

## بررسی‌های مگنتوتلوریک و رادیومگنتوتلوریک، مثالی از جزیره میدسومار سوئد

بهروز اسکویی<sup>۱\*</sup> و آیدا هوشیارفاری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۱۲/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۰/۷/۱۹)

### چکیده

روش‌های الکترومغناطیسی، روش‌های ژئوفیزیکی قدرتمند و متداولی هستند که می‌توان آنها را در توصیف رسانایی الکتریکی مواد زمین به کار گرفت. داده‌های مگنتوتلوریک و رادیومگنتوتلوریک در سال ۲۰۰۰ در یک سایت در جزیره میدسومار، غرب استکلهم در کشور سوئد جمع‌آوری گردیده‌اند. این تحقیق تحت پوشش طرح انرژی بیکرا برای به‌نقشه‌درآوردن ساختارهای زیرسطحی عمق به روش‌های ژئوفیزیکی و حفاری چاه صورت گرفته است. این تحقیق، ترکیب داده‌های موجود این جزیره را مورد بررسی قرار داده است که شامل داده‌های RMT با قابلیت تشخیص ویژگی‌های سطحی‌ترین بخش پوسته و داده‌های MT که ویژگی‌های الکتریکی بخش‌های عمیق‌تر پوسته بالایی زمین است. نتایج وارون‌سازی داده‌های این سایت اندازه‌گیری به خوبی با اطلاعاتی که از چاه حفر شده تا عمق ۹۶۴ متری به‌دست آمده است، مطابقت می‌کند. اطلاعات چاه، وجود مواد رسانا در عمق ۹۰۰ متری و گسترش آنها در اعماق بیشتر را نشان می‌دهد. این لایه رسانا به وضوح با داده‌های MT این جزیره تایید شده است.

واژه‌های کلیدی: رادیومگنتوتلوریک، مگنتوتلوریک، مقاومت ویژه الکتریکی، میدسومار، رسانایی الکتریکی

## Magnetotelluric and Raiomagnetotelluric investigations, an example on Midsommar Island in Sweden

Oskooi, B.<sup>1</sup> and Hoshyarifar, I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 2 March 2009, Accepted: 11 Oct 2011)

### Abstract

Recent studies show that electromagnetic methods are robust and widespread geophysical methods that can be employed to delineate the electrical conductivity of earth materials. In this paper Magnetotelluric and Radio-magnetotelluric methods have been used to map the Earth's structures.

The Magnetotelluric (MT) method is a frequency-domain electromagnet (EM) sounding technique used to investigate the electrical structure of the earth's surface. The method exploits naturally existing EM fields as a signal source. The MT method has a wide range of applications, from shallow investigations (geotechnics, ground water, and environment) to moderate and deep target in exploration of natural resources (mineral, geothermal and petroleum) depending on frequency band used.

In general the Radio-magnetotelluric (RMT) uses the MT-principles by employing artificial transmitters far off the measuring site in the frequency range from about 10 kHz up to 300 kHz. This is called Controlled source RMT method. At the same time we can take the advantage of using signals from powerful communication transmitters for

submarines in the very low frequency range (VLF) from 10 to 30 kHz. In this study we used only the latter case.

Data were collected in year 2000 at one site located on Midsommar Island, west of Stockholm, Sweden. This work has been done under the coverage of Björkö Energy Project which has been designed to map the structure at depth with geophysical methods and by drilling. Combined data including RMT data which reflects the characteristics of the uppermost part of the earth and MT data reflecting the characteristics of the deeper parts of the earth's upper crust at the island are considered. Hence, a good coverage from surface to deeper part of the earth can be obtained.

For RMT measurements radio signals with frequency ranges from 15 to 30 kHz have been used while in MT method three bands have been applied with frequency ranges from 256 Hz to 8192 Hz, 8 Hz to 256 Hz, and 0.25 s to 8 Hz for band 1 to band 3, respectively. In some frequencies a weak correlation were observed due to the noisy data which were collected mostly from band 3. So these data were put aside and we placed more emphasis on the rest.

MT and RMT data, resulted from 1D inversion, had been processed in order to obtain resistivity variation with depth. As a result, electrical structures from upper parts of the crust to 3000 meters depth have been plotted for this site. RMT data are being used to evaluate the characteristics of structures from the surface to 200 meters depth, which demonstrate decrease in the electrical resistivity. This parameter increases down to 600 meters depth then there is a decline in the electrical resistivity in deeper parts. From 900 meters to 1300 meters, a conducting zone has been detected by using MT data.

