

تشخیص منابع‌های گرانی با استفاده از تبدیل موجک پیوسته

امین روشندل کاهو^{۱*} و فرشاد سلاجقه^۲

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۶/۱/۲۸، پذیرش نهایی: ۸۷/۷/۲)

چکیده

امروزه از تبدیل موجک، به صورت گسترده‌ای در پردازش و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی، مخصوصاً داده‌های لرزه‌ای، استفاده می‌شود اما این روش هنوز در تفسیر داده‌های گرانی و ژئومغناطیس کاربرد رایجی نیافته است. در این مقاله سعی شده است روشی جدید بر پایه نظری تبدیل موجک پیوسته برای تعیین موقعیت و عمق ناهنجاری‌های گرانی ارائه شود. موجک مورد استفاده در تبدیل موجک پیوسته در روش پیش‌گفته اساس مشتق‌های افقی چشمه‌ای استوانه‌ای تعیین شده است. در این تحقیق کارایی روش روی داده‌های مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. همه برنامه‌های رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB را نگارندگان تهیه کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک پیوسته، موجک مادر، تعیین موقعیت، تعیین عمق

Gravity sources identification using continuous wavelet transform

Roshandel Kahoo, A.¹ and Salajegheh, F.²

¹Ph.D. student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Ph.D. student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 17 April 2007, Accepted: 23 Sep 2008)

Abstract

Introduction: Wavelet transform is one of the useful and suitable tools for time series and signal analysis. Nowadays wavelet transform is frequently used in geophysical data processing and interpretation, especially seismic data. However, the use of this method isn't widespread in gravity and geomagnetic. Fedi and Quarta (1998), Martelet et al. (2001) and de Oliveira Lyrio (2004) used the wavelet transform for processing and interpretation of the potential field data. In this paper, a new method based on continuous wavelet transform for determination of depth and location of gravity anomalies is introduced.

Continuous Wavelet Transform and Gravity Source Identification: All of the time-frequency or time-scale transforms intend to show how the energy of a signal is distributed in time-frequency or time-scale plan. The Continuous Wavelet Transform (CWT) maps the time (space) domain signal into the time (space)-scale plan. The CWT of a signal $f(x)$ is defined as the convolution of signal with a translated and scaled wavelet (Equation (1)).

$$W_f(a, b) = \int f(x) h_{a,b}^*(x) dx \quad (1)$$

where, * denotes the complex conjugate, a is scale, b is space and h(x) is the mother wavelet. Shifted and scaled version of the mother wavelet can be computed as equation (2):

$$h_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

Any wavelet which is selected as the mother wavelet must meet the zero mean value condition. Mother wavelet selection can affect on the results of wavelet analysis. If the properties of the selected mother wavelet are the same as the signal, then the space-scale representation of the signal can give more useful information about the energy distribution of the signal in space-scale plan.

A buried cylinder can be seen as a rectangle in 2D view. In addition, any body in 2D can be shown by arranged rectangles. Therefore, we use the gravitational anomaly of a buried cylinder and its first and second horizontal derivatives and their vertical derivative as mother wavelets.

The gravitational anomaly of the buried cylinder can be obtained by equation (3):

$$g = \frac{Gmz}{(x^2 + z^2)} \quad (3)$$

where, G is the gravitational constant, m is mass of the buried cylinder located at the position x and depth z. This wavelet does not meet the zero mean value condition and cannot be used as the mother wavelet. But its derivatives are suitable for the mother wavelet. Equations (4) to (7) are the derivatives of the gravitational the anomaly of the buried cylinder.

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{-2Gmzx}{(x^2 + z^2)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = \frac{2Gmz(3x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^3} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z \partial x} = \frac{-2Gmx(x^2 - 3z^2)}{(x^2 + z^2)^3} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^3 g}{\partial z \partial^2 x} = \frac{6Gm(x^4 - 6x^2z^2 + z^4)}{(x^2 + z^2)^4} \quad (7)$$

When we used these equations as the mother wavelet, G and m are not needed and z is set to one.

Discussion: We tested the efficiency of the CWT method for gravity source identification on various synthetic models such as a simple cube, various type of faults, simple cubes in different depths and real data. The CWT coefficients are computed using the gravitational anomaly and its first and second horizontal derivatives. The obtained results show that the CWT coefficients obtained using first horizontal derivative of data and equations (4) and (6) can estimate precisely the depth and location of the source of gravitational anomaly.

Key words: Continuous wavelet transform, Mother wavelet, Position estimation, Depth estimation

۱ مقدمه

تبدیل موجک پیوسته یکی از ابزارهای قدرتمند و مفید برای بررسی سری‌های زمانی یا مکانی است، که در اواسط دهه ۱۹۸۰ معرفی شد. این تبدیل سیگنال را از حوزه زمان (یا مکان) به حوزه زمان-مقیاس (یا مکان-مقیاس)، که مقیاس با بسامد ارتباط دارد، منتقل می‌کند.

با پیشرفت دستگاه‌های گرانی‌سنجی و افزایش دقت اندازه‌گیری آنها، این روش به روشی رایج در اکتشاف معادن، زمین‌شناسی مهندسی و اکتشاف نفت تبدیل شده است. تفسیر داده‌های گرانی یکی از مهم‌ترین مراحل در بررسی گرانی‌سنجی است. ارائه روش‌های جدید با دقت و سرعت زیاد با استفاده از ابزارهای ریاضی نظیر تبدیل موجک برای تفسیر داده‌ها، موضوع تحقیقات جدید در حوزه میدان پتانسیل است. از جمله مقالاتی که در این زمینه به چاپ رسیده‌اند می‌توان به مقالات فدی و کوارتا (۱۹۹۸)، مارتلت و همکاران (۲۰۰۱) و دی‌الیویرالیو و تنوریو (۲۰۰۴) اشاره کرد. در این مقاله روشی متفاوت از روش‌های اشاره شده در مقاله‌های قبلی برای تفسیر داده‌های گرانی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲ تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته تابع $f(x)$ به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود (پولاریکاس، ۲۰۰۰).

$$W_f(a, b) = \int f(x)h_{a,b}^*(x)dx \quad (1)$$

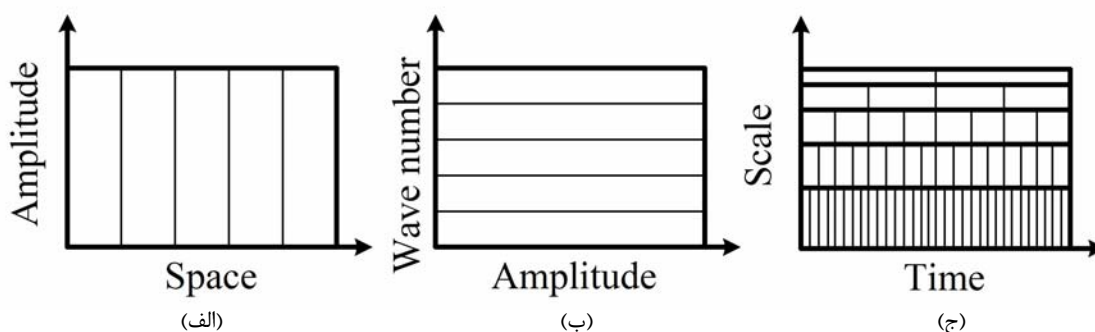
که در آن، * نشان‌دهنده مزدوج مختلط، $h_{a,b}(x)$ موجک، S بیانگر مقیاس و b مرکز پنجره موجک یا بیانگر جابه‌جایی در راستای محور مکان است. $h_{a,b}(x)$ نسخه مقیاس شده (a) و انتقال یافته در مکان (b) موجک مادر است که با استفاده از رابطه (۲) ساخته می‌شود.

$$h_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}h\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

در شکل ۱ نحوه نمایش داده در سه حوزه مکان، عدد موج، مکان-مقیاس نشان داده شده است.

