

## پایش نفوذ آب در خاک با استفاده از روش ژئورادار و مقاومت ویژه الکتریکی (مطالعه موردی: مکان آزمایش ژئوفیزیکی دانشگاه صنعتی شاهرود)

علی آقایی کردشامی<sup>۱</sup>، علیرضا عرب امیری<sup>۲</sup>، ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۳</sup> و حمید بیژنی<sup>۴\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۶)

### چکیده

در این تحقیق با برداشت داده‌های ژئورادار و مقاومت ویژه الکتریکی از مخزن پلی‌اتیلنی در حالت خالی و پر از محلول کات کبود، روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و رادار نفوذی به زمین (GPR) به صورت کنترل شده در مکان آزمایش‌های ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود مطالعه شده است. جهت بررسی چگونگی تغییرات ویژگی‌های الکتریکی بر اثر فرورفت جریان محلول در یک زمین آبرفتی و همچنین تغییرات ناشی از پر یا خالی بودن یک لوله پلی‌اتیلنی مدفون، با استفاده از دو روش ذکر شده، برداشت داده در زمین آبرفتی، قبل و بعد از نشت محلول به سطح زمین انجام شده است. لوله پلی‌اتیلنی مخزنی است که با یک شیر در سطح زمین آبرفتی تخلیه می‌شود. داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR محدوده در دو زمان متفاوت (تابستان و پاییز)، برداشت، پردازش و تفسیر شده است. پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های برداشت شده در قالب مدل‌های دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی و مقاطع عرضی GPR انجام شده است. از مهم‌ترین نتایج این مطالعه می‌توان به عملکرد خوب روش مقاومت ویژه الکتریکی در آشکارسازی جزئیات، آشکار نشدن مناسب جزئیات در روش GPR برای زمین‌های آبرفتی با رس زیاد، نامناسب بودن آنتن فرستنده با بسامد ۱۵۰ مگاهرتز در روش GPR، اثر مخرب رطوبت بر عملکرد این روش و در نهایت، آشکار نکردن اهداف با روش GPR به دلیل تباین کم گذردهی نسبی الکتریکی بین اهداف و زمینه اشاره کرد. با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی لوله پلی‌اتیلنی، قسمت‌هایی که خاک سست و متخلخل دارند، آشکارسازی و مناطق مختلف با توجه به رطوبت نسبی موجود در آنها تفکیک شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مقاومت ویژه الکتریکی، رادار نفوذی به زمین (GPR)، لوله پلی‌اتیلنی، مدل‌سازی دوبعدی، مکان آزمایش ژئوفیزیکی دانشگاه صنعتی شاهرود

## ۱ مقدمه

ردیابی آلودگی‌های منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مرسوم مهندسی مانند حفاری، به لحاظ اجرایی، مشکل، بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. از مهم‌ترین و مناسب‌ترین روش‌های قابل استفاده در ردیابی این آلودگی‌ها، روش‌های ژئوفیزیکی نظیر مقاومت ویژه الکتریکی و GPR است (بنسون، ۱۹۹۵؛ بنسون و ماستو، ۱۹۹۸؛ ریز-لوپز و همکاران، ۲۰۰۸؛ عبدالمی و همکاران، ۲۰۱۱؛ ونگ و همکاران، ۲۰۲۰ و دکاسیا سیلوا باچا و همکاران، ۲۰۲۱). روش‌های ژئوفیزیکی نه تنها اطلاعات مربوط به سایت آلوده را به‌طور مؤثری در تحقیقات پیش از اصلاح آلودگی به‌دست می‌آورند، بلکه مقرون به صرفه هم هستند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). انتشار آلودگی در زمین که در تمامی مراحل تولید، حمل‌ونقل و فرآوری نفت رخ می‌دهد، طی دهه‌ها به تشکیل ذخایر ثانویه نفت منجر می‌شود. آلودگی نفتی به‌ویژه از نظر شیمیایی در نواحی نزدیک به سطح فعال می‌شود و با محیط زمین‌شناسی واکنش نشان می‌دهد. این واکنش ناهنجاری‌هایی را در روش‌های مختلف ژئوفیزیکی از جمله GPR، IP، SP و مقاومت ویژه ایجاد می‌کند (مدین و همکاران، ۱۹۹۷). بررسی‌های ژئوالکتریکی به ابزاری مهم در برنامه‌های کاربردی هیدروژئولوژیکی تبدیل شده‌اند. توزیع فضایی پارامترهای الکتریکی در زیر زمین می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای تشخیص ناهمگونی آب‌های زیرزمینی و خاک فراهم کند. وجود آلاینده‌های غیرآلی در آب‌های زیرزمینی آلوده سبب افزایش میزان هدایت الکتریکی آب می‌شود. این موضوع در انباشت زباله‌ها دیده می‌شود (ارنستون و کرش، ۲۰۰۶). در مطالعات پیشین، برای یافتن مکان دقیق مخازن زیرزمینی و انتشار آلودگی در محیط اطراف مخازن از روش‌های GPR، ERT و FDEM برای مقایسه و صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است (وانگ و همکاران،

۲۰۱۵). روش‌های ژئوفیزیکی نزدیک به سطح به‌ویژه روش‌های الکتریکی و رادار نفوذی به زمین برای تعیین مسیرهای جریان آب زیرزمینی مناسب هستند (جیمز و نويز، ۲۰۱۵).

اهداف این مطالعه عبارت‌اند از:

الف) تعیین مسیرهای جریان آب زیرزمینی؛  
ب) تفکیک غلظت‌های یونی مختلف موجود در آب زیرزمینی.

تعیین مسیرهای جریان آب زیرزمینی می‌تواند با استفاده از روش GPR انجام شود (جیمز و نويز، ۲۰۱۵). زیاد بودن غلظت یون‌ها باید بر خواص الکتریکی تأثیر بگذارد؛ بنابراین روش‌های الکتریکی می‌توانند انتخابی منطقی باشند. همان‌طور که ذکر شد، با ایجاد تغییرات در غلظت یون‌ها و مقدار رطوبت زمین، مقاومت ویژه الکتریکی زمین تغییر می‌کند؛ بنابراین از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای تصویرسازی زیر سطح زمین استفاده می‌شود. در این مطالعه، ترکیبی از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR به کار گرفته می‌شود. پیش‌بینی می‌شود روش مقاومت ویژه الکتریکی بتواند جزئیات را آشکار کند و با استفاده از آن، صحت‌سنجی کار GPR نیز انجام شود. به همین علت، چهار خط برداشت روی مخزن پلی‌اتیلنی (محدوده A) و پنج خط برداشت روی زمین آبرفتی (محدوده B) طراحی شد. برداشت‌های این دو روش در طول این خطوط انجام و نتیجه پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های برداشت‌شده، مسیرهای جریان آب زیرزمینی و وجود غلظت‌های یونی زیاد، متوسط و کم مشخص خواهد شد.

## ۲ موقعیت و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در محدوده معدن آموزشی دانشگاه صنعتی شاهرود و در سایت آزمایش‌های ژئوفیزیکی

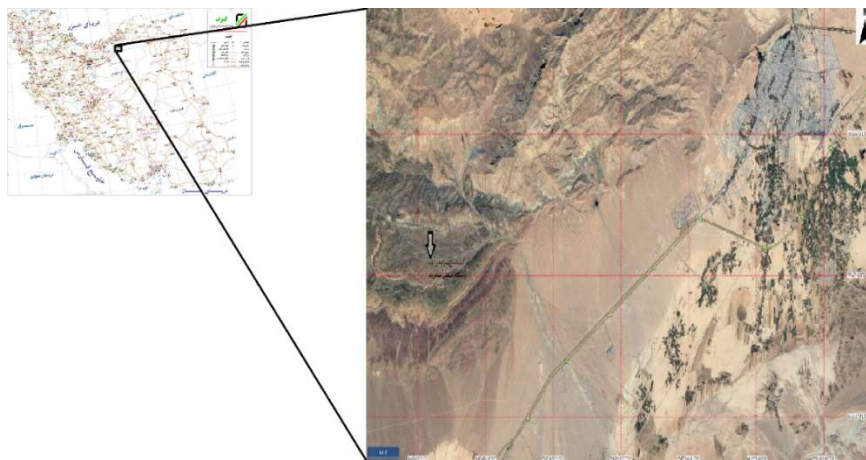
پوشش گیاهی و واریزه سطحی هستند و تشخیص جنس و سن آنها راحت است.

ب) رخساره‌ها و محیط رسوبی: با توجه به پیوستگی توالی‌های چینه‌ای در ناحیه دهملا، تعبیر و تفسیر رخساره‌ها و محیط رسوبی به‌سادگی امکان‌پذیر است. از جمله رخساره‌های مهم این محدوده می‌توان به رخساره استروماتولیتی سازند سلطانیه، باروت و بخشی یک میلا، رخساره‌های طوفانی بخش ۲ سازند میلا و رخساره‌های توریدایتی سازند قلی اشاره کرد. از نظر زمین‌ساختی، سکانس‌های رسوبی اردوئیسین تا سیلورین رخساره‌های هم‌زمان با پیدایش کافت پالتوتیس و رخساره‌های دونین میانی و تریاس میانی حوضه البرز حاکی از تشکیل آنها در حاشیه واگرایی اقیانوس پالتوتیس است. نظم و ترتیب توالی‌ها در ناحیه دهملا به نحوی است که راحت می‌توان تغییر و تحولات زمین‌ساختی حوضه البرز را بر اساس سکانس‌ها و رخساره‌های رسوبی تعبیر و تفسیر کرد.

