

کاربرد تحلیل مکان - عدد موج در اکتشافات مغناطیس‌سنجی

امین روشندل کاهو^{۱*}، علی نجاتی کلاته^۱، علی مرادزاده^۱ و فرامرز دولتی ارده‌جانی^۲

^۱دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

^۲دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۸، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۴)

چکیده

روش مغناطیس‌سنجی روشی رایج در اکتشاف ذخایر معدنی و هیدروکربن است. یکی از اهداف اساسی تفسیر داده‌های مغناطیسی، برآورد عمق یا محل منبع بی‌هنجاری است که در حوزه مکان یا عدد موج صورت می‌گیرد. روش‌های گوناگونی در هر دو حوزه معرفی شده‌اند که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. یکی از روش‌های متداول، استفاده از طیف توان است. محاسبه طیف توان در حالت استاندارد به کمک تبدیل فوری صورت می‌گیرد. برآورد عمق با استفاده از این روش، دارای دقت مناسب نیست و امکان جداسازی بی‌هنجاری‌های مجاور را فراهم نمی‌آورد. در این مقاله از تبدیل موجک پیوسته با استفاده از موجک مادر مورلت برای برآورد طیف توان استفاده شده است. طیف توان حاصل به علت خواص تبدیل موجک پیوسته، هموار است و قابلیت تفکیک بی‌هنجاری‌های مجاور را نیز دارد. نتایج برآورد عمق برای داده‌های مغناطیسی مصنوعی و واقعی، توانایی زیاد این روش را در برآورد عمق داده‌های میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: برآورد عمق، تبدیل موجک پیوسته، موجک مورلت، طیف توان

Application of space-wavenumber analysis in magnetic exploration

Amin Roshandel Kahoo^{1*}, Ali Nejati Kalateh¹, Ali Moradzadeh¹ and Faramarz Doulati Ardejani²

¹ School of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

² School of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 26 February 2013, accepted: 4 January 2014)

Summary

The magnetic method is a common tool in mining exploration, engineering geology and oil exploration. Depth estimation of potential field anomalies is an important step in the interpretation of the potential field data. There are various methods for depth estimation, which act in a space or wavenumber domain. Euler deconvolution is an automatic and conventional space-domain based method for depth estimation. The success of this approach depends on the choice of the two parameters, i.e. structural index and window length. Nowadays, wavelet transform is frequently used in geophysical data processing and interpretation. Cooper (2006) used the continuous wavelet transform of the derivative of the potential field data to estimate the depth of the potential source. This method is a qualitative approach and gives an estimate of the source depth by calculation of the similarity between the potential field data and the wavelet at different depths.

The Spector and Grant method is a common approach which acts on the wavenumber

*Corresponding author:

roshandel@shahroodut.ac.ir

*نگارنده رابط:

domain. Their method is based on the correlation between the wavenumber and anomaly depth. In this method, the depth of the anomaly can be estimated from the slope of the curve fitted to the logarithm of the potential field data power spectrum. In the Spector and Grant method the power spectrum of the potential field data is calculated by a standard Fourier transform. Fourier analysis has provided important visions into the interpretation of both local and regional effect. However, there is an intrinsic disadvantage in Fourier transform method: the kernel of Fourier transform is a sinusoidal function extended on the whole potential field data interval, so that it uses global oscillations to analyze local ones. Due to its global approach, the Fourier power spectral density is inherently non-localized in space.

In this study, we used the continuous wavelet transform of the potential field data to compute the power spectral density of data. From a mathematical point of view, the continuous wavelet transform analysis does not use a global-space sinusoidal function but a space-wavenumber localized function called space-wavenumber wavelet. Unlike the Fourier analysis, the wavelet transform uses different wavelets and the success of the analysis often depends on the appropriate choice of the analyzing wavelet. We used the Morlet wavelet, due to its similarity with the potential field data. The Morlet power spectral density is smoother than that of standard Fourier analysis and it can separate the two lateral and vertical anomalies.

The efficiency of this method is evaluated by applying it to both synthetic and real magnetic data. Synthetic models are considered with and without noise. The results of the synthetic example show that the space-wavenumber depth estimation method results in a more desirable estimation than the standard Fourier power spectral density. We use the mentioned methods to estimate the depth of the iron deposit of Ojat Abad located in the south of the Semnan-Damghan road.

Keywords: Depth estimation, continuous wavelet transform, Morlet wavelet, power spectrum

۱ مقدمه

روش مغناطیس‌سنجی روشی رایج در اکتشاف معادن و اکتشاف نفت است. یکی از اهداف اساسی تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی، برآورد عمق یا محل منبع بی‌هنجاری است که در حوزه مکان یا عدد موج صورت می‌گیرد. روش اویلر روشی خودکار و متداول برای برآورد عمق و محل منبع بی‌هنجاری در حوزه مکان است. این روش را افراد زیادی برای تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار داده‌اند (تامسون، ۱۹۸۲؛ رید و همکاران، ۱۹۹۰؛ مارسون و کلینگر، ۱۹۹۳). پارامترهایی نظیر فاکتور هندسی و طول پنجره، بر نتایج حاصل از این روش تاثیر بارزی دارند که برآورد خودکار اندیس