۳ انتخاب موجک مادر

کاربرد تبدیل موجک پیوسته در هر زمینه ابتدا نیاز به انتخاب موجک مناسب برای عملی ساختن فرایند تبدیل



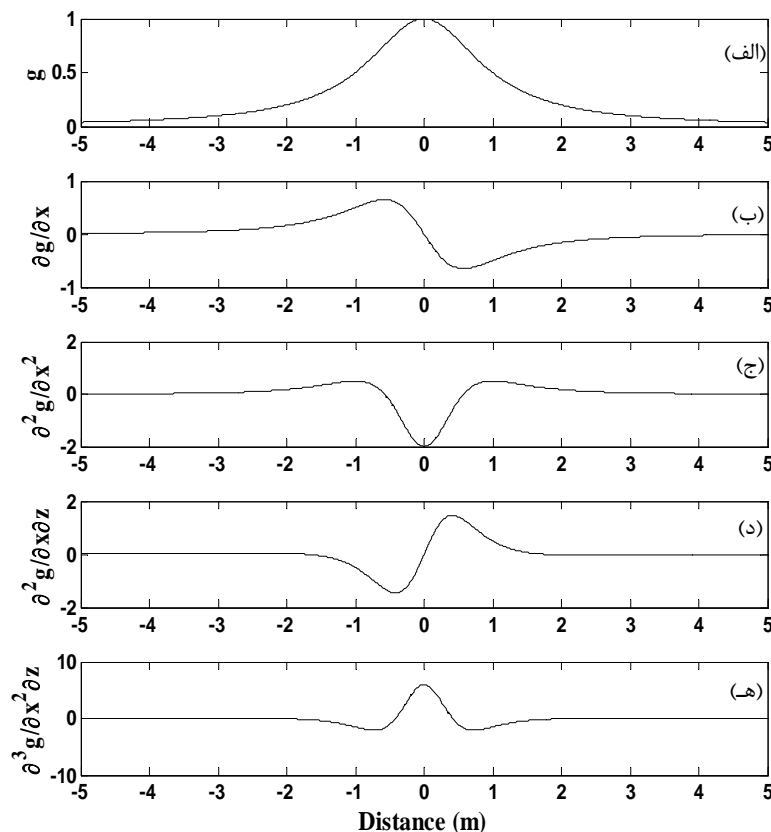
شکل ۱. (الف) نمایش سیگنال در حوزه مکان. (ب) نمایش سیگنال در حوزه عدد موج. (ج) نمایش سیگنال در حوزه مکان-مقیاس (چوی، ۱۹۹۲).

موجک‌ها استفاده می‌شود، به دلیل اینکه شکل کلی این موجک‌ها مورد نیاز است، بنابراین دیگر نیازی به مقادیر G ، m و Z نیست و می‌توان آنها را برابر با یک در نظر گرفت. با توجه به ویژگی‌های موجک مورد استفاده در تبدیل موجک (مالات، ۱۹۹۹)، رابطه (۳) ب رای موجک مناسب نیست، بلکه مشتق‌های آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشتق‌های استفاده شده در این مقاله شامل گرادیان اول و دوم افقی و مشتق قائم این دو گرادیان است که در روابط (۴) تا (۷) بیان و در شکل ۲ به تصویر کشیده شده‌اند (کوپر، ۲۰۰۶). به عبارت دیگر روابط (۴) تا (۷) با صرف نظر از مقادیر G ، m و Z موجک‌هایی هستند که در تبدیل موجک از آنها استفاده شده است.

است. در تحقیقات قبلی، کاربرد این تبدیل در میدان پتانسیل، موجک مورد استفاده از هسته پواسون (Poisson Kernel)، که بر پایه ناهنجاری یک چشمه نقطه‌ای استوار است، به دست می‌آید (موریو و همکاران، ۱۹۹۹). از آنجا که تصویر یک استوانه مدفون در دو بعد به صورت یک مستطیل دیده می‌شود و هر تصویر در دو بعد را می‌توان به صورت ترکیبی از مستطیل‌ها نوشت، لذا در این تحقیق، موجک مورد استفاده براساس مشتق‌های متفاوت یک استوانه قائم مدفون محاسبه می‌شود. ناهنجاری یک استوانه مدفون به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$g = \frac{Gmz}{(x^2 + z^2)} \quad (3)$$

هنگامی که از رابطه (۳) درحکم خانواده‌ای از



شکل ۲. (الف) ناهنجاری یک استوانه مدفون. (ب) گرادیان اول افقی ناهنجاری استوانه مدفون. (ج) گرادیان دوم افقی ناهنجاری استوانه مدفون. (د) مشتق قائم گرادیان اول افقی ناهنجاری استوانه مدفون. (ه) مشتق قائم گرادیان دوم افقی ناهنجاری استوانه مدفون.

مصنوعی برای یک نیم‌رخ (پروفیل) گرانی به صورت شکل ۳- الف با کمک الگوریتم تالوانی به دست آمد (تالوانی و همکاران، ۱۹۵۹).

ابتدا با کمک موجک حاصل از گرادیان افقی یک استوانه مدفون، رابطه (۴)، و خود داده گرانی تبدیل موجک محاسبه شد و نتیجه آن به صورت شکل ۴- الف به دست آمد. محل و موقعیت هر جسم روی شکل با خطوط سفید رنگ نشان داده شده است. در شکل ۴- ب نتیجه تبدیل موجک که با استفاده از موجک رابطه (۴) ولی برای گرادیان اول افقی داده‌ها محاسبه شده، نشان داده شده است. نتیجه حاصل از موجک رابطه (۵) و گرادیان دوم افقی داده‌ها در شکل ۴- ج آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در حالتی که مستقیماً از خود داده‌ها و موجک رابطه (۴) در تبدیل استفاده شده است، همبستگی زیادی بین مدل واقعی و خروجی روش مشاهده نمی‌شود اما در مقابل هنگامی که از گرادیان اول داده‌ها استفاده شده است، بیشترین مقادیر نتیجه تقریباً همبستگی زیادی با مدل واقعی دارد.

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{-2Gmzx}{(x^2 + z^2)^2} \quad (۴)$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = \frac{2Gmz(3x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^3} \quad (۵)$$

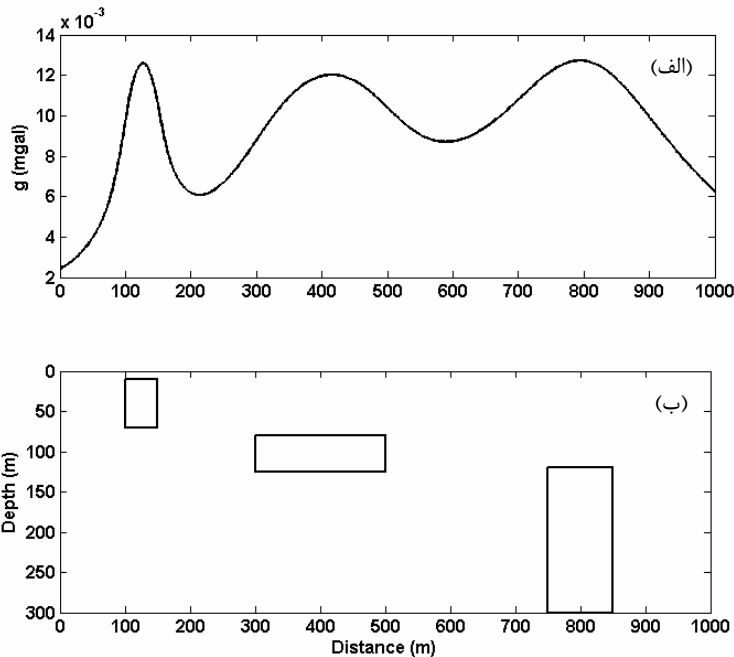
$$\frac{\partial^2 g}{\partial z \partial x} = \frac{-2Gmz(x^2 - 3z^2)}{(x^2 + z^2)^3} \quad (۶)$$

$$\frac{\partial^3 g}{\partial z \partial x^2} = \frac{6Gm(x^4 - 6x^2z^2 + z^4)}{(x^2 + z^2)^4} \quad (۷)$$

