

طراحی و ساخت فرستنده و گیرنده رقمی (دیجیتال) داده‌های ژئوالکتریک و کاربرد آن در کاهش اثر نوفه

غلام جوان دولویی^{۱*}، اصغر آزادی^۲ و نصرالله کمالیان^۳

^۱استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
^۲دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
^۳استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۸، پذیرش نهایی: ۸۷/۴/۳)

چکیده

نوفه‌های الکتریکی تاثیر به سزایی در دقت روش‌های ژئوفیزیکی، به خصوص مقاومت‌سنجی، پتانسیل خودزا، قطبش القایی، ماگنتوتلوریک و الکترومغناطیس دارد. منشا این نوفه‌ها ممکن است نوع زمین، پتانسیل خودزا، پتانسیل القایی، کابل‌ها و دکل‌های برق، ریل‌های راه آهن و مترو، پمپ‌ها، امواج الکتروسیسمیک و جریان‌های الکترومغناطیسی باشد. مرحله اول افزودن بر دقت اندازه‌گیری‌ها در روش مقاومت‌سنجی ژئوالکتریک، شناخت نوفه‌ها و بررسی تأثیر آن در کیفیت برداشت است. در مرحله دوم با استفاده از نوفه برداشت شده و مشخصات مقاومت الکتریکی زمین، وضعیت برداشت داده‌ها را می‌توان شبیه‌سازی کرد. با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته می‌توان بهترین روش اجرایی را برای کاهش اثر نوفه طراحی کرد. در راستای این پژوهش یک دستگاه گیرنده رقمی (دیجیتال) پتانسیل الکتریکی و یک فرستنده جریان الکتریکی پر قدرت طراحی و ساخته شده است. برای تعدادی از ساختارهای متفاوت زمین‌شناسی، در چند نقطه از کشور برداشت نوفه الکتریکی با این روش صورت گرفت. پردازش و تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد که با طراحی و ساخت این دستگاه رقمی برای اندازه‌گیری‌ها به صورت تاریخچه زمانی، دقت اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل از ۱ میلی‌ولت در دستگاه‌های ژئوالکتریک معمولی به حدود ۰/۰۱ میلی‌ولت در دستگاه جدید افزایش می‌یابد. علاوه بر آن می‌توان عمق نفوذ جریان‌های ارسالی را تا چند هزار متر افزایش داد. این موضوع می‌تواند در تعیین مشخصات گسله‌های پی‌سنگی یا روند زون‌های گسلش یافته نقش به سزایی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: ژئوفیزیک، ژئوالکتریک، نوفه، مقاومت‌سنجی رقمی (دیجیتال)

Design of digital geo-electrical equipment and its application on noise level reduction

Javan-Doloei, Gh¹., Azadi, A². and Kamalian, N³.

¹Assistant professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
²Ph.D. student of Geophysics, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
³Assistant professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 3 Mar 2008, Accepted: 23 Jun 2008)

Abstract

Electrical resistivity survey is used to explore subsurface layers in hydrology, geology, mining, geotechnical and environmental investigations. The resistivity measurements are

normally made by injecting current into the ground through two current electrodes, and measuring the resulting voltage difference at two potential electrodes. Electrical resistivity is a function of injection current, measured with difference potential and geometrical factor of electrodes. From the current (I) and voltage (V) values, an apparent resistivity (ρ_a) value is calculated as $\rho_a = KV/I$, where K is the geometrical factor. Increasing the distance between two current electrodes caused an increase in the depth of penetration. To determine the true subsurface resistivity, layers thicknesses, an inversion of the measured apparent resistivity values must be carried out by means of a computer program. The ground resistivity is related to various geological parameters such as the mineral, fluid content, porosity, saline and degree of water saturation in the rock.

One of the new developments in recent years is the use of 2-D electrical Imaging/tomography surveys to map areas with moderately complex geology (Loke & Barker 1996). Chambers et al (1993) use a multi-electrode system and dipole-dipole array for prospecting oil and gas. The results were satisfactory. El-Qady and Ushijima (2001) were used neural networks and inversion of DC resistivity data to interpret deep sounding electric. Busby (2000) has used azimuthally apparent-resistivity measurements for determining fracture strike orientations. Christiansen and Auken (2004) have made a dynamic system for detecting lateral variability.

Recording waveform of resistivity data can be done through moderate seismic digitizers. Distinguishing basement type fault by means of this system is very important and significant in seismology, especially in areas of large cities.

Electrical noises have an important role in the accuracy of geo-electric data. These noises can originate from geology conditions, self-potential, induction polarization, power electrical cables, and underground railways, pumping engines and electromagnetic fields. In the first step, most noises have been identified and the effects of important noises have been investigated which can be reduced using different field array and processing data. One of the most important ways to decrease the gain of noise is the recording of electrical data in digital way. To do this electrical data have been measured in digital waveforms in different parts of Iran. Then we applied different filtering tools to increase gain of signal to noise ratio. Results of our research showed that using electrical waveforms leads to an increase in the precision of measurements from 1mv (in analogue measurements) to 0.01 mv.

Key words: Electrical data, Geo-electrical prospecting, Waveform, Filter

۱ مقدمه

اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده، مقدار جریان تزریقی و هندسه الکترودهای نصب شده در زمین است. با زیاد کردن فاصله الکترودهای فرستنده جریان، وضعیت خطوط هم‌پتانسیل به گونه‌ای تغییر می‌کند که عمق نفوذ بیشتر شود. با اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل چند نقطه برای طول فرستنده جریان متفاوت و محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری، می‌توان منحنی مقاومت ظاهری الکتریکی را برای فواصل متفاوت طول فرستنده جریان ترسیم کرد. با تحلیل

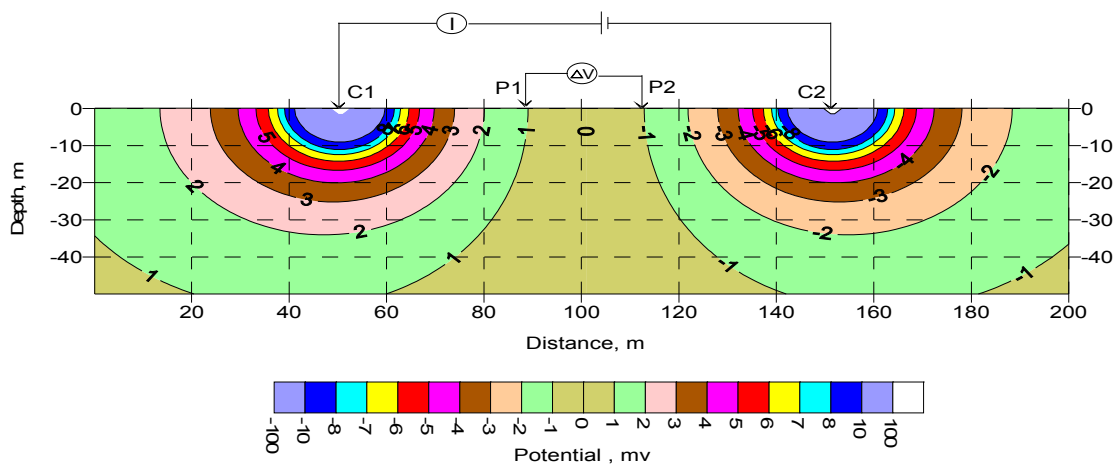
روش‌های مقاومت‌سنجی الکتریکی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی هستند که در بررسی‌های لایه‌های زیرسطحی تحقیقات آب‌شناسی، زمین‌شناسی، معدن، ژئوتکنیک و محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس روش ژئوالکتریک پاسخ زمین در برابر تزریق جریان الکتریکی است. در این روش در دو نقطه جریان الکتریکی به زمین تزریق می‌شود و در دو نقطه دیگر اختلاف پتانسیل زمین اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت الکتریکی ظاهری، تابعی از

دوبعدی و سه‌بعدی توسعه چشمگیری یافت. لوکه و بارکر (۱۹۹۶) برای تفسیر داده‌های ژئوالکتریک از روش مدل‌سازی معکوس برای شناسایی یک کانال ماسه‌ای مصنوعی به ابعاد $3 \times 3 \times 1$ متر مکعب استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها آرایه‌های ونر و ونر- شلومبرژه نتایج رضایت‌بخشی به دست دادند. هر چند که از این مدل برای آرایه‌های دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دو قطبی جواب مناسب به دست نیامده است. از این روش برای شناسایی مخازن نفتی و لایه‌های قیردار با استفاده از سامانه چند الکترودی و برداشت‌های دو و سه‌بعدی در شبکه‌ای به ابعاد 95×95 مترمربع استفاده شده است که نتایج مناسب به دست آمده است (چامبرز و همکاران، ۱۹۹۳). گاهی برای بهبود تفسیر داده‌های ژئوالکتریک عمیق از فنون شبکه عصبی استفاده می‌شود (القادی و اوشیجیما، ۲۰۰۱). در این روش با طراحی یک شبکه عصبی شش لایه‌ای و ۶۰ بار آموزش در امتداد هر نیمرخ، منطقه باستانی صغاری مصر مورد بررسی قرار گرفت. برداشت ژئوالکتریک آزمایشی برای شناسایی شکستگی‌ها و سامانه‌های درز و ترک کارایی خوبی دارد (باسی، ۲۰۰۰). اخیراً در دانشگاه ارهس دانمارک، دستگاهی برای برداشت دینامیکی داده‌های ژئوالکتریک و الکترومغناطیس ساخته

و تفسیر این منحنی‌ها مقاومت الکتریکی لایه‌های مختلف زیرسطحی به دست می‌آید. مقاومت الکتریکی به پارامترهای متفاوت زمین‌شناسی نظیر نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده، میزان رطوبت، درصد اشباع، سطح ایستابی، درصد شوری آب و تخلخل محیط بستگی دارد. پارامتر ژئوفیزیکی مورد استفاده در تفسیر داده‌های مقاومت‌سنجی، مقاومت ظاهری ρ_a است که از رابطه $\rho_a = K \Delta V / I$ به دست می‌آید. و در آن K ضریب گسترش هندسی وابسته به فاصله بین الکترودها؛ ΔV اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین دو الکتروود و I شدت جریان تزریق شده به زمین با دو الکتروود C1 و C2 است. شکل ۱ نمایی از عملیات مقاومت‌سنجی، خطوط جریان و هم‌پتانسیل در اطراف دو الکتروود جریان را نشان می‌دهد.

