JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی

دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷، صفحات ۲۵۰-۲۳۷
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JRAG.2017.5822.1125

اعتبارسنجی مدل وارون داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از ماتریس وضوح مدل، ماتریس وضوح داده و کوواریانس واحد

محمد شاهی فردوس[1]، رسول حمیدزاده مقدم[2] و راشد پورمیرزائی[3*]

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوس
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۳- استادیار، گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۹

* نویسنده مسئول مکاتبات: **rashed.poormirzaee@gmail.com**

چکیده

در مطالعه حاضر یک روش اعتبارسنجی مبتنی بر ماتریس وضوح مدل، ماتریس وضوح داده و کوواریانس واحد برای مدل ژئوفیزیکی مقاومت ویژه ارائه شده است. در این مطالعه وارون‌سازی داده‌ها با استفاده از روش وارون تعمیم‌یافته انجام گرفت. همچنین برای به دست آوردن داده‌های محاسباتی از روش تفاضل محدود استفاده شد. روش پیشنهاد شده پس از کد نویسی در محیط متلب، به وسیله یک مدل مصنوعی دارای نوفه مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس برای پردازش داده‌های واقعی استفاده شد. داده‌های واقعی در محدوده اندیس معدنی همیج واقع در شهرستان بیرجند، با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی و با کمترین فاصله الکترودی ۲۰ متر در جهت شمال- جنوب برداشت شد. در ادامه اعتبار سنجی مدل به دست آمده برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از ماتریس وضوح داده، ماتریس وضوح مدل و ماتریس کوواریانس واحد انجام شد. نتایج حاصل از ماتریس وضوح داده و ماتریس وضوح مدل نشان می‌دهند که روش وارون تعمیم‌یافته برای مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه محدوده همیج به‌خوبی عمل کرده و مدل ارائه‌شده دارای صحت بالایی است. همچنین نتایج حاصل از ماتریس کوواریانس واحد نشان می‌دهد برخی از پارامترهای مدل دارای دقت پایین‌تری می‌باشند؛ که در تفسیر نتایج باید به آن‌ها توجه شود. در پایان داده‌های اندیس همیج با استفاده از نرم‌افزار Res2dinv نیز پردازش شد و خروجی نرم‌افزار با نتایج به دست آمده از روش پیشنهاد شده در این مطالعه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از سه ماتریس به کار برده شده برای اعتبار سنجی و یافتن بهترین پارامترهای مدل از عملکرد مناسبی برخوردار است.

واژگان کلیدی

ماتریس وضوح داده
ماتریس وضوح مدل
ماتریس کوواریانس واحد
وارون تعمیم‌یافته
تفاضل محدود
مقاومت ویژه

۱- مقدمه

روش مقاومت ویژه جهت اکتشافات ژئوفیزیکی از دهه‌های قبل به طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است. سادگی تجهیزات، هزینه پایین بررسی و فراوانی روش‌های تفسیر موجب محبوبیت این روش شده است (McGillivray, 1992). روش مقاومت ویژه به‌صورت گسترده در تشخیص و مطالعه آب‌های زیرزمینی و آلودگی‌ها (Klefstad et al., 1997 ؛ Urish, 1983؛ ناصری و همکاران، ۱۳۹۰)، ارزیابی منابع آب زیرزمینی و ارزیابی کمی پارامترهای آبخوان (Kosinski et al., 1981)، در برنامه‌های باستان‌شناسی و مطالعات ساختگاهی (Clark, 1986) و در اکتشافات کانی‌های فلزی (Ramazi and Mostafaie, 2013) مورد استفاده قرار گرفته است.

در گذشته از روش‌های شباهتی برای تفسیر داده‌های مقاومت ویژه استفاده می‌شد؛ که این روش بیشتر در مورد ساختارهای زمین‌شناسی ساده کاربرد داشت. با پیشرفت سریع علوم کامپیوتر و ظهور الگوریتم‌های جدید، تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده نیز آسان شد و روش‌هایی در مورد تفسیر داده‌های مقاومت ویژه توسعه پیدا کرد که یکی از آن‌ها روش وارون‌سازی است (Inman and Stanley, 1973).

در سال‌های گذشته، کار بر روی وارون سازی یک‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی توسط Pekeris (1940) و (1967) Argelo و Inman and Stanley (1973) انجام شده است. همچنین می‌توان به مطالعات Smith and Vozoff (1984) و Tripp et al. (1984) و Tong and Yang (1990) و Narayan et al. (1994) و Hayley et al. (2011) در مورد وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه اشاره کرد.

در این مطالعه سعی بر آن است تا با استفاده از روش وارون تعمیم‌یافته، مدل دوبعدی مقاومت ویژه حقیقی زمین ارائه شود و سپس اعتبار این مدل با استفاده از ماتریس وضوح داده و ماتریس وضوح مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. با روش پیشنهاد شده در این مطالعه می‌توان بخش‌هایی از مدل با خطای زیاد را شناسایی نمود. این روش جدید با نام ماتریس کوواریانس واحد خوانده می‌شود. استفاده از ماتریس وضوح مدل در اعتبارسنجی مدل وارون مرسوم است؛ اما کمتر به ماتریس کوورایانس واحد و ویژگی‌های آن توجه شده است. در این مقاله سعی می‌شود به ماتریس کوواریانس واحد در اعتبارسنجی مدل وارون پرداخته شود.

۱-۱- روش وارون تعمیم‌یافته

روش‌های خطی، معمولاً برای حل مسائل وارون غیرخطی به کار برده می‌شوند که گام ابتدایی آن، ساختن یک رابطه بین تغییرات پارامترهای مدل و داده‌ها است. به بیان کمی، این رابطه نشان می‌دهد چگونه تغییر در مدل، داده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای یافتن این رابطه می‌توان از معادله ۱ استفاده کرد.

$$d_i^{obs} = F(m_j), j = 1, 2, \ldots, m, i = 1, 2 \ldots, n \tag{۱}$$

در این رابطه، d داده‌ی مشاهده‌ای، m پارامتر مدل، i و j به ترتیب تعداد داده‌ها و پارامترهای مدل هستند. همچنین F(m) بیانگر ارتباط بین داده‌ها و پارامترهای مدل است. با بسط سری تیلور برای معادله ۱ حول پارامتر مدل، در نهایت معادله ۲ حاصل می‌شود.

$$\Delta d_i = G \Delta m_j \tag{۲}$$

که در این معادله Δd اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی، G ماتریس ژاکوبین و Δm تغییرات بین پارامترهای مدل در دو تکرار متوالی را نشان می‌دهد (McGillivray and Oldenburg, 1990). منظور از تکرار، آن است که با حل هر بار مسئله وارون، تغییرات بین پارامترهای مدل حاصل می‌شود و سپس پارامترهای مدل در تکرارهای بعدی با استفاده از معادله ۳ بهبود می‌یابند.

$$m_{r+1} = m_r + \Delta m_r \tag{۳}$$

در معادله ۳، m_{r+1} پارامتر مدل در تکرار r+1، m_r پارامتر مدل در تکرار r و Δm_r تغییرات بین پارامترهای مدل است که با حل مسئله وارون حاصل می‌شود. گفتنی است، بیشتر روش‌های تکرار شونده سعی در کمینه کردن تابع هدف یعنی معادله ۴ را دارند.

$$\varnothing_d = \sum_i^m \left(\frac{F(m)_i - d_i}{\sigma_i}\right)^2 \tag{۴}$$

در معادله ۴، σ انحراف معیار اختلاف داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی است (Friedel, 2003).