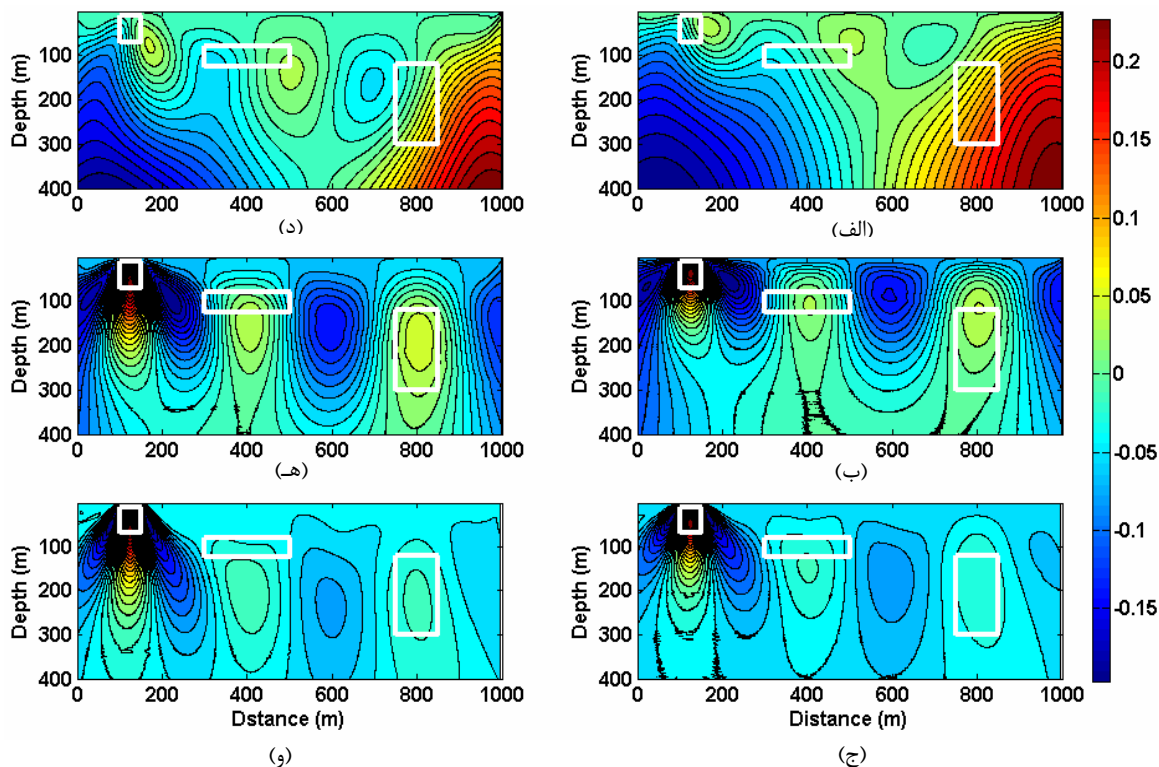
۴ کاربرد تبدیل موجک در تعیین موقعیت و عمق ناهنجاری‌های گرانی

مدل ساده

برای ساخت مدل مصنوعی از الگوریتم تالوانی برای اجسام دوبعدی با سطح مقطع چندضلعی استفاده شد. سه جسم با سطح مقطع‌های مستطیلی و چگالی یکسان 1000 kgm^{-3} در نظر گرفته شد (شکل ۳- ب) و مدل



شکل ۳. الف) نیم‌رخ مصنوعی گرانی. ب) مدل زمین‌شناسی مصنوعی برای ساخت نیم‌رخ گرانی مصنوعی.

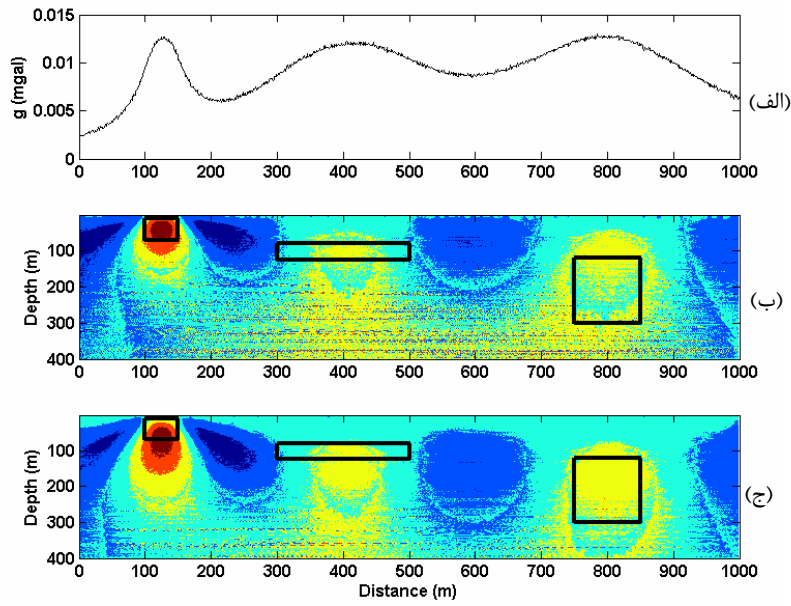


شکل ۴. (الف) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۴). (ب) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۴). (ج) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۵). (د) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۶). (ه) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۶). (و) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۷).

تفکیک در مورد اجسام کم عمق تا حدی افزایش یافته است.

با توجه به نتایج حاصل، استفاده از گرادیان اول افقی داده‌ها به همراه موجک‌های روابط (۴) و (۶) بهترین همبستگی، با مدل مصنوعی زمین‌شناسی دارند. لذا در ادامه به منظور بررسی کارایی روش در مقابل نوفه، این دو روش روی نیم‌رخ مصنوعی گرانی که با نسبت سیگنال به نوفه ۸۰ دسی‌بل نوفه به آن افزوده شده است، اعمال شدند و نتایج حاصل به صورت شکل ۵ به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور نوفه نیز تأثیر چندانی روی کارایی روش ندارد.

