

وارونسازی یک‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک بر اساس الگوریتم لارسن

محمدحسین قلعه‌نویی^{1*}، پرویز پورقهرمانی²

1- کارشناس ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

2- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت: آذر 1392 پذیرش: مهر 1394)

چکیده

مدل نهایی به دست آمده در وارونسازی داده‌های مگنتوتلوریک باید تا حد امکان با زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه همخوانی داشته باشد. در اغلب روش‌های وارونسازی یک‌بعدی مگنتوتلوریک که به صورت لبه‌های تیز ارائه می‌شود، مدل‌هایی به دست می‌آید که انطباق زیادی با زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ندارد. این عدم انطباق به خصوص در آخرین لایه دیده می‌شود. الگوریتم‌هایی که به صورت هموار ارائه می‌شود، اغلب آنقدر هموار هستند که لایه‌های نازک به سختی قابل مدل بوده و با اصلا مدل نمی‌شوند. در الگوریتم لارسن به خصوص در لایه آخر عدم اعتماد وجود دارد که لارسن برای حل این مشکل از توابع کرنل استفاده کرده است. اما در روش حاضر برای این منظور از الگوریتم لارسن استفاده شده به اضافه این که تعداد لایه‌ها در این روش زیاد بوده و اغلب بیشتر از 10 لایه است. در این الگوریتم برخلاف روش لارسن نیازی به حل توابع کرنل نیست و مشکل انتخاب پارامترهای مدل مانند مقیاس ضخامت لایه‌ها حل شده است. نهایتاً با به کار بردن داده‌های مصنوعی و واقعی قابلیت این روش نشان داده شده است.

واژگان کلیدی

تابع پاسخ، مگنتوتلوریک، تابع کرنل، مقیاس ضخامت لایه، دترمینان امیدانس، ناچورشدگی

ارجاع به این مقاله:

قلعه نویی، م.، پورقهرمانی، پ. (1394)، وارونسازی یک‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک بر اساس الگوریتم لارسن، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، 5(9)، 38-31.

[http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940913-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940913-X)

* عهده دار مکاتبات: mhghalehnoee@gmail.com

1- مقدمه

پیشرفت داشته است و پس از آن تلاش‌های زیادی بر روش‌های وارونسازی دو بُعدی و سه بُعدی انجام شده است.

روش ارائه شده در این تحقیق بر پایه مدل لارسن [4] بوده و مشتقات جزئی ماتریس حساسیت بدون اینکه تخمین زده شوند، مستقیماً محاسبه می‌شوند و همچنین الگوریتم حل این مشتقات به صورت خطی است. در روش ارائه شده نیازی به محاسبه توابع کرنل جهت تخمین سطح قابل اعتماد که توسط لارسن ارائه شده، نیست. در این روش برخلاف روش لارسن تعداد لایه‌ها زیاد بوده و مدل به دست آمده هموار⁴ است.

2- مدل پیشرو⁵

تابع پاسخ $G_{obs}(\omega_j)$ برای یک مدل با N لایه افقی که هر لایه با هدایت الکتریکی σ_n و ضخامت h_n که نهایتاً به یک نیم فضا با هدایت الکتریکی σ_N ختم شده، تعریف می‌شود (شکل 1).

Surface			
σ_1	h_1	G_1	L_1
σ_2	h_2	G_2	L_2
		G_3	L_3

σ_{N-1}	h_{N-1}	G_{N-1}	L_{N-1}
σ_N		G_N	L_N

شکل 1: مدل لایه‌ای که در آن هدایت ویژه الکتریکی $\sigma(S/m)$ بوده و ضخامت لایه‌ها $h(m)$ است [4]

حل مدل لایه‌ای به سادگی از طریق معادلات مکسول به دست می‌آید. با نادیده گرفتن جابجایی جریان بر اساس الگوریتم ویت⁶، مدل پیشرو به صورت زیر حل می‌شود:

$$G_n(\omega) = R_n \frac{[G_{n+1}(\omega) + T_n(\omega)]}{[1 + G_{n+1}(\omega)T_n(\omega)]} \quad (3)$$

for $n = 1, 2, \dots, N-1$

$$T_n(\omega) = \tanh[(-i\mu\sigma_0\omega)^{1/2} H_n] \quad (4)$$

$$R_n = (\sigma_{n-1} / \sigma_n)^{1/2} \quad (5)$$

روش مگنتوتلوریک از سیگنال‌های طبیعی الکترومغناطیسی برای تصویر برداری از مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی استفاده می‌کند. اکتشافات مگنتوتلوریک بر اساس ثبت تغییرات زمانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین است. اگر میدان الکتریکی و مغناطیسی اندازه‌گیری شده E و H باشد، مقاومت ظاهری زمین توسط رابطه (1) به دست می‌آید:

$$\rho = \frac{1}{2\pi f \mu_0} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (1)$$

که در آن f فرکانس سیگنال و μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی است. سیگنال‌های الکترومغناطیسی تا فاصله‌ای (عمق) به درون زمین نفوذ می‌کند که به آن عمق پوستی¹ می‌گویند و با واحد متر تعریف می‌شود (رابطه (2)).

