

مقایسه نتایج فیلترهای دیجیتال در مدل سازی مستقیم داده های الکترومغناطیس حوزه زمان

داود رجبی^{۱*}، سعید میرزایی^۲، علیرضا عرب امیری^۳

۱- دانشجوی دکترای، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استاد، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

* نویسنده مسئول مکاتبات: davoodrajabi@gmail.com

واژگان کلیدی

الکترومغناطیس گذرا

پاسخ میدان مغناطیسی قائم

زمین لایه ای

مدل سازی مستقیم

تبدیلات سینوس و کسینوس

فیلترهای دیجیتال

تبدیل سریع فوری

چکیده

فیلترهای دیجیتال به صورت گسترده در مدل سازی پیشرو و وارون داده های الکترومغناطیس مورد استفاده قرار می گیرد. اهمیت استفاده از یک فیلتر دیجیتال مناسب و سریع در انجام مدل سازی های دو و سه بعدی که ممکن است محاسبات تکرارپذیر آنها به میلیون ها بار برسد، بسیار مشهود است. بر خلاف تبدیلات هنکل که به طور گسترده در مدل سازی داده های الکترومغناطیس حوزه فرکانس مورد استفاده قرار گرفته است، در مدل سازی داده های الکترومغناطیس حوزه زمان علاوه بر انتگرال هنکل، انتگرال های سینوس و کسینوسی نیز وجود دارند که این امر محاسبات بر پایه فیلترهای دیجیتال را پیچیده می کند. در این مقاله به بررسی دقت نتایج فیلترهای دیجیتال مختلف در مدل سازی پیشرو میدان الکترومغناطیسی قائم، پاسخ ولتاژ و امپدانس در حوزه زمان پرداخته شده است. بر این اساس ضمن کدنویسی کامل کلیه روش های متداول در برنامه Matlab، نتایج هر یک آنها، ابتدا با نتایج روش حل تحلیلی مستقیم، سپس با نتایج حاصل از مدل های ارائه شده در مقالات و مدل های زمین لایه ای و در پایان با نتایج نرم افزار مدل سازی "CR1MD" مورد بررسی قرار گرفت و ضمن ارزیابی هریک از روش ها به بیان نقاط قوت و ضعف آنها پرداخته و فیلتر دیجیتال مناسب برای مدل سازی داده های الکترومغناطیس حوزه زمان پیشنهاد گردید. نتایج این مطالعه نشان داد، اگرچه در اغلب موارد نتایج حاصل از روش های مختلف فیلترهای دیجیتال با یکدیگر همپوشانی خوبی دارند؛ اما تعداد ضرایب به معنای افزایش دقت محاسبات نیست. روش "Kong" در اغلب موارد نتایج ضعیفی را نشان می دهد و خروجی ضرایب ۶۱ عددی آن مناسب تر است. از طرفی روش تبدیل سریع سینوس به دلیل نتایج ضعیف در کانال های انتهایی بهتر است به عنوان پایه مدل سازی پیشرو و معکوس مورد استفاده قرار نگیرد. به سبب نتایج قابل قبول فیلترهای دیجیتال "Key" و روش تبدیل عددی سینوس می توان از این فیلترهای دیجیتال در مدل سازی الکترومغناطیس حوزه زمان استفاده کرد.

۱- مقدمه

اکتشافات انجام شده با روش های الکترومغناطیس (ElectroMagnetic) از چشمه های اولیه متفاوت با منشأ طبیعی و یا مصنوعی به عنوان منبع تولید میدان اولیه استفاده می کنند و در دو حوزه زمان و فرکانس انجام می شوند. چشمه های متفاوت EM شامل حلقه یا چشمه های خطی در ابعاد متفاوت هستند که عمده ترین چشمه های مورد استفاده در برداشت های ژئوفیزیکی بر اساس شکل و هندسه آنها به دسته های دوقطبی مغناطیسی قائم، دوقطبی مغناطیسی افقی، دوقطبی الکتریکی افقی و دوقطبی الکتریکی قائم تقسیم می شوند.

مدل سازی مستقیم داده های الکترومغناطیس همواره با معادلاتی نظیر انتگرال های هنکل و تبدیلات سینوس و کسینوس همراه است که با روش های متداول تحلیلی قابل حل نبوده و یا محاسبه انتگرال آنها بسیار پیچیده است. در این میان استفاده از روش حل فیلترهای دیجیتال یکی از راه های ساده و دقیق برای مدل سازی های مختلف ژئوفیزیکی است. روش فیلترهای دیجیتال در ابتدا توسط "Ghosh, 1971" جهت ارزیابی تبدیلات هنکل مورد استفاده قرار گرفت و پس از آن توسط "Koefoed et al, (1972)", "Anderson, (1979-1982)", "Chiristensen, (1990)", "Johansen and Sorensen, (1997)", "Guptasarma and Singh, (1979)", "Kong, (2007)" و "Key, (2012)" به کار گرفته و توسعه یافت.

امروزه به واسطه رشد و توسعه سیستم های حوزه زمان، مدل سازی پیشرو و معکوس نیز در این حوزه با سرعت بیشتری در حال انجام است. داده های الکترومغناطیس با منبع کنترل شونده اغلب به صورت مستقیم در حوزه زمان و یا فرکانس محاسبه می شوند. محاسبه در یک دامنه و تبدیل آن از طریق تبدیل فوریه به دامنه دیگر یک جایگزین مناسب جهت حل مسائل الکترومغناطیس است "Werthmüller et al., 2021".

تبدیل فوریه به عنوان روشی مؤثر در مدل سازی داده های ژئوفیزیک نظیر پردازش و تفسیر داده های لرزه ای "زارعی و همکاران، ۱۳۹۱"، تصویر سازی لایه های نازک در مقاطع لرزه ای "آراسته و جواهریان، ۱۳۸۹"، مدل سازی ساختارهای ساده و پیچیده داده های الکترومغناطیس حوزه زمان "Kong et al., 2008"، مدل سازی داده های دو ونیم بعدی داده های الکترومغناطیس گذرا در ابعاد بزرگ بر پایه محاسبات ژاکوبین و المان محدود "Xiao et al., 2022" و سه بعدی الکترومغناطیس مرکب بر پایه روش المان های محدود و حل مشتقات ژاکوبین جهت اکتشافات آب های زیرزمینی "Tang et al., 2015"، در نظر گرفته می شود. وجود محاسبات تبدیل فوریه در مدل سازی حوزه زمان سبب پیچیدگی و محاسبات طولانی تر مدل سازی میدان های الکترومغناطیس حوزه زمان نسبت به حوزه فرکانس شده است. به همین سبب فیلترهای دیجیتال در حل تبدیل فوریه نسبت به تبدیلات هنکل به صورت محدودتر مورد استفاده قرار گرفته و مقالات این حوزه کمتر باشد "Kong, 2012".

تبدیل های سینوس و کسینوس با استفاده از فیلترهای دیجیتال چند دهه است که در روش های الکترومغناطیس گذرا مورد استفاده قرار گرفته است "Kong, 2007" و توسط پژوهشگران این حوزه جهت

توسعه الگوریتم های آن در حال بهینه سازی است "Zhao et al., 2018" تا با ارائه الگوریتم های سریع و دقیق تبدیل این داده ها به پارامترهای قابل فهم فیزیکی را تسریع نمایند.

از جمله روش های دقیق و به روز برای انجام این مهم، روش های مدل سازی معکوس است که در عمل به مدل سازی پیشرو وابسته است. نکته مهم این که هر چقدر نتایج حاصل از روش مدل سازی پیشرو دقیق باشد، نتایج مدل سازی معکوس مرتبط با آن نیز دقیق تر خواهد بود. با بالا بردن دقت الگوریتم پیشرو می توان مناسب ترین روش مدل سازی معکوس را از میان روش های موجود انتخاب نمود "عرب امیری، ۱۳۸۷".

استفاده از فیلترهای دیجیتال در حل معادلات این حوزه می تواند کمک شایانی در تسریع مدل سازی معکوس داده های الکترومغناطیس گذرا نماید. در این مقاله به مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری فیلترهای دیجیتال مختلف برای مدل سازی پیشرو داده های الکترومغناطیس حوزه زمان پرداخته شده است. در این راستا برنامه ای کامپیوتری در محیط نرم افزار Matlab نوشته شد تا بر اساس الگوریتم های مختلف فیلترهای دیجیتال به بررسی دقت ضرایب مورد استفاده در هر روش برای مدل سازی مستقیم داده های EM در حوزه زمان پرداخته شود.

از آنجا که استفاده از حلقه های بزرگ افقی در برداشت های الکترومغناطیس حوزه زمان یک روش متداول و حل تحلیلی مدل سازی مستقیم زمین همگن در حلقه های دایره ای در دسترس است "Ward and Hohmann, 1987"، به منظور بالا بردن دقت در انتخاب و مقایسه الگوریتم ها، به مدل سازی مستقیم پاسخ میدان الکترومغناطیس قائم و پاسخ ولتاژ حاصل از حلقه های دایره ای افقی از زمین لایه ای پرداخته شد. براین اساس در ابتدا نتایج حاصل از الگوریتم های مختلف برای یک زمین همگن مشخص و با نتایج تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفت.

