Archive of SID

تفسیر دوبعدی داده‌های VLF هوابرد

بهروز اسکوئی[۱]، احمد علی بهروزمند[۱]

[۱]مؤسسهٔ ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران (e-mail: abehrouz@ut.ac.ir)

(دریافت: ۸۵/۰۵/۲۳ ، پذیرش نهایی: ۸۶/۰۳/۱۶)

چکیده

داده‌های VLF اثرات دوبعدی قابل ملاحظه را نشان می‌دهند. وارون‌سازی دوبعدی مزایای متعددی را هنگامی که روی داده‌های پروفیل‌های VLF اعمال می‌شوند، بیان می‌کند. نخست آن‌که برآوردی کمی از هدایت‌ویژه‌های سنگ کف به دور از رساناها فراهم می‌کند. دوم این که، ارتباط بین قسمت‌های حقیقی و مجازی بردار تیپر، اطلاعاتی را در مورد عمق رساناها فراهم می‌کند. در این مقاله، یک مدل مصنوعی از یک همبری عمودی و یک پروفیل داده‌های VLF هوابرد مورد بحث قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: وارون‌سازی دوبعدی، تیپر، هدایت‌ویژه.

۱ مقدمه

روش VLF (باند بسامد بسیار کوتاه، ۱۴-۳۰ کیلوهرتز)، ابزار تهیهٔ نقشهٔ مقدماتی برای ساختارهای نزدیک سطح است. مطالعات ژئوفیزیکی با استفاده از سیگنال‌های رادیویی VLF در دههٔ ۱۹۶۰ در حکم ابزاری برای کاوش مواد رسانا آغاز شد (پال، ۱۹۶۵). کاربردهای زمین‌شناختی و آب‌شناختی روش‌های VLF را مک‌نیل و لابسون (۱۹۹۱) مورد بازنگری کلی قرار دادند.

روش‌های VLF براساس پارامترهای اندازه‌گیری‌شونده به دو مقوله تقسیم می‌شوند: در مقولهٔ اول (VLF-Z یا VLF-EM) که مورد توجه این بررسی است، فقط مؤلفه‌های میدان مغناطیسی را که به صورت بیضوی قطبیده شده‌اند اندازه‌گیری می‌کنند. برای راحتی کار، در اینجا آن‌را VLF می‌نامیم. در مقولهٔ دوم (VLF-R) یک مؤلفهٔ الکتریکی و یک مؤلفهٔ مغناطیسی افقی از میدان VLF (عموماً، با مؤلفهٔ الکتریکی عمود بر پروفیل و به موازات امتداد یک ساختار دوبعدی مفروض) اندازه‌گیری می‌شوند.