ج) زمین‌شناسی ساختمانی: در محدوده دهملا، گسل‌های رانده شاخصی وجود دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به راندگی طزره و شاهرود اشاره کرد. راندگی‌های مزبور با دگرشکلی‌های عمده‌ای همراه هستند

(تست سایت ژئوفیزیک) این محدوده قرار دارد. این محدوده در منطقه دهملا قرار گرفته است. منطقه دهملا در ۳۸۰ کیلومتری شمال شرق تهران و ۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان شاهرود واقع و از نظر تقسیمات زمین‌شناسی ایران، جزئی از منطقه البرز شرقی است. یک جاده فرعی به طول ۸ کیلومتر این محدوده را به جاده اصلی شاهرود-دامغان متصل کرده است. این سایت آزمایش در فاصله ۲۴ کیلومتری شهر شاهرود و ۱۵ کیلومتری روستای دهملا و در شمال غربی آن قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت سایت آزمایش‌های ژئوفیزیکی دانشگاه صنعتی شاهرود و مسیر دسترسی به آن دیده می‌شود. ویژگی‌های زمین‌شناسی این منطقه را به‌صورت زیر می‌توان خلاصه کرد (حافظی مقدس و طاهری، ۱۳۸۴):

الف) چینه‌شناسی: رخنمون‌های سنگی محدوده دهملا متعلق به سازندهای بایندر، سلطانیه، باروت، زاگون، لالون، میلا، لشکرک، قلی، جیرود، الیکا، شمشک، دلیچای و لار است. محدوده سنی این واحدها از پرکامبرین تا ژوراسیک را شامل می‌شود. رخدادهای زمین‌ساختی حاکم بر البرز، کمتر باعث به‌هم‌ریختگی در این سازندها شده است. رخنمون‌های سنگی اغلب بدون



شکل ۱. مسیر دسترسی به سایت آزمایش‌های ژئوفیزیکی دانشگاه صنعتی شاهرود.

ویژگی‌های الکتریکی لوله خالی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR اندازه‌گیری و مدل‌سازی شد. سپس لوله با استفاده از یک محلول نمکی (محلول کات کبود) با غلظت ۰/۴۷ مولار، پر و دوباره ویژگی‌های الکتریکی لوله با استفاده از روش‌های ذکر شده اندازه‌گیری شد. در قسمت دیگری از مطالعه، تغییرات ویژگی‌های الکتریکی در یک زمین آبرفتی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR در زمان‌های قبل و بعد از ورود محلول نمکی به زمین بررسی شد. گفتنی است فرایند بررسی به دنبال تزریق محلول به زمین و پس از خشک شدن زمین انجام گرفته است؛ زیرا اشباع بودن زمین باعث ایجاد رسانندگی در سطح و نفوذ نکردن جریان الکتریکی به درون زمین می‌شود. در محل مخزن، چهار پروفیل A1 تا A4 در جهت عمود بر طول استوانه مخزن و در محل تخلیه مخزن در زمین آبرفتی، پنج پروفیل B1 تا B5 طراحی و برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR انجام شده است.

جهت برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برای دست‌یابی به اهداف مختلف، دو محدوده (شکل ۲) طراحی شده است. محدوده A برای اکتشاف اجسام مدفون در طول زمان و با تغییر خصوصیات طراحی شده

که تشخیص مرز گسلی را ساده می‌کنند. از نظر چین‌خوردگی به ناودیس ده‌ملا می‌توان اشاره کرد. (د) زمین‌ریخت‌شناسی: از نظر خصوصیات ریخت‌شناسی نیز این محدوده جالب و در عین حال ساده است. پدیده‌هایی مثل فرسایش انتخابی، زمین‌لغزه‌ها، ریزش‌ها، دامنه‌های نامتقارن و وجود چشمه را می‌توان در این منطقه مشاهده و تفسیر کرد.

دو محدوده برای برداشت داده‌های مقاومت ویژه و GPR در این تحقیق در نظر گرفته شده است. محدوده A در بردارنده لوله‌ای پلی‌اتیلنی با قطر ۰/۵ متر است. محدوده B که در یک رودخانه فصلی قرار دارد، بستری آبرفتی دارد که خصوصیات ژئوالکتریکی و پاسخ GPR در آن قبل و بعد از نشت محلول بررسی شده است. در شکل ۲ موقعیت دو محدوده A و B در سایت آزمایش‌های ژئوفیزیکی دانشگاه صنعتی شاهرود نشان داده شده است که البته با مقیاس مطابقت ندارد.

### ۳ روش کار

در این مطالعه یک لوله پلی‌اتیلنی که یک شیر ورودی و یک دریچه خروجی دارد، به‌عنوان مخزن فرض شده است. طول این لوله استوانه‌ای شکل که در زیر زمین دفن شده است، ۶ متر و قطر آن ۰/۵ متر است. در ابتدا،



شکل ۲. محدوده‌های تعیین شده برای مطالعه. محدوده A محل قرارگیری لوله مدفون و محدوده B بستر آبرفتی مورد مطالعه است.

تزریق آلودگی ناشی از محلول کات کبود مطالعه شده است. در این تحقیق، دقیقاً در مکان خطوط برداشت تعیین شده برای برداشت داده‌های ژئوالکتریک در دو محدوده A و B (شکل ۲)، پروفیل‌های GPR نیز در دو مرحله برداشت شده است. این کار برای مقایسه بهتر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR انجام شده است. برای برداشت داده‌های GPR از دستگاه Cobra Plug-in با آنتن ۱۵۰ مگاهرتز استفاده شده است. برای این مطالعه، عمق نفوذ کم مد نظر بوده است ولی به دلیل دسترسی نداشتن به آنتن با بسامد بیشتر از این آنتن استفاده شده است. تعداد پروفیل‌های GPR برداشت شده شامل چهار خط برداشت در محدوده B روی لوله مدفون با آزمون ۱۱۰ درجه و تعداد پنج خط برداشت با آزمون ۲ درجه در بستر رسوبی واقع در محدوده B (محل نشت محلول) است. شایان ذکر است در این تحقیق تنها نتایج یک پروفیل GPR برای دو محدوده آمده است.

### ۱-۳ روش مقاومت ویژه الکتریکی

مقاومت ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین ارائه می‌دهد. هدف از برداشت‌های الکتریکی، تخمین چگونگی توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح زمین با اندازه‌گیری‌های سطحی است (لوک و لین، ۲۰۰۴). در اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی، جریان الکتریکی از نوع مستقیم با دو الکتروود نقطه‌ای جریان A و B به درون زمین فرستاده می‌شود و اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکتروود پتانسیل M و N در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳).

مقاومت ویژه الکتریکی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (رینولدز، ۲۰۱۱):

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

که  $\Delta V$  اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده،  $I$  شدت جریان

است. محدوده B زمینی آبرفتی است که کف آن با رسوبات رودخانه‌ای و سیلابی پوشیده شده است. هدف مطالعه در محدوده B، بررسی تغییرات مقاومت ویژه ناشی از فروشویی محلول کات کبود در زمین است. برای برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده A تعداد چهار پروفیل در راستای تقریباً عمود بر امتداد لوله برنامه‌ریزی شده است (شکل ۵) که در این مقاله تنها دو پروفیل بررسی شد. به دلیل حساسیت و دقت زیاد مورد نیاز برای جزئیات و به دلیل پوشش افقی وسیع و زمان کم در برداشت داده‌ها نسبت به آرایه‌های دیگر، از آرایه الکتروودی دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکتروودی ۰/۵ متر و پروفیل‌هایی به طول ۶ متر استفاده شده است. فاصله پروفیل‌ها از یکدیگر برابر ۱/۵ متر است. پروفیل شماره یک در جهت شمال غربی محدوده قرار دارد و سایر پروفیل‌ها به ترتیب به سمت جنوب محدوده مطالعه طراحی شده‌اند. دستگاه ژئوالکتریک مورد استفاده SAS4000 است. امتداد این پروفیل‌ها در جهت آزمون ۱۱۰ درجه است. در این مطالعه با اطمینان از اینکه لوله خالی از محلول است، پیمایش مقاومت ویژه الکتریکی در محل لوله مدفون در تابستان ۱۳۹۸ انجام شده است. سپس لوله از محلول کات کبود پر و دوباره در همان فصل تابستان، پیمایش مقاومت ویژه الکتریکی در محل پروفیل‌های تعیین شده روی این لوله مدفون تکرار و نتایج بررسی شده است. در محدوده B تعداد پنج پروفیل به طول ۳/۵ تا ۵ متر با آرایه الکتروودی دوقطبی-دوقطبی و با فاصله الکتروودی ۰/۵ متر طراحی شده (شکل ۶) و برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی آن قبل (تابستان ۱۳۹۸) و بعد از تزریق محلول کات کبود (آبان ۱۳۹۸) به داخل لوله مدفون در زیر سطح زمین صورت گرفته است. البته در این مقاله تنها سه پروفیل در این محدوده بررسی شده است. در بخش دیگر این مطالعه، در محدوده زمین آبرفتی، در مکانی که شیر مخزن در آن باز می‌شود، تغییرات ناشی از

