

# بررسی دقت مدل سازی پیشرو داده‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری در مدل سازی معکوس

علیرضا عرب امیری<sup>۱\*</sup>، علی مرادزاده<sup>۱</sup>، داود رجبی<sup>۱</sup>، نادر فتحیان پور<sup>۱</sup> و برنارد سیمون<sup>۲</sup>

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

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

<sup>۳</sup>آنستیتو علوم زمین و منابع طبیعی آلمان، هانور، آلمان.

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۵/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۱/۰۹

## چکیده

برداشت داده‌های الکترومغناطیسی حوزه بسامد هلیکوپتری (HEM) امروزه جایگاه ویژه‌ای در به نقشه درآوردن ساختارهای زمینی سه‌بعدی مقاومت ویژه با قدرت تفکیک بالا و سریع در مناطق وسیع یافته است. رویه استاندارد در تفسیر این داده‌ها نیز غالباً فرایند وارون سازی زمین لایه‌ای است که امروزه بهره‌مندی از آن عمومیت یافته است. به دلیل متحرک بودن سیستم برداشت در زمان اندازه‌گیری، همراهی نوفه با داده‌ها نیز اجتناب‌ناپذیر است. از آنجا که بخشی از این اطلاعات هنگام به کارگیری فیلترهای متعدد بر روی داده‌ها به منظور آماده‌سازی آنها برای ورود به فرایند مدل سازی از بین می‌روند؛ لازم است از روش‌هایی در مدل سازی استفاده شود که با کمترین خطا و با بیشترین دقت به مدلی از آنچه در زیر زمین وجود دارد؛ نزدیک شوند. در این نوشتار، ابتدا با سه روش مختلف و با استفاده از تبدیل سریع هنکل، به مدل سازی پیشرو داده‌های مربوط به سه مدل مصنوعی دو، سه و چهار لایه پرداخته؛ سپس مدل سازی معکوس بر روی نتایج مدل‌های پیشرو انجام گرفت. نتایج حاصل گویای آن است که روش گوپتاسارما-سینگ بهبودیافته به پاسخ بهتری در هر سه مثال می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** الکترومغناطیسی هلیکوپتری، مدل سازی پیشرو، مدل سازی معکوس، روش گوپتاسارما-سینگ، تبدیل سریع هنکل

E-mail: aamiri@gsi.ir

\*نویسنده مسئول: علیرضا عرب امیری

## ۱- مقدمه

در برداشت‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری (Helicopter borne electromagnetic (HEM))، به نقشه درآوردن مقاومت ویژه گستره وسیعی از زمین با تفکیک مناسب عرضی و در مدت زمانی کوتاه امکان‌پذیر است (Fraser, 1978). رویه استاندارد در تفسیر این داده‌ها نیز غالباً فرایند وارون سازی زمین لایه‌ای است. با ابداع ژرفای مرکزی (centroid depth) توسط Sengpiel & Siemon (1988)، ارائه نتایج مربوط به برداشت‌های الکترومغناطیسی هواپرد چند بسامدی در قالب مقاطع تغییرات مقاومت ویژه در برابر ژرفا فراگیر شد (Huang & Fraser, 1996). به گونه‌ای که تا به امروز نیز این شیوه در ارائه نتایج حفظ شده است. به علت وجود محدودیت در محدوده اثر (footprint) این سامانه‌ها و برداشت تعداد زیادی داده در طول خطوط پرواز، معمولاً مدل سازی معکوس یک بعدی داده‌ها کارساز است (Hodges & Siemon, 2008). بویژه زمانی که تغییرات مقاومت ویژه نسبت به ژرفا به شکل هموار باشد (Sengpiel & Siemon, 2000).

