

تخمین ابعاد مدل صفحه مقاوم افقی با استفاده از پاسخ الکترومغناطیسی گذرا

نرجس همایونی^{۱*}، میرستار مشین چی اصل^۲، حسین ملهم^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده علوم پایه

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده علوم پایه

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، دانشکده علوم پایه

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۵/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۱)

چکیده: مطالعات نشان می‌دهد که صفحه مقاومتی افقی تقریب مناسبی برای مدل‌سازی ساختارهای لایه‌ای نازک افقی چون ذخایر هیدروکربنی مدفون در اعماق بستر دریا هستند. این ذخایر پس از اکتشاف توسط روش‌های لرزه‌ای، جهت تخمین عمق دفن و ابعادشان مورد بررسی‌های بیشتر قرار می‌گیرند. به منظور تکمیل مطالعات لرزه‌ای، روش الکترومغناطیس با چشمه کنترل شده (CSEM) پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه، پاسخ الکترومغناطیسی ناشی از یک صفحه افقی مقاوم به یک موج مربعی صادر شده از یک چشمه دوقطبی الکتریکی افقی (HED)، بررسی شده است. معادله انتگرالی حاصل از مدل ارائه شده با توجه به شرط مرزی ساختارهای مقاوم (پیوستگی مؤلفه قائم چگالی جریان) به روش عددی گشتاوری حل شده است. در این پژوهش نشان داده شده است که زمان رسیدن پاسخ‌های پله دریافتی در گیرنده با افزایش مقاومت ویژه بستر دریا، کاهش می‌یابد. همچنین، فاصله محل تغییر قطبش پاسخ پله از مرکز صفحه به عنوان ابزاری مفید برای تخمین ابعاد مدل صفحه مقاومتی معرفی شده است.

واژه‌های کلیدی: الکترومغناطیس گذرا، میدان الکتریکی، صفحه مقاومتی، دوقطبی الکتریکی افقی، روش گشتاوری

۱- مقدمه

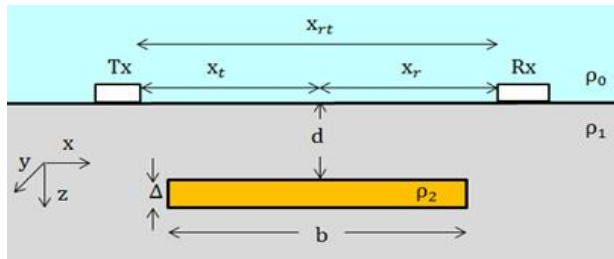
کاوش‌های ژئوفیزیکی با بررسی و تفسیر داده‌های دریافتی از ساختارهای نامشخص زیر سطحی، اطلاعاتی از هندسه و جنس ساختار به دست می‌آید که هدف نهایی عملیات اکتشافی در ژئوفیزیک می‌باشد.

برای رسیدن به این هدف، مدل‌های مصنوعی با ویژگی‌های معلوم در اشکال هندسی ساده انتخاب شده و پاسخ‌های دریافتی از هر ساختار مورد بررسی قرار می‌گیرد، که اصطلاحاً این فرایند مدل‌سازی مستقیم نامیده می‌شود. در هر عملیات اکتشافی، پاسخ‌های دریافتی با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های مستقیم تفسیر می‌شوند.

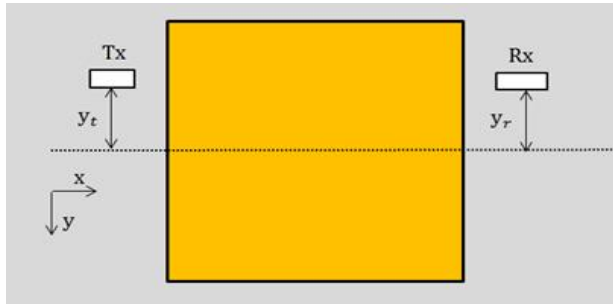
به‌طور کلی ساختارهای صفحه‌ای مقاوم تقریب‌های خوبی برای محدوده وسیعی از مطالعات زمین‌شناسی هستند. این ساختارها در

دانش ژئوفیزیک با هدف مطالعه خواص درونی زمین، آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی و اکتشاف معادن، به بررسی خواص فیزیکی درون زمین می‌پردازد و برای این منظور از روش‌های اکتشافی متفاوتی براساس دانش فیزیک بهره می‌گیرد. یکی از این روش‌ها، روش الکترومغناطیسی با چشمه کنترل شده (CSEM^۱) است که در آن از دوقطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی به عنوان فرستنده و گیرنده در آرایش‌های متفاوتی استفاده می‌شود. انتخاب آرایش‌های مورد استفاده با توجه به محیط اکتشافی (زمینی یا دریایی) و جنس بی‌هنجاری مورد مطالعه (رسانا یا مقاوم)، صورت می‌گیرد. در تمام

* رایانامه نویسنده مسئول: n.homayoni@srbiau.ac.ir



الف



ب

شکل ۱: (الف) نمای جانبی و (ب) نمای فوقانی از مدل صفحه‌های مقاوم مدفون در بستر دریا، Tx دوقطبی الکتریکی فرستنده و Rx دوقطبی الکتریکی گیرنده است.