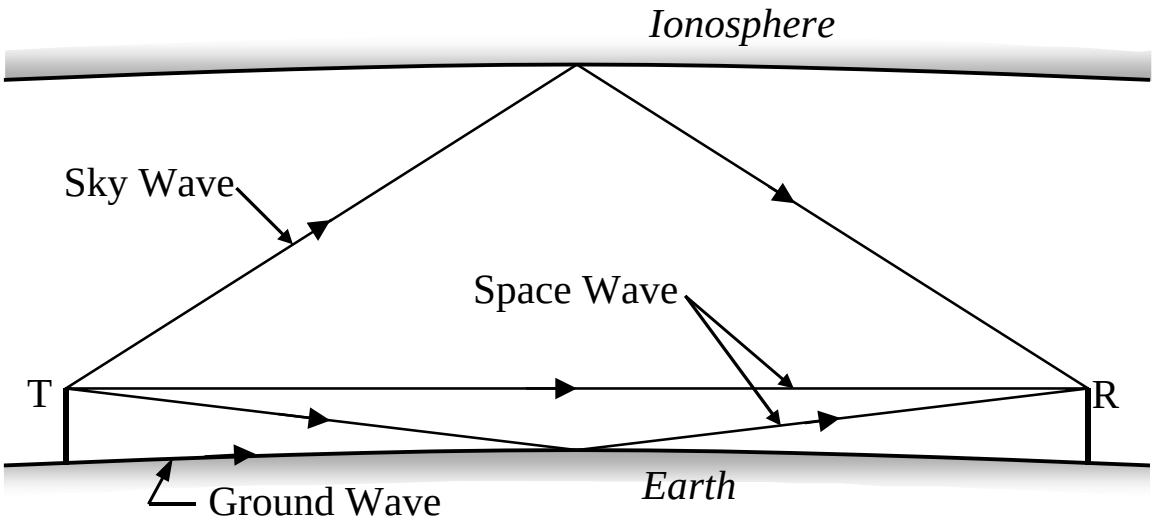
منبع اندازه‌گیری‌های VLF فرستنده‌های ثابت VLF مورد استفاده ارتباطات‌اند. فرستنده‌های VLF به طور نرمال به صورت دوقطبی‌های الکتریکی عمودی با قدرت ارسال از مرتبه ۱ مگاوات عمل می‌کنند. سیگنال‌های رادیویی، هم به صورت امواج زمینی و هم به صورت امواج بازتابی در درون موج‌بر ساخته‌شده با سطح جامد زمین و یون‌سپهر (یونسفر) ارسال می‌شوند (شکل ۱).

۲ داده‌های VLF

بررسی‌های VLF ابزاری سریع و قوی برای مطالعهٔ ساختارهای زمین‌شناسی تا بیشینه عمق حدود ۱۰۰ متر است (فیشر و همکاران، ۱۹۸۳). در طول دههٔ اخیر مؤلفان بسیاری مفیدبودن مدل‌سازی کمی داده‌های VLF را ابراز کرده‌اند، که از میان آنها می‌توان گورین و همکاران (۱۹۹۴)، بمیش (۱۹۹۴،۱۹۹۸،۲۰۰۰)، کایکونن و شارما (۱۹۹۸)، شارما و کایکونن (۱۹۹۸) و پرسن (۲۰۰۱) را نام برد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. انتشار سیگنال‌های رادیویی به صورت امواج زمینی و بازتابی با موج‌بر زمین- یون‌سپهر.

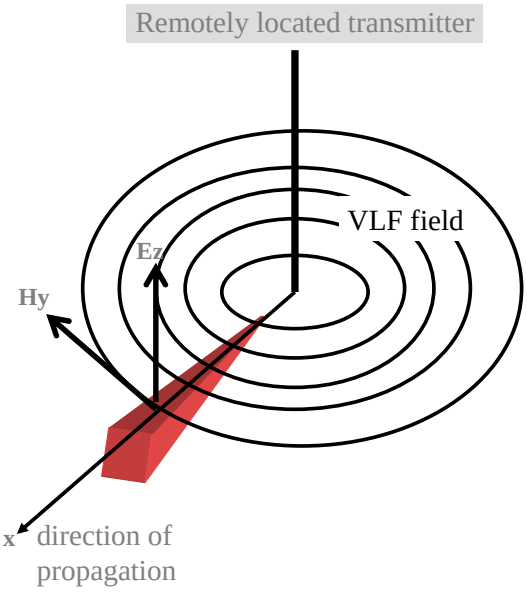
در فواصل به اندازهٔ کافی دور از فرستنده‌های VLF که میدان اولیه را می‌توان به صورت موج تخت در نظر گرفت (شکل ۲)، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی افقی و عمودی (H_x، H_y و H_z) با رابطه‌ای خطی به صورت زیر مرتبط می‌شوند:

$$H_z = AH_x + BH_y \qquad (۱)$$

که تیپر مختلط (A و B) فقط بستگی به ساختار زمین دارد و مستقل از مسیر فرستنده است (پدرسن و همکاران، ۱۹۹۴). در عمل ابزارهای VLF تجاری تنها مؤلفهٔ قائم و یک مؤلفهٔ افقی میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند. جهت x را به مثابه جهت راستای ساختار زمین‌شناسی و ترجیحاً در امتداد فاصله تا فرستندهٔ VLF مورد استفاده در نظر می‌گیریم. محور y مسیر پروفیل است. برای هر سایت، تابع تبدیل، که تیپر اسکالر، B_{sca}، خوانده می‌شود، به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$H_z = B_{sca} H_y \qquad (۲)$$

