



## تخمین عمق آنومالی با استفاده از طیف توان اصلاح شده داده‌های میدان گرانی

اردلان خزانی فر<sup>۱\*</sup>، علی نجانی کلاهی، امین روشندل کاهو<sup>۲</sup>، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

روش‌های گوناگونی برای تخمین عمق بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل وجود دارد. آنالیز طیف توان یکی از این روش‌ها می‌باشد که در ابتدا توسط روش اسپکتور و گرت انجام می‌شد. در روش مذکور منشأ آنومالی به صورت رندوم و ناهم‌بسته در نظر گرفته می‌شد. این روش در بخش‌های مختلفی از جهان مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات مربوط به حفاری‌های KTB نشان داد که فرض‌های روش اسپکتور و گرت در مورد منشأ آنومالی صحیح نیست. روش آنالیز طیف توان اصلاح شده حاصل از داده‌های میدان‌های گرانی و مغناطیس به منظور یافتن مقادیر عمق و خواص آماری مربوط به توزیع منشأ آنومالی با در نظر گرفتن توزیع واقع‌گرایانه برای این منشأها یک روش سودمند و کاربردی است. تفسیر داده‌های مربوط به میدان‌های گرانی و مغناطیس به دلیل اجتناب از پیچیدگی‌های ریاضی مربوط به محاسبه طیف عموماً در حوزه فرکانس انجام می‌شود. اگر طیف توان بدست آمده از تبدیل فوریه داده‌های میدان پتانسیل در مقابل مقادیر عدد موج تصویر شود، فاکتورهای زیادی مانند گسترش سطحی منشأ آنومالی، عمق منشأ آنومالی، ضخامت آن و فاکتورهای مربوط به تباین خواص فیزیکی مانند چگالی یا مغناطیدگی در شکل آن دخالت دارند، اما فاکتور غالب در شکل طیف بدست آمده فاکتور عمق منشأ آنومالی است.

واژگان کلیدی

تبدیل فوریه، تخمین عمق، روش اسپکتور و گرت، روش طیف توان اصلاح شده، میدان گرانی و مغناطیس

مقدمه

شده توسط پیلکینگتون و تودوسچاک (۱۹۹۳) [۶]، ماوس و دیمری (۱۹۹۶) [۷]، فدی (۱۹۹۷) [۸]، ژائو و تایبو (۱۹۹۸) [۵]، ماوس (۱۹۹۹) [۹] و کوآترا (۲۰۰۰) [۱۰] توسعه داده شد.

تحلیل طیفی داده‌های گرانی و مغناطیس در طول دو دهه گذشته به‌طور گسترده برای به‌دست آوردن عمق ساختارهای زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. روش تخمین عمق با استفاده از تحلیل طیف توان یکی از روش‌های اتوماتیک تخمین عمق است که با در نظر گرفتن توزیع آماری منشأهای ایجاد آنومالی به تخمین عمق می‌پردازد. اولین تحلیل طیف توان به‌منظور تخمین عمق آنومالی‌های میدان پتانسیل توسط اسپکتور و گرت (۱۹۷۰) [۱] انجام شد و بعدها توسط (هاهن، ۱۹۷۶) [۲]؛ کناراد، ۱۹۸۳) [۳] توسعه داده شد. در تمامی تحلیل‌های طیفی ارائه شده، پارامترهای مربوط به منشأ آنومالی مانند چگالی و خودپذیری مغناطیسی به صورت رندوم و ناهم‌بسته فرض شده‌اند. این فرض به دو دلیل است: (۱) اجتناب از پیچیدگی‌های ریاضی مربوط به محاسبه طیف. (۲) عدم دسترسی به اطلاعات در مورد توزیع منابع زیر سطحی. با استفاده از مطالعات مربوط به حفاری‌های عمیق KTB که توسط آلمانی‌ها در نقاط مختلفی از جهان انجام شده بود و همچنین با استفاده از مطالعات ماوس و دیمری (۱۹۹۵) [۴] و ژائو و تایبو (۱۹۹۸) [۵] بر روی اطلاعات حاصل از این حفاری‌ها، نشان داده شد که فرض مربوط به ناهم‌بستگی و رندوم بودن منشأ آنومالی صحیح نیست. بنابراین، منشأ آنومالی به‌صورت همبسته و دارای توزیع مقیاس‌بندی شده است. روش تخمین عمق تا سطوح تباین چگالی یا خودپذیری مغناطیسی به‌وسیله طیف توان اصلاح

