برآورد عمق بی‌هنجاری‌های گرانی حاصل از شکل‌های هندسی منتظم با استفاده از تبدیل هیلبرت تغییریافته

زهرا باقری آشنا [۱] و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی [۱*]

[۱] موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۱۹)

چکیده

برآورد عمق بی‌هنجاری‌های گرانی یکی از مهم‌ترین مراحل در تفسیرداده‌های گرانی‌سنجی است. ازاین‌رو در این تحقیق روشی برای برآورد عمق بی‌هنجاری‌ها با استفاده از روش تبدیل هیلبرت تغییریافته عرضه می‌شود. تبدیل هیلبرت، یک عملگر خطی است که فاز تابع را در بسامدهای مثبت به اندازه ۹۰ درجه اضافه و در بسامدهای منفی به اندازه ۹۰ درجه کاهش می‌دهد، درحالی‌که دامنه تابع تغییر نمی‌کند. تبدیل هیلبرت تغییریافته مشابه تبدیل هیلبرت است با این تفاوت که تبدیل هیلبرت تغییریافته اختلاف فازی برابر با ۲۷۰ درجه ایجاد می‌کند، درحالی‌که در سایر ویژگی‌ها مشابه‌اند.

در این مقاله، تبدیل هیلبرت تغییریافته تابع گرانی شکل‌های هندسی منظم محاسبه می‌شود. با طراحی دو مدل مصنوعی استوانه افقی و کره، نتایج در دو وضعیت بدون نوفه و با اِعمال نوفه تصادفی برای عمق‌های متفاوت از کم تا زیاد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مورد کاربرد تبدیل هیلبرت تغییریافته روی داده‌های واقعی به برآورد عمق داده‌های واقعی مربوط به دو منطقه آباده و هواسان پرداخته می‌شود و سپس عمق‌های به‌دست آمده با استفاده از روش تبدیل هیلبرت تغییریافته با نتایج حاصل از روش واهمامیخت اویلر مقایسه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری گرانی، تبدیل هیلبرت تغییریافته، مدل مصنوعی، برآورد عمق

Depth estimation of gravity anomalies due to regular geometrical shapes using modified Hilbert transform

Zahra Bagheri Ashena[1] and Vahid Ebrahimzadeh Ardestani[1*]

[1]*Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

(Received: 4 February 2013, accepted: 8 February 2014)

Summary

One of the most important parameters in the interpretation of gravity data is the depth to the center or top of the buried body. In this study, the interpretation of gravity anomalies of spherical and cylindrical models is examined using the modified Hilbert transform. The Hilbert transform of a real function f(x) is defined as:

$$H(x) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}[IF(\omega)\cos(\omega x) - RF(\omega)\sin(\omega x)]d\omega, \quad (1)$$

where

*Corresponding author: ebrahimz@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\exp(-i\omega x)dx = RF(\omega)-IF(\omega). \quad (2)$$

RF(ω) and FI(ω) are the real and imaginary component of the Fourier transform of f(x). The Hilbert transform defined by Eq.(1) is a mathematical operation which shifts the phase of a function by 90° without changing its amplitude.

Modified Hilbert transform is identical in amplitude with the conventional Hilbert transform but differs in phase as it yields a phase shift of 270°. Modified Hilbert transform, MH(x), can be obtained from Hilbert transform H(x) by replacing x with –x in Eq.(1) (Shriniivas 2000; Sundararajan et al 2000), i.e,

$$MH(x)=\int_{-\infty}^{\infty}[IF(\omega)\cos(\omega x)+RF(\omega)\sin(\omega x)]d\omega. \quad (3)$$

The general gravity effect caused by simple models such as horizontal circular cylinder and sphere, centered at x=0 and buried at a depth z is given by (Abdelrahman et al 2001):

$$g(x)=\frac{Az}{(x^2+z^2)^q}, \quad (4)$$

where q is shape factor and depends on the nature of the source, and is 3/2, for a sphere and 1, for a horizontal cylinder. And A is amplitude factor given by: $4\pi G\rho R^3/3$, for a sphere and $2\pi G\rho R^2$ for a horizontal cylinder, where ρ is the density contrast, G is the universal gravitational contrast and R is the radius.