فقط زمانی که A=0 باشد، تیپر B مساوی با B_{sca} است. برای یک زمین دوبعدی (2D) تیپر در طول پروفیل تغییر می‌کند به طوری که قوی‌ترین گرادیان‌ها را در تباین‌های هدایت ویژه نشان می‌دهد. تیپر یک کمیت مختلط با



شکل ۲. میدان تخت ناشی از فرستندهٔ VLF دوردست.

قسمت‌های حقیقی و مجازی است، زیرا در یک بسامد مشخص، میدانهای افقی و عمودی به طور نرمال به واسطهٔ فرایند القای الکترومغناطیسی درون زمین، تاخیر زمانی دارند. میدان مغناطیسی افقی ترکیبی از میدان اولیه و میدان ثانویه (ناشی از القاء) است، در حالی که میدان مغناطیسی قائم کاملاً منشأ ثانویه دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

۳ تفسیر داده‌های VLF هوابرد

تفسیر کیفی داده‌های هوابرد توسط پدرسن و اسکوئی (۲۰۰۴) از طریق نمایش تفاوت بین نقشه‌های VLF استاندارد و تانسور VLF نشان داده شده است. به همین منظور کمیتی ناوردا از تیپر، که پیکر (peaker) خوانده می‌شود، به کار می‌رود. پیکر را پدرسن و همکاران (۱۹۹۴) به صورت دیورژانس افقی بردار تیپر تعریف می‌کنند:

$$p = \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial B}{\partial y} = \nabla_h .(A, B) \qquad (۳)$$

که به ویژه برای اهداف به نقشه درآوردن (mapping) مفید است، چون روی رسانا مقدار بیشینه دارد و تقریباً متناسب با میدان مغناطیسی عمودی از یک منبع به طور عمودی قطبیده است، با فرض اینکه هدایت ویژهٔ الکتریکی همان جسم متناسب با مغناطیس‌شوندگی‌اش باشد.

تفسیر کمی و مدلسازی داده‌های VLF را بمیش (۱۹۹۴) عملی ساخته است. او روشن ساخت که وارون‌سازی دوبعدی منظم داده‌های VLF تک بسامد می‌تواند اطلاعات جامعی دربارهٔ ساختار هدایت‌ویژهٔ الکتریکی زیرسطحی به دست دهد. به تازگی گروه‌های بیشتری با داده‌های VLF کار کرده‌اند. از این میان تبق و همکاران (۱۹۹۱)، چوتیو و همکاران (۱۹۹۶) و کایکونن و شارما (۲۰۰۱) روی تفسیر کمی داده‌های VLF تأکید ورزیده‌اند. تفسیر بمیش (۲۰۰۰) از داده‌های VLF دوبعدی نشان می‌دهد که هنگامی که داده‌های VLF تک بسامد با یک چگالی جانبی زیاد جمع‌آوری می‌شوند، می‌توان اندازه‌گیری‌ها را برای شناخت اجزای اصلی توزیع مقاومت ویژهٔ زیرسطحی به کار برد. پرسن (۲۰۰۱) مدل‌سازی مصنوعی و وارون‌سازی داده‌های VLF تک و چند بسامدی را برای ساختارهای دوبعدی ساده عملی ساخته است.