بر اساس روش وارون تعمیم‌یافته، به‌منظور یافتن پارامترهای مدل کافی است ماتریس وارون تعمیم‌یافته (G^{-g}) را در اختلاف داده‌ها مشاهده‌ای و محاسباتی (Δd) ضرب نماییم (Menke, 2012). گفتنی است داده‌های محاسباتی از روش مستقیم محاسبه می‌شوند.

$$\Delta m_{est} = G^{(-g)} \Delta d \tag{۵}$$

Δm افزایش جزئی در پارامترهای مدل است. به‌منظور محاسبه ماتریس وارون‌تعمیم‌یافته باید ماتریس ژاکوبین را تعیین نمود که با استفاده از معادله ۶ محاسبه می‌شود.

$$G_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \tag{۶}$$

در معادله ۶، ∂d_i تغییر در داده و ∂m_j تغییر در پارامتر مدل که به ترتیب سطر و ستون یک ماتریس را نشان می‌دهد و G ماتریس ژاکوبین است. برای محاسبه ماتریس وارون تعمیم‌یافته به کمک ماتریس ژاکوبین می‌توان به‌صورت ذیل عمل کرد. بنابر قانون

ماتریس‌ها، هر ماتریس را می‌توان به‌صورت حاصل‌ضرب چند ماتریس دیگر نوشت. در معادله ۷ این کار برای ماتریس ژاکوبین مربعی انجام شده است.

$$G^T G = \left[V \Lambda_m V^T\right] \tag{۷}$$

در این رابطه، G ماتریس ژاکوبین، G^T ترانهاده ماتریس ژاکوبین، V بردار ویژه ماتریس $G^T G$ با ابعاد g*g (g تعداد پارامترهای مدل) و Λ_m مقدار ویژه همراه با آن است. همچنین بنا بر قانون ماتریس‌ها داریم:

$$G G^T = \left[U \Lambda_n U^T\right] \tag{۸}$$

که در این رابطه U بردار ویژه ماتریس $G^T G$ با ابعاد n*n (n تعداد داده‌ها) و Λ_n مقدار ویژه همراه با آن است. اگر معکوس ماتریس $G^T G$ با استفاده از معادله ۷ محاسبه شود؛ خواهیم داشت:

$$\left[G G^T\right]^{-1} = \left[V^T\right]^{-1} \left[\Lambda_m\right]^{-1} V^{-1} \tag{۹}$$

در این رابطه، V^{-1} معکوس بردار ویژه $G^T G$ است. از آنجا که V^T با V و همچنین V^{-1} با V^T برابر است؛ معادله ۹ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد (Lay and Wallace, 1995):

$$\left[G G^T\right]^{-1} = V \left[\Lambda_m\right]^{-1} V^T \tag{۱۰}$$

در نهایت وارون تعمیم‌یافته را می‌توان به شکل معادله ۱۱ ارائه کرد (Lay and Wallace, 1995):

$$G^{-g} = V \Lambda_m^{-1} U^T \tag{۱۱}$$

که در آن، G^{-g} وارون تعمیم‌یافته، V بردار ویژه ماتریس $G^T G$، U^T ترانهاده بردار ویژه ماتریس $G G^T$ و Λ^{-1} به صورت معادله ۱۲ تعریف می‌شود (Inman and Stanley, 1973؛ Lay and Wallace, 1995).

$$\Lambda^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\lambda_m} \end{bmatrix} \tag{۱۲}$$

در این معادله، λ مقادیر تکین است؛ که باید از بزرگ به کوچک در ماتریس فوق قرار گیرد ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_m \geq 0$).

همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به معادله ۱۱ رابطه‌ای برای یافتن وارون تعمیم‌یافته (G^{-g}) ارائه شد؛ که با داشتن ماتریس ژاکوبین (G) به راحتی می‌توان آن را محاسبه نمود (Lay and Wallace, 1995). یکی از ویژگی‌های روش حل مسئله وارون به کمک روش وارون تعمیم‌یافته، اعتبارسنجی مدل با استفاده از ماتریس وضوح مدل و ماتریس وضوح داده است. همچنین از ویژگی‌های آن، تعیین واریانس تخمین پارامترهای مدل است؛ که این کار با استفاده از ماتریس کوواریانس واحد انجام می‌شود. در ادامه به بررسی این سه ماتریس پرداخته شده است.

ماتریس وضوح داده‌ها را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$d^{pre} = N d^{obs} \tag{۱۳}$$

در معادله ۱۳، d^{pre} داده‌های پیش‌بینی‌شده و d^{obs} داده‌های مشاهده‌ای است. ماتریس N یک ماتریس مربعی با ابعاد n*n (n تعداد داده) است؛ که ماتریس وضوح داده نامیده می‌شود. اگر N=I باشد، پس برابر $d^{pre} d^{obs}$ بوده و خطای پیش‌بینی صفر خواهد شد (Menke, 2012).

ماتریس وضوح داده به راحتی با استفاده از ماتریس ژاکوبین قابل محاسبه است؛ که در معادله ۱۴ آورده شده است.

$$N = U U^T \tag{۱۴}$$

در این رابطه، U بردار ویژه ماتریس $G^T G$ با ابعاد n*n است (Lay and Wallace, 1995). ماتریس وضوح مدل با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$m^{est} = R\, m^{tru} \tag{۱۵}$$

در معادله ۱۵، m^{est} بیانگر پارامتر مدل تخمینی و m^{tru} بیانگر پارامتر مدل واقعی است.

در اینجا R یک ماتریس مربعی با ابعاد g*g (g تعداد پارامترهای مدل) است و ماتریس وضوح مدل نامیده می‌شود. اگر R=I باشد یعنی تمام پارامترهای مدل به‌درستی تعیین شده است (Menke, 2012). ماتریس وضوح مدل با استفاده از ماتریس ژاکوبین قابل محاسبه است؛ که در معادله ۱۶ نشان داده شده است.

$$R = V V^T \tag{۱۶}$$

در رابطه پیشین، V بردار ویژه ماتریس $G^T G$ با ابعاد g*g است (Lay and Wallace, 1995).

ماتریس کوواریانس واحد پارامترهای مدل به کوواریانس داده‌ها و چگونگی انتخاب ماتریس وارون تعمیم‌یافته بستگی دارد. اگر فرض شود داده‌ها مستقل و دارای واریانس σ^2 هستند، ماتریس کوواریانس واحد به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$C = G^{-g} G^{-gT} \tag{۱۷}$$

در معادله ۱۷، G^{-g} ماتریس وارون تعمیم‌یافته است (Menke, 2012). با در دست داشتن ماتریس ژاکوبینن به راحتی می‌توان

ماتریس کوواریانس واحد را از معادله ۱۸ به دست آورد.

$$C = V\Lambda^{-2}V^{T} \qquad (۱۸)$$

در معادله فوق، C ماتریس کوواریانس واحد، V بردار ویژه ماتریس $G^{T}G$، V^{T} ترانهاده ماتریس V و Λ^{-2} عکس توان دوم مقدار ویژه مربوط به بردار ویژه V و G ماتریس ژاکوبین است (Lay and Wallace, 1995). ماتریس C نشان می‌دهد کدام یک از پارامترهای مدل دارای خطای بیشتری بوده و باید با دقت از آن در تفسیر استفاده نمود.

۲-۱- روش حل مسئله مستقیم

هدف از حل مسئله مستقیم در کاوش‌های الکتریکی، محاسبه مقاومت ویژه ظاهری با یک آرایش الکترودی داده‌شده برای ساختار زیرسطحی است (Smith and Vozoff, 1984). در حال حاضر روش‌های متعددی برای حل عددی مسائل مستقیم مقاومت ویژه وجود دارد؛ که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش المان محدود و تفاضل محدود اشاره کرد (Jang et al., 2011).

اولین گام برای حل عددی یک مسئله مستقیم، تشریح کامل معادله دیفرانسیل حاکم و شرایط مرزی آن است. برای یک مدل دوبعدی زمین که در آن رسانایی به صورت $\sigma = \sigma(x,z)$ است، معادله حاکم برای پتانسیل الکتریکی، از یک نقطه منبع تزریق با شدت جریان I که در نقطه $(x_s, 0, z_s)$ بر روی سطح واقع شده است؛ به صورت معادله ۱۹ است.

$$-\nabla.\left(\sigma(x,z)\nabla\varphi(x,,y,z)\right) = I\,\delta(x-x_s)\delta(z-z_s) \qquad (۱۹)$$

که در معادله ۱۹، δ تابع دلتای دایرکت است. برای حذف متغیر y از عبارت پتانسیل و جریان، معادله ۱۹ نسبت به متغیر y به فضای فوریه انتقال داده می‌شود؛ که معادله ۱۹ به معادله ۲۰ تبدیل می‌شود(Dey and Morrison, 1979) .

$$-\nabla.(\sigma(x,z)\nabla\tilde{\varphi}(x,,k,z)) + k^{2}\sigma(x,z)\tilde{\varphi}(x,k,z) = I/(2\Delta A)\delta(x-x_s)\delta(z-z_s) \qquad (۲۰)$$

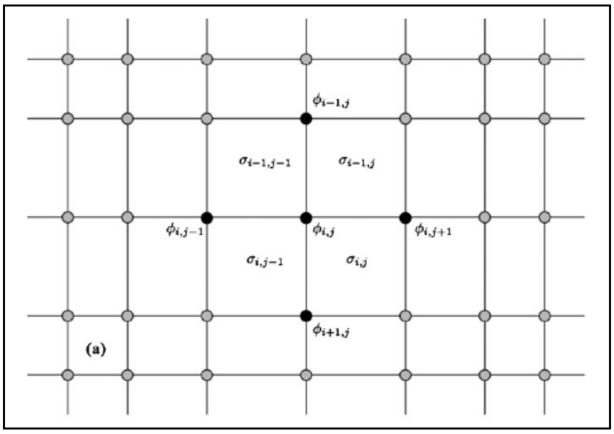
در این معادله، $\tilde{\varphi}$ پتانسیل در فضای فوریه، k عدد موج در فضای فوریه، δ تابع دلتای دایرکت، σ رسانایی، I شدت جریان تزریقی در سطح و ΔA مساحت سلولی که الکترود سطحی بر روی آن قرار می‌گیرد، می‌باشند.