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

به سادگی می‌توان فهمید که برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه در اعماق بیشتر نیاز به داشتن فرکانس‌های کوتاه‌تر است. مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی اغلب بین 0/1 تا 10000 اهم متر بوده و فرکانس‌های مورد استفاده در مگنتوتلوریک از 1000 تا 0/0001 هرتز است. بنابراین عمق پوستی از چند ده متر تا صدها کیلومتر تغییر می‌کند. مقاومت ویژه ظاهری نشان‌دهنده مقاومت الکتریکی میانگین حجمی از زمین روی یک نیمکره با شعاع مساوی عمق با پوستی است.

در وارونسازی یک بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک روش‌های زیادی ارائه شده است که از جمله آنها روش ویدلت [1]، روش حل مستقیم پارکر [2]، روش تحلیلی توسط فیشر و همکاران [3]، روش خطی لارسن [4]، روش ویتال و اولدنبرگ [5] که بر مبنای تئوری انتشار² بیان شده، روش ریساتی³ غیر کوششی با حل مستقیم تابع پاسخ توسط سرینکا و همکاران [6]، روش اُکام یک بُعدی کانستیبیل و همکاران [7] و روش SIS که توسط گوپتا و همکاران [8] و قسمت کامل‌تر آن در سال 2007 [9]، انتشار یافته است. روش‌های یک بُعدی تا سال 2007

جزئیات بیشتری به دست می‌آید. واحد مقیاس ضخامت لایه‌ها بر حسب متر است.

معادله اصلی فرمول (9) در X_n غیر خطی است، اما در صورتیکه ثابت هدایت الکتریکی⁷ لایه‌ها کوچک باشد، یعنی $R_n \cong 1$ که به صورت خطی حل می‌شود، بنابراین $|X_n| \ll 1$ برای $n=2, \dots, N$. بنابراین تخمین زیر مطلوب به نظر می‌رسد:

$$L_n(\omega) \cong X_n + E_n(\omega) L_{n+1}(\omega) \quad (14)$$

برای $n=1, \dots, N-1$ تابع $|E_n(\omega)| \leq 1$ می‌شود. لگاریتم تابع پاسخ اکنون نسبت به X_n به صورت خطی در خواهد آمد:

$$L_1(\omega) = \sum_{n=1}^N D_n(\omega) X_n \quad (15)$$

$$D_n(\omega) = \exp[-2(-i\mu\sigma_0\omega)^{1/2} \sum_{m=1}^{n-1} H_m] \quad (16)$$

که در آن $D_1(\omega) = 1$ و $n = 2, \dots, N$ برقرار است.

2- روش مطالعه

بطور کلی وارونسازی داده‌های روش‌های الکترومغناطیسی غیر خطی است. یعنی اینکه

$$d = g(m) \quad (17)$$

که d داده‌های مشاهده شده (مقاومت ویژه ظاهری و فاز) و $g(m)$ تابع پیشرو است که داده‌ها را به مدل (m) ربط می‌دهد. مدل (m) در این تحقیق شامل مقاومت ویژه لایه‌ها است، که مجهول هستند.

اما به هر حال اگر مقیاس ضخامت لایه‌ها H_n ثابت باشد، حل مجهول X_n با فرآیند تکرار از یک مدل اولیه که فرض می‌شود یک نیم فضای یکدست باشد شروع می‌شود. سپس $(k+1)$ امین مدل از (k) امین مدل با استفاده از قانون چین⁸ با فرمول زیر به دست می‌آید

$$L_1^{k+1}(\omega) \cong L_1^k(\omega) + \sum_{n=1}^N D_n^k(\omega) [X_n^{k+1} - X_n^k] \quad (18)$$

که با حل مشتقات جزئی می‌توان نوشت

$$D_n^k(\omega) = E_1^k(\omega) E_2^k \dots E_{n-1}^k(\omega) \quad (19)$$

برای $n = 2, \dots, N$ و $D_1^k(\omega) = 1$. با استفاده از معادله (11) خواهد شد

$$H_n = h_n(\sigma_n / \sigma_0)^{1/2} \quad (6)$$

$$G_N(\omega) = R_N \quad (7)$$

و تابع پاسخ در سطح زمین $G_1(\omega)$ است که بر $G_{obs}(\omega)$ برازش می‌شود و نفوذپذیری مغناطیسی برای خلا $\mu = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ فرض می‌شود. اکنون مسئله به گونه‌ای حل می‌شود که از یافتن σ_n و h_n برای یافتن H_n مقیاس ضخامت لایه‌ها و R_n جذر نسبت‌های هدایت الکتریکی استفاده می‌شود. با ثابت نگه داشتن H_n برای مدل پیشرو، می‌توان $T_n(\omega)$ را محاسبه کرد و بر اساس آن، با عملیات ساده جبری معادله (3) را حل نمود. برای خطی شدن تابع پاسخ، لارسن [4] تابع پاسخ لگاریتمی را به صورت ذیل تعریف می‌کند:

$$L_{obs}(\omega) = \ln G_{obs}(\omega) \quad (8)$$

برای حل ساده‌تر از معادله (3) لگاریتم گرفته می‌شود تا رابطه خطی شود، یعنی: $L_n = \ln G_n$. با کمی روابط جبری خواهد شد:

$$L_n(\omega) = X_n + 2 \tanh \{E_n(\omega) \tanh [L_{n+1}(\omega) / 2]\} \quad (9)$$

$$X_n = 0.5 \ln(\sigma_{n-1} / \sigma_n) \quad (10)$$

$$E_n(\omega) = \exp[-2(-i\mu\sigma_0\omega)^{1/2} H_n] \quad (11)$$

$$L_N(\omega) = X_N \quad (12)$$

در سطح زمین پاسخ لگاریتمی $L_1(\omega)$ است که بر $L_{obs}(\omega)$ برازش می‌شود.

لارسن برای مدل لایه ای (کمتر از 10 لایه) برای حل H_n رابطه $H_n = H(1 + (n-1)u + (n-1)^2v^2)$ را پیشنهاد داده است و در آن $u, v = 0, 1, 2$ که H ، u و v با سعی و خطا به دست می‌آید.

یافتن چنین پارامترهایی به صورت سعی و خطا وقت گیر است و دقت کافی ندارد، بنابراین پیشنهاد می‌شود مدل با رابطه (13) حل شود:

$$H_n = H_1(n-1)^\alpha + H_1 \quad (13)$$

که در آن H_1 بستگی به باند فرکانس مورد استفاده کمترین مقدار ممکن است، مثلاً در روش آدیومگنتوتلوریک 5 متر در نظر گرفته می‌شود و $1.2 \leq \alpha \leq 2.2$ که اغلب با مقدار $\alpha = 1.5$ وارونسازی انجام می‌گیرد، نکته قابل توجه این است که هر چقدر مقدار α و H_1 کمتر باشد،

که $\psi_{nm} = 0$ و $\psi_{nm} = 1$ ، $n = 1, \dots, N$ که $n \neq m$ با قرار دادن وارون ماتریس $\bar{C}_{nm}^k = (B_{nm}^k + p\psi_{nm})^{-1}$ خواهد شد

$$X_n^{k+1} = \sum \bar{C}_{nm}^k [Y_m^k + pX_m^k] \quad (28)$$

مقدار فاکتور مهار $p \leq 0.01$ است و به حدی تغییر (معمولاً به صورت ضرب در 0/1) می‌کند که کمترین ناجورشدگی حاصل شود. تکرار آنقدر ادامه می‌یابد تا جایی که $|X_n^{k+1} - X_n^k| < 0.001$ شود. بعد از به دست آمدن X_n مطلوب (ضریب k جهت راحتی حذف شده است) برای حل پارامترهای مدل (ضخامت و هدایت الکتریکی لایه‌ها) می‌توان نوشت:

$$\sigma_n = \sigma_0 \exp[-2 \sum_{m=1}^n X_m] \quad (29)$$

for $n = 1, \dots, N - 1$

$$h_n = H_n \exp[\sum_{m=1}^n X_m] \quad (30)$$

for $n = 1, \dots, N - 1$

برای هموار کردن¹⁰ مدل معادلات کمی ساده‌تر می‌شود

$$\sum_{m=1}^N [B_{nm} + q\psi_{nm}] \bar{X}_{nm} = Y_n \quad (31)$$

که فاکتور مهار جدید $q < 0.1$ خواهد بود و $n = 1, \dots, N$ هر چقدر مقدار q کمتر باشد خطای برازش یا ناجورشدگی کمتر و جزئیات بیشتری در مدل مشاهده می‌شود اما در مورد داده‌ای با نویز زیاد به علت ایجاد لایه‌های دروغین، مقدار q نباید از 0/001 کمتر باشد، ولی برای داده‌های با نویز خیلی کم، حتی می‌توان برای مدل لایه‌ای (نه مدل پیوسته) مقدار $q=0$ قرار داد. معادله (31) شبیه معادله (27) است و با قرار دادن وارون ماتریس $\bar{C}_{nm} = (B_{nm} + q\psi_{nm})^{-1}$ به رابطه (32) تبدیل می‌شود.