ساختاری و تاثیر آن بر صحت برآورد عمق صورت گرفته، در مقالات متعددی بررسی شده است (باربوسا و همکاران، ۱۹۹۹؛ هانسون و سوسو، ۲۰۰۲). در حوزه عدد موج و طیف توان، یکی از روش‌های موفق در برآورد عمق بی‌هنجاری را اسپکتور و گرانت (۱۹۷۰) معرفی کردند. این روش بر مبنای ارتباط میان عدد موج و عمق بی‌هنجاری استوار است و برای محاسبه طیف توان از تبدیل فوریه داده‌های میدان پتانسیل استفاده می‌کند. فدی و همکاران (۱۹۹۷) اصلاحیه‌ای بر روش اسپکتور و گرانت در برآورد صحیح‌تر عمق عرضه کردند. این اصلاح به صورت یک جمله $r^{-\beta}$ است که در طیف توان حاصل ضرب می‌شود. البته لازم به ذکر است که مقدار

$$\ln(P(k)) \simeq -2hk + \ln(C) \quad (2)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه (۲) معادله یک خط در مختصات $[k, \ln(P(k))]$ و شیب این خط برابر $-2h$ است. در روش متداول، طیف توان با استفاده از تبدیل فوریه داده‌های میدان کلی مغناطیسی $T(x)$ مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید (پروکیس و مانولاکیس، ۲۰۰۷):

$$P_F(k) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} T(x) e^{-j k x} dx \right|^2 \quad (3)$$

۳ محاسبه طیف توان تبدیل موجک پیوسته
تبدیل موجک پیوسته میدان کلی مغناطیسی $T(x)$ به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود (مالات، ۲۰۰۹):

$$CWT_T(s, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(x) \psi_{s,b}^*(x) dx \quad (4)$$

که در آن، * نشان‌دهنده مزدوج مختلط، $\psi_{s,b}$ موجک، s بیانگر مقیاس و b بیانگر جابه‌جایی در راستای محور مکان است. $\psi_{s,b}$ نسخه مقیاس شده و انتقال یافته موجک مادر $\psi(x)$ است که با استفاده از رابطه (۵) ساخته می‌شود (پولاریکاس، ۱۹۹۴):

$$\psi_{s,b} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-b}{s}\right) \quad (5)$$

در واقع پارامتر مقیاس معادل پارامتر طول موج است. بنابراین رابطه میان مقیاس و عدد موج یک رابطه وارون است. در این تحقیق، موجک مادر مورد استفاده، موجک مورلت است که طبق رابطه (۶) تعریف می‌شود (داییشز، ۱۹۹۲):

$$\psi(x) = e^{-x^2/2} \cos(5x) \quad (6)$$

نمودار موجک مورلت در بازه $[-4, 4]$ در شکل ۱ نشان

β نیز یک مقدار متغیر متناسب با گستردگی هندسی منشا بی‌هنجاری است (بانسال و دیمری، ۲۰۱۰).

عرضه روش‌های جدید با دقت و سرعت زیاد و با استفاده از ابزارهای ریاضی نظیر تبدیل موجک (مالات، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۹) برای تفسیر داده‌ها، موضوع تحقیقات جدید در حوزه میدان پتانسیل است. تبدیل موجک پیوسته یکی از ابزارهای قدرتمند برای بررسی سری‌های زمانی یا مکانی است. این تبدیل، سیگنال را از حوزه مکان به حوزه مکان-مقیاس منتقل می‌کند. در این تبدیل، پارامتر مقیاس با عدد موج ارتباط دارد. کوپر (۲۰۰۶) با استفاده از موجک‌های مادر حاصل از مشتق‌های گوناگون افقی یک چشمه استوانه‌ای، عمق بی‌هنجاری میدان پتانسیل را در حوزه مکان برآورد کرد. این روش به صورت کیفی است و از راه محاسبه شباهت موجک با داده میدان پتانسیل در عمق‌های گوناگون به برآورد عمق می‌پردازد. روش دیگر برآورد عمق بر مبنای تبدیل موجک که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حوزه عدد موج عمل می‌کند. موجک مادر مورد استفاده در این حالت، موجک مورلت است که شباهت‌های زیادی به داده‌های میدان پتانسیل دارد (فدی و راپولا، ۱۹۹۷). این روش روی داده‌های میدان کلی مغناطیسی حاصل از مدل‌های مصنوعی و واقعی اعمال و نتایج آن با روش طیف توان مقایسه شد.

۲ برآورد عمق از طیف توان داده میدان پتانسیل

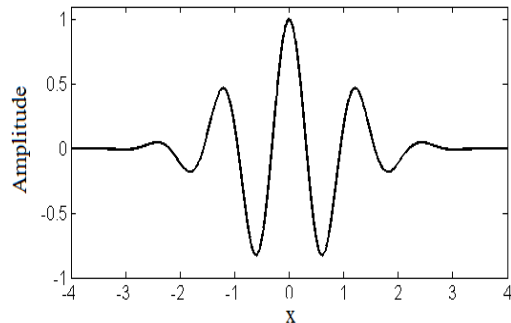
رابطه بین طیف توان، $P(k)$ ، و عمق بی‌هنجاری میدان پتانسیل، h ، به صورت رابطه (۱) است (اسپکتور و گران، ۱۹۷۰؛ ماس و دیمری، ۱۹۹۵):

$$P(k) \simeq C e^{-2hk} \quad (1)$$

که k عدد موج و C یک ثابت وابسته به ویژگی‌های فیزیکی منبع است. چنانچه از رابطه (۱) لگاریتم طبیعی گرفته شود، رابطه حاصل به صورت رابطه (۲) است:

داده شده است.