همان‌طور که از تبدیل موجک انتظار می‌رود، در مورد اجسام عمیق، قدرت تفکیک کاهش می‌یابد. هنگام استفاده از گرادیان دوم افقی داده‌ها و موجک رابطه (۵) به دلیل حذف طول‌موج‌های بلند داده، اطلاعات مربوط به اجسام عمیق تقریباً حذف می‌شود و عملاً مطابق شکل ۴-ج قدرت تفکیک برای این اجسام بسیار ضعیف است. در شکل‌های ۴-د تا ۴-و نتایج تبدیل موجک با استفاده از دو موجک (۶) و (۷) نشان داده شده است. هنگامی که از موجک‌های خانواده گرادیان قائم از گرادیان اول و دوم افقی موجک استفاده می‌شود، اطلاعات اجسام عمیق‌تر نسبتاً بیشتر حذف شده‌اند. در مقابل قدرت



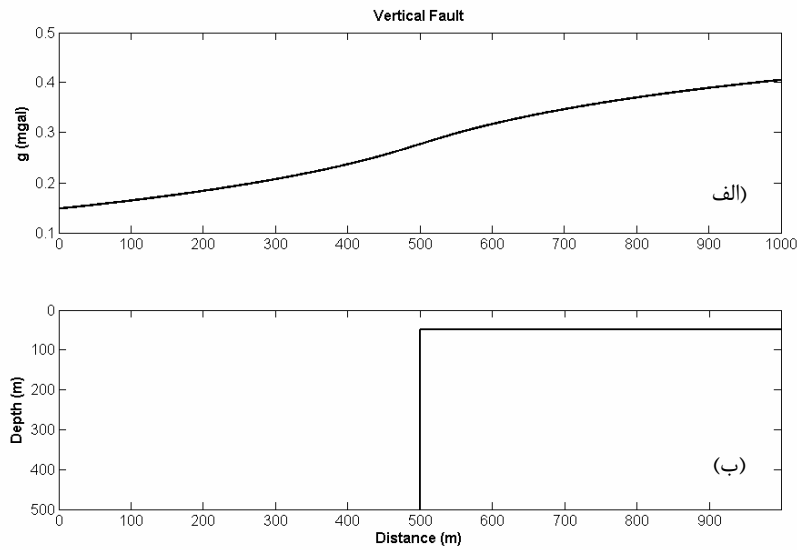
شکل ۵. (الف) نیم‌رخ داده‌های گرانی مصنوعی به همراه نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۸۰ دسی‌بل. (ب) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها به همراه نوفه با موجک رابطه. (ج) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه.

مصنوعی و ناهنجاری حاصل نشان داده شده است. در شکل ۷ نیز نتایج حاصل از تبدیل موجک پیوسته داده‌ها، گرادیان اول و دوم افقی داده‌ها با موجک‌های روابط (۴) تا (۷) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها نیز مشخص است، در این حالت نیز روش معرفی شده به‌طور واضح گسل عمودی را نشان می‌دهد.

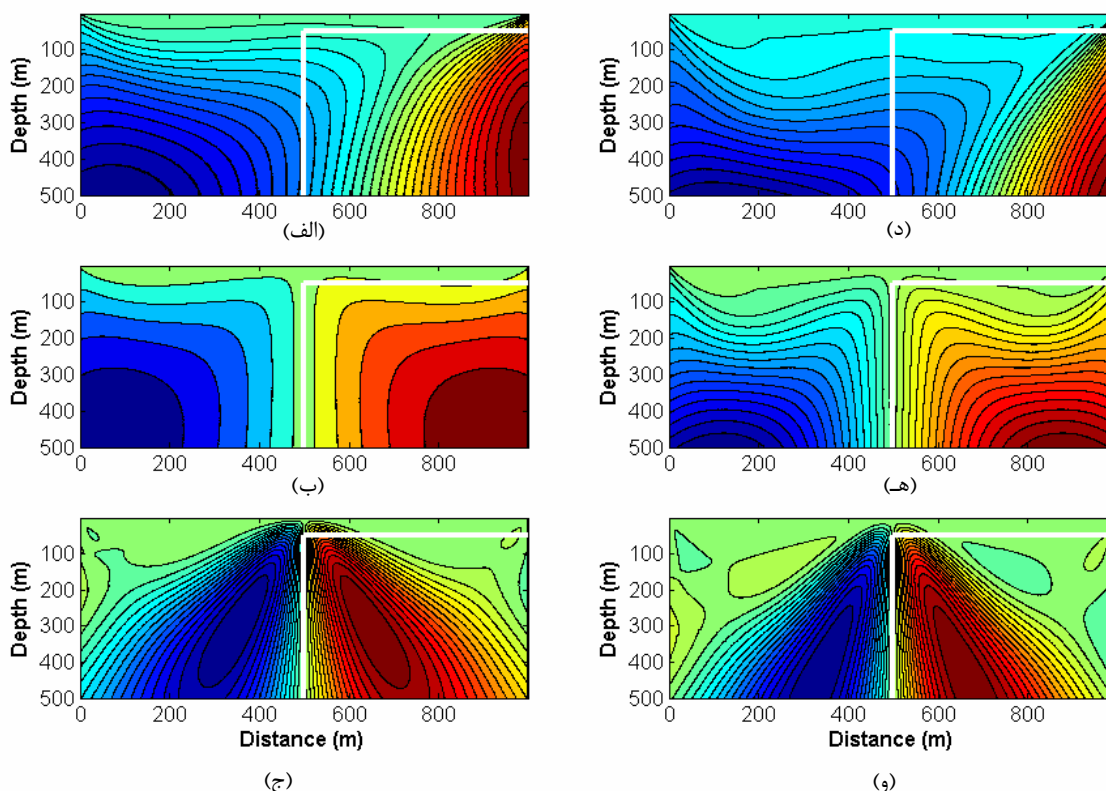
در ادامه الگوریتم روی مدل‌های گوناگون مختلف اعمال می‌شود.

گسل قائم

در ادامه روش روی یک مدل زمین‌شناسی مصنوعی گسل قائم اعمال شد. در شکل‌های ۶-ب و الف به ترتیب مدل



شکل ۶. (الف) نیم‌رخ داده‌های گرانی مصنوعی برای مدل مصنوعی زمین‌شناسی (ب). مدل مصنوعی زمین‌شناسی یک گسل قائم.



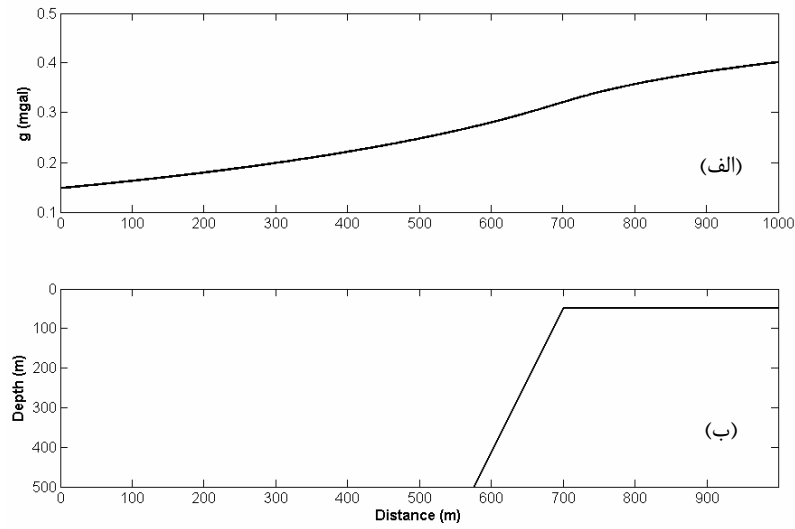
شکل ۷. الف) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۴). ب) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۴). ج) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۵). د) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۶). هـ) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۶). و) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۷).