از آنجا که سامانه برداشت در زمان اندازه‌گیری متحرک است؛ همراهی نوفه با داده‌ها نیز برهیزناپذیر است. البته منابع نوفه در این برداشت‌ها متفاوت است. بخشی از آن به دلیل وجود فلزات اطراف سامانه برداشت مانند بدنه هلیکوپتر و کابل متصل به پرنده و مانند آن است. بخشی از نوفه به علت انحراف پرنده از حالت افقی در هنگام برداشت است (Siemon et al., 2008). همچنین نبود جفت‌شدگی (coupling) حداکثری در پیچه‌های گیرنده، فرستنده و ... بنابراین پیش از آن که داده‌های برداشت مدل سازی شوند؛ باید آماده‌سازی‌های مختلفی روی آنها اعمال شود. برای مثال، از فیلترهای متعددی برای حذف بخشی از نوفه‌ها استفاده شود. لازم به یادآوری این که همین رویه با حذف بخشی از داده‌ها همراه است. پس در مرحله مدل سازی، لازم است از روش‌هایی استفاده شود که با کمترین خطا و بیشترین دقت به مدلی از آنچه در زیر زمین وجود دارد؛ دست یابیم، چرا که در غیر این صورت تصمیم‌گیری‌های آتی با مشکل رو به رو خواهند شد.

در این نوشتار، سعی بر آن است تا با ارائه مثال‌هایی از مدل‌های مصنوعی و اعمال مدل سازی پیشرو داده‌ها، به مسئله تأثیر دقت مدل سازی پیشرو بر نتایج نهایی

## ۲- روش مطالعه

امروزه پیشرفت‌های قابل توجهی در دستگاه‌های برداشت داده‌های الکترومغناطیسی هلیکوپتری ایجاد شده است. به طوری که این دستگاه‌ها قادرند اطلاعات مربوط به لایه‌های زیرسطحی را با پنج یا شش بسامد مختلف جمع‌آوری کنند (Siemon, 2007). این دستگاه‌ها به طور معمول به شکل یک استوانه ساخته می‌شوند. سعی شده برای انعطاف‌پذیری و کاهش وزن نیز از کامپوزیت‌ها در ساخت بدنه آن استفاده شود. در درون این استوانه که پرنده (bird) خوانده می‌شود؛ تجهیزات متعددی مانند پیچه‌های مختلف فرستنده و گیرنده امواج الکترومغناطیسی، مغناطیس سنخ، دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، ارتفاع‌سنج لیزری، دوربین و ... قرار داده شده است. شکل ۱ نمایشگر نمایی از تجهیزات درون یک نمونه پرنده با نام دیگم (DIGHEM) ساخت شرکت فوگرو (Fugro) است (Fugro, 2003). در برداشت‌های الکترومغناطیسی حوزه بسامد، میدان اولیه مغناطیسی توسط پیچه‌های فرستنده و در بسامدهای مختلف تولید می‌شود. از آنجا که فاصله بین پیچه‌های فرستنده و گیرنده کم و نسبت به ارتفاع پرواز ناچیز است؛ بنابراین می‌توان میدان اولیه تولیدی را همانند یک میدان دوقطبی مغناطیسی تصور کرد.

نوسان این میدان باعث القای یک جریان گردابی (eddy) در داخل زمین می‌شود. این جریان نیز به نوبه خود باعث تشکیل یک میدان ثانویه وابسته به توزیع مقاومت ویژه مواد زیرسطحی می‌شود؛ که در پیچه گیرنده قابل دریافت است. به دلیل آن که اندازه این میدان نسبت به میدان اولیه خیلی ناچیز است، در عمل سعی می‌شود میدان اولیه حذف شده و میدان ثانویه نیز به شکل قسمت در میلیون (part per million (ppm)) نشان داده شود (Nabighian, 1996). لازم به یادآوری است که میدان ثانویه نسبت به میدان اولیه یک اختلاف فاز دارد. بنابراین این میدان مختلط بوده و دارای دو مؤلفه هم‌فاز (Real) و ناهم‌فاز (Quadrature) است. همچنین بسته به نحوه قرارگیری پیچه‌های فرستنده و گیرنده نسبت به هم، ممکن است سامانه‌های