فرایندهای وارون‌سازی و مدل‌سازی نسبتاً ارزان که در اصل برای وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک (MT)، استانداردند همانطور که در مقاله‌های اسکوئی و پدرسن (۲۰۰۱ و ۲۰۰۴) نشان داده شده است، حتی روی داده‌های هوابرد با چگالی زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از داده‌های مصنوعی از ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی، مسئلهٔ قدرت تشخیص داده‌های VLF را نیز، پدرسن و اسکوئی (۲۰۰۴) و اسکوئی و پدرسن (۲۰۰۴ و ۲۰۰۶) مورد بررسی قرار داده‌اند.

در این مقاله، برای وارون‌سازی دوبعدی تیپر که از داده‌های VLF محاسبه شده است، رهیافت سیریپون واراپورن و ایگبرت (۲۰۰۰) استفاده شده است.

۴ وارون‌سازی دوبعدی داده‌های تیپر

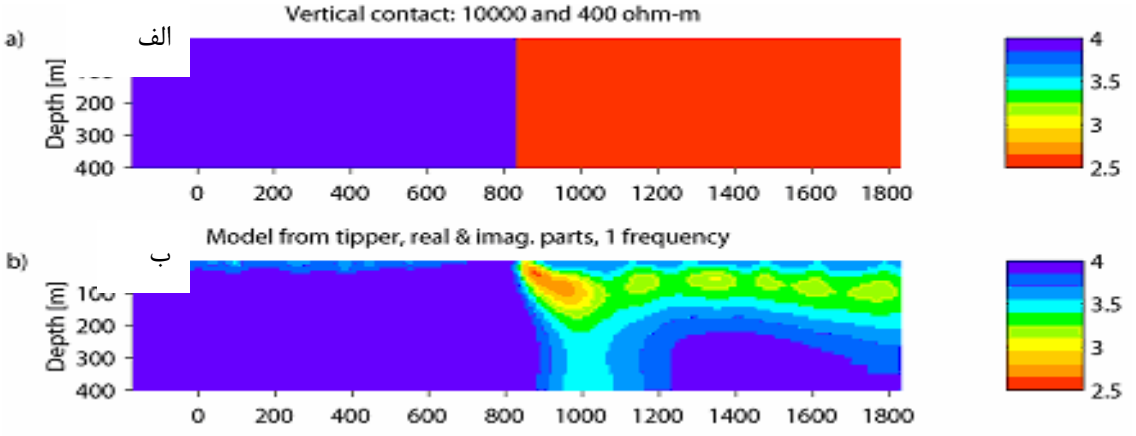
فقط تعداد اندکی برنامه برای وارون‌سازی داده‌های تیپر، بدون در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های میدان الکتریکی وجود دارد. رهیافت وارون‌سازی دو بعدی اکام (Occam) از دیگروت- هدلین و کانستبل (۱۹۹۰) قادر به برگرداندن داده‌های تیپر است. این رهیافت بسیار خوب کار می‌کند و در رسیدن به مدل هموار با بهترین برازش، پایدار است. اما با درنظرگرفتن مقدار زیاد دادهٔ مورد نیاز در مطالعات هوابرد، بسیار وقت‌گیر است. وارون‌سازی دوبعدی سیریپان‌واراپورن و ایگبرت (۲۰۰۰) که در اصل برای مطالعات مگنتوتلوریک (MT) عمیق طراحی شده است، ابزاری بسیار قوی برای مدل‌سازی کمی داده‌های VLF و TVLF فراهم می‌آورد.

۵ نتایج

مدلی مصنوعی به صورت یک همبری قائم (۴۰۰ اهم‌متر/۱۰۰۰۰ اهم‌متر) که برای آزمایش قدرت تفکیک رهیافت وارون‌سازی دوبعدی سیریپان‌واراپورن و ایگبرت

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. تأثیر به کارگیری هر دو بخش حقیقی و مجازی تیپر و نتایج حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌ها از یک همبری قائم (٤٠٠ اهم‌متر/ ١٠٠٠٠ اهم‌متر). الف) مدل همبری عمودی ب) مدل ناشی از وارون‌سازی قسمت‌های حقیقی و مجازی تیپر در بسامد ١٦ کیلوهرتز.

