

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

مجتبی خوش روش^۱، رضا نوروز ولاشدی^۲، جلیل هلالی^۳، محمود رائینی سرجاز^۴

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.

^۱- 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)

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

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

^۴- 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^۱ 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

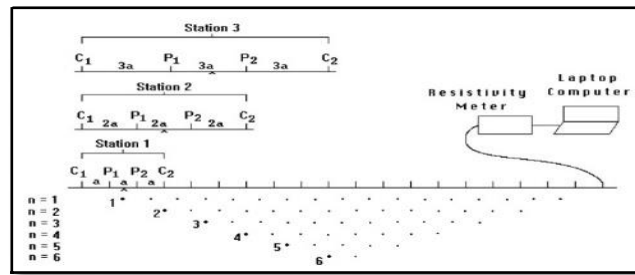
همچون پتانسیل آلاینده‌گی پایین دست و آبخوان در نظر گرفته نشده است. این امر زمانی اهمیت پیدا می‌کند که عدم انتخاب محل مناسب، موجب خسارت جبران‌ناپذیری بر بخش‌های محیطی به ویژه انسانی خواهد شد. این مساله در مناطقی با اقلیم مرطوب مثل مناطق ساحلی دریای خزر که همراه با بارش زیاد، هم از لحاظ مقدار و هم فراوانی 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^۲، شدت آلودگی و همچنین پتانسیل آلاینده‌گی، استفاده از تکنولوژی‌های غیرتخریبی ژئوفیزیکی به ویژه روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی^۳ 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.

³ Electerical Resistivity Tomography (ERT)

¹ Landfill

² Pulume



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

در زیر دریایچه Sirino با روش ERT انجام شده و مشخص شد ترکیب داده‌های ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، امکان تشخیص سنگ‌شناسی و ضخامت رسوبات زیر دریایچه 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



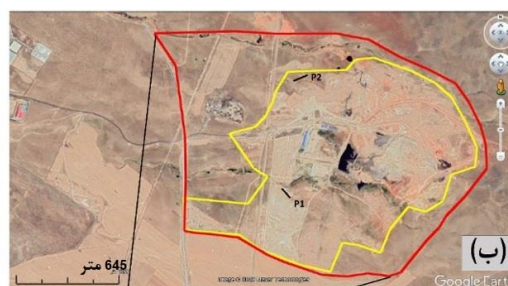
مواد و روش‌ها محدوده مطالعاتی

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

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 می‌باشد

تجهیزات ژئوفیزیکی مورد استفاده

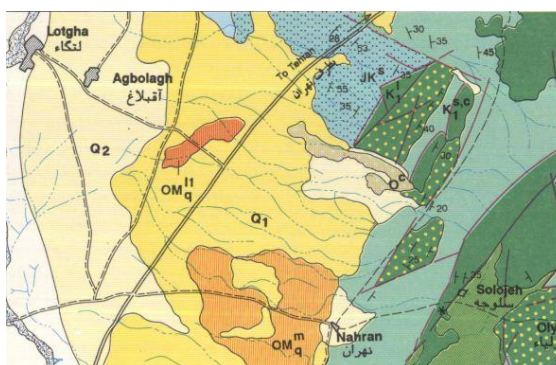
با توجه به اینکه در این مطالعه نیاز به دستگاه ژئوالکتریک با قابلیت برداشت توموگرافی بود، از دستگاه ژئوالکتریک مدل RMT5 ساخت شرکت زمین سولار سیستم استفاده شد. این دستگاه علاوه بر داشتن قابلیت برداشت توموگرافی، دارای خصوصیات فنی دقیق می‌باشد به طوری که دقت اندازه‌گیری ولت، برابر ۱ میکرو ولت، دقت اندازه‌گیری آمپر، برابر ۱ میکرو آمپر و توان خروجی ۵۰۰ وات با قابلیت حذف نوفه‌ها به طور اتوماتیک می‌باشد. نوفه‌ها یا پارازیت‌ها در واقع سیگنال‌هایی به جز هدف مورد هستند که باید قبل از تحلیل نتایج از داده‌ها حذف شوند. به منظور برداشت توموگرافی از سیستم چندکاناله استفاده شد که دربرگیرنده ۲۶ الکتروستیل ضد زنگ با طول ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد.



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

برداشت داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

با توجه به احتمال نشت شیرابه در پایین دست، دو پروفیل در بخش‌های 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 گونه‌ای انتخاب شد که در نزدیکی شیرابه‌های حاصل از پسماند بالادست باشد.