در مرحله دوم با در نظر گرفتن مدل های متفاوتی از زمین لایه ای غیرمغناطیسی همسانگرد، چند لایه که بر اساس مدل های ارائه شده در مقالات مختلف انتخاب شده است، مولفه های پاسخ میدان مغناطیسی و پاسخ ولتاژ توسط روش های مختلف محاسبه و نتایج الگوریتم های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته اند تا الگوریتم بهینه و مناسب جهت مدل سازی پیشرو و معکوس داده های الکترومغناطیس حوزه زمان برای علاقه مندان این حوزه مشخص گردد. شایان ذکر است مدل سازی الکترومغناطیسی گذرا بر پایه استفاده از فیلترهای دیجیتال و ضرایب سینوس و کسینوس هنوز به بلوغ علمی خود نرسیده است و تلاش برای ارائه الگوریتم بهینه با ضرایب کمتر و دقت بالاتر جهت محاسبات میدان های الکترومغناطیس حوزه زمان برپایه فیلترهای دیجیتال همچنان ادامه دارد.

۲- روش فیلترهای دیجیتال

در اغلب مدل سازی های داده های ژئوفیزیکی با انتگرال هایی به صورت رابطه (۱) مواجه هستیم "Key, 2012".

$$\hat{f}(r) = \int_0^{\infty} f(\lambda) T(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

که در این نوع روابط $\hat{f}(r)$ پاسخ تابع میدان الکتریکی و یا مغناطیسی، $T(\lambda r)$ تابع بسل یا سینوس (کسینوس) و $f(\lambda)$ تابع کرنل می باشد

که تقریب گسسته این کانولوشن به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود

$$I(j) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} f(i-j)h(i) \quad (6)$$

که در این رابطه i و j اندیس هستند.

مطالعات "Ghosh, 1971" مشخص کرد مقدار h برداری از فیلترهای خطی دیجیتال است که می‌تواند از پیش تعیین شده و برای توابع دلخواه کرنل استفاده شود. ضرایب بهینه فیلتر برای فیلترهای خطی محدود، با حل رابطه (۶) برای یک فیلتر با طول محدود n به وسیله جفت‌های تبدیل انتگرال i و f پیدا می‌شوند. البته باید دقت نمود این جفت‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که همانند تابع کرنل ویژگی میرایی سریعی داشته باشند. برای یک فیلتر دیجیتال با n نقطه می‌توان رابطه (۴) را به صورت تقریب زیر نوشت

$$rf(r) = \sum_{i=1}^n f\left(\frac{b_i}{r}\right)h_i \quad (7)$$

که در این رابطه فاصله لگاریتمی افقی فیلتر به صورت زیر مشخص می‌شود

$$b_i = \lambda_i r = e^{a_i}, \quad i = -l, -l+1, -l+2, \dots, l \quad (8)$$

که در این رابطه $l = \frac{(n-1)}{2}$ و a فاصله‌ی میان ضرایب فیلتر است.

از این رو در رابطه (۷) پس از مشخص نمودن تابع کرنل $(f(\frac{b_i}{r}))$ ، به وسیله ضرایب مشخص از پیش تعیین شده‌ی h ، می‌توان مقدار عددی عددی $\hat{f}(r)$ را تخمین زد.

ضرایب فیلترهای دیجیتال باتوجه به روش حل آنها می‌تواند از ده‌ها تا صدها نقطه را شامل شود و استفاده از آنها می‌تواند سبب سرعت بخشیدن محاسبات نسبت به محاسبات مستقیم شود؛ که انتگرال را به مجموعه‌ای از جزءهای کوچک برای محاسبه تقسیم می‌کند "Anderson, 1979-1982". همین امر سبب شده است که در حل مسائل الکترومغناطیس، فیلترهای دیجیتال نقش مهمی را در مدل‌سازی‌ها ایفا نمایند. نمونه‌های لگاریتمی حوزه فرکانس "Newman et al., 1986" و "Mulder et al., 2008"، نمونه‌های غیرخطی "Feng et al., 2020"، نمونه‌های لگاریتمی حوزه عدد موج "Mitsuhata, 2000"، نمونه‌های لگاریتمی "Haines and Jones, 1988" و "Talman, 1978" از جمله روش‌های مورد استفاده در محاسبات بر اساس فیلترهای دیجیتال می‌باشند. برای مطالعه‌ی بیشتر بر روی روش‌های متنوع محاسبات عددی می‌توان به "Lucas and Stone, (1995)" و "Vandergraft, (2014)" مراجعه نمود.

۳- محاسبه پاسخ میدان مغناطیسی و پاسخ ولتاژ در برداشت‌های الکترومغناطیس گذرا

بیشتر سیستم‌های برداشت داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان مقدار میدان مغناطیسی قائم $h_z(t)$ و پاسخ ولتاژ $v(t)$ حاصل از یک دوقطبی افقی در بازه‌های زمانی مختلف (پنجره یا کانال) را اندازه‌گیری می‌کنند.

که به خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه وابسته بوده و ممکن است به صورت نوسانی نیز باشد "Key, 2012".

این انتگرال در فرایند مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی یک‌بعدی نظیر محاسبه میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و پاسخ ولتاژ حاصل از یک سیم بزرگ افقی، یک حلقه‌ی مربعی و یا یک حلقه دایره‌ای "Christensen, 2016"، "Spies and Eggers, 1986"، "Tiwari et al., 2018"، "Raiche, 1987"، "Singh et al., 2009"، "Ward and Hohmann, 1987" و "Anderson, 1983"، مطالعات دوبعدی مانند محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی حاصل از یک منبع خطی یا یک دوقطبی "Wait, 1987" و "Mitsuhata, 2000" و هم چنین مسائل ساختارهای پیچیده دو و نیم بعدی و سه بعدی "Newman and Alumbaugh, 1995" و "Kong et al., 2008" ظاهر می‌شود. روش فیلترهای دیجیتال به صورت بسیار گسترده در ارزیابی توابع هنکل (مدل‌سازی مستقیم داده‌های حوزه فرکانس) مورد بررسی قرار گرفته است "Kong, 2012".

تبدیل‌های سینوس و کسینوس نیز شکلی از تبدیل انتگرال فوریه در ریاضیات هستند که شامل مقادیر مختلط نبوده و از شکل انتگرالی به صورت روابط (۲) و (۳) پیروی می‌کنند.

$$\hat{f}(r) = \int_0^{\infty} f(\lambda) \cos(\lambda r) d\lambda \quad (2)$$

$$\hat{f}(r) = \int_0^{\infty} f(\lambda) \sin(\lambda r) d\lambda \quad (3)$$

شکل سینوس و یا کسینوس رابطه (۱)، بخش جدایی‌ناپذیر مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس گذرا "Newman et al., 1986" و الگوریتم‌های دو و نیم بعدی "Li and Key, 2007" است. این نوع انتگرال‌ها میلیون‌ها بار در برنامه‌های مدل‌سازی‌های الکترومغناطیسی بخصوص در مدل‌سازی‌های سه بعدی محاسبه می‌شوند که سبب افزایش قابل توجه زمان محاسبات در مدل‌سازی‌های حوزه زمان می‌گردد "Haines and Jones, 1988".

این موارد برای محاسبات یک‌بعدی نیز وجود دارد، به عنوان مثال وارون‌سازی "Baysian" به طور معمول نیازمند ۱۰ تا ۱۰۰ هزار پردازش مستقیم است "Chen et al., 2007". امروزه بیشتر کدهای مدل‌سازی در حوزه EM، از فیلترهای دیجیتال بر پایه روش ارائه شده به وسیله "Ghosh, 1971" نگارش می‌یابد. به طور خلاصه می‌توان وجه اشتراک این روش‌ها را به صورت زیر بیان کرد.