با چگالی قرینه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۰- ب دو مدل با چگالی‌های قرینه را نشان می‌دهد که یکی دارای چگالی ۱۰۰۰ و دیگری ۱۰۰۰- کیلوگرم بر مترمکعب است. در شکل ۱۰- الف نیم‌رخ گرانی مصنوعی حاصل نشان داده شده است. شکل ۱۱ نتایج حاصل از تبدیل موجک پیوسته داده‌ها، گرادیان اول و دوم افقی داده‌ها با موجک‌های روابط (۴) تا (۷) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از گرادیان‌های اول و دوم افقی داده‌ها و موجک مادر روابط (۴) تا (۷) در تبدیل موجک به‌طور کامل دو مدل مصنوعی را شناسایی کرده است.

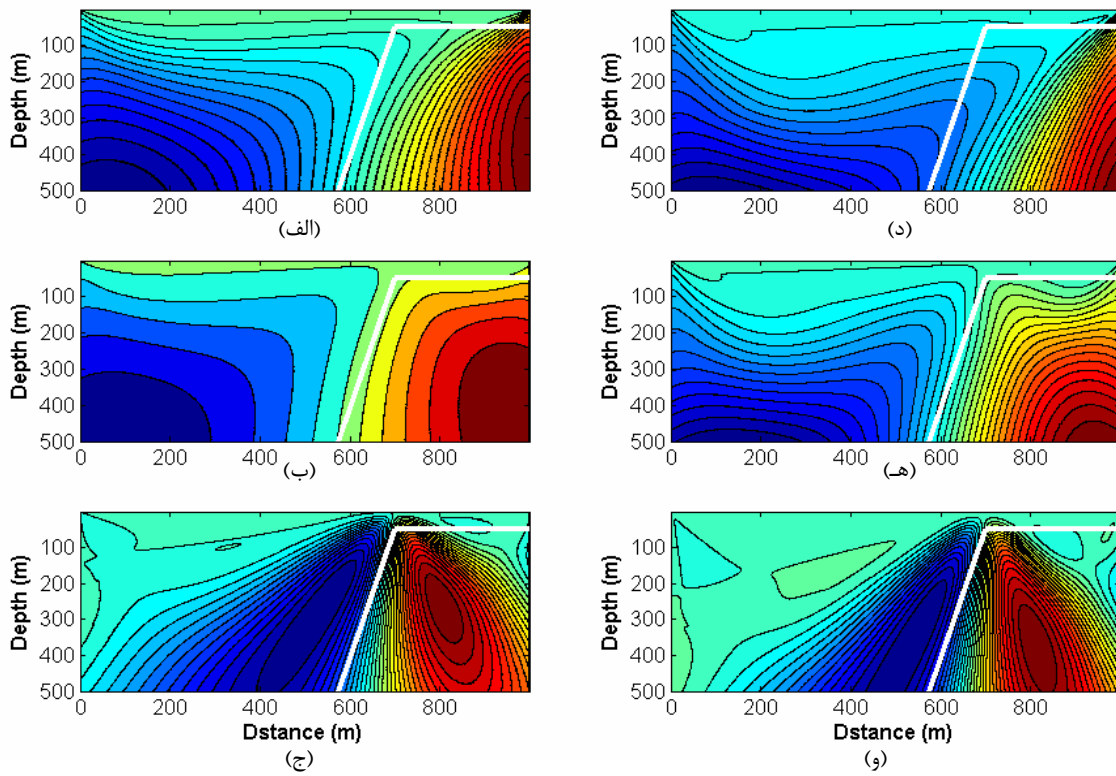
گسل شیب‌دار

در ادامه روش روی مدل زمین‌شناسی مصنوعی گسل شیب‌دار اعمال شد. در شکل‌های ۸- ب و الف به ترتیب مدل مصنوعی و ناهنجاری حاصل نشان داده شده است. در شکل ۹ نیز مانند گسل قائم نتایج حاصل از تبدیل موجک پیوسته داده‌ها، گرادیان اول و دوم افقی داده‌ها با موجک‌های روابط (۴) تا (۷) نمایش داده شده است. نتایج حاصل موفقیت روش تبدیل موجک پیوسته در تشخیص مدل گسل شیب‌دار را نشان می‌دهد.

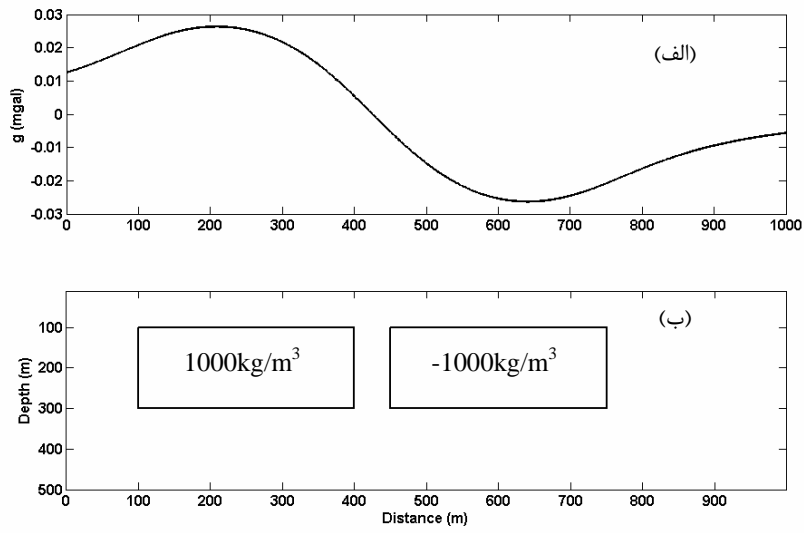
دو مدل مشابه با چگالی‌های متضاد در کنار یکدیگر در این قسمت کارایی روش برای شناسایی دو ناهنجاری



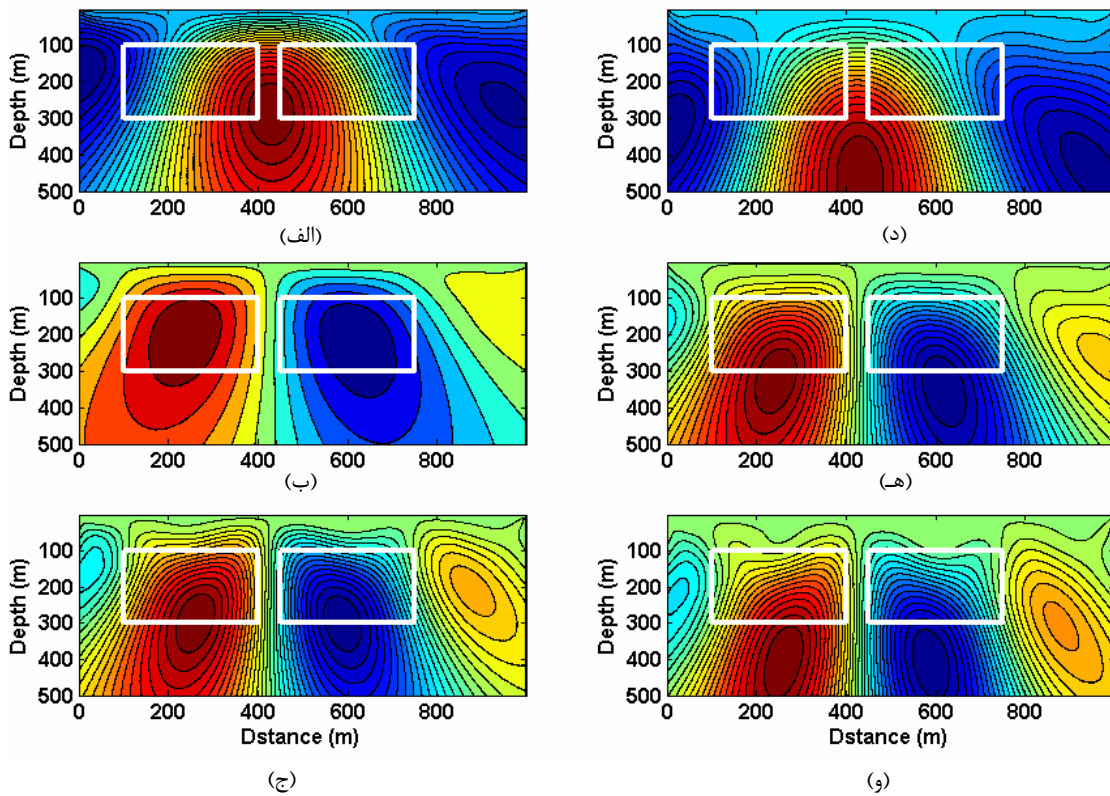
شکل ۸. (الف) نیم‌رخ داده‌های گرانی مصنوعی برای مدل مصنوعی زمین‌شناسی. (ب) مدل مصنوعی زمین‌شناسی یک گسل شیب‌دار.