برای توصیف انتشار میدان الکتریکی در محیط میزبان از توابع گرین^۵ با شکل کلی زیر استفاده می‌شود:

$$G_{zx} \{x, y, z | x', y', z'\} \quad (1)$$

که شکل کلی هر یک از درایه‌های تانسور گرین زیر می‌باشد:

$$G = \begin{pmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

در هر درایه، اندیس اول معرف مؤلفه مورد بررسی میدان در نقطه مشاهده است و اندیس دوم، جهت دوقطبی چشمه را نشان می‌دهد. همچنین مختصات بدون پریم، نقطه مشاهده میدان و مختصات پریم‌دار، موقعیت چشمه را نشان می‌دهند.

صفحه مدل با توزیعی از دوقطبی‌های قائم جریان الکتریکی (VED^۶) جایگزین می‌شود به طوری که شرط پیوستگی مؤلفه قائم چگالی جریان در آن ارضا شود. به هر نقطه (x,y) از صفحه مدل یک دوقطبی الکتریکی قائم با گشتاور دوقطبی در واحد سطح k(x,y)

کاوش‌های معدنی، اکتشاف هیدروکربن‌ها، خصوصاً هیدرات‌های گازی^۱ و عدسی‌های آب شیرین^۲ در جزایر، برای مدل‌سازی و تفسیر پاسخ‌های الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال پژوهش‌هایی در زمینه مطالعات دریایی با استفاده از سیستم‌های CSEM انجام گرفته‌است [۱-۲].

مدل‌سازی پاسخ الکترومغناطیسی صفحات مقاوم افقی در بستر دریا به‌منظور اکتشافات هیدروکربن‌ها به‌خصوص هیدرات‌های گازی توسط آرایش دو-دوقطبی الکتریکی انجام شده است [۳-۴]. در این مطالعات از عامل زمان رسید موج به گیرنده در اکتشافات هیدروکربنی استفاده شده که این عامل به پارامترهای الکتریکی آب دریا و بستر دریا وابسته است [۵]. پراکندگی الکترومغناطیسی توسط صفحه نازک مقاوم، در محیط میزبان رسانا به‌صورت یک معادله انتگرالی ارائه شده است [۶]. حل عددی معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس در مطالعات الکترومغناطیسی با روش‌های تقریبی مختلفی انجام شده است [۷-۱۰].

در این پژوهش با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی مستقیم ساختارهای مقاوم مدفون در اعماق بستر دریا (مدل مخازن هیدروکربنی) و معلوم بودن عمق دفن، روشی برای تخمین ابعاد صفحه‌ی مدل ارائه شده است. از این روش می‌توان به‌عنوان مکمل اطلاعات حاصل از مقاطع لرزه‌ای در اکتشافات هیدروکربنی استفاده کرد. در این مطالعه از جریان گذرا با موج مربعی استفاده شده است. علت این امر و رفتار این موج قبلاً به‌طور کامل مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱-۱۲]. فرستنده و گیرنده مورد استفاده در این پژوهش، از نوع دوقطبی الکتریکی افقی (HED^۴) هستند.

۲- محاسبات نظری

مدل مورد بررسی، یک صفحه مقاومتی مربعی شکل با جهت‌گیری افقی، طول b، ضخامت بسیار کوچک Δ و مقاومت ویژه ρ₂ می‌باشد که در عمق d درون بستر دریا قرار گرفته‌است. مقاومت ویژه‌های بستر دریا و آب دریا به‌ترتیب ρ₁ و ρ₀ فرض می‌شوند. فرستنده و گیرنده یک سیستم دو-دوقطبی الکتریکی هم‌خط افقی^۴ است که فاصله دوقطبی‌های آن از هم X_{ff} می‌باشد. همچنین فاصله افقی فرستنده و گیرنده از مرکز صفحه به‌ترتیب به‌صورت (x_t, y_t) و (x_r, y_r) در نظر گرفته شده است، شکل (۱).

5- Green's Function

6- Vertical Electric Dipole

1- Gas Hydrate

2- Fresh Water Lenses

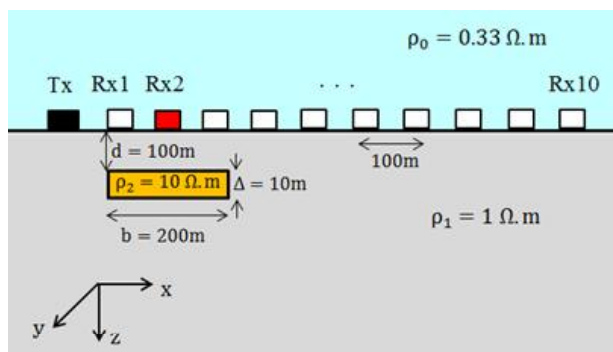
3- Horizontal Electric Dipole

4- Horizontal in-line Electric dipole-dipole

بدین ترتیب با تعیین گشتاور دوقطبی در واحد سطح صفحه، $k(x', y')$ از معادله انتگرالی (۶)، و قرار دادن آن در معادله انتگرالی (۷)، مؤلفه افقی میدان الکتریکی ثانویه ناشی از صفحه مدل محاسبه خواهد شد. برای حل تقریبی معادله انتگرالی (۶) از روش عددی گشتاوری^۳ براساس [۱۵] استفاده شده که به‌عنوان پیوست ارائه شده است.