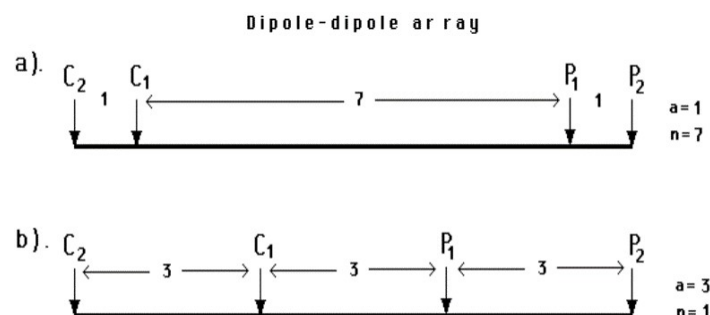
GPR یکی از ابزارهای اصلی ژئوفیزیک در تصویربرداری و بررسی‌های نزدیک به سطح خصوصیات فیزیکی و ساختاری است (بنسون و همکاران، ۱۹۹۱). روش GPR در شکل حاضر خود از عمق‌سنجی رادیویی یخ‌های قطبی در سال ۱۹۶۰ آغاز شد. GPR یکی از روش‌های ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک زیاد است که به منظور آشکارسازی زیرسطحی، با امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا (۱۲/۵ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) تغییرات خواص الکتریکی را در اعماق کم اندازه‌گیری می‌کند (وندام و شلگر، ۲۰۰۲). در سامانه GPR، فرستنده سیگنال‌های الکترومغناطیسی را ارسال می‌کند و گیرنده نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را آشکار می‌سازد. سیگنال ثبت شده به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی ثبت شده از محیط پیرامون و ویژگی‌های موج GPR، مانند میزان تضعیف میدان در محیط سیر موج ( $\alpha$ ) و امپدانس مغناطیسی ( $Z$ ) بستگی دارد. ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در یک محیط کنترل می‌کنند شامل گذردهی نسبی الکتریکی ( $\epsilon$ )، رسانایی الکتریکی ( $\sigma$ ) و تراوایی مغناطیسی ( $\mu$ ) است. در همه شیوه‌های برداشت GPR، اندازه‌گیری از یک مؤلفه میدان الکترومغناطیسی (معمولاً مؤلفه میدان الکتریکی) صورت می‌گیرد و شدت مؤلفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده به یک سیگنال

تزیق شده به زمین و  $K$  ضریب هندسی آرایش مورد استفاده برحسب متر است (کرش و یارامانچی، ۲۰۰۹). ضریب هندسی آرایش‌های مختلف الکترودی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰):

$$K = 2\pi * \frac{1}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (2)$$

در این تحقیق از آرایه دوقطبی-دوقطبی برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده است. در این نوع آرایش، الکترودهای جریان در یک سو و الکترودهای پتانسیل در سوی دیگر قرار می‌گیرند. فاصله بین دو الکتروود جریان و فاصله بین دو الکتروود پتانسیل به یک اندازه است. این آرایه به طور گسترده‌ای در پیمایش‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی (IP) استفاده می‌شود؛ زیرا اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بین الکترودهای جریان و پتانسیل اندک است. در شکل ۳ (a) چیدمان این آرایه نشان داده شده است. در این آرایه  $a$  فاصله الکتروودی بین الکترودهای جریان ( $C1$  و  $C2$ ) است که با فاصله بین جفت الکترودهای پتانسیل ( $P1$  و  $P2$ ) برابر است. این آرایه یک پارامتر دیگر به نام  $n$  دارد که نسبت فاصله بین الکترودهای  $C1$  و  $P1$  به فاصله الکتروودی  $a$  است. شکل ۳ دو ترتیب متفاوت با یک گستره آرایه برابر و با مقادیر متفاوتی از پارامترهای  $n$  و  $a$  را نشان می‌دهد (لوک و لین، ۲۰۰۴).

### ۲-۳ روش ژئورادار (GPR)



شکل ۳. دو ترتیب مختلف ممکن برای اندازه‌گیری با آرایه دو قطبی - دوقطبی. طول آرایه این دو ترتیب یکسان است اما  $n$  و  $a$  متفاوت هستند و در نتیجه، پاسخ یا سیگنال‌های بسیار متفاوتی دارند (لوک و لین، ۲۰۰۴).

معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$V = 1/\sqrt{\varepsilon\mu} = C/\sqrt{K} \quad (5)$$

$$\alpha = 0.5\sigma\sqrt{\mu/\varepsilon} = \sigma/2.K \quad (6)$$

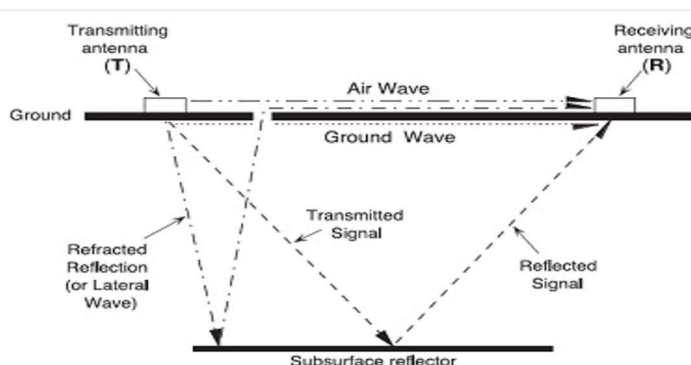
در رابطه (۶) هنگامی که تراوایی مغناطیسی ناچیز تلقی شود،  $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon} = Z_0/\sqrt{K}$  امپدانس محیط مورد بررسی،  $Z_0$  امپدانس فضای خالی و  $K$  ضریب دی الکتریک است. دو عبارت فوق نشان می‌دهند که توانایی انتقال دی الکتریک، سرعت را کنترل می‌کند و رسانندگی الکتریکی، تأثیر زیادی در میرایی دارد. این دو پارامتر در استفاده از GPR بسیار مهم هستند و پدیده انتشار امواج EM را در محیط، تنظیم و تجزیه و تحلیل می‌کنند (کاپوزولی و ریزو، ۲۰۱۷). شکل ۴ انواع امواج منتشر شده و دریافتی در روش GPR را برای محیط حاوی یک بازتابنده افقی تخت نشان می‌دهد.

ولتاژ تبدیل و نسبت به زمان ثبت می‌شود (شفری و همکاران، ۲۰۰۸). تجزیه و تحلیل تغییرات در رفتار EM حاوی اطلاعات مهم و درستی درباره ایمنی و ساختارها است. این تغییرات تباین مربوط به امپدانس EM را به وجود می‌آورند؛ بنابراین ویژگی‌های الکترومغناطیسی در زیر خاک به شدت بر سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس و تضعیف و میرایی انرژی تولید شده در زیر زمین تأثیر می‌گذارند. در حالتی که اتلاف کم باشد، سرعت (V) و میرایی موج EM ( $\alpha$ ) برابر است با:

$$V = 1/\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (3)$$

$$\alpha = 0.5\sigma\sqrt{\mu/\varepsilon} \quad (4)$$

که  $\varepsilon$  ضریب دی الکتریک،  $\mu$  تراوایی مغناطیسی و  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی است. در روش GPR که با بسامد بالا کار می‌کند نیز امواج الکترومغناطیسی میدان‌ها را در محیط پخش می‌کنند؛ بنابراین با توجه به روابط (۳) و (۴)



شکل ۴. نمایش امواج منتشر شده و دریافتی در GPR (نیل، ۲۰۰۴).

مدل‌سازی معکوس بهینه است (اولدنبرگ و لی، ۲۰۰۵). مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV انجام شده است. عملیات مدل‌سازی وارون (وارون‌سازی) استفاده شده با این برنامه بر اساس روش کمترین مربعات است. وارون‌سازی در این روش بر اساس رابطه (۷) عمل می‌کند:

#### ۴ نتایج برداشت، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های

##### مقاومت ویژه و GPR در منطقه مورد مطالعه

#### ۴-۱ مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه

##### الکتریکی

برای تفسیر کمی داده‌های ژئوالکتریک از مدل‌سازی معکوس استفاده شده است. روش‌های مدل‌سازی معکوس متداول شامل مدل‌سازی معکوس اجزا محدود و

مشاهده می‌شود. نکته درخور توجه در این اندازه‌گیری‌ها تفاوت مقدار مقاومت ویژه الکتریکی لوله نسبت به زمینه دربرگیرنده است. قبل از تزریق محلول، مقاومت ویژه محل لوله که در مقطع در فاصله ۳ تا ۴ متری از ابتدای پروفیل واقع شده است، بیشتر از مقاومت ویژه زمینه دربرگیرنده است. پس از تزریق محلول نمکی، این مقدار مقاومت ویژه کمتر از زمینه دربرگیرنده است. این موضوع می‌تواند ناشی از رسوب محلول کات کبود در لوله و فرونشست جریان محلول باشد. به عبارت دیگر، به دلیل وجود محلول در لوله، رسانندگی الکتریکی لوله افزایش یافته است. در سطح زمین در امتداد پروفیل، از ابتدای پروفیل تا موقعیت ۴/۵ متری از ابتدای پروفیل، مقاومت ویژه الکتریکی از مقاومت ویژه زمینه بیشتر است. دلیل این بی‌هنجاری در سطح را می‌توان به وجود حفرات و خاک‌های سطحی نسبت داد. البته با توجه به رسانا شدن کلی محیط زمینه نسبت به داده‌های مرحله اول برداشت (قبل از تزریق کات کبود)، رطوبت زیاد سطح زمین یکی از دلایل اصلی برای پاسخ‌های مقاومت ویژه در این مقطع است. همچنین همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مقدار RMS Error نیز در مدل به دست آمده برابر ۹۳/۸ درصد است



شکل ۶. محدوده B، جهت و راستای پروفیل‌های اجرا شده و موقعیت قرارگیری آنها نسبت به هدف (دید از جنوب غرب به سمت شمال شرق).

