



دوره ۷، شماره ۱، ۱۴۰۰، صفحات ۵۱-۶۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JIRAG.2020.9907.1293

برآورد عمق و مکان بی‌هنجاری‌های حاصل از داده‌های الکترومغناطیس زمینی حوزه فرکانس با استفاده از روش تصویر برداری عمق از نقاط بینهایت

سعید پرنو^۱، بهروز اسکویی^{۲*} و جیووانی فلوریو^۳

۱- دانشجوی دکتری؛ گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۲- دانشیار؛ گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۳- استاد، گروه علوم زمین، زیست محیط و منابع دانشگاه ناپلز فدریکو ۲، ناپل، ایتالیا

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۴

* نویسنده مسئول مکاتبات: boskooi@ut.ac.ir

واژگان کلیدی

چکیده

در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل (روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی) با بهره‌گیری از روش‌های تصویربرداری مشخصه‌های توده‌ی مدفون از جمله عمق، موقعیت افقی، هندسه و خواص فیزیکی را می‌توان تعیین نمود. این روش‌ها به‌طور مرسوم بر روی میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده نمی‌شوند. زیرا روش‌های الکترومغناطیس از معادلات لاپلاس پیروی نکرده و بر پایه معادلات هلمهولتز می‌باشند. در این پژوهش، کارآمدی روش عمق از نقاط بینهایت (DEXP) یا بر روی داده‌های الکترومغناطیس زمینی حوزه فرکانس برای برآورد موقعیت افقی و عمقی ساختارهای رسانای زیرسطحی بررسی شده است. تبدیل DEXP بر پایه مقیاس‌دهی میدان در ارتفاع‌های مختلف با توان مناسبی از ارتفاع است. با توجه به اهمیت فرآیند ادامه فراسو در روش‌های تصویربرداری، در این پژوهش نخست فرآیند ادامه فراسو برای داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس کد نویسی شده و از آن در فرآیند تبدیل DEXP استفاده شده است. در ابتدا برای بررسی کارایی تبدیل DEXP در تفسیر داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس، از داده‌های مصنوعی تولید شده با استفاده از نرم‌افزار کامسول برای مدل‌های سطح تماس، دایک نازک و استوانه در محیط دوبعدی استفاده شده است. نتایج بدست آمده، نشان از کارآمدی این روش در برآورد عمق و موقعیت افقی اهداف مصنوعی، با دقت بالا دارد. برای بررسی عملی روش پیشنهادی، در یک منطقه صنعتی در جنوب ایتالیا (شهر ناپل) که شماری لوله و کابل با عمق و ابعاد مشخص عبور کرده‌اند، یک مجموعه داده در یک شبکه منظم با استفاده از دستگاه EM31، برداشت شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان از روش تصویربرداری DEXP که در حوزه پتانسیل گسترش یافته، به‌منظور تفسیر داده‌های الکترومغناطیس زمینی حوزه فرکانس نیز بهره گرفت. مقاطع حاصل از تبدیل DEXP برای داده‌های واقعی، اطلاعات فراوان، سودمند و دقیقی از اهداف زیرسطحی مدفون در منطقه مورد مطالعه را ارائه می‌کنند.

الکترومغناطیس حوزه فرکانس

برآورد عمق

تصویربرداری

روش ادامه فراسو

۱- مقدمه

سرعت، دقت، حجم بالای داده و غیرمخرب بودن روش‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس، سبب کاربرد گسترده این روش‌ها برای بررسی رسانندگی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی ساختارهای نزدیک به سطح شده است. در ژئوفیزیک، این روش الکترومغناطیسی غیرمخرب با نام‌های متفاوتی مانند روش لوپ-لوپ^۱، الکترومغناطیس القایی^۲، رسانندگی سنج^۳ و تحت شرایط ویژه‌ای به‌عنوان روش عدد القای پایین^۴ شناخته می‌شود. دستگاه‌های LIN برای اندازه‌گیری تغییرات رسانندگی الکتریکی زیر سطح زمین استفاده می‌شوند (McNeil, 1980). با فرض برداشت داده‌ها در سطح زمین (ارتفاع صفر) و تراوایی مغناطیسی برابر خلأ برای زمین، شرط عدد القاء پایین تا هنگامی که عمق پوست خیلی بیشتر از فاصله میان فرستنده و گیرنده باشد، درست است (Reid, & Howlett, 2001). فرایند تفسیر داده‌های دستگاه‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی را می‌توان به دو صورت کیفی و کمی تقسیم نمود. دیدگاه کیفی بر مبنای مشاهده داده‌های رسانندگی الکتریکی ظاهری و تراوایی مغناطیسی ظاهری (یا مؤلفه حقیقی و موهومی) است. در این مورد می‌توان مکان و هندسه سطحی تقریبی آنومالی‌ها را برآورد نمود (Yoder et al., 2017; Heil and Schminhalter, 2016; Dabas et al., 2001). با این دیدگاه، نمی‌توان اطلاعاتی درباره عمق، هندسه کلی و خصوصیات الکترومغناطیسی اهداف مانند رسانندگی یا تراوایی مغناطیسی را آشکار نمود. بنابراین روش‌های گوناگون وارون‌سازی به منظور ارائه تصویری دقیق از خصوصیات الکترومغناطیسی زیرسطحی با استفاده از داده‌های این دستگاه‌ها گسترش یافته‌اند (Kamm et al., 2013; Yi and Sasaki, 2015; Song and Kim, 2008). برای وارون‌سازی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس، حداقل سه داده در هر نقطه نیاز است (Guillemoteau et al., 2019). بنابراین وارون‌سازی داده‌های حاصل از دستگاه‌هایی که تنها از یک فرکانس و یک فاصله فرستنده-گیرنده بهره می‌برند (مانند EM31)، ممکن نیست و تفسیر داده‌های این دستگاه‌ها معمولاً به صورت کیفی است. از طرف دیگر، برای دستگاه‌هایی مانند GSSI EMP400 profiler، یک مجموعه داده دربرگیرنده صدها هزار داده در یک هکتار است و برای مدل‌سازی این دستگاه‌ها با وضوح ۱۰ سانتیمتر و تا عمق ۵ متر نیاز به ۵۰ میلیون پارامتر است (Guillemoteau et al., 2019). بنابراین وارون‌سازی داده‌های این دستگاه‌ها نیازمند حجم بالایی محاسبات است؛ که به طبع نیازمند رایانه‌های قوی و فرآیندی زمان‌بر است.

در این مقاله به منظور غلبه بر این مشکلات، سعی شده از رویکرد تصویربرداری که به‌صورت گسترده در روش‌های ژئوفیزیکی پتانسیل (مغناطیس‌سنجی و گرانی-سنجی) مورد استفاده است؛ بهره گرفته شود. در سال‌های اخیر روش‌های تصویربرداری گوناگونی بر پایه تفسیر داده‌ها در سطح‌های (ارتفاع‌های) گوناگون و به‌منظور ارائه سریع تصویرهای دوبعدی و سه‌بعدی از توده‌های زیرسطحی زیر نام روش‌های چند مقیاسی^۵ ارائه شده‌اند (Florio et al., 2009; Fedi et al., 2009; Hornby et al., 1999). در این پژوهش روش DEXP بر روی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی ارزیابی می‌شود. تبدیل DEXP که بر پایه مقیاس‌دهی میدان در مقیاس‌های (ارتفاع‌های) مختلف با توان مناسبی از همان ارتفاع است؛ برای تفسیر کمی داده‌های پتانسیل پیشنهاد گردید (Fedi, 2005). تابع مقیاس‌دهی در این روش تابعی از ارتفاع، توان مقیاس‌دهی و مرتبه میدان است. روش تصویربرداری DEXP برای برآورد عمق توده‌های زیرسطحی بر روی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس دریایی (عمق پی‌جویی ۱-۲ کیلومتر) به‌صورت موفقیت‌آمیزی استفاده شده است (Di Castelmezzano, 2013). در این پژوهش کارایی تبدیل DEXP در برآورد عمق اهداف رسانا در داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی (عمق پی‌جویی کمتر از ۶۰ متر) با استفاده از داده‌های مصنوعی و واقعی برآمده از دستگاه EM31 ارزیابی شده است. همچنین در این پژوهش به‌منظور کاهش خطای برآورد عمق در محاسبات مربوط به تبدیل DEXP، از فرایند ادامه فراسو که بر پایه معادله هلمهولتز می‌باشد، استفاده شده است.