بر اساس جای‌گذاری مقادیر $r = e^x$ و $\lambda = e^{-y}$ می‌توان رابطه‌ی (۱) را به صورت زیر بازنویسی نمود

$$e^x \hat{f}(e^x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(e^{-y}) T(e^{x-y}) e^{x-y} dy \quad (4)$$

و این رابطه را نیز به شکلی از انتگرال کانولوشن مطابق رابطه (۵)، دوباره نویسی کرد

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) h(x-y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} f(x-y) h(y) dy \quad (5)$$

فرستنده دایره ای به صورت زیر به دست می آید

$$h_z(t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Im}[H_z(\omega, \sigma, h)]}{\omega} \cos(\omega t) d\omega \quad (11)$$

یا

$$h_z(t) = h_z(0) - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re}[H_z(\omega, \sigma, h)]}{\omega} \sin(\omega t) d\omega \quad (12)$$

$$\frac{\partial h_z(t)}{\partial t} = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Re}[H_z(\omega, \sigma, h)] \cos(\omega t) d\omega \quad (13)$$

یا

$$\frac{\partial h_z(t)}{\partial t} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Im}[H_z(\omega, \sigma, h)] \sin(\omega t) d\omega \quad (14)$$

در این روابط σ بردار رسانایی لایه ها برحسب زمین بر متر، ω فرکانس زاویه ای برحسب رادیان بر ثانیه، h بردار ضخامت لایه ها، $h_z(0)$ مقدار اولیه ی میدان مغناطیسی در زمان صفر و $\frac{\partial h_z(t)}{\partial t}$ (مشتق میدان الکترومغناطیس نسبت به زمان) پاسخ ولتاژ را نشان می دهد. از طرفی $\text{Re}[H_z(\omega, \sigma, h)]$ و $\text{Im}[H_z(\omega, \sigma, h)]$ به ترتیب بخش حقیقی و موهومی پاسخ مختلط فرکانسی میدان مغناطیسی قائم حاصل از یک زمین لایه ای است؛ که از رابطه (۱۵) به دست می آید.

$$H_z(\omega, \sigma, h) = aI \int_0^{\infty} \frac{1}{u_0} \left(\frac{Z^1}{Z^1 + Z_0} \right) J_1(\lambda a) \lambda^2 d\lambda \quad (15)$$

در این رابطه $u_n = \sqrt{(\lambda^2 - k_n^2)}$ ، I جریان فرستنده، J_1 تابع بسل و $k_n = \sqrt{-j\omega\mu_0\sigma_n}$ معرف عدد موج برای n امین لایه و Z امپدانس ورودی است، که برای هر لایه از رابطه بازگشتی (۱۶) به دست می آید (Wait, 1970).

$$Z^n = Z_n \frac{Z^{n+1} + Z_n \tanh(u_n h_n)}{Z_n + Z^{n+1} \tanh(u_n h_n)} \quad (16)$$

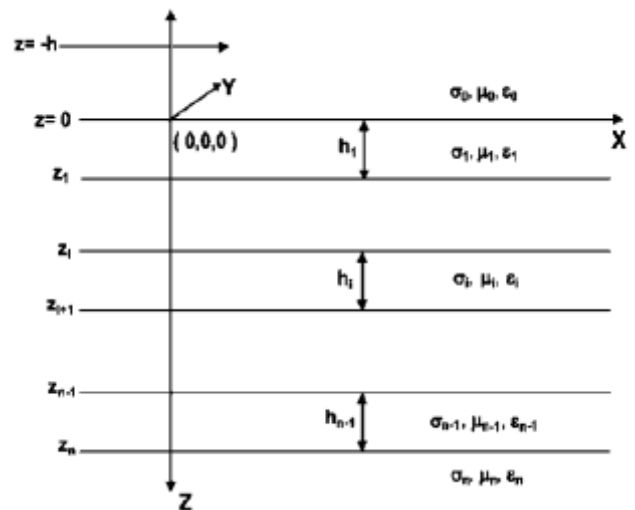
مقدار Z_n (امپدانس لایه n ام) به کمک رابطه ی $Z_n = -j\omega\mu_0 / u_n$ تعیین می شود؛ که این مقدار برای لایه آخر $Z_n = Z^n$ در نظر گرفته می شود. از آنجا که برای فرکانس های زیر ۵۰ کیلوهرتز، از جریان های جابجایی می توان صرف نظر کرد؛ در این روابط از این اثر صرف نظر شده و مقدار گذردهی مغناطیسی و الکتریکی ثابت و برابر با گذردهی خلاء در نظر گرفته شده است.

۴- مدل سازی مستقیم پاسخ میدان الکترومغناطیسی از زمین لایه ای در حوزه زمان

برای مدل سازی مستقیم پاسخ میدان مغناطیسی قائم و پاسخ ولتاژ حاصل از یک چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از یک زمین لایه ای، در ابتدا مقدار حقیقی و موهومی پاسخ مختلط فرکانسی میدان مغناطیسی قائم به وسیله رابطه (۱۵) با بکار بردن ضرایب فیلترهای دیجیتال (Guptasarma and Singh, 1997) محاسبه می گردد. با مشخص شدن پاسخ این انتگرال حل عددی انتگرال های روابط (۱۱) تا (۱۴) برای حصول پاسخ میدان مغناطیسی قائم و پاسخ ولتاژ حاصل از یک چشمه دوقطبی به وسیله الگوریتم های مختلف فیلترهای دیجیتال و با

سیستم های برداشت غالباً به صورت حلقه های بزرگ افقی و یا مربعی شکل است که می توانند به عنوان یک منبع برای برداشت در مرکز، بیرون و هر نقطه دیگر از حلقه مورد استفاده قرار گیرند (Tiwari et al., 2018). در این روش داده های به دست آمده نسبت به جریان فرستنده و بهره تقویت کننده، نرمال شده و سیم پیچ گیرنده نتایج را بر اساس ولت بر آمپر مترمربع " $\frac{V}{Am^2}$ " یا میکرو ولت بر آمپر مترمربع ($\frac{\mu V}{Am^2}$) ثبت می کند (Spies and Frischnecht, 1991).

برای فرمول نویسی پاسخ میدان الکترومغناطیس حاصل از یک چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از یک زمین لایه ای در نقطه سنجش، غالباً از سیستم دکارتی استفاده می کنند که جهت مثبت Z در راستای عمق لایه ها به طرف پایین در نظر گرفته می شود. برای مدل سازی ساده تر فاکتور زمانی را به صورت هارمونیک $e^{i\omega t}$ و در مدل سازی ساده زمین لایه ای، تراوایی مغناطیسی و الکتریکی را برابر با مقدار آن در فضای آزاد در نظر می گیرند. شکل ۱ هندسه زمین لایه ای و موقعیت یک چشمه را برای یک زمین چندلایه در سیستم مختصات دکارتی نشان می دهد.



شکل ۱: هندسه زمین لایه ای، موقعیت چشمه دوقطبی برای زمین لایه ای (Ward and Hohmann, 1987)

(Ward and Hohmann, 1987) نشان دادند حل تحلیلی میدان مغناطیسی قائم و پاسخ ولتاژ یا مشتق میدان مغناطیسی قائم (Wait, 1987) در مرکز یک حلقه دایره ای افقی برای یک نیم فضای همگن با رسانایی σ از رابطه (۹) و (۱۰) به دست می آید.

$$h_z(t) = \frac{I}{\theta^2 a^3} \left[\left(\frac{\theta^2 a^2}{2} - \frac{3}{4} \right) \text{erf}(\theta a) + \frac{3\theta a}{2\sqrt{\pi}} e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (9)$$

$$v(t) = \frac{mI}{\sigma a^3} \left[3 \text{erf}(\theta a) - \frac{2\theta a}{\sqrt{\pi}} (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (10)$$

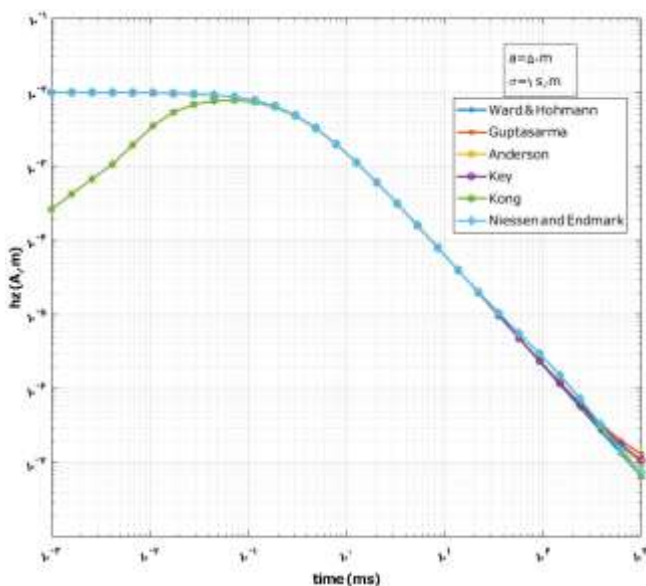
در این رابطه m ممان فرستنده، a شعاع حلقه فرستنده که جریان نوسانی $Ie^{i\omega t}$ در آن جاری است، erf تابع خطا، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلاء است که مقدار آن در محاسبات $4\pi \times 10^{-7} H.m^{-1}$ در نظر گرفته شده و $\theta^2 = \frac{\mu_0 \sigma}{4t}$ می باشد. در صورت لایه ای بودن زمین مورد مطالعه، پاسخ میدان مغناطیسی قائم و پاسخ ولتاژ حاصل از یک

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۱، ۱۴۰۴.

۳۰ فاصله زمانی لگاریتمی بر مبنای ۱۰ تقسیم شده است. نتایج پاسخ حل تحلیلی "Ward and Hohmann, (1986)" با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) به دست آمده و سایر نتایج بر اساس الگوریتم‌های مختلف محاسباتی مختص آنها مشخص شده‌اند.

به دلیل همگن و همسانگرد بودن مدل، نتایج بیشتر روش‌ها بسیار شبیه به هم است؛ اما روش "Kong, (2012)" تنها در کانال‌های انتهایی بسیار خوب عمل کرده و با روش تحلیلی کاملاً منطبق است که این تطابق از زمان ۰.۰۱ میلی‌ثانیه رخ می‌دهد و در کانال‌های اولیه اختلاف فاحشی میان نتایج دیده می‌شود.