### ۱- تخمین عمق با استفاده از طیف توان اصلاح شده

اسپکتور و گرت (۱۹۷۰) [۱] و تریتل (۱۹۷۱) [۱۱] روشی را برای تخمین عمق تا قسمت فوقانی یک گروه ناهمبسته از منشأهای آنومالی مغناطیسی با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد ارائه کردند. در این روش، طیف توان مربوط به میدان مغناطیسی و طیف توان مربوط به خودپذیری مغناطیسی دارای رابطه‌ای به‌شکل زیر هستند (معادله-۱):

$$p(r) = CP_0(r)e^{-2dr} \quad (1)$$

که  $P_0(r)$  طیف توان میدان مغناطیسی،  $C$  یک مقدار ثابت،  $P_0(r)$  طیف توان خودپذیری مغناطیسی،  $I$  عدد موج و  $d$  مقدار عمق تا سطوح تباین مغناطیسی است. این تساوی برای طیف توان حاصل از میدان گرانی و طیف توان مربوط به توزیع چگالی منشأ آنومالی نیز با یک ضریب  $C$  متفاوت به کار می‌رود. در به‌دست آوردن این رابطه، طیف توان مربوط به منشأ آنومالی  $P_0(r)$  ثابت فرض شده است؛ یعنی، توزیع منشأ آنومالی به‌صورت رندوم در نظر گرفته شده است. با فرض اینکه  $P_0(r)$  ثابت است، اگر از طرفین معادله-۱ لگاریتم بگیریم، معادله-۲ حاصل می‌شود:

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات (ardalankhazaie@gmail.com)

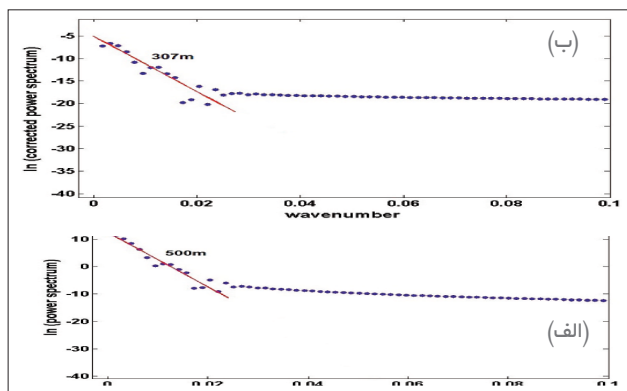
### ۱-۱- اعمال روش بر روی داده مصنوعی

برای آزمودن روابط موجود در هر تکنیکی، لازم است که آن تکنیک بر روی داده‌های مصنوعی اعمال شود. در این مقاله، همانطور که در شکل ۱-ب نشان داده شده است، مدل، دارای مقطع مربعی شکل به ضلع ۷۰۰ متر و گسترش عمقی (ضخامت) ۳۰۰ متر بوده و در عمق ۳۰۰ متری قرار دارد. اختلاف چگالی توده با سنگهای اطراف برابر ۱ در سیستم SI لحاظ شده است. حال بر روی این مدل مانند شکل ۱-الف یک پروفیل زده، بی‌هنجاری گرانی مربوط به این مدل را بدست می‌آوریم.

