

## تفسیر دو بُعدی داده‌های رادیومگنتوتلوریک به منظور به نقشه در آوردن آلودگی محل دفن

### زباله، مثالی از هلند

بابک عصارزادگان<sup>۱</sup>، بهروز اسکویی<sup>۲\*</sup> و مهرداد باستانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، بخش علوم زمین، دانشگاه ایسلا، سوئد

(دریافت: ۸۷/۱۲/۱۱، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۲۱)

#### چکیده

روش رادیومگنتوتلوریک (RMT)، یکی از روش‌های الکترومغناطیسی (EM) با چشمه مصنوعی است که به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی متغیر با زمان روی سطح زمین، به منظور به تصویر در آوردن رسانایی لایه‌های سطحی زمین به کار گرفته می‌شود. چشمه‌های استفاده شده در این روش، فرستنده‌های رادیویی هستند. باند بسامدی که در روش RMT از آن استفاده می‌شود، بین ۱۰-۲۵۰ کیلوهرتز است. با توجه به باند بسامدی بلند، عمق اکتشاف در این روش کم است و بیشتر در تحقیقات مهندسی کم عمق از این روش استفاده می‌شود.

در این مقاله، نتایج وارون‌سازی و تفسیر داده‌های RMT برداشت شده در منطقه کولندورن در کشور هلند، می‌شود. در نزدیکی شهر، در وسط یک دشت پوشیده شده با رسوبات دریایی دوره پلیوسن، از ۱۹۴۹ منطقه عمومی برای دفن زباله‌های مصرفی بوده است. آلودگی در منطقه‌ای نزدیک محل دفن زباله‌های مصرفی مشاهده شده است. همچنین آب آلوده به نواحی خارج از منطقه نشت کرده است. نمونه‌های گرفته شده از چاه شناسایی در منطقه نشان می‌دهد که آب آلوده شامل یون‌های آهن و کلرید است که وجود این یون‌ها باعث افزایش رسانایی شده است. مدل RMT در طول نیم‌رخ بیانگر رسانایی زیاد یک لایه در عمق ۲۵ تا ۳۰ متری بوده که با توجه به نتایج حاصل از داده‌های چاه در منطقه این لایه به منزله لایه آلوده معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رادیومگنتوتلوریک، کولندورن، آلودگی، وارون‌سازی، رسانایی الکتریکی

## 2D inversion of Radiomagnetotelluric data for mapping waste disposal sites, an example from The Netherlands

Assarzadegan, B.<sup>1</sup>, Oskooi, B.<sup>2</sup> and Bastani, M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M. Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden

(Received: 1 March 2009, Accepted: 13 Oct 2009)

#### Abstract

The Radio Magnetotelluric (RMT) method is one of the most widely used electromagnetic (EM) methods which employs artificial time varying electric and magnetic fields at the surface of the earth for imaging conductivity. The Radiomagnetotelluric method proposed by Goldstein and Strangway (1975) is based on measuring one set of horizontal electrical and perpendicular magnetic components. After that, many authors for example Sandberg and Hohmann (1982), Bartel and Jacobson (1987), Hughes and Carlson (1987), have studied this method in detail. The electromagnetic signals are emitted by powerful transmitters. The RMT method has a very broad spectrum that is defined here in the range of 10-250 kHz. With regard to this

high frequency band, exploration depth is low and is used in shallow engineering studies. In Iran, the application of geophysical methods for the study of waste sites has become increasingly important because of industrial development.

In Autumn 1998, the RMT study was carried out to recognize the pollution zone of a waste site in Collendoorn, in Netherlands. The measurements in the Netherlands are selected to show the RMT application of the EnviroMT system. Collendoorn is a small town situated in the north of the Overijssel province, in the Netherlands. Close to the town, in the middle of a flat area, covered by marine Pliocene sediments, lies the former waste disposal site that was used as a public dumping ground from 1949. Waste disposal dumps occurred in (wet) pits that had been dug for winning sand. In 1960 the site was declared as an official waste disposal site and from then the waste was dumped in dry areas of the site. The waste disposal has been discontinued since 1988 and the area has been used for recreational purposes. Pollution has been detected in the area near the waste disposal site and the leakage of polluted water has moved to regions outside the site. Samples taken from bore-holes in the area show that the polluted water contains iron and chloride ions causing the pollution plume to be electrically highly conductive.

A very long geophysical profile taken by the Netherlands Institute of Applied Geoscience (TNO) shows that the Tegelen formation which mainly consists of clay with a thickness of 2-7 m lies at a depth of approximately 35 m below the surface in the vicinity of Collendoorn. The formations above Tegelen are alternating sand and clay beds. Models of the RMT data across profiles, considerably express conductivity of the layer at 25-30 meters and with regards the data of bore-hole, this layer is estimated as a polluted layer.

The main geophysical objective was to detect and map the vertical and lateral extensions of the pollution plume. Based on the information provided by TNO four RMT survey lines situated at the eastern part of the dumpsite were planned for the survey. Lines 1, 2, and 3 were west-eastward and line 4 was south-northward.

Each line contains stations with 10 m spacing. We already know that the Collendoorn RMT data has a one-dimensional character, meaning that a 1D interpretation may work quite satisfactorily. The EnviroMT database software delivers two 1D inversion routines for on line data interpretation. The Least Singular Values Inversion (LSVI) program developed by Pedersen (1999) was employed for the interpretation of the Collendoorn data. The results of the inversion are presented as resistivity-depth sections. Each section shows a compilation of independent models at stations along a survey line. In order to show the similarities and differences in both directions of the induced currents, namely XY and YX directions, the results are represented in separate sections along a survey line. Resistivity-depth sections of the determinant data are also illustrated for comparison with the other two.

The first test field campaign, carried out in the Collendoorn dumpsite in the Netherlands revealed that the EnviroMT system operates satisfactorily. In spite of some minor hardware problems caused by heavy rainfall, the hardware functionality of the system is stable. The hardware-software and software-software interfacing work and the measured RMT data are correctly processed and properly stored. The data is reliable in that the estimated resistivities correlate with the true values directly measured in the bore-holes close the survey lines, indicating that the system is properly calibrated. The RMT data contains sufficient information to resolve four layers in the upper 25 m with a resistive-conductive- resistive-conductive sequence. The resistivity-depth sections from 1D inversion of the RMT data in the Collendoorn depicted the vertical boundaries and lateral extensions of the pollution plume and indicated that the pollution plume is extended more in the north at the eastern parts of the dumpsite. The resistivity of the pollution plume is so low that the RMT responses become insensitive to the conductivity

variations below 35 meters.

**Key words:** Collendoorn, inversion, pollution, radomagnetotelluric, resistivity, RMT

## ۱ مقدمه

زیرزمینی (نابز، ۱۹۹۴)، آشکارسازی رگه‌های آلودگی (باستانی، ۲۰۰۱) و محل‌های دفن زباله ناشناخته به اثبات رسیده است.