روش مقاومت‌سنجی ژئوالکتریک را نخستین بار شلومبرژه، استاد فیزیک مدرسه عالی معدن پاریس در ۱۹۱۲ ابداع کرد (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰؛ وب‌سایت شلومبرژه، ۲۰۰۸). مدت‌های مدیدی روش برداشت از نوع سوندازنی صورت می‌گرفت و تفسیر با منحنی‌های استاندارد دو و سه لایه‌ای صورت می‌گرفت.

در دهه آخر سده بیستم، با توسعه الگوریتم‌های رایانه‌ای و سامانه کابل‌های چندالکتروودی، روش‌های



شکل ۱. نمای اجمالی از خطوط هم‌پتانسیل در عملیات مقاومت‌سنجی. در این شکل C1 و C2 الکترودهای جریان، P1 و P2 الکترودهای پتانسیل.

شده است (کریستیانسن و آکن، ۲۰۰۴). این دستگاه از یک کابل به طول ۱۰۰ متر تشکیل شده است که ۹ استوانه سنگین الکتروود با فاصله‌های ۱۰ متر روی آن نصب شده و با یک خودرو، روی زمین کشیده می‌شود. دو الکتروود، به زمین جریان تزریق می‌کنند و اختلاف پتانسیل با هفت الکتروود دیگر اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه در زمین‌های پوشیده از جنگل، شیب‌های تند و مناطق صعب‌العبور کاربرد ندارد.

دقت اندازه‌گیری دستگاه‌های ژئوالکتریک معمولی در حدود ۱۰ میلی‌ولت است. وجود نوفه‌های الکتریکی در مسیر خطوط انتقال نیرو، تلوریک، پتانسیل خودزا و پتانسیل القایی، بر پتانسیل الکتریکی قابل اندازه‌گیری اثر می‌گذارد. بنابراین استفاده از دستگاه‌های دقیق‌تر ضروری است. اخیراً برای بررسی لایه‌های عمیق زمین و کاهش نوفه‌ها از روش برداشت به صورت سری زمانی، با تأکید بر انباشت، تکرار و فیلتر کردن استفاده می‌شود (استورز و همکاران، ۲۰۰۰). باید خاطر نشان کرد که با پیشرفت و توسعه رقمی‌کننده‌های زلزله‌شناسی و لرزه‌نگاری، امکان به‌کارگیری این گیرنده‌ها برای ثبت رقمی داده‌های مقاومت ویژه به صورت سری زمانی فراهم شده است. بدیهی است با استفاده از روش‌های پردازش، کیفیت سیگنال را می‌توان افزایش داد. بنابراین با طراحی و ساخت فرستنده پر قدرت جریان الکتریکی با مشخصه توانمندی ارسال جریان در بازه‌های زمانی معین می‌توان علاوه بر ثبت رقمی داده‌های مقاومت ویژه به صورت سری زمانی، به عمق نفوذ قابل ملاحظه چند کیلومتری داخل زمین دست یافت. از آنجا که از روش مقامت ویژه در شناسایی سطوح گسلش استفاده می‌شود، با به‌کارگیری تجهیزات مورد نظر این پژوهش می‌توان در شناسایی روند گسل‌های عمیق و پی‌سنگی که از دیدگاه زمین‌لرزه‌شناختی اهمیت خاص در ایجاد زمین‌لرزه‌های مخرب دارند، استفاده کرد. این تجهیزات به ویژه در مناطقی که امکان پایش

(مانیتورینگ) لرزه‌ای وجود ندارد و یا بررسی با سکون لرزه‌ای همراه است، کاربرد دارند.

در این مقاله بررسی انواع نوفه‌های تأثیرگذار بر داده‌های صورت گرفته سپس میزان اثر نوفه‌ها در داده‌های ژئوالکتریک شبیه‌سازی شده است. علاوه بر آن نمونه نوفه‌های برداشت شده در مناطق گوناگون کشور مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعدی به معرفی پارامترهای طراحی و مشخصه‌های فرستنده و گیرنده‌های ساخته شده پرداخته می‌شود. در خاتمه نحوه پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه خواهد شد.

۲ انواع نوفه‌های تأثیرگذار بر اندازه‌گیری‌های مقاومت‌سنجی

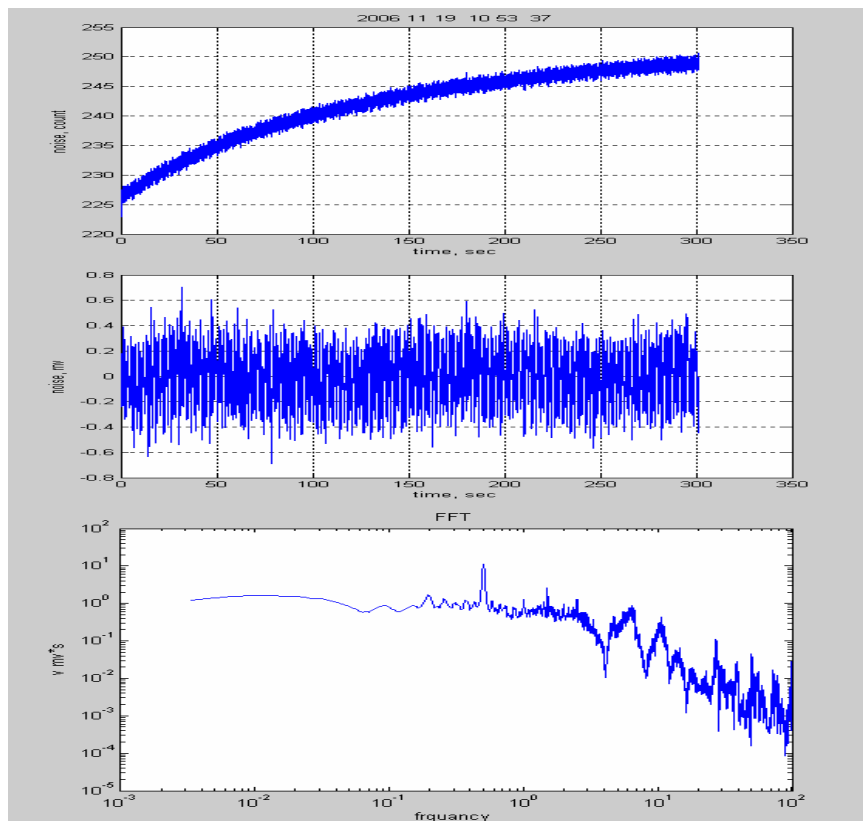
نوفه‌های الکتریکی منابع متفاوتی دارند. منشأ این نوفه‌ها ممکن است لیتولوژی زمین، پتانسیل خودزا، پتانسیل القایی، خطوط انتقال نیرو، ریل‌های راه آهن، مترو، موتورهای پمپ آب، امواج الکتروسیسمیک، سامانه کاتدیك خطوط لوله‌های گاز و نفت و جریان‌های الکترومغناطیسی باشد. در بعضی موارد تفکیک این منابع نوفه از یکدیگر امکان‌پذیر نیست. در جاهایی که مقدار نوفه زیاد باشد با تغییراتی در آرایش الکتروودها، زمان عملیات و روش مناسب پردازش می‌توان اثر نوفه‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای در بررسی‌های مقاومت‌سنجی کاهش داد. در ادامه، مهم‌ترین نوفه‌های تأثیرگذار بر اندازه‌گیری‌های مقاومت‌سنجی در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲ نوفه پتانسیل خودزا (self potential): این نوفه بر اثر وجود مصالح متفاوتی که با الکتروودهای پتانسیل در تماس‌اند به‌دست می‌آید. این نوفه معمولاً در حالتی که جنس زمین در تماس با دو الکتروود متفاوت باشد باعث تشکیل پیل‌های الکتریکی بین دو الکتروود پتانسیل می‌شود.