باتوجه به تعداد ضرایب مورد استفاده در پردازش داده‌ها، دستیابی به پاسخ به‌وسیله ضرایب "Guptasarma, (1982)" و "Niessen and Endmark, (1986)" سریع‌تر است. این سرعت در فرایند وارون‌سازی به دلیل کاهش تعداد ضرایب کاملاً محسوس است. لذا در هسته‌ی الگوریتم معکوس برای زمین همگن می‌توان از روش "Guptasarma, (1982)" و "Niessen and Endmark, (1986)" بهره برد. با دقت در کانال‌های انتهایی به نظر می‌رسد تطابق بهتری میان روش "Key, (2012)" و "Anderson, (1983)" با حل تحلیلی وجود دارد. هر دو این روش‌ها از تعداد ضرایب بالاتری استفاده می‌کنند که می‌توانند در فرایند تکرارپذیر برنامه‌های معکوس سبب اختصاص زمان بیشتر در حصول نتایج شوند.



شکل ۳: مقایسه پاسخ مدل نیم فضای همگن به روش حل تحلیلی و روش فیلترهای دیجیتال، رسانایی زمین همگن، ۱ زیمنس بر متر، شعاع حلقه ۵۰ متر و حلقه فرستنده بر روی زمین قرار دارد.

از آنجاکه اغلب روش‌های حل عددی از ضرایب متفاوتی برای همگرایی انتگرال استفاده می‌کنند، ممکن است این نگاه وجود داشته باشد که با افزایش تعداد ضرایب، دقت مدل‌سازی بیشتر می‌شود. باتوجه به این که نتایج مربوط به مدل‌سازی روش "Kong, (2012)" اختلاف فاحشی در نتایج دارد، این موضوع در شکل (۴) مورد بررسی قرار

استفاده از ضرایب سینوس و کسینوس نظیر ۲۰ نقطه "Niessen and Endmark, (1986)"، ۲۱ نقطه "Guptasarma, (1982)"، فیلترهای DLAG0-DLAG1 "Anderson, (1983)"، ۲۱ و ۶۱ و ۱۰۱ نقطه "Kong, (2012)" و "Key, (2012)" QWE به دست می‌آید.

در ادامه برای مقایسه نتایج مدل‌سازی مستقیم داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان، به بررسی پاسخ حاصل از ضرایب این فیلترها پرداخته و دقت نتایج توسط

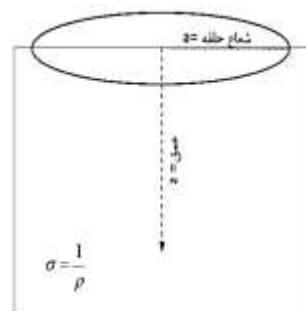
• مدل‌سازی زمین همگن برای مقایسه نتایج حاصل از هر روش با پاسخ حاصل از حل تحلیلی میدان مغناطیسی و پاسخ ولتاژ برای چند زمین همگن

• مدل‌سازی زمین لایه‌ای بر اساس مدل‌های پیش‌فرض ارائه شده به‌وسیله "Spies and Eggers, (1986)"

• مدل‌سازی مستقیم حاصل از زمین لایه‌ای به‌وسیله نرم‌افزار "CR1MD" "Nielsen and Baumgartner, 2006)" مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۱- مدل زمین همگن

در مرحله نخست برای بررسی دقت هر یک از فیلترهای ارائه شده، نتایج حاصل از پاسخ میدان مغناطیسی قائم و پاسخ ولتاژ به‌وسیله روش حل تحلیلی "Ward and Hohmann, (1986)" و نتایج به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های متفاوت فیلترهای دیجیتال در خصوص حل معادله میدان مغناطیسی قائم و پاسخ ولتاژ بررسی شد. در شکل (۲)، مدلی از یک زمین همگن که رسانایی آن از ۰.۰۰۰۱ تا ۱ زیمنس بر متر ($\frac{S}{m}$) تغییر می‌کند، نشان داده شده است.



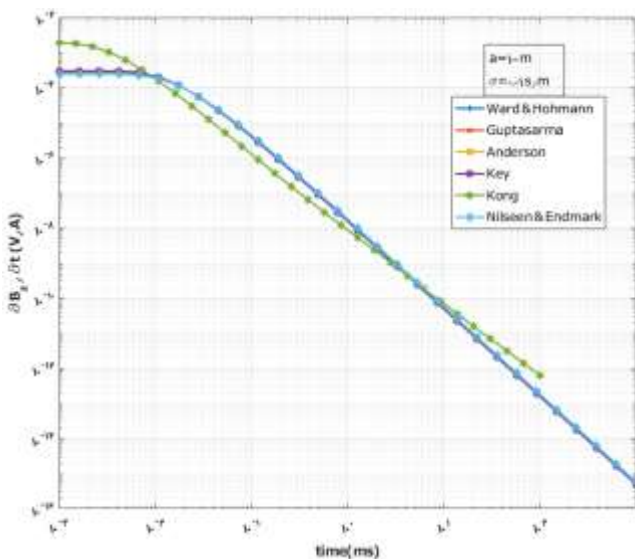
شکل ۲: مدلی ساده از یک نیم فضای همگن، حلقه فرستنده بر روی زمین و رسانایی مدل در همه نقاط یکسان در نظر گرفته شده است

شکل (۳)، نتایج حاصل از حل تحلیلی "Ward and Hohmann, (1986)" و نتایج مربوط به روش فیلترهای دیجیتال "Niessen and Endmark, (1986)"، "Guptasarma, (1982)"، "Anderson, (1983)"، "Kong, (2012)" و "Key, (2012)" QWE را برای یک مدل نیم فضای همگن با رسانایی ۱ زیمنس بر متر نشان می‌دهد. در این مثال شعاع حلقه فرستنده ۵۰ متر (حلقه روی زمین قرار دارد)، جریان فرستنده ۱ آمپر و بازه زمانی برداشت ۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه است که به

رسانایی لایه همگن، اختلاف میان نتایج حاصل از ضرایب مختلف در الگوریتم "Kong, (2012)" بیشتر مشاهده می شود.

مقایسه نتایج ضرایب مختلف نشان می دهد که ضرایب ۱۰۱ عددی نتایج خوبی را ارائه نمی کند و بیشترین اختلاف را با پاسخ تحلیلی دارند. بهترین نتایج این فیلتر در ضرایب ۶۱ عددی مشاهده می شود اگرچه با حرکت به سمت کانال های انتهایی (بیشتر از ۱ میلی ثانیه) برازش خوبی میان همه نتایج مشاهده می شود، از طرفی بهترین برازش برای زمین ۰۰۰۱ زمینس بر متر مشاهده می شود.

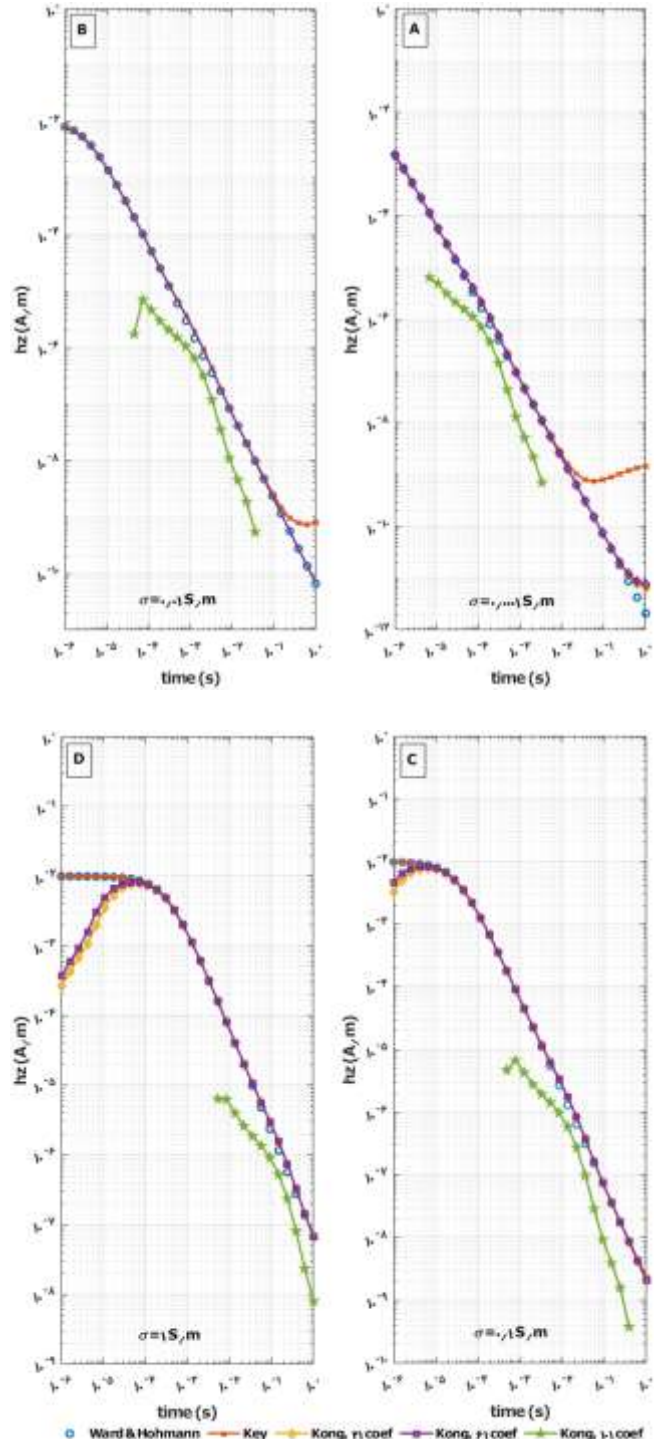
از این رو پیشنهاد می شود برای صحت سنجی ضرایب یک فیلتر، به یک مدل همگن اکتفا نشده و مدل های مختلف در نظر گرفته شوند. در شکل (۵)، نتایج پاسخ ولتاژ حاصل از حل تحلیلی نتایج حاصل از حل تحلیلی "Ward and Hohmann, (1986)" و نتایج مربوط به روش فیلترهای دیجیتال "Niessen and Endmark, (1986)", "Guptasarma, (1982)", "Anderson, (1983)", "Kong, (2012)" و "Key, (2012)" QWE برای یک مدل نیم فضای همگن با رسانایی ۰۰۰۱ زمینس بر متر نشان داده شده است. شعاع حلقه فرستنده ۱۰۰ متر و حلقه بر روی زمین قرار دارد.