امروزه محل زباله‌های مدفون یکی از مسائل محیطی مهم و حیاتی است. برای مثال، در اروپا طی پنجاه سال گذشته نهشته‌های ریزدانه با فاضلاب خانه‌ها و دورریز ساختمان‌ها و نوع دیگری از محل دفن زباله‌ها که معمولاً خطرناک‌اند، مخلوط شده‌اند. برخی از آلودگی‌ها غیر قابل کنترل هستند و روی سطح زمین دارای هیچ گونه شواهدی نیستند. این آلودگی‌ها خطر بزرگی را به زمین تحمیل می‌کنند و بزرگ‌ترین عامل آلودگی آب‌های زیرزمینی هستند.

به‌طور کلی رسانایی منطقه آلودگی نسبت به قسمت‌های میزبان اطراف به علت افزایش یون‌های موجود در سیالات منفذی در اثر آلودگی خیلی بیشتر است. بنابراین فنون EM برای شناسایی محل‌های آلودگی بسیار مناسب هستند. اخیراً کاربردهایی در مورد آشکارسازی گسترش جانبی و عمودی این محل‌ها گزارش شده است (برکتولد و همکاران، ۱۹۹۲؛ زاچر و همکاران، ۱۹۹۶؛ پلرین و آلمباخ، ۱۹۹۷). مک‌نیل (۱۹۹۱) و فریشکت و همکاران (۱۹۹۱) اصول و مبانی روش‌های الکترومغناطیسی برای کاربردهای کم‌عمق عرضه کرده‌اند. نابز (۱۹۹۴) بازنگری دقیقی روی روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی و کاربردهای محیطی آن عملی ساخته است.

## ۲ آلودگی‌ها

به‌طور کلی، دو نوع آلاینده وجود دارد: آلاینده‌های آلی و

روش‌های الکترومغناطیسی به‌طور وسیع در اکتشاف ساختارهای زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها براساس پاسخ ساختارهای زیرسطحی نسبت به انتشار میدان‌های الکترومغناطیسی استوارند. اصول القای الکترومغناطیسی (EM) که با معادلات ماکسول بیان شده است، بیش از ۱۵۰ سال است که به‌خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربرد معادلات ماکسول را بسیاری از نویسندگان بازنگری و ساده کرده‌اند و با روش‌های EM در ژئوفیزیک اکتشافی تطبیق داده‌اند که در میان آنها تیکونو (۱۹۵۰)، کانپارد (۱۹۵۳)، کانتول (۱۹۶۰)، پیشرو هستند.

بررسی روش‌های الکترومغناطیسی در دو حوزه زمان و بسامد صورت می‌گیرد. روش‌های حوزه زمان معمولاً دارای چشمه مصنوعی هستند. دوقطبی‌های مغناطیسی افقی و خطوط جریان مستقیم نمونه‌ای از این چشمه‌ها هستند. در روش‌های حوزه بسامد، این نکته مدنظر است که نسبت میدان‌های الکتریکی افقی و میدان‌های مغناطیسی افقی توزیع عمودی رسانایی را داخل زمین مشخص می‌کند. میزان عمق بررسی بستگی به بسامد دارد. به‌عبارت‌دیگر، هرچه بسامد موج ارسالی کمتر باشد، عمق نفوذ بیشتر است.

در دهه گذشته فعالیت‌های زیادی در جهت استفاده از فنون EM در کاربردهای زیست‌محیطی با توجه به قدرت تفکیک زیاد و ارزان بودن آنها صورت گرفته است (جانسون و همکاران، ۲۰۰۱). کارایی روش‌های EM و بقیه فنون ژئوفیزیکی کم‌عمق (۰-۲۰۰ m) برای حل مشکلات باستان‌شناسی (زاچر و همکاران، ۱۹۹۶)، علوم مهندسی (هاچینسن و همکاران، ۲۰۰۱)، کشف آب‌های

دوقطبی الکتریکی افقی یا قائم جفت شده‌اند، بین سطح زمین و یون سپهر منتشر می‌شوند.

فرستنده‌های رادیویی به طور قابل ملاحظه در مقیاس جهانی توزیع گسترده‌ای یافته‌اند. در این تحقیق چشمه RMT فرستنده‌های رادیویی با توزیع تقریباً یکسان در سوئد و هلند بودند. برای مثال در شکل ۱ توزیع بسامدهای فرستنده‌های رادیویی در اواسط ماه نوامبر ۱۹۹۸ در هلند نشان داده شده است که جمعاً بسامدهای ۴۰ فرستنده که حداقل ۱۴dB بالاتر از نوفه میدان مغناطیسی افقی است، قابل کشف است.

در روش RMT اجزای میدان الکتریکی و مغناطیسی، حاصل از فرستنده‌های رادیویی در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. طراحی عملیات صحرائی RMT به صورت نمایی در شکل ۲ نشان داده شده است. در هر ایستگاه جعبه فیلتر آنالوگ (شماره ۱، AF box) در مرکز قرار داده می‌شود.

اجزای میدان الکتریکی افقی در دو جهت N-S و E-W با استفاده از دو جفت الکتروود فلزی اندازه‌گیری می‌شود، الکتروودها به شکل متقارن و با فاصله یکسان در دو جهت قرار می‌گیرند (شماره ۲). الکتروودها به یک تقویت‌کننده (شماره ۴) برای تقویت سیگنال و همچنین از راه کابل‌های مخصوص به جعبه AF (شماره ۳) متصل شده‌اند.

سه گیرنده مغناطیسی را روی یک سه پایه نصب می‌کنند (شماره ۵) و اجزای میدان مغناطیسی را اندازه می‌گیرند. دو گیرنده، افقی و موازی با الکتروودهای الکتریکی هستند و گیرنده سوم به شکل عمود و در جهت پایین است. سه پایه به راحتی قابل جابه‌جا شدن است و در نزدیکی جعبه AF قرار دارد و با یک کابل چند سیمی به جعبه متصل می‌شود (شماره ۶).

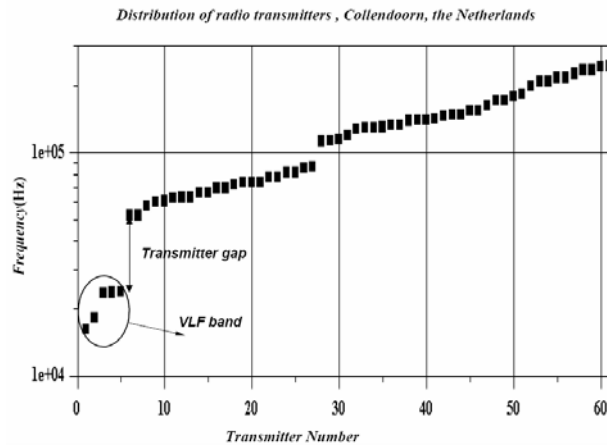
آلاینده‌های غیرآلی. آلودگی‌های آلی مربوط به هیدروکربن‌ها و ریزش‌های نفتی است. آلودگی‌های غیرآلی مربوط به مواد شیمیایی، فاضلاب ساختمان‌ها و محل دفن زباله‌های مصرفی هستند که در کنار آنها مفهوم رگه‌های آلودگی مطرح می‌شود. محل لکه‌های نفتی خود دارای مشخصه‌های خاصی هستند و از درجه اهمیت بالایی برخوردارند.