گفتنی است برای محاسبه عدد موج بهینه می‌توان از روش ژئو استفاده کرد (Xu et al., 2000)؛ که در این مقاله نیز از همین روش استفاده شد. پس از حل معادله ۲۰ به روش تفاضل محدود، پتانسیل در فضای فوریه حاصل می‌شود؛ که با انجام عکس تبدیل فوریه می‌توان آن را به فضای حقیقی انتقال داد؛ که با استفاده از آن مقاومت ویژه ظاهری قابل محاسبه است (Dey and Morrison, 1979).

در روش تفاضل محدود، ابتدا مدل مقاومت ویژه حقیقی به صورت چندین مستطیل شبکه‌بندی می‌شود؛ که در آن پتانسیل در فضای فوریه بر روی گره‌ها و رسانایی در مرکز هر بلوک تعریف می‌شود (شکل ۱). با به کارگیری روش تفاضل محدود بر روی معادله ۲۰، معادله گسسته شده آن برای هر گره به صورت معادله ۲۱ حاصل می‌شود.

$$C_L^{ij}\tilde{\varphi}_{i,j-1} + C_R^{ij}\tilde{\varphi}_{i,j+1} + C_T^{ij}\tilde{\varphi}_{i-1,j} + C_B^{ij}\tilde{\varphi}_{i+1,j} + C_P^{ij}\tilde{\varphi}_{i,j} = s \qquad (۲۱)$$

که در اینجا C_B^{ij}، C_T^{ij}، C_R^{ij}، C_L^{ij} به ترتیب (Coupling Coefficient) برای گره‌های چپ (i,j-1)، راست (i,j+1)، بالا (i-1,j) و پایین (i+1,j) تعریف می‌شود. C_P^{ij} (Self- Coupling Coefficient) برای گره (i,j) است و S منبع تزریقی نامیده می‌شود؛ که مقدار آن برابر با نصف شدت جریان تزریقی است. برای جزئیات بیشتر می‌توان به مقالات Dey and Morrison, (1979) و Vachiratienchai et al., (2010) اشاره کرد.



شکل ۱: قسمتی از شبکه‌بندی مدل مقاومت حقیقی برای انجام روش تفاضل محدود (Vachiratienchai et al., 2010).

در حالت کلی برای حل مسئله مستقیم مقاومت ویژه، از شرایط مرزی نیومن، دیریکله و مرکب استفاده می‌شود (McGillivray, 1992). از آنجا که هیچ جریانی از سطح زمین عبور نمی‌کند، می‌توان برای فاصله بین زمین و هوا شرایط مرزی نیومن را بکار برد. این شرایط به صورت معادله ۲۲ نشان داده می‌شود:

$$\frac{\partial\tilde{\varphi}}{\partial n} = 0 \qquad (۲۲)$$

که در این معادله n بردار نرمال خارجی و $\tilde{\varphi}$ پتانسیل در فضای فوریه است (Dey and Morrison, 1979).

برای مرزهای جانبی و پایین ناحیه در بی‌نهایت می توان شرایط مرزی نیومن و دیریکله را بکار برد. البته از آنجا که شرایط مرزی

نیومن و دیریکله باعث ناپایداری حل معادله می‌شود؛ پیشنهاد می‌شود از شرایط مرزی مرکب برای این مرزها استفاده شود (Li, and Spitzer, 2005). شرایط مرزی مرکب به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha = k\frac{K_1(k,r)}{K_0(k,r)}.\cos\theta \qquad (۲۳)$$

در این معادله، k عدد موج، K_0 و K_1 به ترتیب تابع بسل اصلاح‌شده نوع اول مرتبه صفر و مرتبه یک می‌باشند. θ زاویه بین فاصله شعاعی بردار نرمال خروجی با بردار متصل‌کننده نقطه منبع و گره در مرز است (McGillivray, 1992).

۱-۳- ماتریس ژاکوبین

ماتریس ژاکوبین که با نام‌های ماتریس حساسیت و ماتریس ثابت هم خوانده می‌شود، برای وارون‌سازی غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماتریس به تغییرات داده نسبت به پارامتر مدل دلالت دارد (Boonchaisuk et al., 2008). در مورد مسائل مقاومت ویژه، ماتریس ژاکوبین به‌صورت تغییرات مقاومت ویژه ظاهری به تغییرات مقاومت ویژه در نظر گرفته می‌شود.

یک راه ساده برای محاسبه ماتریس ژاکوبین، استفاده از رابطه‌ی عددی پیشرو است. بر اساس این رابطه می‌توان ماتریس ژاکوبین را به‌صورت زیر محاسبه نمود.

$$G_{ij} = \frac{\partial d_i(\mathrm{m})}{\partial \mathrm{m}_j} = \frac{\mathrm{d_i}(\mathrm{m}+\Delta\mathrm{m_k}) - \mathrm{d_i}(\mathrm{m})}{\Delta\mathrm{m_j}} \qquad (۲۴)$$

عبارت Perturbation به این خاطر به این روش اطلاق می‌شود که هر بار یک افزایش جزئی به اندازه Δm_j در پارامترهای مدل ایجاد می‌شود. این روش مستلزم چندین بار، حل مسئله مستقیم است. اگر چه روشی زمان‌بر است؛ اما در مسائل ژئوفیزیکی کاربرد بسیاری دارد (McGillivray and Oldenburg, 1990).

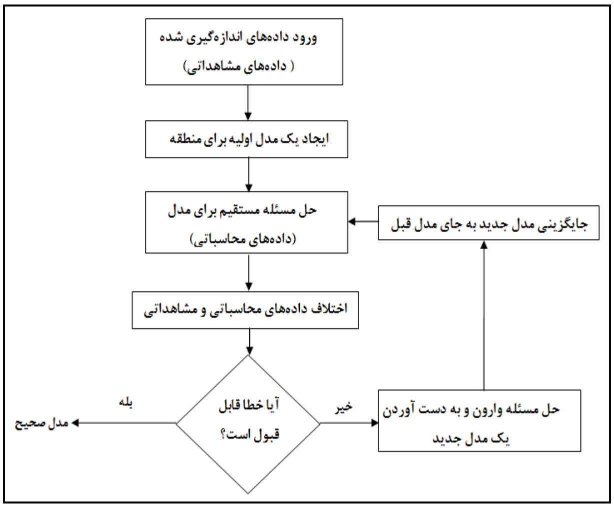
محاسبه ماتریس وضوح داده، ماتریس وضوح مدل و همچنین ماتریس کوواریانس واحد برای اعتبارسنجی نتیجه وارون سازی و همچنین جهت محاسبه صحت مدل، پارامترهای حائز اهمیت هستند. در ادامه به شرح این ماتریس‌ها و چگونگی محاسبه آن‌ها پرداخته می‌شود. در شکل ۲ الگوریتم مورد استفاده در این مقاله به منظور وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه نشان داده شده است.

۲- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه به مختصات ′۳۲°۲۵ عرض جغرافیایی و ′۰۰°۵۹ طول جغرافیایی در استان خراسان جنوبی و در ۸۰ کیلومتری جنوب غربی شهر بیرجند قرار دارد. موقعیت این محدوده و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۳ مشخص شده است. به‌منظور دسترسی به محدوده موردمطالعه می‌توان از طریق جاده آسفالته خوسف – همند و خوسف –ماژان و سپس راه‌های فرعی استفاده نمود.

به لحاظ زمین‌شناسی، رخنمون‌های سنگی قابل‌مشاهده اغلب از نوع ولکانیکی بوده و شامل داسیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت و توف‌های دگرسان شده هستند که گسترش داسیت در مقایسه با دیگر رخساره‌های سنگی بیشتر است. به‌طورکلی می‌توان چندین رخساره را در این محدوده، مشخص نمود. توده‌ها و سنگ‌های آذرین، بیشتر شامل آندزیت و داسیت بوده و سنگ‌ها و ساختارهای حاصل از دگرگونی، شامل فیلیت‌های سبز و خاکستری‌رنگ می‌باشند. این فیلیت‌ها از دگرگونی درجه پائین توف‌ها به وجود آمده و دارای شیستوزیته هستند. دگرسانی توده‌های داسیتی و آندزیتی به کانی‌های رسی و آلتراسیون‌های آرژیلیتی، تپه‌های وسیعی را به وجود آورده که در بخش‌های مختلف محدوده به همراه لایه‌های سطحی و نازک ژیپس قابل مشاهده می‌باشند (شکل ۳) (شاهی فردوس و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین در محدوده مورد مطالعه لایه‌ها و استورک‌ورک‌های سیلیسی که گاهی همراه کانی‌زائی نیز هستند، وجود دارد.

