

# معرفی انتگرال بهبود یافته ماندری در مدل سازی معکوس داده های الکترومغناطیسی هوا برد و مقایسه نتایج آن با انتگرال ماندری

علیرضا عرب امیری<sup>۱\*</sup>، علی مرادزاده<sup>۱</sup>، داود رجبی<sup>۱</sup>، برنارد سیمون<sup>۲</sup> و نادر فتحیان پور<sup>۳</sup>

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

<sup>۲</sup>انستیتو علوم زمین و منابع طبیعی آلمان، هانور، آلمان.

<sup>۳</sup>دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۰/۲۵

## چکیده

برداشت های الکترومغناطیسی هوا برد هلیکوپتری نزدیک به سی سال است که در بررسی های اکتشافی موادمعدنی، آب، مطالعات زیست محیطی و همچنین تهیه نقشه زمین شناسی در مناطق وسیع استفاده می شوند. اما یکی از مهم ترین مسائل در بهره مندی از اطلاعات حاصل از این برداشت ها، تفسیر درست آنهاست. در غیر این صورت انجام آن جز صرف هزینه ای بالا، نتیجه خاص دیگری به دنبال نخواهد داشت. از این رو، تفسیر این داده ها، قدمتی به اندازه خود برداشت ها دارد. افراد متعددی سعی در بهبود راهکارهای تفسیر این داده ها داشته اند و تاکنون به موفقیت های خیلی خوبی نیز دست یافته اند. تقریباً در تمامی این برداشت ها، نتیجه به صورت مقاطع تغییرات مقاومت ویژه (یا عکس آن هدایت ویژه) در برابر ژرفا، ارائه می شود. برای دستیابی به این مهم، نخستین گام حل معادله القای میدان الکترومغناطیسی است. از آنجا که حل این انتگرال با روش های تحلیلی مرسوم امکان پذیر نیست؛ روش های عددی متعددی برای حل آن ابداع شده است. از جمله این روش ها می توان به تبدیل لاپلاس، تبدیل هنکل، روش ژاکوبی و ... اشاره نمود. از سوی دیگر افراد مختلف، راهکارهای متعددی برای حل معادله القای میدان الکترومغناطیسی توسط این روش ها ارائه نموده اند. یکی از مهم ترین این روش ها، تبدیل هنکل سریع است. برای حل معادله القای الکترومغناطیسی به روش هنکل سریع، در اختیار داشتن کرنل و ضرایب وزنی، نیازی جدی است، به طوری که با نبود یکی از این دو، حل معادله یاد شده ناممکن است. در این نوشتار ابتدا روش گوپتاسارما-سینگ (Guptasarma-Singh) برای حل انتگرال معادله القای میدان الکترومغناطیسی مطرح می شود. آنگاه نتایج حاصل از به کارگیری این روش و تصحیح آن مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد، ضمن آن که نتایج حاصل از این تصحیح در دو مدل مصنوعی، با مدل سازی معکوس به نمایش گذارده می شود. در این میان، نتایج حاصل پس از افزودن پارامتر  $\alpha_0$  آشکارا گویای بهبود نتایج مدل سازی معکوس است. ضمن این که مسئله نقاط تکین نیز که در بسامدهای بالا در تمامی روش های حل رخ می دهند؛ نیز نه به طور کامل، اما تا حد زیادی برطرف شده است.