وقتی خاک مرطوب یا آب‌های زیرزمینی با مواد شیمیایی غیرآلی تماس پیدا می‌کنند، به سادگی به یون تبدیل می‌شوند و در مجموع یون‌های موجود در سیالات منفذی را افزایش می‌دهند و بنابراین رسانایی توده‌سنگ افزایش می‌یابد.

اثر آلودگی‌های آلی روی مقاومت زمین پیچیده‌تر است. به‌طور کلی، با توجه به اینکه نفت یک عایق الکتریکی است، مقاومت یک سنگ با جایگزین شدن یک مقدار نفت به جای سیالات منفذی باید افزایش پیدا کند، اما مشاهدات آزمایشگاهی در بسامد ۱Hz کاهش مقاومت را نشان می‌دهد. این کاهش را می‌توان به دو صورت توجیه کرد. نفت باعث جداکردن یون‌ها از سطح ذرات سنگ می‌شود، بنابراین تعداد یون‌ها در محلول زیاد می‌شود و یا ممکن است که هیدروکربن‌ها با فرایندهای زیست‌شیمیایی تبدیل به یون‌ها شوند. در این مقاله از روش رادیو مگنتوتلوریک (RMT) (Radio Magnetotelluric) برای اکتشاف آلودگی غیر آلی ناشی از محل دفن زباله در شهر کولندورن، هلند استفاده شده است.

### ۳ روش RMT

روش RMT یکی از روش‌های EM با چشمه مصنوعی است. منبع امواج در این روش امواج رادیویی، فرستنده‌های رادیویی هستند. سیگنال‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از فرستنده‌های قوی که با زمین به شکل

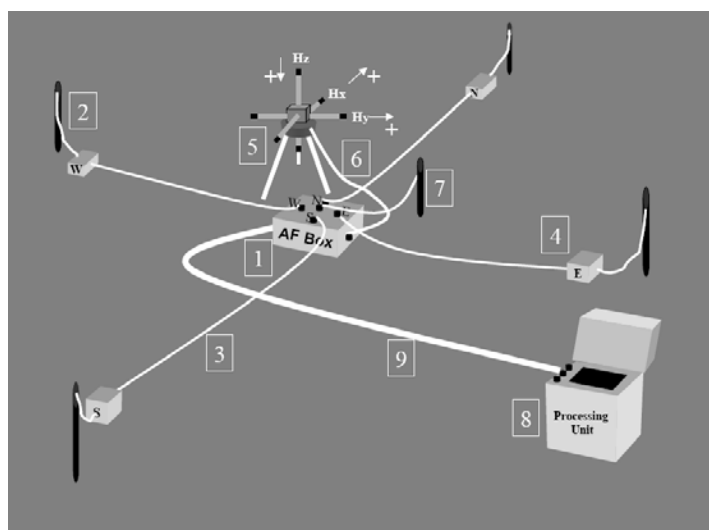


شکل ۱. یک مثال از توزیع فرستنده‌های رادیویی با باندهای بسامد متنوع در ایستگاه گیرنده در کولندورن (باستانی، ۲۰۰۱).

شکل یک بُعدی و دو بُعدی مدل‌سازی کرد که در این تحقیق وارون‌سازی دو بُعدی صورت گرفته است. پس از وارون‌سازی داده‌ها مقاطع مقاومت ویژه به دست می‌آید. با توجه به آنکه فاز و مقاومت ویژه رابطه عکس دارند، می‌توان با بررسی داده‌های فاز و مقاومت ویژه کیفیت وارون‌سازی را بررسی کرد، به این نحو که هرچه تطابق بیشتری بین این داده‌ها باشد می‌توان تفسیر دقیق‌تر و بهتری صورت داد. در این تحقیق با توجه به اینکه آب آلوده شامل یون‌های کلرید و آهن است، لایه آلوده رسانایی زیادی دارد.

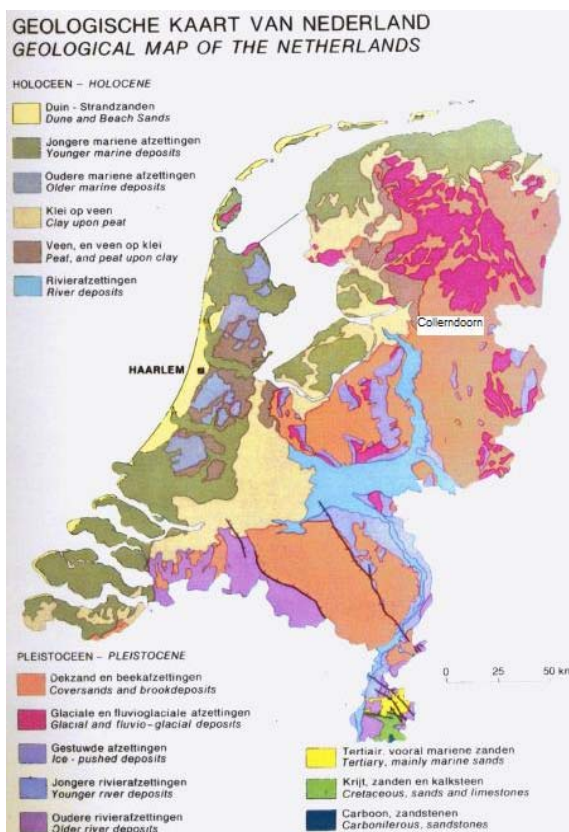
کابلی که متصل به الکتروود فلزی درون زمین قرار گرفته، در قسمت مرکزی جعبه AF است و مرجع ولتاژ صفر است (شماره ۷). بعد از اینکه سیگنال‌های آنالوگ در جعبه AF فیلتر شدند، از پنج کانال برای پردازش و تبدیل بعدی A/D به واحد مرکزی منتقل می‌شوند (شماره ۸) و در نهایت یک کابل چند سیمی به طول ۱۰ متر این دو واحد را به هم متصل می‌کند (شماره ۹). سیگنال آنالوگ پس از دیجیتال شدن (مبدل A/) در واحد پردازش آماده وارون‌سازی و تفسیر نهایی می‌شود.

پس از پردازش داده‌های RMT، می‌توان داده‌ها را به



شکل ۲. یک طرح نمایی از عملیات صحرائی به روش RMT (باستانی، ۲۰۰۱).

نظر گرفته شده است. در جدول ۱ تعداد ایستگاه‌های نیم‌رخ‌های متفاوت آورده شده است.



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی از هلند (برگرفته از سایت زمین‌شناسی هلند).

الگوریتم وارون‌سازی REBOCC را سیرین‌واراپرن و اگبرت (۲۰۰۰) برای وارون‌سازی دو بُعدی (2D) داده‌های مگنتوتلوریک عرضه کرده‌اند.