$$\bar{X}_n = \sum_{m=1}^N \bar{C}_{nm} Y_m \quad (32)$$

for $n = 1, \dots, N$

سپس برای حل پارامترهای مدل (ضخامت و هدایت الکتریکی لایه‌ها) معادلات (29) و (30) استفاده می‌شود که در آن، \bar{X}_m جایگزین X_m می‌شود.

$$E_n^k(\omega) = \frac{[G_n^k(\omega)/R_n^k - R_n^k/G_n^k(\omega)]}{[G_{n+1}^k(\omega) - 1/G_{n+1}^k(\omega)]} \quad (20)$$

چنانچه قبلاً گفته شد مدل با یک نیم فضا⁹ آغاز می‌شود. بنابراین برای $N=1$

$$X_1 = (1/J) \sum L_{obs}(\omega_j) \quad (21)$$

با دانستن اینکس $X_1 = 0.5 \ln(\sigma_0/\sigma_1)$ و $L_{obs} = 0.5 \ln(\sigma_0/\sigma_a)$ پس از استفاده از معادله (9) می‌شود: $\sigma_1 = \sigma_0$

با قرار دادن $k=0$ مدل اولیه با هدایت الکتریکی σ_0 خواهد داشت: $X_n^0 = 0$ و $L_n^0(\omega) = 0$ برای $n = 1, \dots, N$ بنابراین $E_n^0(\omega)$ (معادله 20) با $E_n(\omega)$ (معادله 11) و $D_n^0(\omega)$ (معادله 19) با $D_n(\omega)$ (معادله 16) مساوی خواهد شد. معادله (18) هم به صورت خطی کاهش می‌یابد:

$$L_1^1(\omega) = \sum_{n=1}^N D_n(\omega) X_n^1 \quad (22)$$

حل مسئله وارون از طریق روش حداقل مربعات با کمینه کردن اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های محاسبه شده به دست می‌آید. بنابراین با تعریف تابع هدف \mathcal{E} به صورت زیر تعریف می‌شود

$$2\mathcal{E}^2 = (1/J) \sum_{j=1}^J \left| L_{obs}(\omega_j) - \sum_{n=1}^N D_n^k(\omega_j) X_n^{k+1} \right|^2 \quad (23)$$

با حل حداقل مربعات معادله (23) معادلات نرمال زیر بوجود می‌آید:

$$\sum_{m=1}^N B_{nm}^k X_m^{k+1} = Y_n^k \quad (24)$$

for $n = 1, \dots, N$

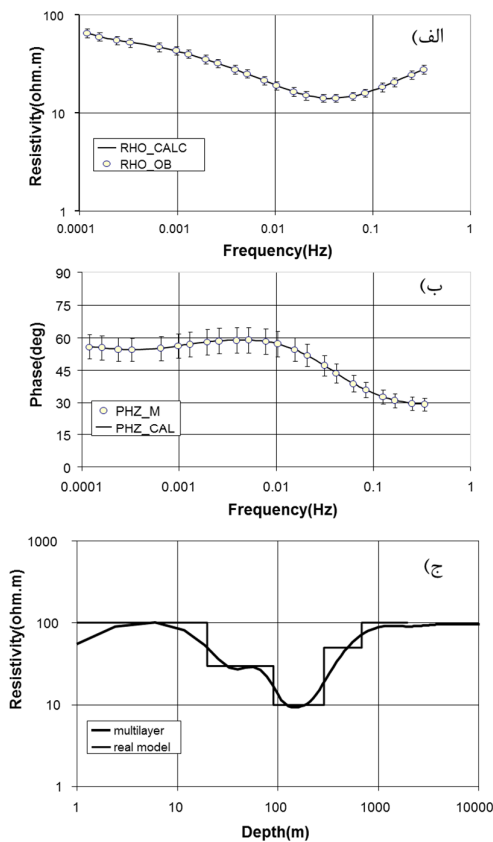
$$B_{nm}^k = (1/J) \text{Re} \sum_{j=1}^J D_n^k(\omega_j)^* D_m^k(\omega_j) \quad (25)$$

$$Y_n^k = (1/J) \text{Re} \sum_{j=1}^J D_n^k(\omega_j)^* L_0^k(\omega_j) \quad (26)$$

علامت ستاره نشان از مزدوج عدد مختلط است. مقدار X_n^{k+1} با حل ماتریسی معادله (24) حاصل می‌شود و برای حل باید از فاکتور مهار p استفاده شود، بنابراین:

$$\sum_{m=1}^N (B_{nm}^k + p\psi_{nm}) X_m^{k+1} = Y_n^k + pX_n^k \quad (27)$$

شکل وارونسازی شده آن با مقدار $q = 0.0001$ بسیار شبیه به مدل واقعی است اما در لایه نازک هادی مقداری خطا دیده می‌شود، مدلی دیگر با مقدار $q = 0.01$ وارونسازی شده که هموار است و لایه نازک هادی را بسیار ضعیف نشان داده و مقاومت ویژه نیم فضا کمتر از مقدار واقعی است. به هر حال وارونسازی مدل اولیه با نیم فضای با مقاومت 15 اهم متر شروع شده است، خطای برازش یا ناجورشدگی در مدل با $q = 0.0001$ ، $\varepsilon_1 = 0.0804$ ، با $q = 0.01$ مقدار ناجورشدگی $\varepsilon_2 = 0.144$ بوده و سایر پارامترها شبیه مدل اول است (شکل 3).



