ارائه یک الگوریتم مناسب در محاسبه مقاومت‌ویژه و عمق داده‌های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس

ابوالقاسم کامکار روحانی[۱]، علی مرادزاده[۱] ، علیرضا عرب امیری، علیرضا قطبی و داوود رجبی

[۱] عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

بطور معمول در نخستین مراحل ارزیابی داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، مقاومت‌ویژه ظاهری بر اساس مدلی از یک نیم‌فضای همگن، در برابر عمق محاسبه می‌شود. البته برای انجام این مهم تاکنون الگوریتم‌های متعددی ارائه شده است. اما در هیچیک از مقالات و تحقیقات گزارش شده، روند کامل محاسبات ارائه نشده است. دو مورد از مهمترین این الگوریتم‌ها عبارتند از: روش عمق مرکزی سنگپیل و روش سیمون. یکی از نکات مهم در این دو الگوریتم نحوه بهره‌مندی از تبدیل هنکل در محاسبات مربوطه است. در این مقاله چگونگی استفاده از روش گوپتا و سینگ در انجام این محاسبات و نتایج حاصل ارائه شده است. در نهایت با ارائه چند مثال به مقایسه نتایج حاصل از روش ارائه شده در این مقاله با نتایج روش‌های پارامتر دیفرانسیلی هوانگ و فریزر، سنگپیل و سیمون پرداخته شده است.

Abstract

The calculation of apparent resistivity, based on the model of a homogeneous half-space, is commonly the first step in order to evaluate helicopter electromagnetic (HEM) data. Several algorithms for deriving enhanced resistivity–depth profiles, which are more sensitive to resistivity variations with respect to depth, are presented. Two simple methods for this purpose are differential parameter method and centroid depth. So we produced new software based on Sengpiel's algorithm. Then we compared the results of our own algorithm with the reference result of differential parameter method and centroid depth. We saw that there was a good agreement between our results and those obtained by others

مقدمه

روش‌های برداشت الکترومغناطیس هلیکوپتری به منظور ارزیابی سریع ویژگیهای زمین‌شناختی یک منطقه وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش‌ها توزیع مقاومت‌ویژه عمقی با تحلیل میدان‌های الکترومغناطیس در فرکانس‌های مورد استفاده بدست می‌آید. لذا در نخستین گام، تفسیر داده‌های الکترومغناطیس نیازمند تعیین مقاومت‌ویژه و تغییرات عمقی است. در دهۀ ۱۹۷۰ این محاسبات غالباً به نمودارهای فازور محدود می‌شد. پس از آن در سال ۱۹۸۴، ماندری [Mundry, 1984] الگوریتمی را به منظور بهبود محاسبات عددی ارائه نمود. در ادامه در سال ۱۹۸۸ عمق مرکزی بوسیله سنگپیل [Sengpiel, 1988] تعریف شد؛ که بر اساس آن داده‌های الکترومغناطیس هوابرد به صورت منحنی‌های سونداژ یا مقاطع مقاومت‌ویژه نشان داده می‌شدند. سپس در سال ۱۹۹۶ هوانگ و فریزر [Huang & Fraser, 1996] روش پارامتر دیفرانسیلی را ارائه نمودند. پس از آن نیز راهکارهای دیگری توسط سیمون در سال ۱۹۹۸ [Sengpiel & Simeon, 2000] برای محاسبه عمق مرکزی ارائه شد.

بحث

بر طبق الگوریتم ارائه شده توسط سنگپیل، یکی از مهمترین مشکلات در فرآیند معکوس‌سازی، حل انتگرال ماندری است. از آنجا که انتگرال فوق‌الذکر بر اساس روش‌های متداول انتگرال‌گیری قابل حل نیست؛ از این رو باید بر اساس روش‌های حل عددی از قبیل روش لاپلاس و روش ضرایب هنکل به حل این انتگرال همت گمارد. از مهمترین و پیچیده‌ترین مسائل در این مسیر نیز آگاهی از کرنل و ضرایب وزنی مورد نیاز است. متاسفانه در مقالات و گزارش‌های ارائه شده در این زمینه، تقریباً در غالب موارد کرنل و ضرایب ارائه نشده‌اند. به همین دلیل رسیدن به نتایج روش سنگپیل و به تبع آن سیمون ناممکن است. در ادامه بحث ما با استفاده از روش ارائه شده

توسط گوپتا و سینگ [Gupta & Singh, 1997] به محاسبه انتگرال فوق‌الذکر می‌پردازیم. تابع هنکل را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$f(r)=\int_0^{\infty}k(\lambda)J_n(\lambda r)d\lambda \quad (۱)$$