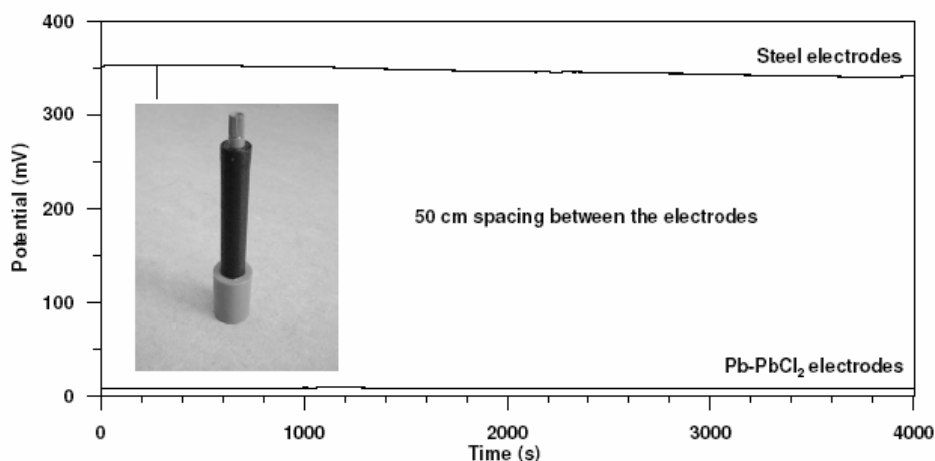
در محیط‌های معمولی، مقدار پتانسیل خودزا بین ۱۰ تا ۴۰۰ میلی‌ولت است و در بعضی مناطق، بیشتر از ۱ ولت نیز مشاهده شده است. روش برداشت پتانسیل خودزا کاربرد زیادی در اکتشاف معادن سولفوری دارد. برای حذف این نوفه‌ها در بعضی از دستگاه‌های ژئوالکتریک، با ارسال ولتاژی معکوس، اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود را صفر می‌کنند. در بعضی از دستگاه‌های دیگر، از روش انباشت (برانبارش) استفاده می‌کنند. در این روش حداقل دو بار با تعویض قطب‌های جریان در دو الکتروود جریان اختلاف پتانسیل بین دو الکتروودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. هر دو روش در هنگامی که ماهیت نوفه‌ها نسبت به زمان تغییر می‌کند، دقت خوبی ندارد. در روش ثبت رقمی به صورت سری زمانی می‌توان از روش تصحیح خط مبنا

(base line correction) استفاده کرد. شکل ۲ نمونه‌ای از نوفه برداشت شده در منطقه بوشهر را نشان می‌دهد. مقدار پتانسیل خودزا بین ۲۲۵ تا ۲۵۰ میلی‌ولت است. با تصحیح خط مبنا مقدار نوفه، ± 0.60 میلی‌ولت و بسامد غالب، حدود ۰/۵ هرتز است. برای کاهش این نوفه، می‌توان از الکتروود قطبش‌ناپذیری مانند الکتروود برنجی، الکتروود کلرید سرب و یا کوزه کات کبود استفاده کرد. مقایسه مقادیر پتانسیل خودزا برای دو الکتروود فولادی و کلرید سربی در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار نوفه در الکتروودهای سربی خیلی کمتر از الکتروودهای فولادی است. شایان ذکر است که الکتروودهای سربی سمی‌اند و اتخاذ تدابیر خاص هنگام کار با آنها ضروری است.



شکل ۲. (بالا) نمونه‌ای از ثبت نوفه پتانسیل در بوشهر؛ (وسط) تصحیح نگاشت براساس خط مبنا؛ (پایین) طیف نگاشت تصحیح شده. مقدار پتانسیل خودزا ۲۲۵-۲۵۰ میلی‌ولت است. با تصحیح خط مبنا مقدار نوفه ± 0.60 میلی‌ولت و بسامد غالب حدود ۰/۵ هرتز است.



شکل ۳. مقایسه‌ای بین الکتروود کلرید سربی و الکتروود فولادی. در سمت چپ تصویر الکتروود کلرید سربی نشان داده شده است (اقتباس از راهنمای دستگاه مقاومت‌سنجی ABEM-4000).

معمولاً زمین مانند یک خازن عمل می‌کند. بنابراین هنگامی که جریانی مربعی به زمین داده شود، زمین مقداری از انرژی را در خود ذخیره می‌کند و هنگامی که جریان قطع شود، آن جریان را پس می‌دهد (شکل ۶). این روش در شناسایی معادن سولفوری کاربرد زیادی دارد ولی در برداشت داده‌ها به صورت رقمی در نقش نوفه شناخته می‌شود. به طور معمول مدت زمان فراز (وصل جریان) طولانی‌تر از مدت زمان فرود (قطع جریان) است. برای حذف این نوفه، دوره قطع و وصل جریان افزایش داده می‌شود و در پردازش داده‌ها برای اطمینان یک ثانیه از طول نگاشت هنگام قطع و وصل جریان در نظر گرفته نمی‌شود.

۲-۵ نوفه دستگاهی (device noise): نوفه‌های دستگاهی شامل نوفه رقمی‌کننده، کابل، قرقره و گیره‌ها است. برای اندازه‌گیری نوفه دستگاه دو سر ورودی هر کانال از رقمی‌کننده را به هم وصل و نوفه را برداشت می‌کنند. در شکل ۷ نمونه‌ای از نوفه دستگاهی ثبت شده در یک رقمی‌کننده ۳ کاناله ۲۴ بیتی آورده شده است. در

۲-۲ نوفه الکتریکی (electrical noise): این نوفه در نزدیکی‌های مسیر خطوط نیرو وجود دارد و با اعمال فیلتر ناچ (۵۰ هرتز) می‌توان آن را از بین برد. در شکل ۴ نمونه‌ای از نگاشت برداشت شده در منطقه سوهانک تهران در مجاورت دکل و خطوط انتقال نیروی برق ولتاژ قوی نشان داده شده است. مقدار نوفه الکتریکی در این نگاشت حدود ۲ میلی‌ولت است.

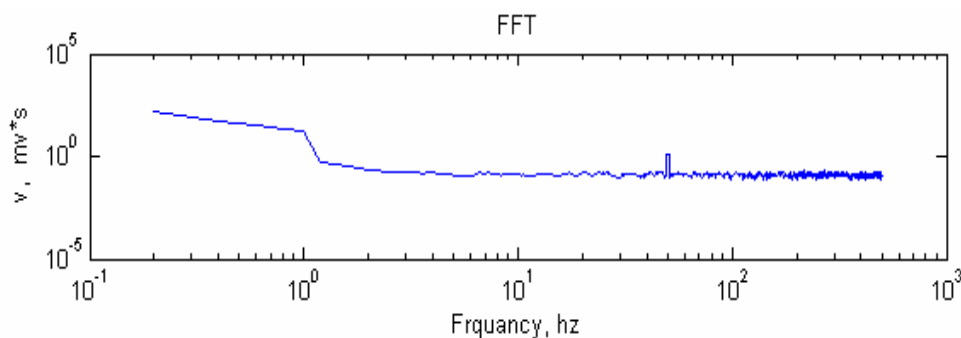
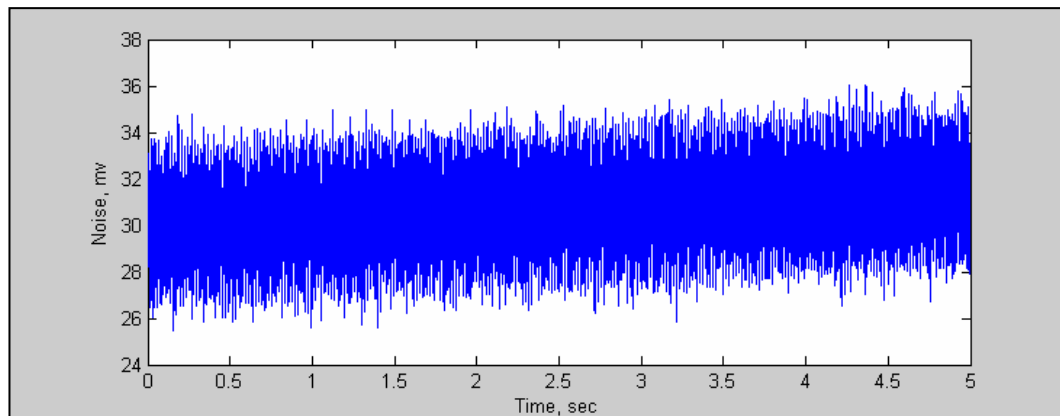
۲-۳ نوفه تلوریک (telluric): این نوفه بر اثر جریان‌های طبیعی تلوریک زمین به وجود می‌آید و با نوفه‌های مصنوعی حاصل از عبور و مرور، کارکردن دستگاه‌ها، امواج دریا و پمپ‌های آب تداخل می‌کند. تفکیک این نوفه‌ها با توجه به منشأ آنها مشکل است و با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، اثر آن را می‌توان کم کرد. در شکل ۵ نمونه‌ای از نگاشت ثبت شده در ساحل بوشهر نشان داده شده است. بسامد غالب نیم هرتز نگاشت، ناشی از موج دریا است.