در شکل ۲ نتایج مربوط به مدل سازی معکوس بر روی یک زمین دو لایه با سه روش بالا نشان داده شده است. در این شکل در بخش (الف)، نتایج عاری از نوفه، در قسمت (ب) با افزودن ۲ درصد نوفه تصادفی و در قسمت (ج) با افزودن ۵ درصد نوفه تصادفی به دست آمده است. همان گونه که در این اشکال به خوبی قابل مشاهده است؛ روش گویاسارما-سینگ نه تنها نتوانسته وجود دو لایه را مشخص کند؛ بلکه از نمایش روند حاکم بر مقاومت ویژه و ژرفای نیز به کلی ناتوان بوده است. در مقابل دو روش سیمون و گویاسارما-سینگ بهبود یافته توانسته اند تا حد زیادی مقاومت ویژه و ژرفای قرارگیری لایه های زیرسطحی را نشان دهند. در این مثال تفاوت قابل ملاحظه ای در روش سیمون و گویاسارما-سینگ بهبود یافته دیده نمی شود. در نهایت این مثال گویای آن است که با استفاده از روش سیمون و گویاسارما-سینگ بهبود یافته می توان به مدل قابل قبولی از داده های حاصل از یک زمین دو لایه رسید. اما در شکل ۳ نتایج مربوط به مدل سازی معکوس بر روی یک زمین سه لایه با سه روش نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل نیز آشکارا قابل مشاهده است؛ روش گویاسارما-سینگ در این مثال تنها توانسته است ژرفا و مقاومت ویژه لایه نخست را مشخص کند و در شناسایی لایه های ژرف تر کاملاً ناتوان بوده است. در مقابل، دو روش دیگر یعنی روش سیمون و گویاسارما-سینگ بهبود یافته، بهتر عمل نموده و در این دو روش شاهد نمایش بهتری از تغییرات ژرفایی و نمایش مقاومت ویژه زیرسطحی هستیم. البته باید این موضوع را مد نظر داشت که این دو روش نیز موفقیت کاملی در شناسایی و ارائه تغییرات هر سه لایه نشان نمی دهند. در این میان روش گویاسارما-سینگ بهبود یافته در شناسایی تغییرات ژرفا و مقاومت ویژه، بویژه برای لایه دوم بهتر از روش سیمون عمل کرده است.

از نکته های حائز اهمیت در این مثال این است که نتایج حاصل از روش گویاسارما-سینگ در بسامدهای بالاتر از روش سیمون هم بهتر بوده است؛ به طوری که این نتایج در قسمت (الف) یعنی نتایج بدون نوفه و در قسمت (ب) با ۲ درصد نوفه با وضوح بیشتری قابل رصد است. نکته مهم دیگر، پایداری بسیار خوب روش گویاسارما-سینگ بهبود یافته نسبت به روش گویاسارما-سینگ در برابر نوفه موجود در داده ها است. آخرین مثال مربوط به یک زمین چهار لایه است که در شکل ۴ نتایج مربوط به مدل سازی معکوس آن با سه روش قبل نشان داده شده است. چند نکته قابل توجه در این شکل نیز عبارتست از این که: اولاً هیچ کدام از روش های مدل سازی مورد بحث نتوانسته اند روند حاکم بر تغییرات ژرفایی و مقاومت ویژه لایه های زیرسطحی بویژه میان لایه نازک موجود را به طور کامل مشخص کند. ثانیاً روش گویاسارما-سینگ در نهایت تنها مدلی شبیه به نتایج مربوط به مدل سه لایه قبل (شکل ۳) را ارائه کرده است. همچنین در برابر نوفه افزوده شده به داده ها نیز بسیار ناپایدار عمل کرده است. از میان دو روش سیمون و گویاسارما-سینگ بهبود یافته نیز، بر خلاف تشخیص درست تعداد لایه ها در هر دو روش، روش گویاسارما-سینگ تغییرات مقاومت ویژه لایه سوم را بهتر از روش سیمون نشان داده است. نکته دیگر این که هر دو این روش ها در نهایت به سمت نمایش لایه چهارم پیش رفته اند، اما هرگز موفق به شناسایی کامل آن نشده اند. در مورد هر دو آنها یکسان بوده است. از میان دو روش سیمون و گویاسارما-سینگ بهبود یافته نیز، هر دو کاملاً مشابه عمل نموده اند و از این جهت تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند. نکته دیگر این که هر چند هر دو این روش ها در نهایت به سمت نمایش لایه چهارم پیش رفته اند، اما هرگز موفق به شناسایی کامل آن نشده اند.