به روش متداول بهبود یابد. همچنین به علت اینکه هسته تبدیل فوریه یک موج سینوسی با امتداد نامتناهی است، در بررسی یک بی‌هنجاری محلی تأثیر بی‌هنجاری‌های مجاور اجتناب ناپذیر است. به همین علت در برآورد عمق با استفاده از طیف توان استاندارد امکان جداسازی دو بی‌هنجاری مجاور وجود ندارد. اما در مورد طیف توان به‌دست آمده از تبدیل موجک پیوسته، به علت طول متناهی موجک، می‌توان بی‌هنجاری‌های محلی را بدون تأثیر بی‌هنجاری‌های مجاور بررسی کرد.



شکل ۱. نمودار موجک مورلت.

۴ برآورد عمق مدل مصنوعی

به منظور بررسی و مقایسه برآورد عمق با استفاده از طیف توان حاصل از دو روش تبدیل فوریه و تبدیل موجک پیوسته با موجک مورلت، ۲ مدل مصنوعی در نظر گرفته شد. این مدل‌ها در دو حالت بدون نوفه و همراه نوفه بررسی شدند. مدل اول شامل دو بی‌هنجاری مغناطیسی مکعبی‌شکل با ابعاد $3000 * 1000 * 1000$ متر در دو عمق ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ متر با خودپذیری مغناطیسی 0.002 در سامانه SI در دو موقعیت جانبی متفاوت است. زاویه انحراف مغناطیسی برابر صفر درجه و میل مغناطیسی برابر 45 درجه در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ موقعیت دو بی‌هنجاری به همراه میدان کل مغناطیسی آنها نشان داده شده است. در شکل ۳ نمودار نیم‌رخ عبوری از هر دو بی‌هنجاری در حالت بدون نوفه و همراه نوفه 30 دسی‌بل نشان داده شده است. طیف توان این دو نیم‌رخ با استفاده از دو روش تبدیل فوریه و تبدیل موجک پیوسته با موجک مورلت به‌دست آمد.

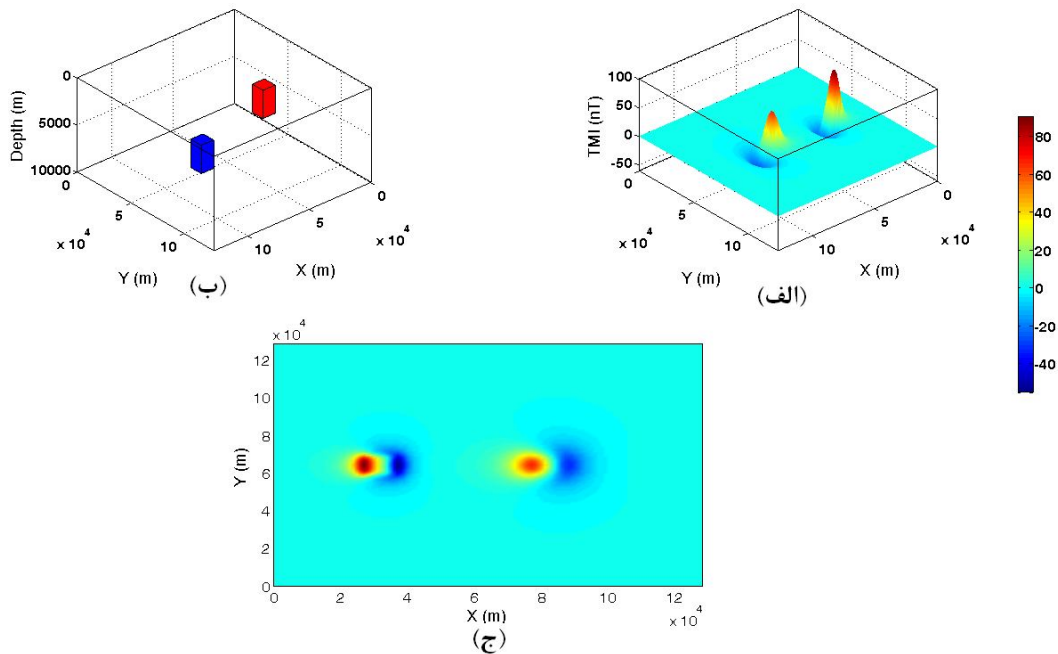
برای محاسبه طیف توان می‌توان به‌جای استفاده از تبدیل فوریه (رابطه (۳)) از ضرایب تبدیل موجک پیوسته مطابق رابطه (۷) استفاده کرد (فدی و راپولا، ۱۹۹۷):

$$P_{CWT}(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} |CWT_T(s, b)|^2 db \quad (7)$$

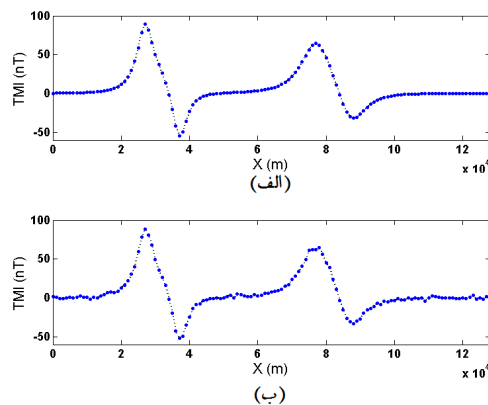
هادگینز و همکاران (۱۹۹۳) نشان دادند که بین طیف توان به‌دست آمده از تبدیل فوریه و تبدیل موجک پیوسته رابطه (۸) برقرار است:

$$P_{CWT}(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_F(\omega) P_\psi(\omega) d\omega \quad (8)$$