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^۱ بر خلاف روش مستقیم با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل زمین برآورد می‌شود. در این روش ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز است (Loke, 2006). 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.

¹ Inversion



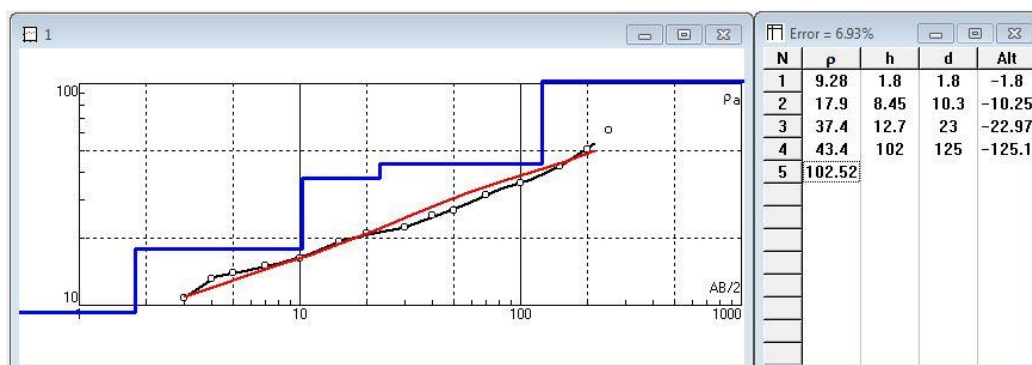
سنگ و تا عمق حدود ۱۲۵ متری، ماسه سنگ آهکی می‌باشد (شکل ۴) که با داده‌های نمونه‌گیری شده تطابق نشان می‌دهد (جدول ۱). در محل پروفیل شماره ۲ نیز برداشت سونداژ الکتریکی قائم نشان می‌دهد که تا عمق حدود ۱ متری، خاک سطحی و رس، تا عمق ۶ متری، رس، تا عمق ۱۰ متری، رس و سیلت، تا عمق ۴۸ متری، سیلت و مادستون و تا 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.

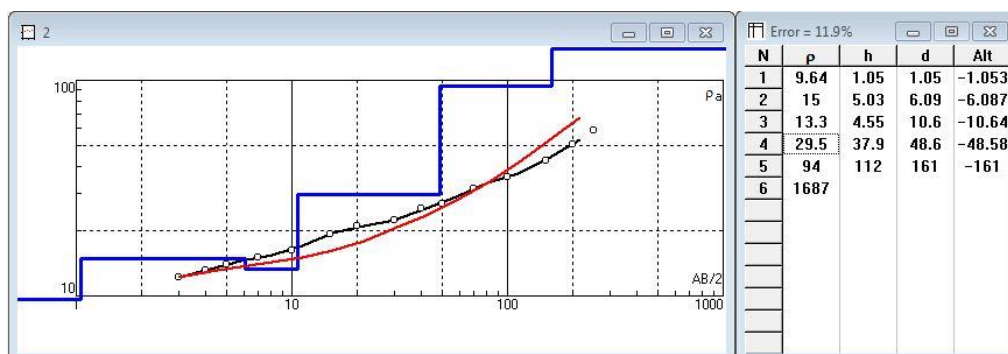
نتایج و بحث

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))