شکل 2: وارونسازی یک بعدی از داده‌های مدل اول، الف) منحنی مقاومت ویژه، ب) منحنی فاز (مقدار خطا 10٪) و ج) مدل وارونسازی شده در حالت پیوسته (خطوط انحنای دار) و شکل اصلی مدل (خطوط شکسته)؛ خطای برازش $\varepsilon = 1.24 \times 10^{-3}$ است.

4- داده‌های واقعی

لارسن [4] جهت اطمینان از مدل به دست آمده از نوعی توابع پیچیده با نام کرنل یا هسته استفاده کرده است که اطمینان دهد مقاومت الکتریکی آخرین لایه دقیقاً چه اندازه می‌تواند باشد. استفاده از این توابع بسیار پیچیده و وقت‌گیر بوده و حتی در برخی موارد اطمینان لازم را هم نمی‌دهد [4]. برای رفع این مشکل از مدل پیوسته لایه‌ای با بیش از 100 لایه استفاده شده است و دیگر نیازی به توابع کرنل نیست. بعد از مدل پیوسته می‌توان بهترین مدل لایه‌ای (کمتر از 10 لایه) که بیشترین شباهت را به مدل پیوسته دارد، به دست آورد (شکل 5). برای به دست آوردن مقدار ناجورشدگی از تابع دیگری هم می‌توان استفاده کرد:

$$\varepsilon = \text{SQRT} \left\{ (1/2J) \sum_{j=1}^J \left[\left(\frac{\rho_j^{obs} - \rho_j^{cal}}{\delta_\rho} \right)^2 + \left(\frac{\varphi_j^{obs} - \varphi_j^{cal}}{\delta_\varphi} \right)^2 \right] \right\} \quad (33)$$

که در آن ρ^{cal} و ρ^{obs} بترتیب مقاومت ویژه مشاهده شده و مقاومت ویژه حل شده از مدل پیوسته، φ^{cal} و φ^{obs} به ترتیب مقدار فاز داده‌ها و فاز محاسبه شده از مدل پیوسته و مقادیر δ_ρ و δ_φ مقدار خطای داده‌های مقاومت ویژه و فاز است.

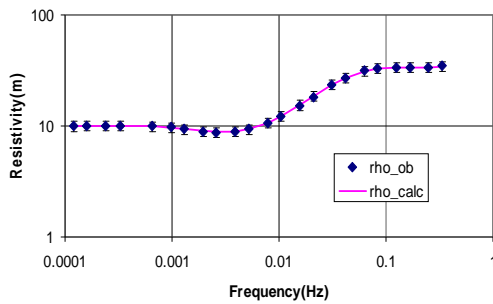
در این راستا برنامه‌ای به زبان فرترن 90 با نام $L_ID_Inversion$ نوشته شده است که داده‌های ورودی را با فرمت خاص دریافت کرده و با وارد کردن پارامترهای مدل مانند تعداد لایه‌ها، مقاومت نیم فضای مدل اولیه و ...، داده‌ها را وارونسازی می‌کند. الگوریتم حاصله در مورد داده‌های مصنوعی و واقعی بررسی شده است که در ادامه به تشریح آنها پرداخته خواهد شد.

3- داده‌های مصنوعی

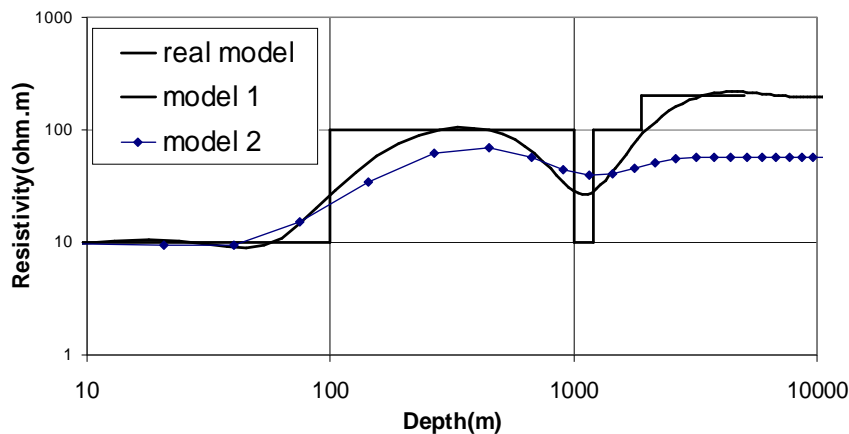
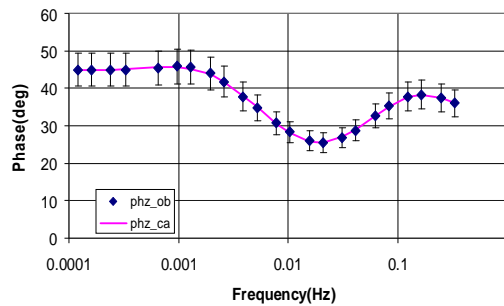
مورد اول یک مدل 5 لایه‌ای است، شکل مدل ساده بوده و برای حل آن با تعداد لایه 150 لایه و مقاومت ویژه نیم فضای 27 اهم متر شروع می‌شود. پس از دو بار تکرار با پارامترهای $q = 0.001$ ، $\alpha = 1.5$ و $H_1 = 5$ ، مقدار ناجورشدگی $\varepsilon = 1.24 \times 10^{-3}$ حاصل شده و خطای داده‌ها 10٪ در نظر گرفته شده است (شکل 2).