شکل ۹. (الف) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۴). (ب) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۴). (ج) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۵). (د) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۶). (ه) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۶). (و) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۷).



شکل ۱۰. (الف) نیم‌رخ داده‌های گرانی مصنوعی برای مدل مصنوعی زمین‌شناسی. (ب) مدل مصنوعی زمین‌شناسی دو مدل با چگالی متضاد.



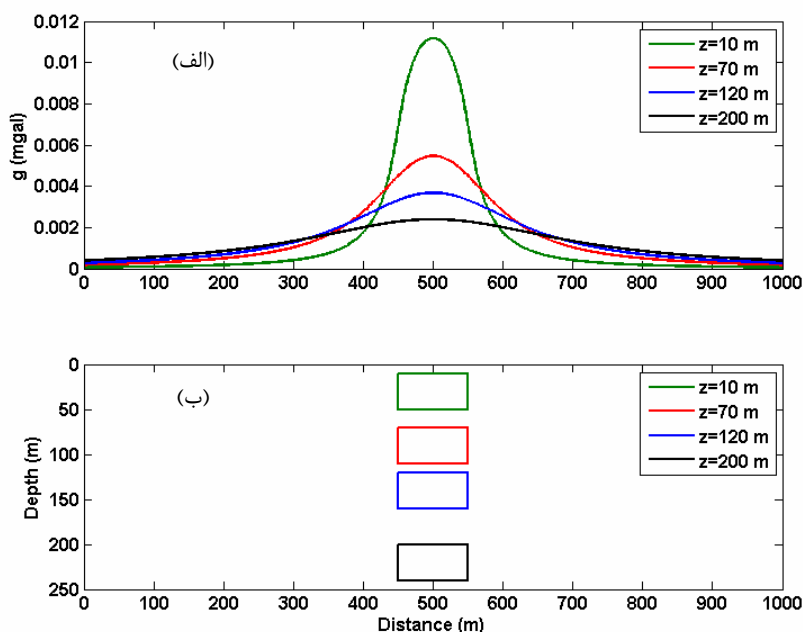
شکل ۱۱. (الف) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۴). (ب) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۴). (ج) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۵). (د) حاصل تبدیل موجک داده‌ها با موجک رابطه (۶). (ه) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۷). (و) حاصل تبدیل موجک گرادیان دوم افقی داده‌ها با موجک رابطه (۷).

۵ بررسی حساسیت روش نسبت به عمق

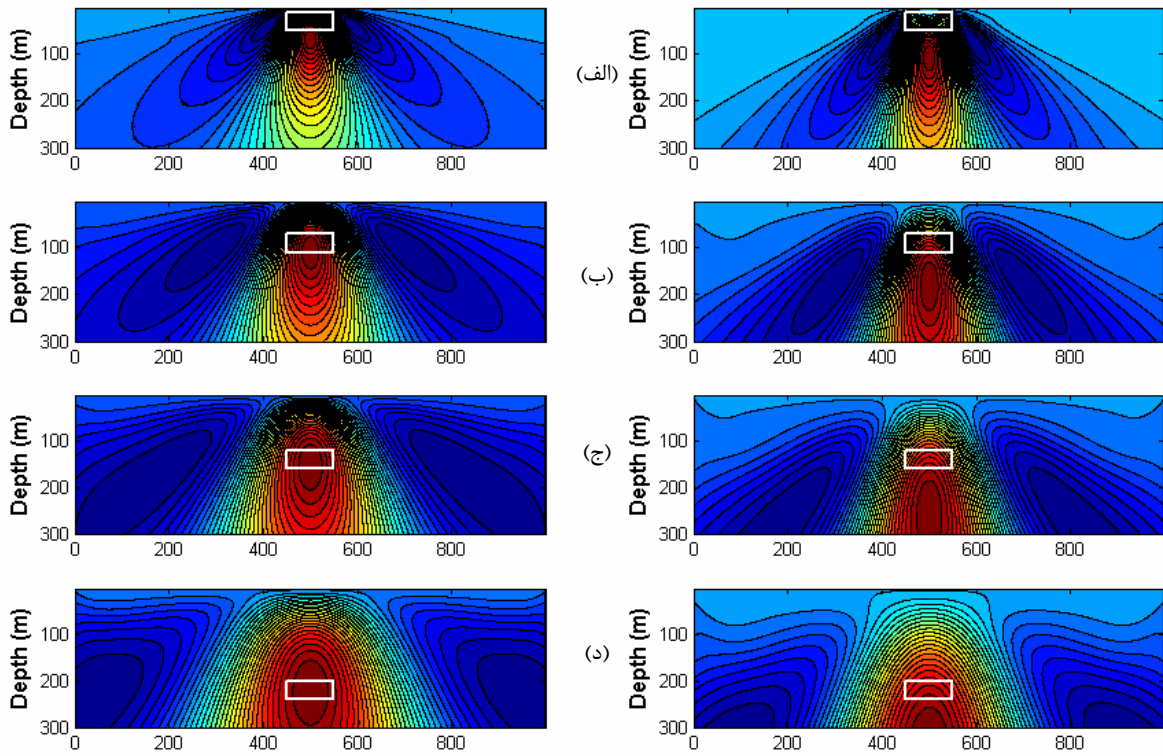
در این قسمت به منظور بررسی حساسیت روش تبدیل موجک برای تعیین عمق و محدوده ناهنجاری‌های گرانی، مدل ساده مستطیلی با ابعاد یکسان در نظر گرفته شد و فقط عمق آن به صورت ۱۰، ۷۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ تغییر کرد. در شکل ۱۲ مدل‌های مصنوعی به همراه ناهنجاری مربوطه نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از گرادیان اول افقی داده به همراه موجک‌های روابط (۴) و (۶) بهترین پاسخ را ارائه می‌کند. لذا در بررسی حساسیت به عمق، فقط دو روش پیش‌گفته روی داده‌ها اعمال شد که نتایج آن در شکل ۱۳ برای عمق‌های متفاوت مدل مصنوعی نشان داده شده است.