Inversion results correlate perfectly with borehole data which had been drilled to 964 meters depth on the island. From the surface to 200 meter depth low electrical resistivity about 300 can be detected which interpreted as brackish water. From 200 meters to 670 meters the electrical resistivity increases to about 5000 and the lithology of this part indicates Jotnian sandstone with sharp boundary. From 670 meter to 900 meter the electrical resistivity exceeds. From 900 meters to 960 meters depth the electrical resistivity decreases to about 600 most probably due to the electrical nature of the brecciated quartz lithology at that depth. From this depth down to 1300 meter a conducting zone is detected probably due to the abundant fractures in rocks which contain fluids and the MT data confirms this by showing resistivity lows.

In regard to the frequency gap between MT and RMT data, it is suggested to combine another electromagnetic method such as, CSMT which data can be controlled better with less noisy data while filling this gap. Professor Laust Pedersen from Uppsala University is appreciated for providing the data to be reprocessed and reported.

**Key words:** Electrical conductivity, Electrical resistivity, Magnetotelluric, Midsommar Island, Radiomagnetotelluric.

## ۱ مقدمه

زیاد است که می‌توان با استفاده از آن، مرزهای مشخصی را تعیین کرد و به نقشه درآورد. روش‌های الکترومغناطیسی، روش‌هایی قدرتمند، چندمنظوره و گسترده هستند که با آنها می‌توان مقاومت ویژه الکتریکی مواد زمین را تعیین کرد. این روش‌ها براساس پاسخ

مقاومت ویژه الکتریکی در بیشتر مواد زمین در بازه‌ای از چند دهه اهم‌متر ( $\Omega m$ ) تا ده‌ها هزار اهم‌متر قرار دارد. بنابراین تفاوت زیادی در مقاومت ویژه بین ساختارهای زمین‌شناسی در همسایگی یکدیگر وجود دارد. در برخی مناطق تفاوت بین مقاومت ویژه الکتریکی مواد به قدری

میدسومار (Midsommar) واقع در جنوب غرب جزیره بیرکا (Bjorko) در دریاچه ملارن (Malaren) کشور سوئد می‌پردازد. داده‌های مورد استفاده در سال ۲۰۰۰ را نگارنده برداشت کرده است و این عملیات تحت پوشش پروژه انرژی بیرکا (Bjorko Energy Project) برای به نقشه درآوردن ساختارهای عمقی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی MT و RMT صورت گرفته است. برای اندازه‌گیری‌های RMT از سیگنال‌های رادیویی در بازه ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ هرتز و در اندازه‌گیری‌های MT از سه باند بسامدی که در جدول زیر آورده شده، استفاده شده است.

جدول ۱. بازه بسامدهای MT مورد استفاده در پروژه MT.

بسامد پایینی (هرتز)	بسامد بالایی (هرتز)	باند
۲۵۶	۸۱۹۲	۱
۸	۲۵۶	۲
۱/۴ s	۸	۳

در این بررسی، نتایج حاصل از وارون‌سازی یک‌بُعدی (ID inversion) ترکیب داده‌های مگنتوتلوریک و رادیومگنتوتلوریک آورده شده است که ساختار عمق را از نزدیکی سطح زمین تا عمق ۳۰۰۰ متر نشان می‌دهد.

**۳ وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌ها (ID-inversion)**  
به‌منظور تفسیر صحیح اندازه‌گیری‌های سطحی مولفه‌های میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی، نیاز به دانستن مفاهیم اولیه برهم‌کنش این میدان‌ها با زمین است. پدیده تولید و انتشار امواج الکترومغناطیسی در اواسط قرن نوزدهم بررسی شد. تحقیقات تجربی (مانند وارد و هممن، ۱۹۹۱)، نشان می‌دهند که همه پدیده‌های الکترومغناطیسی از معادلات ماکسول پیروی می‌کنند.

ساختارهای زیرسطحی نسبت به انتشار میدان‌های الکترومغناطیسی استوار هستند (اسکویی و همکاران، ۲۰۰۵).