که  $f_x$  فیلتر هموارسازی افقی،  $f_z$  فیلتر هموارسازی عمودی،  $J$  ماتریس مشتقات جزئی،  $u$  ضریب تعدیل،  $d$  بردار تغییرات مدل و  $g$  بردار اختلافات است. این برنامه از روش کمترین مربعات بر اساس روش بهینه‌سازی گوس-نیوتن استفاده می‌کند. در روش گوس-نیوتن مرسوم، در هر تکرار، ماتریس ژاکوبی که همان ماتریس مشتقات جزئی است، دوباره محاسبه می‌شود اما در روش شبه‌نیوتن که در این نرم افزار نیز از آن استفاده می‌شود، ماتریس ژاکوبی فقط یک بار محاسبه می‌شود (لوک و لین، ۲۰۰۴).

#### • پروفیل A1

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، از ابتدای پروفیل در سطح مقاومت ویژه زیادی ایجاد شده است. در محل ذکر شده ضخامت کمی از خاک دست‌ریز یا جابه‌جاشده توسط جانوران وجود دارد. همچنین از عمق حدود ۳۰ الی ۴۰ سانتیمتری تا حدود ۸۵ سانتیمتری زمین یک بی‌هنجاری مقاوم دیده می‌شود. این بی‌هنجاری تقریباً ابعادی متناسب با هدف مدفون (لوله پلی‌اتیلنی) دارد و با توجه به پروفیل‌های دیگر می‌توان این موضوع را قبول یا رد کرد. پس از تزریق محلول کات کبود در لوله، اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه تکرار شده است. مقطع مقاومت ویژه پروفیل اول روی لوله پس از تزریق محلول مورد نظر در شکل ۸



شکل ۵. محدوده A، جهت و راستای پروفیل‌های اجرا شده و موقعیت قرارگیری آنها نسبت به هدف (دید از جنوب غرب به سمت شمال شرق)

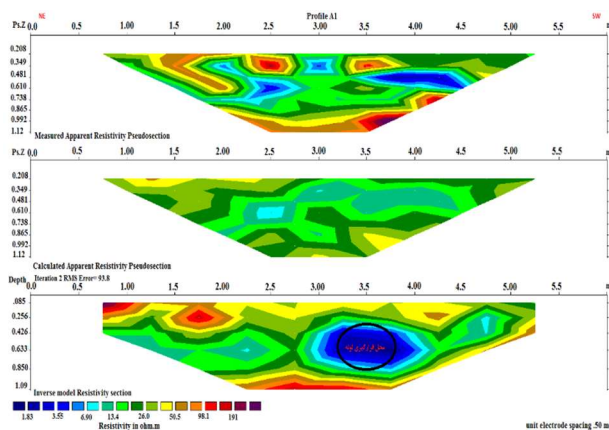


پروفیل در مقابل شیر خروجی مخزن قرار دارد که در این ناحیه بر اثر تجمع رطوبت پشت محفظه بتنی که اطراف شیر را گرفته است، یک بی‌هنجاری با رسانندگی زیاد در مدل مشاهده می‌شود. در شکل ۱۰ مدل وارون مقاومت ویژه پروفیل اول پس از تزریق محلول کات کبود در این محدوده مشاهده می‌شود. در این مدل رسانندگی الکتریکی به‌وضوح نسبت به حالت زمین قبل از تخلیه محلول بیشتر شده است. البته شایان ذکر است که زمین مقداری رطوبت دارد که حاصل بارندگی قبل از برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی است. در این پروفیل در موقعیت ۲/۵ تا ۳ متری مانند داده‌های مرحله اول و در عمق حدود ۲۵ سانتیمتری، مقاومت ویژه الکتریکی زیاد است و این بی‌هنجاری دقیقاً در مکانی دیده می‌شود که رسوبات حاصل از نشست رسوبات درشت رودخانه‌ای در امتداد رودخانه قرار گرفته است. این بی‌هنجاری با رسانندگی الکتریکی کمتر نسبت به زمینه، به دلیل وجود یک لایه شنی برآمده در بستر رودخانه ایجاد شده است. در مدل مقاومت ویژه پروفیل

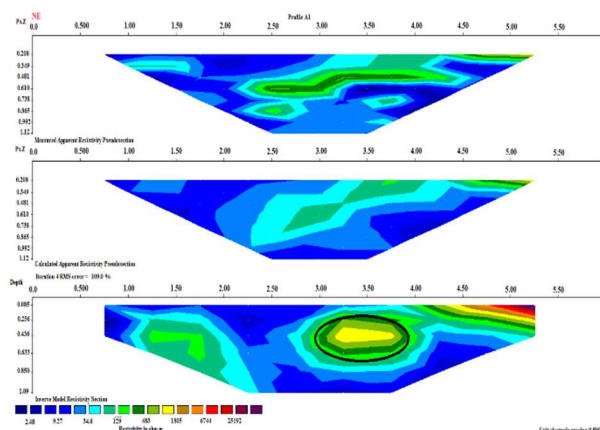
که نشان‌دهنده وجود خطای زیاد در مدل‌سازی داده‌ها است. این مسئله به دلیل تغییرات به‌نسبت شدید در داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده است.

### • پروفیل B1

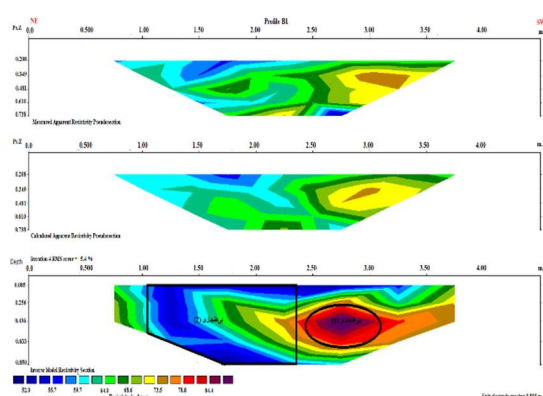
مدل مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل اول که در فاصله ۲۰ سانتیمتری شیر خروجی لوله قرار دارد، در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در این مدل، مقدار مقاومت ویژه زیاد در ناحیه ۲/۵ تا ۳ متری و در عمق ۲۵ سانتیمتری به‌صورت بی‌هنجاری (۱) دیده می‌شود. در ناحیه‌ای که این بی‌هنجاری مقاومت ویژه زیاد دیده می‌شود، در سطح بستر رودخانه، لایه‌ای شنی و با ذرات رسوبی درشت در امتداد مسیر رودخانه قرار گرفته است و به‌نظر می‌رسد عامل افزایش مقاومت ویژه الکتریکی در طول ۲/۵ تا ۳ متری از ابتدای پروفیل شده است (شکل ۹). در بخش ابتدایی پروفیل، سطح زمین با شن‌های خشک آبرفتی پوشیده شده است و به دیواره رودخانه فصلی منتهی می‌شود. مقاومت الکتریکی زیاد در این ناحیه که در اثر شن‌های خشک متخلخل ایجاد شده است، با بی‌هنجاری (۲) در شکل ۹ مشخص شده است. همچنین ناحیه ۱ تا ۱/۵ متری طول



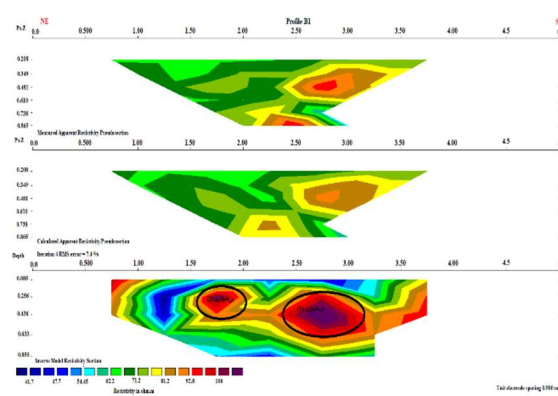
شکل ۸. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل A1 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون.



شکل ۹. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل B1 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون.



شکل ۱۰. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل B1 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.



شکل ۹. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل B1 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.