### ۳- نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدل سازی پیشرو و در نهایت معکوس بر روی مدل های متعدد و آنچه

مختلف هم صفحه یا هم محور تشکیل شوند. اما معادله القای الکترومغناطیس برای حالت هم صفحه افقی عبارتست از:

$$Z = (R + iQ) = r^3 \int_0^{\infty} R_0(\omega, \lambda, \rho(z)) \lambda^2 e^{-2\lambda h} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

که در آن  $Z = \sqrt{-1}$ ، میدان مغناطیسی ثانویه  $R_0$  (ppm) مؤلفه هم فاز،  $Q$  مؤلفه ناهم فاز،  $J_0$  تابع بسل نوع اول درجه صفر،  $R_0$  ضریب انعکاسی مختلط (وابسته به بسامد سامانه، عدد موج  $\lambda$  و توزیع ژرفی مقاومت ویژه  $\rho(z)$  سیستم)،  $r$  فاصله گیرنده و فرستنده و  $h$  ارتفاع پرنده از زمین و هر دو بر حسب متر است. محاسبه ضریب بازتاب در محیط نیم فضای همگن نیز با استفاده از روابط زیر انجام می شود (Mundry, 1984).

$$p = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}}, \quad v = (\lambda^2 + \frac{2i}{p^2})^{1/2}, \quad R_0 = \frac{\lambda - v}{\lambda + v} \quad (2)$$

که در آن،  $\rho$  مقاومت ویژه نیم فضا،  $p$  ژرفای پوسته و  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Vs/Am نفوذپذیری مغناطیسی خلأ تعریف می شود. برای رسیدن به مقصود اصلی که همان تغییرات مقاومت ویژه نسبت به ژرفا است؛ باید معادله ۱ حل شود. از آنجا که این معادله با روش های مرسوم تحلیلی قابل حل نیست؛ یکی از راهکارهای اجرایی، بهره گیری از روش های حل عددی است. در این نوشتار، از حل تبدیل هنکل سریع استفاده شده است. در این میان نیز راهکار مورد استفاده، روش گویاسارما-سینگ (Guptasarma & Singh, 1997) است. حال در پی آنیم تا نشان دهیم نقش دقت مدل سازی پیشرو در رسیدن به نتایج معکوس چیست؟ برای انجام این مهم چند مدل مصنوعی از زمین لایه ای را در نظر گرفته؛ به بررسی موضوع پرداخته می شود؛ ضمن آن که برای نزدیک شدن به داده های زمین واقعی در چند مرحله مقادیر مختلفی نوفه تصادفی نیز به داده ها افزوده خواهد شد؛ تا پایداری روش مورد استفاده مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد. مدل های مورد استفاده عبارتند از زمین دو لایه، سه لایه و چهار لایه. فرض بر استفاده از داده های حاصل از برداشت با بسامدهای بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ هرتز است. همه پیچهای فرستنده و گیرنده هم صفحه افقی و فاصله جدایش آنها از یکدیگر ۸ متر در نظر گرفته شده است.

اما در محاسبه مقاومت ویژه و ژرفا باید خاطر نشان نمود که به دلیل وابستگی کاملاً غیر خطی میدان ثانویه به مقاومت ویژه نیم فضا (رابطه ۱)؛ مقاومت ویژه به استفاده از یک جدول تفسیر (look-up table)، برازش منحنی یا روش های تکراری محاسبه می شود (Beard, 2000). از سوی دیگر، از آنجا که ارتفاع اندازه گیری شده به وسیله سنسور لیزری ارتفاع سنج ممکن است تحت تأثیر درختان و ساختمان های موجود در مسیر پرواز قرار گیرد (Beamish, 2002)؛ در محاسبه مقاومت ویژه ظاهری از هر دو مؤلفه هم فاز و ناهم فاز میدان ثانویه استفاده خواهد شد.