**کلیدواژه ها:** الکترومغناطیسی هوا برد هلیکوپتری، مدل سازی معکوس، انتگرال ماندری، انتگرال بهبود یافته ماندری

\*نویسنده مسئول: علیرضا عرب امیری

## ۱- مقدمه

برداشت های الکترومغناطیسی (HEM) نزدیک به سه دهه است که به عنوان ابزاری مناسب و سریع (Fraser, 1978) در تهیه نقشه های زمین شناسی، اکتشاف آب های زیرزمینی و موادمعدنی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین امروزه این برداشت ها جایگاه خود را در مطالعات زیست محیطی به خوبی باز کرده اند. به طور معمول نتیجه این برداشت ها، ارائه توزیع مقاومت ویژه مواد زیرسطحی در برابر ژرفا است. در این برداشت ها که غالباً "از ارتفاع کمتر از یک صد متری زمین انجام می شود؛ سیستم های اندازه گیری به ثبت میدان الکترومغناطیسی ثانویه ناشی از ارسال میدان اولیه ای با بزرگای بیش از ۳ تا ۶ برابر آن می پردازند (Siemon, 2007). به دلیل اندازه بسیار کوچک میدان ثانویه نسبت به میدان اولیه، نتایج به صورت قسمت در میلیون (ppm) نشان داده می شوند. برای رسیدن به مقادیر نزدیک به مقاومت ویژه و ژرفا، بهبود سیستم های برداشت، آماده سازی و مدل سازی دقیق تر نتایج ضروری است.

در حال حاضر سیستم های مدرن برداشت هلیکوپتری قادرند اطلاعات مربوط به چهار تا شش بسامد مختلف را در بازه تقریبی ۲۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ هرتز ثبت نمایند (Siemon, 2007). پیش از تفسیر نتایج لازم است داده های برداشت شده موازنه (کالیبره) و تصحیح شوند. پس از آن فرایند مدل سازی وارون با استفاده از الگوریتم های زمین همگن یا نیم فضای لایه ای بر روی داده ها اعمال می شود. در نهایت نتایج به صورت نقشه های مقاومت ویژه یا مقاطع عرضی نمایش داده می شوند

(Sengpiel, 1990; Sengpiel & Siemon, 1998)

این نوشتار به دنبال این است که در فرایند مدل سازی داده های الکترومغناطیسی هلیکوپتری، ضمن بررسی نحوه محاسبه معادله القای الکترومغناطیسی و فرمول محاسبه میدان مغناطیسی ثانویه، به نحوی آن را بهبود بخشد و در نهایت نتایج حاصل از محاسبه اولیه و بهبود یافته را با انجام مدل سازی معکوس بر روی چند مدل مصنوعی نشان دهد.

## ۲- فرمول های پایه

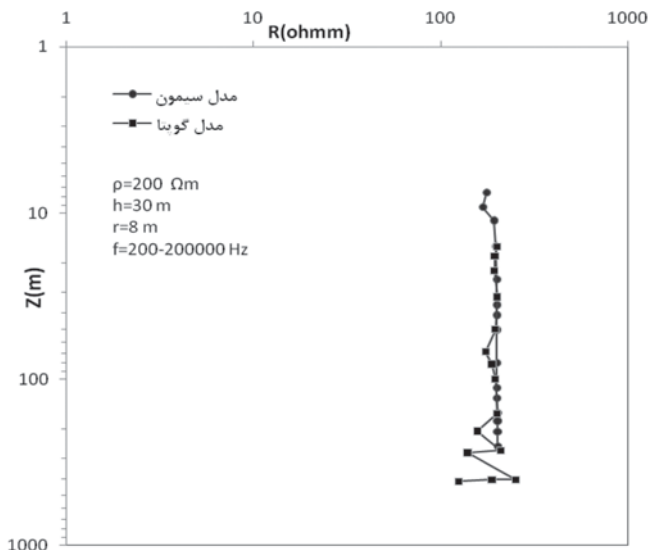
سیستم های نوین هلیکوپتری الکترومغناطیسی حوزه بسامد، دارای پیچیده های متعدد فرستنده و گیرنده با قطری نزدیک به نیم متر هستند. سیگنال فرستنده یا همان میدان مغناطیسی اولیه، در نتیجه یک شار جریان الکتریکی سینوسی در پیچ فرستنده و در بسامدهای مختلف، ایجاد می شود. شرایط حاکم بر محیط تولید این میدان، مانند فاصله پیچ های گیرنده و فرستنده سبب می شود شرایطی مانند یک میدان دوقطبی شکل گیرد. نوسانات میدان مغناطیسی اولیه باعث تشکیل جریان های گردابی زیرسطحی می شود. این جریان ها نیز منجر به شکل گیری یک میدان مغناطیسی ثانویه متناسب با توزیع مقاومت ویژه زمین می شوند. میدان مغناطیسی ثانویه در پیچ گیرنده ثبت می شود و وابسته به میدان اولیه تولیدی در پیچ فرستنده است. به دلیل آن که میدان ثانویه نسبت به میدان اولیه بسیار کوچک تر است؛ به طور معمول میدان اولیه