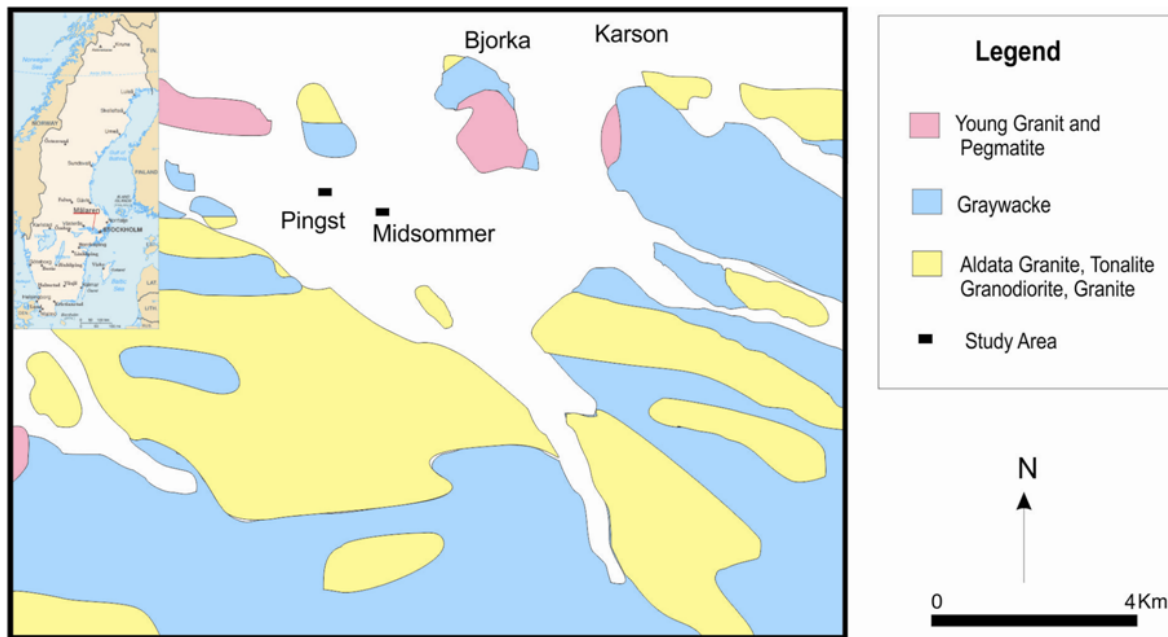
در دهه ۱۹۵۰، تیکونوف و کانبارد دریافتند که اگر تغییرات میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی در صورتی که به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شود می‌توان نسبت مختلطی به نام امپدانس را به‌دست آورد که نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی را به داخل زمین توضیح می‌دهد. این نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی به داخل زمین بستگی به دوره سیگنال‌های الکترومغناطیسی و رسانایی ساختارهای زیرزمینی دارد. میدان‌های الکترومغناطیسی که به‌طور طبیعی در زمین القا شده‌اند، طول موج‌هایی از حدود  $10^{-4}$  تا  $10^3$  ثانیه دارند. عمق زیادی که با استفاده از این روش می‌تواند به تصویر کشیده شود یکی از مزایای این روش در مقایسه با دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است که معمولاً در آنها پیشینه عمقی که می‌توان کاوش کرد با اندازه منبع موجود محدود می‌شود.

بررسی روش‌های الکترومغناطیسی در دو حوزه صورت می‌گیرد: روش‌های الکترومغناطیس در حوزه زمان و دیگری روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه بسامد.

در این تحقیق روش‌هایی که مورد بررسی قرار می‌گیرد در حوزه بسامد هستند. منشأ روش مگنتوتلوریک (MT) میدان‌های طبیعی است. دیگر روش‌های الکترومغناطیسی به منابع تغذیه قدرتمند و کنترل جریان نیاز دارند. از جمله این روش‌ها روش رادیومگنتوتلوریک (RMT) است که در این تحقیق نتایج و داده‌های آن نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲ منطقه مورد بررسی

این تحقیق به بررسی ساختار پوسته فوقانی زمین در جزیره



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (هنکل، ۲۰۰۰).