۳- مدل‌سازی عددی

مدل مورد بررسی به‌صورت صفحه‌ای مربعی با طول 200 m در نظر گرفته شده‌است که در عمق 100 m از بستر دریا قرار دارد. ضخامت آن 10 m متر و دارای مقاومت ویژه $10 \Omega \cdot \text{m}$ می‌باشد. مقاومت ویژه‌های آب دریا و بستر دریا طبق روال کاوش‌های دریایی به‌ترتیب $0.33 \Omega \cdot \text{m}$ و $1 \Omega \cdot \text{m}$ فرض شده‌اند. یک فرستنده در مبدأ و 10 گیرنده در فواصل 100 m از یکدیگر بر روی بستر دریا در یک راستا قرار گرفته‌اند. فاصله گیرنده اول و نیز لبه سمت چپ صفحه از مبدأ مختصات 100 m است، شکل (۲).



شکل ۲: مدل مورد استفاده برای مدل‌سازی عددی گیرنده واقع بر مرکز صفحه با رنگ قرمز مشخص شده‌است.

در این پژوهش اثر تغییرات مقاومت ویژه بستر دریا نسبت به آب دریا و نیز عمق دفن صفحه مدل بر روی یک گیرنده واقع بر مرکز صفحه (به نمایندگی از تمام گیرنده‌ها) بررسی شده است. هم‌چنین برای بررسی تغییرات زمان رسیدها در اثر تغییرات عمق دفن مدل، پاسخ دریافتی در یک ردیف 10 تایی از گیرنده‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تمام نمودارها بر اساس مدل‌سازی عددی و با تقسیم صفحه به 64 بخش کوچک‌تر به‌دست آمده‌اند.

نسبت داده می‌شود. افت پتانسیل $\Delta\phi$ در سرتاسر یک صفحه نازک که در معرض شارش جریان قرار گرفته، وابسته به چگالی جریان قائم داخل صفحه J_z^{int} است، [۱۳]، که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\Delta\phi = J_z^{int} T \quad (3)$$

که در آن T امپدانس عرضی^۱ صفحه $(\rho_2 \Delta)$ است. به‌علاوه، اختلاف پتانسیل در سرتاسر صفحه دوقطبی با حاصل ضرب چگالی گشتاور دوقطبی در مقاومت ویژه محیط اطراف آن برابر است [۱۴]. بدین ترتیب چگالی جریان داخلی در هر نقطه (x, y) روی صفحه مدل به‌صورت زیر است:

$$J_z^{int} = \frac{\rho_1 k(x, y)}{T} \quad (4)$$

با توجه به شرط پیوستگی جریان، چگالی جریان قائم خارج از صفحه مدل با چگالی جریان قائم درون آن برابر است:

$$J_z^{int} = J_z^{ext} \quad (5)$$

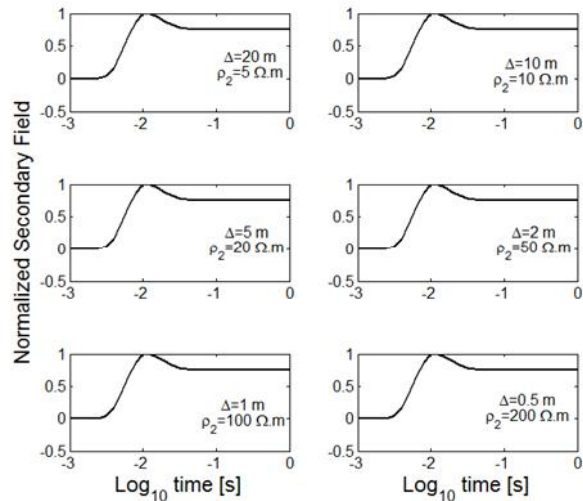
چگالی جریان خارجی J_z^{ext} حاصل جمع چگالی جریان فرستنده در محیط زمینه و اثر توزیع دوقطبی‌های ثانویه در راستای مرز صفحه است. بنابراین با توجه به روابط (۴) و (۵) پیوستگی میدان الکتریکی در فصل مشترک صفحه مدل و محیط میزبان به معادله انتگرالی زیر می‌انجامد:

$$mG_{zx} \{x, y, d | 0, 0, 0\} + \iint k(x', y') G_{zz} \{x, y, d | x', y', d\} dx' dy' = \frac{\rho_1^2 k(x, y)}{T} \quad (6)$$

جمله اول در سمت چپ معادله (۶)، مؤلفه قائم میدان در فصل مشترک صفحه مدل با محیط میزبان است که ناشی از دوقطبی فرستنده با گشتاور دوقطبی m ، واقع در مبدأ است. دومین جمله اثر اندرکنش‌های^۲ نقاط درون صفحه مدل است.

میدان الکتریکی ثانویه E_x^S ، حاصل از قطبش صفحه مدل که در گیرنده دریافت می‌شود به شکل کلی زیر است:

$$E_x^S \{x_{rt}, 0, 0\} = \iint k(x', y') G_{xz} \{x_{rt}, 0, 0 | x', y', d\} dx' dy' \quad (7)$$



شکل ۳: نمایش برقراری هم‌ارزی T بر روی پاسخ پله نرمالیزه شده حاصل از صفحه مقاوم افقی بر حسب زمان لگاریتمی

تغییر داده شده است. اثر تغییر نسبت مقاومت ویژه بستر دریا به آب دریا بر روی پاسخ پله نرمالیزه شده بر حسب زمان لگاریتمی در شکل (۴) به نمایش درآمده است. پاسخ دریافتی در گیرنده مرکزی نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت ویژه بستر دریا نسبت به آب دریا، زمان رسید موج (که از مسیر بستر دریا عبور می‌کند و تحت تأثیر حضور بی‌هنجاری است) کاهش می‌یابد. این امر، نتیجه استفاده از جریان گذرا است.