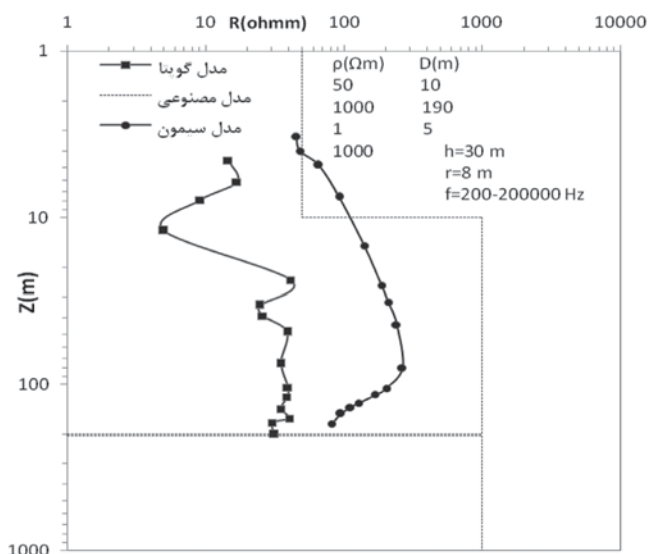
مدل‌سازی هستند؛ نیز استفاده نمود و در نتیجه با استفاده از یک مدل اولیه دقیق، در نهایت به نتایج دقیق‌تری آن هم در زمان کوتاه‌تر دست یافت. البته همچنان ابهاماتی وجود دارد که این نکات نیز باید در تحقیقات آتی بیشتر مورد توجه واقع شوند. یکی از مهم‌ترین این نکات، بهبود نتایج در تفکیک دقیق‌تر لایه‌های زیر سطحی و مقاومت‌ویژه آنهاست. دیگر آن‌که هنوز هم مشکلاتی در بسامدهای خیلی زیاد برداشت وجود دارد. به نحوی که حذف کامل نقاط تکین هنگام تغییر بسامد نسبت به مقادیر حقیقی و موهومی معادله القا، از جمله آنهاست.

### سپاسگزاری

انجام این تحقیق بدون مساعدت‌های آقایان دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی از دانشگاه صنعتی شاهرود، دکتر اووه میر (Uwe Meyer) و همکاران ایشان در انستیتو Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR)، ممکن نبود. از ایشان به خاطر این مساعدت‌ها سپاسگزاریم.



شکل ۱- نتایج مدل‌سازی مربوط به یک زمین همگن با مقاومت‌ویژه ۲۰۰ اهم متر با دو روش سیمون و گوپتا



