

انتخاب بهینه پارامتر منظم سازی در وارون سازی داده های مگنتوتلوریک

عارف زینال پور^{۱*}، غلامرضا کمالی^۲، علی مرادزاده^۲ و محمد رضایی^۴

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه باهنر کرمان

۲- دانشیار؛ دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه باهنر کرمان

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران

۴- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، گروه معدن، دانشگاه ملایر

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

* نویسنده مسئول مکاتبات: aref.zainalpour@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

مدل سازی وارون داده های مگنتوتلوریک به عنوان یک مساله غیرخطی و بد حالت شناخته شده است، بنابراین برای به دست آوردن نتایجی معنی دار و منحصر به فرد، به طور معمول از روش منظم سازی تیخونوف برای حل آن استفاده می شود. همچنین انتخاب بهینه پارامتر منظم سازی از دیگر فاکتورهای مهم برای دستیابی به مدل سازی وارون مناسب است. هدف از انجام این تحقیق، یافتن مقداری بهینه برای پارامتر منظم سازی، در وارون سازی دو بعدی داده های مگنتوتلوریک براساس الگوریتم دوقطری سازی لنگزوس می باشد که بهترین ترکیب را با این روش برای بهبود دقت مدل سازی و افزایش سرعت وارون سازی ساختارهای زیرسطحی لحاظ کند. برای این منظور دو روش متداول، اعتبارسنجی تقاطعی^۱ و متعادل سازی قید فعال^۲ بررسی و با روش جدید، منظم سازی انطباقی^۳ به عنوان روشی اتوماتیک و بهینه در الگوریتم وارون سازی دو بعدی داده های مگنتوتلوریک در مقیاس بزرگ مقایسه خواهند شد. همچنین برای افزایش سرعت مدل سازی وارون از روش دو قطری سازی لنگزوس^۴ استفاده شده است. روش های مذکور در محیط متلب کد نویسی و در برنامه الگوریتم پایه MT2DInvMatlab لحاظ گردید. تخمین های انجام یافته برای پارامتر منظم سازی، بر روی یک مدل مصنوعی با اعمال ۳ درصد نوفه تصادفی و همچنین داده های واقعی زمین گرمایی منطقه بوشلی (نیر) سبلان انجام شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که علیرغم توانمندی همه روش ها در انتخاب پارامتر منظم سازی، روش معرفی شده به لحاظ پارامترهای اندازه گیری شده از نظر میزان حافظه مورد نیاز، زمان سپری شده، همگرایی به مدل مطلوب در تکرارهای کمتر و همچنین دقت مدل سازی بر سایر روش های مرسوم ارجحیت دارد. همچنین به کارگیری این روش برای داده های واقعی نشان از توانمندی این روش در تولید یک مدل بهینه وارون دارد.

بوشلی (نیر)،

زمین گرمایی،

مگنتوتلوریک،

الگوریتم وارون سازی دو بعدی،

پارامتر منظم سازی،

دو قطری سازی لنگزوس.

1-GCV: Generalized Cross Validation

2-ACB: Active Constraint Balancing

3-Adaptive Regularization

4-Lanczos Bidiagonalization

در اوایل قرن بیستم، مفهوم مسائل بد وضع^۱ توسط هدامرد^۲ (۱۹۲۳) مطرح شد. طبق این تعریف، مسائلی بد وضع به شمار می آیند که جواب یکتایی برای حل آن وجود نداشته باشد و اگر این جواب وجود دارد تابع پیوسته از داده ها نمی باشد. مسائل وارون سازی عمدتاً جزء مسائل بد وضع هستند. مدل سازی وارون داده های مگنتوتلوریک (MT) نیز به عنوان یک مساله غیرخطی و بد وضع شناخته شده است. بنابراین برای به دست آوردن نتایجی قابل قبول و منحصر به فرد، به طور معمول از روش منظم سازی تیخونوف برای حل آن استفاده می شود (Newman and Alumbaugh, 2000). روش تیخونوف یکی از مهم ترین روش ها در منظم سازی مسائل بد وضع است (Tikhonov and Arsenin, 1977). عمده مسائل مربوط به وارون سازی در ژئوفیزیک و به ویژه مگنتوتلوریک از این روش برای دستیابی به راه حل هایی یکتا و پایدار استفاده می کنند (Lee et al., 2009; Sasaki, 2004; Rodi and Mackie, 2001; Siripunvaraporn and Egbert, 2000; Smith and Booker, 1991; Constable et al., 1987).

به طور کلی حالت گسسته از مساله وارون MT براساس روش منظم سازی تیخونوف از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$P(m) = \phi(d) + \lambda^2 \phi(m) \quad (1)$$

این فرمول شامل دو مؤلفه اصلی عدم برازش داده $(\phi(d))$ و تثبیت کننده مدل $(\phi(m))$ است. m بردار پارامترهای مدل و $P(m)$ تابع هدف که از طریق به حداقل رساندن آن می توان به نتایج وارون سازی مطلوب دست یافت. λ یک پارامتر اساسی در روش وارون سازی است که به عنوان پارامتر منظم سازی یا ضریب لاگرانژ شناخته می شود و تعادل نسبی بین پارامتر تثبیت کننده مدل و عدم برازش داده را تنظیم می کند. به طوری که اگر λ مقدار کوچکی انتخاب شود از اهمیت پایداری مدل کاسته می شود و همچنین اگر λ مقدار بزرگی انتخاب شود تأثیر میزان برازش داده ها کم می شود. در نتیجه، برآورد مقداری مناسب برای پارامتر منظم سازی برای تولید یک مدل ایده آل از اهمیت زیادی برخوردار است (Farquharson and Oldenburg, 2004). روش های مختلفی برای برآورد مناسب پارامتر منظم سازی در مسائل وارون سازی خطی داده های ژئوفیزیکی ارائه شده است که مطلوب بودن آن تابع شرایط خاص آن مساله است (Hansen, 2010). بائر و لوکاس (Bauer and Lukas, 2011) در یک تحقیق جامع، غالب روش های برآورد پارامتر منظم سازی را بررسی کردند و نشان دادند که مقایسه هر یک از روش ها کار ساده ای نیست و نمی توان انتظار داشت که در صورت مناسب بودن یک روش منظم سازی برای یک مساله بد وضع خاص، این روش برای تمامی مسائل بد وضع مناسب باشد. روش های انتخاب پارامتر منظم سازی باید برای هر مساله بد وضع خاص به صورت مجزا مورد مطالعه قرار گیرند و پارامترهای مربوطه با توجه به طبیعت آن مساله بد وضع تنظیم گردد. تحقیق های متعددی در طی دهه های اخیر برای انتخاب مناسب پارامتر منظم سازی در مسائل وارون سازی ژئوفیزیکی انجام گرفته است. روش های

منحنی L و GCV به ترتیب توسط Li and Oldenburg (1999) و Walker (1999) برای برآورد پارامتر منظم سازی در وارون سازی داده های مقاومت ویژه و الکترومغناطیس مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان دهنده ایجاد ساختارهای اضافه در تکرارهای اولیه بود که در تکرارهای بعدی حذف آن ها زمان بر است. روش "اعتبارسنجی تقاطعی تعمیم یافته" در حل مساله وارون غیرخطی گوس- نیوتن (توسط Haber and Oldenburg (2000) برای وارون سازی داده های گرانی سنجی و مگنتوتلوریک در یک مثال مصنوعی بکار گرفته شد. پس از معرفی روش متعادل سازی قید فعال^۳ توسط Yi et al., (2003)، این روش در وارون سازی دو بعدی هموار داده های مگنتوتلوریک مورد استفاده قرار گرفت (Lee et al., 2009). بر طبق نتایج آن ها، مقدار مناسب برای پارامتر منظم سازی در محدوده بین بیش ترین و کمترین مقدار در هر اجرا تعیین می گردد که می تواند منجر به همگرایی نتایج در تعداد تکرار کمتری باشد. Farquharson and Oldenburg (2004) روش های اصل نبود انطباق، منحنی L و GCV را در وارون سازی داده های الکترومغناطیس مقایسه کردند نتایج حاکی از موثرتر بودن روش اصل نبود انطباق در یک بازه جستجوی مناسب، در صورت مشخص بودن سطح نوفه در داده ها است. از معایب این روش، کاهش بازده محاسباتی آن در مواجهه با مسائل با حجم زیاد از نظر تعداد داده و پارامترهای مدل است. همچنین روش منحنی L دارای توانایی بالاتری نسبت به روش GCV می باشد اما از نظر سرعت محاسباتی کندتر است. Oldenburg and Li, (2005) از روش های اعتبارسنجی متقاطع تعمیم یافته (GCV)، اصل نبود انطباق (DP) و منحنی L برای مشخص کردن مقدار پارامتر منظم سازی در وارون سازی داده های میدان پتانسیل استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان داد که روش GCV قادر است مقدار مناسب پارامتر منظم سازی را تا حد ایده آلی به دست آورد و سطح نوفه موجود در داده ها را تخمین بزند. وطن خواه و همکاران (۲۰۱۴) روش های اصل χ^2 و تخمینگر ناریب ریسک احتمالی^۴ را در وارون سازی متمرکز داده های گرانی استفاده کردند. آنها برای حل مساله وارون از روش های مستقیم بر پایه روش SVD استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده افزایش سرعت انجام وارون سازی متمرکز داده های گرانی بود. قائد رحمتی و همکاران (۱۳۹۴) به بهبود و مقایسه انتخاب پارامتر منظم سازی با استفاده از روش های GCV تعمیم یافته، منحنی L و مقایسه آن ها با روش ACB پرداختند، نتایج آن ها نشان دهنده مناسب بودن روش GCV تعمیم یافته نسبت به روش های مورد بررسی می باشد. رضایی و همکاران (۱۳۹۴) نیز روش تخمینگر ناریب ریسک احتمال ($UPRE$) که توسط Vogel در سال ۲۰۰۲ معرفی شده است را در وارون سازی سه بعدی مقید داده های مغناطیسی بکار گرفتند. در تحقیق پیشرو، به مدل سازی داده های مگنتوتلوریک بر مبنای روش دو قطری سازی لنکروس و انتخاب پارامتر منظم سازی با روش منظم سازی انطباقی و مقایسه آن با روش های GCV تعمیم یافته و ACB در مثال مصنوعی و داده های واقعی خواهیم پرداخت. برای مقایسه مزایا و معایب روش های