که در آن P_ψ طیف توان موجک در مقیاس s است. فدی و راپولا (۱۹۹۷) روشن ساختند که طیف توان به‌دست آمده از تبدیل موجک، پیوسته هموارتر از طیف توان به‌دست آمده از تبدیل فوریه است. چنانچه از طیف توان حاصل از تبدیل موجک پیوسته در رابطه (۲) برای برآورد عمق استفاده شود، با توجه به هموار بودن این طیف، می‌توان انتظار داشت که نتایج برآورد عمق، نسبت



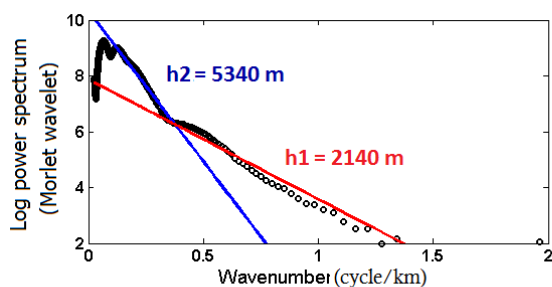
شکل ۲. (الف) داده‌های میدان کلی مغناطیسی در سه بُعد برای (ب) مدل مصنوعی اول، (ج) داده‌های میدان کلی مغناطیسی در دو بُعد. جهت شمال مغناطیسی در راستای محور X است.



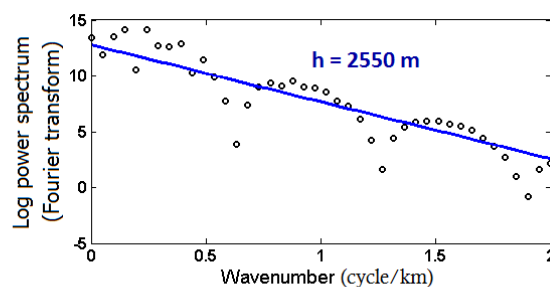
شکل ۳. نیم‌رخ عبوری از دو بی‌هنجاری (الف) بدون نوفه و (ب) همراه نوفه ۳۰ دسی‌بل.

ناچار بایستی یک خط به روند کلی منحنی برازش داد و یک عمق تقریبی متوسط برای دو بی‌هنجاری به دست آورد. نتایج قابل قبولی برای برآورد عمق دو بی‌هنجاری با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به دست می‌آید که در شکل ۴ مقادیر آنها روی نمودار درج شده است. در شکل ۵ نیز نتایج برای نیم‌رخ حاوی نوفه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این روش در حضور نوفه نیز دارای نتایج قابل قبولی است.

در شکل ۴ لگاریتم طیف توان حاصل از دو روش برحسب عدد موج برای حالت بدون نوفه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لگاریتم طیف توان تبدیل موجک پیوسته هموارتر از لگاریتم طیف توان تبدیل فوریه است و همچنین می‌توان به راحتی دو شیب مجزا مربوط به دو بی‌هنجاری را روی آن تشخیص داد. در صورتی که در لگاریتم طیف توان تبدیل فوریه همان‌طور که در فدی و راپولا (۱۹۹۷) اشاره شده است، این دو بی‌هنجاری از یکدیگر تفکیک پذیر نیستند و به

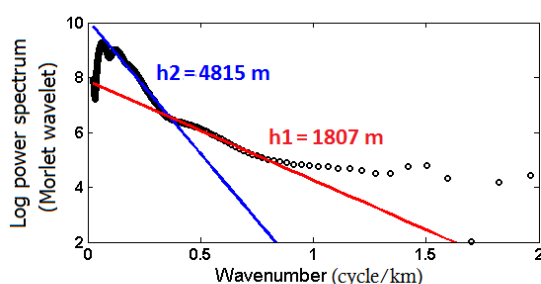


(ب)

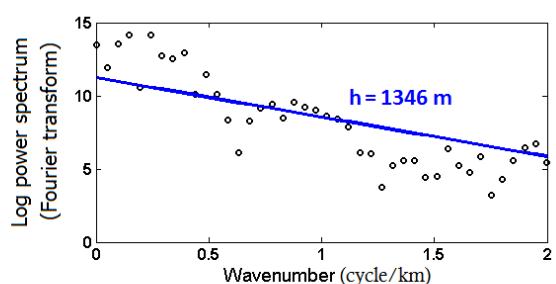


(الف)

شکل ۴. نمودار لگاریتم طیف توان برحسب عدد موج برای نیم‌رخ بدون نوفه با استفاده از روش (الف) تبدیل فوری و (ب) تبدیل موجک پیوسته.