زمانی که از جریان گذرا در فرستنده استفاده می‌شود، در لحظه روشن شدن فرستنده که جریان بیشترین مقدار فرکانس را دارد، بخش عمده شار جریان تمایل به عبور از مسیر با مقاومت ویژه بیشتر (بستر دریا) دارد و با گذشت زمان و نزدیک شدن به محدوده پایدار (فرکانس صفر) که معادل استفاده از جریان مستقیم DC است، بخش عمده شار جریان از مسیر رساناتر (آب دریا) به گیرنده می‌رسد و تقریباً هیچگونه حساسیتی نسبت به مقاومت ویژه بستر دریا از خود نشان نمی‌دهد. بر همین اساس، در مطالعه بستر دریا از جریان گذرا استفاده می‌شود. اصول نظری و روابط مربوط به این مبحث، به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. در واقع یکی از نتایج مهم پژوهش یادشده، وابستگی مستقیم زمان رسید به نسبت رسانندگی آب دریا به بستر دریاست. از این رو، این بخش از پژوهش به‌منظور بررسی شهودی اثر مقاومت ویژه بستر دریا بر زمان رسید موج ارائه شده است.

لازم به ذکر است که اعتبار مدل‌سازی ارائه‌شده در این مطالعه، با مقایسه آن با روش عددی تفاضل محدود در حل معادلات دیفرانسیل، مورد بررسی قرار گرفته است [۴].

۳-۱- هم‌ارزی T برای مدل صفحه‌ای

فرستنده مورد استفاده در این پژوهش، دوقطبی الکتریکی افقی است. چنین فرستنده‌ای توانایی تولید هر دو حالت قطبشی مغناطیسی عرضی (TM^1) و الکتریکی عرضی (TE^1) را دارد. میدان‌های حالت TE (به‌علت این که فاقد مؤلفه قائم میدان الکتریکی هستند) هیچگونه حساسیتی به حضور ساختارهای مقاوم افقی نشان نمی‌دهند، در حالی که انحراف شار جریان الکتریکی تولیدشده در حالت TM، عاملی مؤثر در شناسایی چنین ساختارهایی محسوب می‌شود [۱۱-۱۲].

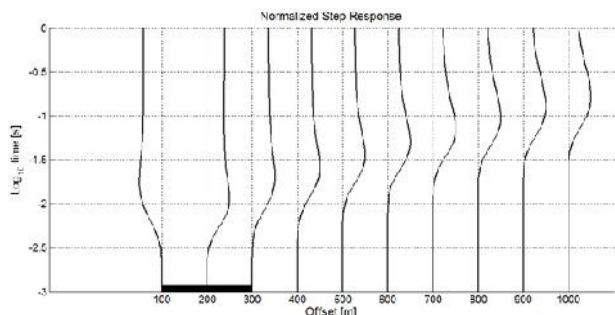
برای این که از میان دو حالت قطبشی تولیدشده توسط فرستنده (دوقطبی الکتریکی افقی)، حالت TM مورد بررسی قرار گیرد، گیرنده از نوع دوقطبی الکتریکی افقی انتخاب و هم‌راستا با دوقطبی فرستنده قرار داده شده است. یکی از نتایج استفاده از حالت TM، وابستگی پاسخ دریافتی به حاصل ضرب دو عامل مقاومت ویژه و ضخامت صفحه مدل است. این حاصل ضرب با عنوان امپدانس عرضی T^3 شناخته می‌شود و وابستگی پاسخ را به این حاصل ضرب، هم‌ارزی T می‌نامند. برای بررسی برقراری هم‌ارزی T روی پاسخ، لازم است که دو عامل مقاومت ویژه و ضخامت صفحه به‌گونه‌ای تغییر داده شود که حاصل ضرب آن‌ها در تمام موارد یکسان بماند، شکل (۳).

بنابراین نتایج مدل‌سازی که برای صفحه‌ای با ضخامت ۱۰ متر و امپدانس عرضی ۱۰ اهم‌متر انجام شده است برای تمام ساختارهای با امپدانس عرضی ۱۰۰ اهم مترمربع قابل تعمیم خواهد بود.

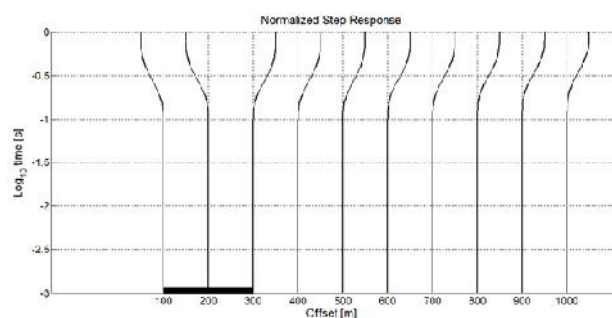
۳-۲- اثر مقاومت ویژه محیط میزبان

در این قسمت، اثر تغییر مقاومت ویژه محیط میزبان (بستر دریا) به‌عنوان نیم‌فضای مقاوم‌تر) نسبت به آب دریا (نیم‌فضای با مقاومت ویژه کمتر) بر روی پاسخ دریافت‌شده در گیرنده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مقاومت ویژه آب دریا، مقدار ۰/۳۳ اهم‌متر در نظر گرفته‌شده و مقاومت ویژه بستر دریا نسبت به آن،