3-Active Constraint Balancing

4-Unbiased Predictive Risk Estimator (UPRE)

1-Ill-posed

2-Hadamard

مقدار بهینه پارامتر منظم‌سازی به دست می‌آید. باوئر و لوکاس (۲۰۱۱)، مقدار پارامتر تثبیت کننده را $c = 3$ انتخاب کردند. برآورد انجام شده برای پارامتر منظم‌سازی براساس این روش در تکرارهای نخستین به مقدار نهایی آن نزدیک است، اما بکار گیری این تخمین‌ها، منجر به پدیدار شدن ساختارهایی اضافی در مدل نهایی می‌گردد (Walker, 1999).

۲-۳- روش متعادل‌سازی قید فعال (ACB)

این روش توسط Yi و همکاران در سال ۲۰۰۳ مطرح گردید و در وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک بکار گرفته شد (Lee et al., 2009). اساس این روش بر پایه تعریف پارامتر منظم‌سازی به صورت یک تابع فضایی $\lambda(x, z)$ است که در آن پارامتر منظم‌سازی در هر تکرار فرآیند وارون متغیر است و از طریق تحلیل تباین پارامتری تخمین زده می‌شود. در واقع الگوریتم متعادل‌ساز قید فعال در فرآیند وارون‌سازی، برای دستیابی به یک قید هموارسازی بهینه اجرا می‌شود. پارامتر منظم‌سازی بهینه از طریق تابع تفکیک‌پذیری (Spread function)، SP_i برای i امین پارامتر مدل محاسبه می‌شود که این پارامتر توسط ماتریس تحلیل پارامتر R (Parameter Resolution Matrix) به صورت زیر تعریف می‌شود (Menke, 1989).

$$SP_i = \sum_{j=1}^N (w_{ij}(1 - S_{ij})R_{ij})^2 \quad (7)$$

که در آن N تعداد پارامترهای مدل، w_{ij} ضریب وزنی که از طریق فاصله فضایی بین i امین و j امین پارامتر محاسبه می‌شود، S_{ij} ماتریسی برای اعمال قیدهای منظم‌سازی در فرآیند وارون روی i امین پارامتر و R نیز ماتریس حساسیت است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R = (G^T G + \lambda C^T C)^{-1} G^T G \quad (8)$$

C عملگر هموارساز لاپلاسین مرتبه دوم است. در این روش ضرایب لاگرانژ از طریق درون‌یابی خطی در فضای لگاریتمی و مابین دو مقدار کمینه و بیشینه تعیین می‌گردد. تابع زیر ضریب لاگرانژ را بر مبنای تابع تفکیک پذیری تخصیص می‌دهد (Yi et al., 2003).

$$\log(\lambda_i) = \log(\lambda_{\min}) + \frac{\log(\lambda_{\max}) - \log(\lambda_{\min})}{\log(SP_{\max}) - \log(SP_{\min})} \{ \log(SP_i) - \log(SP_{\min}) \} \quad (9)$$

λ_i ضریب لاگرانژ برای پارامتر i ، SP_i تابع تفکیک‌پذیری پارامتر i ، $SP_{\min}$ و $SP_{\max}$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر تابع تفکیک پذیری $\lambda_{\min}$ و $\lambda_{\max}$ به ترتیب مقادیر کم و زیاد برای ضریب لاگرانژ هستند که توسط کاربر انتخاب می‌شوند.

۲-۴- روش منظم‌سازی انطباقی

روش منظم‌سازی انطباقی توسط Zhdanov, (2002) معرفی گردید و بر پایه ایجاد تعادل بین تابع تثبیت کننده $\varphi(m)$ و عدم برازش داده $\varphi(d)$ عمل می‌کند. مطابق روش Zhdanov، اولین تکرار وارون‌سازی بدون در نظر گرفتن پارامتر منظم‌سازی اجرا می‌شود ($\lambda_0 = 0$). پس از

مذکور عواملی چون حداکثر دقت روش، اتوماتیک بودن، نیاز به طرح کنترلی، نیاز به اطلاعات اولیه مثل سطح نوفه داده‌ها، بار محاسباتی هر روش و زمان لازم برای محاسبات کل روند وارون‌سازی مد نظر قرار خواهد گرفت.

۲- تئوری

۲-۱- مساله وارون مگنتوتلوریک

از مشکلات عمده در وارون‌سازی مسائل مگنتوتلوریک، عدم یکتایی در جواب وارون‌سازی و بدحالت بودن آن است (Li and Oldenburg, 1988). به این منظور از تئوری تیخونوف برای منظم‌سازی مسائل وارون استفاده می‌شود (Tikhonov and Arsenin, 1977):

$$\varphi(m) = \|d_{obs} - Gm\|_2^2 + \lambda \|m - m_0\|_2^2 \quad (2)$$

که d بردار داده‌ها، $G(m)$ تابع پیشرو، λ پارامتر منظم‌سازی، m بردار پارامترهای مدل و m_0 مدل مرجع است. با کمینه کردن تابع هدف، می‌توان پارامترهای مدل را از رابطه زیر به دست آورد:

$$m_\lambda = \arg(\min\{\|d_{obs} - Gm\|_2^2 + \lambda \|m - m_0\|_2^2\}) \quad (3)$$

که در آن m_λ پارامترهای مدل تخمین زده شده است، $\|d_{obs} - Gm\|_2^2$ تابع عدم برازش داده بوده و $\|m - m_0\|_2^2$ تابع منظم‌ساز تیخونوف است. پارامتر λ پارامتر منظم‌سازی است ($\lambda > 0$). در نهایت پارامترهای مدل از حل معادله زیر محاسبه می‌شود (Aster et al., 2013).

$$m_\lambda = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T d_{obs} \quad (4)$$

۲-۲- روش GCV تعمیم یافته

روش اعتبارسنجی متقابل (GCV) یک روش رایج برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی بهینه می‌باشد (Wahba, 1990). در این روش پاسخ مناسب برای یک مساله وارون، پاسخی است که بی‌دلیل حساس به هیچ داده‌ای نیست. در واقع مدل به دست آمده از حل مساله وارون می‌تواند داده‌ای را تخمین بزند که برای محاسبه مدل بکار نرفته است. از این رو این روش به روش اعتبارسنجی معروف شده است. بنابراین مقدار بهینه انتخاب شده برای پارامتر منظم‌سازی قادر است تمامی داده‌ها را از طریق مدل به دست آمده از حل مساله وارون تخمین بزند. پس از خطی سازی مسائل وارون غیرخطی که غالباً از طریق روش‌های تکرار حل می‌گردند (رابطه (۲))، روش GCV را در هر تکرار وارون‌سازی می‌توان به کار گرفت. براساس روابط (۲) و (۳)، روش GCV برای یک مساله وارون به صورت زیر خواهد بود (Farquharson and Oldenburg, 2004):

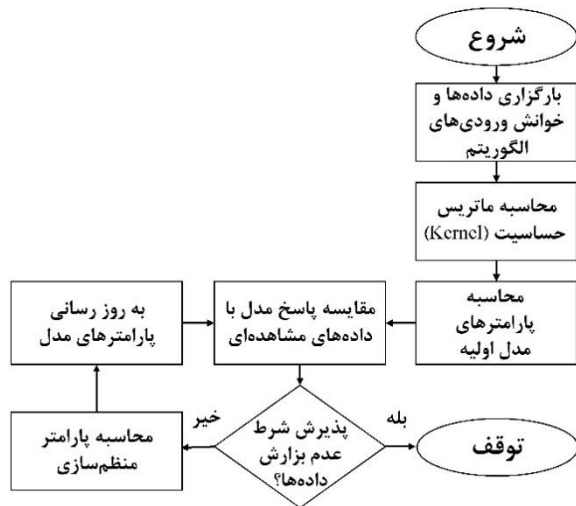
$$GCV(\lambda) = \frac{\|d(\lambda) - d_{obs}\|^2}{[\text{trace}(I - C(\lambda))]^2} \quad (5)$$

که در آن

$$C(\lambda) = G(G^T G + \lambda I_n)^{-1} G^T \quad (6)$$

trace بیان‌کننده مجموع عناصر روی قطر اصلی ماتریس I و ماتریس همانی است. C به عنوان یک پارامتر تثبیت کننده در یک روش عمل می‌کند؛ که منجر به افزایش پایداری روش می‌گردد از این رو به روش GCV تعمیم یافته معروف است (Vio et al., 2004; Bauer and Lukas, 2011). در این روش با کمینه کردن تابع GCV (رابطه (۵))،

و جواب مساله وارون را به دست آورد. در شکل (۱) روند ساده شده از فرآیند وارون سازی نمایش داده شده است.



شکل (۱): نمودار شماتیکی از فرآیند الگوریتم وارون سازی.