به منظور مطالعات اکتشافی نیمه تفضیلی، با استفاده از آرایش دوقطبی- دوقطبی اقدام به برداشت داده‌های مقاومت ویژه شده است. کمترین فاصله الکترودی ۲۰ متر و تعداد گام‌ها (n) ۱ تا ۴ در نظر گرفته شده است. داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری به صورت همزمان و با استفاده از دستگاه SyscalR2 ساخت شرکت IRIS فرانسه، برداشت شده‌اند. راستای پروفیل مورد مطالعه شمالی- جنوبی است.



شکل ۲: الگوریتم مربوط به مدل‌سازی مسائل ژئوفیزیکی.

۳- روش تحقیق

در این مقاله، روش تحقیق به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول شامل وارون سازی داده‌های مصنوعی و بخش دوم شامل وارون

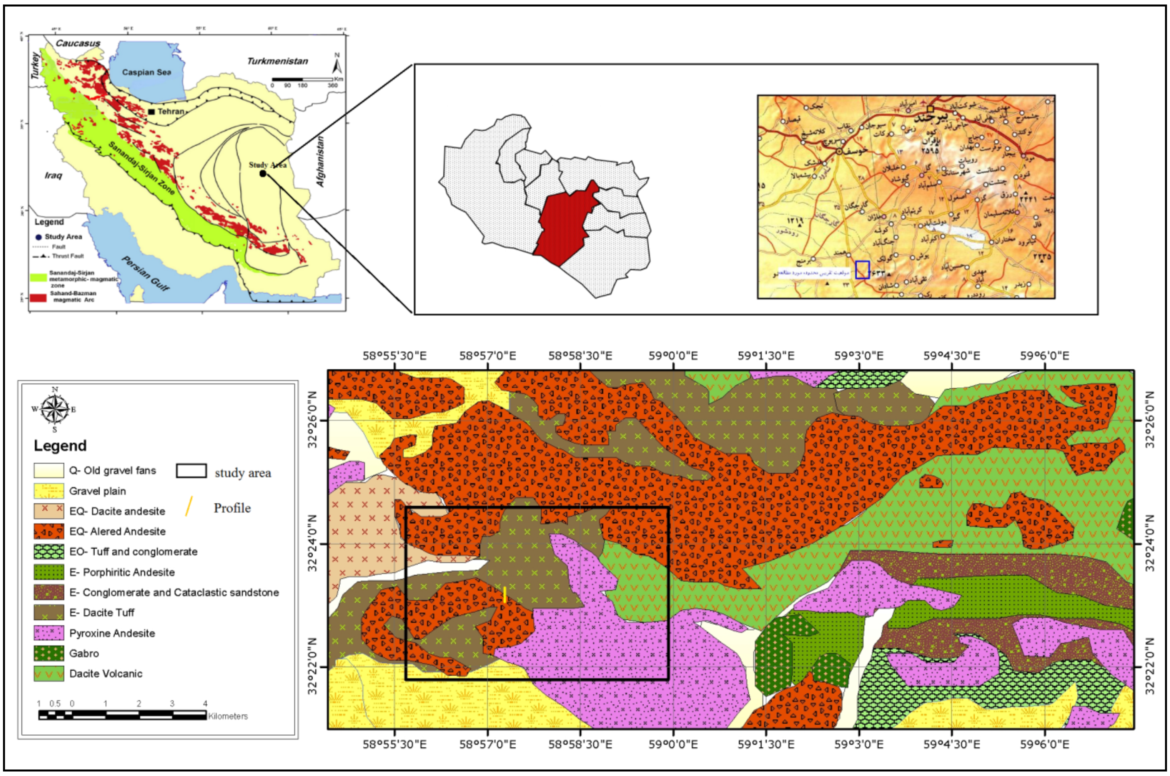
سازی داده‌های واقعی است.

۳-۱- وارون‌سازی داده‌های مصنوعی

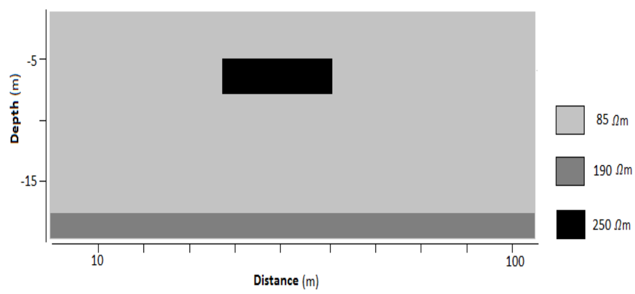
در ابتدا برای ارزیابی عملکرد مدل‌سازی وارون تعمیم‌یافته، یک مدل مصنوعی ایجاد شد. مدل مصنوعی ایجاد شده دارای محیطی با مقاومت ویژه ۸۵ اهم- متر است که یک لایه ۱۹۰ اهم‌متری در قسمت پایین آن قرار گرفته است. همچنین مستطیلی با مقاومت ویژه ۲۵۰ اهم- متری در عمق حدودی ۷ متری قرار دارد. این مدل مصنوعی در شکل ۴ آورده شده است.

مقاومت ویژه ظاهری مدل مصنوعی فوق، با استفاده از روش تفاضل محدود به دست آمد. گفتنی است داده‌های مقاومت ویژه ظاهری با فرض برداشت با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی محاسبه شدند. در گام دوم، به داده‌های حاصله نوفه اضافه شد. نوفه اضافه شده دارای توزیع گوسین با میانگین صفر و انحراف معیار ۰/۱۵ است. در گام سوم، بر طبق الگوریتم شکل ۲، وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری نوفه‌دار به کمک روش وارون تعمیم‌یافته انجام گرفت.

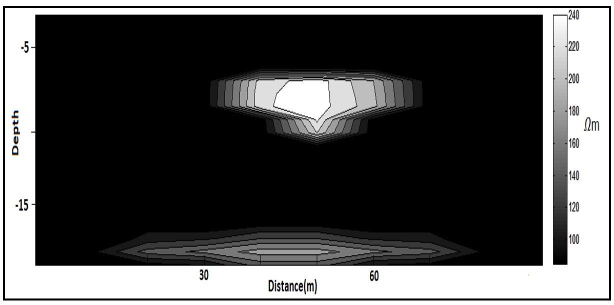
مدل وارون داده‌های مقاومت ویژه نوفه‌دار در شکل ۵ نشان داده شده است. با مقایسه دو شکل ۴ و ۵، مشاهده می‌شود که در مدل مصنوعی اولیه یک لایه با مقاومت ۱۹۰ اهم‌متر در پایین مدل قرار دارد که همین لایه در مدل وارون حاصله از داده‌های نوفه‌دار نیز وجود دارد. همچنین در مدل اولیه، مستطیلی با مقاومت ویژه ۲۵۰ اهم‌متر در عمق حدودی ۷ متری جای گرفته که در مدل حاصل از داده‌های نوفه‌دار نیز همین مستطیل قابل مشاهده است. این مقایسه نشان می‌دهد عملکرد روش وارون تعمیم‌یافته مناسب بوده و می‌توان برای داده‌های واقعی از آن استفاده کرد.



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه (چالیچی و همکاران، ۱۳۶۹).



شکل ۴: مدل مصنوعی ایجاد شده به‌منظور بررسی عملکرد روش وارون تعمیم‌یافته.



شکل ۵: مدل وارون با استفاده از روش وارون تعمیم‌یافته برای مدل مصنوعی نوفه‌دار.

۳-۲- وارون‌سازی داده‌های واقعی

برای شروع وارون‌سازی و بر اساس الگوریتم شکل ۲، ایجاد یک مدل اولیه امری ضروری است. انتخاب مدل اولیه مناسب باعث می‌شود تعداد تکرار برای رسیدن به مدل صحیح با کمترین خطا به‌صورت چشم‌گیری کاهش یابد و مدل حاصله، بهترین انطباق را با واقعیت داشته باشد.

