیع دو بعدی آلودگی) همراه با داده‌های چاهک‌ها استفاده شود.

با توجه به وجود آلودگی‌های متعدد در مناطق مختلف کشور و بررسی‌های جامع این آلودگی‌ها، به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های غیرتخریبی در این مطالعات ضروری باشد. این نوع مطالعات عمدتاً از دیدگاه نقطه‌ای و نمونه‌برداری‌های چاهک‌های موجود بوده و به صورت دو بعدی یا سه بعدی، تصویری از ناحیه انتشار آلاینده ارائه نکرده‌اند و به عبارتی الگوی انتشار را در کل لندفیل، یکنواخت و همگن در نظر گرفته‌اند. با توجه به تغییرات شدید در پروفیل‌های موجود، این امکان وجود دارد که الگوی نفوذ شیرابه در آبخوان یا عمق‌های پایین‌تر یکنواخت و همگن نباشد. به این منظور نیاز به شبیه‌سازی و مدل‌سازی دو بعدی یا سه بعدی مسیر و عمق نفوذ آلاینده است که یکی از روش‌های مورد استفاده برای این منظور، استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی است. در این مطالعه ارزیابی صورت گرفته بر مبنای سونداژ الکتریکی قائم و



## تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به دلیل تامین هزینه‌های طرح پژوهشی با کد قرارداد ۰۳-۱۳۹۹-۰۲، کمال تشکر را دارند. همچنین از شرکت زمین سولار سیستم بابت مشاوره فنی تقدیر و تشکر می‌شود.

## منابع

- جمشیدی، ا.، ع. تاج‌امیری و س. ا. میرباقری. ۱۳۹۳. تاثیر شیرابه محل دفن زباله‌های شهر یاسوج بر کیفیت منبع آبی پایین‌دست (چاه شماره ۶ تنگ‌کناره). ارمغان دانش، جلد ۸۷، ص ۳۶۰-۳۴۷.
- رحمانی جویبانی، م.، ر. کاظمی و س. ر. امام جمعه. ۱۳۹۵. توموگرافی الکتریکی دو بعدی، روشی مناسب در شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی عرصه‌های پخش سیلاب، مطالعه موردی: ایستگاه هرات-یزد. مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد هشتم، شماره اول، ص ۱-۱۲.
- شریفی، ف.، م. رحمانی جویبانی و ح. داودی. ۱۳۹۶. معرفی و کاربرد روش کمی توموگرافی الکتریکی دو بعدی در آشکارسازی حرکت آب و ارزیابی عملکرد اقدامات آبخیزداری، مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز وردیج. شمال غرب تهران، مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد نهم، شماره چهارم، ص ۴۶۵-۴۷۸.
- صمدی، ل. ۱۳۹۷. بررسی تنش‌های وارده بر خاک و نشست احتمالی پایه‌های پل با استفاده از لرزه‌نگاری و توموگرافی ژئوالکتریکی. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۲، شماره اول، ص ۸۵-۱۰۲.
- فتحی هفشجانی، ا.، ح. بیگی هرچگانی، ع. داودیان دهکردی و س. ح. طباطبایی. ۱۳۹۳. مقایسه چند روش درون‌یابی مکانی و انتخاب مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد. مهندسی آبیاری و آب ایران، سال چهارم، شماره ۱۵، ص ۶۳-۵۱.
- کاظم‌نژاد، ف.، ت. احمدی، ع. شیخ‌الاسلامی، ح. زال‌نژاد و ع. بهجو. ۱۳۹۰. بررسی اثر شیرابه بر درختان جنگلی (مطالعه موردی: محل دپوی زباله شهرستان چالوس، پلهم‌کوتی). فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی، سال ششم، شماره ۳، ص ۴۳-۵۲.
- کاظمی، ع.، ح. یونسی و ن. بهرامی‌فر. ۱۳۹۱. تعیین پتانسیل آلودگی شیرابه مکان‌های دفن پسماند شهرهای تالش، رودسر و فریدونکنار با استفاده از شاخص پتانسیل آلودگی شیرابه (LPI). مجله شیلات، سال ششم، شماره ۴، ص ۵۰-۴۳.
- کریمی، ی. ۱۳۹۰. بررسی سه‌بعدی هاله آلودگی در ناحیه غیراشباع با استفاده از روش ژئوالکتریک. دانشگاه خوارزمی تهران، ۱۵۰ ص.
- نخعی، م.، ح. ناصری و و. امیری. ۱۳۹۱. مدل‌سازی انتقال آلودگی ناشی از نشت شیرابه محل دفن زباله‌های شهر رشت. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، جلد سوم، شماره اول، ص ۸۲-۶۹.
- یزدانی، و. و ح. منصوریان. ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین و تحلیل حساسیت حذف پارامترها با بکارگیری GIS. مهندسی آبیاری و آب ایران، سال دهم، شماره ۳۸، ص ۱۴۵-۱۲۷.
- Audebert, M., R. Clément, S. Moreau, C. Duquennoi, S. Loisel and N. Touze-Foltz. 2016. Understanding leachate flow in municipal solid waste landfills by combining time-lapse ERT and subsurface flow modelling— Part I: Analysis of infiltration shape on two different waste deposit cells. *Waste Management*, 55: 165-175.
- Giampaolo, V., L. Capozzoli, S. Grimaldi and E. Rizzo. 2016. Sinkhole risk assessment by ERT: The case study of Sirino Lake (Basilicata, Italy). *Geomorphology*, 253: 1-9.
- Loke, M. H. 2006. RES2DINV ver. 3.55, Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Software Manual*, 139pp.