شکل ۲- نتایج مدل‌سازی مربوط به یک زمین چهار لایه با دو روش سیمون و گوپتا

که در آن،  $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$  ثابت دی‌الکتریک هوا یا خلاء و  $\rho_0 \gg 10^{10} \Omega m$  مقاومت‌ویژه هواست. ذکر این نکته نیز ضروری است که در بسامدهای پایین ( $f < 10000 \text{ Hz}$ ) معمولاً "بخش حقیقی میدان ثانویه خیلی کوچک‌تر از بخش موهومی آن است. بنابراین می‌توان در این حالت با برآورد خوبی  $\alpha_0 \approx \lambda$  در نظر گرفت. اما در بسامدهای بالاتر این چنین نیست؛ که در این حالت نقش پارامتر  $\alpha_0$  در تصحیح نتایج جدی‌تر است. حال بهبود یافته انتگرال ماندری به شکل رابطه (۱۴) در می‌آید:

$$Z = (R + iQ)^{-3} \int_0^{\infty} R_0(\omega, \lambda, \rho(z)) \frac{\lambda^3}{\alpha_0} e^{-2\alpha_0 h} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (14)$$

از مقایسه رابطه (۱۴) و (۳) داریم:

$$k(\lambda) = r^3 \frac{\lambda^3}{\alpha_0} e^{-2\alpha_0 h} R_0 \quad (15)$$

اما در نیم‌فضای همگن:

$$R_0 = \frac{\sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0} - \sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}}{\sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0} + \sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}} \quad (16)$$

$$k(\lambda) = r^3 \frac{\lambda^3}{\alpha_0} e^{-2\alpha_0 h} \quad (17)$$

حال کد مربوط به الگوریتم حاصل را بازنویسی نموده و به مدل‌سازی دو مثال پیشین پرداخته می‌شود. برای مدل زمین همگن نتایج حاصل در شکل ۳ نمایش داده شده است.

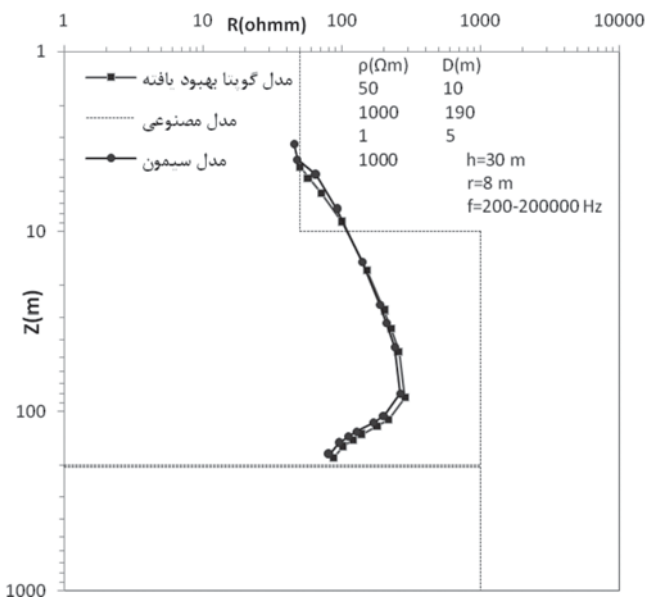
همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش گوپتا بهبود یافته نسبت به حالت پیشین بسیار دقیق‌تر شده و حتی در محاسبه مقاومت‌ویژه نسبت به روش سیمون نیز بهبود وضعیت نشان می‌دهد و به صورت بسیار جزئی‌تر در عمق نفوذ نیز از این روش پیشی گرفته است.

نتایج مربوط به مدل زمین چهار لایه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. ضمن مقایسه این نتایج با شکل ۲، بهبود بسیار محسوس نتایج هنگام به کارگیری پارامتر  $\alpha_0$  در روش گوپتا، به خوبی قابل تأیید است. ضمن این که در روش گوپتا بهبود یافته، مقادیر مقاومت‌ویژه بخصوص برای لایه‌های ژرف‌تر نسبت به روش سیمون اندکی به واقعیت نزدیک‌ترند.