از آنجا که داده‌های مقاومت ویژه ظاهری در قسمت سمت راست و چپ مقطع، اعداد متفاوتی را نشان می‌دهند؛ این موضوع می‌تواند دلیلی بر وجود یک همبری در مقطع مورد مطالعه باشد. از این رو مدل اولیه به صورت یک همبری قائم در نظر گرفته شد و میزان مقاومت ویژه حقیقی سمت راست و چپ همبری، میانگین مقاومت ویژه ظاهری آن‌ها قرار داده شد. مقاومت ویژه حقیقی در سمت راست همبری برابر ۲۰ اهم‌متر و مقاومت ویژه حقیقی در سمت چپ همبری ۱۲۰ اهم‌متر است.

در گام دوم و بر اساس الگوریتم شکل ۲ باید مسئله مستقیم برای مدل حل شود. در این مقاله از روش تفاضل محدود برای به دست آوردن داده‌های محاسباتی (مقاومت ویژه ظاهری) استفاده شد. برای حل معادله حاکم به روش تفاضل محدود، ابتدا مدل شبکه‌بندی شد. در این مطالعه، شبکه‌بندی به صورت مربعاتی با فواصل یکسان در نظر گرفته شده است. این شبکه‌بندی تا فواصل تقریباً بی‌نهایت از الکترود جریان در ابتدا و انتهای پروفیل و همچنین عمق قرار دارد؛ تا اطمینان از برقراری شرایط مرزی مرکب برای گره‌های حاشیه‌ای حاصل شود. البته در خارج از محدوده، فواصل شبکه‌بندی نیز افزایش پیدا کرده است. هر بار الکترود جریان بر روی سطح، در گره مربوطه قرار داده شده و معادله دیفرانسیلی حاکم به روش تفاضل محدود برای آن الکترود حل شده است. از این طریق پتانسیل و سپس اختلاف پتانسیل از طریق پتانسیل‌های استخراج شده از سلول‌های سطر اول محاسبه شد. در نهایت با توجه به معادله زیر مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شد.

$$\rho = K\frac{\Delta v}{I} \qquad (۲۵)$$

در معادله ۲۵، ρ مقاومت ویژه ظاهری و K ضریب هندسی مربوط به آرایش دوقطبی- دوقطبی است.

گفتنی است که در این مقاله تعداد هشت عدد موج به همراه وزن مربوط به آن‌ها با استفاده از روش ژنو محاسبه شد. در جدول ۱، اعداد موج بهینه به همراه وزن مربوط به آن‌ها نشان داده شده است. به ازای هر عدد موج یک پتانسیل فوریه با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود. در گام بعد، پتانسیل فوریه حاصله در وزن آن ضرب می‌شود و این کار برای تمامی عددهای موج انجام می‌شود.

در نهایت پتانسیل‌های فوریه با یکدیگر جمع می‌شوند. با این کار، پتانسیل فوریه بهینه حاصل می‌گردد.

پس از روش مستقیم، باید روش وارون برای مدل‌سازی استفاده شود؛ تا بر اساس آن بتوان مقاومت ویژه حقیقی را از مقاومت ویژه ظاهری محاسبه کرد. یکی از پارامترهای مهم در حل مسئله وارون با استفاده از وارون تعمیم‌یافته، محاسبه ماتریس ژاکوبین است که در این مقاله با استفاده از روش Perturbation، محاسبه شده است.

تمامی مراحل فوق در نرم‌افزار متلب کد نویسی شدند. در نهایت، با سه تکرار، مدل نهایی داده‌های واقعی به دست آمد که میزان خطای مطلق برای مدل به ۱۰٪ کاهش یافت. شکل ۶ نمودارهای تغییرات مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده نسبت به مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده مدل را در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. به منظور نسبت دادن اختلاف پتانسیل سطحی به عمق مناسب از روش ارائه شده توسط لوک استفاده شد. در روش ارائه شده توسط Look (2004)، عمق میانه بررسی می‌تواند تخمین مناسبی از عمق مورد نظر باشد که در این عمق، ۵۰ درصد کل جریان از بالای آن عبور می‌نماید. در مورد آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی این عمق بستگی به کوچک‌ترین فاصله الکترودی، طول خط برداشت و تعداد گام برداشتی دارد.

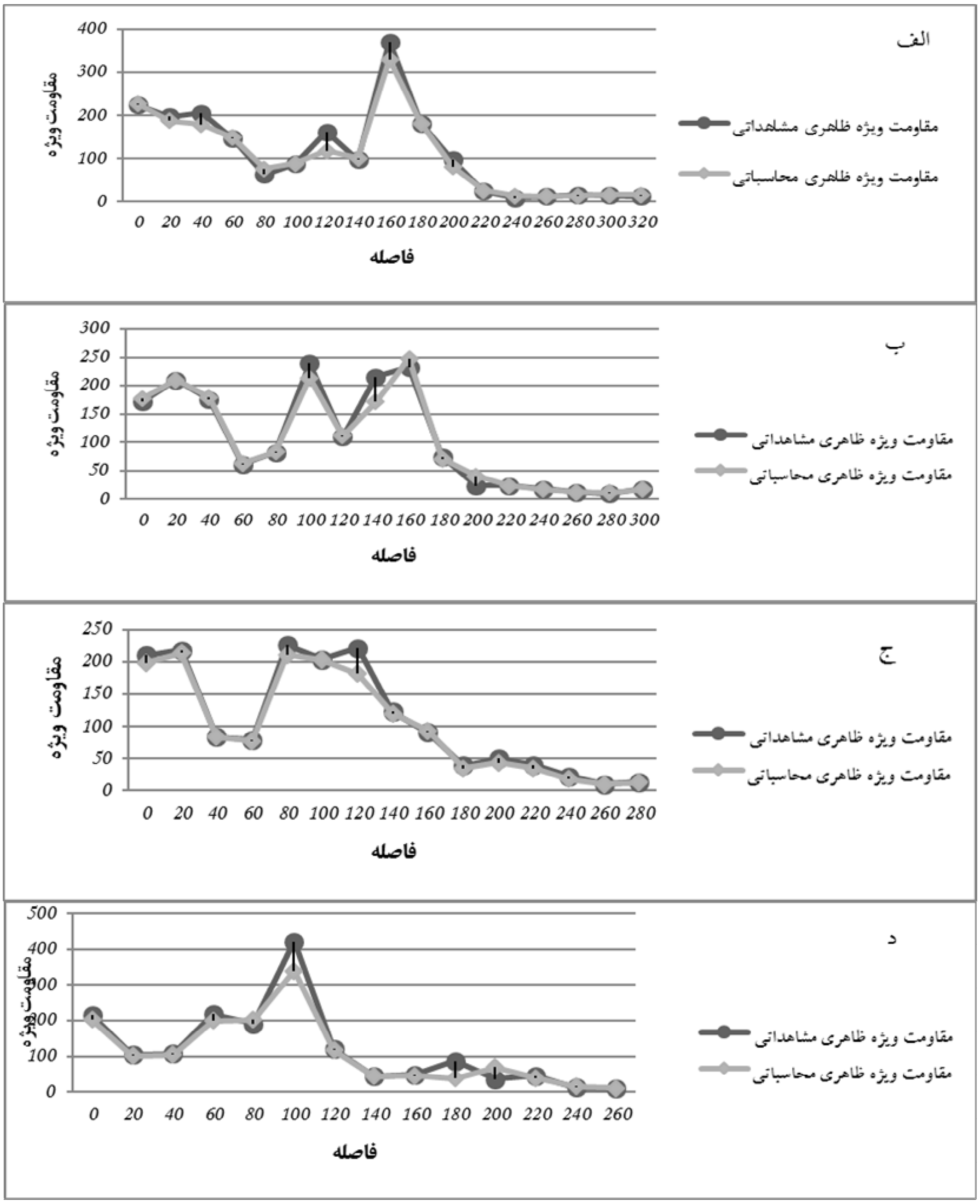
در شکل ۷ هیستوگرام اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی مقاومت ویژه ظاهری آمده است. این هیستوگرام نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف، دامنه‌ای بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۵- دارد و توزیع آن به صورت زنگوله‌ای است.

در شکل ۸ مدل ارائه شده برای محدوده موردمطالعه نشان داده شده است. برای مدل به‌دست‌آمده، با توجه به آنکه مقاومت ویژه سمت راست و چپ مدل تا حدودی متفاوت است؛ می‌توان با احتیاط یک گسل قائم در فاصله ۲۲۰ متری از ابتدای پروفیل را در نظر گرفت. این گسل با خط قرمز مشخص شده است. به طور کلی مقاومت ویژه سمت راست گسل احتمالی پایین است.