۲- روش LIN

به طور کلی، روش‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس با بهره‌گیری از جریان متغیر با زمان، یک میدان مغناطیس اولیه (H_p) در پیچه فرستنده (T_x) تولید می‌کنند. اگر یک توده رسانا داخل زمین وجود داشته باشد، جریان‌های گردابی^۶ در توده القاء شده (قانون فارادی) و این جریان‌ها میدان مغناطیسی ثانویه تولید می‌کنند (قانون آمپر) (Brosten et al., 2011). در نهایت پیچه‌ی گیرنده (R_x) میدان مغناطیسی اولیه و ثانویه (H_s) را ثبت می‌کند (شکل ۱).

- 1 Loop-Loop
- 2 Electromagnetic induction (EMI)
- 3 Conductivity meter
- 4 Low Induction Number (LIN)

$$IP(\%) = \text{Re}\left(\frac{H_t - H_p}{H_p}\right) \times 100 \quad (2)$$

و

$$QP(\%) = \text{Im}\left(\frac{H_t - H_p}{H_p}\right) \times 100 \quad (3)$$

میدان مغناطیس اولیه در راستای قائم را می‌توان به صورت زیر بیان نمود (Guillemoteau et al., 2015):

$$H_p = -\frac{m}{4\pi s^3} \quad (4)$$

در اینجا m و s به ترتیب گشتاور مغناطیسی و فاصله بین فرستنده و گیرنده هستند.

با توجه به تغییرات اندک تراوایی مغناطیسی مواد زیر سطح زمین در مقایسه با رسانندگی الکتریکی، تغییرات مؤلفه حقیقی (یا هم‌فاز) میدان مغناطیسی ثانویه خیلی کوچک است و در کاربردهای عملی بیشتر از مؤلفه موهومی (یا غیر هم‌فاز) استفاده می‌شود (Cella, F. & Fedi, 2015). با فرض شرط عدد القای پایین مقدار رسانندگی ظاهری (σ_a) در دستگاه‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس به صورت رابطه (5) تعریف می‌شود (McNeil, 1980):

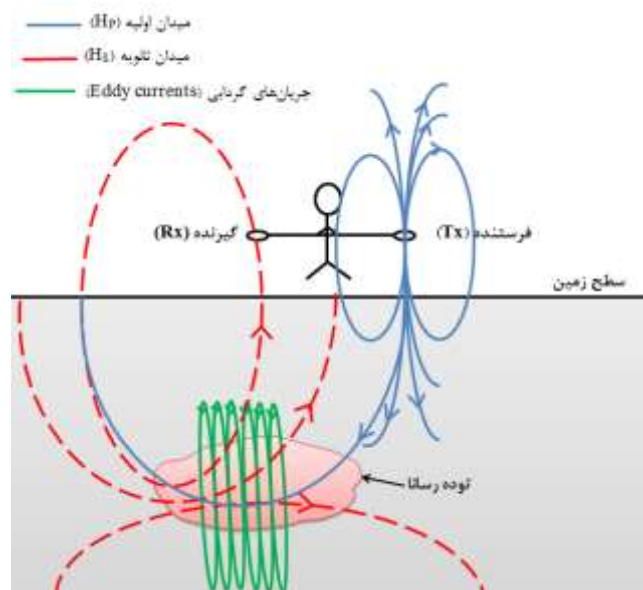
$$\sigma_a = \frac{4}{2\pi\mu s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)_{QP} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که برخلاف استفاده گسترده از روش الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی به دلیل سرعت، دقت، حجم بالای داده و غیرمخرب بودن آن در بیشتر کشورها، متأسفانه در ایران تنها آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود به دستگاه EM34-3 مجهز است و پژوهش‌هایی در این زمینه در این دانشگاه نیز انجام شده است (به عنوان نمونه می‌توان به احمدی (۱۳۹۴)؛ بهرامی (۱۳۹۳) اشاره نمود).

۳- تصویربرداری در روش الکترومغناطیس حوزه فرکانس

در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل (روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس-سنجی) با بهره‌گیری از روش‌های تصویربرداری پارامترهای توده‌های مدفون از جمله عمق، موقعیت افقی، شاخص ساختاری و خواص فیزیکی را می‌توان تعیین نمود. این روش‌ها به‌طور مرسوم بر روی میدان‌های الکترومغناطیس استفاده نمی‌شوند، زیرا روش‌های الکترومغناطیس از معادلات لاپلاس پیروی نکرده و بر اساس معادله هلمهولتز می‌باشند. با این وجود اگر بتوان اثر جریان‌های جابجایی^۱ را نادیده گرفت و محیط میزبان رسانندگی خیلی پایینی نسبت به توده مورد بررسی داشته باشد، از روش‌های تصویربرداری در روش الکترومغناطیس حوزه فرکانس نیز می‌توان بهره گرفت (Roy, 1966).

در روش ژئوفیزیکی LIN با توجه به فرکانس مورد استفاده (معمولاً در حد چند کیلوهرتز) می‌توان بخش حقیقی معادله هلمهولتز را نادیده گرفت (McNeil, 1980) و در نتیجه معادله هلمهولتز



شکل ۱: نمایی از برداشت داده‌ها به روش الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی. فاصله بین پیچ‌های فرستنده (TX) و گیرنده (RX) برای فرکانس‌های مختلف، متفاوت است. میدان اولیه توسط فرستنده تولید می‌شود، در این شکل میدان اولیه، ثانویه و جریان‌های گردابی به ترتیب با رنگ‌های آبی، قرمز و سبز نشان داده شده است، برگرفته از (Brosten et al., 2011).

دامنه، فاز و جهت میدان دریافتی به وسیله پیچ‌های گیرنده، نسبت به میدان مغناطیسی اولیه متفاوت خواهد بود و بر مبنای همین تفاوت‌ها، اطلاعات سودمندی را می‌توان درباره توده‌های زیرسطحی (هندسه و خصوصیات الکترومغناطیسی) بدست آورد. میدان مغناطیس کل (H_t) که به وسیله گیرنده ثبت می‌شود، مجموع میدان‌های مغناطیسی اولیه و ثانویه است (Guillemoteau et al., 2019):

$$H_t = H_p + H_s \quad (1)$$

H_p همواره مقداری حقیقی است؛ که معرف موج مستقیم هوایی است. میدان ثانویه که نتیجه برهم‌کنش میدان اولیه با زمین است، مقداری مختلط است؛ که شامل دو بخش حقیقی و موهومی است. به طور معمول، خروجی دستگاه‌های الکترومغناطیس زمینی حوزه فرکانس به صورت بخش حقیقی و موهومی نسبت میدان مغناطیسی ثانویه به میدان مغناطیسی اولیه است. این مقادیر حقیقی و موهومی، به ترتیب با تراوایی مغناطیسی و رسانندگی الکتریکی مواد زیر سطح زمین رابطه مستقیم دارند (McNeil, 1980). به همین دلیل در برخی از دستگاه‌ها (مانند EM31) با یکسری فرضیات (فرض عدد القای پایین)، خروجی دستگاه‌ها به صورت رسانندگی الکتریکی یا تراوایی مغناطیسی ظاهری ارائه می‌شوند. این نسبت‌های بدون واحد، مقادیر خیلی کوچکی بوده و بیشتر به صورت درصد یا قسمت در هزار (ppm) بیان می‌شوند (Guillemoteau et al., 2015).

عملگر برای روش الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی استخراج گردد. در روش‌های پتانسیل، محاسبات مربوط به ادامه فراسو به‌طور معمول در حوزه‌ی فرکانس از طریق تبدیل فوریه سریع در سه مرحله انجام می‌شود: تبدیل فوریه میدان پتانسیل، حاصلضرب مرحله اول در عدد موج و در پایان تبدیل فوریه معکوس گام دوم. فرآیند ادامه فراسو در روش‌های پتانسیل بر اساس فرض معادله لاپلاس است.