۲-۴ نوفه قطبش القایی (inductive polarization):

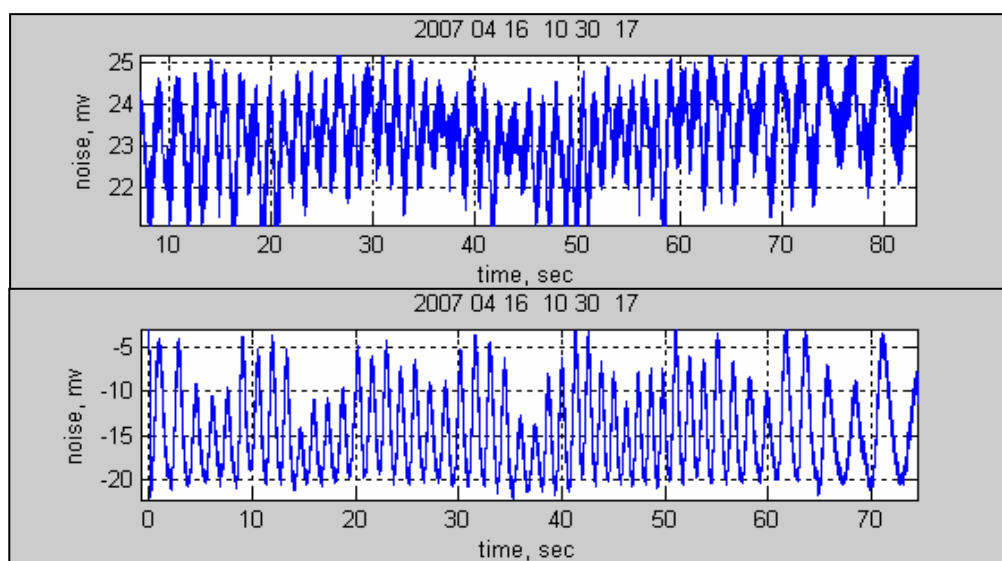
۲-۶ نوفه‌های ترکیبی (combined noises): چنین نوفه‌ای از ترکیب نوفه‌های متفاوتی تشکیل می‌شود. کاربران هنگام تفکیک این نوفه‌ها با مشکل جدی روبرو هستند. با استفاده از روش‌های اجرایی و تغییر زمان برداشت داده، اثر این نوع نوفه‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای می‌توان کاهش داد. در شکل ۹ نمونه‌ای از نگاشت نوفه ترکیبی بسامد کم و زیاد به همراه نگاشت تفکیک شده و تصحیح شده در شهر تهران جنب بزرگراه همت نشان داده شده است.

در خاتمه این قسمت، خلاصه‌ای از انواع نوفه‌های مهم و تأثیرگذار بر اندازه‌گیری پتانسیل در جدول ۱ ارائه شده است.

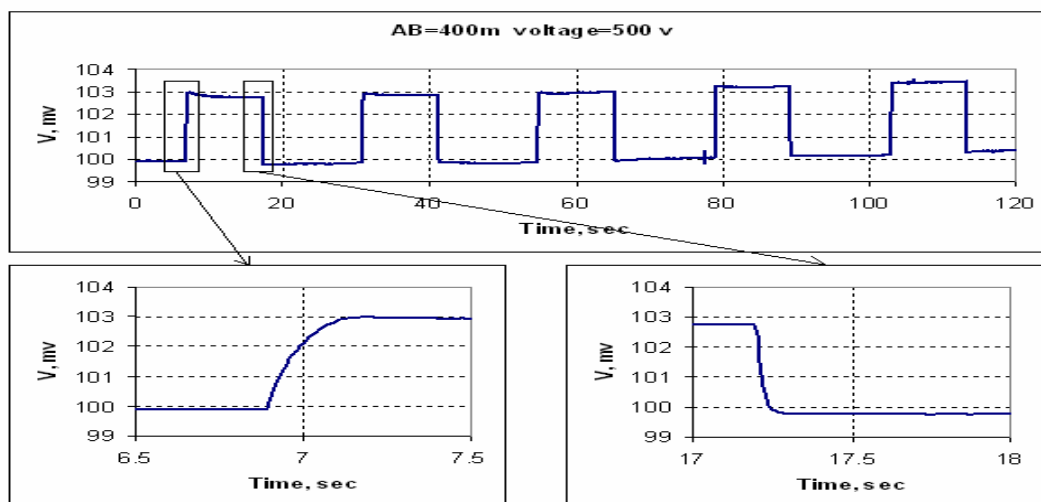
این دستگاه مقدار خطای پتانسیل ثبت شده حداکثر ± 0.05 میلی‌ولت است. در صورتی که تصحیح خط مبنا صورت گیرد خطای دستگاهی ± 0.002 میلی‌ولت است. در شکل ۸ نمونه‌ای از نوفه دستگاهی ثبت شده یک رقمی کننده ۴ کاناله ۱۶ بیتی برای مقایسه با شکل ۷ آورده شده است. در این دستگاه مقدار خطای پتانسیل ثبت شده حداکثر ± 0.17 میلی‌ولت است. در صورتی که تصحیح خط مبنا به انجام برسد، خطای دستگاهی ± 0.02 میلی‌ولت است. مقایسه تطبیقی شکل‌های ۷ و ۸ بیانگر آن است که استفاده از رقمی کننده ۳ کاناله ۲۴ بیتی، دقت قابل ملاحظه در ثبت داده‌های مقاومت ویژه به همراه دارد چراکه میزان نوفه دستگاهی آن کم است.



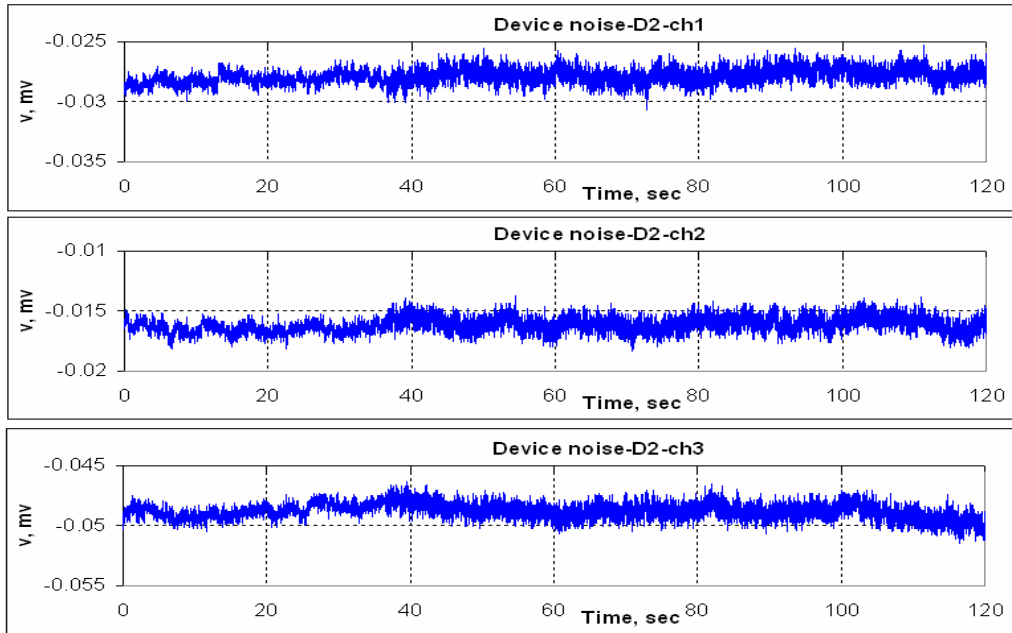
شکل ۴. نمونه‌ای از نگاشت برداشت شده در منطقه سوهانک تهران در مجاورت دکل برق (بالا); و طیف فوریه آن (پایین). بسامد پیک ۵۰ هرتز در شکل پایین مشهود است.



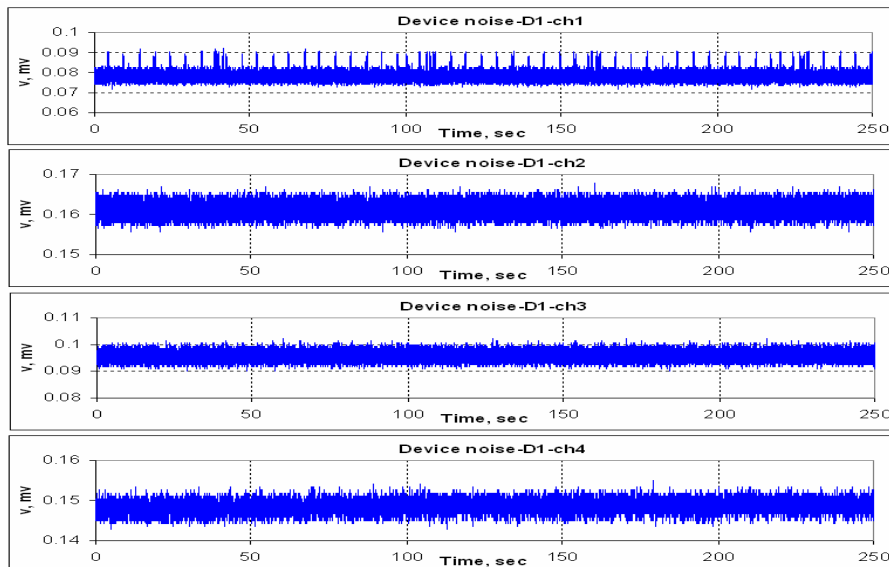
شکل ۵. نمونه‌هایی از نوفه‌های ناشی از امواج دریا.