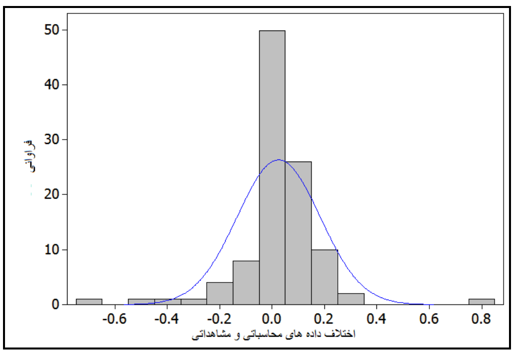
در شکل‌های ۹ و ۱۰ ماتریس وضوح داده و ماتریس وضوح مدل برای محدوده مورد مطالعه محاسبه شده است. این ماتریس‌ها نشان می‌دهند مدل ارائه شده با صحت بالایی برآورد شده است. با توجه به رنگ‌بندی ماتریس شکل‌های ۹ و ۱۰، رنگ آبی دامنه اعداد صفر تا ۰/۲ و رنگ قرمز دامنه اعداد ۰/۸ تا یک را نشان می‌دهد. با توجه به این مطلب این ماتریس بسیار نزدیک به ماتریس قطری است. به طوری که روی قطر اصلی ماتریس وضوح داده و ماتریس وضوح مدل اعدادی بین ۰/۸ تا یک و برای مابقی عناصر ماتریس اعدادی بین صفر تا ۰/۲، قرار گرفته‌اند.

جدول ۱: اعداد موج بهینه به همراه وزن مربوطه.

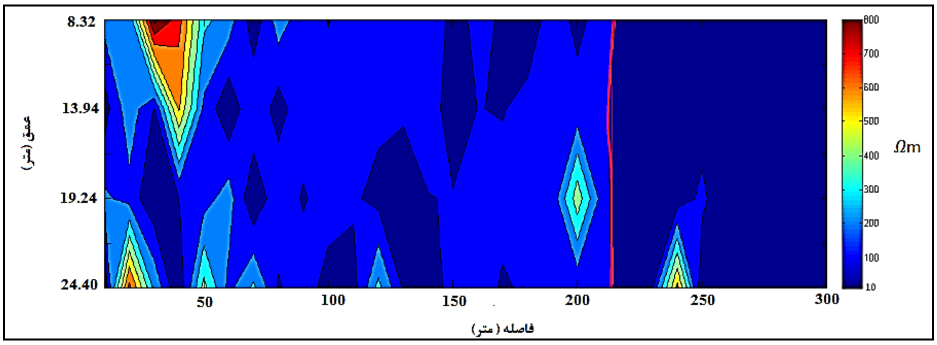
عدد موج	۰/۰۰۹۱	۰/۱۳۸۴	۰/۲۹۱۷	۰/۵۴۵۹	۰/۸۱۸۲	۱/۱۴۱۹	۴/۱۷۲۵	۱۰/۶۲۴۷
وزن	۰/۰۱۶۱	۰/۱۸۱۹	۰/۲۰۶۳	۰/۲۳۶۱	۰/۴۶۸۴	۱/۲۵۸۷	۳/۴۸۳۵	۷/۷۶۳۸



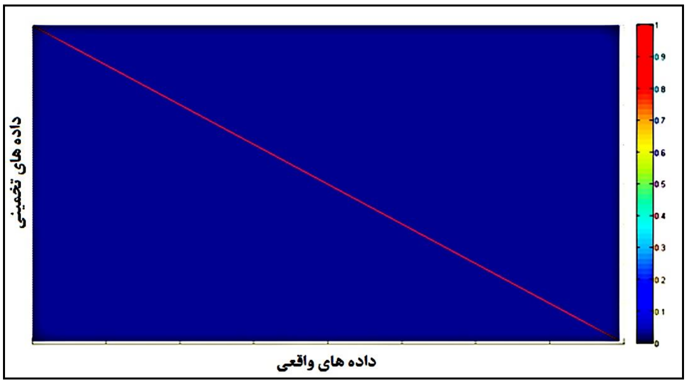
شکل ۶: تغییرات مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده نسبت به مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده برای مدل در عمق‌های مختلف (الف: عمق ظاهری ۲۰ متر، ب: عمق ظاهری ۴۰ متر، ج: عمق ظاهری ۶۰ متر و د: عمق ظاهری ۸۰ متر).



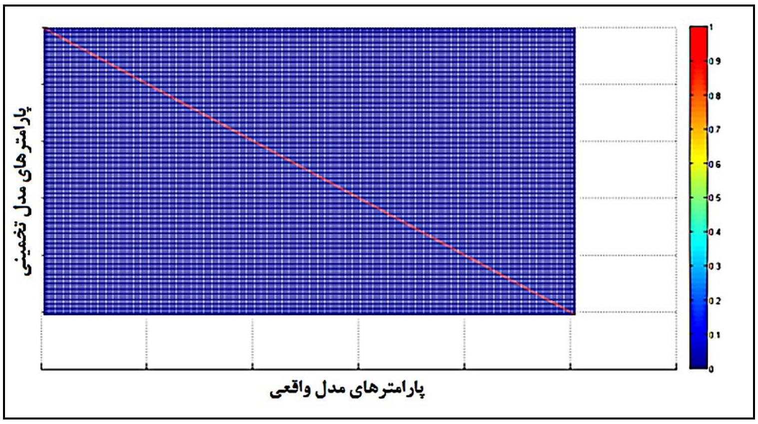
شکل ۷: هیستوگرام خطا (اختلاف داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی).



شکل ۸: مدل ارائه‌شده برای محدوده موردمطالعه با خطای ۱۰٪.



شکل ۹: ماتریس وضوح داده (عناصر روی قطر اصلی عدد یک و مابقی عناصر اعداد نزدیک به صفر می‌باشند).



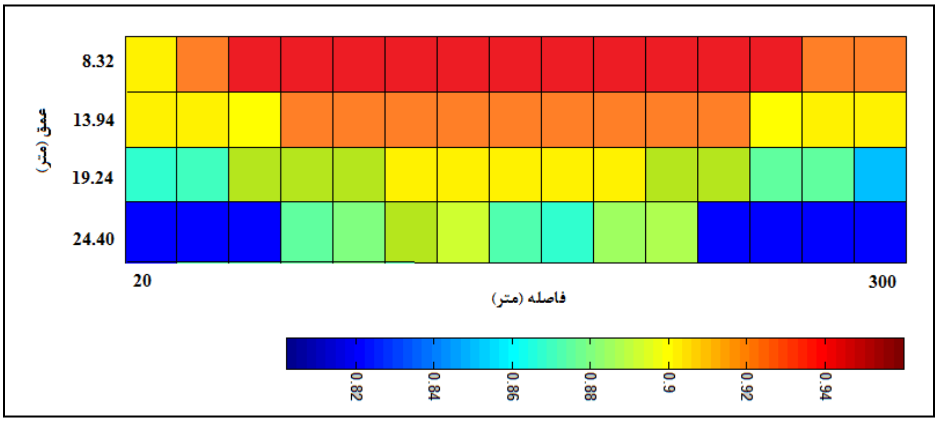
شکل ۱۰: ماتریس وضوح مدل (عناصر روی قطر اصلی عدد یک و مابقی عناصر اعداد نزدیک به صفر می‌باشند).

به منظور درک بهتری از ماتریس وضوح مدل، هر یک از مقادیر قطر اصلی این ماتریس بر روی بلوک خود قرار گرفت. این موضوع در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بلوک‌های سطحی‌تر مقادیر نزدیک‌تری به عدد یک و بلوک‌های عمقی‌تر از این مقدار دورتر می‌شوند. بنابر آنچه در بخش قبل عنوان شد، هر چه این مقادیر به عدد یک نزدیک‌تر باشند، پارامتر مدل برآورد شده (مقاومت ویژه حقیقی) به مقدار واقعی آن نزدیک‌تر است.