شکل ۵: مقایسه پاسخ ولتاژ مدل نیم فضای همگن به روش حل تحلیلی و روش فیلترهای دیجیتال. رسانایی زمین همگن، ۰۰۰۱ زمینس بر متر، شعاع حلقه ۱۰۰ متر و حلقه بر روی زمین قرار دارد.

در غالب روش ها نتایج با روش تحلیلی همپوشانی دارند که این همپوشانی در کانال های انتهایی بسیار بهتر صورت می پذیرد. از آنجاکه زمین مورد مطالعه همگن است، در زمان محاسبات اختلاف فاحشی مشاهده نمی شود؛ اما نتایج حاصل از ضرایب متفاوت فیلترهای دیجیتال "Kong, (2012)" متفاوت هستند. ضرایب فیلترهای دیجیتال "Kong, (2012)" با افزایش میزان رسانندگی نتایج بهتری را نسبت به قبل نشان می دهند، از آنجا که الگوریتم فیلتر دیجیتال "Kong, (2012)" از پارامترهای خاصی برای محاسبه استفاده می کند انتخاب این پارامترها تاثیر مستقیم بر نتایج می گذارد "Zhao et al, 2018".

گرفت. در این شکل نتایج حاصل از ضرایب مختلف "Kong, (2012)" با روش "Key, (2012)" و حل تحلیلی "Ward and Hohmann, (1986)" برای چهار مدل زمین همگن با رسانایی های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴: بررسی دقت تعداد ضرایب فیلترهای دیجیتال در حل عددی مدل سازی مستقیم داده های الکترومغناطیس گذرا - شعاع حلقه ۵۰ متر و بر روی زمین قرار دارد و رسانایی مدل های نیم فضا همگن از A تا D در حال افزایش است.

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، با افزایش تعداد ضرایب نتایج بسیار متفاوت و در پاره ای موارد فاقد حقیقی می شود. در این فیلتر ضرایب ۶۱ عددی نتایج بهتری را نشان می دهند. با افزایش

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۱، ۱۴۰۴.

مدل‌سازی با ضرایب ۱۰۱ عددی مشاهده می‌شود. برازش میان منحنی‌ها با نتایج حل تحلیلی در رسانایی ۰۰۰۱ ژیمنس بر متر، بهتر از سایر مدل‌ها است. در این میان ضرایب ۲۱ عددی نتایج بهتری را نسبت به ضرایب ۶۱ و ۱۰۱ عددی نشان می‌دهد.

روش "Key, (2012)" با نتایج تحلیلی برازش بسیار خوبی را نشان می‌دهد. پاسخ مشتق میدان مغناطیسی به زمان، نسبت به برازش نتایج میان داده‌های میدان مغناطیسی بهتر است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود، در صورت استفاده از ضرایب فیلترهای دیجیتال "Key, (2012)" از نتایج مربوط به پاسخ ولتاژ در مدل‌سازی داده‌های الکترومغناطیس گذرا استفاده شود. زیرا برازش میان نتایج تحلیلی و نتایج حاصل از فیلترهای دیجیتال در این حالت کمترین خطا را نشان داده است؛ از این رو می‌تواند دقت وارون‌سازی را بالاتر ببرد.

سایر روش‌ها نیز نتایج نسبتاً یکسانی را همانند روش "Key, (2012)" ارائه می‌کنند که برای جلوگیری از شلوغ شدن شکل‌ها در نتایج نهایی لحاظ نشده است. به دلیل تعداد کم فیلترهای دیجیتال "Kong, (2012)" و برازش خوبی که میان آن با پاسخ ولتاژ مشاهده می‌شود، انتظار می‌رود این فیلتر انتخاب مناسبی برای مدل‌سازی معکوس داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان بر پایه‌ی پاسخ ولتاژ باشد. البته همان‌طور که در ادامه خواهید دید، این انتخاب در مدل‌سازی زمین لایه‌ای چندان خوب عمل نمی‌کند.

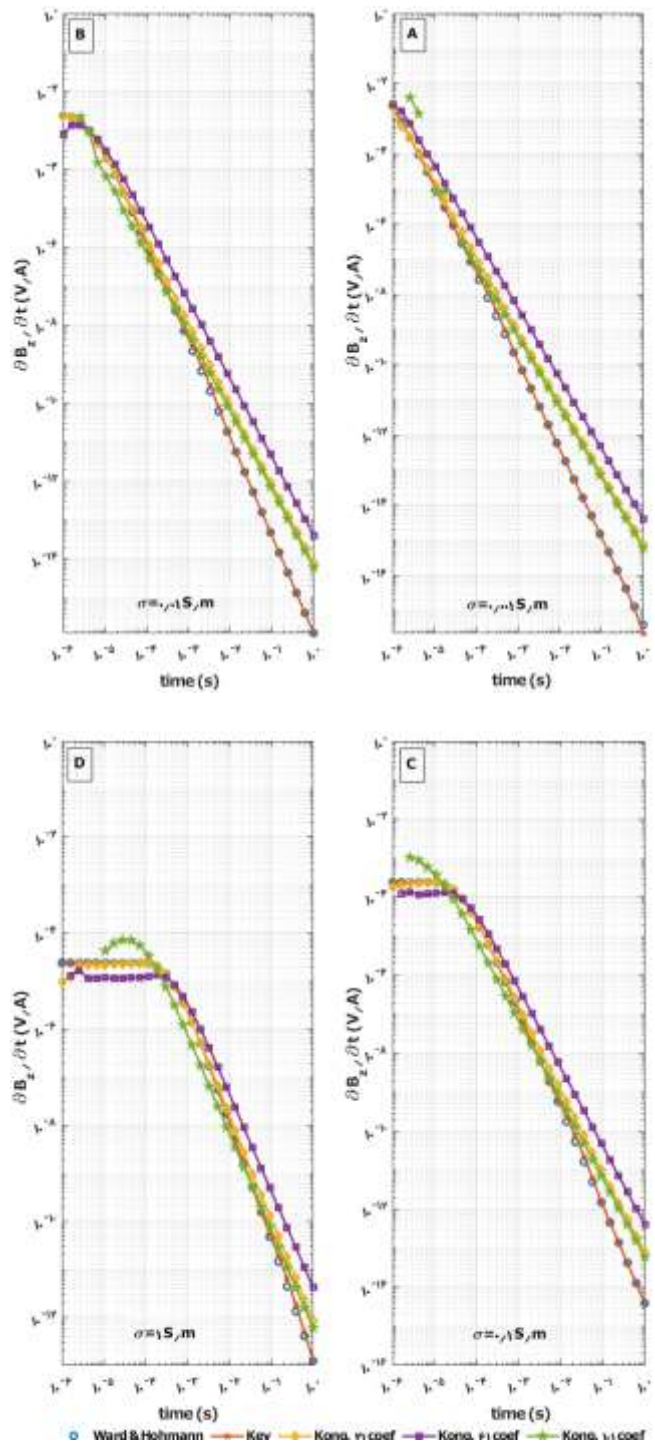
۲-۴- مدل زمین لایه‌ای

جهت مدل‌سازی زمین لایه‌ای از مدل‌های ارائه شده در مقالات چاپ شده اولیه استفاده شد. در جدول (۱)، پارامترهای مدل‌های دولایه مندرج در مقاله "Spies and Eggers, (1986)" نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات سه مدل زمین دولایه "Spies and Eggers, (1986)"

ضخامت (m)	رسانایی لایه دوم (S/m)	رسانایی لایه اول (S/m)	مدل
۲۵۰	10^{-2}	10^{-4}	A
۲۵	10^{-2}	۰.۱	B
۲۵	۱۰	۰.۱	C

در شکل (۷) و (۸) به ترتیب نتایج مدل‌سازی پیشرو داده‌های میدان مغناطیسی قائم و مشتق میدان مغناطیسی به‌وسیله فیلترهای دیجیتال حاصل از یک حلقه افقی به شعاع ۱۰۰ متر، حاوی جریان ۱ آمپر، برای هر مدل نشان داده شده است. برای پرهیز از شلوغ شدن شکل‌ها، بهترین برازش میان ضرایب مختلف یک روش به‌عنوان نتیجه روش موردنظر در شکل‌های نهایی ارائه شده است.