در این مقاله از عملگر ادامه فراسو که برای روش‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی که بر مبنای معادله هلمهولتز ارائه شده، استفاده شده است. Roy (1969)، معادله انتگرالی عملگر ادامه فراسو را برای قسمت‌های حقیقی و موهومی میدان الکترومغناطیسی در خلا (مقدار رسانندگی تقریباً صفر) استخراج نمود:

$$\operatorname{Re}(H_i(x, y, -z)) = \frac{(z-z')}{2\pi} \iint \left[\operatorname{Re}(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\cos(2\pi R/\lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \sin(2\pi R/\lambda) \right\} - QP(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\sin(2\pi R/\lambda)}{R} - \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi R/\lambda) \right\} \right] \frac{1}{R^2} dx' dy' \quad (10)$$

و

$$QP(H_i(x, y, -z)) = \frac{(z-z')}{2\pi} \iint \left[\operatorname{Re}(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\sin(2\pi R/\lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi R/\lambda) \right\} - QP(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\cos(2\pi R/\lambda)}{R} - \frac{2\pi}{\lambda} \sin(2\pi R/\lambda) \right\} \right] \frac{1}{R^2} dx' dy' \quad (11)$$

در اینجا λ طول موج و $R = ((x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2)^{1/2}$ است. برای میدان‌های ایستا، اندازه λ بینهایت بزرگ و بخش موهومی صفر است، در نتیجه معادلات (۱۰ و ۱۱) به معادلات انتگرالی ادامه فراسوی ایستا تبدیل می‌شوند. می‌توان معادلات (۱۰ و ۱۱) را به‌صورت یک ماتریس خطی که داده‌های اندازه‌گیری شده در یک سطح مبنا (معمولاً سطح زمین) را به داده‌هایی در ارتفاع‌های مختلف تصویر می‌کند، در نظر گرفت. برای یک مجموعه داده که در فواصل یکسان اندازه‌گیری شده‌اند، روابط (۱۰ و ۱۱) را می‌توان به صورت روابط (۱۲ و ۱۳) گسسته نمود:

$$\operatorname{Re}(H_i(x, y, -z)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m'} \left[\operatorname{Re}(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\cos(2\pi R/\lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \sin(2\pi R/\lambda) \right\} - QP(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\sin(2\pi R/\lambda)}{R} - \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi R/\lambda) \right\} \right] \times \frac{(z-z')}{R^2} \quad (12)$$

و

$$QP(H_i(x, y, -z)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m'} \left[\operatorname{Re}(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\sin(2\pi R/\lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi R/\lambda) \right\} - QP(H_i(x', y', z')) \left\{ \frac{\cos(2\pi R/\lambda)}{R} - \frac{2\pi}{\lambda} \sin(2\pi R/\lambda) \right\} \right] \times \frac{(z-z')}{R^2} \quad (13)$$

بنابراین عملگر فراسو برای قسمت حقیقی و موهومی خروجی دستگاه‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$K_U^{\operatorname{Re}(H_i)} = \frac{\Delta x \Delta y}{2\pi} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m'} \left(\frac{\sin(2\pi R/\lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi R/\lambda) \right) - \frac{\sin(2\pi R/\lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi R/\lambda) \times \frac{(z-z')}{R^2} \quad (14)$$

و

$$\nabla^2 H + i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)H = 0 \quad (6)$$

به معادله پخش تبدیل می‌شود:

$$\nabla^2 H + i\omega\mu\sigma H = 0 \quad (7)$$

در اینجا μ تراوایی مغناطیسی، ω فرکانس زاویه‌ای، ϵ گذردهی الکتریکی و i عدد مختلط ($\sqrt{-1}$) است. با فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ هرتز و نسبت رسانندگی الکتریکی محیط میزبان به توده کمتر از ۰/۰۵، می‌توان اثر جریان‌های جابجایی را نیز در نظر نگرفت (Roy, 1966). در این شرایط معادله پخش به معادله لاپلاس تبدیل می‌شود:

$$\nabla^2 H = 0 \quad (8)$$

در این حالت به‌طور مستقیم می‌توان از روش‌های تصویربرداری (با استفاده از فرآیند ادامه فراسو پیشنهاد شده برای روش‌های پتانسیل) گسترش یافته برای روش‌های پتانسیل استفاده نمود. با این فرضیات، (Beamish, 2012) از مشتقات زاویه تیلت به منظور برآورد موقعیت افقی و عمق ساختارهای زیرسطحی در داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس، (Di Castelmezzano, 2013) از روش هندسی و DEXP برای برآورد عمق توده‌های زیرسطحی در داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس دریایی، (Dondurur, 2005) از روش گردایان کامل نرمال شده برای برآورد عمق بی‌هنجاری‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس برآمده از اهداف صفحه‌ای با شیب‌های متفاوت، استفاده نمودند. با این وجود، با افزایش فرکانس و نسبت رسانندگی الکتریکی محیط میزبان به توده، نمی‌توان فرض معادله لاپلاس را در نظر گرفت و در نتیجه پارامترهای برآورد شده از روش‌های تصویربرداری با خطای بالا همراه خواهند بود. در این پژوهش برای رفع این مشکل از فرآیند ادامه فراسوی پیشنهادی بر اساس معادله هلمهولتز در روش تصویربرداری DEXP در تفسیر داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس استفاده شده است.

لازم به ذکر است که روش تصویربرداری برای داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس نخستین بار توسط (Roy, 1966) پیشنهاد گردید. Roy (1966) نشان داد که عمق بالای سطح توده‌ها را می‌توان با دقت قابل توجهی با استفاده از روش ادامه فراسو برآورد نمود.

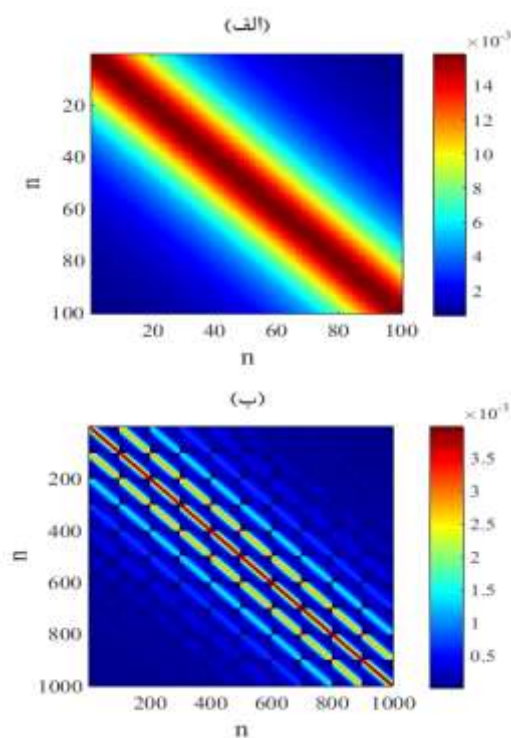
۴- روش DEXP و ادامه فراسو

تبدیل DEXP با رابطه (۹) محاسبه می‌شود ((Fedi and Pilkington., 2012)، بنی‌عامریان و همکاران، ۱۳۹۵، الف):

$$DEXP(h_i) = |h_i|^{\alpha_n} \left| \frac{\partial^n f(x, y, z)}{\partial z^n} \right|_{z=h_i} = |h_i|^{\frac{(N+n)}{2}} \left| \frac{\partial^n f(h_i)}{\partial z^n} \right|_{z=h_i} \quad (9)$$

که در آن h_i مقیاس یا ارتفاع ادامه‌ی فراسو، $i=1,2,\dots,l$ شمار مقیاس‌ها، α توان مقیاس‌ده، n مرتبه مشتق میدان و N شاخص ساختاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملگر ادامه‌ی فراسو نقش کلیدی در این تبدیل ایفا می‌کند؛ به‌نحوی که تمام روش‌های تصویربرداری به گونه‌ای دربرگیرنده فرآیند ادامه فراسو یا فروسو هستند (Fedi and Pilkington., 2012). بنابراین، در نخستین گام باید این

برآورد عمق بدون نیاز به فرآیند زمان‌بر وارون‌سازی استفاده می‌شود. در میان روش‌های ارائه شده در گستره پتانسیل، نمی‌توان یک روش را همواره کامل در نظر گرفت. به این معنی که تنها نتایج یک روش خاص را به منزله‌ی نتایج قطعی در نظر گرفت. بنابراین در هر مورد نیاز است که با توجه به کیفیت داده‌ها و هدف نهایی روش‌های گوناگونی بکار گرفته شوند تا بهترین نتایج با کمترین خطا بدست آید (بنی‌عامریان و همکاران، ۱۳۹۵، ب). در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی زیر نام روش‌های چندمقیاسی معرفی شده و بیشتر بر اساس این واقعیت پایه‌گذاری شده‌اند که میدان‌های پتانسیل تولید شده بوسیله چشمه‌هایی مانند کره و استوانه، همگن هستند و تغییرات آنها تابع توان مشخصی از فاصله تا چشمه است (Fedi and Pilkington., 2012).



شکل ۳: نمونه‌ای از قسمت موهومی ماتریس عملگر ادامه فراسو برای ارتفاع ۲ متر از سطح زمین. (الف): حالت دوبعدی برای یک پروفیل به طول ۱۰ متر در راستای محور x و فاصله نمونه‌برداری ۰/۱ متر. (ب): حالت سه‌بعدی قسمت الف برای ۱۰ پروفیل با فواصل ۱ متر در راستای محور y مختصات.

با بهره‌گیری از این ویژگی، بررسی میدان در ارتفاع‌ها یا مقیاس‌های مختلف اطلاعات سودمندی از عمق و ساختار تقریبی چشمه فراهم می‌کند. اندازه‌گیری داده‌ها در چندین ارتفاع فرآیندی پرهزینه، زمان‌بر و دشوار است. بنابراین نخست با بهره از عملگر ادامه‌ی فراسو؛ داده‌ها در ارتفاع‌های مختلف برآورد می‌شوند.