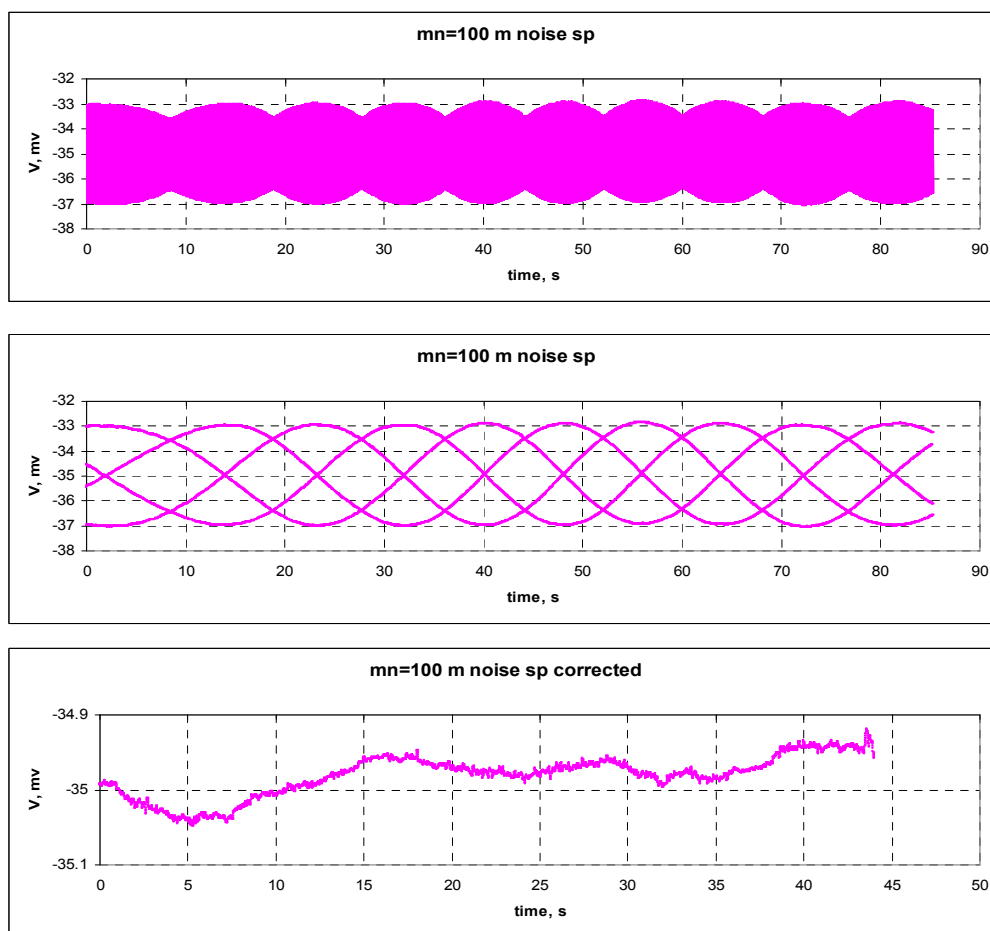
شکل ۶. نمونه‌ای از نداشت دستگاه فرستنده جریان برداشت شده با ارسال سیگنال مربعی در تهران پارک جنگلی شبان (بالا)؛ پایین: سمت راست اثر قطبش القایی در پنجره‌ای از قطع سیگنال؛ پایین: سمت چپ اثر قطبش القایی در پنجره‌ای از زمان اتصال سیگنال.



شکل ۷. نوفه دستگاهی در رقمی کننده ۳ کاناله ۲۴ بیتی.



شکل ۸. نوفه دستگاهی در رقمی کننده ۴ کاناله ۱۶ بیتی.



شکل ۹. (بالا) نمونه‌ای از نگاشت نوفه ترکیبی بسامد کم و زیاد ثبت شده در شهر تهران بزرگراه همت. (وسط) نگاشت تفکیک شده، (پایین) نگاشت تصحیح شده.

جدول ۱. انواع نوفه‌ها، منشأ، شکل تقریبی و روش حذف آنها.

نوع نوفه	منشأ	شکل نوفه	طریقه حذف نوفه
پتانسیل خودزا	اختلاف جنس زمین در دو الکتروود پتانسیل	خطی تا تابع درجه ۵	تصحیح خط مبنا، استفاده از الکترودهای قطبش‌ناپذیر
نوفه الکتریک	کابل‌ها و دکل‌های برق	سینوسی ۵۰ هرتز	اعمال فیلتر ناچ، هموارسازی و فاصله گرفتن از کابل‌ها و دکل‌ها
نوفه‌های تلوریک	تلوریک طبیعی زمین	نامنظم	استفاده از روش فیلتر کردن موجک، انباشت و آرایش مناسب الکترودهای پتانسیل
قطبش القایی	خاصیت خازنی زمین هنگام اتصال و یا قطع جریان الکتریکی	کاهش دهنده	استفاده از سیگنال‌هایی مربعی با دوره بیش از ۱۰ ثانیه
نوفه دستگاهی	نوفه دستگاه گیرنده، کابل‌ها و گیره‌ها	نامنظم	استفاده از دستگاه با محافظ مخصوص، گیره‌های با روکش پلاستیکی
نوفه‌های ترکیبی	ترکیبی از منشاهای متفاوت	ترکیبی از شکل‌های متفاوت	رعایت مرحله خاص حذف هر نوفه

۳ شبیه‌سازی نوفه‌های تأثیرگذار بر پتانسیل

برای مشخص شدن دقت اندازه‌گیری، به دست آوردن تجربی برخی پارامترهای لازم ضرورت دارد. برای برآورد مقدار اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده با توجه به فاصله بین گیرنده و فرستنده جریان، از روش شبیه‌سازی استفاده شده است. در این روش با تغییر هر پارامتر می‌توان اثر آن را در اختلاف پتانسیل دید. در شکل ۱۰ تصویری اجمالی از شبیه‌سازی تأثیر نوفه‌ها بر پتانسیل اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. در این بررسی از بسته نرم‌افزاری شبیه‌سازی در محیط مطلب استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر فاصله، مقاومت ویژه الکتریکی زمین و مقدار جریان ارسالی، نوفه‌هایی وجود دارد که اثر آنها را باید حذف کرد یا در صورت امکان کاهش داد. با برداشت تعدادی ایستگاه نوفه‌سنجی می‌توان با توجه به اطلاعات موجود مقدار و وضعیت نوفه‌ها را ارزیابی کرد و با انتخاب آرایش مناسب و نوع و مدت زمان ارسال تپ، وضعیت برداشت داده‌های ژئوالکترونیک را بهبود بخشید. در شکل ۱۱ با توجه به شرایط زمین‌شناسی سیگنال قابل دریافت، نوفه الکتریکی، نوفه تلوریک و پتانسیل خودزا به صورت جداگانه نشان داده شده است. در شکل ۱۲ مجموع سیگنال و نوفه‌ها که همان نگاشت خام ثبت شده توسط دستگاه است از راه شبیه‌سازی نشان داده شده است.

۴ گیرنده رقمی

برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی نیاز به دستگاهی است که بتوان داده‌ها را به صورت رقمی ثبت کرد، قدرت تفکیک مناسبی داشته باشد، محدوده اندازه‌گیری حداکثر و حداقل ولتاژ دستگاه گیرنده در محدوده مقادیر قابل اندازه‌گیری باشد، دارای حداقل مقدار نوفه باشد. حداقل سه کاناله باشد، دارای محافظ مخصوص جلوگیری از نفوذ رطوبت، باران و شوک‌های

الکتریکی ناشی از اتصال کوتاه و رعد و برق باشد. با توجه به موارد مطرح شده برد رقمی کننده ۲۴ بیتی سه کاناله مدل سارا (مائوری، ۲۰۰۶) تهیه و ملحقاتی به آن اضافه شد تا بتواند پاسخگوی نیازهای این پژوهش باشد. برخی ویژگی‌های دستگاه گیرنده رقمی تهیه شده به شرح زیر است:

- نوع رقمی کننده: رقمی کننده ۲۴ بیتی سیگما دلتا دارای سه کانال مجزا با امپدانس ۳۰۰ کیلوهم؛
- آهنگ نمونه‌برداری: ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ نمونه در ثانیه.
- محدوده دینامیکی: ۱۲۴ دسی‌بل با آهنگ نمونه‌برداری ۲۵ نمونه در ثانیه.
- سرعت انتقال داده از دستگاه به رایانه: ۳۸۴۰۰ بیت در ثانیه.
- محدوده قابل اندازه‌گیری: ± 1 ولت (این محدوده قابل تغییر است).
- دقت اندازه‌گیری: ۱۱۹ نانو ولت.
- قابلیت اتصال به سامانه GPS برای تعیین زمان دقیق ثبت سیگنال.
- قاب محافظ مناسب برای جلوگیری از ورود رطوبت به دستگاه.
- دستگاه محافظ الکتریسته ساکن و صاعقه؛
- مجهز به دستگاه چکانش؛