۳- ارزیابی مدل سازی وارون

۳-۱- مدل مصنوعی

توانایی روش های مذکور در انتخاب مناسب پارامتر منظم سازی از طریق کد نویسی در محیط متلب و مبتنی بر الگوریتم دوقطری سازی لنکروس در کدهای الگوریتم لی و همکاران (۲۰۰۹) و با انجام تغییراتی در قسمت nlsqinv2d.m و nlsqupdate.m انجام گردید این دو تابع به ترتیب نقش مهمی را در به روز رسانی پارامترهای مدل در هر تکرار و هسته محاسباتی در فرآیند وارون سازی ایفا می کنند. در ادامه، وارون سازی دو بعدی داده های مگنتوتلوریک در یک مثال مصنوعی با حجم بزرگ به لحاظ تعداد داده ها، پارامترهای مدل و تعداد فرکانس های انتخابی بررسی می شود. نتایج نهایی به دست آمده از روش های مختلف، با نتایج وارون سازی حاصل از روش منظم سازی انطباقی مقایسه خواهند شد. داده های منطقه لچند استرالیا به عنوان مدل مصنوعی انتخاب شده است که مدل سازی آن قبلاً توسط نرم افزارهای مختلف انجام شده است (Lee et al., 2009). این مدل به دلیل حجم بالای داده ها به لحاظ تعداد ایستگاه ها و فرکانس های نمونه برداری یک مدل تقریباً ایده آل برای وارون سازی مساله در حجم بزرگ و بررسی تاثیر روش های مختلف انتخاب پارامتر منظم سازی می باشد. داده های برداشت شده در منطقه ای با رسوبات دریایی، چرت ها و سنگ های آتشفشانی بازنیک با سن پالئوژئیک می باشد. اندازه گیری داده های MT در یک پروفیل به طول ۱۸۰ کیلومتر با آزمون ۹۵ درجه عمود بر امتداد ساختارها در ۵۳ ایستگاه برداشت شده است. تعداد فرکانس های نمونه برداری ۲۷ فرکانس در بازه ۰/۰۹۲ تا ۶۶ هرتز می باشد. با در نظر گرفتن حجم بالای پارامترهای مدل (5724 = 53 × 27 × 4) برای هر دو مد (TE+TM) استفاده از الگوریتم دوقطری سازی لنکروس (LB) به عنوان الگوریتمی سریع و کارآمد برای مدل سازی وارون داده ها ضروری می باشد. با ایجاد یک شبکه بندی مناسب، مدل سازی پیشرو از طریق روش المان محدود (FE) طبق روش ارائه شده توسط Rodi (1979) انجام شده است (Lee et al., 2009). نتایج به دست آمده از روش های مختلف انتخاب پارامتر

اولین تکرار، مقدار پارامتر منظم سازی λ_1 ، به صورت زیر محاسبه می شود (Zhdanov, 2002):

$$\lambda_1 = \frac{\|Gm_1 - d_{obs}\|_2^2}{\|m_1\|_2^2} \quad (10)$$

در این روش از تکراری تا تکرار بعدی، افزایشی در نرم مدل می تواند رخ دهد. از این رو برای همگرایی سریع، ضریب کاهشی برای پارامتر منظم سازی متناسب با افزایش عملکرد نرم مدل پیشنهاد شده است (Zhdanov, 2002):

$$\lambda_k = \lambda_1 q^{k-1}; k = 1, 2, 3, \dots, n; 0 < q < 1 \quad (11)$$

k تعداد تکرار، λ_k پارامتر منظم سازی مرتبه k ام و ضریب q میزان کاهش پارامتر منظم سازی را تعیین می کند. این ضریب به صورت تجربی انتخاب می شود. طبق معادله (۱۰)، تا زمانی که حداکثر تعداد تکرارها یا شرایط مناسب برای عدم برازش داده در هر تکرار وارون سازی به دست آید، پارامتر منظم سازی مطلوب، λ_k به صورت پیوسته کاهش خواهد یافت. در این روش، توصیه می شود از تعداد بهینه تکرارها استفاده شود، زیرا مقدار تخمین زده شده برای پارامتر منظم سازی در هر تکرار بسیار کوچک خواهد بود که می تواند منجر به راه حل های نادرست و ناپایدار شود. با این وجود، با تعیین قید مناسب برای هر بار تکرار در فرآیند وارون سازی، از جمله اعمال محدودیت های معین برای میزان کاهش عدم برازش داده این مشکل رفع خواهد شد (Zhdanov, 2002).

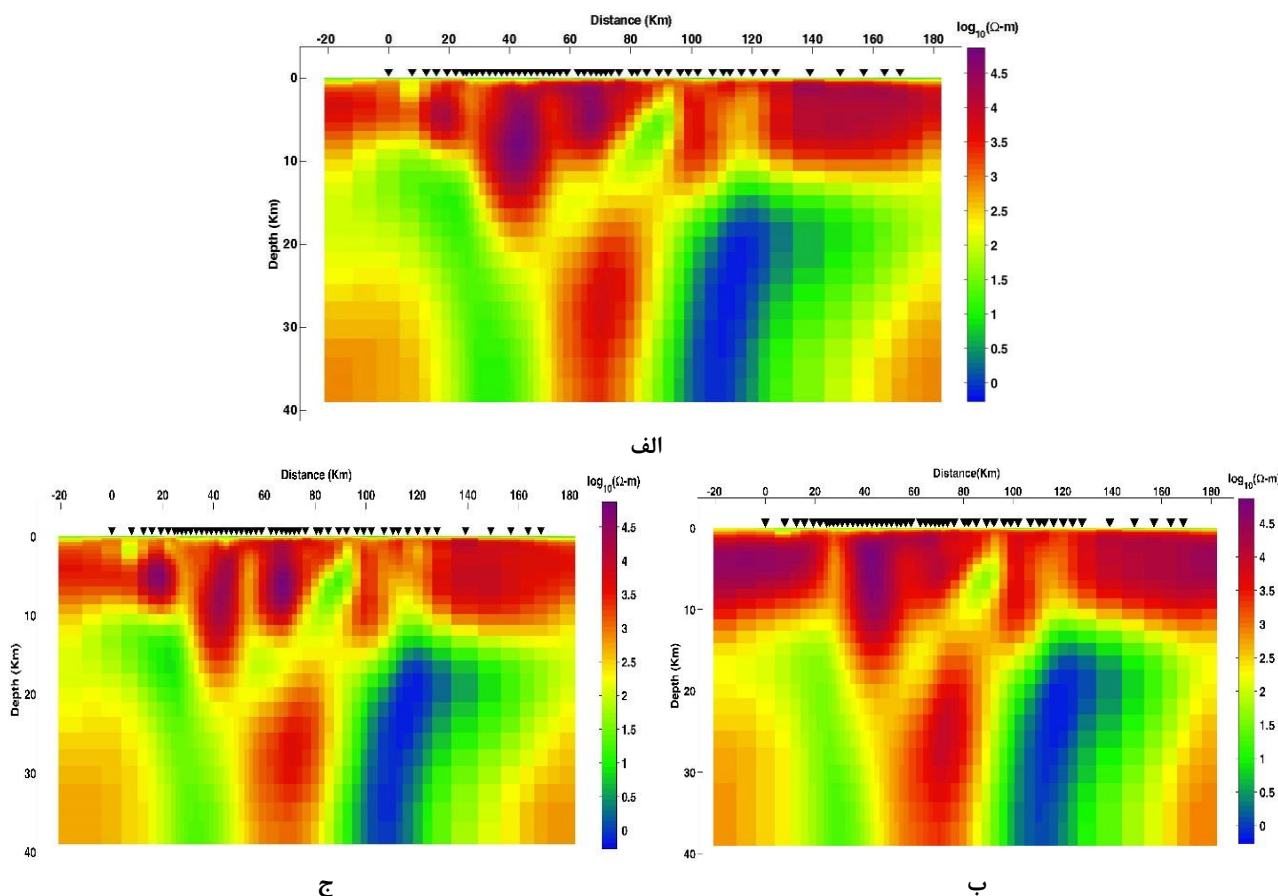
۲-۵- وارون سازی براساس روش دو قطری سازی لنکروس

روش دو قطری سازی لنکروس، الگوریتمی براساس روش های حل تکراری است که با انتقال سیستم معادلات به زیر فضایی با ابعاد کمتر (زیر فضای کرلیف K_k)، سرعت اجرای الگوریتم و حل مساله وارون را افزایش می دهد (Abedi et al., 2013؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۴). در صورتی که سیستم معادلات به صورت کلی رابطه (۴) باشد، بردار پارامترهای مدل قابل دستیابی از رابطه زیر خواهد بود:

$$\rho = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T d^{obs} \quad (12)$$

حل مساله وارون براساس ماتریس ژاکوبینی با ویژگی های دو قطری بودن و ابعادی کوچک تر نسبت به ماتریس ژاکوبین اصلی منجر به کاهش میزان فضای ذخیره سازی حافظه رایانه و زمان مدل سازی وارون و در نتیجه افزایش سرعت اجرای الگوریتم خواهد شد. روش دو قطری سازی لنکروس روشی ایده آل در تخمین پارامترهای مدل در مسائلی است که تعداد پارامترهای مدل بیشتر از تعداد داده ها می باشد و به اصلاح مساله فرو برآورد است. با کمینه کردن نرم ۲ رابطه عدم برازش داده $\|G\rho - d\|_2^2$ می توان رابطه $d = G\rho$ را حل نمود. بنابراین جواب ρ را می توان با اعمال n مرتبه تکرار الگوریتم وارون سازی به روش دو قطری سازی لنکروس به دست آورد (Paige and Saunders, 1982). مساله حداقل مربعات در رابطه (۳) نیز، با بکارگیری الگوریتم دو قطری سازی لنکروس را می توان به صورت زیر حل نمود:

$$\min \left\| \begin{bmatrix} G \\ \sqrt{\lambda} L \end{bmatrix} \rho - \begin{bmatrix} d^{obs} \\ 0 \end{bmatrix} \right\|_2^2 \quad (13)$$



شکل (۲): مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری و فاز مدل مصنوعی منطقه لچلند استرالیا بر مبنای الگوریتم دوقطری سازی لنکروس، الف - مدل وارون‌سازی شده بر اساس روش ACB ($RMS = 0.203\%$), ب - مدل به دست آمده از روش GCV تعمیم یافته ($RMS = 0.167\%$), ج - مدل به دست آمده از روش منظم‌سازی انطباقی ($RMS = 0.145\%$).