Teresa Perri, M., P. De Vita, R. Masciale, I. Portoghese, G. Battista Chirico and G. Cassiani. 2018. Time-lapse Mise-à-la-Masse measurements and modeling for tracer test monitoring in a shallow aquifer. *Journal of Hydrology*, 561: 461–477.

Wehrer, M., A. Binley and L. D. Slater. 2016. Characterization of reactive transport by 3D electrical resistivity tomography (ERT) under unsaturated conditions. *Water resources research*, 52(10): 8295-8316.



## Tracing and Simulation of Leachate Penetration Transfer at Downstream of Landfill Using Special Electrical Resistivity Tomography Method

Mojtaba Khoshravesh<sup>1</sup>, Reza Norooz Valashedi<sup>2</sup>, Jalil Helali<sup>3</sup>, Mahmoud Raeini-Sarjaz<sup>4</sup>

### Abstract

It is very important to study and simulate the transfer of environmental pollutants, especially leachate from waste accumulation in landfills. The aim of this study was to trace and simulate the path and depth of leachate transfer at downstream of Landfill using special electrical resistivity tomography. For this purpose, at the leachate accumulation site from the landfill of Hamadan city, two special resistance tomographic profiles in the northwest and southwest parts with a length of 52 m were taken at 2 meters electrode distances with a Wenner array. The results showed that the study area is of alluvial, sandstone and calcareous formations. Also, it was found that during the profile, the pattern of diffusion and infiltration of leachate from landfill was not similar, so that in profile 1, the leachate penetrated to the end at a distance of 30 to 40 meters to a depth of 3 meters, and in other parts of the profile, no deep penetration was observed. However, in the total length of profile 2, the penetration depth has reached to 2.5 meters and in the middle part up to 5 meters and more, which indicates the nonuniformity of leachate penetration along the profile. Therefore, it was found that the use of special electrical resistivity tomography method in two-dimensional imaging of landfill leachate diffusion will be more accurate and realistic than point studies. It is suggested that in feasibility studies to determine the landfill, the use of vertical electrical sounding methods and special electrical resistivity tomography should be prioritized due to low cost in the study of the depth and area of contamination and on the other hand, the effect these pollutants should be analyzed on the quality of downstream groundwater resources.

**Keywords:** Leachate, Profile, Waste, Wenner array.

<sup>1</sup> Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: khoshravesh\_m24@yahoo.com; m.khoshravesh@sanru.ac.ir (Corresponding author)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: rezanorooz@yahoo.com

<sup>3</sup> PhD, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran, Iran, Email: jalilhelali@gmail.com

<sup>4</sup> Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: raeini@yahoo.com