به دلیل اینکه در عمل زمین به شکل یک بُعدی واقعی وجود ندارد، از دترمینان (Determinant) تانسور امپدانس که به آن امپدانس موثر (Effective Impedance) نیز می‌گویند، استفاده می‌شود (لی و پدرسون، ۱۹۹۱). دترمینان تانسور امپدانس را با استفاده از عناصر ماتریس امپدانس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (4)$$

و مقاومت ویژه ظاهری و فاز برای زمین یک بُعدی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\rho_{ai} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_i|^2 \quad (5)$$

$$\varphi_{ai} = \text{pahse}(Z_i) \quad (6)$$

که  $i = xx, xy, yx, yy, \text{DET}$  و  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی در فضای آزاد و  $\text{DET}$  بیانگر دترمینان داده‌ها است.

وارون‌سازی یک بُعدی داده‌های دترمینان با استفاده

در مبحث القا موج روشن شده است که در مورد یک توزیع رسانایی کلی در زمین، مولفه‌های میدان الکتریکی افقی ( $E_x, E_y$ ) و به صورت زیر با مولفه‌های میدان مغناطیسی افقی ( $H_x, H_y$ ) مرتبط هستند (کانتول ۱۹۶۰):

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$Z$  یک ماتریس  $2 \times 2$  است که در حکم تانسور امپدانس مختلط شناخته می‌شود:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$Z$  به منزله تابع تبدیل مگنتوتلوریک (Magnetotelluric Transfer Function) شناخته می‌شود. برای یک زمین ۱D که هیچ جهت ترجیحی وجود ندارد، معادلات ماکسول، ساختار زیر را برای تانسور امپدانس به دست می‌دهد:

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ساختار رسانا تا عمق در حدود ۱۰ متر سپس ساختار مقاوم تا عمق ۲۰ متر و بعد از آن ساختار رسانا تا عمق ۴۰ متر و تا عمق ۸۰ متر ساختار مقاوم می‌شود و در نهایت ساختار رسانا تا عمق ۱۱۰ متر مشاهده می‌شود. از عمق ۱۵۰ متر به بعد تقریباً مقاومت ویژه ثابت می‌شود.

از آنجا داده‌های MT با بسامد باند ۳ دارای نوفه تشخیص داده شد نتایج وارون‌سازی با استفاده از داده RMT و داده‌های MT باند ۱ و ۲ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از عمق ۲۰۰ تا ۸۰۰ متر لایه‌ای مقاوم و به طرف عمق یک ناحیه انتقالی با ساختاری نسبتاً رسانا از عمق ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ متر وجود دارد.

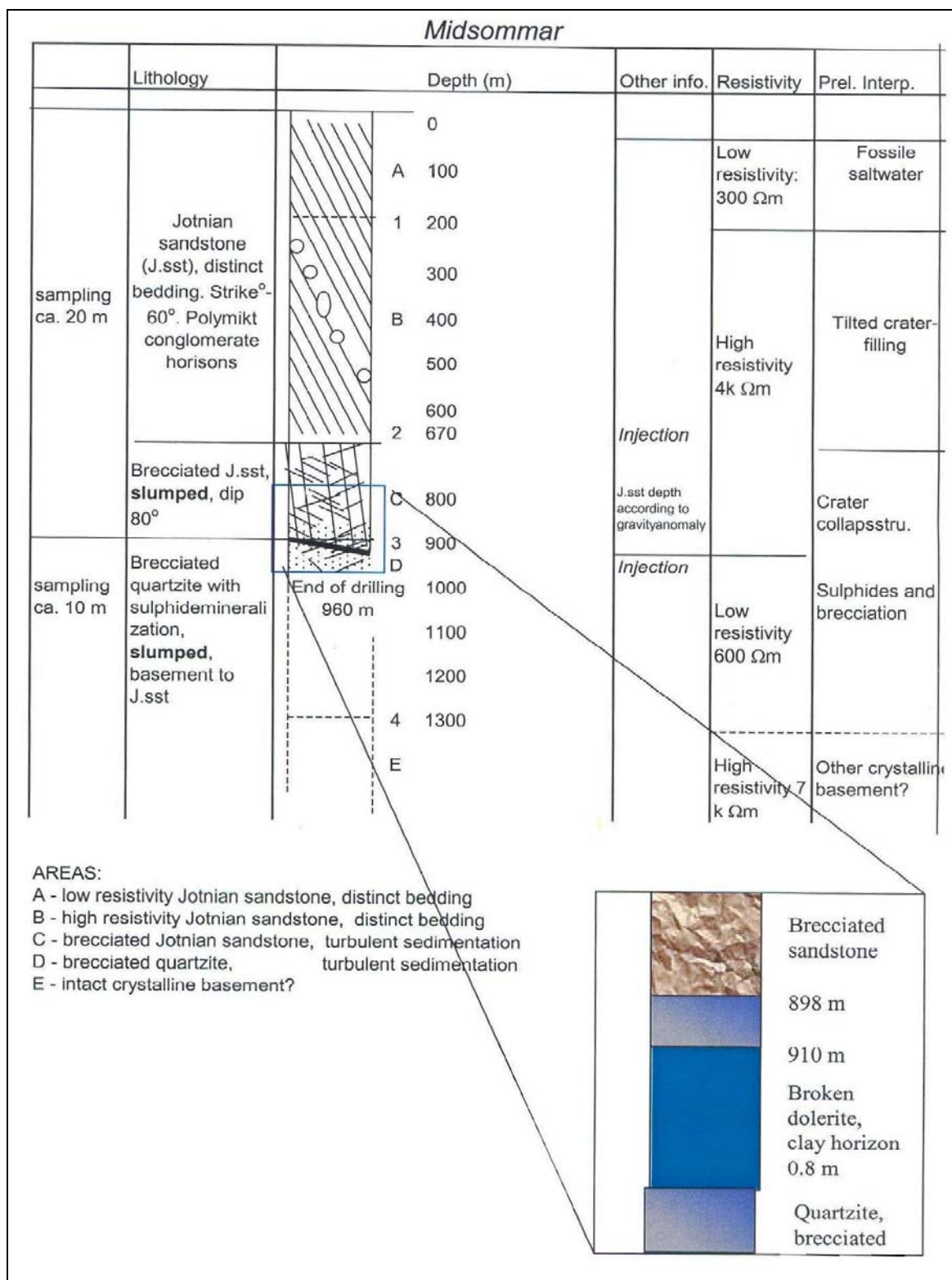
#### ۴ اطلاعات چاه موجود در جزیره میدسومار