در این بررسی برای هر چهار نیم‌رخ برگردان داده‌های DET, TETM, TM, TE (اسکویی و همکاران، ۲۰۰۵) محاسبه شده که نتایج هر نیم‌رخ، در ادامه آمده است.

جدول ۱. مشخصات نیم‌رخ‌ها در منطقه کولندورن.

شماره پروفیل	تعداد ایستگاه
۱	۴۲
۲	۳۷
۳	۲۱
۴	۳۶

#### ۴- وارون‌سازی دو بُعدی (2D) داده‌های منطقه کولندورن

کولندورن (Collendoorn) شهری کوچک در شمال استان اووریجسل (Overijssel) در کشور هلند است. ناحیه مورد بررسی، منطقه‌ای عمومی با توپوگرافی هموار پوشیده از رسوبات دریایی دوره پلیوسن، در نزدیکی شهر کولندورن است که از ۱۹۴۹ محلی برای دفن زباله‌های مصرفی بوده است. از ۱۹۶۰ به بعد آن منطقه به منزله یک مرکز رسمی دفن زباله به حساب می‌آید. اما از ۱۹۸۸ این منطقه تبدیل به یک محل تفریحی شد. آلودگی در منطقه‌ای نزدیک محل دفن زباله‌های مصرفی مشاهده شد و همچنین آب آلوده به نواحی خارج از منطقه نشت کرد. نمونه‌های گرفته شده از چاه درون منطقه نشان می‌دهد که آب آلوده شامل یون‌های آهن و کلرید است و وجود این یون‌ها باعث افزایش رسانایی شده است. در شکل ۳، نقشه زمین‌شناسی هلند، برای نشان دادن موقعیت منطقه کولندورن آورده شده است.

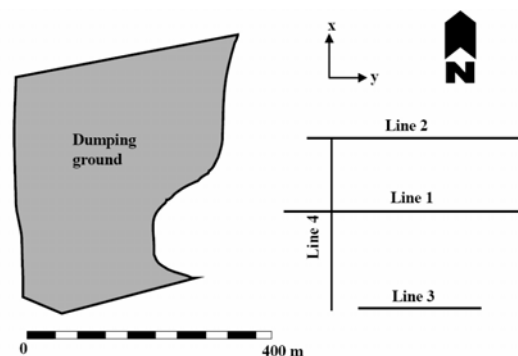
در این منطقه چهار نیم‌رخ برای برداشت داده به روش RMT طراحی شد. نیم‌رخ ۱ (با طول ۴۲۰ متر) طولانی‌ترین نیم‌رخ است و سراسر طول منطقه برداشت داده را پوشش می‌دهد. نیم‌رخ‌های ۲ و ۳ به موازات نیم‌رخ ۱ و در سمت شمال و جنوب آن واقع‌اند و طول هر دو آنها کوتاه‌تر از نیم‌رخ ۱ است.

نیم‌رخ ۴ به شکل عمود بر سایر نیم‌رخ‌ها است و نیم‌رخ‌های ۱ و ۲ را قطع می‌کند. نیم‌رخ ۴ به گونه‌ای است که سراسر عرض منطقه برداشت داده را پوشش می‌دهد و می‌توان نتایج نیم‌رخ‌های ۱، ۲ و ۳ را با نتایج نیم‌رخ ۴ تطبیق داد.

انتظار می‌رود در محل‌هایی که این نیم‌رخ سایر نیم‌رخ‌ها را قطع می‌کند به نتایج مشابهی دست یابیم. شمای کلی از نیم‌رخ‌های طراحی شده در شکل ۴ آورده شده است. در همه نیم‌رخ‌ها فاصله ایستگاه‌ها ۱۰ متر در

سطح بالایی لایه آلوده در این مقطع هم به‌خوبی قابل مشاهده است.

کم‌عمق‌ترین لایه مربوط به یک لایه مقاوم با ضخامت پنج متر است. لایه دوم که دارای مقاومت ویژه کمتر نسبت به لایه اول است با ضخامت ۱۵ متر و تقریباً تا عمق ۲۰ متری ادامه یافته است. لایه سوم دارای ضخامت ۱۰ متر است و تا بالای لایه آلوده در عمق ۳۰ متر کشیده شده است.



شکل ۴. شمالی کلی از منطقه برداشت داده در کولندورن (باستانی، ۲۰۰۱).

همان‌طور که در شکل‌های ۶- الف، ب، ج، د قابل مشاهده است به سمت شرق مقاومت ویژه لایه‌ها افزایش یافته است و به طور بارز در مقطع DET (شکل ۶- د) روند افزایش مقاومت در لایه‌های متفاوت از غرب به شرق کاملاً مشخص است و آلودگی به سمت شرق نفوذ کرده است. می‌توان از این مقاطع به این نتیجه رسید که لایه آلوده در مسیر نیم‌رخ ۲ از ایستگاه ۲ تا ایستگاه ۲۴ گسترش جانبی داشته است.

بررسی شکل ۷ مربوط به مقاطع DET, TETM, TE از نیم‌رخ ۳ وجود چهار لایه با مقاومت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. کم‌عمق‌ترین لایه مربوط به یک لایه مقاوم با ضخامت ۲ متر است. لایه دوم که دارای مقاومت ویژه کمتری نسبت به لایه اول است دارای ضخامت ۸ متری است و تقریباً تا عمق ۱۰ متری ادامه یافته است. لایه سوم دارای ضخامت ۱۰ متری است و تا بالای لایه آلوده، در عمق ۲۰ متری کشیده شده است.