(ب)



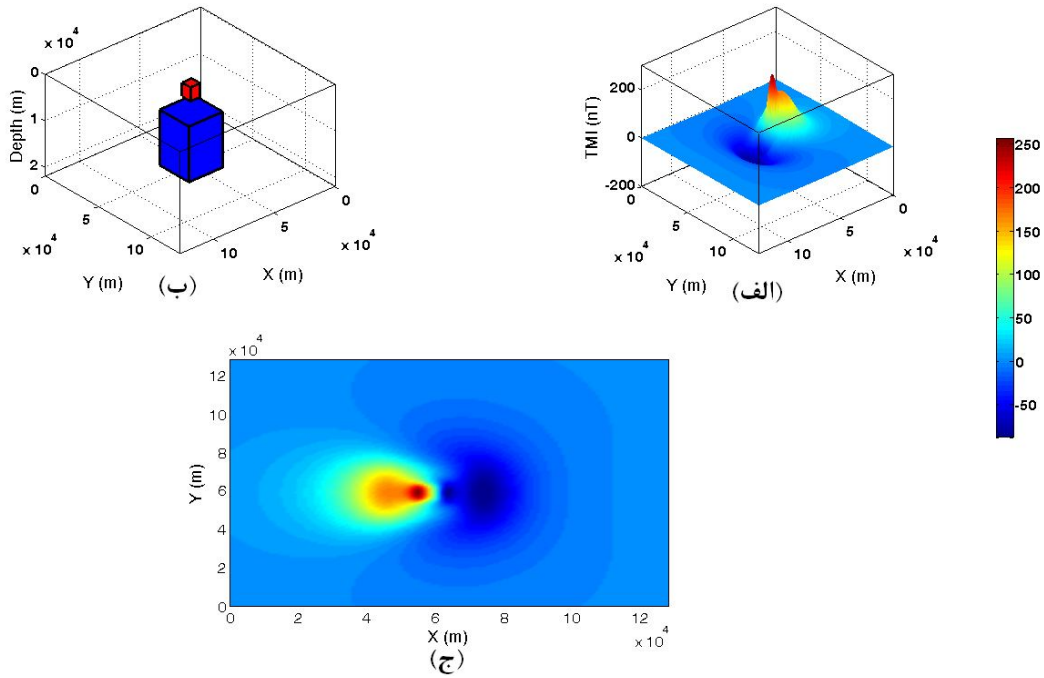
(الف)

شکل ۵. نمودار لگاریتم طیف توان برحسب عدد موج برای نیم‌رخ همراه نوفه با استفاده از روش (الف) تبدیل فوری و (ب) تبدیل موجک پیوسته.

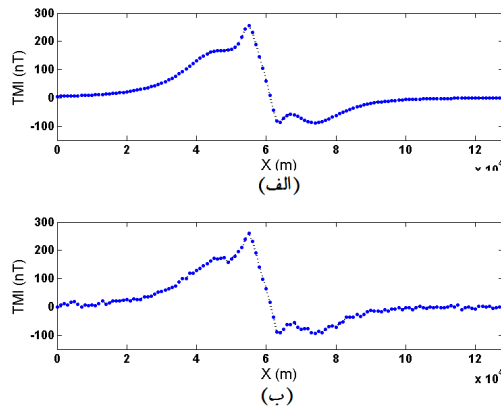
۸۰۰۰ متر است که در شکل ۶ مدل و میدان کلی مغناطیسی حاصل از این مدل نشان داده شده است. نیم‌رخ عبوری از این دو بی‌هنجاری برای دو حالت بدون نوفه و همراه نوفه ۳۰ دسی‌بل در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج برآورد عمق برای هر دو حالت بدون نوفه و همراه نوفه به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. نتایج این مدل مصنوعی نیز حاکی از برتری روش تبدیل موجک پیوسته به روش تبدیل فوری در برآورد عمق مدل‌های پیچیده است.

مدل مصنوعی دوم نسبت به مدل اول دارای پیچیدگی بیشتری است. بدین صورت که دو بی‌هنجاری در یک موقعیت جانبی قرار می‌گیرند و فقط عمق آنها متفاوت است. اغلب روش‌های برآورد عمق در مدل‌های پیچیده مانند این مثال دچار مشکل می‌شوند و معمولاً یک عمق میانگین برای بی‌هنجاری‌های گوناگون به دست می‌دهند. اما روش تبدیل موجک پیوسته با موجک مورلت قابلیت تفکیک عمقی این گونه مدل‌های پیچیده را نیز دارد.

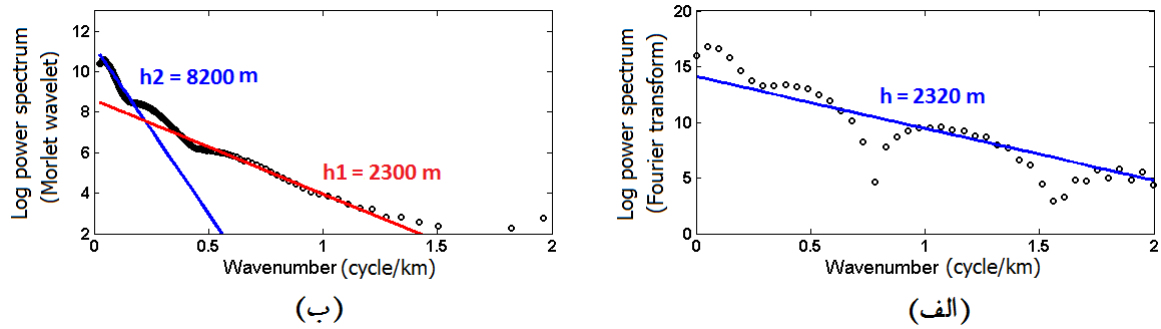
ابعاد این دو بی‌هنجاری ۳۰۰*۸۰۰*۸۰۰ متر و ۱۲۰۰*۲۸۰۰*۲۸۰۰ متر به ترتیب در دو عمق ۲۰۰ و