باشد. همچنین بیش‌ترین میزان تطابق و کمترین خطای مدل‌سازی نیز مربوط به روش منظم‌سازی انطباقی می‌باشد که با توجه به پارامترهای، میزان حافظه مورد نیاز، زمان لازم برای انجام مدل‌سازی و همگرایی به جواب مطلوب در تکرارهای کمتر براساس نتایج جدول (۱) را دارا می‌باشد.

با توجه به شکل (۲)، هر سه مدل به دست آمده، تطابق و مشابهت نسبتاً یکسانی با یکدیگر دارند و به خوبی مناطق با مقاومت‌ویژه‌های زیاد و کم را شناسایی کرده‌اند. تفاوت اساسی در مدل‌های به دست آمده، مربوط به شناسایی دقیق مرزهای آنومالی می‌باشد که در روش منظم‌سازی انطباقی این امر به خوبی مشخص شده است و بیانگر دقت بالای این روش می‌باشد.

جدول (۱): مقایسه روش‌های مختلف انتخاب پارامتر منظم‌سازی بر مبنای الگوریتم دوقطری سازی لنکروس

روش‌ها	زمان سپری شده (ثانیه)	میزان حافظه لازم (Mb)	تعداد تکرارهای بهینه	خطای RMS
متعادل‌سازی قید فعال (ACB)	۱۷۱۸،۵	۱۱۸،۹	۱۱	۰،۲۰۳٪
GCV تعمیم یافته	۲۱۸۵،۵	۱۶۱،۲	۱۳	۰،۱۶۷٪
منظم‌سازی انطباقی	۹۲۳،۸	۸۸،۹	۸	۰،۱۴۵٪

یافته برای هر مقدار انتخابی پارامتر منظم‌سازی در بازه بین کمترین و بیشترین مقادیر که توسط کاربر انتخاب شده است، محاسبات پیشرو در هر تکرار انجام می‌شود در نتیجه در وارون‌سازی داده‌های در حجم بزرگ و داده‌های سه بعدی مگنتوتلوریک میزان زمان و حافظه به نسبت بیشتری نیاز خواهیم داشت. لازم به ذکر است که در روش‌های مذکور، محدوده جستجوی پارامتر منظم‌سازی تأثیر به سزایی در بازدهی محاسباتی روش‌ها خواهد داشت. روش منظم‌سازی انطباقی با محاسبه نسبت توابع عدم برازش داده به نرم مدل در هر تکرار و کمینه کردن تابع

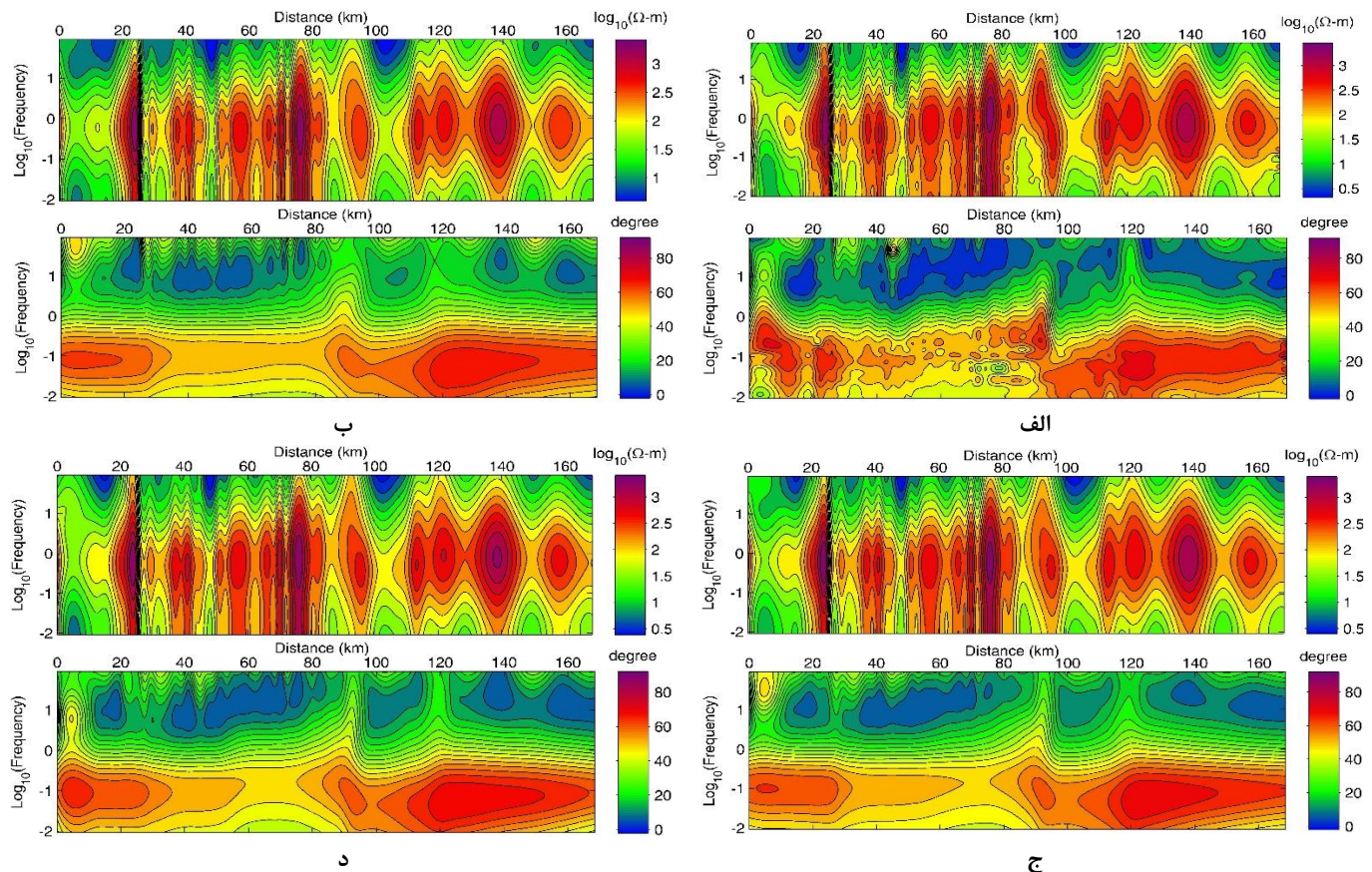
تعداد تکرارهای بهینه در این مقایسه براساس دستیابی به مقداری ثابتی به عنوان کمترین مقدار تابع عدم برازش داده (شرط کنترلی) در همه روش‌ها منظور شده است. با توجه به نتایج جدول (۱)، روش GCV تعمیم یافته دارای بیش‌ترین میزان زمان و حافظه لازم برای انجام مدل‌سازی است که این امر به دلیل بررسی مقادیر مختلفی از پارامتر منظم‌سازی و حل محاسبات متعدد پیشرو در جهت کمینه کردن تابع، به ازای هر تکرار مساله وارون در یک محدوده جستجوی بزرگ و یافتن مقداری بهینه است. در روش ACB نیز، همانند روش GCV تعمیم

شده است. این منطقه در شمال غرب ایران و در استان اردبیل و جنوب غربی شهر نیر قرار دارد. محدوده مورد نظر در بخشی از بلوک قفقاز و ایران قرار دارد که از جهات مختلف تحت تاثیر تنش ها و دگرشکلی های ناشی از حرکات زمین ساختی حاکم بر این منطقه در رخداد تکتونیکی آلیی است. در یک نگاه کلی می توان این منطقه را بخشی از کناره بلوک قاره ای تصور نمود که دستخوش پویایی تکتونو - ماگمایی نئوژن کواترنر شده است.

هدف، به انتخاب بهینه پارامتر منظم سازی اقدام می کند و در نتیجه کمترین زمان برای دستیابی به مقداری مناسب صرف خواهد شد. لذا بر طبق نتایج جدول (۱)، روش منظم سازی انطباقی به عنوان سریع ترین روش با حداکثر میزان دقت لازم در شناسایی مرزها برای وارون سازی داده های مگنتوتلوریک دو بعدی در حجم بزرگ و داده های سه بعدی پیشنهاد می شود.

۳-۲- داده های مگنتوتلوریک سبلان

آزمایش های وارون سازی و بررسی روش های انتخاب پارامتر منظم سازی برای یک دسته داده واقعی مگنتوتلوریک در منطقه بوشلی (نیر) انجام



شکل (۳): مقایسه شبه مقاطع داده های مقاومت ویژه ظاهری و فاز مشاهده ای (الف) منطقه لچلند استرالیا بر مبنای الگوریتم دوقطری سازی لنگزوس و پاسخ مدل حاصل از وارون سازی دو بعدی با بکارگیری روش های ACB (ب)، GCV تعمیم یافته (ج) و منظم سازی انطباقی (د).