- 1- Transverse Magnetic Mode
- 2- Transverse Electric Mode
- 3- Transverse Impedance

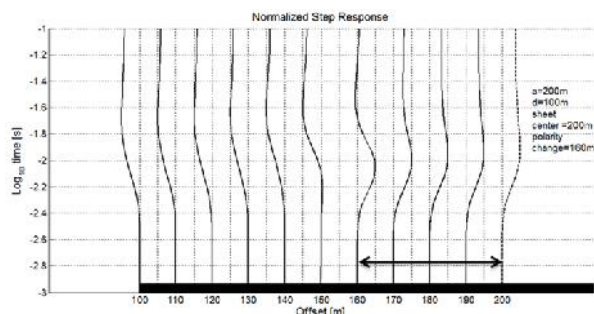


الف



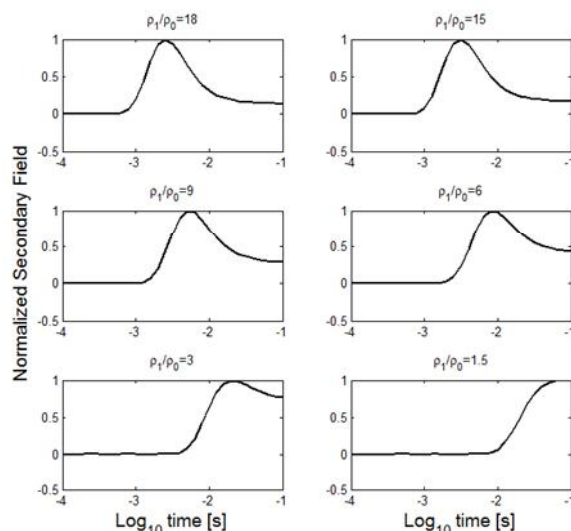
ب

شکل ۵: پاسخ پله نرمالیزه شده دریافتی در یک ردیف گیرنده با فواصل ۱۰۰ m، محور افقی فاصله هر گیرنده را از فرستنده واقع در مبدأ نشان می‌دهد. مستطیل سیاه‌رنگ محل قرارگیری صفحه مدل را نشان می‌دهد. (الف) عمق دفن صفحه: ۱۰۰ m (ب) بستر دریا (ب) عمق دفن صفحه: ۱۰۰۰ m متر از بستر دریا



شکل ۶: پاسخ پله نرمالیزه شده دریافتی در یک ردیف گیرنده با فواصل ۱۰ متری چیده شده بر روی صفحه از لبه تا مرکز آن. محور افقی فاصله هر گیرنده را از فرستنده واقع در مبدأ نشان می‌دهد.

با تغییر عمق دفن و بررسی نمودارهای متفاوت مشاهده شد که محل تغییر قطبش ثابت نبوده و نسبت به مرکز صفحه تغییر مکان می‌دهد. برای مثال، شکل (۵) نشان می‌دهد که در عمق دفن ۱۰۰ m، تغییر قطبش در فاصله‌ای میان دو گیرنده واقع در ۱۰۰ m (لبه نزدیک به فرستنده) و ۲۰۰ m (مرکز صفحه) رخ داده است و با افزایش عمق، محل تغییر قطبش به مرکز صفحه نزدیک می‌شود و در عمق دفن ۱۰۰۰ m این نقطه از مرکز صفحه عبور کرده و به سمت



شکل ۴: نمایش اثر تغییر نسبت مقاومت ویژه بستر دریا به آب دریا بر روی پاسخ پله نرمالیزه شده بر حسب زمان لگاریتمی

۳-۳- اثر عمق دفن مدل

عمق کاوش در اکتشافات ژئوفیزیکی یک عامل مهم تلقی می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع در این پژوهش، از یک ردیف گیرنده (گیرنده‌های رشته‌ای) با فواصل مشخص نسبت به فرستنده، استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن گیرنده به لبه صفحه، زمان رسیدن موج کاهش می‌یابد و در مرکز صفحه، زمان رسید، حداقل مقدار خود را نشان می‌دهد. دلیل این امر نیز، مقاومت ویژه بالاتر صفحه مدل نسبت به محیط میزبان است. در واقع، حضور ساختار مقاوم با شکل صفحه نازک افقی، با مسدود کردن مسیر شارش جریان در محیط، موجب انحراف شار جریان الکتریکی و تسریع در رسیدن آن به گیرنده می‌شود. مدل‌سازی عددی نشان داد که در اثر افزایش عمق دفن صفحه مدل، اختلاف نسبی زمان رسیدهای دریافتی در گیرنده‌ها کاهش می‌یابند و در عمقی معادل ۵ برابر طول صفحه، این اختلاف به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر وقتی مدل صفحه مقاومتی در عمقی در حدود ۵ برابر ابعاد صفحه مدفون باشد، حضور آن بر مسیر شار جریان الکتریکی فرستنده تأثیری نداشته و آشکارسازی بی‌هنجاری در این عمق غیرممکن می‌شود، شکل (۵).