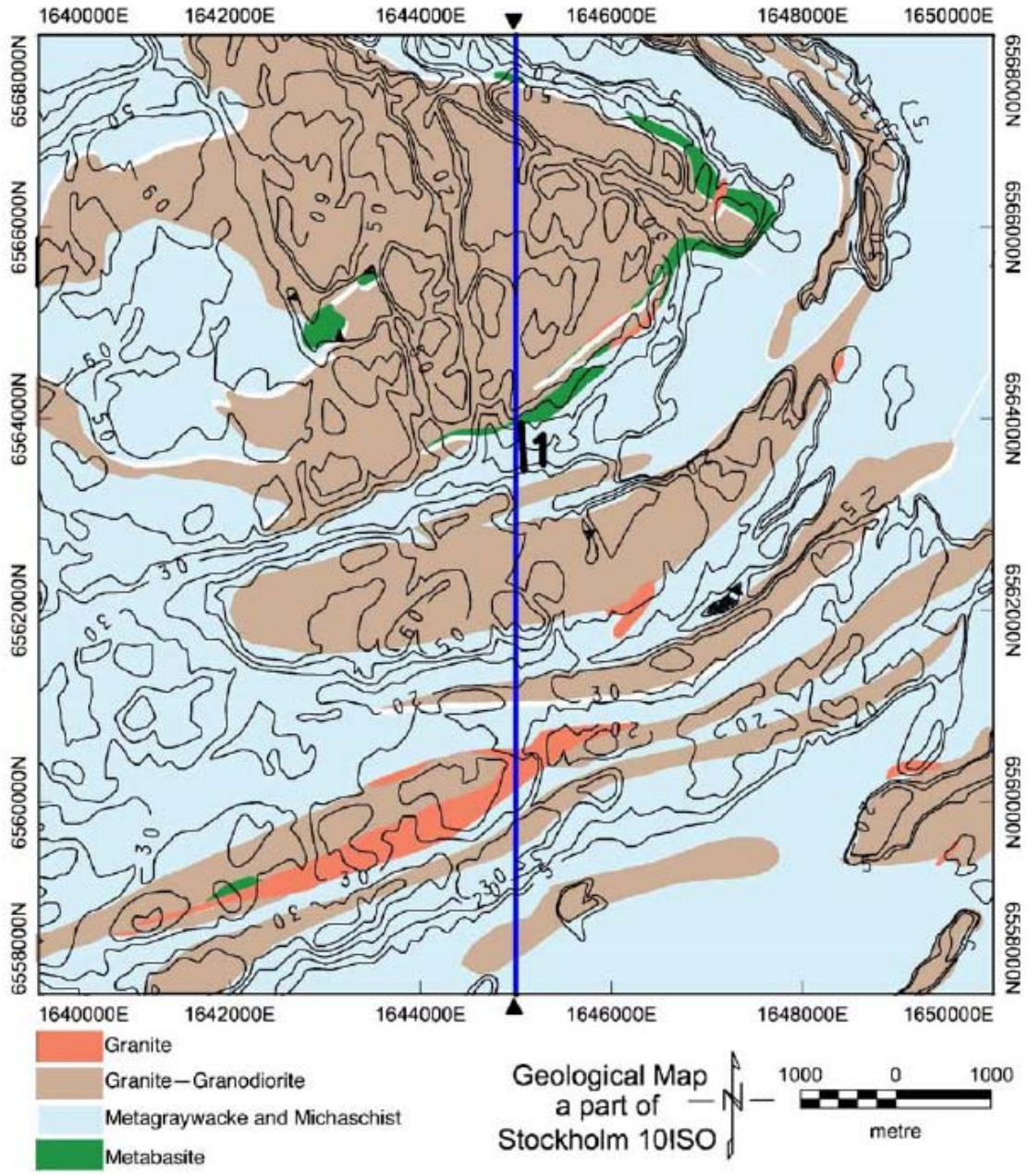
(۲۰۰۰) تهیه شده، در شکل (۳) نشان داده شده است. از یک تک بسامد ۱۶ کیلوهرتزی برای ایجاد داده‌های مصنوعی استفاده شده است. تأثیر به کارگیری هر دو بخش حقیقی و مجازی تیپر و نتایج حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌ها در شکل (۳ ب) نشان داده شده است. داده‌های VLF تک بسامد می‌توانند رساناها را به طور جانبی و همچنین در عمق به خوبی تشخیص دهند.