باختری اردبیل فرو افتادگی با ناهنجاری منفی است که مرکز آن آبگرم سرعین است.

آنچه مسلم است ضرورت تشکیل میدان زمین گرمایی وجود کانون حرارتی گرم در ژرفا، معبر و مسیر حرکتی مناسب برای انتقال و انباشت آبگرم (مخزن مناسب) و در نهایت وجود پوشش مناسب جهت حفظ مخزن میدان زمین گرمایی است. در منطقه مورد مطالعه سازندهای مناسبی برای ایجاد سنگ مخزن و پوشش سنگ وجود دارد مثل سازندهای کربناته پرمین - تریاس و پوشش شیلی سازند کرج، و از طرفی کانون حرارتی مرتبط با هر یک از سیستم های ماگماتوژن می باشد که به هر روی انواع جوان تر شرایط و قدرت مناسب تر دارند و از اهمیت بالاتری برخوردارند و در منطقه سبلان، سیستم آتشفشانی سبلان جوان تر و از نظر پتروژنز مناسب ترین سیستمی است که می تواند حرارت مناسب را

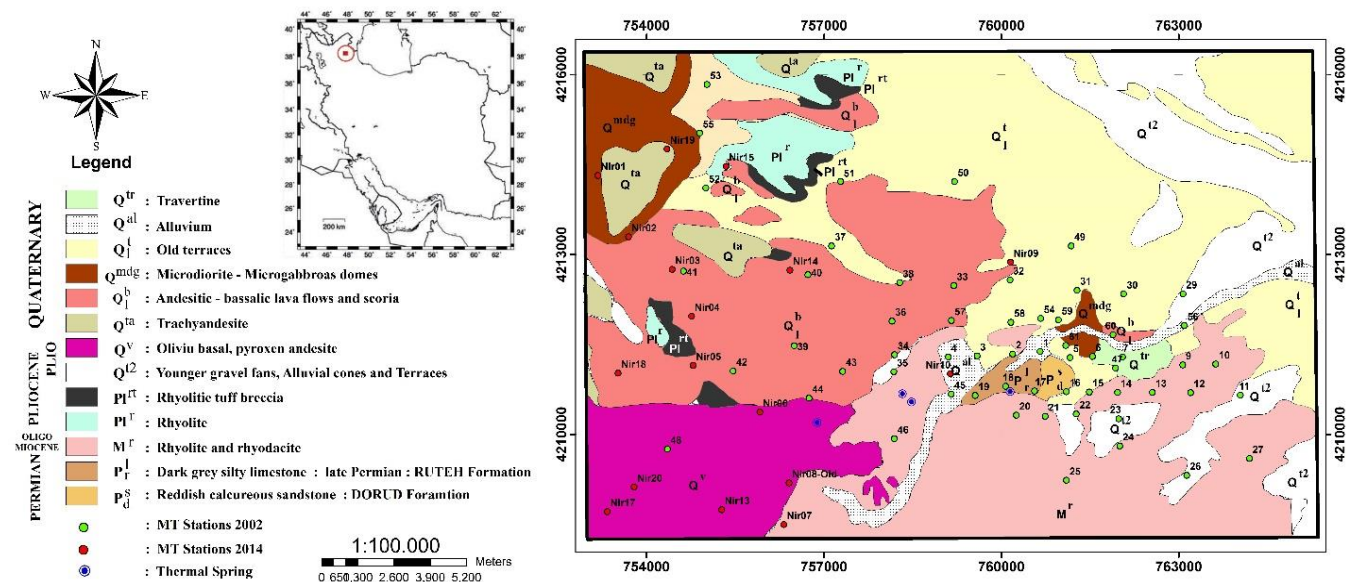
فرآیندهای این پدیده به صورت ماگماتیسم آتشفشانی نئوژن کواترنر بروز کرده است؛ که تشکیل سیستم های زمین گرمایی نیز مرتبط باهمین رخداد است. در مقیاس ناحیه ای، محدوده جزئی از کناره فرو افتاده سیستم سبلان به حساب می آید که سیستم ساختار حلقوی بالیخلوچای - قره سو و تلخه زرد در آن جریان دارد. این سیستم خود می تواند فرآیند پویایی ساختمانی خطواره ها و ساختارهایی باشد که اصولاً سیستم آتشفشانی سبلان را تحت کنترل دارد. منطقه متشکل از یک مجموعه سیستم های هورست و گرابن بوده که در آن هورست ها محل صعود و نفوذ توده های ماگمایی بوده و گرابن ها محل انباشته شدن رسوبات تخریبی در آن ها شده است؛ به نحوی که بر پایه صفات گرانی سنجی توده سبلان و قصر داغ ناهنجاری مثبت دارند حال آنکه منطقه جنوبی

پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SSMT2000 صورت گرفته است. برای شناسایی مخزن زمین گرمایی در دامنه عمقی مناسب، تانسورهای امپدانس در ۳۶ فرکانس در محدوده ۰.۰۰۸۲۵ تا ۲۳۷ هرتز اندازه‌گیری شده است. شکل (۵) مقاومت ظاهری و منحنی فاز چهار ایستگاه MT را در حالت TE و TM برای داده‌های میدانی نشان می‌دهد.

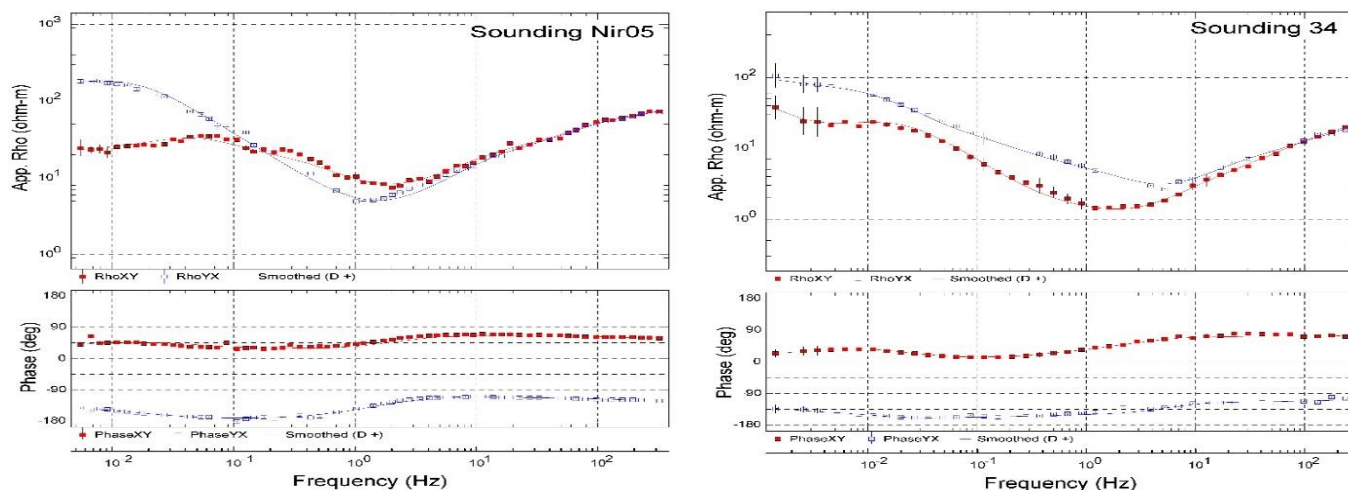
داده‌های ۱۲ ایستگاه MT در طول پروفیل انتخابی (P7) از منطقه مورد مطالعه برای وارون‌سازی دو بعدی در شکل (۶) نشان داده شده است (زینال‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). نتایج حاصل از بکارگیری روش‌های مختلف انتخاب پارامتر منظم‌سازی به همراه استفاده از روش دو قطری‌سازی لنگزوس به منظور تسریع روند وارون‌سازی در شکل (۷) آمده است. همچنین در شکل (۸)، شبه مقاطع داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری و فاز این مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای منطقه مقایسه شده است.

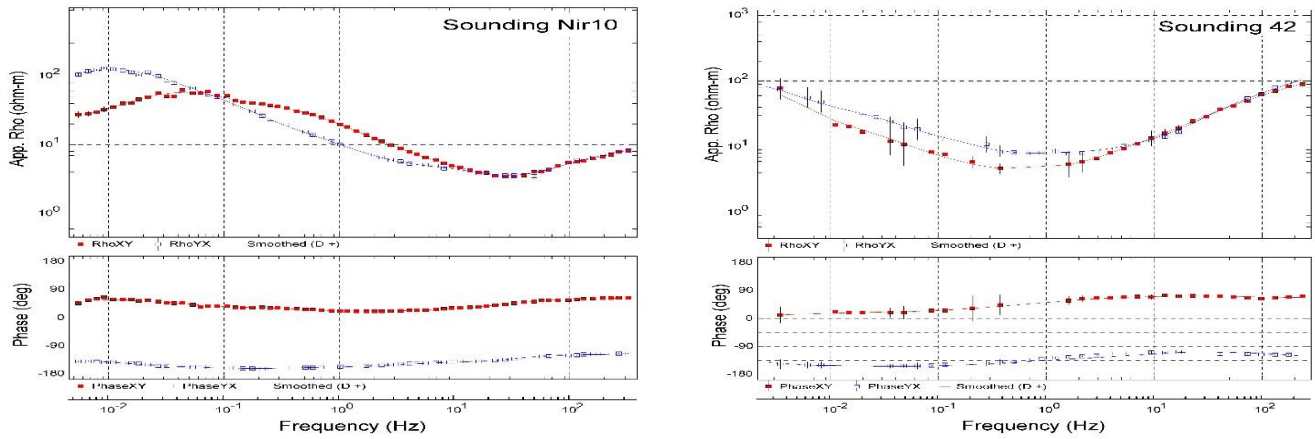
تولید نماید حال آنکه سیستم قره داغ به واسطه سرشت بازالتی علیرغم جوان بودن، احتمالاً از ژرفای بیشتری نشئت گرفته است. سیستم ولکانو - پلوتونی نیر - زرج آباد چندان جوان نبوده و به واسطه کپه‌ولت فاقد منطقه مناسب است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که سیستم زمین گرمایی کنونی در گرو فرآیند پویای ماگمایی سبلان است؛ که توانسته کانون داغی را به وجود آورده باشد. سیستم‌های زمین گرمایی بوشلی و سرعین عموماً در فرو افتادگی ساختاری اردبیل - نیر است؛ که از کانون ماگمایی سبلان فاصله دارد، اما جایگاهی است که می‌تواند میزبان ذخایری از آب-های داغ در ژرفای منطقه باشد (کاوشگران، ۱۳۷۵). نقشه ساختارهای زمین‌شناسی بوشلی به همراه موقعیت ایستگاه‌ها و چشمه‌های آبگرم در شکل (۴) نشان داده شده است.