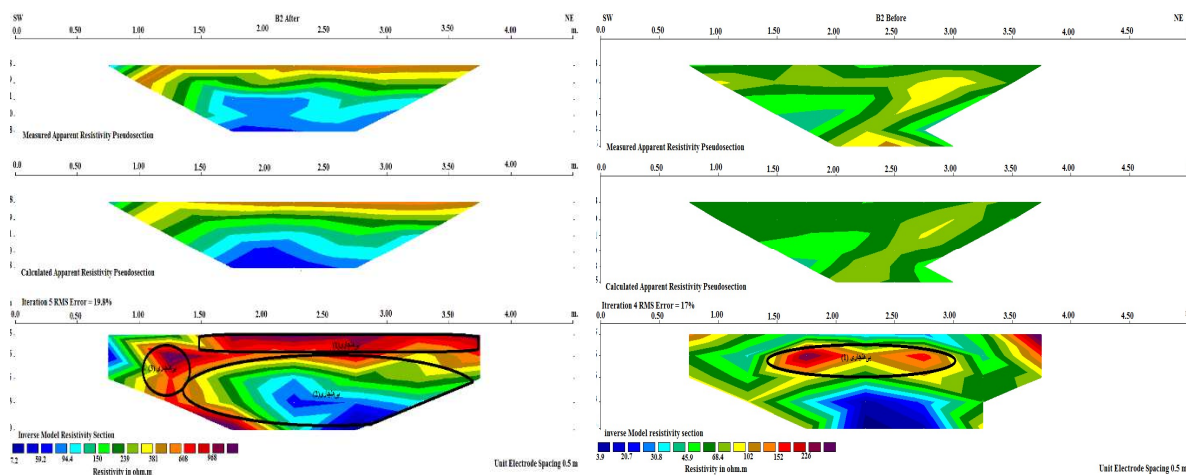
### • پروفیل B2

شکل ۱۱ مدل وارون پروفیل دوم را نشان می‌دهد که با فاصله ۱ متری از پروفیل اول و در محل تخلیه محلول نمکی قرار دارد. در این مدل دو بی‌هنجاری در موقعیت‌های ۱/۵ تا ۲ متری و از ۲ تا ۲/۵ متری دیده می‌شود که به صورت بی‌هنجاری (۱) در شکل ۱۱ مشخص شده‌اند و تقریباً به یکدیگر متصل هستند. در محل این دو بی‌هنجاری، ادامه رسوبات بیضوی رودخانه‌ای درشت‌دانه امتداد یافته است که در پروفیل اول نیز مشاهده شدند و عامل اصلی بی‌هنجاری با مقاومت زیاد در این ناحیه است. در گوشه‌های مدل، مقاومت الکتریکی زیاد دیده می‌شود که ناشی از وجود حاشیه‌های شنی دست‌ریز در اطراف محدوده B است؛ زیرا از خصوصیات این نواحی می‌توان به درشت‌دانه بودن و تخلخل زیاد آنها اشاره کرد و این دو، عوامل مؤثر بر افزایش مقاومت ویژه هستند. همچنین یک بی‌هنجاری با مقاومت الکتریکی زیاد در حاشیه مدل و در فاصله ۳ تا ۳/۵ متری وجود دارد که مانند پروفیل اول می‌توان این بی‌هنجاری را به رسوبات دست‌ریز حاشیه مسیر رودخانه با بافت متخلخل و غیرمتراکم نسبت داد. شکل ۱۲ مدل وارون پروفیل دوم پس از تخلیه محلول به زمین آبرفتی مورد نظر است. در

در این مرحله، یکی از بی‌هنجاری‌ها با مقاومت الکتریکی زیاد که در نزدیکی محل تزریق محلول نمکی قرار داشته است، به یک بی‌هنجاری با مقاومت الکتریکی کم تبدیل شده است. در محل پروفیل B1 دلیل ایجاد این بی‌هنجاری را می‌توان به بیشتر بودن رطوبت و همچنین متراکم‌تر بودن زمین در موقعیت ۱ تا ۲ متری در طول پروفیل نسبت به قسمت‌های دیگر آن نسبت داد. همچنین ممکن است وجود مانع در مسیر عبور جریان‌های ناشی از بارندگی قبل از برداشت مرحله دوم در زمین (وجود یک محفظه بتنی در محل قرارگیری شیر خروجی لوله)، نقشی در این موضوع ایفا کرده باشد. با وجود این، افزایش رسانندگی در بی‌هنجاری (۲) که در شکل ۱۰ مشخص شده است، می‌تواند نشان‌دهنده مسیر نشسته محلول کات کبود را نشان دهد؛ زیرا در این محل اثر نشسته کات کبود با تغییر رنگ اندکی که در رسوبات ایجاد کرده است، با مشاهده تشخیص داده می‌شود. نکته درخور توجه دیگر، کاهش مقادیر کلی مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به داده‌های مقاومت ویژه قبل از تزریق محلول در محدوده B است که با مقایسه دو مدل در شکل ۹ و شکل ۱۰ می‌توان آن را دریافت.

طول ۱ تا ۱/۵ متری در این پروفیل، بی‌هنجاری دیگری با مقاومت الکتریکی زیاد وجود دارد که در شکل ۱۲ به صورت بی‌هنجاری (۳) در عمق ۱۰ تا ۵۰ سانتیمتری در مدل دیده می‌شود. این بی‌هنجاری با توجه به اثر رسوبات آبرفتی برآمده دیگر ایجاد شده است. رسوبات دقیقاً از محل کوبیده شدن الکتروود دوم در پروفیل دوم شروع شده‌اند. تا الکتروود چهارم، می‌توان این رسوبات را در سطح دید که البته باعث ایجاد بی‌هنجاری در این ناحیه شده است.

این مدل لایه‌ای مقاوم روی سطح زمین از ابتدا تا انتهای پروفیل مشاهده می‌شود. این لایه با ضخامت تقریبی ۲۰ سانتیمتری، که در شکل ۱۲ با بی‌هنجاری (۱) مشخص شده است، به دلیل افزایش رسوبات آواری درشت‌دانه و غیرمتراکم که عمود بر امتداد پروفیل‌ها قرار گرفته‌اند، باعث بی‌هنجاری مقاومت الکتریکی زیاد در سطح شده است و با حرکت به سمت پروفیل پنجم، گسترش عرضی بیشتری می‌یابد. علاوه بر این گسترش منطقه رسانا که در شکل ۱۲ با بی‌هنجاری (۲) مشخص شده است، می‌تواند نشان‌دهنده اثر نشت محلول کات کبود در زمین باشد. در



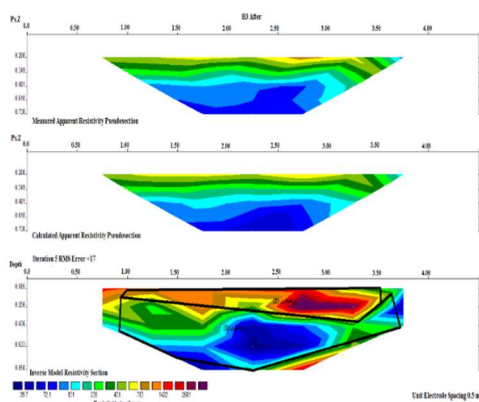
شکل ۱۲. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل B2 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.

شکل ۱۱. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل B2 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.

رسی و ماسه‌های آبرفتی به شکل دو جویبار در نواحی ذکر شده ایجاد شده است. در قسمت سطحی دیگر بی‌هنجاری مقاومت ویژه بسیار زیاد دیده می‌شود که شامل بازه‌های ۱ تا ۱/۵ متری و ۲/۵ تا ۴ متری در قسمت سطحی پروفیل B3 است (بی‌هنجاری‌های (۲) و (۴) در). ذرات درشت آواری شامل شن‌ها و قلوه‌ها در سطح زمین با بافت غیرمتراکم و خشک دیده می‌شوند. در فاصله ۲ تا ۳ متری روی پروفیل و در عمق حدود ۳۰ سانتیمتری، توده‌ای با رسانندگی الکتریکی زیاد با نام بی‌هنجاری (۵)

• **پروفیل B3**  
در شکل ۱۳ مدل وارون مقاومت ویژه پروفیل B3 در محل تخلیه، قبل از نشت محلول کات کبود مشاهده می‌شود. در این پروفیل رسانندگی الکتریکی از ابتدای پروفیل تا فاصله حدود ۱ متری و از ۱/۵ تا ۲/۵ متری در سطح نسبت به بخش‌های سطحی دیگر بیشتر است و به صورت بی‌هنجاری‌های (۱) و (۲) در شکل ۱۳ مشخص شده‌اند. پیش‌بینی می‌شود مطابق با مشاهدات عینی در محل برداشت، این رسانندگی به دلیل وجود ذرات ریز

داده‌های مرحله قبل از تزریق محلول کات کبود تطابق دارد. موضوع درخور توجه در این پروفیل، افزایش رسانندگی الکتریکی در عمق بیشتر از ۲۵ سانتیمتری است. این افزایش رسانندگی می‌تواند ناشی از نشت محلول کات کبود به این قسمت باشد که از آن برای افزایش رسانش الکترودها با بستر زمین در برداشت داده‌های مقاومت ویژه نیز استفاده می‌شود و به صورت بی‌هنجاری (۱) در شکل ۱۴ مشخص شده است.



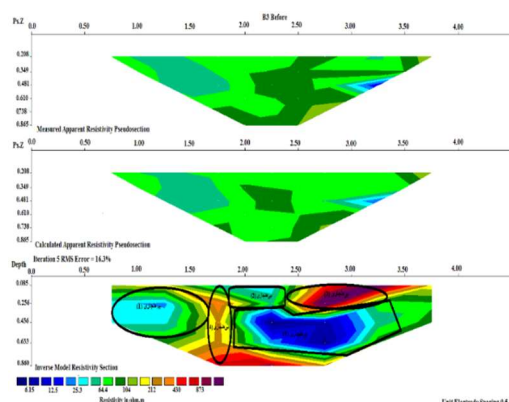
شکل ۱۴. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل B3 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین

زمین در این محدوده شرایط چندانی مناسبی برای برداشت داده‌های GPR ندارد؛ چون مقدار زیادی رس با رطوبت زیاد دارد. به همین دلیل عمق نفوذ امواج GPR و بازتاب خوب از امواج GPR به دست نیامده است. به این علت در مقاله حاضر تنها دو پروفیل که در دو زمان برداشت اول و دوم نتایج مشابهی با سایر پروفیل‌ها داشتند، برای نمونه آورده شده است.