مورد دوم دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به مدل اولیه و شامل 5 لایه است که یک لایه نازک با ضخامت و مقاومت ویژه کم، در عمق دارد. هدف از ایجاد این مدل با این لایه نازک هادی، تعیین حساسیت روش پیوسته است.

ضخامت کم (نسبت به آن عمق) و مقاومت تقریباً 50 اهم متر تشخیص داده شده است اما در روش اُکام چنین لایه‌ای با مقاومت ویژه 245 اهم متر به زحمت دیده می‌شود (شکل 4). لازم به ذکر است که در این داده‌ها مدل لایه‌ای مناسب با مدل پیوسته یافت نشد و بیشترین اشکال در مقاومت ویژه لایه آخر بوده که مقاومتی کمتر از 50 اهم متر داشته است.



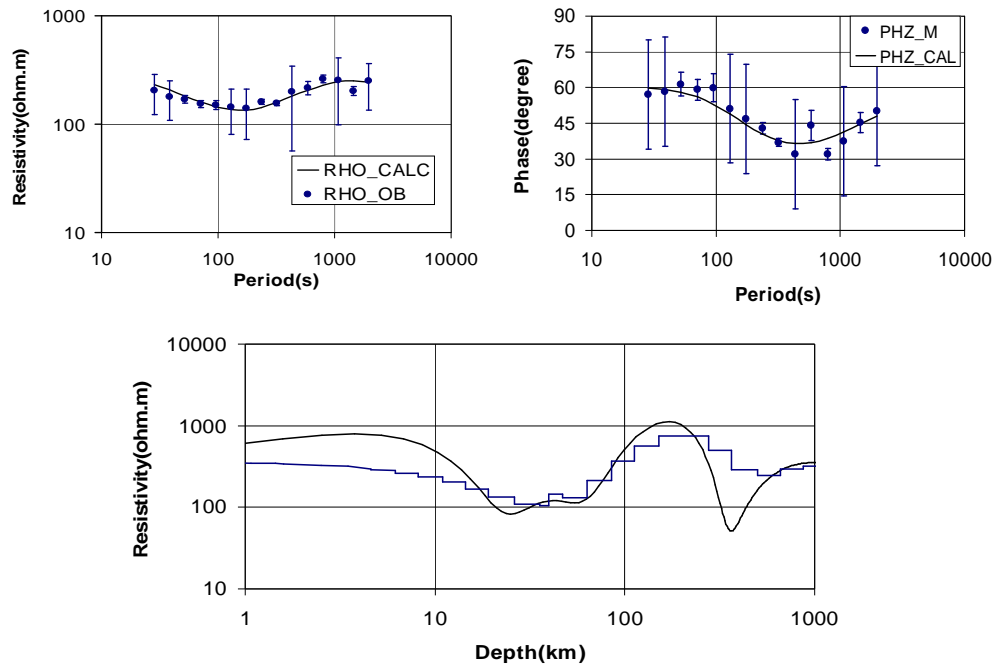
مدل اول داده‌های کاپراد¹¹ از کانستیبیل و همکاران [7] گرفته شده است. مقدار نویز در این مدل زیاد است. وارونسازی با مدل اولیه با مقاومت ویژه 186 اهم متر و تعداد 150 لایه شروع شده و با دو بار تکرار به نتیجه مطلوب رسیده است. مقدار ناجورشدگی $\varepsilon = 0.244$ و $\alpha = 1.5$ ، $q = 0.001$ است (شکل 4). روش اُکام بدلیل هموار بودن بعضی از جزئیات را بخوبی نشان نمی‌دهد، به ویژه در عمق 370 کیلومتری لایه‌ای با