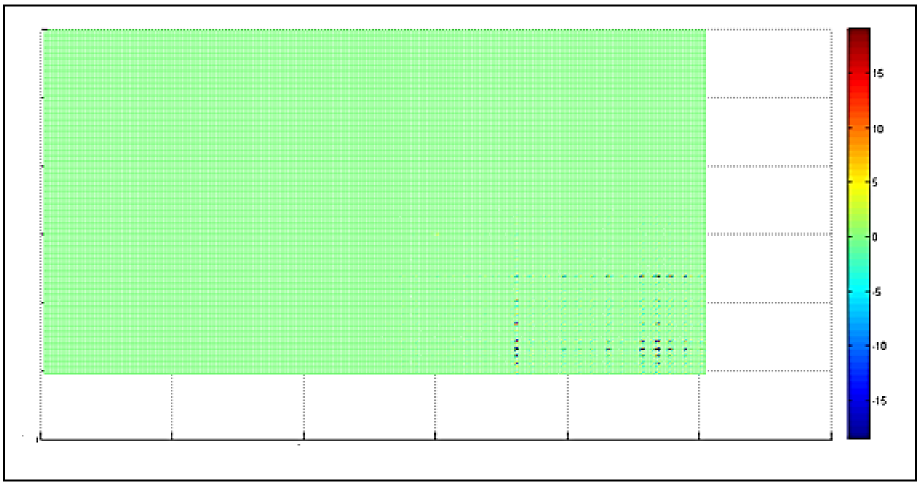
ماتریس کوواریانس واحد نیز برای پارامترهای مدل ترسیم شد (شکل ۱۲). این ماتریس نشان می‌دهد که پارامترهای انتهایی مدل (مناطق انتهایی در سمت راست گسل) دارای خطای حداکثر ۱۵ درصدی می‌باشند؛ که باید با احتیاط در تفسیر استفاده شوند. برای مابقی نقاط این مقدار برابر صفر است. همچنین به منظور درک بهتر از بلوک‌هایی که باید با دقت بیشتری با آن‌ها برخورد شود، هر یک از مقادیر قطر اصلی ماتریس کوواریانس واحد بر روی بلوک خود قرار داده شد. این موضوع در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود خطای بلوک‌های سطحی نزدیک به صفر است و هرچه به سمت عمق حرکت می‌شود، این خطا افزایش می‌یابد. در مدل ارائه شده به وسیله روش وارون تعمیم‌یافته، بیشترین خطا مربوط به بلوک‌های انتهای سمت راست گسل است.

یکی از نرم‌افزارهایی که به صورت گسترده در وارون‌سازی

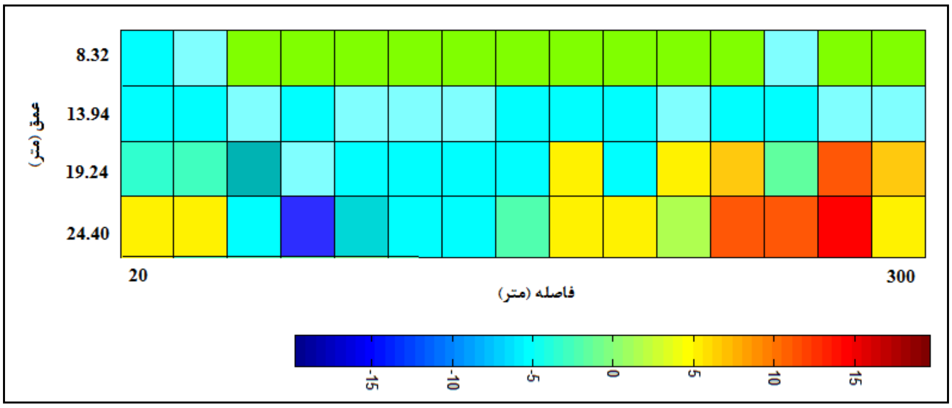
داده‌های مقاومت ویژه استفاده می‌شود، نرم‌افزار Res2dinv است. در این مطالعه داده‌های منطقه همیج با استفاده از این نرم‌افزار نیز پردازش شد و سپس عدم قطعیت‌های حاصل از نرم‌افزار Res2dinv و کد بکار برده شده در این مقاله با هم مقایسه شدند. در شکل ۱۴، عدم قطعیت به دست آمده از نرم‌افزار Res2dinv برای داده‌های منطقه مورد بررسی ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۱۴ مشخص است، عدم قطعیت در مورد بلوک‌های سطحی‌تر کم و هر چه به عمق پیش می‌رویم، این عدم قطعیت بیشتر می‌شود. این موضوع در مورد مدل ارائه شده با استفاده از روش به کار برده شده در این مقاله نیز صادق است (شکل ۱۳). همچنین عدم قطعیت به دست آمده از نرم‌افزار Res2dinv بیانگر آن است که بلوک‌های قرار گرفته در سمت راست گسل باید با احتیاط در تفسیر استفاده شوند.



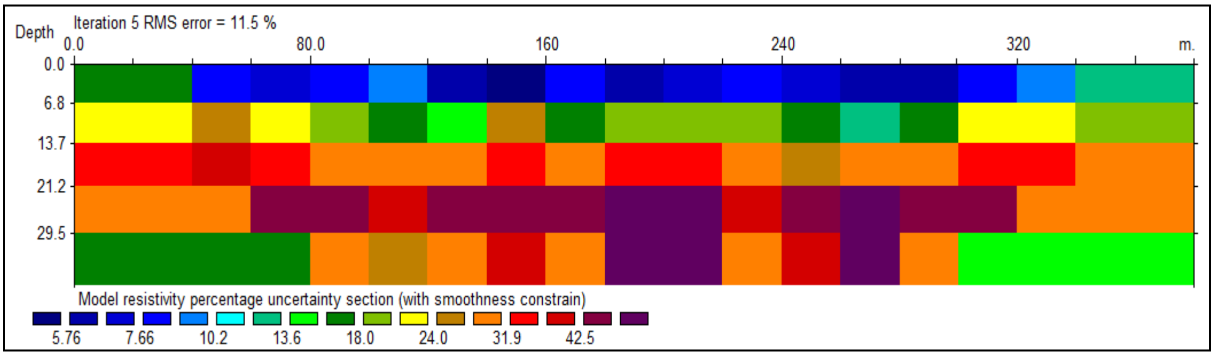
شکل ۱۱: مقادیر ماتریس وضوح مدل بر روی بلوک مربوطه.



شکل ۱۲: ماتریس کوواریانس واحد برای پارامترهای مدل.



شکل ۱۳: مقادیر کوواریانس واحد بر روی بلوک مربوطه.



شکل ۱۴: عدم قطعیت حاصله با استفاده از نرم‌افزار Res2dinv.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی مدل وارون داده‌های مقاومت ویژه، از ماتریس کوواریانس واحد و ماتریس وضوح مدل استفاده شد. همچنین وارون سازی داده‌های مقاومت ویژه با روش وارون تعمیم‌یافته انجام گرفت. به این منظور، روش پیشنهاد شده ابتدا در محیط متلب کدنویسی شد. در ادامه به منظور ارزیابی روش وارون‌تعمیم‌یافته از یک مدل مصنوعی دارای نوفه استفاده شد؛ که نتایج حاصل نشان می‌دهد این روش وارون‌سازی عملکرد مناسبی را دارد. سپس برای داده‌های واقعی محدوده همیج، مدل وارون داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از روش وارون تعمیم‌یافته و حل مسئله مستقیم با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه شد؛ که خطای این مدل در حدود ۱۰٪ به دست آمد. از آنجا که در مدل به دست آمده مقاومت ویژه حقیقی در دو سمت راست و چپ با یکدیگر تفاوت دارند؛ یک گسل احتمالی در فاصله ۲۲۰ متری از ابتدای پروفیل در نظر گرفته شد. گفتنی است مطالعات زمین‌شناسی منطقه (وجود رگه‌ها سیلیسی بعضاً کانه‌دار در محدوده مورد مطالعه) صحت مدل پیشنهاد شده در این مطالعه را تائید می‌کند و بیانگر تطابق مدل ارائه شده با ساختارهای زمین‌شناسی موجود در اندیس همیج است.

برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده در محدوده مورد مطالعه از ماتریس وضوح داده و ماتریس وضوح مدل استفاده شد. چرا که این دو ماتریس یکی از روش‌های کارآمد در ارزیابی صحت مدل می‌باشند. در مطالعه حاضر این دو ماتریس نشان می‌دهند که مدل حاصله در این پژوهش از صحت بالایی برخوردار است؛ زیرا عناصر روی قطر اصلی ماتریس‌های فوق دامنه‌ای بین ۰/۸ تا یک و مابقی عناصر دامنه‌ای بین صفر تا ۰/۲ را دارند. از سوی دیگر در وارون‌سازی داده‌ها، یکی از راه‌های شناسایی پارامتر مدل دارای اعتبار بیشتر، بکار بردن ماتریس کوواریانس واحد است. با محاسبه این ماتریس در محدوده مورد مطالعه مشخص شد که در تفسیر نتایج از مقاومت ویژه حقیقی به دست آمده در سمت راست گسل باید با احتیاط بیشتری استفاده کرد. استفاده از ماتریس کوواریانس واحد در خصوص اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده برای داده‌های ژئوالکتریک، ایده جدیدی است که از این پس می‌تواند به عنوان یک معیار کمی برای این نوع از داده‌های ژئوفیزیکی بکار برده شود. لازم به ذکر است، کدهای نوشته شده برای روش‌های به کار برده شده در این مقاله در رایانه‌های معمولی قابل اجرا بوده و در مدت زمان بسیار کمی خروجی پردازش داده‌ها در اختیار مفسر قرار می‌گیرد.