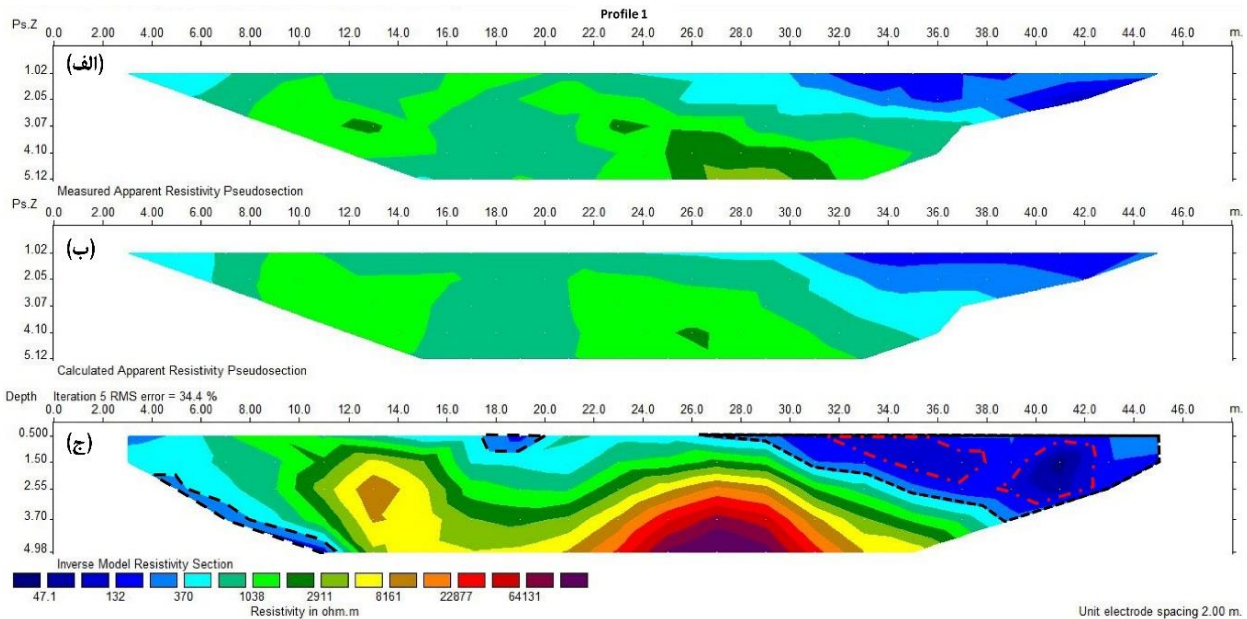
جدول (۱): تغییرات بافت نمونه‌های خاک نسبت به عمق

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 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

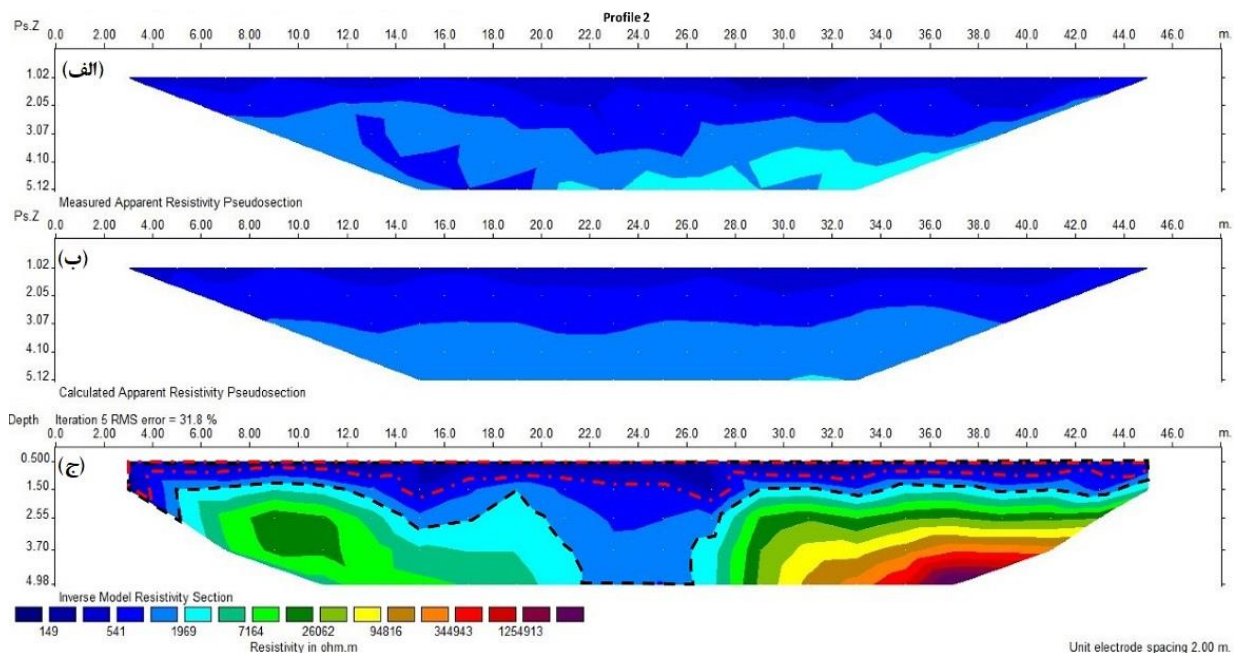
تفسیر نتایج تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی و شبه مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری پروفیل ۱ در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شبه مقطع خام و تصحیح شده نیز مشاهده می‌شود نقاط ناهمگنی زیادتر است. در بخش انتهایی پروفیل (۳۰ تا ۴۰ متری) و تا عمق نزدیک به ۳ متری، افت مقاومت ویژه الکتریکی قابل مشاهده است که نشان‌دهنده 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 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 Khoshravesh¹, Reza Norooz Valashedi², Jalil Helali³, Mahmoud Raeini-Sarjaz⁴

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.