نخستین روش محاسبه، استفاده از هنکل گویاسارما-سینگ بدون هیچ تغییری در معادله القای الکترومغناطیس (معادله ۱) است (Guptasarma & Singh, 1997). دومین روش، روش سیمون است که در این روش از هنکل سریع یوهانسون-سورنسن (Johanson & Sørensen, 1979) استفاده شده است. سرانجام سومین روش عبارتست از روش گویاسارما-سینگ بهبود یافته که با تعریف پارامتر  $\alpha_0$  در معادله ۱ به شرح ذیل حاصل می شود (Wait, 1982):

$$Z = R + iQ = r^3 \int_0^{\infty} R_0(\omega, \lambda, \rho(z)) \frac{\lambda^3}{\alpha_0} e^{-2\alpha_0 h} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3)$$

در این رابطه،  $\alpha_0 = (\lambda^2 - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0)^{1/2}$ ، ثابت دی الکتریک است، همچنین  $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$

برداشت، از اهمیت بالایی برخوردارند. به کارگیری روش‌های مبتنی بر دقت نیز در دستیابی به نتایج مناسب، لازم است. به عبارت ساده‌تر باید یک راه حل بهینه از نظر دقت و زمان مدل‌سازی انتخاب و به کار گرفته شود. البته انتظار این است که با پیشرفت سریع فناوری و بهبود سرعت محاسباتی رایانه‌ها، عامل زمان با سرعت افزون‌تری مرتفع شود.

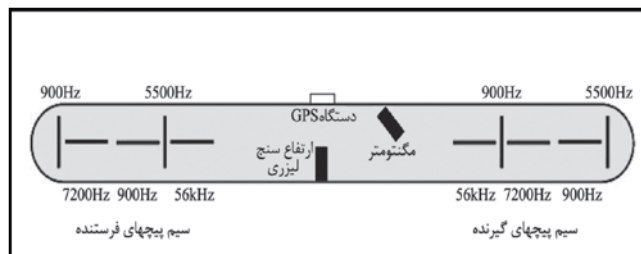
### سپاسگزاری

انجام این پژوهش بدون همکاری آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی از دانشگاه صنعتی شاهرود و مساعدت آقای دکتر اووه میر (Uwe Meyer) و همکاران ایشان در انستیتو علوم زمین و منابع طبیعی آلمان (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR))، میسر نبود. از ایشان به خاطر این تلاش‌ها سپاسگزاریم.

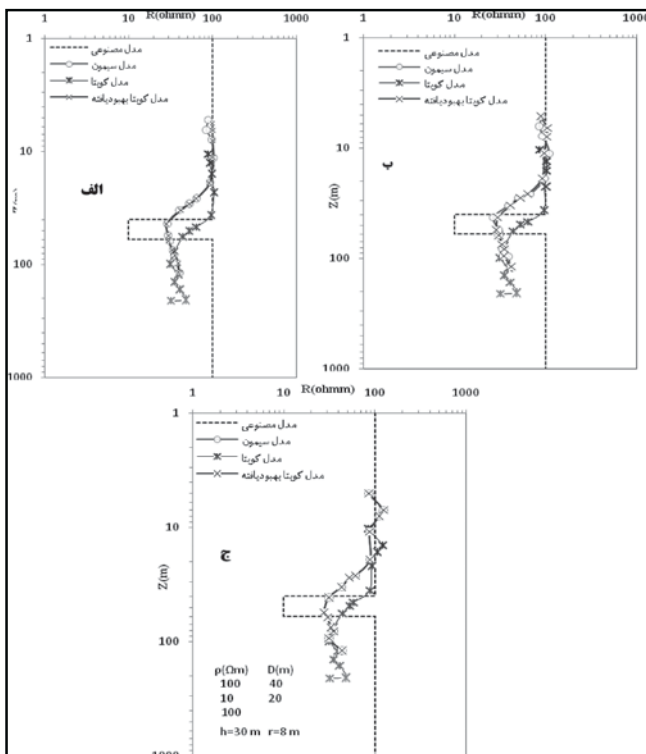
به اختصار در این نوشتار آمده است؛ به خوبی گویای آنست که در مطالعه داده‌های الکترومغناطیس هوابرد هلیکوپتری نقش داده‌های اولیه برداشت (در مثال‌های مربوط به این نوشتار نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشرو)، در برآورد شرایط حاکم بر زمین زیرسطحی بسیار مهم است. از آنجا که در این روش در عمل بخشی از داده‌ها نیز به واسطه تحلیل و آماده‌سازی‌های اولیه از بین می‌روند (Siemon, 2007)؛ بنابراین توجه به فرایند برداشت پیش از آماده‌سازی داده‌ها، بسیار قابل تأمل است.