۵- منابع

چالیچی، ن.، اعتمادی، ن. و افشاریان‌زاده، م.، ۱۳۶۹، نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ بیرجند، سازمان زمین‌شناسی کشور.

شاهی فردوس، م.، بیچرانلو حسن، م. و پورمیرزائی، ر.، ۱۳۹۳، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی ژئوالکتریک با استفاده از روش فازی به منظور انتخاب بهترین نقطه حفاری: بررسی موردی محدوده همیج، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۰ (۱)، ۹۵-۱۰۵.

ناصری، ح. م.، علیجانی، ف. و نخعی، م.، ۱۳۹۰، اکتشاف آب زیرزمینی در مناطق کارستی جنوب باختر ایذه با استفاده از توموگرافی ژئوالکتریک، فصلنامه علوم زمین، ۸۶، ۱۰۷-۱۱۸.

Argelo, S.M., 1967, Two computer programs for the calculation of standard graphs for resistivity prospecting, Geophysical Prospecting, 15 (1), 71-91.

Boonchaisuk, S., Vachiratienchai, C. and Siripunvaraporn, W., 2008, Two-dimensional direct current (DC) resistivity inversion: Data space Occam's approach, physics of the Earth and Planetary Interiors, 168, 204-211.

Clark, A.J., 1986, Archaeological geophysics in Britain, Geophysics, 51 (7), 1404-1413.

Dey, A. and Morrison, H.F., 1979, Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, Geophysical Prospecting, 27 (1), 106-136.

Friedel, S., 2003, Resolution, stability and efficiency of resistivity tomography estimated from a generalized inverse approach, Geophysical Journal International, 153 (2), 305-316.

Columbia).

Menke, W., 2012, Geophysical data analysis: discrete inverse theory. Academic Press.

Narayan, S., Dusseault, M.B. and Nobes, D.C., 1994, Inversion techniques applied to resistivity inverse problems, Inverse Problems, 10 (3), 669.

Pekeris, C.L., 1940, Direct method of interpretation in resistivity prospecting, Geophysics, 5 (1), 31-42.

Ramazi, H. and Mostafaie, K., 2013, Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit exploration, Arabian Journal of Geosciences, 6 (8), 2961-2970.

Smith, N.C. and Vozoff, K., 1984, Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1, 21-28.

Tong, L.T. and Yang, C.H., 1990, Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion, Geophysics, 55 (3), 354-361.

Tripp, A.C., Hohmann, G.W. and Swift, C.M., 1984, Two dimensional resistivity inversion, Geophysics, 49, 708-717.

Urish, D.W., 1983, The Practical Application of Surface Electrical Resistivity to Detection of Ground-Water Pollution, Groundwater, 21 (2), 144-152.

Vachiratienchai, C., Boonchaisuk, S. and Siripunvaraporn, W., 2010, A hybrid finite difference–finite element method to incorporate topography for 2D direct current (DC) resistivity modeling, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 183 (3), 426-434.

Xu, S.Z., Duan, B.C. and Zhang, D.H., 2000, Selection of the wavenumbers k using an optimization method for the inverse Fourier transform in 2.5 D electrical modeling, Geophysical Prospecting, 48 (5), 789-796.

Glenn, W.E., Ryu, J., Ward, S.H., Peeples, W.J. and Phillips, R.J., 1973, The inversion of vertical magnetic dipole sounding data, Geophysics, 38 (6), 1109-1129.

Hayley, K., Pidlisecky, A. and Bentley, L.R., 2011, Simultaneous time-lapse electrical resistivity inversion, Journal of Applied Geophysics, 75 (2), 401-411.

Inman, J.R. and Stanley, H., 1973, Resistivity Inversion, Geophysics, 38 (6), 1088-1108.

Jang, T., Feiyan, W., Xiao, X. and Lincheng, Z., 2011, 2.5D DC resistivity modeling considering flexibility and accuracy, Journal of Earth Science, 22 (1), 124-130.

Klefstad, G., Sendlein, L.V. and Palmquist, R.C., 1977, Limitations of the electrical resistivity method in landfill investigations, Groundwater, 15 (5), 418-427.

Kosinski, W.K. and Kelly, W.E., 1981, Geoelectrical soundings for predicting aquifer properties, Groundwater, 19 (2), 163-171.

Lay, T. and Wallace, T.C., 1995, Modern global seismology, Vol. 58, Academic Press.

Li, Y. and Spitzer, K., 2005, Finite element resistivity modelling for three-dimensional structures with arbitrary anisotropy, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 150 (1), 15-27.

Loke, M.H., 2004, Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, 2004 Revised Edition.

McGillivray, P.R. and Oldenburg, D.W., 1990, Methods for Calculating Fréchet Derivatives and Sensitivities for the Non-Linear Inverse Problem: A Comparative Study 1, Geophysical Prospecting, 38 (5), 499-524.

McGillivray, P.R., 1992, Forward modeling and inversion of DC resistivity and MMR data (Doctoral dissertation, University of British

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG)

2018, VOL. 4, NO. 2

(DOI): 10.22044/JRAG.2017.5822.1125

Shahrood University of Technology

Validation of resistivity inversion results by model resolution matrix and unit covariance matrix

Mohammad Shahi Ferdos[1], Rasoul Hamidzadeh Moghadam[2] and Rashed Poormirzaee[3*]

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ferdos University, Ferdos, Iran
2- Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
3- Assistant Professor, Department of Mining and Material Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Received: 2 June 2017; Accepted: 10 November 2017

*** Corresponding author: rashed.poormirzaee@gmail.com**

Keywords

Data Resolution Matrix
Model Resolution Matrix
Unit Covariance Matrix
Generalized Inversion
Finite Difference
Resistivity

Extended Abstract

Summary

The resistivity method is frequently used in fields of engineering geology and exploration of mineral resources. The simplicity of the equipment, the low cost of the survey in comparison with other methods, and the abundance of interpretation methods makes it as a popular geophysical method. There are many methods for inversion of resistivity data. Validation of inverted models is an important step in modeling. In general, validation of the resistivity results is performed by calculating the difference between observed and estimated values, but in this study, a validation technique based on data resolution matrix and model resolution matrix is proposed. The applied method for validation of the results has not been used so far, in this research work, resistivity and induced polarization data have been collected using dipole-dipole electrode array in Hamyj copper deposit located near the city of Birjand. The results of data resolution matrix and model resolution matrix have shown that generalized inversion is a suitable method for processing of resistivity data, because both data and model resolution matrix have been close to an identity matrix.

Introduction

After gathering the resistivity data, application of a suitable inversion method for finding an adequate subsurface model is very important. Visual and analytical methods are used for the interpretation of resistivity data over simple structures such as faults. However, these methods require a certain degree of symmetry and they are suitable only for simple geological conditions. Generalized inversion is one of the important modelling techniques to invert geophysical data. In current study, generalized inversion is used for inversion of resistivity data. Normally the validation of the resistivity results is performed by calculating the difference between observed and estimated values, i.e. error function, but data resolution matrix and model resolution matrix are suitable tools for validation of the results. This method for validation of the results has not been used so far. In this research work, unit covariance matrix has been used to identify the correctness of the each parameter. Moreover, data resolution matrix describes the accuracy level of the estimated values. The covariance of the model parameters depends on the covariance of the data and the way that the error is mapped from data to model parameters. This mapping is just dependent on the data kernel and the generalized inversion, which is independent of the data.

Methodology and Approaches

The proposed technique was tested on synthetic and real datasets. To explore the capability of the applied method more, 10 percent noise was also added to the synthetic data. The results of synthetic dataset showed the capability of the applied technique in the absence and presence of noise. For collecting the real resistivity data, an electrode spacing of 20 m has been used. Then inversion of the resistivity data acquired along a survey line was carried out using the generalized inversion method. Finite difference method was used for forward modelling, and also, perturbation approach was used for calculation of the Jacobin matrix in the inversion process. The results showed the presence o a fault in the study area. Furthermore, the results had a good correlation with the geological evidence from the study area. In this research, the code of the generalized inversion method has been written in MATLAB.

Results and Conclusions

In the present study, a new method for the inversion of resistivity data has been proposed. The proposed method, which is a, generalized inversion method, has been tested on synthetic and actual datasets. The results have shown that the generalized inversion method is a successful technique in the inversion of the resistivity data, because both data resolution matrix and model resolution matrix have been close to an identity matrix. The results, obtained from applying the unit covariance matrix, have shown that the variance of some data is not zero. In other words, the field datasets acquired from the southeast of the survey line, have less accuracy. Finally, we can conclude that these three matrixes for the validation of the model and finding the best model parameters are very useful.