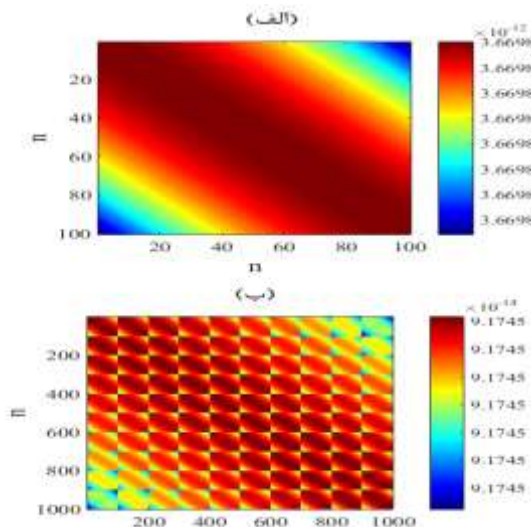
انگیزه اصلی این پژوهش ارزیابی همه‌ی روش‌های تصویربرداری یا مقایسه آن‌ها باهم نبوده، بلکه انگیزه بررسی کاربردی بودن این روش‌ها بر روی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی است. از این‌رو در این

$$K_U^{QP(H_i)} = \frac{\Delta x \Delta y}{2\pi} \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{ny} \left(\frac{\cos(2\pi R / \lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \sin(2\pi R / \lambda) \right) - \frac{\cos(2\pi R / \lambda)}{R} + \frac{2\pi}{\lambda} \sin(2\pi R / \lambda) \times \frac{(z - z')}{R^2} \quad (15)$$

در ادامه فراسوی پیوسته در معادلات (۱۲ و ۱۳) می‌توان عبارت $z - z'$ را با Δz جایگزین کرد. در پایان می‌توان روابط را به شکل ماتریسی نوشت:

$$Data_U = K_U^{QP(H_i)/IP(H_i)} \cdot Data \quad (16)$$

در اینجا $Data_U$ بردار داده‌های تصویر شده در ارتفاع بالاتر (با ابعاد $n \times 1$)، $Data$ داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح زمین و K ماتریس کرنل یا به عبارتی عملگر ادامه فراسو با ابعاد $n \times n$ است. با انتگرال‌گیری در راستای محور y می‌توان عملگر ادامه فراسو را به حالت دوبعدی تعمیم و بر روی یک خط پیمایش اعمال نمود. در شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب ماتریس کرنل قسمت‌های حقیقی و موهومی برای ۱۰۰ داده با فاصله نمونه‌برداری ۰/۱ متر در حالت دوبعدی و یک شبکه 10×10 در حالت سه‌بعدی نمایش داده شده است. با دقت در این تصاویر، مشاهده می‌شود که تغییرات بخش حقیقی با ارتفاع بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی در محاسبات است. با این حال، در این پژوهش در مورد داده‌های واقعی از هر دو بخش حقیقی و موهومی عملگر ادامه فراسو و داده‌ها استفاده شده است.

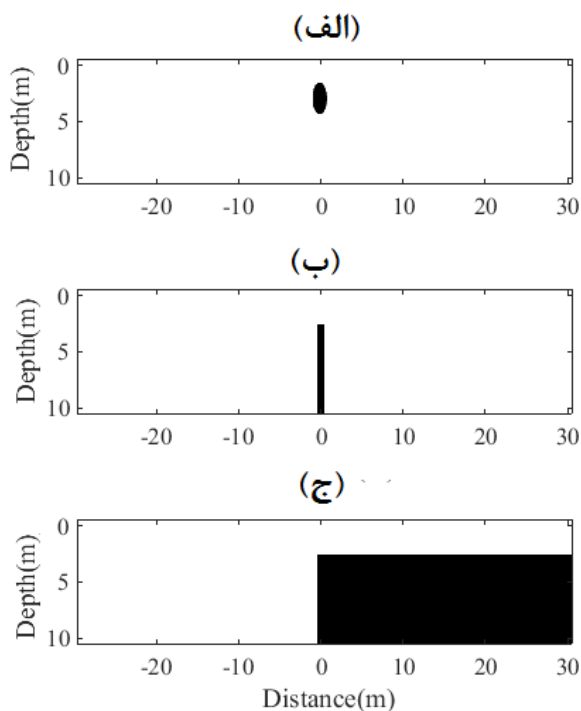


شکل ۴: نمونه‌ای از بخش حقیقی ماتریس عملگر ادامه فراسو برای ارتفاع ۲ متر از سطح زمین. (الف): حالت دوبعدی برای یک پروفیل به طول ۱۰ متر در راستای محور x مختصات و فاصله نمونه‌برداری ۰/۱ متر. (ب): حالت سه‌بعدی قسمت الف برای ۱۰ پروفیل با فواصل ۱ متر در راستای محور y مختصات.

۵- برآورد عمق

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، منظور از تفسیر کمی آشکار ساختن پارامترهای عمق، هندسه و خواص الکترومغناطیسی (رسانندگی و پذیرفتاری مغناطیسی) اهداف زیر سطح زمین است. در بیشتر موارد، عمق در مقایسه با دیگر کمیت‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. در روش‌های ژئوفیزیکی پتانسیل، از روش‌های مختلفی مانند DEXP برای

(شکل ۵). از آنجا که هدف نخستین ارزیابی کارایی روش DEXP بر روی داده‌های الکترومغناطیس زمینی حوزه فرکانس است، از افزودن نوفه به داده‌های تولید شده (بخش موهومی) خودداری شده است. مشاهده می‌شود که پاسخ مدل‌سازی پیشرو در هر سه مدل دارای دو قله مثبت (بیشینه) و یک قله منفی (کمینه) است. در روش مغناطیس‌سنجی، پاسخ مدل‌سازی پیشرو برای مدل‌های یادشده به‌صورت یک بیشینه و یک کمینه (دوقطبی مغناطیسی) خواهد بود.



شکل ۴: (الف) مدل استوانه افقی با طول بینهایت، (ب) دایک نازک و (ج) سطح تماس مورد استفاده در این پژوهش.

پژوهش از میان طیف گسترده‌ای از این روش‌ها، روش DEXP ارزیابی شده است.

در روش‌های پتانسیل، مقادیر بیشینه و کمینه تبدیل DEXP که بر اساس مقیاس‌دهی میدان در مقیاس‌های متفاوت با توان مناسبی از همان ارتفاع است، محل چشمه‌های میدان را تعیین می‌کنند. عمق برآوردی با بهره از این نقاط بیشینه یا کمینه برای توده‌هایی با اشکال هندسی ساده مانند کره و استوانه‌ی افقی، در مرکز و برای ساختارهایی مانند دایک، سطح تماس و استوانه‌ی عمودی در بالای آنها قرار دارد (Di Castellezzano, 2013).

در اینجا از نحوه استخراج روابط مربوط به تبدیل DEXP خودداری شده و تنها به معادله (۵) بسنده شده است. در ادامه، نتایج کارکرد آن بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی الکترومغناطیس حوزه فرکانس ارائه و بحث شده است. از این‌رو علاقه‌مندان می‌توانند به‌منظور مطالعه بیشتر این روش به مقاله Fedi, (2007) مراجعه نمایند. همچنین می‌توان نشان داد که برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در روش‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس، روابطی مشابه با رابطه تبدیل DEXP (رابطه ۹) در روش‌های پتانسیل استخراج نمود (Di Castellezzano, 2013).

۶- مدل مصنوعی

در آغاز نیاز است که نتایج روش تصویربرداری مورد نظر در این پژوهش (DEXP) در رابطه با مدل‌های مصنوعی رایج مورد ارزیابی قرار گیرد. از این‌روی مدل‌های استوانه افقی نامحدود (با قطر ۱ متر)، سطح تماس و دایک نازک (ضخامت ۱ متر) در عمق‌های یکسان و با رسانندگی الکتریکی ۵ ژیمنس بر متر که در یک محیط همگن با رسانندگی ۰/۰۱ ژیمنس بر متر قرار دارند (جدول ۱)، در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و هندسی مدل‌های مصنوعی.