برداشت داده‌های مگنتوتلوریک برای شناسایی مخزن زمین گرمایی در منطقه بوشلی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله نخست ۶۰ ایستگاه MT در سال ۱۳۸۱ با دستگاه Metronix GMS05 (گویا، ۱۳۸۱) و در مرحله دوم ۲۱ ایستگاه MT در سال ۱۳۹۳ با دستگاه Phoenix MTU-5A برداشت شده است (مرادزاده، ۱۳۹۳). همچنین

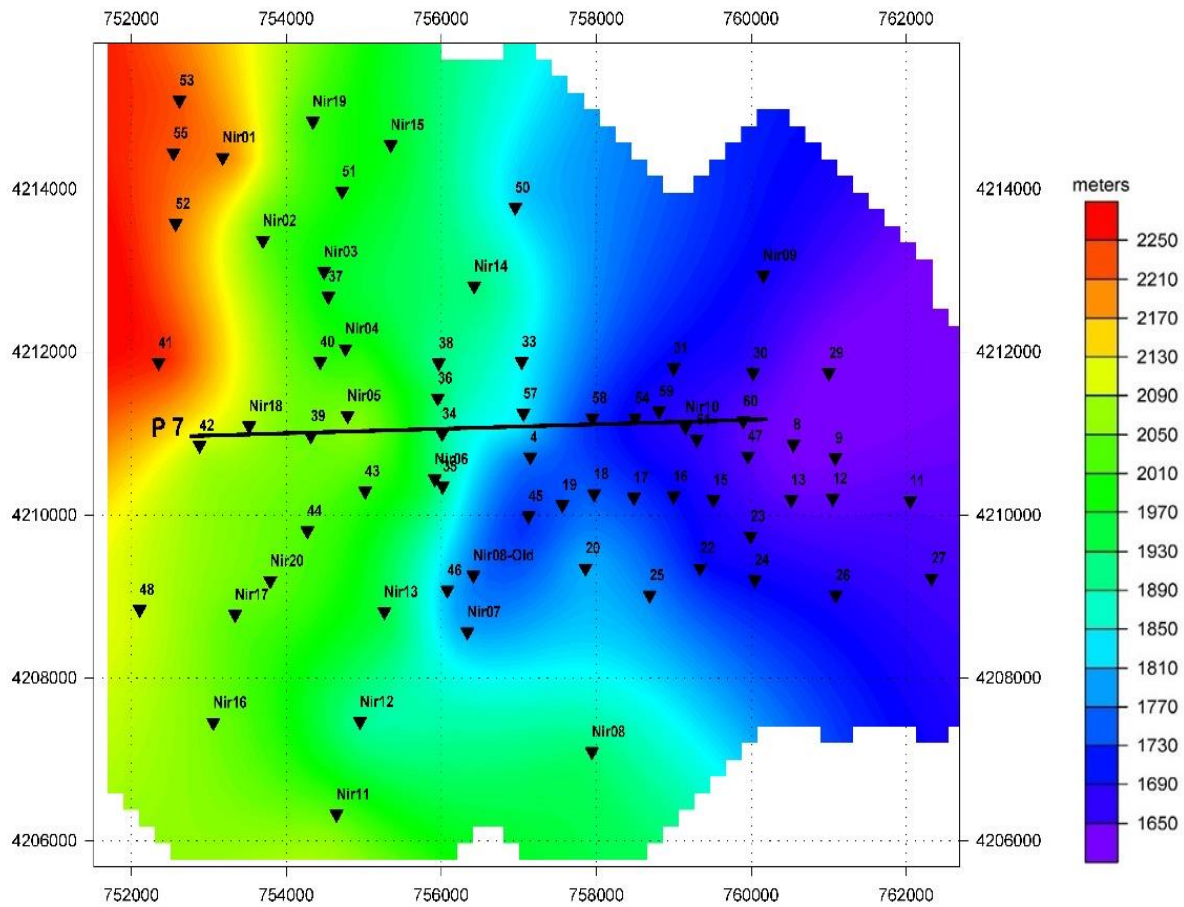


شکل (۴): موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه بوشلی به همراه محل چشمه‌های آب گرم و ایستگاه‌های MT.

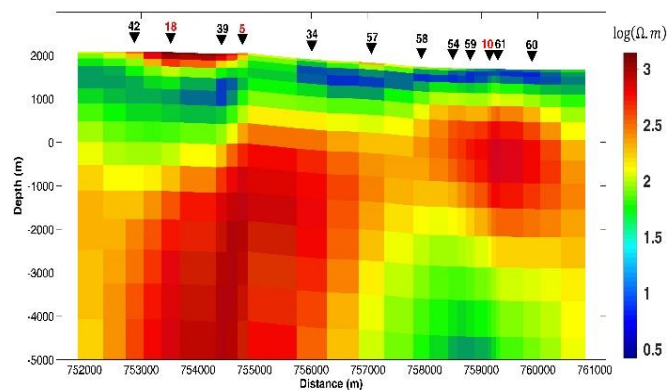




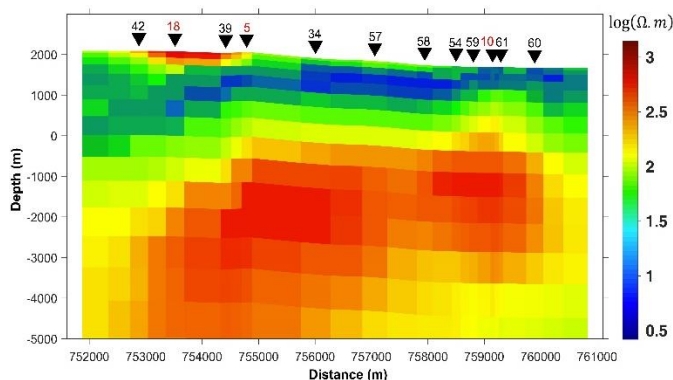
شکل (۵): منحنی های مقاومت ویژه و فاز برای ۴ ایستگاه MT در حالت های TE و TM منطقه زمین گرمایی بوشلی (نیر).



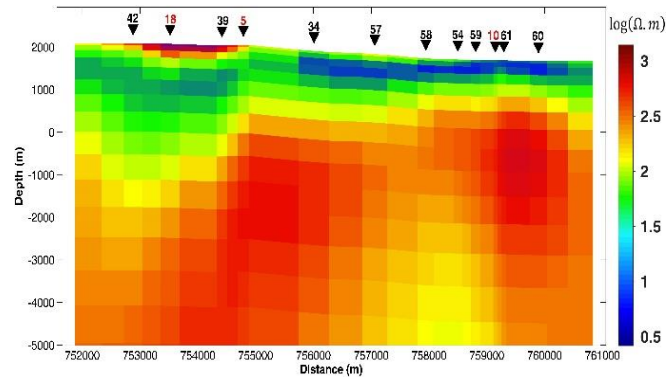
شکل (۶): نقشه توپوگرافی و توزیع ایستگاه های MT و در منطقه جنوب سبلان (بوشلی)، استان اردبیل (WingLink, 2003).



الف



ج



ب

شکل (۷): مقایسه نتایج مختلف انتخاب پارامتر منظم‌سازی بر روی پروفیل P7 منطقه زمین گرمایی بوشلی (نیر). الف - مدل به دست آمده از روش ACB ($RMS = 0.66\%$)، ب - مدل به دست آمده از روش GCV تعمیم یافته ($RMS = 0.53\%$)، ج - مدل به دست آمده از روش منظم‌سازی انطباقی ($RMS = 0.42\%$).