#### • پروفیل A1

در شکل ۱۵-الف در سمت چپ مقطع عمقی GPR حاصل از برداشت داده‌ها در طول پروفیل A پس از تصحیح استاتیک و قرارگیری تمامی اولین رویدادها در یک مقطع زمان رسید موج مشاهده می‌شود. این مقطع

در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری رسانا به دلیل زیاد بودن مقدار رس و ریزدانه بودن آبرفت‌ها در این ناحیه است. در شکل ۱۴ مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل سوم بعد از تخلیه محلول در این ناحیه مشاهده می‌شود. در این پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی در سطح پروفیل نسبت به مرحله قبل افزایش یافته است و لایه‌ای با مقاومت ویژه زیاد در بخش میانی این پروفیل دیده می‌شود (بی‌هنجاری (۲) در شکل ۱۴) که تقریباً



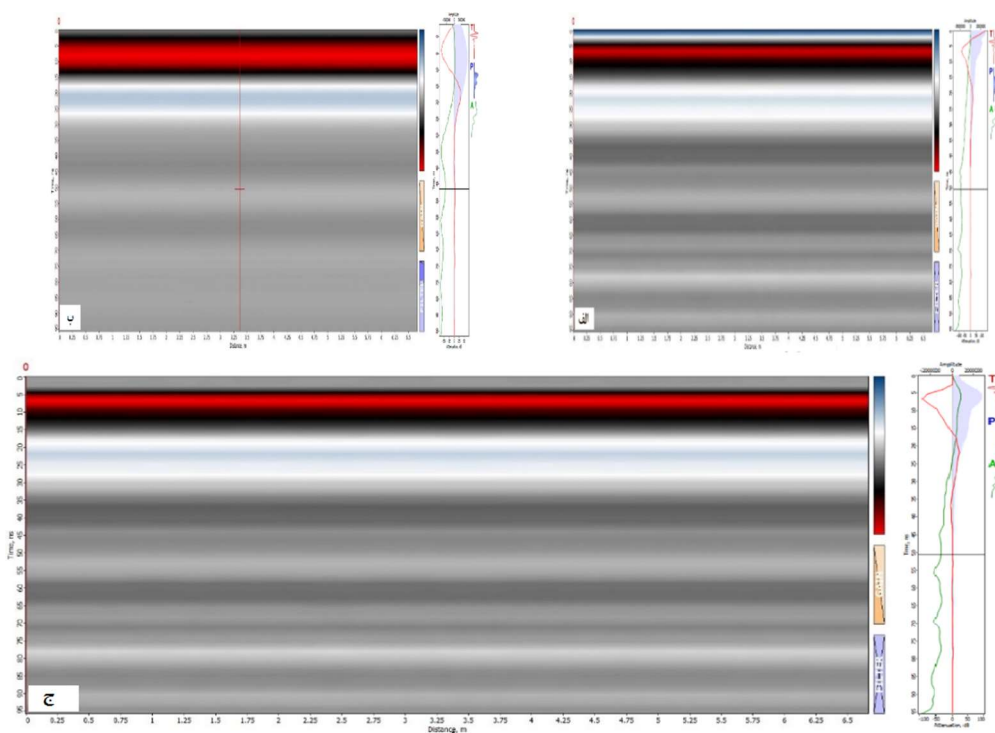
شکل ۱۳. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت‌شده در طول پروفیل B3 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین

## ۲-۴ پردازش و تفسیر داده‌های GPR

در این بخش نتایج پردازش و تفسیر داده‌های GPR آورده شده است. ابتدا روی داده‌ها تصحیح استاتیک اعمال شد تا زمان اولین رویداد در همه رد موج‌ها برابر شود. سپس برای تقویت سیگنال‌ها و تضعیف نوفه‌های احتمالی پردازش‌هایی روی داده‌ها اعمال شد. از نرم‌افزار Prism2 که نرم‌افزار تخصصی پردازش داده‌های GPR است، برای پردازش داده‌های GPR در این مقاله استفاده شده است. برای تصحیح دامنه امواج دریافتی و کاهش نوفه‌ها و افزایش قدرت سیگنال در داده‌های GPR با قالب segy، فیلترهای حذف پس‌زمینه و فیلتر بالاگذر در نرم‌افزار Prism2 اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد

منحنی‌های سیگنال و میرایی سیگنال، بهترین پنجره‌های بسامدی برای اعمال فیلتر پس‌زمینه انتخاب شدند. در شکل ۱۵-ج ردموج و مقطع GPR پروفیل مذکور بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بر داده‌های GPR برداشت‌شده از طول پروفیل A1 نشان داده شده است. به دلیل تباین بسیار کم در زمین محل برداشت و مقدار زیاد رطوبت خاک در طول این پروفیل، موج GPR ارسالی به زمین به شدت میرا شده است (شکل ۱۵). شایان توجه است که امکان داده‌برداری در زمان مناسب‌تر وجود نداشته است. در طول این پروفیل، مقدار رس موجود در خاک نیز زیاد است که این عامل نیز باعث میرایی بیشتر امواج GPR و محدود شدن عمق نفوذ شده است. مطابق با آنچه در شکل ۱۵-ج سمت راست دیده می‌شود، در

حاصل برداشت داده‌های GPR از پروفیل‌های اجراشده روی لوله مدفون قبل از تزریق محلول کات کبود است. سمت راست شکل ۱۵ نمایش عمقی یک ردموج GPR را نشان می‌دهد که در آن خط قرمز بیانگر دامنه ردموج، خط سبز بیانگر میرایی سیگنال و منحنی هاشورزده آبی بیانگر توان سیگنال است. طیف‌های رنگی در این مقطع بیانگر دامنه‌های مختلف موج است. در شکل ۱۵-ب مقطع GPR این پروفیل پس از اعمال فیلتر حذف زمینه در مقطع GPR همان مقطع پروفیل آورده‌شده در شکل ۱۵-الف مشاهده می‌شود که پردازش حذف پس‌زمینه بر آن اعمال شده است. فیلتر حذف زمینه بر این داده با حداقل میرایی سیگنال انجام شده است. برای انجام دادن این کار پنجره‌هایی با پهناهای مختلف بررسی شدند و با توجه به

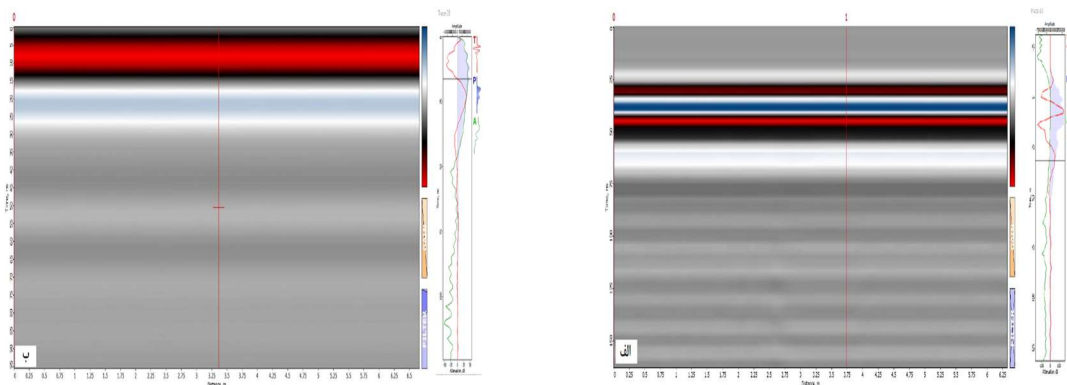


شکل ۱۵. ردموج‌های GPR (سمت راست) و مقاطع GPR در طول پروفیل A1 (سمت چپ) قبل از تزریق محلول کات کبود داخل لوله. (الف) سمت چپ: مقطع GPR بعد از تصحیح استاتیک داده‌ها (ب) سمت چپ: مقطع GPR بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه روی داده‌ها (ج) سمت چپ: مقطع GPR داده‌ها بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر روی داده‌ها.

شکل ۱۶-ب سمت چپ، مقطع GPR پس از اعمال پردازش تصحیح صفر زمانی، فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر به دست آمده است. در این مقطع نیز نمی توان خصوصیات زمین را به دلیل وجود رس زیاد و رطوبت زیاد زمینه مشاهده کرد. دلیل دیگر دیده نشدن بی‌هنجاری‌ها در مقاطع GPR را می توان به نبود تباین کافی بین گذردهی نسبی زمینه و هدف مدفون نسبت داد. طیف‌های رنگی متفاوتی که در مقاطع دیده می‌شود، بیانگر مقادیر مختلف دامنه موج است.

نتایج برداشت داده‌های GPR در طول پروفیل‌های برداشت در محدوده B نیز بررسی شده است ولی به دلیل شباهت پاسخ‌ها و نتایج، تنها بررسی یک خط برداشت روی لوله مدفون در اینجا آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روش GPR برای این گونه زمین‌های با مقادیر زیاد رس و همچنین زمین‌های با رطوبت به نسبت زیاد که تباین گذردهی نسبی کمی بین اهداف و زمینه دارند، مناسب نیست.

زمان حدود ۲۵ نانوثانیه، دامنه سیگنال تقریباً برابر صفر شده است؛ لذا در داده‌های GPR برداشت شده سیگنال بسیار ضعیف و محدودی از زمین دریافت شده است و با توجه به نبود تباین گذردهی الکتریکی کافی بین بی‌هنجاری‌ها و زمینه در زمین مورد مطالعه در طول این پروفیل و همچنین رخداد پدیده رینگینگ، که نوعی نوفه محسوب می‌شود، اطلاعاتی از محل قرارگیری لوله مدفون و تغییرات حاصل از پر شدن آن با محلول کات کبود در زیر سطح زمین به دست نمی‌آید. شکل ۱۶-الف، سمت چپ، مقطع عمقی GPR را در طول پروفیل A1 روی لوله مدفون پس از تزریق محلول کات کبود نشان می‌دهد. در این مقطع هیچ گونه پردازشی از جمله تصحیح جابه‌جایی صفر زمانی روی داده‌ها صورت نگرفته است. در سمت راست شکل ۱۶-الف مقطع زمانی یک رد موج GPR در داده‌ها به عنوان داده اولیه آورده شده است. همان‌طور که در این رد موج دیده می‌شود، دامنه سیگنال در زمان حدود ۵۰ نانوثانیه (بدون اعمال تصحیح صفر زمانی) به شدت تضعیف شده یا به عبارت دیگر، موج میرا شده است. در



شکل ۱۶. ۱۶. رد موج‌های GPR (سمت راست) و مقاطع GPR در طول پروفیل A1 (سمت چپ) بعد از تزریق محلول کات کبود داخل لوله. (الف) سمت چپ: مقطع GPR بعد از تصحیح استاتیکی داده‌ها (ب) سمت چپ: مقطع GPR داده‌ها بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر روی داده‌ها.