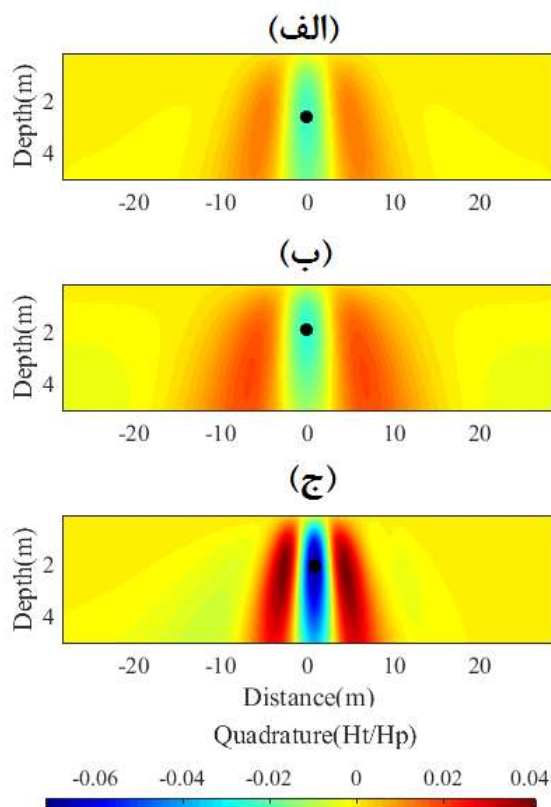
مدل	رسانندگی (S/m)	تراوایی مغناطیسی نسبی	کشیدگی در راستای y	ضخامت یا قطر
سطح تماس	۵	۱	۲۰۰ متر	۳۰ متر
دایک نازک	۵	۱	۲۰۰ متر	۱ متر
استوانه افقی	۵	۱	۲۰۰ متر	۱ متر

شکل ۴ هندسه و محل قرارگیری مدل‌ها در نیم‌فضای زیرسطحی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که دایره در فضای دوبعدی هم‌ارز استوانه افقی با طول بینهایت در فضای سه‌بعدی خواهد بود. در این مدل‌ها فاصله بین فرستنده- گیرنده ۳/۶۶ متر و فرکانس ۹۸۰۰ هرتز که معادل دستگاه EM31 ساخت شرکت GEONIX است، استفاده شده است. در مدل-های یادشده، تراوایی مغناطیسی توده زیرسطحی و زمینه برابر با تراوایی مغناطیسی خلأ در نظر گرفته شده است. لذا در ادامه تنها بخش موهومی میدان الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعداد نقاط اندازه-گیری در طول هر پروفیل ۶۲ نقطه و فاصله بین آنها ۰/۹۱۵ متر است.

داده‌های ارائه شده در شکل ۵ را نشان می‌دهد. نقاط مشکي در این شکل‌ها، کمینه محلی تبدیل DEXP را نمایش می‌دهند که انطباق خوبی با عمق و موقعیت افقی بی‌هنجاری‌ها دارند. در اینجا شاخص ساختاری مدل‌ها، برابر شاخص ساختاری روش مغناطیس‌سنجی برای همین مدل‌ها در نظر گرفته شده است. در روش مغناطیس‌سنجی شاخص ساختاری برای سطح تماس، استوانه افقی با طول بینهایت و دایک نازک به ترتیب ۰، ۲ و ۱ است. در رابطه با مشتق‌های داده‌ها، مرتبه مشتق به شاخص ساختاری داده‌های اولیه افزوده می‌شود (Hinze et al., 2013).

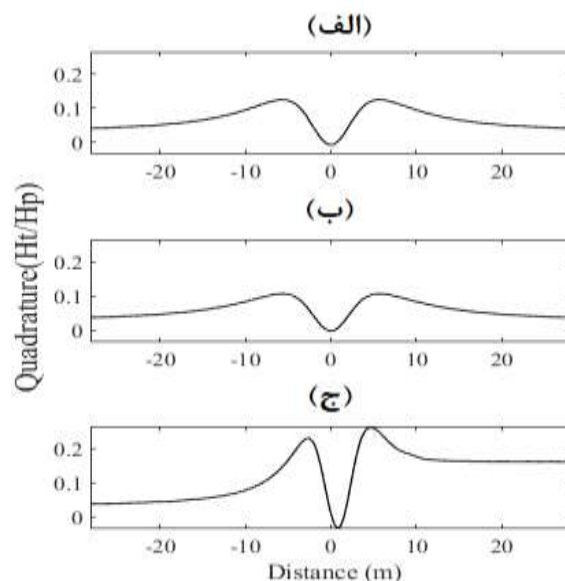
در روش پتانسیل مغناطیس‌سنجی برای هر چشمه مغناطیسی تبدیل DEXP میدان دارای یک بیشینه و یک کمینه است؛ که چشمه میان این دو نقطه قرار می‌گیرد (Fedi, 2005).

چشمه در روش تصویربرداری DEXP بر روی داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس دریایی در مکان بیشینه محلی قرار می‌گیرد (Di Castelmezzano, 2013).



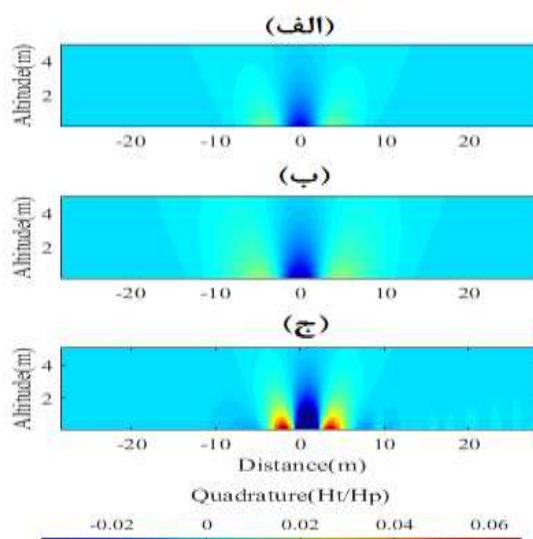
شکل ۷: (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب تبدیل DEXP داده‌های بخش موهومی روش الکترومغناطیسی حوزه فرکانس را برای استوانه افقی با طول بینهایت، دایک نازک و سطح تماس را نمایش می‌دهند. نقاط مشکي محل کمینه تبدیل DEXP را نشان می‌دهند که برآورد موقعیت (عمق و مختصات افقی) ساختارها است.

در این پژوهش با توجه به رفتار دوقطبی الکترومغناطیسی تولید کننده موج الکترومغناطیس (در روش LIN)، برای هر بی‌هنجاری



شکل ۵: (الف)، (ب) و (ج) مؤلفه موهومی محاسبه شده موج الکترومغناطیس برای یک سیستم با مشخصات دستگاه EM31 (فاصله فرستنده-گیرنده ۳/۶۶ متر و فرکانس ۹۸۰۰ هرتز) به ترتیب بر روی مدل‌های شکل ۴ (الف)، (ب) و (ج).

در ادامه داده‌های شبیه‌سازی شده برای مدل‌های یادشده با بکارگیری تبدیل DEXP تفسیر می‌شوند. نخست با بهره از فرآیند ادامه فراسو، میدان چند مقیاسی تولید می‌شود. بنابراین ابتدا میدان چند مقیاسی با ادامه‌ی فراسوی داده‌ها از ارتفاع ۰/۲ متر تا ارتفاع ۵ متری با فاصله‌های ۰/۱ متری تولید شده است (شکل ۶).



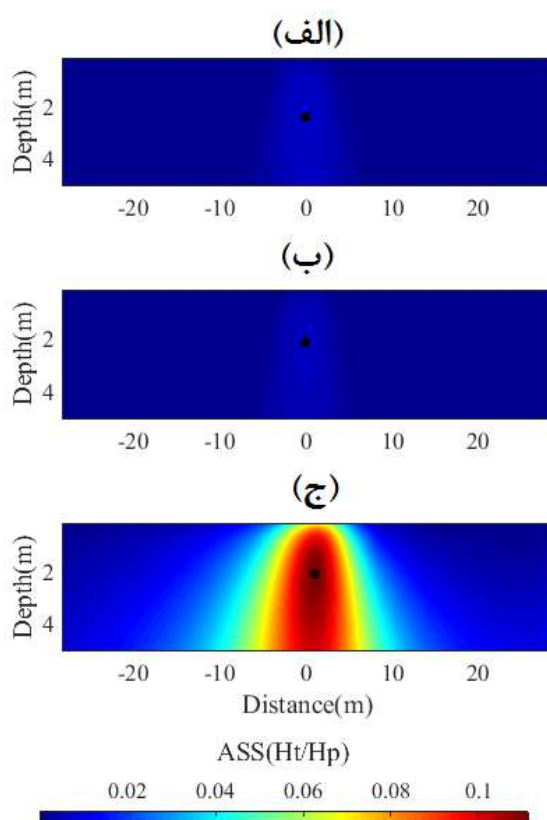
شکل ۶: ادامه فراسوی داده‌های مصنوعی (شکل ۵) از ارتفاع ۰/۲ متر تا ۵ متر با فواصل ۰/۱ متر. در قسمت (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب میدان چند مقیاسی برای مدل استوانه افقی با طول بینهایت، دایک نازک و سطح تماس ارائه شده است.