۶ داده واقعی

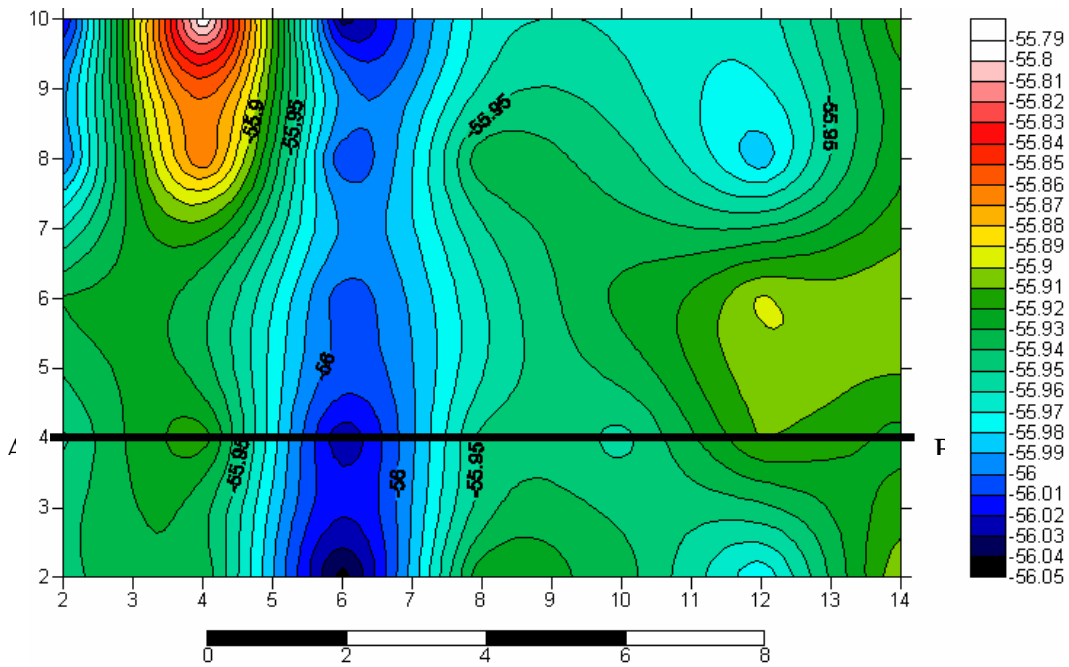
به منظور بررسی کارایی روش در مورد داده‌های واقعی، الگوریتم تعیین عمق و محدوده ناهنجاری گرانی با استفاده از تبدیل موجک پیوسته روی داده‌های گرانی برداشت شده از قنات واقع در مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران اعمال شد. برداشت به صورت یک شبکه منظم به ابعاد ۱۴×۱۰ متر به فاصله نقاط یک متر صورت گرفت و ناهنجاری بوگه حاصل به صورت شکل ۱۴ به دست آمد. از نیم‌رخ A-B که روی ناهنجاری بوگه نشان داده شده است، برای اعمال روش تبدیل موجک پیوسته استفاده شد که نتیجه آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شکل ۱۶- الف و ۱۷- ب به ترتیب حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها و موجک‌های روابط (۴) و (۶) را نشان می‌دهند.



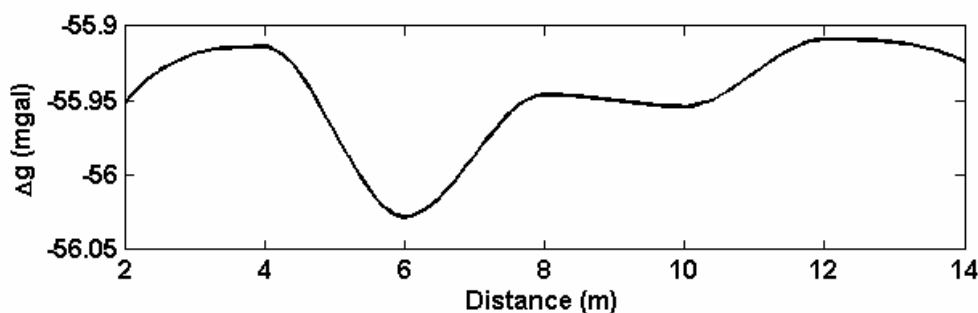
شکل ۱۲. ناهنجاری گرانی حاصل (الف) از مدل‌های مصنوعی (ب).



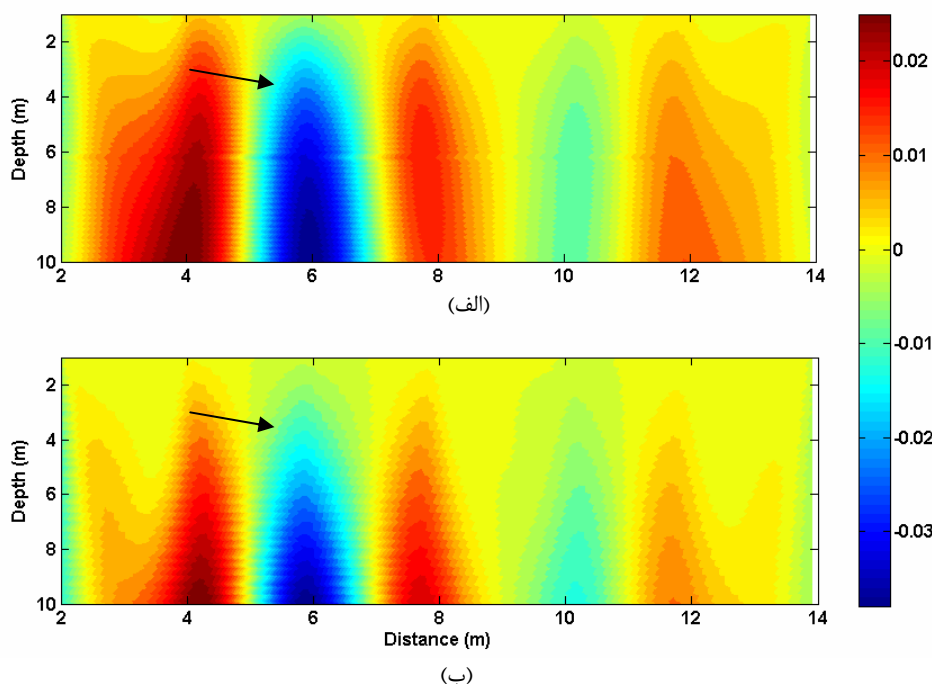
شکل ۱۳. حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (سمت چپ) و موجک رابطه (سمت راست) برای عمق‌های متفاوت (الف) ۱۰، (ب) ۷۰، (ج) ۱۲۰ و (د) ۲۰۰ متر.



شکل ۱۴. ناهنجاری بوگه به‌دست آمده روی فئات واقع در مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.



شکل ۱۵. نیم‌رخ A-B حاصل از ناهنجاری بوگه شکل ۱۴.

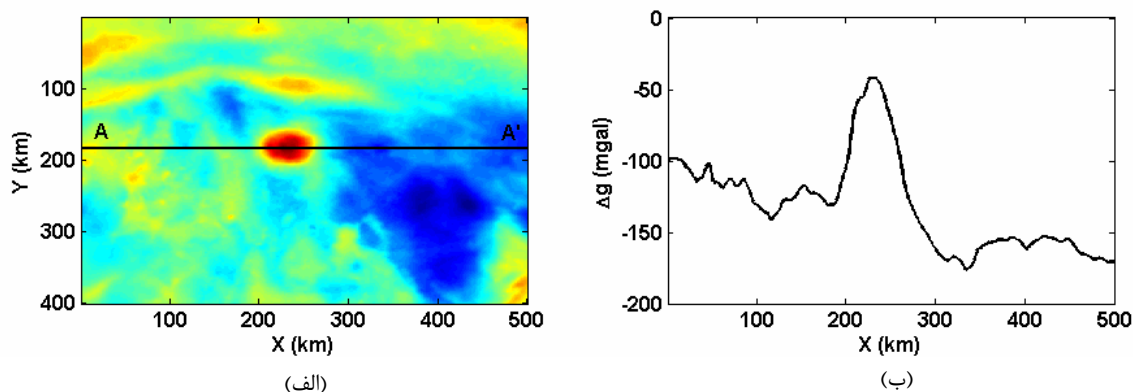


شکل ۱۶. (الف) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۴) و (ب) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۶).