از نتایج لاگ چاه موجود که در جزیره نیز برای تفسیر داده‌ها استفاده شد. مشخصات این لاگ به صورت زیر است. از سطح تا عمق ۲۰۰ متر مقاومت ویژه کم، در حدود  $300 \Omega m$ ، مشاهده می‌شود که تفسیر اولیه آن نشان از وجود آب شور فسیل‌شده دارد. از عمق ۲۰۰ متر تا ۶۷۰ متر، مقاومت ویژه در حدود  $4000 \Omega m$  افزایش می‌یابد و بنا بر اطلاعات موجود، از نظر چینه‌گذاری این قسمت ماسه‌سنگ با سن جوتنین (Jotnian) (ca. 1.2-1.5 Ga) است. مرز مشخص بستر وجود دارد و امتداد لایه‌ها ۶۰ درجه است. از عمق ۶۷۰ تا ۹۰۰ متر شیب لایه‌ها ۸۰ درجه می‌شود و مقاومت ویژه نیز افزایش می‌یابد. از عمق ۹۰۰ متر تا ۹۶۰ متر مقاومت ویژه کاهش می‌یابد، در حدود  $600 \Omega m$ ، و سنگ‌شناسی این قسمت، کوارتزهای برشی شده است.

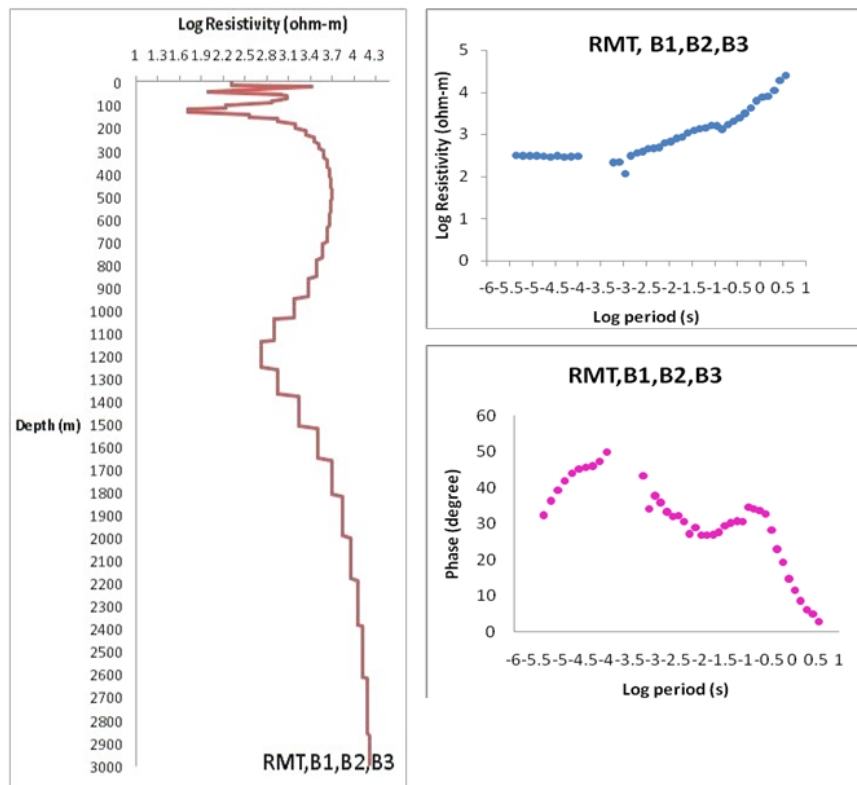
از رهیافت عرضه شده از سوی پدرسن (۲۰۰۴) صورت گرفته است. در این برنامه خطای میانگین مربعی کل (total mean-square error) مدل برآورده شده برای تعریف سطح برش (truncation level) استفاده می‌شود تا تعادل معقولی بین قدرت تفکیک و واریانس مدل به دست آید. این تعادل، بیشتر با داده‌ها تعیین می‌شود و به فرضیات بیشتری به جز اینکه جملات گرایست (bias