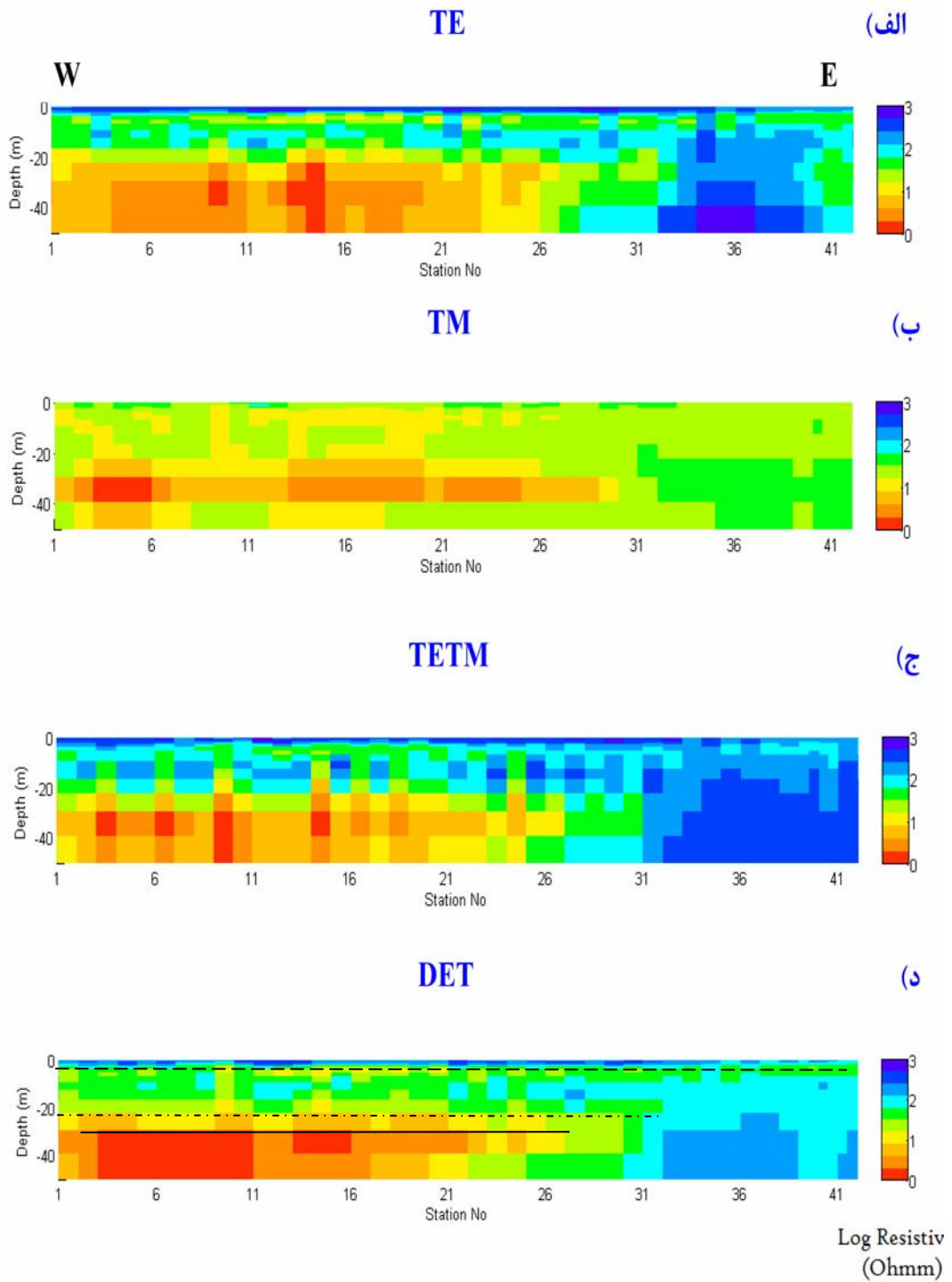
همان‌طور که در شکل‌های ۷- الف، ب، ج، د قابل مشاهده است به سمت شرق مقاومت ویژه لایه‌ها افزایش یافته است و به‌طور مشخص در مقطع TE (شکل ۷- الف) و TETM (شکل ۷- ج) تغییر مقاومت ویژه زیاد از ایستگاه‌های ۱۴ به بعد کاملاً مشهود است. می‌توان از این مقاطع به این نتیجه رسید که لایه آلوده در مسیر نیم‌رخ ۳ از ایستگاه ۲ تا ایستگاه ۱۳ گسترش جانبی داشته است، به گونه‌ای که لایه با مقاومت ویژه کم به شکل شیب‌دار تا

بررسی شکل ۵ مربوط به داده‌های DET, TETM, TE از نیم‌رخ ۱ وجود چهار لایه با مقاومت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. کم‌عمق‌ترین لایه مربوط به یک لایه مقاوم با ضخامت چهار متر است. لایه دوم که دارای مقاومت ویژه کمتر نسبت به لایه اول است با ضخامت ۱۱ متر و تقریباً تا عمق ۱۵ متر ادامه یافته است. لایه سوم دارای ضخامت ۵ متری است و تا بالای لایه آلوده، در عمق ۲۰ متری کشیده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۵- الف، ب، ج، د قابل مشاهده است. هرچه که به سمت شرق حرکت کرده‌ایم مقاومت لایه‌ها افزایش یافته است و به‌طور مشخص در مقاطع DET (شکل ۵- د) و TETM (شکل ۵- ج) تغییر مقاومت ویژه زیاد از ایستگاه‌های ۳۱ به بعد کاملاً مشهود است. می‌توان از این مقاطع به این نتیجه رسید که لایه آلوده در مسیر نیم‌رخ ۱ از ایستگاه ۱ تا ایستگاه ۲۵ گسترش جانبی داشته است.

بررسی شکل ۶ مربوط به داده‌های DET, TETM, TE از نیم‌رخ ۲ وجود چهار لایه با مقاومت ویژه‌های متفاوت را نشان می‌دهد که هرچه به سمت عمق می‌رویم مقاومت ویژه‌ها کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که در شکل‌های ۶- الف، ب، ج، د نشان داده شده است مقاطع TE و TETM شباهت زیادی به هم دارند، درحالی‌که مقطع DET تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به سایر مقاطع دارد. علی‌رغم اینکه مقطع TM تفکیک‌پذیری کمتری نسبت به سایر مقاطع دارد ولی