که در آن λ متغیر انتگرال، r موقعیت مکانی، $k(\lambda)$ کرنل انتگرال و $J_n(\lambda r)$ تابع بسل می‌باشد. حل این انتگرال به صورت تحلیلی ناممکن است و با استفاده از کرنل و ضرایب وزنی به صورت زیر قابل حل است. این ضرایب در روش گوپتا و سینگ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f(r)=\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{n}k(\lambda_i)W_i \quad (۲)$$

$$\lambda_i=(\frac{1}{r})\times 10^{[a+(i-1)s]} \quad (۳)$$

$$rf(r)=\sum_{i=1}^{n}k(\lambda_i)W_i \Rightarrow f(r)=\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{n}k(\lambda_i)W_i \quad (۴)$$

حال باید ضرایب وزنی و تابع کرنل درون انتگرال تعیین شود. اما پیش از آن انتگرال ماندری را تعریف می‌نماییم:

$$f(r)=\frac{4}{M}\int_0^{\infty}\lambda^2 e^{-2\lambda}R_1 J_n(\lambda r)d\lambda \quad (۵)$$

که در آن e تابع نمایی، و R_1 ضریب بازتاب است. حال لازم است تابع فوق به فرم قابل استفاده در رابطه گوپتا و سینگ درآید. بدین منظور با توجه به رابطه ارائه شده برای R_1 در مقاله سنگپیل [Sengpiel, 1988] می‌توان نوشت:

$$f(a)=\frac{4}{M}\int\lambda^2 e^{2\lambda}RJ_n(\lambda a)d\lambda$$
$$R=\frac{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}-\lambda}{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}+\lambda}\Rightarrow f(a)=\frac{4}{M}\int\lambda^2 e^{2\lambda}\frac{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}-\lambda}{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}+\lambda}J_n(\lambda a)d\lambda \quad (۶)$$

که در آن $i=\sqrt{-1}$ است و ضریب M برابر است با $\frac{4}{G_i}(\frac{h}{r})^3$ که خود تابع تغییرات ارتفاع پرواز (h) و فاصله سیم‌پیچ‌ها (r) است؛ لذا با فرض $a=\frac{r}{h}$ داریم:

$$f(\frac{r}{h})=G_i(\frac{r}{h})^3\int\lambda^2 e^{2\lambda}\frac{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}-\lambda}{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}+\lambda}J_n(\lambda\frac{r}{h})d\lambda \quad (۷)$$

حال می‌توان مقدار ثابت و تابع کرنل را به صورت روابط زیر بیان نمود:

$$\lambda_i=(h/r)\times 10^{[a+(i-1)s]} \quad (۸)$$

$$K(\lambda_i)=G_i(\frac{r}{h})^3\lambda^2 e^{2\lambda}\frac{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}-\lambda}{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}+\lambda} \quad (۹)$$

که در آن G_i فاکتوری ثابت و وابسته به نحوه قرارگیری سیم‌پیچ‌هاست. مقدار $G_i(\frac{r}{h})^3$ ثابت است؛ لذا می‌توان مقدار کرنل را به شکل زیر نیز ساده‌تر نمود:

$$K(\lambda_i)=\lambda^2 e^{2\lambda}\frac{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}-\lambda}{\sqrt{\lambda^2+2i\delta}+\lambda} \quad (۱۰)$$

در نهایت ضرایب λ_i و تابع $f(\frac{r}{h})$ با استفاده از رابطه گوپتا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\lambda_i=(h/r)\times 10^{[a+(i-1)s]} \quad (۱۱)$$

$$f(r/h) = (h/r)\sum_{i=1}^{n} k(\lambda_i) W_i \qquad (۱۲)$$

حال با معلوم بودن ضرایب وزنی و تابع کرنل، مقدار انتگرال ماندری به سهولت قابل محاسبه است. در اینجا به منظور بررسی نحوه عملکرد روش فوق‌الذکر، به بیان دو مثال می‌پردازیم. در این دو مثال ارتفاع پرواز ۳۰ متر است. اما در الگوریتم محاسباتی فرض بر این است که بازه تغییرات ارتفاع پرواز بین ۲۶/۴ تا ۴۰ متر و ۲۸ تا ۴۰ متر است و گام‌های تغییرات ۰/۱ متر فرض شده است. همچنین بازه تغییرات عکس مقاومت ویژه الکتریکی به فاصله جدایش پیچه‌ها، بین ۰/۰۱ تا ۲ در نظر گرفته شده است. که این بازه بیانگر تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی از ۷/۵ تا ۲۹۱۰ اهم‌متر است. در جدول (۱) نتایج حاصل از مدلسازی یک زمین دو لایه با روش‌های سنگپیل، پارامتر دیفرانسیلی هوانگ و فریزر و روش سنگپیل و سیمون تحلیلی با روش ارائه شده در این مقاله برای مقایسه نشان داده شده است. که در آن ضخامت لایه اول ۱۰ متر و مقاومت‌ویژه آن ۵۰ اهم‌متر و مقاومت‌ویژه لایه دوم ۱۰۰۰ اهم‌متر است.