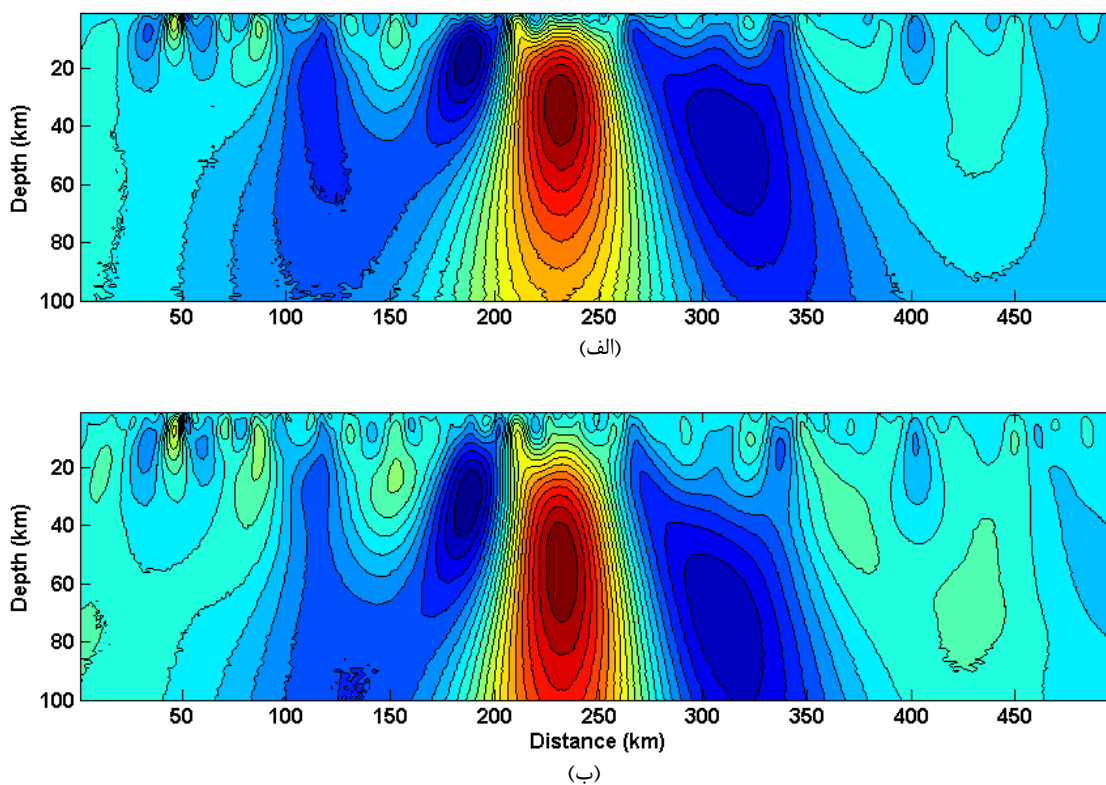
در شکل ۱۷- الف ناهنجاری بوگه مربوط به این توده گرانی نشان داده شده است. برای بررسی و اعمال الگوریتم نیم‌رخ از داده‌ها، که روی شکل به صورت خط A-A' نشان داده شده است، انتخاب شد. این پروفیل در شکل ۱۷- ب نشان داده شده است. در شکل ۱۸ نتایج حاصل از اعمال الگوریتم روی نیم‌رخ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها می‌توان دید، عمق بالایی توده گرانی را می‌توان بین ۲۰ تا ۲۵ کیلومتر برآورد کرد.

با توجه به نتایج قسمت بخش ۴، و در نظر گرفتن اینکه قنات مؤسسه دارای عمق کمی است، شکل ۱۶- الف از اعتبار بیشتری برخوردار است و لذا می‌توان عمق قنات را در حدود ۳۵ متر برآورد کرد. همچنین قنات در فاصله ۴ متری از نقطه A (شکل ۱۴) قرار دارد.

داده واقعی دیگری که با این روش مورد بررسی قرار گرفت مربوط به ناهنجاری ترامپسبرگ است که در افریقای جنوبی قرار دارد. دانشمندان حدس می‌زنند این ناهنجاری ناشی از توده‌ای گرانی باشد (بوچمن، ۱۹۶۰).



شکل ۱۷. (الف) ناهنجاری بوگه توده گرانیتی ترامپسبرگ واقع در افریقای جنوبی. خط A-A' محل نیمرخ مورد بررسی را نشان می‌دهد. (ب) پروفیل A-A' مورد بررسی.



شکل ۱۶. (الف) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۴) و (ب) حاصل تبدیل موجک گرادیان اول افقی داده‌ها با موجک رابطه (۶).

۷ نتیجه‌گیری

آن نسبت به محور قائم درحکم موجک برای تبدیل موجک پیوسته مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به مدل‌سازی‌های صورت گرفته، مشخص شد که استفاده از موجک روابط (۴) و (۶) و گرادیان افقی داده‌ها، بهترین

در این مقاله روشی کیفی برای تعیین عمق و محدوده داده‌های گرانی براساس تبدیل موجک پیوسته ارائه شد. گرادیان‌های اول و دوم ناهنجاری یک استوانه و مشتق‌های

پاسخ است. از طرفی استفاده از رابطه (۴) برای ناهنجاری‌های کم‌عمق و رابطه (۶) برای ناهنجاری‌های عمیق‌تر مناسب‌تر است.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از آقای دکتر کوپر به خاطر فراهم آوردن امکان دسترسی به داده‌های ناهنجاری ترامپسبرگ تقدیر و تشکر شود.

منابع

- Buchmann, J. P., 1960, Exploration of a geophysical anomaly at Tropmsburg, orange free state: South Africa Transactions of the Geol. Soc. South Africa, **63**, 1-10.
- Chui, C. K., 1992, An introduction to wavelets, Academic Press, USA.
- Cooper, G. R. J., 2006, Interpreting potential field data using continuous wavelet transforms of their horizontal derivatives: Comput. Geosci., **32**, 984-992.
- de Oliveira Lyrio, J. C. S., and Tenorio, L., Li, Y., 2004, Efficient automatic denoising of gravity gradiometry data: Geophysics, **69**, 772-782.
- Fedi, M., and Quarta, T., 1998, Wavelet analysis for the regional residual and local separation of potential field anomalies: Geophy. Prospect., **46**, 507-525.
- Mallat, S., 1999, A wavelet tour of signal processing, Academic Press, New York, USA.
- Martelet, G., Sailhac, P., Moreau, F., Diamant, M., 2001, Characterization of geological boundaries using 1-D wavelet transform on gravity data: theory and applications to the Himalayas: Geophysics, **66**, 1116-1129.
- Moreau, F., Gilbert, D., Holschneider, M., and Saracco, G., 1999, Identification of potential fields with the continuous wavelet transform: basic theory: J. Geophys. Res., **104** (B3), 5003-5013.
- Poularikas, A. D., 2000, The transforms and applications Handbook, 2nd edition, CRC Press, USA.
- Talwani, M., Worzel, J. L., and Landisman, M., 1959, Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone: J. Geophys. Res., **64**, 49-61.