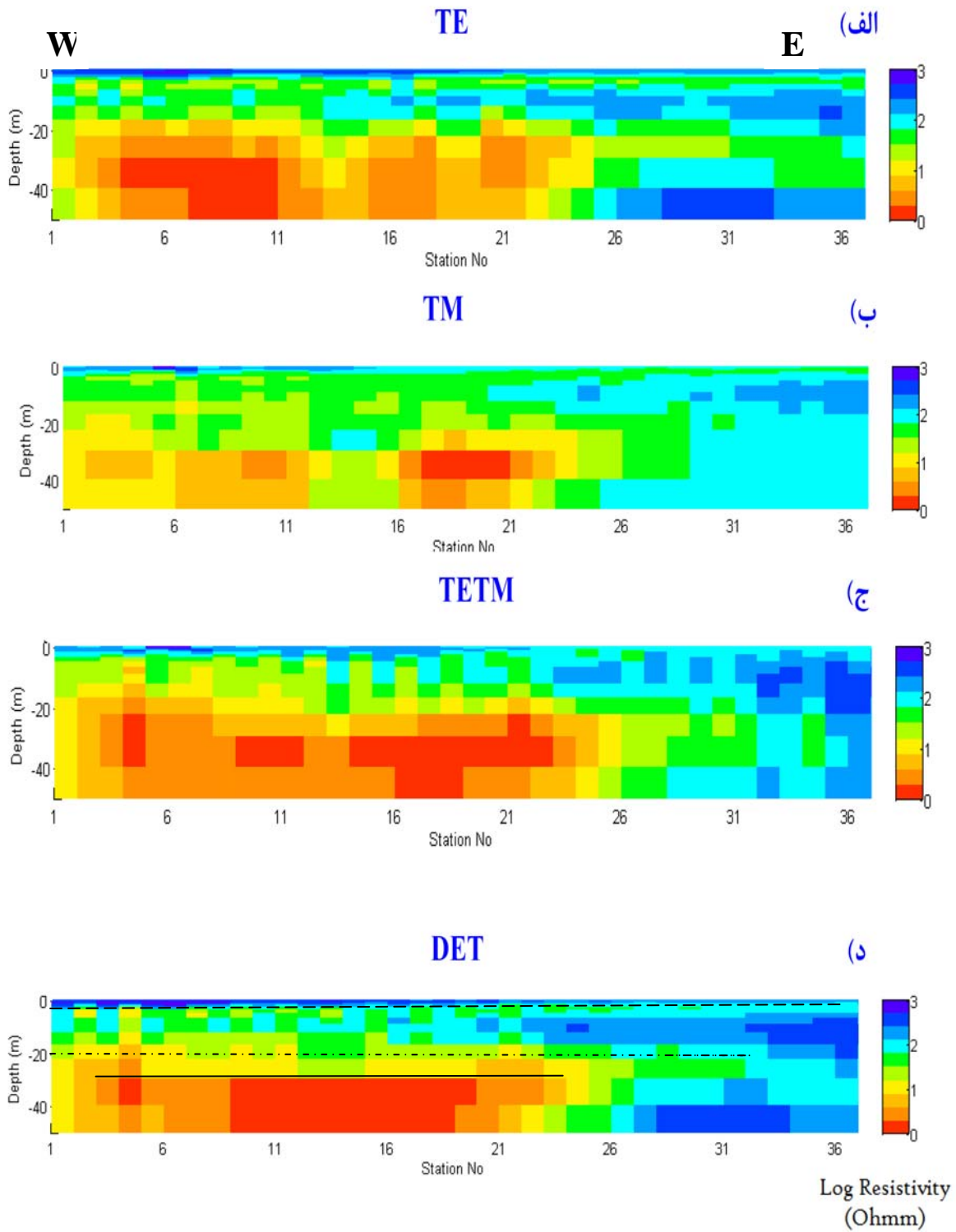


عمق ۴۰ متری در ایستگاه ۱۴ نفوذ کرده است.

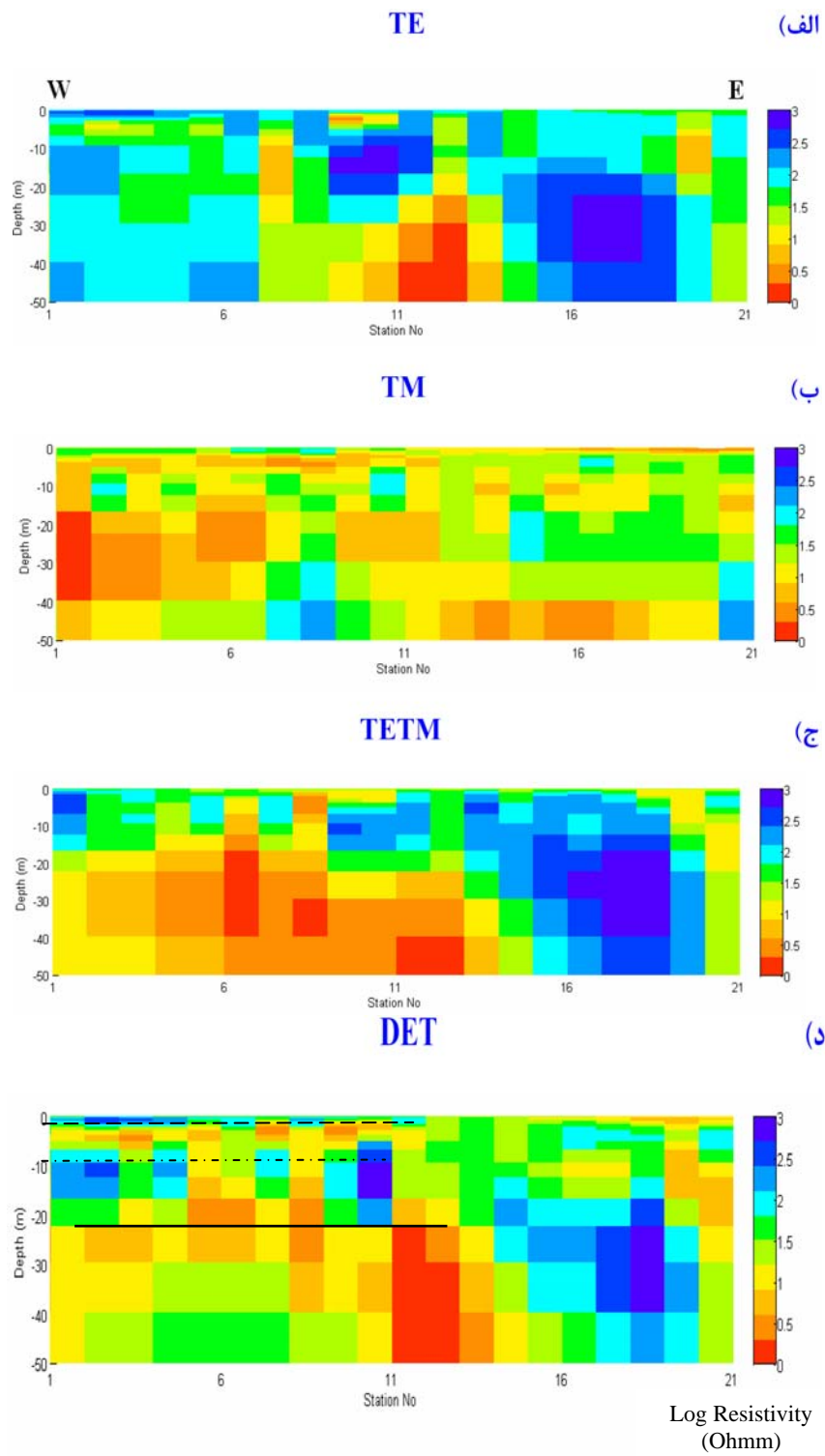


شکل ۵. مقطع مقاومت ویژه در امتداد نیم‌رخ ۱ (الف) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TE، (ب) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TM، (ج) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TETM، (د) مقطع مقاومت ویژه - عمق در حالت DET.