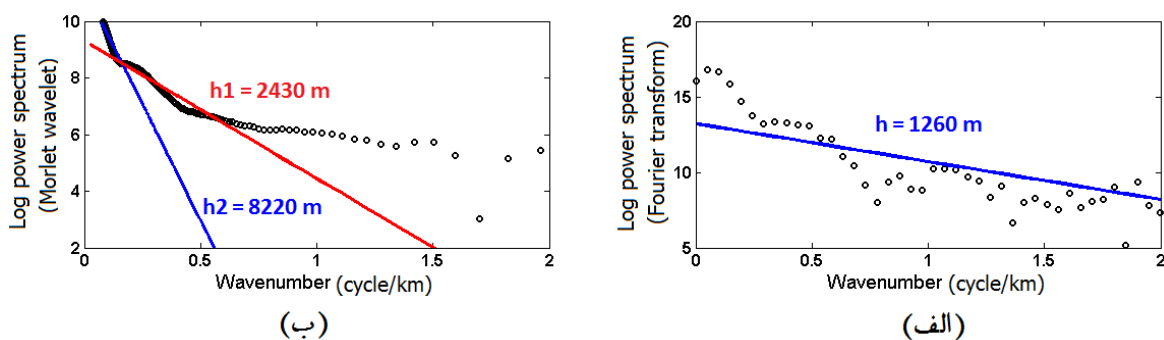
شکل ۶. (الف) داده‌های میدان کلی مغناطیسی در سه بُعد برای (ب) مدل مصنوعی دوم، (ج) داده‌های میدان کلی مغناطیسی در دو بُعد. جهت شمال مغناطیسی در راستای محور X است.



شکل ۷. نیم‌رخ عبوری از دو بی‌هنجاری (الف) بدون نوفه و (ب) همراه نوفه ۳۰ دسی‌بل.



شکل ۸. نمودار لگاریتم طیف توان برحسب عدد موج برای نیم‌رخ بدون نوفه با استفاده از روش (الف) تبدیل فوریه و (ب) تبدیل موجک پیوسته.



شکل ۹. نمودار لگاریتم طیف توان برحسب عدد موج برای نیمرخ همراه نوفه با استفاده از روش (الف) تبدیل فوری و (ب) تبدیل موجک پیوسته.

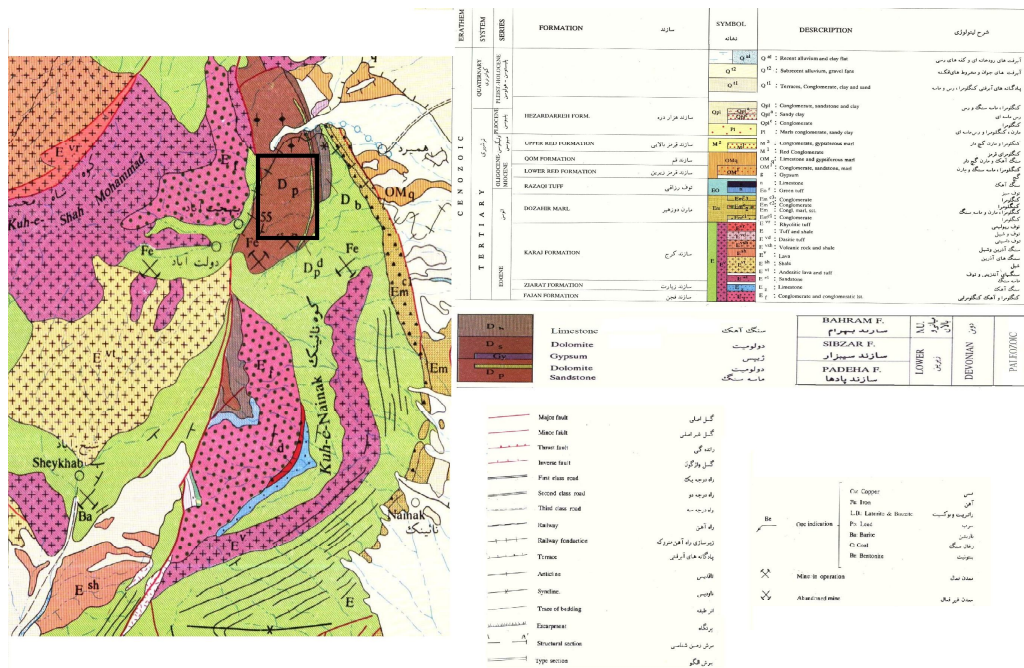
۵ زمین‌شناسی منطقه

کانی‌سازی شده از ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌آهک‌های دونین تشکیل شده است. در بخش‌های غربی و جنوبی ناحیه مورد بررسی، کنگلومرا و آهک کنگلومرای سازند فجن با سن ائوسن زیرین مشاهده می‌شود. همچنین سنگ‌های نفوذی میکرودیوریت مربوط به دوره ترشیاری با گسترش محدود در بخش جنوبی منطقه رخنمون دارند. شکل ۱۱ بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جام (سازمان زمین‌شناسی، ۱۳۸۴) را که در برگیرنده این منطقه است، نشان می‌دهد. کانی‌سازی آهن در این

منطقه مورد بررسی، کانسار آهن اجت‌آباد در ۶۳ کیلومتری شمال شرقی سمنان و در جنوب جاده سمنان - دامغان قرار دارد. برداشت داده‌ها در منطقه‌ای به وسعت ۳۶ هکتار در امتداد ۲۲ نیمرخ شرقی - غربی و ۳ نیمرخ شمالی - جنوبی با فاصله ۱۵ متر صورت گرفته است. در مجموع ۱۲۰۰ نقطه برداشت مغناطیس‌سنجی در منطقه صورت پذیرفته است. شکل ۱۰ موقعیت جغرافیایی منطقه را نشان می‌دهد. طبق برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جام، منطقه



شکل ۱۰. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی.