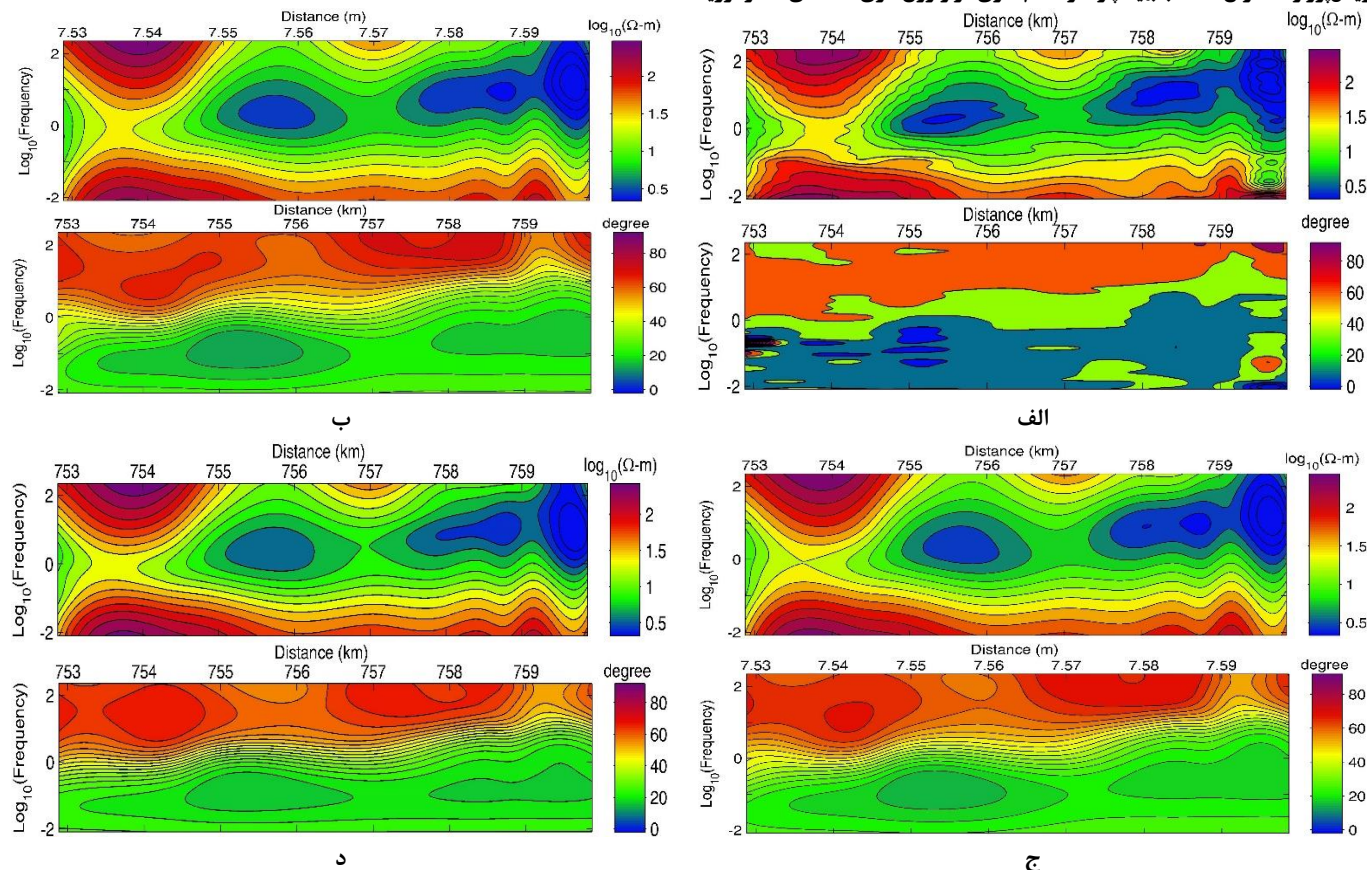
از روش‌های مختلف انتخاب پارامتر منظم‌سازی بر روی پروفیل P7 منطقه زمین گرمایی بوشلی (نیر)، روش منظم‌سازی انطباقی مدلی به مراتب دقیق‌تر به خصوص در شناسایی مرزهای مناطق با مقاومت‌های ویژه‌های کم و زیاد و همچنین کمترین زمان و خطای محاسباتی را ارائه کرده است. بعد از این روش، به ترتیب، روش‌های GCV تعمیم یافته و روش متعادل‌سازی قید فعال (ACB) نتایج قابل قبولی داشته‌اند که موید نتایج به دست آمده از مدل مصنوعی می‌باشد.

جدول (۲) نتایج به دست آمده برای مدل‌سازی پروفیل P7 منطقه زمین گرمایی بوشلی (نیر) را نشان می‌دهد.

در تمامی پروفیل‌ها، روند مقاومت‌ویژه زیاد در سطح مشاهده می‌شود. با نظر گرفتن اطلاعات نقشه زمین‌شناسی این مقاومت به دلیل وجود سنگ‌های ریولیتی و آندزیتی آتشفشانی می‌باشد. مقاومت‌ویژه کم در عمق ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری حاکی از وجود کانی‌های رسی ژئولیت - اسمکتیت و آلتراسیون آرژیلیتی به عنوان پوشش مخزن می‌باشد. همچنین مقاومت‌ویژه زیاد در عمق ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متری را می‌توان ناشی از وجود سنگ‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی یا توده‌های لاکولیتی با جنس داسیت باشد که می‌توان به عنوان منبع داغ زمین گرمایی تفسیر نمود (زینال‌پور، ۱۳۹۳). در مقایسه نتایج مقاطع دو بعدی به دست آمده

جدول (۲): مقایسه روش‌های مختلف انتخاب پارامتر منظم‌سازی بر روی پروفیل P7 منطقه زمین گرمایی بوشلی (نیر)

روش‌ها	زمان سپری شده (ثانیه)	میزان حافظه لازم (Mb)	تعداد تکرارهای بهینه	خطای RMS
متعادل‌سازی قید فعال (ACB)	۲۷۹،۱	۴۱،۲	۹	٪ ۰،۶۶
GCV تعمیم یافته	۳۵۲،۹	۵۳،۸	۱۰	٪ ۰،۵۳
منظم‌سازی انطباقی	۱۶۴،۳	۳۳،۹	۵	٪ ۰،۴۲



شکل (۸): مقایسه شبه مقاطع داده های مقاومت ویژه ظاهری و فاز مشاهده ای (الف) بر روی پروفیل P7 منطقه زمین گرمایی بوشلی (نیر) بر مبنای الگوریتم دوقطری سازی لنگزوس و پاسخ مدل حاصل از وارون سازی دو بعدی با بکارگیری روش های ACB (ب)، GCV تعمیم یافته (ج) و منظم سازی انطباقی (د).

۴ - نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، روش GCV تعمیم یافته به دلیل محاسبات مربوط به مدل سازی پیشرو برای هر پارامتر منظم سازی انتخابی در هر تکرار در یک محدوده جستجوی بزرگ، بیشترین میزان حافظه و زمان را برای انجام وارون سازی نیاز دارد. روش متعادل سازی قید فعال (ACB) از روش GCV تعمیم یافته سریع تر است ولی در مقایسه با روش منظم سازی انطباقی کندتر عمل می کند. این روش نیز، همانند روش GCV تعمیم یافته نیازمند محاسبه مقداری بهینه در یک محدوده جستجو بین بیشترین و کمترین مقدار انتخابی توسط کاربر است در نتیجه میزان زمان و حافظه افزایش خواهد یافت ولی میزان بار محاسباتی این روش در مقایسه با روش GCV تعمیم یافته کمتر است. از نظر دقت عملکرد مدل سازی، هر سه روش مدل هایی قابل قبول و تقریباً مشابهی ارائه داده اند. روش منظم سازی انطباقی در مقایسه با روش های دیگر روشی بسیار قدرتمند در تخمین پارامتر منظم سازی می باشد، این روش دارای کمترین میزان حافظه و زمان لازم برای انجام مدل سازی وارون در کمترین تکرار می باشد همچنین حداکثر دقت با کمترین میزان خطای RMS نیز مربوط به این روش می باشد. کارآمدی این روش در تخمین پارامتر منظم سازی مطلوب و در نتیجه تولید مدلی ایده آل برای وارون سازی داده های مصنوعی و واقعی، در این تحقیق نشان داده شده

است. بنابراین این روش به عنوان روشی مناسب در انتخاب پارامتر منظم سازی برای وارون سازی داده های مگنتوتلوریک دو بعدی در حجم بزرگ محسوب می گردد.

۵- منابع

رضایی، م.، مرادزاده، ع.، نجاتی کلاته، ع. و آقاجانی، ح.، ۱۳۹۴، برآورد خودکار پارامتر منظم سازی به روش تخمینگر ناریب ریسک احتمالی در وارون سازی سه بعدی مقید داده های مغناطیسی، نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، ۲، ۳، ۱۴۵-۱۵۴.

زینالپور، ع.، قائدرحمتی، ر.، مرادزاده، ع. و رحمانی، م. ر.، ۱۳۹۷، اکتشاف ذخایر زمین گرمایی در منطقه بوشلی - سبلان با استفاده از داده های مگنتوتلوریک، مجله پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، ۴، ۲، ۱۷۱-۱۸۶.

زینالپور، ع.، ۱۳۹۳، پردازش، مدل سازی و تفسیر داده های مگنتوتلوریک منطقه بوشلی (استان اردبیل) با هدف اکتشاف منابع زمین گرمایی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

سانا، ۱۳۷۵، گزارش زمین شناسی ناحیه نیر (جنوب غرب شهرستان اردبیل) شرکت کاوشگران، شرح نقشه زمین شناسی ۱:۲۰۰۰۰.