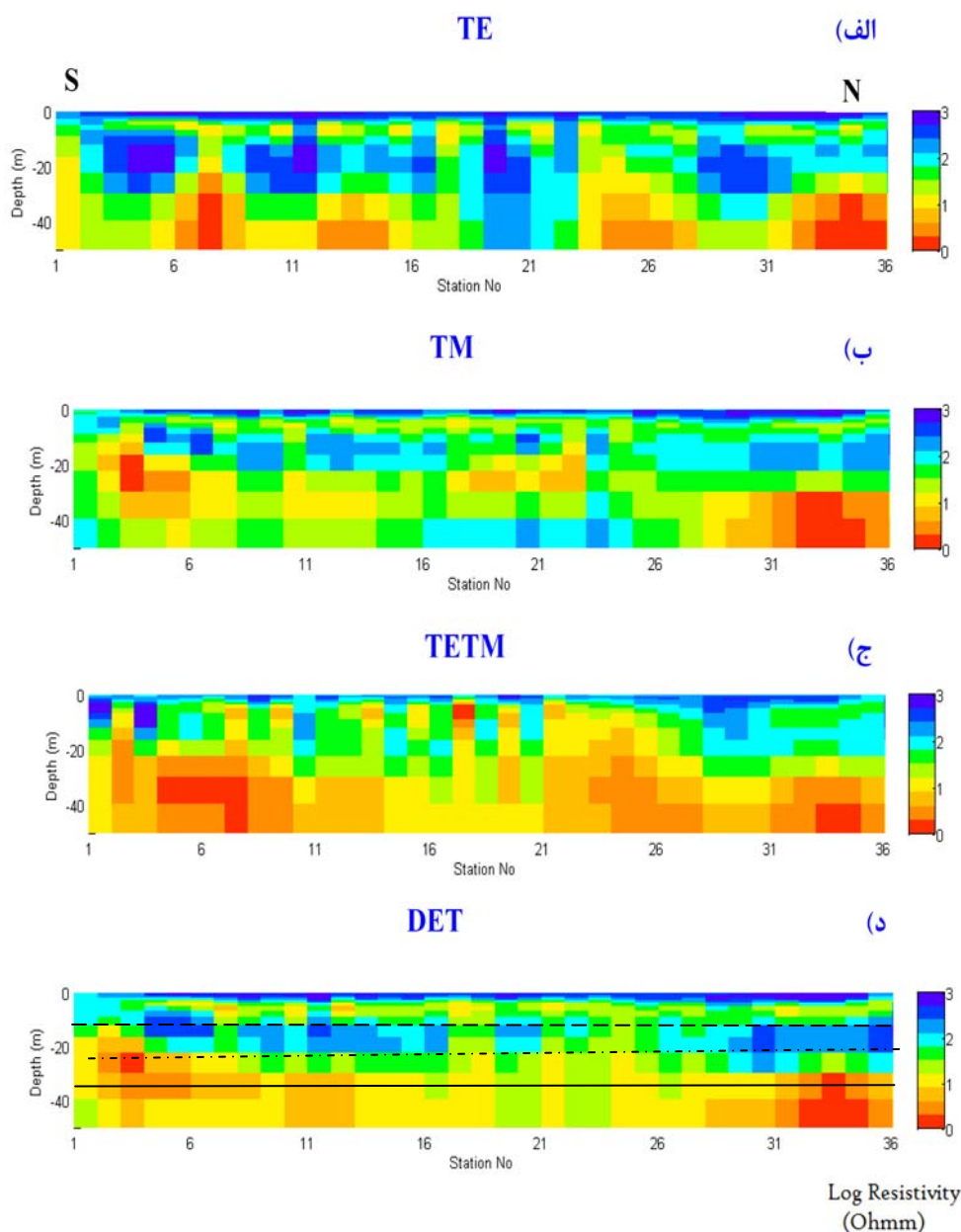
شکل ۶. مقطع مقاومت ویژه در امتداد نیم‌رخ ۲ الف) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TE، ج) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TETM، د) مقطع مقاومت ویژه - عمق در حالت DET.



شکل ۷. مقطع مقاومت ویژه در امتداد نیم‌رخ ۳ الف) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TE، ب) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TM، ج) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد TETM، د) مقطع مقاومت ویژه - عمق در حالت DET.

مقطع TETM تفکیک پذیری کمتری نسبت به سایر مقاطع دارد. کم عمق ترین لایه مربوط به یک لایه مقاوم با ضخامت دو تا چهار متر است. لایه دوم که مقاومت کمتر نسبت به لایه اول دارد و تا عمق ۱۰ متری ادامه یافته است. لایه سوم دارای ضخامت ۱۰ متری است و تا بالای لایه آلوده، در عمق ۲۰ متری کشیده شده است.

بررسی شکل ۸ مربوط به مقاطع  $TM$ ،  $DET$ ،  $TETM$ ،  $TE$  از نیم رخ ۴ وجود چهار لایه با مقاومت ویژه‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل های ۸- الف، ب، ج، د نشان داده شده است مقاطع  $DET$  و  $TM$  و شباهت زیادی به هم دارند، در مقطع  $TE$  هم لایه‌های یک، دو و سه به خوبی قابل تشخیص است. در حالی که



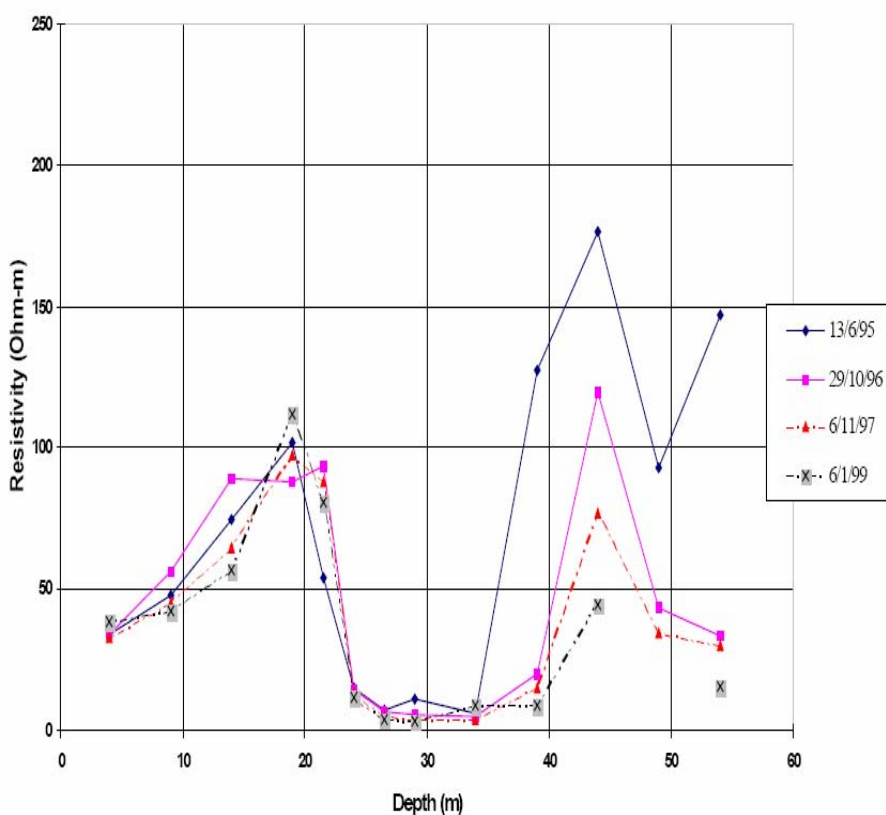
شکل ۸. مقطع مقاومت ویژه در امتداد نیم رخ ۴ الف) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد  $TM$ ، ب) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد  $TE$ ، ج) مقطع مقاومت ویژه - عمق در مد  $TETM$ ، د) مقطع مقاومت ویژه - عمق در حالت  $DET$