۴- تخمین ابعاد صفحه مدل

نمودارهای حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند که دامنه زمان رسیدها در یک مکان معین تغییر قطبش می‌دهند، شکل (۶).

بررسی کرد تا به ساختارهای موجود در طبیعت نزدیک تر شوند. از سوی دیگر در نظر گرفتن لایه بندی و ناهمسان گردی محیط میزبان (بستر دریا) به نتایج دقیق تری از مدل سازی می انجامد.

۶- مراجع

- [1] S. Constable and C. Weiss, "Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: insights from 1D modeling," *Geophysics*, vol. 71, pp. 43-51, 2006.
- [2] D. Chave and C.S. Cox, "Controlled electromagnetic sources for measuring the electrical conductivity beneath the oceans," *Geophysics Res.*, vol. 87, pp. 5327-5338, 1982.
- [3] A. Swidinsky and R.N. Edwards, "The marine CSEM response of a resistive sheet: straightforward but not trivial," *Geophysics Int.*, vol. 179, pp. 1488-1498, 2009.
- [4] A. Swidinsky and R.N. Edwards, "The transient electromagnetic response of a resistive sheet: An extension to three-dimensions," *Geophysics Int.*, vol. 182, pp. 663-674, 2010.
- [5] R.N. Edwards, "Two-dimensional modeling of a towed in-line electric dipole-dipole sea-floor electromagnetic system: the optimum time delay or frequency for target resolution," *Geophysics*, vol. 53, pp. 846-853, 1988.
- [6] P.W. Walker and G.F. West, "A robust integral equation solution for electromagnetic scattering by a thin plate in conductive media," *Geophysics*, vol. 56, pp. 1140-1152, 1991.
- [7] G.A. Newman and D.L. Alumbaugh, "Frequency-domain modeling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences," *Geophys. Prospect.* vol. 43, pp. 1021-1042, 1995.
- [8] V.L. Druskin and L.A. Knizhnerman, "Spectral approach to solving three-dimensional Maxwell's diffusion equations in the time and frequency domains," *Radio Sci.*, vol. 29, pp. 937-953, 1994.
- [9] M.E. Everett and R.N. Edwards, "Transient marine electromagnetics: the 2.5D forward problem," *Geophysics Int.*, vol. 113, pp. 545-561, 1993.

لبه دور از فرستنده پیش می رود. نتایج عددی برای عمق های متفاوت در جدول (۱) به ثبت رسیده است. گیرنده های رشته ای مورد استفاده برای تنظیم جدول (۱) دارای فواصل ۱۰ m هستند. در هر عمق، فاصله نقطه تعویض قطبش تا مرکز صفحه به صورت نسبتی از عمق دفن تعیین شده است.

جدول ۱: محل تغییر قطبش برای یک صفحه به طول نامشخص و عمق معلوم.

عمق دفن نسبت به طول صفحه	فاصله محل تغییر قطبش از مرکز صفحه (نسبت به عمق دفن)
۰٫۲۵	۱
۰٫۵	۰٫۴۰
۰٫۷۵	۰٫۲۰
۱	۰٫۱۰
۱٫۵	۰٫۰۳
۲	۰

مشاهدات نشان می دهند که آشکارسازی چنین ساختارهایی با استفاده از این روش، تا عمق ۱/۵ برابر طول صفحه ممکن می باشد. چراکه در عمق معادل دو برابر طول صفحه، فاصله نقطه تعویض قطبش از مرکز صفحه صفر می شود. در صورت معلوم بودن عمق دفن صفحه (مثلاً با استفاده از کاوش های لرزه ای که پیش از کاوش های الکترومغناطیسی در ژئوفیزیک انجام می گیرند)، ابعاد آن با استفاده از جدول (۱) قابل تخمین خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر تغییر مقاومت ویژه محیط میزبان و هم چنین عمق دفن مدل، بر روی زمان رسید پاسخ های پله نرمالیزه مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهدات عددی نشان دادند که به علت استفاده از جریان گذرا، افزایش مقاومت ویژه بستر دریا نسبت به آب دریا، موجب تسریع در رسیدن موج به گیرنده می شود. هم چنین تا عمق ۵ برابری ابعاد صفحه، حضور چنین ساختارهایی در محیط قابل تشخیص است. با استفاده از اطلاعات عمق حاصل از مقاطع لرزه ای، روش جدیدی بر اساس اصول الکترومغناطیس برای تخمین ابعاد صفحه مدل ارائه شد. این روش تا عمق ۱/۵ برابری ابعاد صفحه مدل، پاسخ مطلوبی ارائه می دهد. از ترکیب صفحات افقی با صفحات شیب دار نیز می توان مدل های پیچیده تری از مخازن هیدروکربنی را

از سوی دیگر با در نظر گرفتن هر چشمه نقطه‌ای از صفحه در مبدأ و همچنین با در نظر گرفتن یک ضریب عبور وابسته به ضریب بازتاب به صورت $1-R^{TM}$ ، تابع گرین صفحه تا گیرنده G_{xz} به شکل زیر به دست می‌آید:

$$G_{xz}\{x, y, -d|0,0,0\} = \frac{\rho_1 e^{-\alpha_1 r}}{4\pi r^3} \left(\frac{2\rho_0\theta_0}{\rho_1\theta_1 + \rho_0\theta_0} \right) \left[\frac{-xd}{r^2} \left(\frac{\alpha_1^2 r^2}{+3} \right) \right] \quad (9)$$