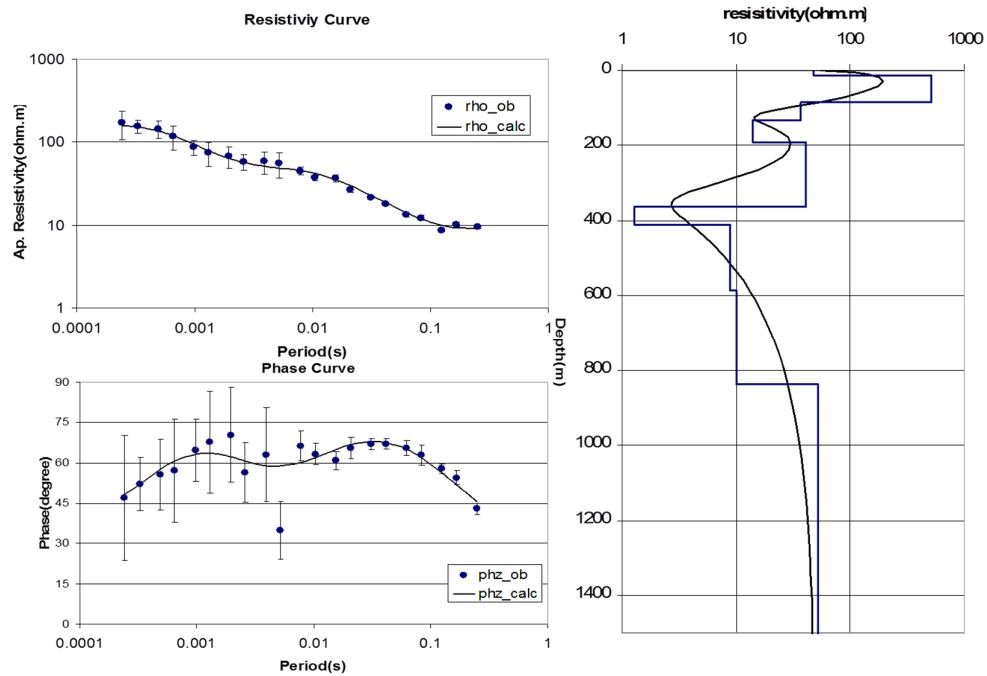
شکل 3: وارونسازی یک بعدی از داده‌های مدل دوم، شکل بالا سمت چپ منحنی مقاومت ویژه، شکل بالا سمت راست منحنی فاز (مقدار خط 10٪) و شکل پایین وارونسازی شده در حالت پیوسته مدل 1 (خطوط انحنای دار) با $q = 0.0001$ ، مدل 2 با $q = 0.01$ (خطوط انحنای دار نقطه‌ای) و شکل اصلی مدل (خطوط شکسته)؛ خطای برازش در مدل 1 $\varepsilon_1 = 0.0804$ و در مدل 2 $\varepsilon_2 = 0.144$ است، توضیحات بیشتر در متن وجود دارد.

سایر پارامترها $q = 0.001$ ، $\alpha = 1.5$ و $H_1 = 5$ است. در این مدل، لایه پوش سنگ مخزن زمین‌گرمایی (سقف مخزن) با مقاومت ویژه کمتر از 5 اهم متر در عمق حدوداً 400 متری مشاهده می‌شود و قسمت‌های عمیق‌تر مربوط به خود مخزن با دمای حدوداً 250 درجه سانتیگراد است. در این ایستگاه بهترین مدل لایه‌ای با 10 لایه و $q = 0$ ، $\alpha = 1.5$ و $H_1 = 50$ با سعی و خطا حاصل شده است (شکل 5).

مدل دیگر از داده‌های مگنتوتلوریک سبلان در شمال غرب ایران گرفته شده که جهت اکتشاف ذخایر زمین‌گرمایی آن منطقه برداشت شده است [10]. داده‌ای وارون شده، دترمینان امیدانس¹ است. دترمینان امیدانس یک تابع تبدیل است که داده‌ها را یک بعدی می‌کند (تئوری این روش بطور مفصل توسط پدرسن و همکاران [11] ارائه شده است). وارونسازی با مقاومت نیم فضای 39 اهم متر با 150 لایه شروع شده و خطای برازش آن $\varepsilon = 0.17$ است.



شکل 4: وارونسازی یک بعدی از داده‌های کاپراد [7]، شکل بالا سمت چپ منحنی مقاومت ویژه، شکل بالا سمت راست منحنی فاز و شکل پایین وارونسازی شده در حالت پیوسته (خطوط انحنا دار) و مدل آکام (خطوط شکسته) است؛ خطای برازش $\varepsilon = 0.244$ به دست آمده است.



شکل 5: وارونسازی یک بعدی از ایستگاه S102 سبلان [10]، شکل بالا سمت چپ منحنی مقاومت ویژه، شکل پایین سمت چپ منحنی فاز و شکل سمت راست مدل وارونسازی شده در حالت پیوسته (خطوط انحنا دار) و حالت لایه ای (خطوط شکسته)؛ خطای برازش $\varepsilon = 0.17$ است.

dimensional magnetotelluric data. Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Earth and Planetary Sciences, 105, 413- 429.