terms) باید به خوبی برآورده شوند، نیاز ندارد. داده‌های MT به صورت مقاومت ویژه ظاهری و فازپاگیری (برحسب بسامد یا دوره تناوب) در حکم ورودی به برنامه برگردان پدرسن داده شده‌اند (اسکویی و پدرسن، ۲۰۰۵).

در شکل‌های ۳ تا ۵ نتایج وارون‌سازی با رسم مقاومت ویژه برحسب عمق، به همراه مقاومت ویژه و فاز برحسب بسامد آورده شده است. در شکل ۳ سونداژ داده MT شامل اطلاعاتی از سه باند بسامدی آن و نیز اطلاعات بسامدهای RMT نشان داده شده است. در سمت راست نمودار مقاومت ویژه و فاز برحسب دوره آورده شده است. دوره‌های کم مربوط به داده‌های RMT و دوره‌های بلندتر مربوط به داده‌های MT هستند. درست‌چپ نتایج وارون‌سازی با استفاده از همه این داده‌ها آورده شده است. از سطح تا عمقی در حدود ۲۵۰ متر مربوط به داده‌های RMT است، سپس تا عمق ۳۰۰۰ متر مربوط به داده‌های MT هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود از عمق ۲۰۰۰ متر به بعد مقاومت ویژه ثابت باقی می‌ماند.

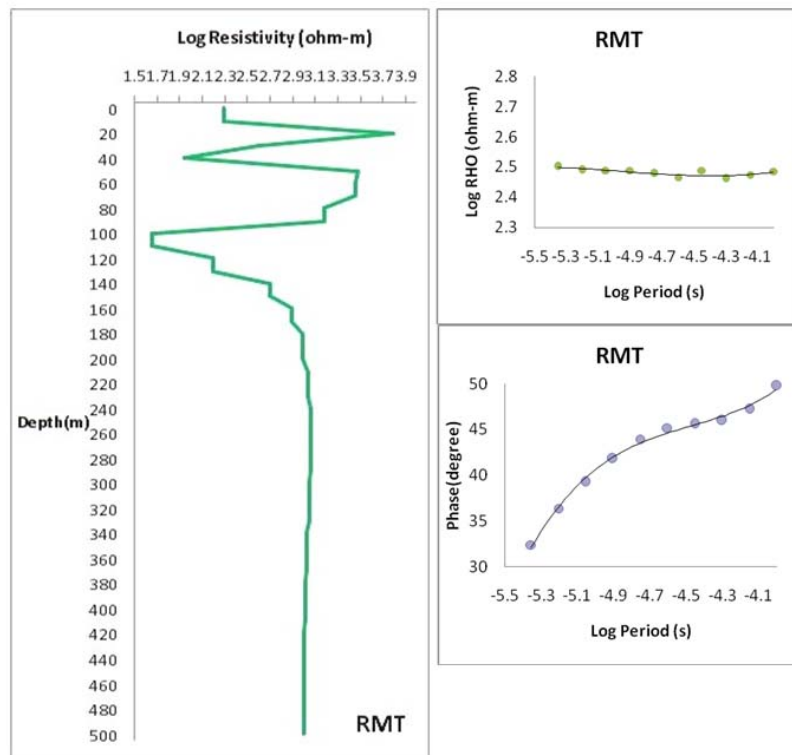
داده‌های RMT (بسامدهای زیاد) اطلاعات را از قسمت‌های بالای زیر سطح فراهم می‌کنند. نتایج وارون‌سازی داده‌های RMT به تنهایی در شکل ۴ آورده شده است. از سطح زمین به ترتیب