- Lee, S. K., Kim, H., J., Song, Y., and Lee, C., 2009, MT2DInvMatlab- A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion: *Computers & Geosciences*, **35**, 1722-1735.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1998, 3-D inversion of gravity data, *Geophysics*, **63**, 1, 109.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1999, 3-D inversion of DC resistivity data using an L-curve criterion: 69th Ann. Int. Meeting of the SEG, Expanded Abstracts, 251–254.
- Newman, G. A., and Alumbaugh, D. L., 2000, Three dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients: *Geophys. J. Int.*, **140**, 410 – 424.
- Oldenburg, D. W., and Li, Y., 2005, Inversion for applied geophysics: A tutorial, pp 89-150, In: “Near-surface geophysics”, Butler, D. K., SEG, Investigations in Geophysics, US.
- Paige, C. C., and Saunders, M. A., 1982, LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares, *ACM Trans. Math. Soft. (TOMS)*, **8**, 1, 43.
- Rodi, W. L., and Mackie, R. L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion: *Geophysics*, **66**, 174–187.
- Rodi, W.L., 1976. A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **44**, 483–506.
- Sasaki, Y., 2004, Three dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data: *Earth Planets Space*, **56**, 239–248.
- Siripunvaraporn, W., and Egbert, G., 2000, An efficient data sub space inversion method for 2-D magnetotelluric data: *Geophysics*, **65**, 791– 803.
- Smith, J. T., and Booker, J. R., 1991, Rapid relaxation inversion of two- and three-dimensional magnetotelluric data: *J. Geophys. Res.*, **96**, 3905–3922.
- Tikhonov, A. N., and Arsenin, V. Y., 1977, *Solution of ill-posed problems*: V. H. Winston and Sons.
- Vatankhah, S., Renaut, R. A., and Ardestani, V. E., 2014, Regularization parameter estimation for underdetermined problems by the χ^2 principle with application to 2D focusing gravity inversion, *Inverse Prob.*, **30**, 85002.
- Vio, R., Ma, P., Zhong, W., Nagy, J., Tenorio, L., and Wamsteker, W., 2004, Estimation of regularization parameters in multiple image deblurring: *Astron. Astrophys.*, **423**, 1179–1186.
- Vogel, C. R., 2002, Computational methods for inverse problems, **23**, Siam, US, 182.
- Wahba, G., 1990, *Spline Models for observational data*: SIAM, Philadelphia.
- Walker, S. E., 1999, Inversion of EM data to recover 1-D conductivity and a geometric survey parameter: MSc thesis, University of British Columbia.
- Yi, M. J., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2003, Enhancing the resolving power of least squares inversion with active constraint balancing: *Geophysics*, **68**, 931–941.
- Zhdanov, M. S., 2002, *Geophysical inverse theory and regularization problems*: Elsevier.
- قائد رحمتی، ر.، مرادزاده، ع.، فتحیان‌پور، ن. و سونگ ک. ل.، ۱۳۹۴، بهبود وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از روش‌های خودکار انتخاب پارامتر منظم‌سازی، *مجله ژئوفیزیک ایران*، **۹**، ۳۰–۴۵.
- گویا، ن.، ۱۳۸۱، گزارش طرح اولیه اکتشاف منابع زمین گرمایی در منطقه جنوب سبلان (بوشلی)، سازمان انرژی اتمی ایران، مرکز توسعه انرژی‌های نو، بخش زمین گرمایی.
- مرادزاده، ع.، ۱۳۹۳، گزارش اکتشاف ذخایر زمین گرمایی در منطقه بوشلی (نیر) توسط داده‌های مگنتوتلوریک، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا).
- Abedi, M., Gholami, A., Norouzi, G.H., and Fathianpour, N., 2013, Fast inversion of magnetic data using Lanczos bidiagonalization method, *J. Appl. Geophys.*, **90**, 126.
- Aster, R. C., Borchers, B., and Thurber, C. H., 2013, *Parameter estimation and inverse problems*, second edition, Academic Press, US, 360.
- Bauer, F., and Lukas, M. A., 2011, Comparing parameter choice methods for regularization of ill-posed problems: *Mathematics and Computer in Simulation*, **81**, 1795-1841.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data: *Geophysics*, **52**, 289–300.
- Engl, H. W., Hanke, M., and Neubauer, A., 1996, *Regularization of inverse problems*, **375**, Kluwer, Dordrecht, the Netherlands, 333.
- Farquharson, C. G., and Oldenburg, D. W., 2004, A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non- linear inverse problems: *Geophys. J. Int.*, **156**, 411–425.
- Geosystem SRL., 2003, *A guide to using WinGLink*, ver.2. 3. 1.
- Haber, E., and Oldenburg, D. W., 2000, A GCV based method for nonlinear ill-posed problems: *Computer and Geosciences*, **4**, 41–63.
- Hadamard, J., 1923, *Lectures on Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equations*: Yale University Press, New Haven.
- Hansen, P. C., 1997, Rank-deficient and discrete ill-posed problems: numerical aspects of linear inversion: SIAM, Philadelphia.
- Hansen, P. C., 2010, *Discrete inverse problems: insight and algorithms*, **7**, SIAM, US, 213.
- Hansen, P. C., Jensen, T. K., Rodriguez, G., 2007, An adaptive pruning algorithm for the discrete L-curve criterion: *J. Comput. Appl. Math.*, **198**, 483–492.
- Hansen, P.C., 2007, *Regularization Tools Version 4.1 for Matlab 7.3*, Numerical Algorithms, **46**, 189-194.
- Lawson, C. L., and Hanson, R. J., 1974, *Solving least squares problems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, US, 330.



Optimal selection of regularization parameter in inversion of magnetotelluric data

Aref Zainalpour ^{1*}, Gholamreza Kamali ², Ali Moradzadeh ³ and Mohamad Rezayi ⁴

1- PhD Candidate of Mineral Exploration; Department of Mining Engineering, Bahonar University of Kerman, Iran.

2- Associate Professor; Department of Mining Engineering, Bahonar University of Kerman, Iran.

3- Professor; School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

4- Assistant Professor; Department of Mining Engineering, Malayer University, Iran.

Received: 1 November 2020; Accepted: 21 March 2021

Corresponding author: aref.zainalpour@gmail.com

Keywords

Bushli,
Geothermal
Magnetotelluric
2D inversion algorithm
Regularization parameter
Lanczos bidiagonalization.

Extended Abstract

Summary

The essential issue in the interpretation of magnetotelluric (MT) field data is the solutions for inverse problems that should be in agreement with realistic subsurface geological structures. The MT data inverse modeling is known as an ill posed and nonlinear inverse problem, therefore, in order to prevent the problem of nonunique solution and to obtain meaningful results, it is normally solved using Tikhonov regularization method as the most popular regularization method. Another crucial problem in geophysical data inversion particularly MT field data is to reduce computation time and memory

requirements. For achieving more precise inversion solutions, selection of the optimal regularization parameter value is an important factor in the inversion process. The novelty of the present study is to propose a new two-dimensional (2D) algorithm that has been developed for smooth inversion of MT data in which the optimal regularization parameter has been considered. In order to achieve this objective, the forward solution and Lanczos bidiagonalization (LB) algorithm have been implemented in a MATLAB code. For finding an appropriate value for the regularization parameter, adaptive regularization has been used and compared with modified generalized cross-validation (MGCV) and active constraint balancing (ACB) methods. The generated MT data by a 2D synthetic model and Bushli (Nir) geothermal MT field data in Ardabil Province, Iran, have been used in the inversion by the proposed algorithm. The results indicate that the proposed method is more effective and faster than the compared methods especially in less memory usage, decreasing elapsed time, and more accurate solution in the inversion process.

Introduction

Magnetotellurics is widely used for exploration of geothermal resources because of its potential in the conductivity contrast of deep geological structures in geothermal regions. Hence, 2D inversion of the MT data is a major step in determination of physical properties of exploration targets and their geometric quantitative dimensions. In recent years, many attempts have been made on the development of 2D MT inversion algorithms and interpretation of the results. The solutions for inverse problems of MT data are nonunique and unstable since the measured data are accompanied by noise. The Tikhonov regularization theory is a common method for resolving unstable and ill posed inverse problems. In solving this regularized inverse problem, selection of an optimal regularization parameter value is important for achieving an ideal inverse modeling result. This parameter controls the balancing between the minimization process of the stabilizing and the misfit function. Therefore, it must be chosen carefully. In this paper, a novel method has been presented in which the optimal value of the regularization parameter for 2D inversion of the MT data is selected based on the LB method to increase the speed and accuracy of the results of the inversion.

Methodology and Approaches

Numerical modeling of geophysical response for a given geophysical model is known as forward problem. The directly inverting of the forward sensitivity matrix is very difficult especially in large scale problems, instead, one needs to use iterative methods to calculate it quickly. To achieve this, a fast iterative solver like LB algorithm is used for smooth inversion of MT field data. In this method, the large forward sensitivity matrix is substituted by a smaller dimension bidiagonal matrix, which avoids large matrix multiplication and basis vectors storing. Therefore, the inversion process

speed in solving the large inversion problems and obtaining accurate results will increase, and the required memory and inversion calculation time will also be decreased. In order to find an appropriate value for the regularization parameter, a novel method has been presented in which adaptive regularization, has been used and compared with two conventional methods, namely MGCV and ACB. All these methods have been used in MATLAB codes and combined with the LB method, and then has been added to software package MT2DInvMatlab developed by Lee (2009). To demonstrate the efficiency of the proposed technique comprising of the above-mentioned methods, it has been applied on synthetic MT data having 3 percent Gaussian noise, and also, real MT data of the Bushli (Nir) geothermal field in Ardabil Province, Iran.

Results and Conclusions

The models produced from the inversion of the synthetic MT data and the Bushli MT field data set using the adaptive regularization, MGCV, and ACB methods are almost similar. The constructed model from using adaptive regularization is slightly better than the model obtained from MGCV and ACB methods. therefore, with respect to the results obtained from 2D inversion of the synthetic MT data and the Bushli (Nir) MT field data, the adaptive regularization method provides a more accurate solution especially in estimating the conductive layer and reservoir boundaries. In addition, this method, compared to the MGCV and ACB methods, is faster and requires less memory in the inversion process. Hence, this method can be considered as the most reliable method for selection of the optimal regularization parameter in the inversion of large 2D and 3D magnetotelluric data sets.