شکل ۷ تبدیل DEXP مؤلفه موهومی موج الکترومغناطیس را برای

جدول ۲: موقعیت افقی و عمقی حاصل از تبدیل DEXP، بدست آمده از شکل ۷.

مدل	موقعیت افقی واقعی	موقعیت افقی برآوردی	عمق واقعی	عمق برآوردی
سطح تماس	۰ متر	۰/۹۲ متر	۲ متر	۲/۱ متر
دایک نازک	۰ متر	۰/۰۱ متر	۲ متر	۱/۹ متر
استوانه افقی	۰ متر	۰/۰۱۲ متر	۲ متر	۲/۶ متر

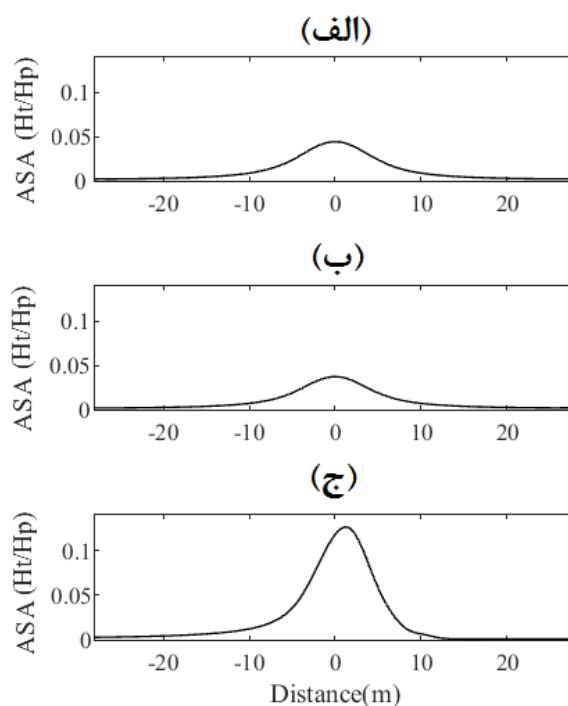
همچنین برای شبیه‌سازی بهتر شرایط واقعی، داده‌ها با نوفه تصادفی گاوسی با دامنه ۵ درصد بیشینه دامنه داده آمیخته شده است. تبدیل DEXP داده‌های آلوده به نوفه و نتایج کمی آن به ترتیب در شکل ۱۰ و جدول ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۹: (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی در شکل ۸ (الف)، (ب) و (ج). نقاط مشکی محل بیشینه تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی را نشان می‌دهند که برآورد موقعیت (عمق و مختصات افقی) ساختارها است.

با دقت در این شکل‌ها و جدول، نتیجه گرفته می‌شود که روش DEXP برای داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس نوفه‌دار نیز توانایی خوبی در برآورد عمق ساختارهای زیرسطحی دارد و در برابر نوفه پایدار است.

الکترومغناطیسی تبدیل DEXP میدان دارای دو بیشینه و یک کمینه است؛ که چشمه در مکان کمینه (میان دو بیشینه) قرار می‌گیرد. در این شرایط برای حذف اثر دوقطبی الکترومغناطیسی محل چشمه، می‌توان از تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی^۱ میدان نیز بهره گرفت. در این حالت شکل دوقطبی الکترومغناطیسی میدان DEXP از میان رفته و تنها یک نقطه‌ی بیشینه وجود خواهد داشت. شکل ۸ دامنه سیگنال تحلیلی و شکل ۹ تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی برای داده‌های نمایش داده شده در شکل ۵ را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، ساختارها با وضوح بیشتری نمایش داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که در تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی بخش موهومی داده الکترومغناطیس حوزه فرکانس، بیشینه نشان دهنده عمق برآورد شده بوسیله این روش است (نقاط مشکی). بنابراین برای کاهش اثر تداخلی بی‌هنجاری‌های مجاور و تفکیک بهتر می‌توان از تبدیل DEXP سیگنال تحلیلی بهره گرفت. در روش‌های پتانسیل نیز از تبدیل DEXP سیگنال تحلیلی داده‌ها، برای حذف شکل دوقطبی و در نتیجه برآورد بهتر موقعیت چشمه استفاده می‌شود (بنی‌عامریان و همکاران، ۱۳۹۵، الف).



شکل ۸: (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب دامنه سیگنال تحلیلی (ASA) داده‌های مصنوعی ارائه شده در شکل ۵ (الف)، (ب) و (ج).

به‌منظور سنجش کمی، عمق و موقعیت افقی برآورد شده به روش DEXP و مقادیر واقعی مدل‌ها در جدول ۲ آمده است.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۷، شماره ۱، ۱۴۰۰.

الکترومغناطیس حوزه فرکانس با فرکانس ۹۸۰۰ هرتز و فاصله بین فرستنده-گیرنده ۳/۶۶ متر است. داده‌برداری توسط این دستگاه می‌تواند به دو صورت آرایش دوقطبی قائم^۱ یا دوقطبی افقی^۲ انجام شود. عمق مؤثر اکتشاف این دستگاه تحت شرایط عدد القای پایین برای آرایش‌های VMD و HMD به ترتیب ۳ و ۶ متر است (Reid, J.E. & Howlett, A., 2001). تقریباً تمام تحلیل‌های تئوری دستگاه EM31 با فرض شرط عدد القای پایین انجام شده است. بنابراین با نقض شرط عدد القای پایین، این تحلیل‌ها که دربرگیرنده عمق مؤثر اکتشاف و رابطه مربوط به محاسبه رسانندگی الکتریکی ظاهری است، نقض می‌شوند (Reid, J.E. & Howlett, A., 2001).

برای یک سامانه مشخص (مانند EM31) هنگامی که برداشت‌ها در سطح زمین انجام گیرد (ارتفاع صفر) و تغییرات تراوایی مغناطیسی زمین ناچیز باشد، عامل کنترل‌کننده شرط عدد القای پایین، مقدار رسانندگی الکتریکی زیر سطح زمین است. برای دستگاه EM31 و آرایش VMD، در رسانندگی‌های بالاتر از ۰/۱ زیمنس بر متر، شرط عدد القای پایین معتبر نخواهد بود (McNeil, 1980). انواع مختلف دستگاه‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی، شامل پیچیده‌های فرستنده و گیرنده، سامانه نگاشت و نمایش هم‌زمان داده‌های برداشتی و واحد الکترونیک (منبع تولید جریان) هستند (شکل ۱۱).



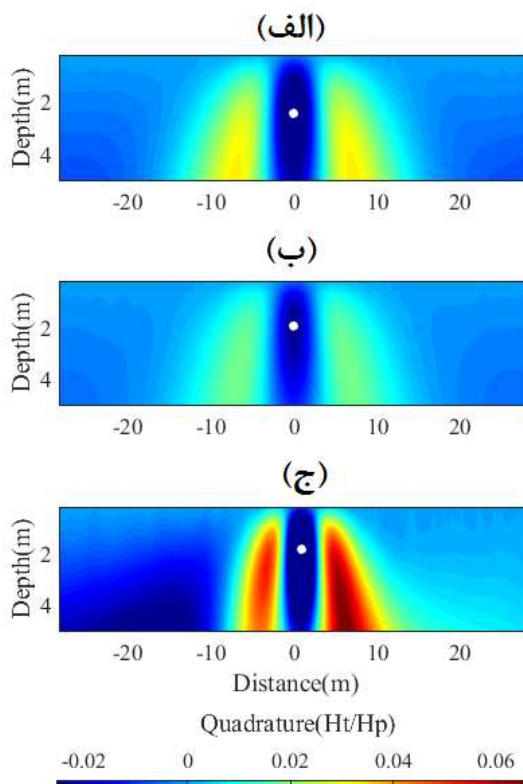
شکل ۱۱: تصویری از برداشت داده‌های دستگاه EM31 در یک منطقه صنعتی در شهر ناپل، کشور ایتالیا. در این تصویر اجزاء مختلف دستگاه EM31 مشخص شده است.

در یک منطقه صنعتی در جنوب ایتالیا (شهر ناپل) که تأسیسات زیرسطحی زیادی عبور کرده و دارای پتانسیل لازم برای بررسی کارکرد روش یادشده است، یک شبکه منظم با ۱۶۰ پروفیل طولی به فواصل ۰/۲۵ متر از هم، برداشت شده است. این شبکه که دارای ابعاد ۵۰ متر طول و ۴۰ متر عرض است، به همراه موقعیت ساختارهای مورد بررسی در شکل ۱۲-الف نمایش داده شده است. فاصله نقاط اندازه‌گیری بر روی هر پروفیل (راستای y) ۰/۲۵ متر است. همان‌طور که در شکل ۱۲ (الف) مشاهده می‌شود، در شبکه مورد نظر دو لوله فلزی و دو کابل انتقال نیروی برق با قطرهای متفاوت، وجود دارند. این اهداف که دارای شکل‌های استوانه افقی با طول بینهایت و تباین رسانندگی الکتریکی بالا

جدول ۳: موقعیت افقی و عمقی برآمده از تبدیل DEXP، بدست آمده از شکل ۱۰.