برد اصلی دستگاه رقمی کننده به همراه قاب آلومینیومی دربرگیرنده مدارهای الکتریکی و دستگاه سخت‌افزاری آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این دستگاه در شرایط آزمایشگاه و صحرا مورد آزمایش قرار گرفته است. شکل ۱۴ نمودار تغییرات طیف پاسخ با آهنگ نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. برای مثال برای آهنگ نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه (منحنی مشکی رنگ) در ۳۰ هرتز مقدار کاهندگی دامنه سیگنال حدود ۱۷/۵ دسی‌بل است. توانمندی این نوع رقمی کننده در

دامنه سیگنال و کاهش دامنه نوفه می‌شود. مسیر کلی پردازش داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ثبت نوفه قبل از ثبت نگاشت داده‌های الکتریک صورت می‌گیرد. پس از برداشت نوفه با تفاضل آن از نگاشت خام، سیگنال اصلی تقویت می‌شود. اعمال تصحیح خط مبنای هموارسازی و برخی اوقات استفاده از فیلترها برای افزایش دامنه سیگنال نسبت به دامنه ضروری است. معمولاً می‌توان برای تصحیح کردن خط مبنای و به‌کارگیری فیلترهای مناسب، از برنامه‌های نرم‌افزاری قابل دسترس (برای نمونه MATLAB, PITS) استفاده کرد. با توجه به قابلیت برنامه MATLAB (ماتورک، ۲۰۰۵) در این پژوهش از این برنامه نرم‌افزاری استفاده شده است. یکی از خصوصیات تجهیزات طراحی شده برای ثبت داده‌های مقاومت ویژه قابلیت تکرار اندازه‌گیری به منظور انباشت (برانبارش) نگاشت‌ها است. نتیجه این فرایند تقویت سیگنال اصلی مشابه روش‌های لرزه‌نگاری بازتابی است. با داشتن اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود و هندسه الکتروودها، با استفاده از روابط موجود، مقاومت الکتریکی ظاهری به دست می‌آید.

در بررسی موردی این مقاله، سه نمونه نگاشت داده ژئوالکتریک در منطقه خواجه ربیع شهر مشهد مقدس برداشت شده است که در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ دیده می‌شود. در این نگاشت‌ها با استفاده از دستگاه فرستنده جریان یک تپ مربعی به مدت ۲۰ ثانیه به زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود پتانسیل با گیرنده به صورت رقمی ثبت شده است.

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ برداشت داده با آرایش چهار گوش دوقطبی - دوقطبی به ترتیب با فاصله‌های ۱۵۰ متر و ۱۰۰ متر در همان محل شکل ۱۸ صورت گرفته است.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود نوفه‌های ناشی از پتانسیل خودزا، الکتریک، تلوریک و

محدوده بسامد ۰/۱ هرتز در حدود ۲۸ بیت مؤثر و مفید است. در حالی که در بسامد ۴۰ هرتز دارای مقدار بیت مؤثر ۲۲ است. بنابراین با توجه به منحنی پاسخ گیرنده فوق، مقدار واقعی گستره دینامیکی برای ثبت دامنه‌های بزرگ، مشابه سایر گیرنده‌های لرزه‌نگاری، تابعی از گستره بسامدی مورد نیاز است.

۵ طراحی و ساخت دستگاه فرستنده جریان الکتریکی

برای تزریق جریان الکتریکی به زمین نیاز به دستگاهی است که بتواند سیگنال مربعی ایجاد کند تا بتوان در مراحل بعدی، در دستگاه‌های گیرنده نوفه را حذف کرد. با کنترل مدت زمان و تعداد سیکل سیگنال تزریقی به زمین می‌توان کنترل بیشتری روی نوفه داشت. علاوه بر آن تولید و کنترل سیگنال مربعی ساده‌تر از دیگر انواع سیگنال‌ها است. بنابراین با توجه به موارد فوق و برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در عمق‌های زیاد، نگارندگان دستگاهی با ویژگی‌های زیر طراحی کردند و آن را با همکاری بخش صنعت ساختند.

- حداکثر مقدار ولتاژ خروجی: ۱۲۵۰ ولت؛ - نوع سیگنال خروجی: مربعی با دوره و تعداد سیکل متفاوت؛ - ثبت رقمی جریان تزریقی؛ - قالب و محافظ مناسب برای جلوگیری از ورود رطوبت به دستگاه؛ - داشتن محافظ اتصال به زمین، الکتریسیته ساکن و صاعقه.

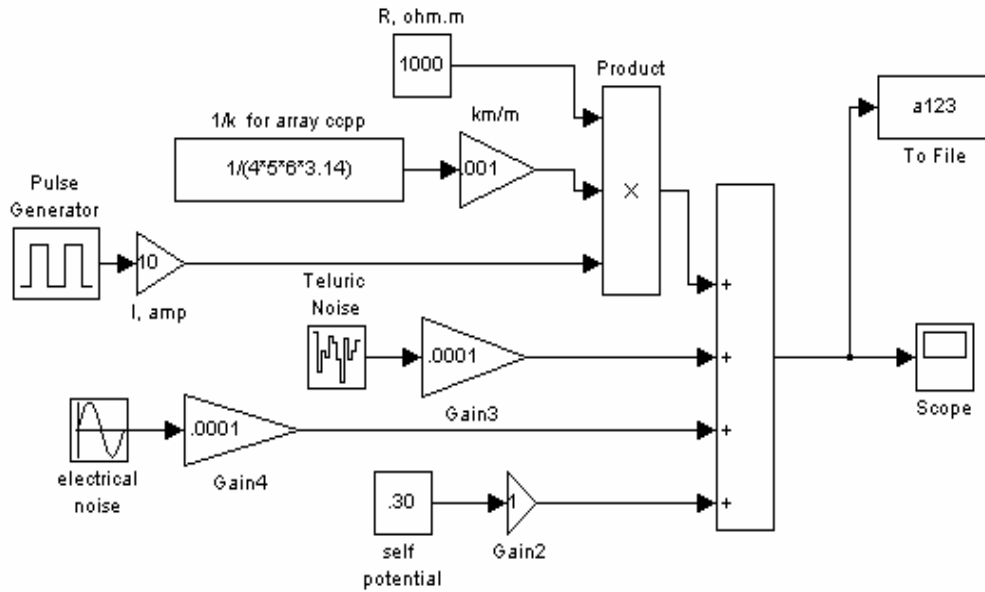
در شکل ۱۵ تصویر دستگاه فرستنده جریان الکتریکی طراحی و ساخته شده برای این پژوهش و در شکل ۱۶ نمونه‌ای از ولتاژ تزریقی به زمین نشان داده شده است.

۶ پردازش داده‌ها

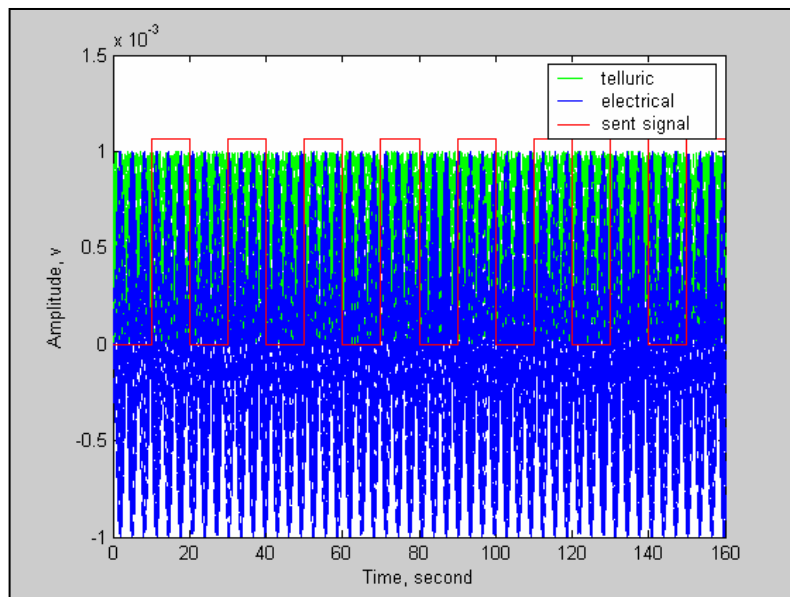
پردازش داده‌ها در بردارنده‌ی مراحل است که باعث افزایش

سپس مقدار مقاومت ویژه ظاهری را مطابق رابطه‌های مورد اشاره در فلوجارت شکل ۱۷ و مقدار مقاومت ویژه حقیقی را با استفاده از نرم‌افزارهای IPI6, Res3d, Res2d مدل‌سازی (اینترپکس، ۲۰۰۵ و لوکه، ۲۰۰۵) تعیین کرد.