که در دو رابطه (۹ و ۸)، $\alpha_i = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho_i}}$ عدد موج محیط i ام با مقاومت ویژه ρ_i ، ω فرکانس زاویه‌ای جریان، و μ_0 تراوایی مغناطیسی در خلأ می‌باشد. در ضرایب بازتاب و عبور، θ عدد موج کامل بوده و برابر است با $\theta_i = \sqrt{\lambda^2 + \alpha_i^2}$ و λ متغیر انتگرال گیری است. همچنین فاصله هر چشمه از نقطه آزمون، $r = \left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2 \right]^{1/2}$ است. با توجه به رابطه (۹) و خاصیت تانسور گرین تابع گرین فرستنده تا صفحه G_{zx} نیز همانند رابطه بالا خواهد بود.

$$G_{ab}\{x, y, z|x', y', z'\} = G_{ba}\{x', y', z'|x, y, z\} \quad (10)$$

۷-۲- محاسبات عددی به روش گشتاوری

در این پیوست حل تقریبی دو معادله (۶ و ۷) بر اساس روش گشتاوری [۱۵]، ارائه می‌شود. برای این منظور، صفحه مدل به N المان مربعی به طول a تقسیم شده و در مرکز هر المان یک چشمه دوقطبی الکتریکی قائم با گشتاور دوقطبی ثابت در واحد حجم k_i در نظر گرفته می‌شود. هر یک از این دوقطبی‌ها با یکدیگر اندرکنش داشته و همچنین در گیرنده پاسخ ایجاد می‌کنند. با انتخاب N المان و برقراری شرط مرزی (۴) در مرکز هر کدام، معادله (۵) به معادله ماتریسی زیر تبدیل می‌شود:

$$AK = -J$$

که در آن متغیرهای K و J بردارهایی هستند که به ترتیب حاوی k_i برای هر المان و چگالی جریان چشمه در هر نقطه از صفحه می‌باشند [۱۶]. ماتریس A حاوی توابع گرینی است که اندرکنش بین چشمه‌ها و نقاط آزمون را نشان می‌دهد.

برای ساخت درایه‌های ماتریس A ، در رابطه (۸) باید از جمله اصلی (تمام‌فضا) در سطح المان انتگرال گیری کرد تا همگرایی پاسخ

- [10] Weiss and S. Constable, "Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods. Part II. Modeling and analysis in 3D," *Geophysics*, vol. 71, pp. 321-332, 2006.
- [11] R. N. Edwards and A. D. Chave, "On the theory of a transient electric dipole-dipole method for mapping the conductivity of the sea floor," *Geophysics*, vol. 51, pp. 984-987, 1986.
- [12] S. J. Cheesman, R.N. Edwards and A.D.Chave, "On the theory of sea-floor conductivity mapping using transient electromagnetic systems," *Geophysics*, vol. 52, pp. 204-217, 1987.
- [13] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 188-192, 1941.
- [14] R. F. Harrington, *Field computation by moment methods*, MacMillan, New York, 1968.
- [15] S. H. Ward and G. W. Hohmann, "Electromagnetic theory for geophysical applications," in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 1, eds Nabighian, M.N., SEG, Oklahoma, pp. 173-174, 1988.

۷- پیوست

۷-۱- محاسبه توابع گرین

در معادلات (۶) و (۷) به توابع G_{zx} ، G_{xz} و G_{zz} از تانسور گرین نیاز داریم. درایه‌های تانسور گرین (۲) برای انتشار میدان الکتریکی ناشی از یک دوقطبی الکتریکی در امتداد x ، در تمام فضا تعریف شده‌اند [۱۶]. برای تابع اندرکنش‌های درونی صفحه G_{zz} و تصاویر آن‌ها از فصل مشترک دو محیط، نکات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- ۱- هر نقطه از صفحه در دو نقش چشمه و گیرنده عمل می‌کند؛
- ۲- در هر اندازه‌گیری، نقطه آزمون در مبدأ فرض می‌شود؛
- ۳- جملات اصلی (تمام‌فضا) مربوط به چشمه‌های صفحه در زیر فصل مشترک و جملات تصویری (تمام‌فضا ضربدر ضریب بازتاب R^{TM}) مربوط به چشمه‌های تصویری صفحه نسبت به فصل مشترک هستند.

با این ملاحظات، از جمع جملات اصلی و تصویری اندرکنش

صفحه، تابع گرین اندرکنش دونیم‌فضا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$G_{zz}\{x, y, d|x', y', d\} = \left[\begin{array}{c} G_{zz}\{0,0,0|x', y', 0\} \\ + R^{TM} G_{zz}\{0,0,0|x', y', -2d\} \end{array} \right] = -\frac{\rho_1 e^{-\alpha_1 r}}{4\pi r^3} \left\{ \begin{array}{c} \left(\frac{\alpha_1^2 r^2}{+1} \right) \\ + \frac{\rho_1\theta_1 - \rho_0\theta_0}{\rho_1\theta_1 + \rho_0\theta_0} \left[\frac{(-2d)^2}{r^2} \left(\frac{\alpha_1^2 r^2}{+3} \right) \right] \\ - \left(\frac{\alpha_1^2 r^2}{+1} \right) \end{array} \right\} \quad (8)$$