شکل ۶: بررسی دقت تعداد ضرایب فیلترهای دیجیتال در حل عددی مدل‌سازی مستقیم داده‌های الکترومغناطیس گذرا - شعاع حلقه ۱۰۰ متر و بر روی زمین قرار دارد و رسانایی مدل‌های نیم فضا همگن از A تا D در حال افزایش است.

در شکل (۶) نتایج حاصل از پاسخ ولتاژ بر اساس ضرایب مختلف فیلترهای دیجیتال "Kong, (2012)" در نیم فضاها مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، اگر چه نمودارها روند بهتری را نشان می‌دهند؛ با این‌وجود یک گسستگی در نتایج حاصل از

به زمین همگن و زمین لایه ای، در صورتی که از فیلترهای دیجیتال "Key, (2012)" برای مدل سازی داده های الکترومغناطیس حوزه زمان استفاده می شود، از نتایج مربوط به پاسخ ولتاژ در بدنه برنامه وارون سازی استفاده شود.

۳-۴- مقایسه نتایج فیلترهای دیجیتال با نرم افزار مدل سازی

"CR1MD" کدی در محیط Matlab است که برای مدل سازی داده های الکترومغناطیس به وسیله "Nielsen and Baumgartner, (2006)" بر پایه روش "Ryu et al., (1970)" و "Anderson, (1981)" نگارش یافته است. این برنامه بر اساس روش تبدیل عددی سینوس (NST) و روش تبدیل سریع سینوس (FST) به مدل سازی پیشرو داده های حوزه زمان می پردازد و از ۳۰۱ ضریب برای مدل سازی استفاده می کند و مقدار امیدانس را بر اساس تغییرات زمان محاسبه می نماید. با فرض این که میدان مغناطیسی در سطح حلقه فرستنده ثابت می ماند، می توان رابطه میان پاسخ میدان مغناطیسی قائم و ولتاژ القایی را به صورت زیر نوشت:

$$v(t) = -\mu_0 n \pi a^2 \frac{dh_z(t)}{dt} \quad (17)$$

و مقدار امیدانس متقابل را از رابطه ۱۸ به دست آورد

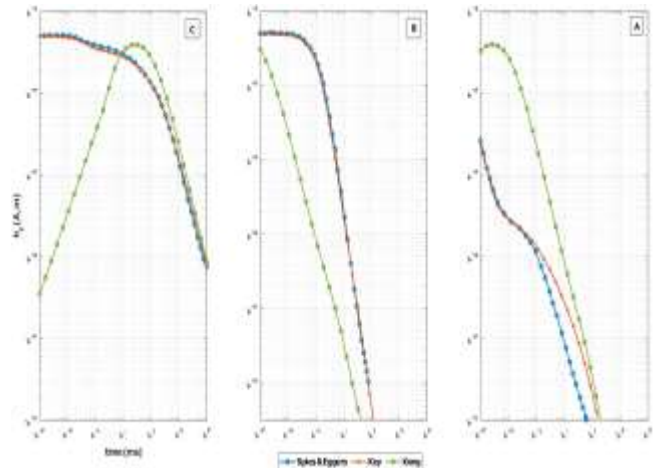
$$Z(\tau) = -\frac{2na^2}{\sigma_1 a^3} \int_0^\infty \text{Im} \left[h_z \left(\frac{2g}{\sigma_1 \mu_0 a^2} \right) \frac{2a}{I} \right] \sin(g\tau) dg \quad (18)$$

که در این روابط n تعداد حلقه فرستنده، $\tau = \frac{2t}{\sigma_1 \mu_0 a^2}$ و

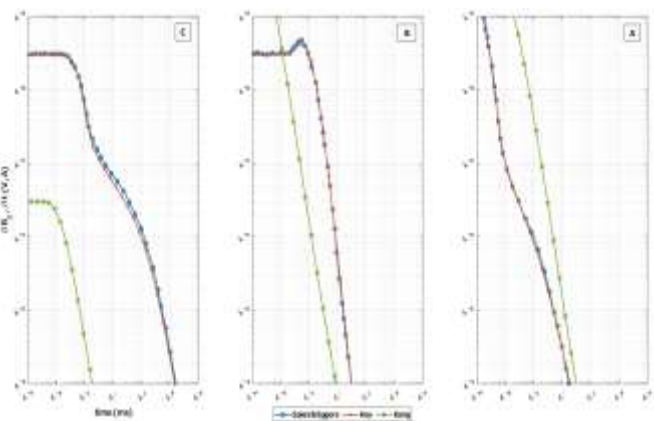
$g = \frac{1}{2} \sigma_1 \mu_0 \omega a^2$ در نظر گرفته می شود و σ_1 بیانگر رسانایی لایه اول است. با توجه به رابطه (۱۸)، می توان مقدار امیدانس متقابل را در کانال های مختلف محاسبه نمود ("Nielsen and Baumgartner, 2006") برای مقایسه عملکرد الگوریتم های مختلف فیلترهای دیجیتال، مطابق جدول (۲)، چند مدل زمین لایه ای برای مقایسه میان نتایج مختلف فیلترهای دیجیتال با نرم افزارهای مدل سازی داده های الکترومغناطیس حوزه زمان در نظر گرفته شد.

جدول ۲. مشخصات سه مدل مختلف زمین لایه ای، رسانایی لایه ها بر حسب (S/m) و ضخامت لایه ها بر حسب (m) است.

مدل	A	B	C
σ_1	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲
d_1	۵۰	۲۰	۵۰
σ_2	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۰۲
d_2	۵۰۰	۴۰	۱۰۰
σ_3	۰.۰۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰۱

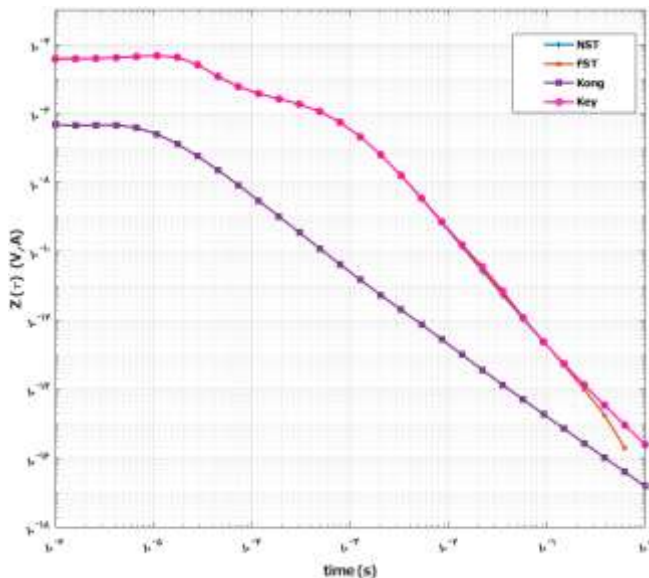


شکل ۷: مقایسه نتایج پاسخ میدان مغناطیسی قائم حاصل از مدل های A، B و C که مشخصات آنها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۸: مقایسه نتایج پاسخ ولتاژ حاصل از مدل های A، B و C که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است.