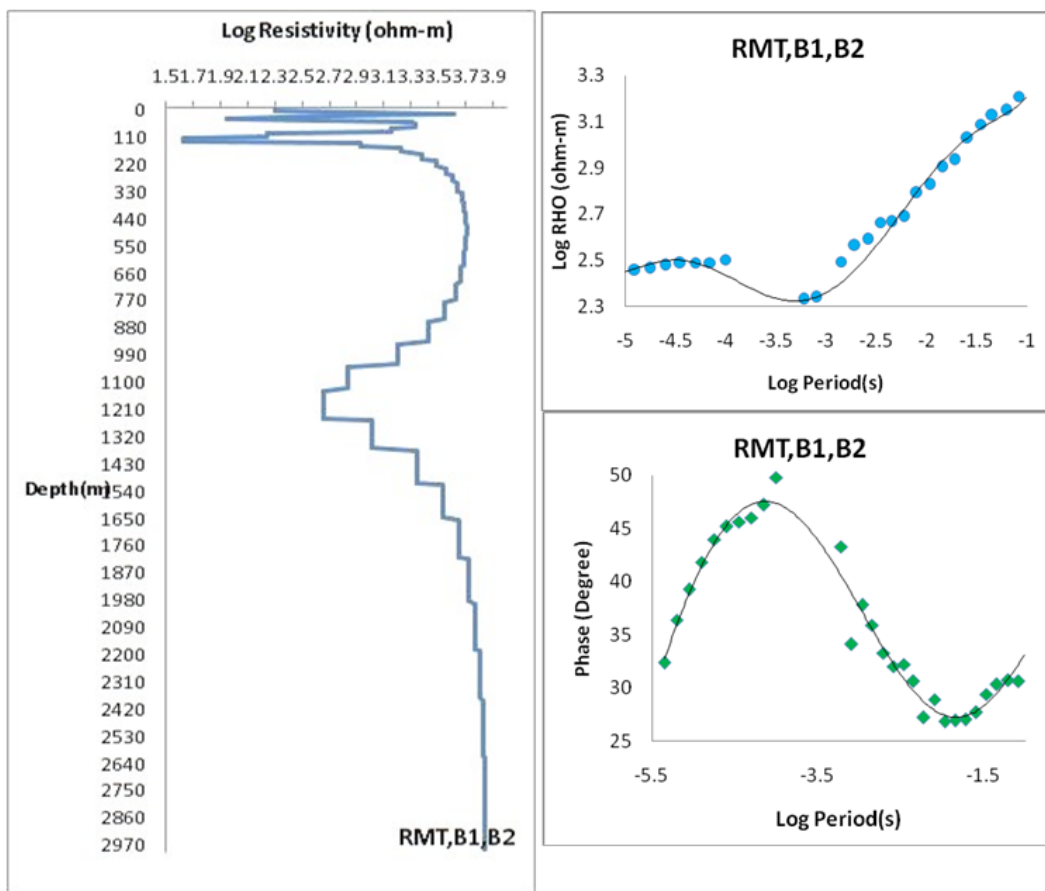
شکل ۲. توالی چینه‌نگاری چاه حفر شده در جزیره میدسومار (هنکل، ۲۰۰۰).



شکل ۳. به ترتیب از بالا به پایین مقاومت ویژه - فاز (سمت راست) و مدل یک بُعدی مقاومت ویژه بر حسب عمق برای سه باند بسامدی MT و یک باند بسامدی RMT (سمت چپ).