درایه‌ها که روی قطر اصلی قرار دارند، جمله $\frac{\rho_1^2}{T_j}$ اضافه می‌شود که از سمت راست معادله (Δ) ناشی می‌شود. در نهایت با حل معادله ماتریسی، یک بردار K برای صفحه مدل حاصل می‌شود. بر اساس روش گشتاوری و با توجه به فرایند گسسته‌سازی مدل، معادله انتگرالی (γ) برای محاسبه میدان ثانویه، به صورت زیر تقریب زده می‌شود.

$$E^s \{0,0,0\} = \sum_{i=1}^N a^2 k_i G_{zz} \{0,0,0 | x'_i, y'_i, d\} \quad (14)$$

که در آن (x'_i, y'_i) فاصله نقطه میانی هر المان تا گیرنده‌ای است که در مبدأ قرار گرفته است [۴]. لازم به ذکر است که تمام روابط در حوزه فرکانس هستند و برای تبدیل به حوزه زمان از تبدیل لاپلاس استفاده می‌شود تا از بخش موهومی صرف نظر شود.

تضمین شود. اما در مورد جمله تصویری (تمام فضا ضرب در ضریب بازتاب) کافی است آن را در مساحت المان ضرب کنیم. برای درایه‌های قطر اصلی که معرف انطباق چشمه و نقطه آزمون بر یکدیگر است، انتگرال گیری عددی دقت مناسبی ندارد و لازم است تا انتگرال گیری تحلیلی انجام شود. اما با توجه به این که این امر میسر نیست ابتدا با بسط تیلور آن را ساده می‌کنیم. در استفاده از بسط تیلور و کوتاه کردن سری، یک نکته در نظر گرفته می‌شود: صفحه به N المان تقسیم شده است؛ با افزایش تعداد المان‌های سطح، دقت محاسبات افزایش می‌یابد. از طرفی هرچه فرکانس این چشمه‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، حجم بالای محاسبات با سرعت بالاتری انجام می‌شوند. بنابراین با فرض فرکانس پایین، جمله اول را به صورت یک سری تیلور بسط می‌دهیم:

$$G_{zz} \{x, y, d | x', y', d\} \cong -\frac{\rho_1}{4\pi} \left[\frac{1}{r^3} + \frac{\alpha_1^2}{2} \frac{1}{r} \right] + \dots \text{بالاتر} \quad (11)$$

اکنون رابطه بالا را می‌توان در مختصات دکارتی در کل سطح المان چشمه انتگرال گیری کرد. با فرض فرکانس پایین، از عبارات $\alpha_1^3 r^3$ و توان‌های بالاتر صرف نظر می‌کنیم و نقطه آزمون را در مبدأ در نظر می‌گیریم. در این صورت درایه‌های تمام فضای $G_{zz} \{0,0,d | x', y', d\}$ در ماتریس A را برای دوقطبی‌های عمود بر یک صفحه افقی می‌توان به صورت رابطه (۱۲) تقریب زد.

$$-\frac{\rho_1}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \left[\frac{1}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} + \frac{\alpha_1^2}{2} \frac{1}{(x'^2 + y'^2)^{1/2}} \right] dx' dy' \quad (12)$$

که در آن $x_1 = x_i - \frac{a}{2}$ و $x_2 = x_i + \frac{a}{2}$ ، $y_1 = y_i - \frac{a}{2}$ ، $y_2 = y_i + \frac{a}{2}$ لبه‌های چهارگانه هر المان مربعی را نشان می‌دهند.

$$\frac{\rho_1}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{xy} \\ -\frac{\alpha_1^2}{2} \left[x \log(2y + 2\sqrt{x^2 + y^2}) \right. \\ \left. + y \log(2x + 2\sqrt{x^2 + y^2}) \right] \end{array} \right\} \Bigg|_{y_1}^{y_2} \Bigg|_{x_1}^{x_2} \quad (13)$$

با قرار دادن حدود انتگرال، ۱۲ جمله خواهیم داشت و سپس جملات تصویری را به آنها اضافه می‌کنیم. از سوی دیگر به این

Estimating the Dimension of Horizontal Resistive Sheet Model Using Transient Electromagnetic Response

N. Homayoni^{*}, M. S. Meshinchi– Asl, H. Molhem

**Islamic Azad University, Tehran, Iran*

(Received: 21/12/2014 , Accepted: 11/01/2015)

Abstract

Studies show that the horizontal resistive sheet is an appropriate approximation for modeling of horizontal, thin layered structures such as hydrocarbon reservoirs buried in the seabed depths. After the exploration of these reservoirs by using seismic methods, more investigations are needed to determine their burial depth and size. In order to complete the seismic studies, the Controlled Source Electromagnetic method (CSEM) is proposed. In this study, the electromagnetic response of a horizontal resistive sheet to a square wave transmitted by a Horizontal Electric Dipole (HED) source has been investigated. The integral equation obtained according to the boundary condition of resistive structures (the continuity of the normal component of current density), has been solved by Method of Moment (MOM). In this research, it was shown that the arrival time of received step responses in the receiver, decrease with increasing seabed resistivity. Also, the distance of polarity change of step response from the center of the sheet, was introduced as a useful tool for estimating the dimension of resistive sheet models.

Keyword: transient electromagnetic, electric field, resistive sheet, horizontal electric dipole, moment method

** Corresponding Author Email: n.homayoni@srbiau.ac.ir*