در اغلب موارد نتایج مشابه هم بوده و اختلاف فاحشی میان آنها جز در کانال های انتهایی مشاهده نمی شود. همان گونه که در شکل (۷) مشخص است، پاسخ مربوط به روش "Kong, (2012)" نسبت به روش "Key, (2012)"؛ روش "Anderson, (1983)" پاسخ مشابهی را نشان می دهد (تفاوت های فاحشی را نشان می داد. از این رو اگرچه این روش دارای ضرایب فیلتر بسیار کمتری است؛ اما در مدل سازی زمین لایه ای نتایج خوبی را ارائه نکرده است این پاسخ در نتایج مربوط به پاسخ ولتاژ بسیار واضح تر است. هنگامی که روباره مقاوم است اختلاف میان روش "Key, (2012)" با نتایج "Spies and Eggers, (1986)" در کانال های ابتدایی کمتر و با رفتن به کانال های انتهایی این اختلاف بیشتر می شود این مورد با کاهش مقدار مقاومت ویژه روباره بسیار کمتر می شود؛ اما مطابق نتایج شکل (۸)، در پاسخ ولتاژ این اتفاق رخ نمی دهد و نتایج میان روش "Key, (2012)" با نتایج "Spies and Eggers, (1986)" در هر سه مدل برآزش بسیار خوبی را نشان می دهند. روش "Kong, (2012)" در مدل سازی زمین لایه ای ساده نتایج ضعیفی را در پاسخ ولتاژ ارائه می کند که این مهم مطابق شکل (۸)، در هر سه مدل کاملاً قابل مشاهده است. بنابراین، پیشنهاد می شود باتوجه به نتایج مربوط



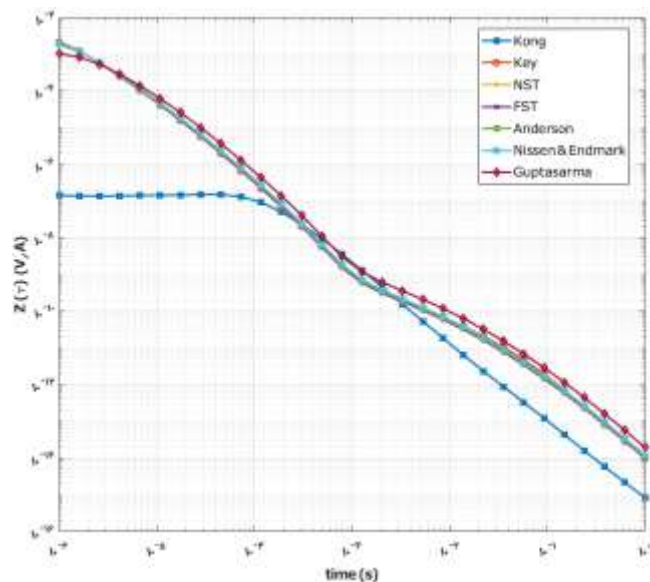
شکل ۱۰: مقایسه نتایج مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های الکترومغناطیس مدل B جدول (۲)، به‌وسیله روش‌های مختلف فیلترهای دیجیتال نسبت به نتایج ارائه شده به‌وسیله نرم‌افزار "CR1MD"، برای مقایسه‌ی بهتر سایر نتایج مشابه حذف شده است.

ضرایب فیلتر "Key, (2012)" نتایج بسیار خوبی را با نتایج حاصل از روش‌های "FST" و "NST" نشان می‌دهند که این انطباق در شکل (۱۰) و (۱۱)، بهتر مشاهده می‌شود. به سبب استفاده از تعداد ضرایب کمتر، پیشنهاد می‌شود برای مدل‌سازی وارون از این روش به عنوان هسته مدل‌سازی پیش‌رو استفاده شود. روش تبدیل سریع سینوس در کانال‌های انتهایی نتایج خوبی به دست نمی‌دهد، این مورد در شکل ۱۰ و خصوصاً شکل (۱۱) کاملاً مشخص است. فیلتر "Kong, (2012)" اگرچه روند نزولی را در هر دو شکل نشان می‌دهد؛ اما همچنان در نتایج قابل اعتماد نیست و اختلاف زیادی با نتایج اصلی دارد.

در مدل C تبدیل سریع سینوس در کانال‌های انتهایی پاسخ حقیقی ارائه نمی‌دهد، این مورد با یک افتادگی ناگهانی در شکل ۱۱، مشهود است. از این رو این روش برای مدل‌سازی وارون می‌تواند نتایج اشتباهی در کانال‌های انتهایی ارائه دهد. فیلتر "Kong, (2012)" تنها یک روند نزولی را نشان می‌دهد که با سایر روش‌ها همپوشانی ندارد بنابراین مناسب هسته وارون‌سازی نیست، اما فیلتر "Key, (2012)"، "NST" و "Anderson, (1983)" همپوشانی خوبی را همانند مدل‌های قبل ارائه می‌دهد، نظر به اینکه تعداد ضرایب فیلتر "Key, (2012)" کمتر از این دو می‌باشد، می‌تواند به عنوان انتخابی مناسب در وارون‌سازی داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان باشد.

d_3	۱۰۰	۶۰	∞
σ_4	۰.۱	۰.۰۰۲	
d_4	∞	∞	
a	۱۰۰	۲۰۰	۵۰

نتایج حاصل از امپدانس متقابل مدل‌های مختلف جدول (۲)، با استفاده از روش‌های مختلف در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نمایش داده شده است. در شکل (۹) و (۱۰)، شعاع حلقه فرستنده بیشتر از ضخامت لایه اول و در شکل (۱۱)، شعاع حلقه فرستنده برابر با لایه اول است. مطابق نتایج به دست آمده، تمام مدل‌ها به جز فیلتر "Kong, (2012)" در کانال‌های انتهایی همپوشانی خوبی را ایجاد و روند را به خوبی نشان داده‌اند، از آنجاکه این نرم‌افزار بر پایه روش "Anderson, (1981)" نوشته شده است، نتایج این روش همپوشانی بسیار خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۹: مقایسه نتایج مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های الکترومغناطیس مدل A جدول (۲)، با روش‌های مختلف فیلترهای دیجیتال نسبت به نتایج ارائه شده به‌وسیله نرم‌افزار "CR1MD"

در فیلتر "Guptasarma, (1982)" تنها یک بالا افتادگی وجود دارد؛ که حاصل از ضرایب و پارامترهای متفاوت این روش است. البته این روش از ضرایب کمی برای محاسبه استفاده میکند و به کار بردن آن در هسته برنامه وارون می‌تواند سبب کاهش زمان در حصول نتایج شود.

لایه ای و همچنین نتایج نهایی مشهود است، به گونه ای که هرچه زمین مورد مطالعه رسانا تر باشد و یا حلقه فرستنده کوچک تر شود، این عدم تطابق بهتر مشاهده می شود.

از این رو اگرچه این روش برای مدل سازی دوبعدی داده های الکترومغناطیس حوزه زمان نتایج خوبی را ارائه می کند اما بر اساس تغییر شعاع حلقه فرستنده و نوع لایه بندی زمین، نتایج متفاوت با خطای فاحشی را ارائه می کند از این رو پیشنهاد می شود جهت مدل سازی پیشرو داده های الکترومغناطیس حوزه زمان استفاده از روش فیلترهای دیجیتال "Kong, (2012)" با احتیاط و بررسی بیشتری برای وارون سازی بر پایه پاسخ ولتاژ استفاده شود. از سوی دیگر باتوجه به پاسخ امپدانس مدل های زمین لایه ای، مشخص شد که پاسخ مربوط به روش تبدیل سریع سینوس در کانال های انتهایی دارای خطا است.

از این رو به نظر می رسد برای هسته وارون گزینه مناسبی نباشد. از آنجاکه نرم افزار "CR1MD" بر پایه روش "Ryu et al., (1970)" و "Anderson, (1981)" نگارش یافته است و روش "Anderson, (1981)" همپوشانی خیلی خوبی با آن دارد لذا با توجه به ضرایب کمتر می تواند گزینه مناسبی برای مدل سازی های این حوزه باشد. البته باید توجه داشت که ضرایب روش "Anderson, (1981)" تقریباً ۴ برابر روش "Key, (2012)" است. از آنجاکه در تمام مدل سازی های صورت گرفته "Key, (2012)" نتایج قابل قبولی را در مقایسه با سایر روش های ارائه نمود، می تواند به عنوان گزینه مناسب فیلترهای دیجیتال در حل معادلات مدل سازی پیشرو و هسته وارون الکترومغناطیس حوزه زمان در نظر گرفته شود.

۶- فهرست منابع

زارعی، م.، روشندل کاهو، ا.، سیاه کوهی، ح.، ر.، صادقی، م.، ۱۳۹۱، شناسایی کانال مدفون با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۶ (۴)، ۸۵-۹۵

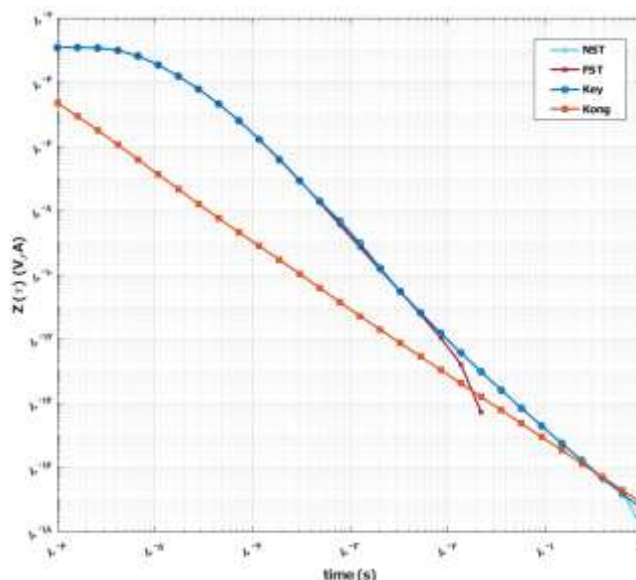
عرب امیری، ع.، ۱۳۸۸، ارائه روشی بهبود یافته جهت مدل سازی معکوس داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، رساله دکتری معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود

آراسته، ه.، جواهریان، ع.، ۱۳۸۹، تصویر سازی لایه های نازک با استفاده از نشانگرهای به دست آمده از تجزیه طیفی به روش تبدیل فوریه زمان کوتاه، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۶ (۲)، ۴۱-۵۹

Anderson, W.L., 1982, Fast Hankel transforms using related and lagged convolutions: ACM Trans. on Math. Software 8, 344-368.