شکل ۱۱. نقشه زمین شناسی منطقه مورد بررسی (بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بر گره جام).

نیمرخ داده مغناطیسی و نتایج برآورد عمق با استفاده از تبدیل فوریه و تبدیل موجک پیوسته نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، عمق برآورد شده برای کانسار آهن مورد بررسی در زیر این نیمرخ، حدود ۱۵ متر است که همخوانی مناسبی با نتایج حاصل از مدل سازی دو بُعدی صورت گرفته (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۸) دارد.

۷ نتیجه گیری

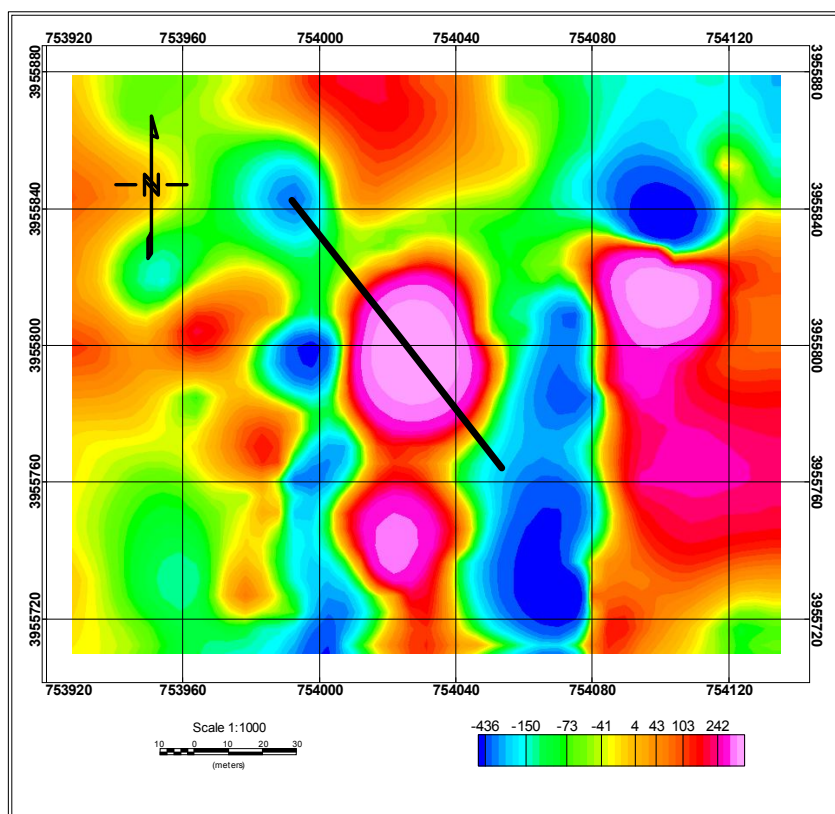
در این مقاله روشی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته برای برآورد طیف توان معرفی شد. طیف توان حاصل از تبدیل موجک پیوسته بر خلاف طیف توان استاندارد به دست آمده از تبدیل فوریه، به علت داشتن خاصیت موضعی بودن، امکان جداسازی دو بی هنجاری جانبی و عمقی را در فرایند برآورد عمق فراهم می آورد. همچنین براساس رابطه بین طیف توان حاصل از تبدیل فوریه و تبدیل موجک پیوسته، طیف توان تبدیل موجک پیوسته هموارتر

منطقه عموماً کانی سازی آهن در این منطقه عموماً از جنس مگنتیت و هماتیت است (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۸) که این امر احتمالاً می تواند در اثر فعالیت های گرمایی ناشی از نفوذ سنگ های آندزیت - داسیت به درون رسوبات آهکی، کنگلومرایبی و همچنین سیلیس های با سن ائوسن باشد. از کانی های فرعی همراه ماده معدنی می توان به سیلیس و باریت اشاره کرد. توده های آهن دار عموماً به صورت رگه و دایک هستند.

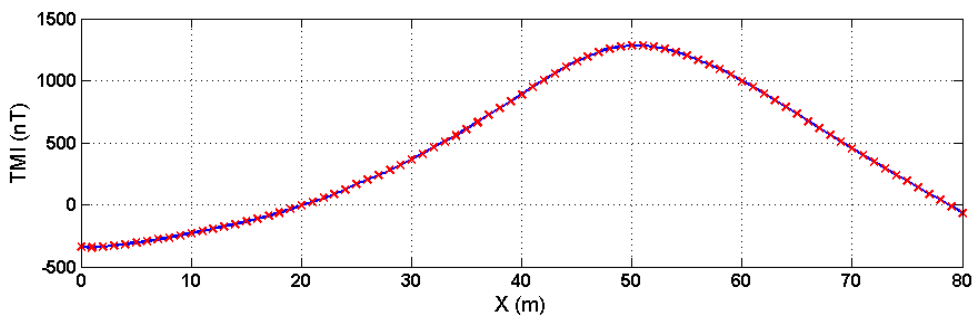
۶ برآورد عمق داده های واقعی

برای بررسی کارایی روش برآورد عمق با استفاده از تبدیل موجک پیوسته، داده های مغناطیسی باقی مانده محاسبه و پس از تصحیحات لازم، در برآورد عمق، استفاده شده است (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۸).