جدول ۱. مدلسازی زمین دو لایه با روش‌های سنگپیل، پارامتر دیفرانسیلی هوانگ و فریزر و سیمون و سنگپیل تحلیلی با روش ارائه شده در این مقاله.

Frequency (Hz)	ppm		Sengpiel Method		Differential Method		Our own Results		
	Inphase	Quad	Apparent Res (ohm-m)	Centroid Depth (m)	Diff. Res (ohm-m)	Diff depth (m)	Resistivity (ohm-m)	Depth Sengpiel (m)	Depth Siemon (m)
115200	1270.60	641.00	64.00	5	64	6	57.35	4.67	9.89
57600	884.90	711.50	87.00	8	169	13	86.15	18.70	27.50
28800	495.10	627.40	119.00	15	240	20	163.44	21.10	37.90
14400	224.60	447.30	160.00	25	320	33	140.36	36.40	58.50
7200	83.30	273.50	211.00	35	404	54	178.33	46.30	87.20
3600	29.60	152.10	267.00	45	470	87	240.45	36.00	128.00
1800	9.50	80.20	324.00	56	511	139	270.54	40.80	192.00
900	3.00	41.30	393.00	66	629	217	236.62	72.70	268.00
450	0.90	20.90	461.00	83	676	336	257.81	48.50	378.00
225	0.30	10.50	531.00	98	749	512	469.82	90.20	737.00

جدول ۲. مدلسازی زمین چهار لایه با روش‌های سنگپیل، پارامتر دیفرانسیلی هوانگ و فریزر و سیمون و سنگپیل تحلیلی با روش ارائه شده در این مقاله.

Frequency (Hz)	ppm		Sengpiel Method		Differential Method		Our own Results		
	Inphase	Quad	Apparent Res (ohm-m)	Centroid Depth (m)	Diff. Res (ohm-m)	Diff depth (m)	Resistivity (ohm-m)	Depth Sengpiel (m)	Depth Siemon (m)
115200	1270.6	641.0	64	5	64	6	33.87	5.4	9.5
57600	884.9	711.5	87	8	169	13	68.77	19.4	27.4
28800	495.1	627.4	119	15	240	20	99.81	26.8	39.6
14400	224.6	447.5	161	25	325	33	142.12	36.1	58.4
7200	85.5	272.3	213	35	416	54	181.91	46.0	87.6
3600	30.2	149.5	261	45	420	87	252.66	35.4	130.0
1800	12.2	78.0	258	52	255	130	181.91	64.6	170.0
900	6.7	40.6	189	56	91	172	142.12	68.9	210.0
450	4.3	21.8	120	73	38	207	126.33	58.3	269.0
225	2.5	12.2	84	97	37	246	63.16	74.2	277.0

در جدول (۲) نیز نتایج حاصل از مدلسازی یک زمین چهار لایه با روش‌های سنگپیل، پارامتر دیفرانسیلی هوانگ و فریزر و روش سنگپیل و سیمون تحلیلی با روش ارائه شده در این مقاله برای مقایسه نشان داده شده است. که در آن ضخامت لایه اول ۱۰ متر و مقاومت‌ویژه آن ۵۰ اهم‌متر، ضخامت لایه دوم ۱۹۰ متر و مقاومت‌ویژه آن ۱۰۰۰ اهم‌متر، ضخامت لایه سوم ۵ متر و مقاومت‌ویژه آن ۱ اهم‌متر و مقاومت‌ویژه لایه آخر نیز ۱۰۰۰ اهم‌متر است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدلسازی با الگوریتم سنگپیل حاکی از آن است که این روش در شناسایی توده‌های عمیق مشکل دارد. لذا در آن پاسخ‌های مربوط به نواحی عمیق دارای ابهام است. البته در روش ارائه شده در این مقاله این ابهام کمتر از روش سنتی سنگپیل است. از سوی دیگر روش‌های سیمون و دیفرانسیلی هوانگ و فریزر فاقد این اشکال هستند؛ و نتایج توده‌های عمقی در آنها بهتر از روش سنتی سنگپیل است. در نهایت اینکه نتایج روش سیمون ارائه شده در این مقاله، بهتر از روش دیفرانسیلی هوانگ و فریزر به شناسایی عمق و مقاومت‌ویژه توده‌های زیر سطحی پرداخته است.

منابع

Guptasarma, D., and Singh, B., 1997, New digital linear filters for Hankel J_0 and J_1 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., 1988, approximate inversion of airborne EM data from a multi-layered ground: Geophysical Prospecting, **36**, 446-459.

Huang, H., and Fraser, D.C., 1996, the differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping: Geophysics, **61** (1), 100–109.

Siemon, B., 2001, improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data: Journal of Applied Geophysics, **46**, 65-76.