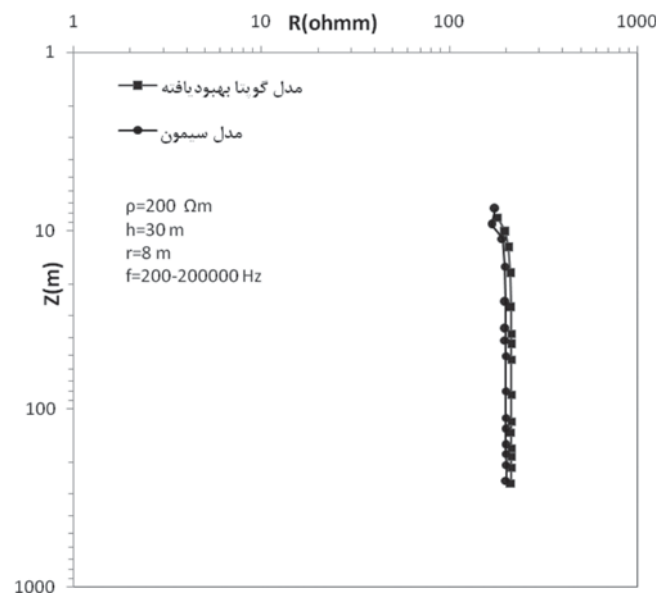
لازم به یادآوری این که بهبود نتایج مدل‌سازی بر روی مدل‌های متعددی مشاهده شد؛ که نگارندگان تنها به ذکر دو مورد از آنها بسنده نمودند.

### ۳- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی مدل‌های مصنوعی حاکی از آن است که با اعمال ضریب  $\alpha_0$  در انتگرال القای الکترومغناطیس، مقادیر حاصل از مدل‌سازی پیشرو بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته و در رسیدن به نتایج وارون نیز بهبود آشکاری حاصل می‌شود. ضمن آن که در بسامدهای خیلی زیاد نیز که موضوع نوینی در تحقیقات جاری دنیا در این زمینه است، به دلیل مشکلاتی که در مقادیر حقیقی و موهومی معادله القا در این بسامدها رخ می‌دهد و نقاط تکین متعددی ظاهر می‌شوند، بهبود قابل ملاحظه‌ای حاصل شده است. یکی دیگر از مهم‌ترین نتایج این نوشتار، بهبود نتایج مدل‌سازی بدون اندک تغییری در سرعت دستیابی به نتایج است. چرا که در عمل و هنگام مدل‌سازی حجم بالایی از داده‌های هوابرد، عامل زمان در تصمیم‌سازی و قضاوت درباره یک روش مدل‌سازی بسیار حائز اهمیت است. نکته قابل توجه دیگر این که، با رسیدن به نتایج دقیق مقاومت‌ویژه و ژرفا در روش‌های خیلی سریع، می‌توان از این نتایج در روش‌های دقیق‌تر مدل‌سازی که هنگام اجرا نیازمند یک مدل اولیه برای شروع فرایند



شکل ۴- نتایج مدل‌سازی مربوط به به یک زمین چهار لایه با دو روش سیمون و گویتا بهبود یافته



شکل ۳- نتایج مدل‌سازی مربوط به یک زمین همگن با مقاومت ویژه ۲۰۰ اهم متر با روش سیمون و گویتا بهبود یافته

**References**

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.  
 Mundry, E., 1984- On the interpretation of airborne electromagnetic data for the two-layer case: *Geophysical Prospecting*, 32: 336-346.  
 Sengpiel, K. P. & Siemon, B., 1998- Examples of 1D inversion of multifrequency AEM data from 3D resistivity distributions, *Exploration Geophysics*, 29: 133-141.  
 Sengpiel, K. P. & Siemon, B., 2000- Advanced inversion methods for airborne electromagnetic, *Exploration. Geophysics*, 65: 1983-1992.  
 Sengpiel, K. P., 1990- Theoretical and practical aspects of ground-water exploration using airborne electromagnetic techniques. In: Fitterman, D.V. (ed.), *Proceedings of the USGS Workshop on Developments and Applications of Modern Airborne Electromagnetic Surveys*. 1987: Golden, Co, 149-154. USGS Bulletin 1925, Denver, Co.  
 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.  
 Wait, J. R., 1982- *Geo-Electromagnetism*, Academic Press Inc, New York.