نیم‌رخ یک قرار دارد) نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها در چهار زمان متفاوت در طی سه و نیم سال صورت گرفته است. مقاومت در نواحی کم‌عمق مستقل از زمان است و در عمق‌های بین ۲۰ تا ۲۵ متری مقاومت ویژه به یک‌باره به مقدار ۱۰ اهم متر می‌رسد که در این محل نمونه‌های آلودگی مشخص شده است. مقاومت ویژه در عمق‌های بین ۲۵ تا ۳۴ متر تقریباً ثابت بوده است. اما در بخش‌های عمیق‌تر به‌طور کاملاً مشخص مقاومت ویژه کاهش پیدا کرده است و این واقعیت را بیان می‌کند که آلودگی به آهستگی به سمت قسمت‌های عمیق زمین در حال گسترش است. مقایسه بین وارون‌سازی دُبعدی داده‌های RMT در ایستگاه ۱۱ از نیم‌رخ یک با اندازه‌گیری‌های نشان داده شده در شکل ۹ تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های ۸- الف، ب، ج، د قابل مشاهده است، از جنوب به شمال روند لایه‌ها یکسان است با این تفاوت که به نظر می‌رسد به سمت شمال ضخامت لایه‌ها افزایش یافته است. می‌توان از این مقاطع به این نتیجه رسید که لایه آلوده در مسیر نیم‌رخ ۴ از ایستگاه دو تا ایستگاه آخر (ایستگاه ۳۶) گسترش جانبی داشته است. با توجه به این موضوع که این نیم‌رخ عمود بر سایر نیم‌رخ‌ها است، می‌توان چنین برداشت کرد که لایه آلوده سراسر عرض منطقه برداشت داده‌ها را فرا گرفته است. نتایج این نیم‌رخ تطبیق بسیار خوبی را با سایر نیم‌رخ‌ها نشان می‌دهد.

شکل ۹ اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه توسط TNO (موسسه علوم زمین کاربردی هلند) را در مشاهدات حاصل از چاه WP5 (در ۲۰ متری شمال ایستگاه ۱۱ از

WP5



شکل ۹. اندازه‌گیری‌های انجام شده در چاه WP5 (باستانی، ۲۰۰۱).

- Berkold, A., Schleicher, F., Strobl, P., Mathes, P. and Durlusser, H., 1992, *Möglichkeiten und Grenzen des VLF-R Verfahrens im Ingenieur/Umweltbereich*, Munchener Geophys. Mitteilungen, **6**, 65-88.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. *Geophysics*, **8**, 605-635.
- Cantwell, T., 1960, Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signal. Ph.D. thesis. *Geology and Geophysics*, Massachusetts Institute of technology.
- Frischknecht, F. C., Labson, V. F., Spies, B. R. and Anderson, W. L., 1991, Profiling methods using small sources, in M.N. Nabighian (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. **2**, SEG, 105-270.
- Hutchinson, Peter J., Barta, Laura, S., *Geophysical application to solid waste Analysis*, Proceedings of the sixteenth International Conference on Solid Waste and Management, Philadelphia, pa. USA. December 10-13, 2000, ISSN: 1091-804.
- Johnson, C. D., Lane, J. W., Jr., Williams, J. H., and Haeni, F. P., 2001, Application of geophysical methods to delineate contamination in fractured rock at the University of Connecticut landfill, Storrs, connecticut: in Symposium on the Application of Geophysics to engineering and Environmental Problems, Denver, Colorado, March 4-7, 2001, Proceedings.
- McNeill, J. D., 1991, Advances in electromagnetic methods for groundwater studies. *Geoexploration*, Vol. **27**, 65-80.
- Nobes, D. C., 1994, Troubled waters: environmental applications of electrical and electromagnetic methods. extended abstract, 12th workshop on electromagnetic induction in the earth, Brest, 125-158.
- Oskooi, B., Pederson, L., Smirnov, M., Arnason, K., Eysteisson, H. and Manzella, A., 2005, The deep geothermal structure of Mid-Atlantic Ridge deduced from MT data in SW Iceland. *PHYSICS OF THE EARTH AND PLANETARY INTERIORS*, V150 P 183-195.
- Pellerin, L. and Alumbaugh, D. L., 1997, Tools for electromagnetic investigation for the shallow subsurface. *Leading Edge*, Vol. **16**, 1631-1641.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, **65**, 791-803.
- Tikonov, A. N., 1950, On determining electrical

## ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات

هدف از این تحقیق، اکتشاف آلودگی‌های حاصل از زباله‌های مصرفی در شهر کولندورن بوده است. در این مطالعه داده‌های برداشت شده از چهار پروفیل در نزدیکی محل دفن زباله‌ها توسط نرم‌افزار REBOCC، وارون‌سازی دو بُعدی شده است.

از بررسی‌های صورت گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که لایه آلوده دارای مقاومت ویژه کمتر از ۱۰ اهم متر بوده است. مدل نهایی یک زمین چهار لایه با مقاومت ویژه‌های متفاوت را نشان می‌دهد، که هرچه به سمت عمق حرکت کرده مقاومت ویژه کاهش یافته است. لایه آلوده، در مناطق گوناگون تا عمقهای ۲۰ تا ۲۵ متر کشیده شده است. نتایج از نیم‌رخ ۴، نشان می‌دهد که لایه آلوده سراسر عرض منطقه را فرا گرفته است. با در نظر گرفتن این موضوع که در روش RMT اندازه‌گیری‌ها در باند بسامدی بلند صورت می‌گیرد و عمق نفوذ کم است، وجود این لایه آلوده، که دارای مقاومت کم است، و همچنین لایه رسانایی رُسی که در زیر آن قرار دارد، باعث می‌شود که نتایج در عمق‌های زیادتر قابل اعتماد نباشند.

با توجه به مطالب فوق، می‌توان لایه آلوده را به شکل یک صفحه با ضخامت متغیر در نظر گرفت، در شمال و در اطراف نیم‌رخ ۲ ضخیم‌تر و به سمت جنوب در محل نیم‌رخ ۳ نازک می‌شود.

با توجه به اینکه روند آلودگی به سمت شمال است، برداشت داده‌ها در یک یا دو نیم‌رخ در شمال نیم‌رخ ۲ پیشنهاد می‌شود تا بتوان ابعاد پیشروی را بهتر به تصویر کشید.

## منابع

- Bastani, M., 2001, *EnviroMT-a New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System*. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Geophysics, presented at Uppsala University in 2001.

- characteristics of the deep layers of the earth's crust. *Doklady*, **73**, 281-285.
- Zacher, G., Tezkan, B., Neubauer, F. M., Hordt, A. and Muller, I., 1996a. Radiomagnetotellurics: a powerful tool for waste-site exploration. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **1**, 139-159.
- Zacher, G., Tezkan, B., Neubauer, F. M. and Ziknens, J., 1996b. Application of Radiomagnetotelluric to Archaeology-Reconstruction of a Monastery in Volkeroda (Thuringia). extended abstract, EEGS, Nantes, 212-215.