اگر لگاریتم طیف توان در مقابل مقادیر عدد موج رسم و خطی بر آن برازش شود، می‌توان با استفاده از شیب این خط برای طیف توان معمولی و طیف توان اصلاح شده، عمق را بدست آورد (شکل ۲-ب). همانگونه که در شکل ۲-الف دیده می‌شود، مقدار عمق تخمینی با استفاده از طیف توان معمولی برابر با ۵۰۰ متر است، در حالی که مدل مصنوعی مورد نظر در عمق ۳۰۰ متری قرار دارد. مقدار این عمق در شکل ۲-ب با استفاده از طیف توان اصلاح شده ۳۰۷ متر بدست می‌آید که با عمق در نظر گرفته شده برای مدل مصنوعی، هم‌خوانی مناسبی دارد. لذا، با توجه به نتایج فوق می‌توان چنین استنباط کرد که برای استفاده از روشهای طیفی در تخمین عمق، در نظر گرفتن یک توزیع واقعگرایانه برای منشأ و در نتیجه استفاده از طیف توان اصلاح شده، مقادیر دقیق‌تری را در دسترس قرار می‌دهد.

### ۱-۲- تخمین عمق آنومالی داده‌های واقعی با استفاده از طیف توان اصلاح شده

در این بخش، با استفاده از روش آنالیز طیف توان اصلاح شده، به تخمین عمق داده‌های واقعی بی‌هنجاری گرانی می‌پردازیم؛ پتانسیل معدنی مورد نظر در بخش رودان از استان هرمزگان واقع شده است. در شکل ۳-موقعیت تقریبی منطقه نشان داده شده است. حال، تخمین عمق با استفاده از روش مذکور بر روی پروفیل اول داده‌های گرانی در ناحیه انجام می‌شود. در شکل ۴-بی‌هنجاری



شکل ۲ | عمق تخمینی منشأ بی‌هنجاری مصنوعی با استفاده از آنالیز (الف) طیف توان (ب) طیف توان اصلاح شده

$$\ln p(r) = 2dr + \text{const} \quad (2)$$

همان‌طور که از رابطه‌ی فوق استنباط می‌شود، در این روش با استفاده از رسم لگاریتم طیف توان در مقابل مقادیر عدد موج و یافتن شیب، مقدار عمق تا سطوح تباین بدست می‌آید. اگر بیش از یک گروه از منشأهای آنومالی وجود داشته باشد، در این صورت، شیب در قسمت‌های دارای فرکانس پایین‌تر، عمق تا منشأهای عمیق‌تر را به ما می‌دهد و مقادیر شیب‌های بعدی در فرکانس‌های بالاتر، عمق تا منشأهای سطحی‌تر را نتیجه می‌دهد؛ اما همانطور که قبلاً گفته شد، آنالیز داده‌های مربوط به خودپذیری مغناطیسی و چگالی بدست آمده از حفاری‌های KTB نشان می‌داد که  $P_0(r)$  ثابت نیست، بلکه رفتار آن نشان دهنده منشأ آنومالی مقیاس بندی شده است. (پیلکینگتون و تودوسچاک، ۱۹۹۳ [۶]؛ ماوس و دیمری، ۱۹۹۶ [۷]؛ ژائو و تایبو، ۱۹۹۸ [۵]). بنابراین داریم:

$$p_0(r) = C_1 r^{-\delta} \quad (3)$$

که  $C_1$  یک مقدار ثابت و  $\delta$  توان مقیاس بندی شده مربوط به توزیع منشأ آنومالی است. از طرف دیگر، طیف توان مربوط به میدان پتانسیل  $P(r)$  نیز یک رابطه مقیاس بندی شده دارد:

$$P(r) = C_2 r^{-\beta} \quad (4)$$

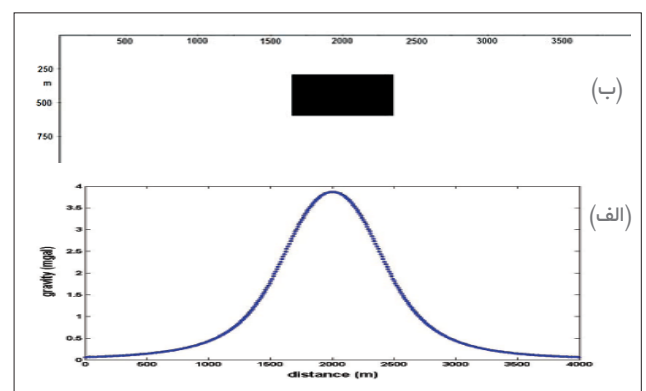
که  $C_2$  یک مقدار ثابت و  $\beta$  توان مقیاس بندی شده مربوط به میدان پتانسیل است که از طریق رابطه زیر با در ارتباط است (ماوس و دیمری، ۱۹۹۵ [۴]):

$$\delta = \beta - 1$$

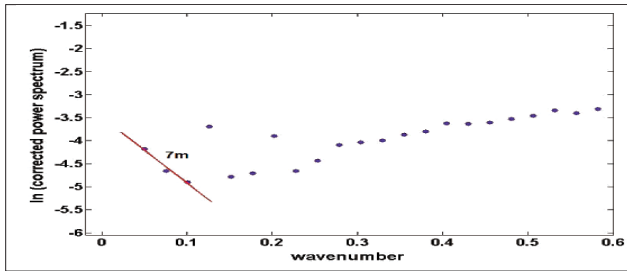
با ترکیب معادلات (۱)، (۳) و (۴)، معادله ۵- بدست می‌آید:

$$P(r) = C_3 r^{-(\beta-1)} e^{-2dr} \quad (5)$$

که در این رابطه،  $C_3$  یک مقدار ثابت است. با استفاده از معادله ۵- می‌توان عمق تا منشأ چگالی را تخمین زد. در ادامه، کاربرد این معادلات بررسی می‌گردد.



شکل ۳ | (الف) پروفیل بی‌هنجاری گرانی مربوط به مدل مصنوعی (ب) مدل مصنوعی زیرسطحی



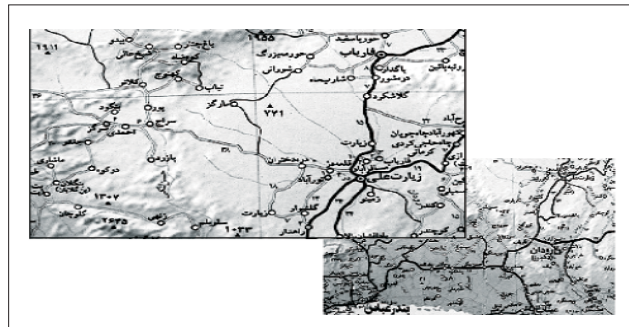
شکل ۵ | عمق منشأ بی‌هنجاری گرانی داده‌های واقعی با استفاده از آنالیز طیف توان اصلاح شده داده‌های برداشت شده پروفیل ۱

آورد (شکل-۵).

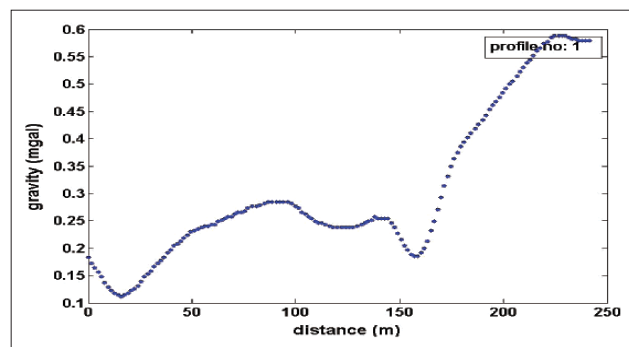
همان گونه که در شکل اخیر دیده می‌شود، عمق تخمینی برای این پروفیل توسط روش آنالیز طیف توان تعمیم یافته ۷ متر است.