مطالعات VLF هوابرد با استفاده از سیگنال‌های تک بسامد از فرستنده‌های VLFدوردست، فن‌های سریعی برای تهیهٔ نقشه‌های مقاومت‌ویژهٔ زیرسطحی به ویژه در کشورهایی نظیر سوئد و کانادا هستند که رسوبات پوشانندهٔ سطحی نازکی دارند. به‌منظور نشان دادن توانایی روش VLF تک بسامد در تهیهٔ اطلاعات کمی مقاومت ویژهٔ زیرسطحی، نتایج وارون‌سازی دوبعدی داده‌های VLF هوابرد در طول یک پروفیل در منطقهٔ استکهلم شکل (۴) با ارتفاع پرواز ۷۰ متر و بسامد ۱۶ کیلوهرتز در شکل (۵) نشان داده شده است. با استفاده از سیگنال‌های فرستندهٔ راگبی (Rugby) واقع در انگلستان، داده‌های VLF، در طول خط پرواز با فاصلهٔ نمونه‌برداری حدود ۱۷ متر برداشت شده‌اند. خط پرواز به طول ۱۰ کیلومتر در مسیر N-S بوده که به خوبی با راستای ساختارهای عمدهٔ زمین‌شناسی ناحیه سازگار است (یعنی تقریبا عمود بر راستای $N60^{\circ}E$ ساختارها است). داده‌ها و نتایج حاصل از وارون‌سازی آنها در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. برای مقایسه، بخشی از نقشهٔ زمین‌شناسی در امتداد پروفیل در شکل (۵ الف) آمده است. قسمت‌های حقیقی و مجازی تیپر اسکالر و پاسخ‌های مدل در شکل (۵ ب) نشان داده شده‌اند و در نهایت، مقطع مقاومت‌ویژه- عمق حاصل از وارون‌سازی دوبعدی در شکل (۵ج) آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود توافق خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پاسخ‌های مدل وجود دارد. با توجه به شکل، دو رسانای عمده در فواصل ۴۰۰۰-۳۰۰۰ کیلومتر و ۶۰۰۰-۵۰۰۰ کیلومتر روی پروفیل مشاهده می‌شود که هر دو آنها با موقعیت دگرگونی‌های رسوبی موجود در منطقه سازگارند.

با یک سطح خطای (Error floor) ۰/۰۲ روی قسمت‌های حقیقی و مجازی تیپر، میانگین برازش داده‌ها به روش جذر میانگین مربعی (RMS) حدود ۱/۵ است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤. نقشهٔ زمین‌شناسی ناحیهٔ موردمطالعه واقع در منطقهٔ استکهلم به‌همراه پربندهای توپوگرافی. خط شمالی–جنوبی آبی‌رنگ معرف موقعیت پروفیل برداشت داده‌های VLF هوابرد می‌باشد.