¹ 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)

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

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

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

Extended Abstract

Research Paper

Tracing and Simulation of Leachate Penetration Transfer at Downstream of Landfill Using Special Electrical Resistivity Tomography MethodMojtaba Khoshravesh¹, Reza Norooz Valashedi², Jalil Helali³, Mahmoud Raeini-Sarjaz⁴

1. 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)

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

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

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



Received:

01. April.2020

Accepted:

22. April.2020

Available online:

10. January.2022

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

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.

1. Introduction

Eliminate groundwater pollution is a very costly and time-consuming process and is often diagnosed when it becomes almost impossible to remediate aquifer pollution. Spatial changes are normal, but recognizing these changes is necessary and useful for careful planning and management. It is very important to study and simulate the transfer of environmental pollutants, especially leachate from waste accumulation in landfills. Given the existence of numerous contaminants in different parts of the country and comprehensive studies of these contaminants, it seems necessary to use non-destructive methods in these studies. These studies are mainly from the point of view and sampling of existing wells and do not provide a two-dimensional or three-dimensional image of the pollutant diffusion area, in other words, the diffusion pattern is uniform throughout the landfill and are considered homogeneous. For this purpose, two-dimensional or three-dimensional

simulation and modeling of the path and depth of pollutant penetration is required. One of the methods used for this purpose is the use of special electrical resistivity tomography method. One of the gaps in Iran is the lack of use of this technology in studies on the leachate diffusion of contamination from landfill. Numerous studies from different aspects have discussed the effects of landfills, including the effect of leachate on forest trees, determining the potential for landfill contamination, modeling the transmission of contamination due to landfill leachate, the effect of landfill leachate on groundwater quality and physical and chemical properties of soil. In most of the above studies, points and statistics from the landfill have been investigated and the area that may be contaminated has not been done in two dimensions or grids. On the other hand, in determining the landfill, environmental factors such as the potential for downstream pollution and the aquifer have not been considered. This is important when not choosing the right place will cause irreparable damage to the environment, especially humans. This problem is more acute in areas with humid climates, such as the coastal areas of the Caspian Sea, which are associated with heavy rainfall, both in terms of quantity and frequency. The aim of this study was to use the special electrical resistivity tomography method and its efficiency in modeling, simulating and identifying the two-dimensional expansion of the path and the penetration depth of the landfill leachate.

2. Materials and Methods

The study area is located in the northern part of Hamadan city and about 20 km north of it. In this research, 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 choice of two profiles was based on the presence of leachate on the ground. After extracting the data and deleting the outliers, the raw data of the apparent resistivity of the extracted data were entered into Res2Dinv software for initial drawing of pseudo-resistivity. Outlier data were removed from the calculations before modeling. In order to obtain the lithological structure and bedrock, vertical electric sounding method was used with a transmitter length of 150 m with Schlumberger array and sampling up to a depth of 10 m.

Results

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.

3. Discussion and Conclusion

The use of tomography method shows the changes of special electrical resistivity in the horizontal direction better and indicates that the entire length of the profile was not homogeneous, at least in the middle part, with respect to leachate infiltration. Due to the severe changes in the existing profiles, it is possible that the pattern of leachate infiltration into the aquifer or lower depths is not uniform and homogeneous. Extraction of vertical electrical sounding data showed that the study site has a very weak potential for leachate penetration and the possibility of infiltration of leachate from the waste into the lower layers and infiltration into the lower aquifer will be weak, but, specific resistance tomographic showed that the penetration pattern would not be homogeneous along the profile. 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. Also, in feasibility studies to determine the landfill using

geoelectric methods (vertical electrical sounding for lithology and bedrock and special electrical resistivity tomography to study the two-dimensional distribution of pollution) are used with data wells.

5. Six important references

1. 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.
2. 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.
3. Loke, M. H. 2006. RES2DINV ver. 3.55, Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Software Manual*, 139pp.
4. Nakhaei, M., H. Nassery and V. Amiri. 2012. Contaminant Transport Modeling due to Leachate Leaking of Rasht waste disposal site
5. 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.
6. 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.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.