از سوی دیگر در مراحل آماده‌سازی و تحلیل داده‌ها نیز آنچه باید مورد توجه جدی قرار گیرد این است که از فیلترهای مناسب و حتی‌الامکان دقیق و به روز استفاده شود تا حجم کمتری از داده‌های برداشت از بین رود.

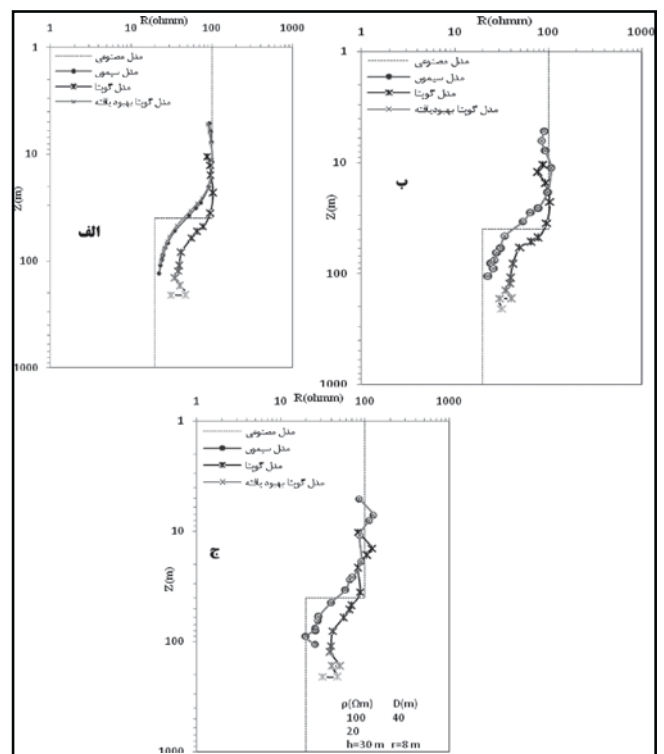
یکی از پیشنهادات برای دسترسی به این مهم، استفاده از روش‌های نوین تعدیل (Levelling) مانند میکرو تعدیل (micro levelling) است (Siemon, 2007). در این میان، توجه به روش‌های مدل‌سازی معکوس نیز قابل توجه است. ضمن این که در این برداشت‌ها، به کارگیری روش‌های سریع به واسطه حجم بسیار زیاد داده‌های



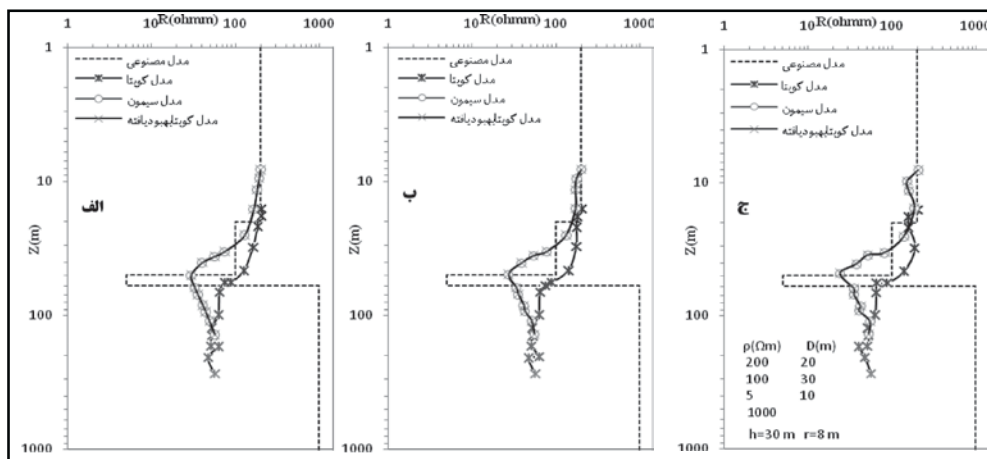
شکل ۱- نمایی از تجهیزات درون سیستم DIGHEM<sup>V</sup> (After Fugro, 2003)