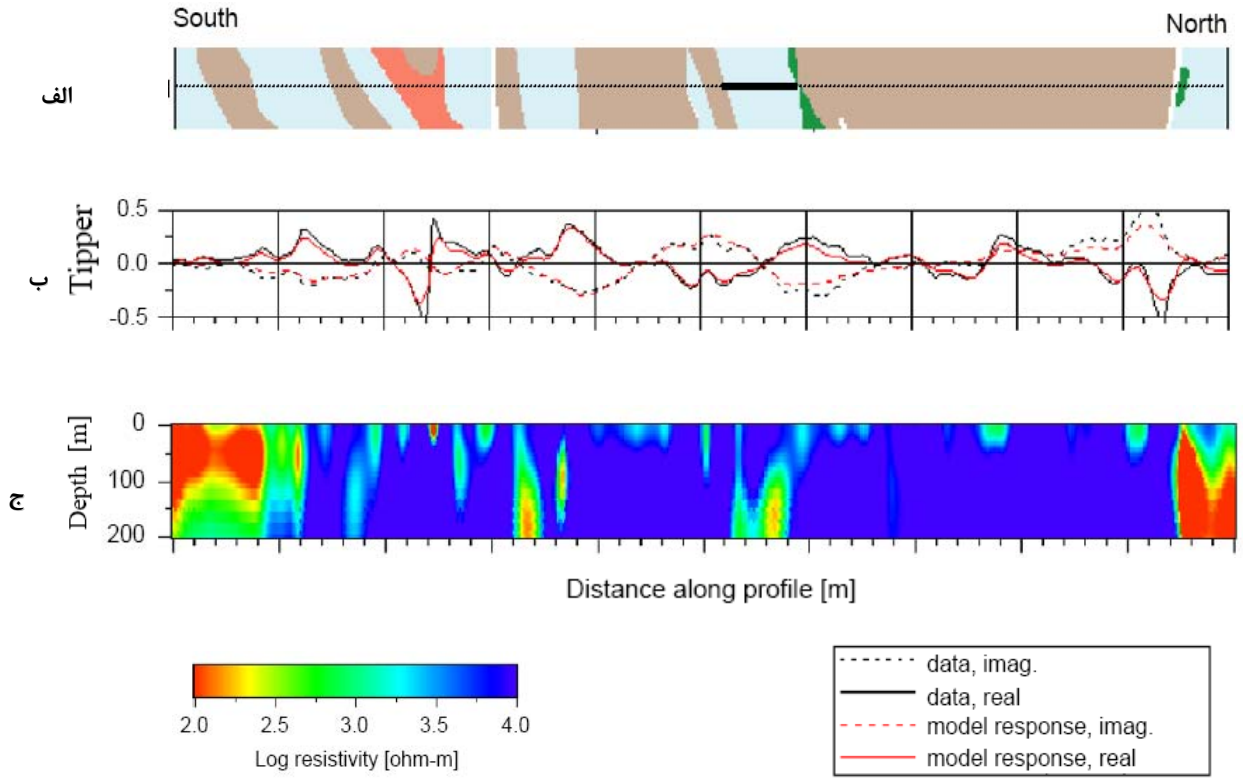
۶ نتیجه گیری و بحث

وارون‌سازی دوبعدی منظم روی داده‌های صحرایی و مصنوعی، برای بررسی مدل‌های گرفته‌شده از روش VLF استاندارد صورت گرفته است. در همین راستا نتیجه‌گیری می‌شود که وارون‌سازی همزمان قسمت‌های حقیقی و مجازی تیپر، مدل‌های با قدرت تفکیک جانبی عالی و حتی با قدرت تفکیک عمق بیشتر را، هنگام نفوذ امواج الکترومغناطیسی تخت به رساناهای بالاتر، فراهم می‌کند.

تفسیر آنومالی‌های VLF روی یک ساختار شامل واحدهای رسانا در یک زمینهٔ مقاوم، می‌تواند با استفاده از

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵. وارون‌سازی دوبعدی داده‌های صحرایی تیپر. الف) برشی از نقشهٔ زمین‌شناسی ناحیهٔ استکهلم در طول پروفیل. رنگ آبی نشانگر رسوب‌های دگرگونی رسانا و رنگ قهوه‌ای نشانگر گرانیت‌های مقاوم است. ب) برازش داده‌ها (data fit)، داده‌های هوابرد تهیه شده است. ج) مدل دوبعدی به دست آمده در آخرین تکرار.