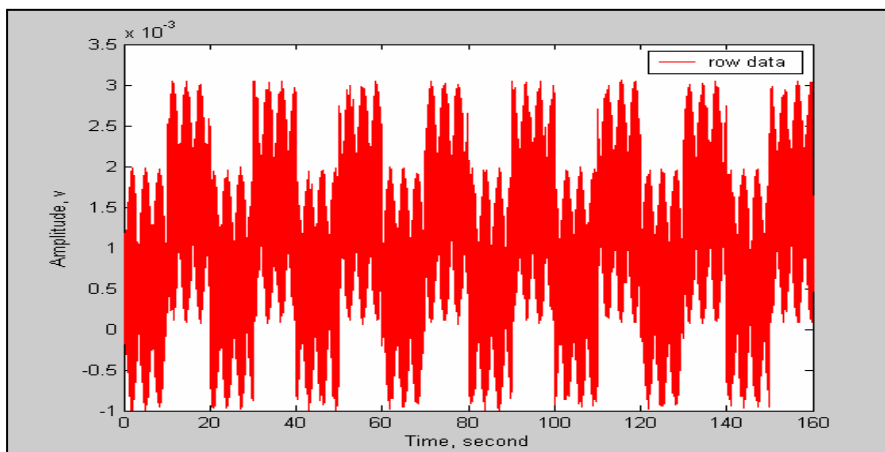
قطبش القایی هر سه نگاشت را تحت تأثیر قرار داده است؛ به طوری که در دستگاه‌های معمولی امکان اندازه‌گیری این مقدار ولتاژ برای اختلاف پتانسیل امکان‌پذیر نیست. با پردازش و تصحیح این داده‌ها به راحتی می‌توان مقدار اختلاف پتانسیل را استخراج کرد و



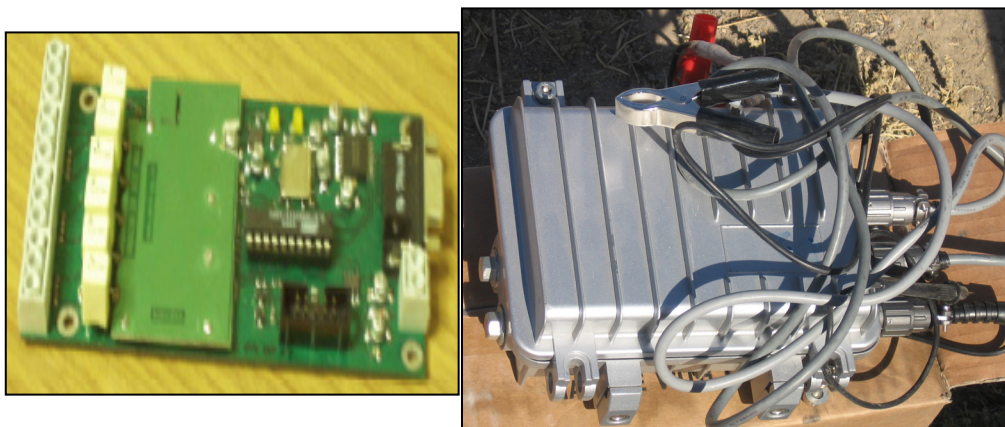
شکل ۱۰. شبیه‌سازی تأثیر نوفه روی مقدار پتانسیل اندازه‌گیری شده در محیط نرم‌افزار مطلب.



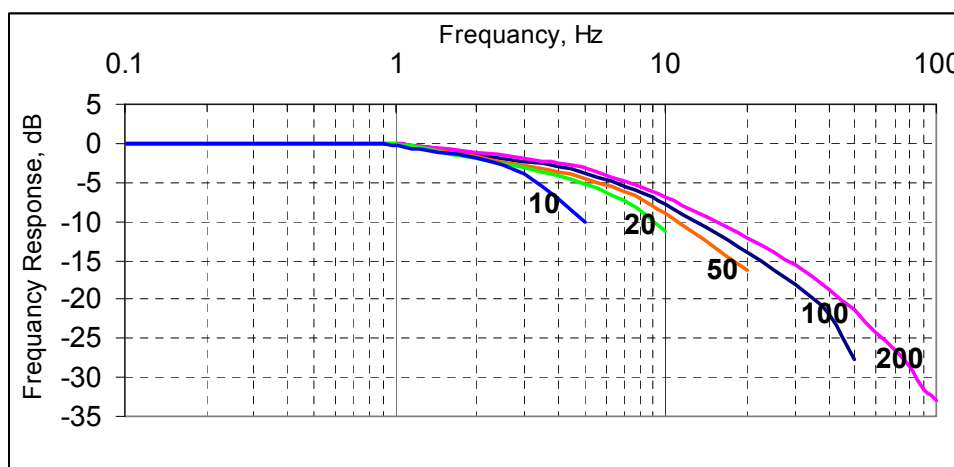
شکل ۱۱. نوفه الکتریکی، نوفه تلوریک و پتانسیل خودزا به صورت تفکیک شده.



شکل ۱۲. نمونه‌ای از سیگنال و نوفه شبیه‌سازی شده با توجه به شرایط زمین.



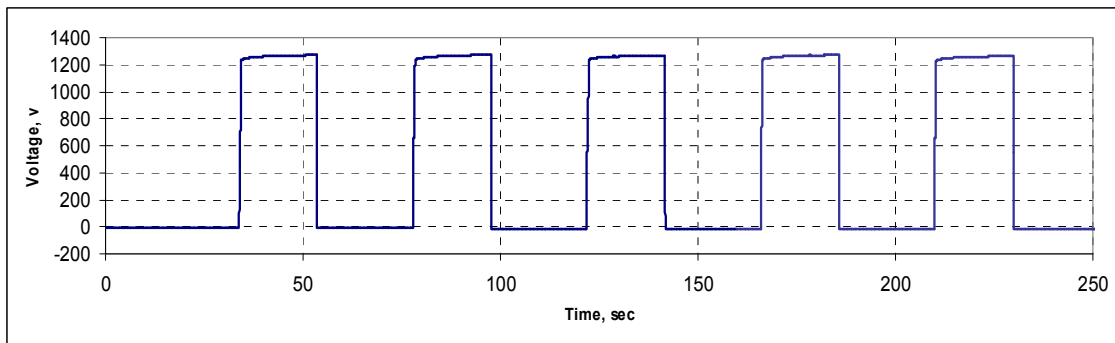
شکل ۱۳. تصویر برد رقمی‌کننده (چپ) و قاب محافظ گیرنده پتانسیل الکتریکی (راست).



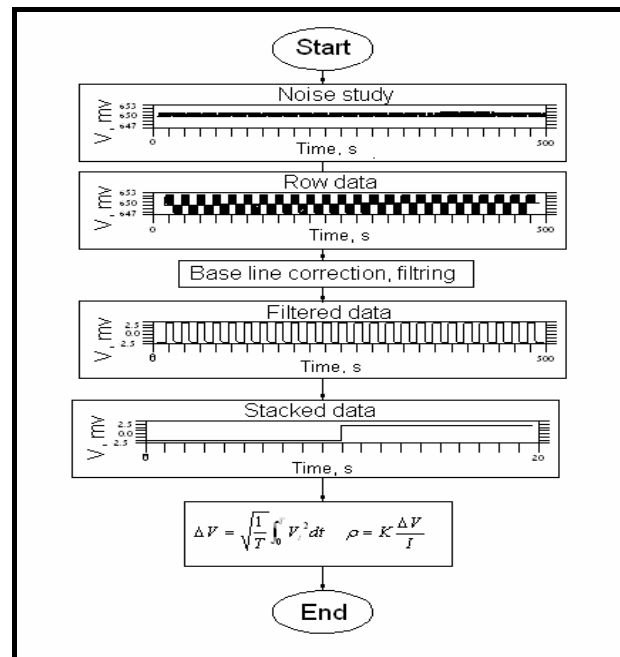
شکل ۱۴. نمودار طیف پاسخ رقمی‌کننده با آهنگ نمونه‌برداری ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ هرتز.



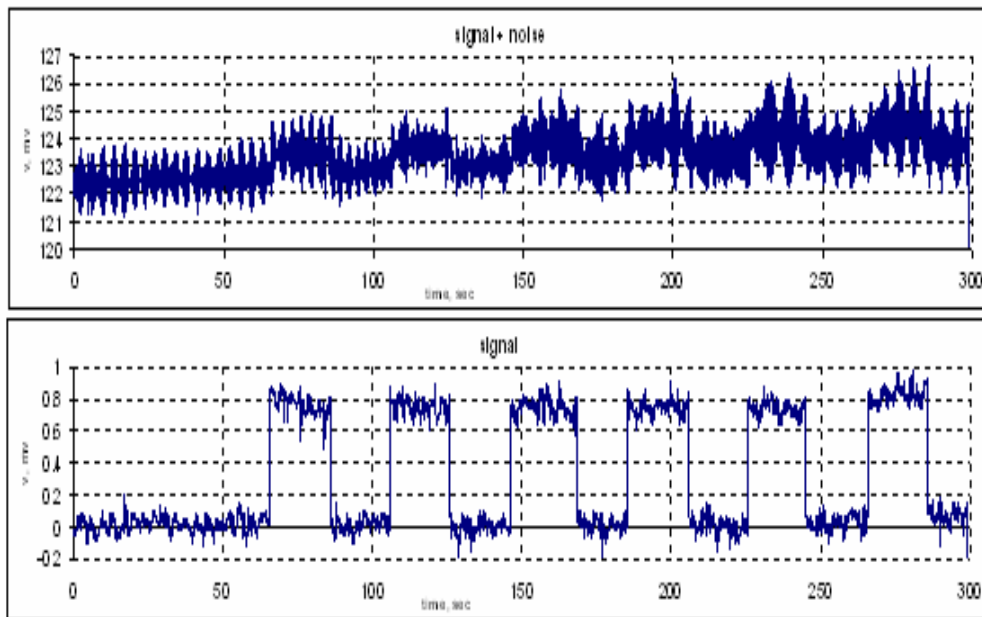
شکل ۱۵. فرستنده جریان الکتریکی.