شکل ۳- نتایج مربوط به مدل‌سازی معکوس بر روی یک زمین سه لایه با سه روش سیمون، گوتاسارما-سینگ و گوتاسارما-سینگ بهبود یافته الف) عاری از نوفه، ب) با ۲ درصد نوفه تصادفی، ج) با ۵ درصد نوفه تصادفی



شکل ۲- نتایج مربوط به مدل‌سازی معکوس بر روی یک زمین دو لایه با سه روش سیمون، گوتاسارما-سینگ و گوتاسارما-سینگ بهبود یافته الف) عاری از نوفه، ب) با ۲ درصد نوفه تصادفی، ج) با ۵ درصد نوفه تصادفی



شکل ۴- نتایج مربوط به مدل سازی معکوس بر روی یک زمین چهار لایه با سه روش سیمون، گویتاسارما- سینگ و گویتاسارما- سینگ بهبود یافته الف) عاری از نوفه، ب) با ۲ درصد نوفه تصادفی، ج) با ۵ درصد نوفه تصادفی

## References

- Abramowitz, M. & Stegun, I. A., 1964- Handbook of mathematical functions, Dover, New York, 1058pp.
- Beamish, D., 2002- An assessment of inversion methods for AEM data applied to environmental studies: Journal of Applied Geophysics, 51: 75-96.
- Beard, L. P., 2000- Comparison of methods for estimating earth resistivity from airborne electromagnetic measurements, Journal of Applied Geophysics, 45: 239-259.
- Fraser, D. C., 1978- Resistivity mapping with an airborne multi-coil electromagnetic system, Geophysics, 43: 144-172.
- Guptasarma, D. & Singh, B., 1997- New digital filters for Hankel J0 and J1 transforms, Geophysical Prospecting, 45: 745-762.
- Hodges, G. & Siemon, B., 2008- Comparative analysis of one-dimensional inversions of helicopter-borne frequency-domain electromagnetic data. In: AEM 2008, 5th International Conference on Airborne Electromagnetic, Haikko Manor, Finland.
- <http://www.fugroairborne.com>, Airborne electromagnetic surveys short course, 2003- Fugro Airborne Surveys Inc.
- Huang, H. & Fraser, D. C., 1996- The differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping. Geophysics, 61: 100-109.
- Johanson, H. K. & Sørensen, K., 1979- Fast Hankel transforms. Geophysical Prospecting, 27: 876-901.
- Mundry, E., 1984- On the interpretation of airborne electromagnetic data for the two-layer case: Geophysical Prospecting, 32: 336-346.
- Nabighian, M. N., 1996- Electromagnetic Methods in Applied Geophysics- Applications, Part A and Part B, Society of Exploration Geophysics, 972pp.
- Sengpiel, K. P. & Siemon, B., 1998- Examples of 1D inversion of multifrequency AEM data from 3D resistivity distributions, Exploration Geophysics, 29: 133-141.
- Siemon, B. & Auken, E. & Christiansen, A. V., 2008- Laterally constrained inversion of helicopter-borne frequency-domain electromagnetic data, Journal of Applied Geophysics, xx: xxx-xxx.
- Siemon, B., 2001- Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. Journal of Applied Geophysics, 46: 65-76.
- Siemon, B., 2007- Levelling of helicopter-borne frequency-domain electromagnetic data, Journal of Applied Geophysics, xx: xxx-xxx.
- Siemon, B., Röttger, B. & Rehl, H. J., 2006- Technical report on the helicopter-borne geophysical investigation in the province Nanggroe Aceh Darussalam, Northern Sumatra, Indonesia, survey area Banda Aceh/Aceh Besar, 2005, Helicopter Project Aceh (HELP ACEH). BGR Report Vol. A-1, Archives No. 0126196 A-1, Hannover.
- Wait, J. R., 1982- Geo-Electromagnetism, Academic Press Inc, New York.