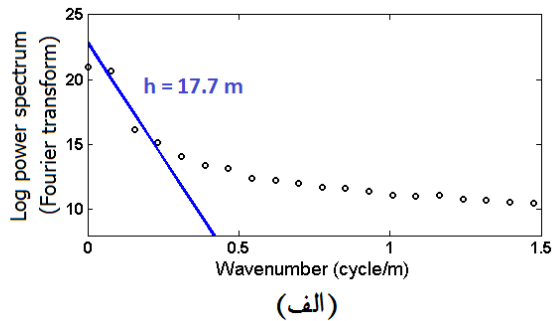
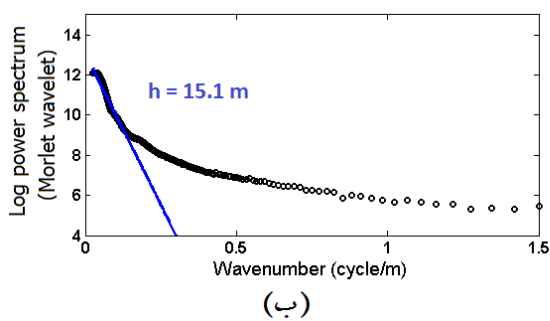
در شکل ۱۲ بخش جنوب غربی از داده های پیش گفته نشان داده شده است. الگوریتم روی یک نیمرخ عبوری در این ناحیه اعمال شد. در شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب



شکل ۱۲. نقشه مغناطیسی باقی مانده بخش جنوب غربی منطقه مورد بررسی. خط توپوگرافی محل نهر را نشان می دهد.



شکل ۱۳. نهر داده میدان کلی مغناطیسی نشان داده شده در شکل ۱۲.



شکل ۱۴. نمودار لگاریتم طیف توان بر حسب عدد موج برای نهر شکل ۱۳ با استفاده از روش (الف) تبدیل فوری و (ب) تبدیل موجک پیوسته.

- Hansen, R. O., and Suci, L., 2002, Multiple source Euler deconvolution: *Geophysics*, **67**, 525-535.
- Hudgins, L. H., Friehe, C. A., and Mayer, M. E., 1993, Fourier and wavelet analysis of atmospheric turbulence: in Meyer, Y., and Roques, S., *Progress in Wavelet Analysis and Applications: proceedings of the International conference Wavelets and applications*, Toulouse, France, 491-498.
- Mallat, S., 1999, *A wavelet tour of signal processing*, 2nd edition: Elsevier.
- Mallat, S., 2009, *A wavelet tour of signal processing*, 3th edition: Elsevier.
- Marson, I., and Klingele, E. E., 1993, Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation: *Geophysics*, **58**, 1588-1595.
- Maus, S., and Dimri, V. P., 1995, Potential field power spectrum inversion for scaling geology: *Journal of Geophysical Research: solid earth*, **100**, 12605-12616.
- Poularikas, A. D., 1999, *The transforms and applications Handbook*, 2nd edition: CRC Press.
- Proakis, J. G., and Manolakis, D. G., 2007, *Digital signal processing, principles, algorithms, and applications*: Pearson Prentice Hall.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., and Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, **55**, 80-91.
- Spector, A., and Grant, F. S., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data: *Geophysics*, **35**, 293-302.
- Thompson, D. T., 1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, **47**, 31-37.
- است و همین خاصیت، برآزش ساده تر و دقیق تر خط را در نمودار لگاریتم طیف توان برحسب عدد موج، امکان پذیر می سازد. نتایج به دست آمده از داده های مصنوعی و واقعی حاکی از برتری روش طیف توان تبدیل موجک پیوسته بر طیف توان حاصل از تبدیل فوریه است.
- منابع**
- مرادزاده، ع.، دولتی اردجانی، ف.، و طیبی، ب.، ۱۳۸۸، تفسیر داده های مغناطیسی ذخیره آهن اجت آباد، شمال خاور سمنان: علوم زمین، **۱۸**، ۶۳-۶۸.
- Bansal, A. R., and Dimri, V. P., 2010, Scaling spectral analysis: A new tool for interpretation of gravity and magnetic data: *Earth science India*, **3**, 54-68.
- Barbosa, V. C. F., Joao, B. C., and Medeiros, W. E., 1999, Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution: *Geophysics*, **64**, 48-60.
- Cooper, G. R. J., 2006, Interpreting potential field data using continuous wavelet transforms of their horizontal derivatives: *Computers & Geosciences*, **32**, 984-992.
- Daubechies, I., 1992, *Ten lectures on wavelets*: SIAM.
- Fedi, M., and Rapolla, A., 1997, Space-frequency analysis and reduction of potential field ambiguity: *Annali di Geofisica*, **40**, 1189-1200.
- Fedi, M., Quarta, T., and Santis, A. D., 1997, Inherent power law behavior of magnetic field power spectra from a Spector and Grant ensemble: *Geophysics*, **62**, 1143-1150.