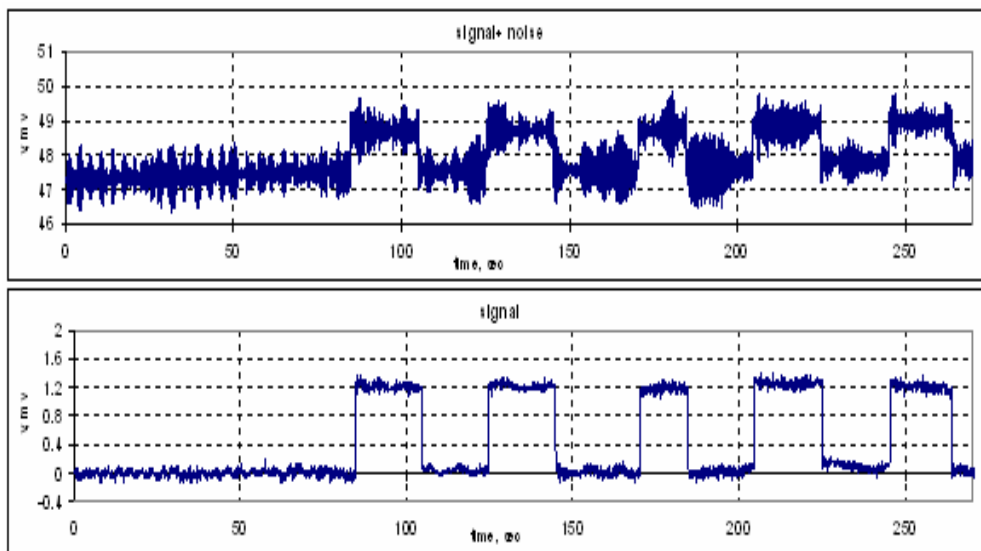
شکل ۱۶. نمودار ولتاژ تزریقی به زمین با دستگاه فرستنده جریان الکتریکی در تپ‌های متفاوت.



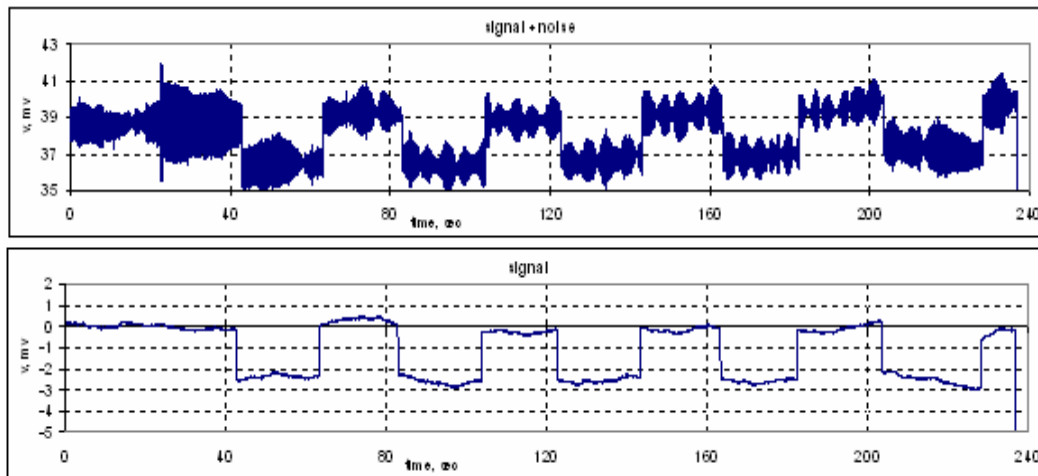
شکل ۱۷. مراحل متفاوت پردازش داده‌ها.



شکل ۱۸. (بالا) نمونه‌ای از نگاشت برداشت شده در محیط با سطح نوفه زیاد در شهر مشهد مقدس با استفاده دیتالاگر ۲۴ بیتی در آرایش چهارگوش دو قطبی - دو قطبی به فاصله ۲۰۰ متر و فرستنده جریان با تپ مربعی. با توجه به شکل، مقدار پتانسیل خودزا ۱۲۱ تا ۱۲۵ میلی‌ولت است و نوفه جریان برق و الکترومغناطیس کل نگاشت را تحت تأثیر قرار داده است که سیگنال با استفاده از دستگاه‌های معمولی قابل تشخیص نیست. در بخش پایینی شکل نگاشت تصحیح شده آن با استفاده از تصحیح خط مبنای، فیلتر کردن و هموارسازی، مقدار اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده حدود ۰/۷ میلی‌ولت است.



شکل ۱۹. (بالا) نمونه‌ای از نگاشت خام در آرایش چهارگوش دو قطبی - دو قطبی به فاصله ۱۵۰ متر، (پایین) سیگنال تصحیح شده نگاشت بالا.



شکل ۲۰. (بالا) نمونه‌ای از نگاشت تصحیح نشده در آرایش چهارگوش دو قطبی - دو قطبی به فاصله ۱۰۰ متر، (پایین) نگاشت تصحیح شده.

۷ نتیجه گیری

دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌ولت است. این امر می‌تواند نقش مؤثری در افزایش گستره کاربردهای روش مقاومت‌سنجی، به‌خصوص در مناطق شهری یا مناطق با سطح نوفه زیاد ایجاد کند. این قابلیت‌ها در شناسایی روند گسله‌ها، مسیر قنات‌ها و مانند آن، کمک شایان توجهی می‌کند.

منابع

- ABEM, 2005, Instrument manual resistivitymeter SAS-4000, ABEM, Sweden.
- Busby, J. P., 2000, The effectiveness of azimuthally apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations, *Geophys. Prospect.*, **48**, 677-695.
- Chambers, J., Ogilvy, R., Meldrum, P., and Nissen, J., 1993, 3D Resistivity imaging of buried oil and tar- contaminated waste deposits, *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.*, **4**, 3-15.
- Christiansen A. V., and Auken, E., 2004, Optimizing a layered and laterally constrained 2d inversion of resistivity data using Broyden's update and 1d derivation. *J. Appl. Geophys.*, **56**, 247-261.
- El-Qady G., and Ushijima, K., 2001, Inversion of DC resistivity data using neural networks: *Geophys. Prospect.*, **49**, 417-430.

در محیط‌های شهری، شبکه سیم‌ها و تیرهای برق، کابل‌های تلفن، لوله‌های گاز و آب، باعث ایجاد نوفه‌های الکتریکی می‌شود که با استفاده از دستگاه‌های معمولی ژئوالکتریک امکان برداشت داده با دقت مناسب را ناممکن می‌سازد. با برداشت تعدادی ایستگاه نوفه‌سنجی الکتریکی با توجه به اطلاعات موجود، مقدار و وضعیت نوفه‌ها را می‌توان ارزیابی کرد. انتخاب آرایش مناسب و نوع و مدت زمان ارسال تپ، وضعیت برداشت داده‌های ژئوالکتریک را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها می‌شود. استفاده از دستگاه ثابت برای ثبت اختلاف پتانسیل الکترودها یکی از راهکارهای مناسب ثبت رقمی است که فرایندهای پردازش برای کاهش دامنه نوفه‌ها را با استفاده از روش تصحیح خط مبنا، فیلتر کردن و هموارسازی امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه بر آن حجم زیادی داده قابل برداشت و پردازش است. دقت اندازه‌گیری، اختلاف پتانسیل دو سر الکترودها در دستگاه‌های معمولی حدود ۱ میلی‌ولت است درحالی‌که در دستگاه طراحی شده برای این پژوهش،

- Interpex, 2005, Resistivity 2D software, Colorado, Golden, USA.
- Loke M. H., Barker R. D., 1996, Practical techniques for 3d resistivity and data inversion: Geophys. Prospect., **44**, 499-523.
- Loke M. H., 2005, Rapid 2-D and 3-D resistivity & IP inversion using the least squares method, Geotomo software, Penang, Malaysia.
- Mathworks, Inc., 2005, Matlab Software, Mathworks, natica, USA.
- Maure M., 2006, Record earthquakes in digital way, seismowin software, Sara company, Italy.
- Schlumberger Web Site:
[http://www.slb.com/content/about/history.asp?](http://www.slb.com/content/about/history.asp)
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A., 1990, Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge University Press.
- Storz, H., Storz, W., and Jacobs, F., 2000, Electrical resistivity tomography to investigate geological structure: Geophys. Prospect., **48**, 455-471.