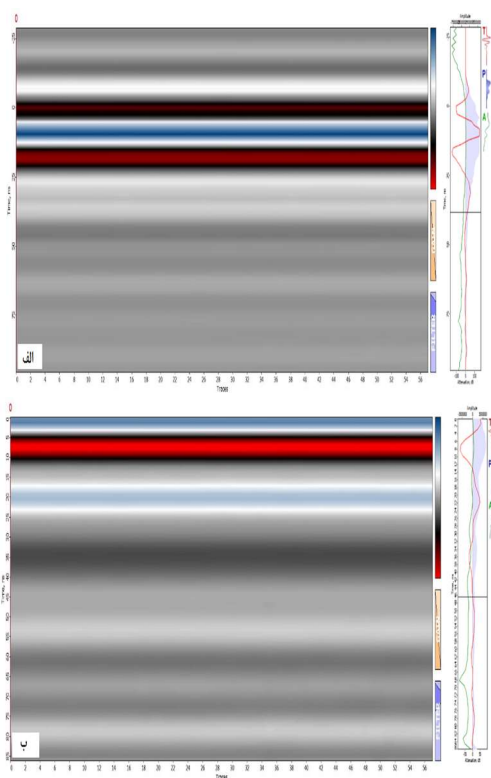
پروفیل پس از اعمال فیلتر حذف زمینه در مقطع GPR همان مقطع پروفیل آورده شده در شکل ۱۷-الف است.

### • پروفیل B1

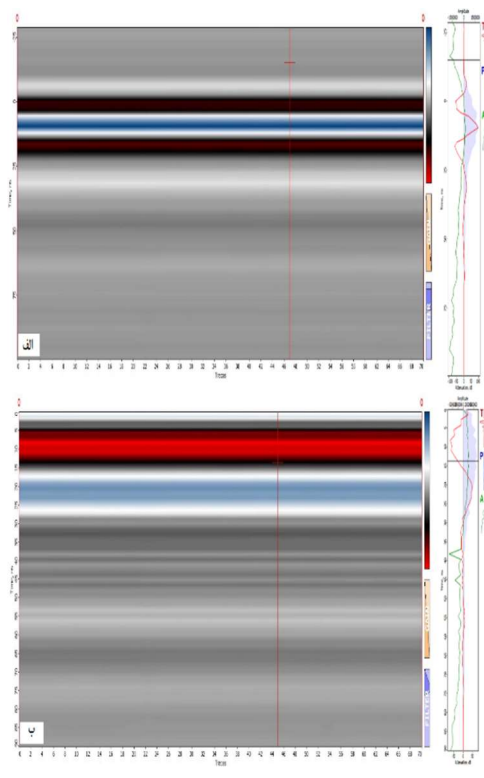
در شکل ۱۷ مقطع عمقی GPR حاصل از برداشت داده‌ها در طول پروفیل B1 مشاهده می‌شود. مقطع GPR این

حد ممکن زمین باید خشک باشد و مقدار کمی رس داشته باشد تا بتوان از نفوذ و انعکاس امواج GPR اطلاعاتی از بستر زمین به دست آورد ولی در این تحقیق به دلیل پیش‌بینی بارندگی‌های سیل آسا امکان داده‌برداری در زمان مناسب‌تری وجود نداشته است. به همین دلیل و به علت نبود اطلاعات کافی در مقاطع GPR، در این بخش تنها نتایج برداشت و پردازش داده‌های یک خط برداشت برای نمونه آورده شده است.

این مقطع حاصل برداشت داده‌های GPR روی پروفیل - های اجرا شده در محدوده B قبل از تزریق محلول کات کبود است. شکل ۱۷- ب نیز ردموج و مقطع GPR پروفیل B1 را پس از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر روی داده‌های GPR برداشت‌شده در طول پروفیل مذکور نشان می‌دهد. شکل ۱۸- الف مقطع عمقی GPR حاصل از برداشت داده‌ها در طول پروفیل B1 بعد از تزریق محلول کات کبود در محدوده B است. در شکل ۱۸- ب نیز نتایج نشان می‌دهد استفاده از روش GPR در زمینی با این خصوصیات پاسخ مناسبی دربر ندارد؛ لذا تا



شکل ۱۸. مقاطع خط برداشت اول GPR در محل B1 پس از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. (الف) مقطع داده‌های اولیه به دست آمده از خط برداشت اول (ب) نتیجه پردازش‌های جابه‌جایی صفر زمانی، حذف پس‌زمینه و اعمال فیلتر بالاگذر روی مقطع الف.



شکل ۱۷. مقاطع خط برداشت اول GPR در محل B1 قبل از نشت محلول کات کبود به داخل زمین. (الف) مقطع داده‌های اولیه به دست آمده از خط برداشت اول (ب) نتیجه پردازش‌های جابه‌جایی صفر زمانی، حذف پس‌زمینه و اعمال فیلتر بالاگذر روی مقطع الف.

### نتیجه گیری

نتایج مدل سازی دوبعدی داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A1 نشان می دهد میانگین مقاومت ویژه الکتریکی زمین در مرحله اول پیمایش (قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون) بیشتر از مقادیر مقاومت ویژه در پیمایش دوم (بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون) است. همچنین نتایج مقاطع GPR به دست آمده از برداشت در طول این پروفیل ها نشان می دهد سیگنال دریافتی از زمین بسیار ضعیف بوده است؛ در نتیجه اطلاعات خاصی از زمین پیمایش شده به دست نمی آید. علاوه بر این مدل های دوبعدی مقاومت ویژه وارون در طول پروفیل های محدوده A تا محدوده B بیانگر تغییرات مقاومت ویژه در طول زمان هستند. مدل های به دست آمده از محدوده B نمایش دهنده تغییرات جریان محلول در بستر رسوبی و جهت حرکت جریان محلول هستند. سایر نتایج این تحقیق در زیر آورده شده است:

۱- لوله مدفون در زیر زمین که از جنس پلی اتیلن است، در حالت قبل از پر شدن لوله در پروفیل A1 به صورت یک بی هنجاری با مقاومت ویژه زیاد خود را نشان داده است. دلیل رسانندگی لوله مدفون در مقطع حاصل از وارون سازی داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A1 را می توان به نشت محلول کات کبود و رسوب احتمالی آن در اطراف لوله پس از تزریق محلول به داخل آن نسبت داد. این موضوع نشان می دهد جهت حرکت جریانات زیر سطحی و وجود محلول را می توان با استفاده از بررسی های دقیق تر مقاومت ویژه تعیین کرد.

۲- در مقاطع حاصل از وارون سازی دوبعدی داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل های مقاومت ویژه در محدوده A، لوله مدفون با دقت زیادی به صورت یک بی هنجاری با مقاومت ویژه زیاد دیده می شود.

۳- مدل های وارون مقاومت ویژه حاصل از وارون سازی دوبعدی داده ها در طول پروفیل B1 قبل و بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین آبرفتی نشان دهنده کاهش مقاومت ویژه الکتریکی در طول پروفیل هستند به خصوص در بخشی که لوله حاوی محلول تخلیه می شود. نتایج برداشت و مدل سازی وارون داده ها در طول پروفیل B2، نتایج پروفیل B1 را تأیید می کند با این تفاوت که دو بی هنجاری مقاوم در طول پروفیل B2 تفکیک پذیری بهتری دارند. همچنین می توان اثر تزریق محلول کات کبود را در ابتدای پروفیل B2 در مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه در طول پروفیل مشاهده کرد.

۴- نتایج به کارگیری روش GPR در طول پروفیل های بررسی شده بیانگر نفوذ نکردن مناسب امواج GPR است. دلیل این موضوع را می توان به وجود رطوبت زیاد و رس زیاد در خاک زمین محدوده مورد بررسی نسبت داد؛ در نتیجه استفاده از این روش در چنین مناطقی معمولاً مناسب نیست.

### منابع

- حافظی مقدس، ن.، طاهری، ع.، ۱۳۸۴، معرفی منطقه دهملا شاهرود به عنوان پارک آموزشی زمین شناسی: بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین.
- حیدری، ا.، عابر، ح.، جهان آرا، ع.، ۱۳۹۷، شناسایی تونل مدفون با استفاده از شبیه سازی عددی دوبعدی داده های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعه موردی: تونل شماره ۳ آزادراه تهران- پردیس: پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، ۴(۱)، ۸۱-۹۳.
- کامکار روحانی، ا.، اکبری فیض آبادی، و.، شاه پسندزاده، م.، یعقوبی تبار، ب.، دژپسند، س.، راه انجام، م.، بابائی، م.، ۱۳۹۳، بررسی گسترش آلودگی آب زیرزمینی با استفاده از توموگرافی الکتریکی: کنفرانس ژئوفیزیک ایران.