مدل	موقعیت افقی واقعی	موقعیت افقی برآوردی	عمق واقعی	عمق برآوردی
سطح تماس	۰ متر	۰/۹۳ متر	۲ متر	۱/۸ متر
دایک نازک	۰ متر	۰/۱۲ متر	۲ متر	۱/۹ متر
استوانه افقی	۰ متر	۰/۱۲ متر	۲ متر	۲/۴ متر

مشاهده می‌شود با آلوده شدن داده‌ها با نوفه همچنان روش DEXP در برآورد عمق و موقعیت افقی پایدار است و نتایج بسیار مطلوب و دقیقی را ارائه می‌نماید.



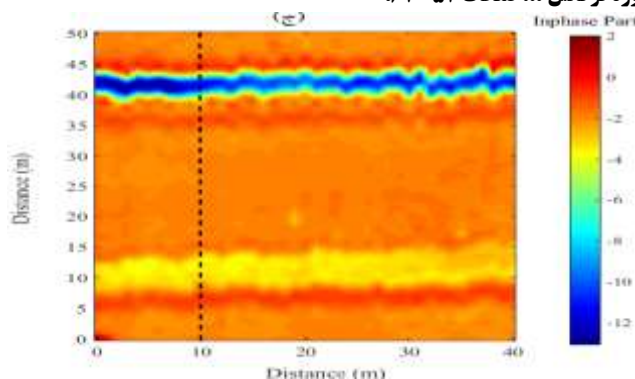
شکل ۱۰: (الف)، (ب) و (ج) تبدیل DEXP مؤلفه موهومی موج الکترومغناطیس آمیخته با نوفه تصادفی با دامنه ۵ درصد بیشینه سیگنال، به ترتیب برای مدل‌های ارائه شده در شکل ۴ (الف)، (ب) و (ج) نمایش داده شده است. در اینجا برآورد عمق با نقطه سفید نمایش داده شده است. نقاط سفید محل کمینه تبدیل DEXP را نشان می‌دهند که تخمین موقعیت (عمق و مختصات افقی) ساختارها است.

۷- داده‌های واقعی

در این بخش، برای ارزیابی عملی تبدیل DEXP در آشکارسازی موقعیت اهداف زیرسطحی با به‌کارگیری داده‌های الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی، از داده‌های دستگاه EM31 بر روی کابل و لوله که تباین الکترومغناطیسی قابل توجه‌ای با محیط دربرگیرنده دارند؛ استفاده شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، EM31 یک دستگاه

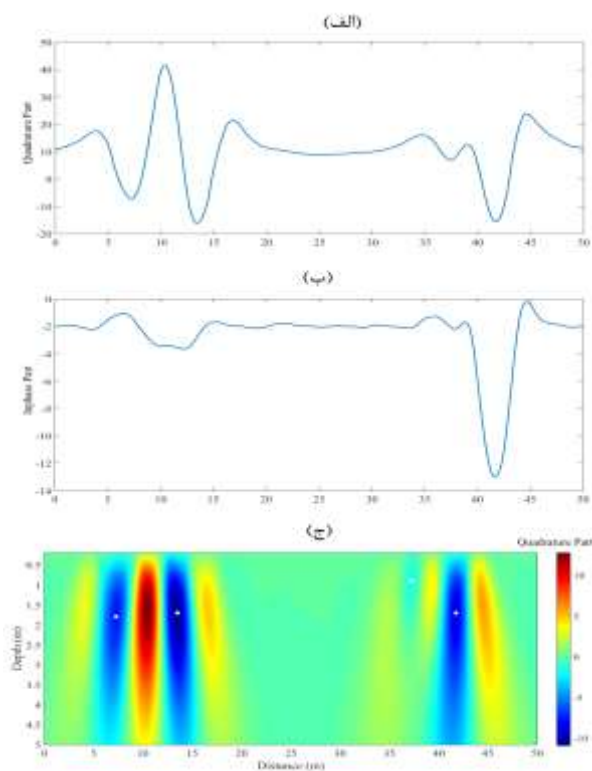
1 Vertical Magnetic Dipole (VMD)

2 Horizontal Magnetic Dipole (HMD)



شکل ۱۲: (الف) موقعیت ساختارهای زیرسطحی شبکه برداشت شده، (ب) مؤلفه موهومی و (ج) مؤلفه حقیقی داده‌های برداشت شده.

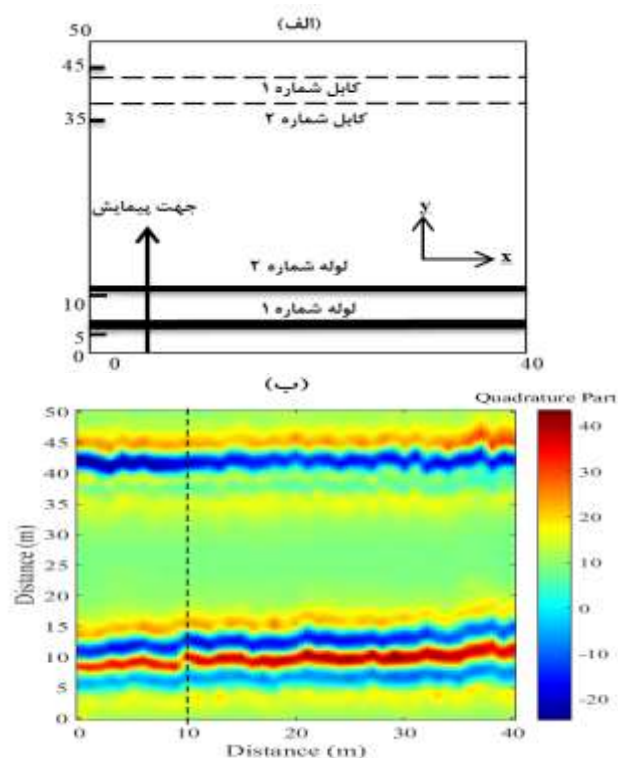
همچنین در شکل ۱۳ (الف)، در فاصله ۳۵ تا ۴۰ متری از ابتدای پروفیل یک بی‌هنجاری با دامنه ضعیف در محل تقریبی کابل شماره ۲ مشاهده می‌شود. با این وجود، در تصویر برآمده از روش DEXP موقعیت افقی و عمقی این کابل به‌خوبی برآورد شده است، هرچند دامنه DEXP مربوط به آن ضعیف است.



شکل ۱۳: (الف) و (ب) به ترتیب مؤلفه موهومی و حقیقی پروفیل نشان داده شده در شکل ۱۲ و (ج) تبدیل DEXP مربوط به آن. در این شکل نقاط سفید محل کمینه محلی تبدیل DEXP را نشان می‌دهند که تخمین موقعیت (عمق و مختصات افقی) کابل‌ها و لوله‌ها هستند.

نسبت به محیط دربرگیرنده آنها هستند، برای ارزیابی روش DEXP بسیار مناسب هستند. مشخصات هندسی و موقعیت این اهداف در جدول ۴ ارائه شده است. در ادامه، به‌منظور بررسی کارکرد روش DEXP، پروفیل شماره ۲۵ در فاصله ۱۰ متری از ابتدای محور x انتخاب شده است. بخش‌های موهومی و حقیقی، همراه با نتایج برآمده از بکار بردن تبدیل DEXP، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. آنومالی‌های حاصل از لوله‌ها و کابل‌ها در هر دو مؤلفه حقیقی و موهومی قابل مشاهده، ولی غیرقابل تفکیک می‌باشند. با توجه به عمق کاوش دستگاه یادشده (نزدیک به ۵ متر)، فرآیند ادامه فراسو در تبدیل DEXP، تا ارتفاع ۵ متر در نظر گرفته شده است.

موقعیت افقی و عمقی کابل‌ها و لوله‌ها با بهره از محل کمینه‌ی (میان دو بیشینه) تبدیل DEXP برآورد شده است. با توجه به مقطع برآمده از تبدیل DEXP، سه کمینه به‌خوبی در محل تقریبی لوله‌ها (شماره ۱ و ۲) و کابل شماره ۱ با تفکیک مناسب به تصویر کشیده شده‌اند. با توجه به جدول ۴ ملاحظه می‌شود که عمق و موقعیت افقی بدست آمده با مقادیر واقعی در سازش خیلی خوبی است. برای نمونه عمق مرکز لوله شماره ۲، تنها ۱۰ سانتیمتر با مقدار واقعی آن اختلاف دارد.



نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۷، شماره ۱، ۱۴۰۰.

بنی‌عامریان، ج.، اسکویی، ب. و جوع عطا بیرمی، ا.، ۱۳۹۵، برآورد عمق و شاخص ساختاری چشمه‌های مغناطیسی با استفاده از روش‌های تحلیل چندمقیاسی و DEXP، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۲ (۱)، ۱۱۱-۱۲۱.

بنی‌عامریان، ج.، اسکویی، ب. و فدی، م.، ۱۳۹۵، مقایسه روش‌های گوناگون برآورد عمق، مکان و نوع چشمه‌ی میدان‌های مغناطیسی و گرانی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۲ (۲)، ۳۶۹-۳۹۱.

بهرامی، ع.، ۱۳۹۳، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های EM34 و مقاومت ویژه بر روی قنات در منطقه مجن و مقایسه نتایج حاصله، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک.

Beamish, D., 2012. The application of spatial derivatives to non-potential field data interpretation, *Geophysical Prospecting*, 60, 337-360.

Brosten, T.R., Day-Lewis, F.D., Schultz, G.M., Curtis, G.P. & Lane Jr, J.W., 2011. Inversion of multi-frequency electromagnetic induction data for 3D characterization of hydraulic conductivity, *Journal of Applied Geophysics*, 73, 323-335.

Cella, F. & Fedi, M., 2015. High-resolution geophysical 3D imaging for archaeology by magnetic and EM data: the case of the iron age settlement of Torre Galli, Southern Italy, *Surveys in Geophysics*, 36, 831-850.

Dabas, M., Anest, A., Thiesson, J. & Tabbagh, A., 2016. Slingram EMI Devices for Characterizing Resistive Features Using Apparent Conductivity Measurements: check of the DualEM-421S Instrument and Field Tests, *Archaeological Prospection*, 23, 165-180.

Dondurur, D., 2005. Depth estimates for slingram electromagnetic anomalies from dipping sheet-like bodies by the normalized full gradient method, *Pure and Applied Geophysics*, 162, 2179-2195.

Fedi, M., 2007. DEXP: A fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources, *Geophysics*, 72, I1-I11.

Fedi, M., Florio, G. & Quarta, T.A., 2009. Multiridge analysis of potential fields: Geometric method and reduced Euler deconvolution, *Geophysics*, 74, L53-L65.

Fedi, M. & Pilkington, M., 2012. Understanding imaging methods for potential field data, *Geophysics*, 77, G13-G24.

Florio, G., Fedi, M. & Rapolla, A., 2009. Interpretation of regional aeromagnetic data by the scaling function method: the case of Southern Apennines (Italy), *Geophysical Prospecting*, 57, 479-489.

جدول ۴: نتایج حاصل از تبدیل DEXP، بدست آمده از شکل ۱۳.

نام ساختار	موقعیت افقی واقعی	موقعیت افقی تخمینی	عمق مرکز واقعی	عمق مرکز تخمینی	قطر (متر)
لوله شماره ۱	۷/۱ متر	۷/۲۵ متر	۱/۶ متر	۱/۸ متر	۱/۵
لوله شماره ۲	۱۳/۵ متر	۱۳/۵ متر	۱/۶ متر	۱/۷ متر	۰/۸
کابل شماره ۲	۳۷/۱۵ متر	۳۷/۲۵ متر	۰/۷ متر	۰/۹ متر	۰/۰۵
کابل شماره ۱	۴۱/۶ متر	۴۱/۷ متر	۱/۶ متر	۱/۷ متر	۰/۵

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی روش تصویربرداری DEXP به‌منظور برآورد موقعیت افقی و عمقی ساختارهای رسانای زیرسطحی (با تباین قابل توجه نسبت به زمینه) با بهره از داده‌های حاصل از روش الکترومغناطیس حوزه فرکانس زمینی پرداخته شد. نتایج حاصل از مدل مصنوعی نشان می‌دهد که این روش موقعیت افقی و عمقی ساختارهای رسانای زیرسطحی را با دقت خوبی برآورد کرده است. درباره داده‌های آلوده به نوفه، نتایج بدست آمده از تبدیل DEXP از پایداری و کیفیت لازم برای تفسیر برخوردار بود. در داده‌های واقعی مشاهده شد که روش یادشده به‌خوبی بی-هنجاری‌های نزدیک به هم را تفکیک می‌کند و به عبارتی می‌توان برای افزایش تفکیک‌پذیری جانبی نیز از این روش استفاده نمود. برجسته‌ترین برتری تبدیل DEXP این است که سرعت زیادی دارد و برخلاف روش‌های وارون‌سازی به‌آسانی می‌توان از آنها برای تحلیل حجم فراوانی از داده‌ها و یا حتی تصویرسازی سریع ساختارهای زیرسطحی بهره برد. در این پژوهش با برداشت منظم یک شبکه، توسط دستگاه EM31، در یک منطقه صنعتی دربرگیرنده یک شبکه نسبتاً پیچیده از تأسیسات زیرسطحی متشکل از لوله‌های فلزی و کابل، توانایی و کارکرد روش DEXP مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که تنها با مشاهده داده‌های خام (تفسیر کیفی)، نمی‌توان موقعیت افقی و عمقی اهداف مدفون را آشکار نمود. در چنین شرایطی به‌کارگیری تبدیل DEXP، اطلاعات فراوان و دقیقی از اهداف زیرسطحی مدفون در منطقه برداشت را آشکار نمود. به‌طور کلی نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان از روش تصویربرداری DEXP که در حوزه پتانسیل گسترش یافته است، به‌منظور آشکارسازی اهداف رسانای زیرسطحی در داده‌های الکترومغناطیس زمینی حوزه فرکانس نیز بهره گرفت.

لازم به ذکر این که هر چند در این پژوهش اهداف رسانای زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفت، انگیزه پژوهش‌های آینده می‌تواند بررسی اهداف مقاوم زیرسطحی یا دیگر روش‌های تصویربرداری باشد.

۹- منابع

احمدی، م.، ۱۳۹۴، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های EM34-3 و VLF در اندیس مس دوچپله- میامی و مقایسه نتایج با داده‌های مقاومت ویژه و IP، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک.

- McNeil, J., 1980. EM 34-3 Survey Interpretation Techniques Technical Note TN-8, Geonics Ltd.
- Reid, J.E. & Howlett, A., 2001. Application of the EM-31 terrain conductivity meter in highly-conductive regimes, *Exploration Geophysics*, 32, 219-224.
- Roy, A., 1966. Downward continuation and its application to electromagnetic data interpretation, *Geophysics*, 31, 167-184.
- Roy, A., 1969. Continuation of electromagnetic fields,(pt.) 2, *Geophysics*, 34, 572-583.
- Song, Y. & Kim, J.-H., 2008. An efficient 2.5 D inversion of loop-loop electromagnetic data, *Exploration Geophysics*, 39, 68-77.
- Yi, M.-J. & Sasaki, Y., 2015. 2-D and 3-D joint inversion of loop-loop electromagnetic and electrical data for resistivity and magnetic susceptibility, *Geophysical Journal International*, 203, 1085-1095.
- Yoder, R.E., Freeland, R.S., Ammons, J.T. & Leonard, L.L., 2001. Mapping agricultural fields with GPR and EMI to identify offsite movement of agrochemicals, *Journal of Applied Geophysics*, 47, 251-259.
- Guillemoteau, J., Sailhac, P., Boulanger, C. & Trules, J., 2015. Inversion of ground constant offset loop-loop electromagnetic data for a large range of induction numbers, *Geophysics*, 80, E11-E21.
- Guillemoteau, J., Simon, F.-X., Hulin, G., Dousteysier, B., Dacko, M. & Tronicke, J., 2019. 3-D imaging of subsurface magnetic permeability/susceptibility with portable frequency domain electromagnetic sensors for near surface exploration, *Geophysical Journal International*, 219, 1773-1785.
- Heil, K. & Schmidhalter, U., 2017. The application of EM38: determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology, *Sensors*, 17, 2540.
- Hinze, W.J., Von Frese, R.R. & Saad, A.H., 2013. Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications, edn, Vol., pp. Pages, Cambridge University Press.
- Hornby, P., Boschetti, F. & Horowitz, F., 1999. Analysis of potential field data in the wavelet domain, *Geophysical Journal International*, 137, 175-196.
- Kamm, J., Becken, M. & Pedersen, L.B., 2013. Inversion of slingram electromagnetic induction data using a Born approximation, *Geophysics*, 78, E201-E212.