## Definition and Comparison Improved Mundry's Integral with Mundry's Integral on HEM Data Inverse Modeling

A. R. Arab-Amiri<sup>1\*</sup>, A. Moradzadeh<sup>1</sup>, D. Rajabi<sup>1</sup>, B. Siemon<sup>2</sup> & N. Fathianpour<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shahrood University of Technology, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood, Iran.

<sup>2</sup>Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany.

<sup>3</sup>Isfahan University of Technology (IUT), Faculty of Mining Engineering, Isfahan, Iran.

Received: 2008 August 23

Accepted: 2009 January 14

### Abstract

It is about 30 years that Helicopter electromagnetic (HEM) surveys are being used for rapid mineral and ground water exploration, environmental investigations and also geological mapping in extensive areas. Despite this, one of the most important problems in using obtained data from the surveys is accurate interpretation of the data. Otherwise, there will be no beneficial results while spending high costs. Thus the interpretation of the data is as old as the surveys. Several experts have tried to improve the interpretation of HEM data and they have achieved great successes. Almost the results of all these surveys are presented as resistivity (or conductivity)-depth sections. To reach this target, the first step is to solve the electromagnetic induction integral equation. As solving this integral is not possible using analytical methods, several numerical methods such as Laplace transformation, Hankel transformation and Jacobi-Matrix methods have been suggested for the solution of the integral, and different approaches have been presented with each method by various authorities. One of the most important solution methods is fast Hankel transformation. In this paper, it is attempted to use this method for finally obtaining resistivity-depth sections. For solving the induction equation by this method, we need the kernel function of the integral and weighting coefficients that replace the Bessel function in the integral. For this, first we use the Guptasarma-Singh method. Then results of this method are corrected and evaluated. Then, these results will be analyzed and tested with two synthetic models in addition to presenting the results of inverse modeling. Finally, by adding new parameter named  $\alpha_0$  to induction equation, we will clearly see an improvement in the results of inverse modeling. Meanwhile, the problem of singularity that occurs at high frequencies is almost removed.

**Key words:** Helicopter electromagnetic, Inverse modeling, Mundry's integral, Improved Mundry's integral.

For Persian Version see pages 115 to 118

\*Corresponding author: A. R. Arab-Amiri; E-mail: aamiri@gsi.ir

## The Study of Calcareous Nannofossils Correlation and Foraminifera Planktonic of Gurpi Formation in East of Behbahan

S. Senemari<sup>1\*</sup>, L. Fazli<sup>2</sup> & M. Omrani<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mining, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology, Faculty of science, Islamic-Azad University, Damavand, Iran

<sup>3</sup> Department of Geology, Faculty of science, Islamic-Azad University, Karaj, Iran

Received: 2007 May 01

Accepted: 2008 December 15

### Abstract

Nannofossils and foraminifera planktonic have been short range stratigraphy and spread vast geographical because of that two fossils groups can be used for subdividing biostratigraphy. According to this, and due to the lack of any correlational paleontological study, the nannofossils of Gurpi Formation have been investigated in north of Gachsaran. This formation has been formed of marl. As a result of this study and based on the obtained nannofossils and foraminifera planktonic, the studied section is Late Santonian to Late Maastrichtian in age, that corresponding to CC16-CC26 Zones (Sissingh, 1977) and *Dicarinella asymetrica*-*Globotruncanita elevata* Zone to *Abathomphalus mayaroensis* Zone (James & wind, 1985).

**Keywords:** Corrolation, Calcareous Nannofossils, Planktonic Foraminifera, Gurpi Formation, East of Behbahan.

For Persian Version see pages 119 to 126

\* Corresponding author: S. Senemari; E\_mail: senemari2004@yahoo.com