Anderson, W.L., 1979, Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and I by adaptive digital filtering, Geophysics, 44, 1287-1305.

Anderson, W.L., 1983, Fourier cosine and sine transforms using lagged convolutions in double-precision (subprograms DLAGFO/DLAGF1). U.S. Geological Survey Open-File Report, 83-320.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج مدل سازی پیشرو داده های الکترومغناطیس مدل C جدول (۲)، به وسیله روش های مختلف فیلترهای دیجیتال نسبت به نتایج ارائه شده به وسیله نرم افزار "CR1MD"

۵- نتیجه گیری

تبدیلات سینوس و کسینوس به صورت متداول در مسائل الکترومغناطیس از جمله حل معادله مدل سازی پیشرو داده های الکترومغناطیس حوزه زمان مشاهده می شوند که برای حل آنها روش فیلترهای دیجیتال ابزاری مناسب و قابل اطمینان است. انتگرال هنکل و تبدیلات فوریه، میلیون ها بار در برنامه های مدل سازی های الکترومغناطیسی بخصوص در مدل سازی های دو و سه بعدی محاسبه می شوند که سبب افزایش قابل توجه زمان محاسبات در مدل سازی های حوزه زمان می گردد. بر همین اساس پژوهشگران همواره در صدد بوده اند که با کاهش تعداد ضرایب فیلترهای دیجیتال سرعت و دقت انجام محاسبات را در مدل سازی پیشرو که هسته اصلی وارون سازی است؛ بهبود بدهند. در این مطالعه به بررسی فیلترهای دیجیتال مختلف برای حل مدل سازی پیشرو داده های الکترومغناطیس حوزه زمان با استفاده از الگوریتم های مختلف پرداخته شد تا الگوریتم بهینه و مناسب جهت مدل سازی پیشرو داده های الکترومغناطیس حوزه زمان مشخص گردد.

بر این اساس ضمن کدنویسی کامل هر یک از روش ها در نرم افزار Matlab پاسخ میدان مغناطیسی قائم، پاسخ ولتاژ و امپدانس نسبت به زمان به دست آمد. در مرحله اول نتایج هر روش با پاسخ تحلیلی حاصل از چند مدل همگن صحت سنجی شد. آنگاه پاسخ مدل های مختلف زمین لایه ای به وسیله هر یک از روش ها محاسبه و نتایج مورد مقایسه قرار گرفت و در پایان برای انتخاب دقیق تر با نتایج حاصل از برنامه "CR1MD" مورد مقایسه قرار گرفت. پس از بررسی های انجام شده، مشخص شد، اگر چه ضرایب "Kong, (2012)" تعداد کمی را شامل می شود و در محاسبات انتگرال های پیچیده ریاضی نتایج خوب و خطای کمی را نشان می دهد؛ اما در مدل سازی های صورت گرفته نتایج ضعیف تری را نسبت به سایر روش ها نشان می دهد که این مهم در پاسخ تحلیلی میدان مغناطیسی قائم و پاسخ ولتاژ در حالت همگن و زمین

- Li, Y. G., & Key, K. 2007, 2D marine controlled-source electromagnetic modeling: Part 1 – An adaptive finite-element algorithm. *Geophysics*, 72(2), 51-62.
- Lucas, S. K., & Stone, H. A., 1995, Evaluating infinite integrals involving Bessel functions of arbitrary order. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 64(3), 217–231.
- Mitsuhata, Y., 2000, 2-D electromagnetic modeling by finite-element method with a dipole source and topography. *Geophysics*, 65, 465–475.
- Mulder, W.A., Wirianto, M., Slob, E.C., 2008, Time-domain modeling of electromagnetic diffusion with a frequency-domain code, *Geophysics*, 73 (1), 1-8.
- Newman, G. A., Alumbaugh, D. L., 1995, Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences1. *Geophysical Prospecting*, 43(8), 1021–1042.
- Newman, G. A., Hohmann, G. W., Anderson, W. L., 1986, Transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a layered earth, *Geophysics*, 51 (8), 1608–1627.
- Nissen, J., Enmark, T., 1986, An optimized digital filter for the Fourier transforms. *Geophysical Prospecting* 34, 897–903.
- Raiche, A. P., 1987, Transient electromagnetic field computations for polygonal loops on layered earth, *Geophysics*, 52 (6), 785–793.
- Ryu, J., Morrison H.F. and Ward S.H., 1970, Electromagnetic field about a loop source of current, *Geophysics*, 35, 862-896.
- Singh, N. P., Utsugi, M., Kagiya, T., 2009, TEM response of a large loop source over a homogeneous earth model: A generalized expression for arbitrary source-receiver offsets, *Pure and Applied Geophysics*, 166 (12), 2037–2058.
- Spies, B.R., Eggers, D.E., 1986, The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods: *Geophysics*, 51, 1462–1471.
- Spies, B.R., Frischknecht, F., 1991, *Electromagnetic Sounding. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*.
- Talman, J.D., 1978, Numerical Fourier and Bessel transforms in logarithmic variables. *Journal of Computational Physics*, 29 (1), 35–48.
- Tang, Z., Dong, X., Wang, X., & Ding, Z., 2015, Oligocene-Miocene magnetostratigraphy and magnetic
- Chen, J., Hoversten, G. M., Vasco, D., Rubin, Y., & Hou., Z., 2007, A Bayesian model for gas saturation estimation using marine seismic AVA and CSEM data. *Geophysics*, 72(2), 85–95.
- Christensen, N.B., 2016, Fast approximate 1D modelling and inversion of transient electromagnetic data, *Geophysical Prospecting*, 64, 1620-1631.
- Christensen, N.B., 1990, Optimized fast Hankel transform filters, *Geophysical Prospecting*, 38, 545–558.
- Ghosh, D.P., 1971, The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements, *Geophysical Prospecting*, 19, 192–217.
- Guptasarma, D., 1982, Computation of the time-domain response of a polarizable ground, *Geophysics*, 47, 1574–1576.
- Guptasarma, D., Singh, B., 1997, New digital linear filters for Hankel J0 and J1 transforms, *Geophysical Prospecting*, 45, 745–762.
- Haines, G.V., Jones, A.G., 1988, Logarithmic Fourier transformation, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 92, 171–178.
- Ingeman-Nielsen, T., Baumgartner, F., 2006, CR1Dmod: A Matlab program to model 1D complex resistivity effects in electrical and electromagnetic surveys, *Computers & Geosciences*, 32, 9, 1411–1419.
- Johansen, H.K., Sorensen, K.I., 1979, Fast Hankel transforms, *Geophysical Prospecting*, 27.
- Key, K., 2012, Is the fast Hankel transform faster than quadrature?, *Geophysics*, 77 (3), 21-30.
- Koefoed, O., Ghosh, D.P., Polman, G.J., 1972, Computation of type curves for electromagnetic depth sounding with a horizontal transmitting coil by means of a digital linear filter, *Geophysical Prospecting*, 20, 406–420.
- Kong, F.N., 2012, Evaluation of Fourier cosine/sine transforms using exponentially positioned samples. *Applied Geophysics*, 79, 46-54.
- Kong, F.N., 2007, Hankel transform filters for dipole antenna radiation in a conductive medium. *Geophysical Prospecting*, 55, 83–89.
- Kong, F.N., Johnstad, S.E., Røsten, T., Westerdahl, H., 2008, A 2.5D finite-element modeling difference method for marine CSEM modeling in stratified anisotropy media. *Geophysics*, 73 (1), 9–19.

anisotropy of the Baxbulak section from the Pamir-Tian Shan convergence zone, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(10), 3575–3592.

Tiwari, A. K., Maurya, S. P., Singh, N. P., 2018, TEM Response of a Large Loop Source over the Multilayer Earth Models, *International Journal of Geophysics*.

Vandergraft, S. J., 2014, *Introduction to Numerical Computations*, Academic Press.

Ward, S. H., Hohmann, G. W., 1987, Electromagnetic theory for geophysical applications, in M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, v.1, Theory: SEG, 53–129.

Wait, J.R., 1987, *Electromagnetic Wave Theory*, John Wiley & sons.

Werthmüller, D., Mulder A. W., Slob, E. C., 2021, Fast Fourier transform of electromagnetic data for computationally expensive kernels, *Geophysical Journal International*, 226 (2) , 1336-1347.

Zhao, Y., Zhu, Z., Lu, G., & Han, B., 2018, The optimal digital filters of sine and cosine transforms for geophysical transient electromagnetic method. *Journal of Applied Geophysics*, 150, 267–277.

Xiao, L., Gianluca, F., Bo, Z., Auken, E., & Christiansen, A. V., 2022, Fast 2.5D and 3D Inversion of transient electromagnetic surveys using the octree-based finite element method, *Geophysics*, 87(4), 267-277.