### نتیجه‌گیری

■ با مقایسه نتایج روشهای آنالیز طیف توان معمولی و طیف توان اصلاح شده بر روی داده‌های مصنوعی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که برای تخمین عمق با استفاده از روشهای تحلیل طیفی، روش طیف توان اصلاح شده، مقادیر بسیار دقیق تری را در دسترس قرار می‌دهد. ■ با اعمال این روش بر روی پروفیل ۱- بی‌هنجاری گرانی داده‌های واقعی ناحیه رودان استان هرمزگان به این نتیجه رسیدیم که منشأ آنومالی در این پروفیل در عمق حدود ۷ متری قرار دارد. علی‌نجاتی و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی (۱۳۸۴) [۱۲] مدل‌سازی وارون دوبعدی این ناحیه را انجام دادند، که عمق بدست آمده در اینجا کاملاً با نتایج بدست آمده توسط ایشان هم‌خوانی دارد و تأیید می‌کند که منشأ بی‌هنجاری در لایه‌های سطحی قرار دارد. ■



شکل ۳ | موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه واقع در استان هرمزگان



شکل ۴ | بی‌هنجاری گرانی داده‌های واقعی برداشت شده در پروفیل ۱

ناشی از پروفیل ۱- نشان داده شده است. با در نظر گرفتن یک توزیع مقیاس‌بندی شده برای منشأ آنومالی و با رسم لگاریتم طیف توان اصلاح شده در مقابل مقادیر عدد موج می‌توان عمق را با استفاده از روش مطروحه برای داده‌های بی‌هنجاری گرانی پروفیل فوق‌به‌دست

### منابع

- [1] Spector, A., and Grant, F. S., Statistical model for the interpreting of aeromagnetic data. *Geophysics.*, 1970. 35, 293-302.
- [2] Hahn, A., Kind, E. G., and Mishra, D. C., Depth estimation of magnetic sources by means of fourier amplitude spectra. *Geophysical Prospecting.*, 1976. 24, 287-308.
- [3] Connard, G., Couch, R., and Gemperle, M., Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in Central Oregon. *Geophysics.*, 1983. 48, 376-390.
- [4] Maus, S., and Dimri, V. P., Potential field power spectrum inversion for scaling geology. *J. Geophysical research.*, 1995. 100, 12605-12616.
- [5] Zhou, S., and Thybo, H., Power spectra analysis of aeromagnetic data and KTB susceptibility logs, and their implication for fractal behavior of crustal magnetization. *Pure and Applied Geophysics.*, 1998. 151, 147-159.
- [6] Pilkington, M., and Todoeschuck, J. P., Fractal magnetization of continental crust. *Geophysical Research Letters.*, 1993. 20, 627- 630.
- [7] Maus, S., and Dimri, V. P., Depth estimation from the scaling power spectrum of potential field. *Geophysical J. International.*, 1996. 124, 113-120.
- [8] Fedi, M., Quarta, T., and Santis, A. D., Inherent power-law behavior of magnetic field power spectra from a Spector and Grant ensemble. *Geophysics.*, 1997. 62, 1143-1150.
- [9] Maus, S., Variogram analysis of magnetic and gravity data. *Geophysics.*, 1999. 64, 776-784.
- [10] Quarta, T., Fedi, M., and Santis, A. D., Source ambiguity from an estimation of the scaling exponent of potential field power spectra. *Geophysics.*, 2000. J. Int., 140, 311-323.
- [11] Treitel, S., Clement, W. G., and Kaul, R. K., The spectral determination of depths of buried magnetic basement rocks. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society.*, 1971. 24, 415-428.
- [۱۲] نجاتی کلاته، علی، ابراهیم‌زاده اردستانی، وحید، مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های گرانی. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۱۳۸۴، جلد ۳۱، شماره ۱، ص ۲۷-۳۷.