[9] Niwas, S., Gupta, P. K., & Gaur, V. K. (2007). Straightforward inversion of MT data using a normalized impedance function. *Geophysics*, 72(1), F19-F24.

[10] Ghalehnoee. M. H., & Arousmahaleh. F. G. (2012). Magnetotelluric soundings in the Sabalan geothermal area, Iran. *Indian Journal of Geosciences*, 66(1), 39-48.

[11] Pedersen, L. B. (2004). Determination of the regularization level of truncated singular-value decomposition inversion: The case of 1D, inversion of MT data. *Geophys. Prospect.*, 52, 261-270.

5- نتیجه‌گیری

روش ارائه شده حالت ساده شده و کاربردی‌تری از مدل لارسن بوده که برای وارونسازی یک‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک استفاده می‌شود و تابع پاسخ به صورت لگاریتمی و بدون بعد است، همچنین این الگوریتم خطی بوده و مشتقات جزئی تابع پاسخ بدون تخمین به صورت ساده حل می‌شوند.

برای حل مقیاس عمق لایه‌ها از فرمول کاربردی‌تر جدیدی استفاده شده است که پارامترهای آن ساده‌تر و با اطمینان بیشتری به دست می‌آیند. تعداد لایه‌ها در این روش بیشتر از 100 لایه انتخاب می‌شود. در نهایت نیازی به حل توابع کرنل که پیچیدگی زیادی دارد و سرعت عمل را کند می‌کند، نیست.

این روش با تعدادی از داده‌های مصنوعی و واقعی مورد آزمایش قرار گرفت و می‌توان نتیجه گرفت که روش مورد بحث روشی جامع و کامل برای وارونسازی داده‌های یک بعدی مگنتوتلوریک است.

6- مراجع

[1] Weidelt, P. (1972). The inverse problem of Geomagnetic Induction. *Zeitschrift für Geophysik*, 38, 257-289.

[2] Parker, R. L. (1980). The inverse problem of electromagnetic induction: existence and construction of solutions based on incomplete data. *J. Geophys. Res.*, 85, 4421- 4428.

[3] Fischer, G., Schnegg, P. A., Peguiron, M., & Le Quang, B. V. (1981). An analytic one-dimensional inversion scheme. *Geophys. j. R. astr. Soc.*, 67, 257-278.

[4] Larsen, J. C. (1981). A new technique for layered earth magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 46(1), 1247- 1257.

[5] Whittall, K. P., & Oldenburg, D. W. (1986). Inversion of Magnetotelluric data using practical inverse scattering formulation. *Geophysics*, 51, 383-395.

[6] Srnka, L. J., & Crutchfield, W. Y. (1987). Riccati inversion of magnetotelluric data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 91, 211-228.

[7] Constable, C. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300.

[8] Gupta, P. K., Niwas, S., & Gaur, V. K. (1996). Straightforward inversion scheme (SIS) for one-

-
- 1- Skin depth
 - 2- Scattering theory
 - 3- Riccati method
 - 4- Smooth
 - 5- Forward model
 - 6- Wait
 - 7- Conductivity contrast
 - 8- Chain
 - 9- Half-space
 - 10- Smoothing
 - 11- Coprod data
 - 12- Impedance determinant

One-Dimensional Magnetotelluric Inversion Based on Larsen's Algorithm

M. Ghalehnoee^{1*}, P. Pourghahremani²

1- MSc. of Mining Engineering, Dept. of Mining, Sahand University of Technology, Iran

2- Assistant Professor, Dept. of Mining, Sahand University of Technology, Iran

* Corresponding Author: mhghalehnoee@gmail.com

(Received: November 2013, Accepted: October 2015)

Abstract

Final model of one-dimensional magnetotelluric inversion should be consistent with geology of the region. In most sharp 1D inversion, final model is not consistent with the geology especially in the last layer. Smooth inversion such as Occam's method often are very smooth that the thin layers are masked or difficult to model. There is uncertainty in the Larsen's algorithm (1981), such as sharp algorithms especially the last layers. So Larsen used kernel function to overcome this problem. In the present method, the Larsen's algorithm has been used while there are multiple layers, usually more than 10. In our method, solving kernel functions are not necessary and the depth scale is selected automatically. Finally, the method has been performed on some artificial and real data successfully.

Keywords

Response Function, Magnetotelluric, Kernel Function, Scaled-Layer Thickness, Impedance Determination, Misfit

Cite This Paper:

Ghalehnoee, M., Pourghahremani, P. (2015). "One-Dimensional Magnetotelluric Inversion Based on Larsen's Algorithm." *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 5(9): 31-38. [http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940913-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940913-X)