شکل ۴. به ترتیب از بالا به پایین مقاومت ویژه - فاز (سمت راست) و مدل یک بُعدی مقاومت ویژه بر حسب عمق برای داده های RMT (سمت چپ).



شکل ۵. به ترتیب از بالا به پایین مقاومت ویژه - فاز (سمت راست) و مدل یک بُعدی مقاومت ویژه بر حسب عمق برای داده‌های باندهای بسامدی او MT و باندهای بسامدی RMT (سمت چپ).

### ۶ نتیجه گیری

روش RMT به خاطر استفاده از بازه بسامدی بالا دارای مزیتی است که بیشتر ویژگی‌های بخش بالایی زیر سطح زمین را نشان می‌دهد و مزیت عمده روش مگنتوتلوریک (MT) با بازه بسامدی وسیع در مقایسه با سایر روش‌های الکترومغناطیسی، عمق نفوذ زیاد آن است که به همین دلیل از این روش اغلب در بررسی‌های عمیق (پوسته و گوشته بالایی) استفاده می‌شود. بنابراین با تفسیر داده‌های این دو روش با هم می‌توانیم مشخصات الکتریکی لایه‌های فوقانی پوسته زمین را از نزدیک سطح زمین تا اعماق قابل ملاحظه به دست آوریم.

بررسی‌های تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق حاصل از تفسیر داده‌های RMT و MT که مستقیماً از

وارون‌سازی یک بُعدی داده‌ها به دست آمده است، ساختار الکتریکی قسمت فوقانی پوسته زمین را در جزیره میدسومار تا گسترش عمق ۳۰۰۰ متری نشان می‌دهد. از سطح تا عمق ۲۰۰ متری مقاومت ویژه الکتریکی که با داده‌های RMT قابل ارزیابی است، کاهش می‌یابد، سپس این کمیت تا عمق ۶۰۰ متری افزایش می‌یابد و در اعماق بیشتر، کاهش مقاومت ویژه الکتریکی تشخیص داده می‌شود. از عمق حدود ۹۰۰ متر تا ۱۳۰۰ متر نیز یک زون کاملاً رسانا با کمک داده‌های MT قابل تشخیص است.

نتایج وارون‌سازی داده‌ها به خوبی با اطلاعات چاهی که تا عمق ۹۶۴ متری در جزیره حفر شده، همخوانی دارد. از سطح تا عمق ۲۰۰ متر با مقاومت ویژه کم در حدود  $300 \Omega m$  مشاهده می‌شود که تفسیر اولیه آن



آب‌های شور فسیل شده می‌تواند باشد. از عمق ۲۰۰ متر تا ۶۷۰ متر مقاومت‌ویژه افزایش می‌یابد، در حدود  $4000 \Omega m$ ، و سنگ‌شناسی این قسمت ماسه سنگ جوتیان (Jotnian) می‌باشد و مرز مشخصی قابل تشخیص است. از عمق ۶۷۰ تا ۹۰۰ متر مقاومت‌ویژه همچنان افزایش می‌یابد. از عمق ۹۰۰ متر تا ۹۶۰ متر مقاومت‌ویژه تا  $600 \Omega m$  کاهش می‌یابد و سنگ‌شناسی این قسمت کوارتزهای برشی شده است. از این عمق به بعد تا عمق حدود ۱۳۰۰ متر احتمالاً به دلیل شکستگی‌های فراوان سنگ‌ها که حاوی شاره هستند، از نظر الکتریکی یک زون رسانا تشخیص داده شده است که داده‌های مگنتوتلوریک هم این موضوع را تایید می‌کنند.

#### منابع

- Cantwell, T., 1960, Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signal, Ph.D. thesis, Geology and Geophysics, Massachusetts Institute of technology.
- Henkel, H., 2000, The Bjorko geothermal energy project, Norge Geologiske Undersokelse Bulletin.
- Li, X. and Pedersen, L. B., 1991, The electromagnetic response of an azimuthally anisotropic half space, *Geophysics*, **56**, 1462-1473.
- Pedersen, L. B., 2004, Determination of the regularization level of truncated singular-value decomposition inversion, The case of 1D inversion of MT data, *Geophys. Prosp.*, **52**, 261-270.
- Tikhonov, A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, *Doklady*, **73**, 281-285.
- Ward, S. H. and Hohmann, G. W., 1991, Electromagnetic Theory for Geophysical Applications, *Electromagnetic methods in applied geophysics*, **2**(3).