- Abdullahi, N. K., Osazuwa, I. B., and Sule, P. O., 2011, Application of integrated geophysical techniques in the investigation of groundwater contamination: A case study of municipal solid waste leachate: *Ozean Journal of Applied Sciences*, **4**(1), 7-25.
- Allred, B. J., Fausey, N. R., Peters, L., Jr., Chen, C., Daniels, J. J., and Youn, H., 2004, Detection of buried agricultural drainage pipe with geophysical methods: *Applied Engineering in Agriculture*, **20**(3), 307-318.
- Basile, V., Carozzo, M. T., Negri, S., Nuzzo, L., Quarta, T., and Villani, A. V., 2000, A ground-penetrating radar survey for archaeological investigations in an urban area (Lecce, Italy): *Journal of Applied Geophysics*, **44**(1), 15-32, ISSN 0926-9851.
- Benson, A. K., 1995, Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities: *Journal of Applied Geophysics*, **33**(1-3), 177-193, ISSN 0926-9851.
- Benson, A. K., Frederickson, C., and Mustoe, N. B., 1991, Ground penetrating radar, electrical resistivity, soil and water quality studies integrated to determine the source(s) and geometry of hydrocarbon contamination at a site in north-central Arizona: *Proceedings of the 27th symposium on engineering geology and geotechnical engineering*, 31-38.
- Benson, A. K., and Mustoe, N. B., 1998, Integration of electrical resistivity, ground-penetrating radar, and very low-frequency electromagnetic induction surveys to help map groundwater contamination produced by hydrocarbons leaking from underground storage tanks: *Environmental Geosciences Journal*, **5**(2), 61-67.
- Capozzoli, L., and Rizzo, E., 2017, Combined NDT techniques in civil engineering applications: Laboratory and real test: *Construction and Building Materials*, **154**, 1139-1150.
- de Cassia Silva Bacha, D., Santos, S., de Alcantara Mendes, R., et al., 2021, Evaluation of the contamination of the soil and water of an open dump in the Amazon Region, Brazil: *Environmental Earth Sciences*, **80**(3), 113.
- Degenhardt, Jr., J. J., Giardino, J. R., and Junck, M. B., 2003, GPR survey of a lobate rock glacier in Yankee Boy Basin, Colorado, USA: *Geological Society, London, Special Publications*, **211**, 167-179.
- Dentith, M., and Mudge, S. T., 2014, *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*: Cambridge University Press.
- Doolittle, J. A., Jenkinson, B., Hopkins, D., Ulmer, M., and Tuttle, W., 2006, Hydrogeological investigations with ground penetrating radar (GPR): Estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse textured soils: *Geoderma*, **131**(3-4), 317-329, ISSN 0016-7061.
- Emam, A. E., Lethy, A., Radwan Ali, M., and Awad, A., 2021, Archaeological investigation and hazard assessment using magnetic, ground penetrating radar, and GPS tools at Dahshour Area, Giza, Egypt: *Frontiers in Earth Science*, **9**, 437.
- Ernstson, K., and Kirsch, R., 2006, *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*: Springer.
- Ibraheem, I. M., Ergers, R. B., and Tezkan, B., 2021, Archaeogeophysical exploration in Neuss-Norf, Germany using electrical resistivity tomography and magnetic data: *Near Surface Geophysics*, **19**(5), 603-623.
- James, M., and Nobes, D. C., 2015, Time lapse characterization of leachate flow using electromagnetics and ground penetrating radar: *Near-Surface Asia Pacific Conference, Waikoloa, Hawaii, 7-10 July 2015*, 211-214.
- Kirsch, R., and Yaramanci, U., 2009, *Geoelectrical Methods, in Groundwater Geophysics*: Springer, 85-117.
- Kleanthis, S., Papadopoulos, N., and Cantoro, G., 2016, Shallow off-shore archaeological prospection with 3-D electrical resistivity tomography: The case of Olous (Modern Elounda), Greece: *Remote Sensing*, **8**(11), 897.
- Loke, M. H., and Lane, Jr., J. W., 2004, Inversion of data from electrical resistivity imaging surveys in water-covered areas: *Exploration Geophysics*, **35**(4), 266-271.
- Modin, I. N., Shevnin, V. A., Bobatchev, A. A., Bolshakov, D. K., Leonov, D. A., and Vladov, M. L., 1997, Investigations of oil pollution with electrical prospecting methods: 3rd EEGS Meeting, cp-95, European Association of Geoscientists and Engineers.
- Naguyen, F., Garambois, S., Jongmans, D., Pirard, E., Loke, M. H., 2012, Image processing of 2D resistivity data for imaging

- faults: *Journal of Applied Geophysics*, **57**(4), 260-277.
- Neal, A., 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-Science Review*, **66**(3-4), 261-330.
- Oldenburg, D. W., and Li, Y., 2005, Inversion for Applied Geophysics: A Tutorial: *Near-Surface Geophysics*, 89-150.
- Parnow, S., Bizhani, H., and Zarei, M., 2020, Application of ground penetrating radar (GPR) to discover water table: The 19th Iranian geophysical conference.
- Redman, D., Parkin, G. W., and Annan, A. P., 2000, Borehole GPR measurement of soil water content during an infiltration experiment: Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, **4084**, 501-505.
- Reyes-López, J. A., Ramírez-Hernández, J., Lázaro-Mancilla, O., Carreón-Diazconti, C., and Garrido, M. M., 2008, Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in México: *Waste Management*, **28**, Supplement 1(2-3), S33-S39, ISSN 0956-053X.
- Reynolds, J. M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*: John Wiley & Sons, Chichester, 418-459.
- Reynolds, J. M., 2011, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd edition: John Wiley & Sons.
- Riwayat, A. I., et al., 2018, Application of electrical resistivity method (ERM) in groundwater exploration: *Journal of Physics: Conference Series*, **995** 012094.
- Sana, H., Taborik, P., Valenta, J., Bhat, F. A., Flašar, J., Štěpančíková, P., and Khwaja, N. A., 2021, Detecting active faults in intramountain basins using electrical resistivity tomography: A focus on Kashmir Basin, NW Himalaya: *Journal of Applied Geophysics*, **192**, 104395, ISSN 0926-9851.
- Shafri, H. Z. M., Abdullah, R. S., Roslee, M., and Muniandy, R., 2008, Optimization of ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pavement density data analysis: *IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, **3**, III-1326.
- Soldovieri, F., Catapano, I., Barone, P. M., et al., 2013, GPR estimation of the geometrical features of buried metallic targets in testing conditions: *Progress In Electromagnetics Research B*, **49**, 339-362.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. R. E., and Sheriff, R. E., 1990, *Applied Geophysics*: Cambridge University Press.
- Vaughan, C. J., 1986, Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations: *Geophysics*, **51**(3).
- Van Dam, R. L., Schlager, W., Dekkers, M. J., and Huisman, J. A., 2002, Iron oxides as a cause of GPR reflections: *Geophysics*, **67**(2), 536-545.
- Wahab, S., Saibi, H., and Mizunaga, H., 2021, Groundwater aquifer detection using the electrical resistivity method at Ito Campus, Kyushu University (Fukuoka, Japan): *Geoscience Letters*, **8**, 15.
- Wang, T., Chen, Y., Chen, C., et al., 2020, Application of cross-hole electrical resistivity tomography to groundwater contaminated remediation site: *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, **31**(5), 507-521.
- Wang, T. P., Chen, C. C., Tong, L. T., et al., 2015, Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study: *Journal of Applied Geophysics*, **121**, 21-30.
- Zhanxiang, H., Hu, Z., Gao, Y., et al., 2015, Field test of monitoring gas reservoir development using time-lapse continuous electromagnetic profile method: *Geophysics*, **80**(2), WA127-WA134

## Characterization of leachate flow using time lapse ground penetrating radar (GPR) and resistivity survey (case study: geophysical test site of Shahrood University of Technology)

Ali Aghaei Kordeshami <sup>1</sup>, Ali Reza Arab-Amiri <sup>2</sup>, Abolghasem Kamkar-Rouhani <sup>3</sup> and Hamid Bizhani <sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> MS.c. Student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>4</sup>MS.c. Student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: 29 September 2022, Accepted: 27 May 2022)

### Summary

This study investigates the efficiency of different geophysical methods for detecting contaminated zones as well as hidden pipes. There are a number of geophysical techniques that can be useful and beneficial for achieving these purposes. Ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity methods are the most useful approaches for identifying polluted areas and buried features, causing us to utilize such methods in the area. Although GPR and electrical resistivity methods are solely effective for mapping subsurface targets, the integration of these methods might provide us valuable information and valid outcomes. In this paper, electrical resistivity and GPR surveys are conducted and acquired data are modelled to investigate the pollution leakage in the ground. To achieve this aim, a polyethylene pipe with inlet and outlet valves is considered as a tank buried underground in the geophysical test site of Shahrood University of Technology.

In the first step of the study, the electrical properties of the empty pipe were measured and modelled using electrical resistivity and GPR methods. In the next step, the pipe was filled by the cupric sulfate solution and electrical measurements were performed again. In addition, the electrical properties were investigated by means of electrical resistivity and GPR methods in another area, sitting on alluvial soil, after and before injecting the cupric sulfate solution. It is worth mentioning that the measurements were performed after drying the surface which was humid due to the injection of cupric sulfate to avoid false conductivity on the ground. The designed profiles include four lines on a buried reservoir and five profiles on alluvial soil. However, the 2D modeling results and interpretation of the acquired data along with two (on the buried target) and three (on alluvial soil) survey lines are just presented in this paper. After collecting and interpreting the electrical resistivity and GPR data in the study area, the results are in the form of two-dimensional models of electrical resistivity and GPR cross sections, which have been obtained by use of RES2DINV and Prism2 softwares, respectively. The obtained results revealed that the electrical resistivity method enjoys a relatively good performance in detailed detection. It is also shown that the GPR method is not able to work properly in alluvial soils with high clay and it suffers from the unsuitability of the transmitter antenna with a frequency of 150 MHz and the destructive effect of moisture on the performance. Regarding the obtained outcomes and using electrical resistivity data, ground details such as polyethylene reservoir, loose and porous soil parts and separation of different areas according to the relative humidity in them have been revealed.

**Keywords:** Electrical resistivity, Ground Penetrating Radar (GPR), polyethylene pipe, two-dimensional modelling, geophysical test site of Shahrood University of Technology