دیگر روش‌ها نظیر DC ژئوالکتریک و اندازه‌گیری‌های رادیومغناطیسی در طول بعضی از پروفیل‌ها آزمایش و تکمیل شود. بنابراین به راحتی می‌توان به نتایج حاصل از بررسی VLF بزرگ‌مقیاس، برای به نقشه درآوردن مقاومت ویژهٔ الکتریکی و به ویژه تغییرات آن در چند ده متر بالایی پوشش رسوبی اتکا کرد.

منابع

Beamish, D., 1994, Two-dimensional, regularized inversion of VLF data. J. Appl. Geophys., **32**, 357- 374.

Beamish, D., 1998, Three- dimensional modeling of VLF data. J. Appl. Geophys., **39**, 63- 76.

Beamish, D., 2000, Quantitative 2D VLF data interpretation. J. Appl. Geophys., **45**, 33- 47.

Chouteau, M., Zhang, P. and Chapellier, D., 1996, Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering. Geophys. Prosp, **44**, 215- 232.

De Groot- Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, **55**, 1613-1624.

Fischer, G., Le Quang, B. V. and Muller, I., 1983, VLF ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures: Geophysical Prospecting **31**, 977- 991.

Guérin, R., Tabbagh, A. and Anderieux, P., 1994, Field and/or resistivity mapping in MT-VLF and implications for data processing. Geophysics, **59**, 1695- 1712.

Kaikkonen, P. and Sharma, S. P., 1998, 2D nonlinear joint inversion of VLF and VLF-R data using simulated annealing. J. Appl. Geophys., **39**, 155- 176.

Kaikkonen, P. and Sharma, S. P., 2001, 'Acomparison of performances of linearized and global nonlinear 2- D inversions of VLF and VLF- R electromagnetic data', Geophysics **66**, 462- 475.

www.SID.ir

Archive of SID

McNeill, J. D. and Labson, V. F., 1991, Geological mapping using VLF radio fields. In: Nabighian M. N. (ED.), Electromagnetic methods in applied geophysics, part B: Application. SEG, Tulsa, 521- 640.

Oskooi, B. and Pedersen L. B., 2001, Processing and Interpretation of tensor VLF Data. A report to the Geological Survey of Sweden.

Oskooi, B. and Pedersen, L. B., 2004, Comparison between VLF and RMT methods. A combined tool for mapping conductivity changes in the sedimentary cover. J. Appl. Geophys **57**, 227- 241.

Oskooi, B. and Pedersen, L. B., 2006, Resolution of airborne VLF data. J. Appl. Geophys, in press.

Paal, G., 1965, Ore prospecting based on VLF-radio signals: Geoexploration **3**, 139- 147.

Pedersen, L. B., 1998, Tensor VLF measurements: Our first experiences. Expl. Geophys., **29**, 52-57.

Persson, L., 2001, Plane wave electromagnetic measurements for imaging fracture zones. Ph. D. thesis, Uppsala University, Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 30. ISBN 91-554-5028-8.

Pedersen, L. B., Qian, W., Dynesius, L. and Zhang, P., 1994, An airborne tensor VLF system. From concept to realization: Geophysical Prospecting **42**, 863-883.

Pedersen, L. B. and Oskooi, B., 2004, Airborne VLF measurements and variations of ground conductivity: a tutorial. Surveys in Geophysics **25**, 151-181.

Sharma, S. P. and Kaikkonen, P., 1998, Two-dimensional non-linear inversion of VLF-R data using simulated annealing. Geophys. J. Int., **133**, 649-668.

Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An efficient data- subspace inversion method for two- dimensional magnetotelluric data. Geophysics, **65**, 791-803.

Tabbagh, A., Bendritter, Y., Andrieux, P., Decriaud, J. P. and Guerin, R., 1991, VLF resistivity mapping and verticalization of the electric field. Geophys. Prosp., **39**, 1083-1097.

www.SID.ir