The application of the method is examined using noise free and noise corrupted synthetic gravity data created for spherical and cylindrical models with a density contrast of 1 and 1.5g/cm3 respectively. The gravity anomaly g(x), modified Hilbert transform MH(x), along a profile at an interval of 1m are computed for both data sets. The procedure has been tested for several models at different dephts and radii, for three of which the results are presented here. It is observed that the depth to the origin of the gravity anomaly can be computed as a function of the intersection point of gravity anomaly g(x) and its modified Hilbert transform MH(x).

The effect of random noise on the models shows that even by including up to 16% random noise, interpretational values do not differ significantly from thoes of the noise free case. Hence the effect of noise is negligible on the procedure.

To illustrate the applicability of the method two field examples from “Abade” in Fars province and “Havasan” in Ilam province, Iran, are also included. A Scintrex CG3 gravimeter with a sensitivity of 5 microGal was used for micro-gravity observations in the selected areas. Station altitudes were measured with a total station model Leica Tc 407 with an accuracy of 1-5mm in horizontal and vertical coordinates. The residual gravity grids of were obtained obtained using Geosoft software.

To demonstrate the reliability of the proposed method, the Euler de-convolution method is used to detect the depth of the real gravity anomalies. The results from the interpretation of real data by modified Hilbert transform method are compared to the ones obtained from the Euler de-convolution method and the known depth values from drilling information.

Keywords: Gravity anomaly, modified Hilbert transform, synthetic model, depth estimation

۱ مقدمه

در بعضی از روش‌های رایج تفسیر داده‌های گرانی، هدف برآورد پارامترهای هندسی بی‌هنجاری‌های گرانی است که از ساختارهایی به‌صورت شکل‌های ساده هندسی (کره- استوانه) حاصل شده‌اند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی عمق بی‌هنجاری گرانی است.

روش‌های عددی بسیاری برای تعیین عمق بی‌هنجاری‌های گرانی با فرض چشمه به‌شکل کره، استوانه افقی و یا استوانه عمودی، عرضه شده است. از جمله روش‌های برآورد عمق، روش تبدیل هیلبرت است. هدف از استفاده تبدیل هیلبرت در تحقیقات ژئوفیزیکی، به‌دست آوردن پارامترهای ساختاری با توجه به ریشه‌ها و نقاط تقاطع بی‌هنجاری و گرادیان‌های مختلط است.

در میدان‌های پتانسیل این تبدیل به خاطر عملکرد ساده و کارا در امر تفسیر و پردازش مورد توجه است. کاربرد تبدیل هیلبرت در پردازش و تفسیر داده‌های میدان‌های پتانسیل از اوایل دهه ۱۹۷۰ اهمیت یافت (نبیغان، ۱۹۷۲؛ گرین و استنلی، ۱۹۷۶؛ موهان و همکاران، ۱۹۸۲؛ ساندارارجان، ۱۹۸۲). بر اساس روش موهان (۱۹۸۲) و ساندارارجان (۱۹۸۲)، تبدیل هیلبرت در تفسیر بی‌هنجاری‌های پتانسیل همواره جواب‌گو نیست، به‌ویژه زمانی که تابع پتانسیل، تابعی فرد است. برای رفع این نقص تبدیل هیلبرت تغییریافته تعریف می‌شود (ساندارارجان، ۱۹۹۶؛ الگارنی و ساندارارجان، ۲۰۰۹). از تبدیل هیلبرت تغییریافته در تعیین عمق مرکز ساختارهایی استفاده می‌شود که تبدیل هیلبرت در تعیین آنها ناتوان است و یا نتایج دقیقی به‌همراه ندارد.

۲ نظریهٔ روش

تبدیل هیلبرت ($H(x)$) تابع حقیقی $f(x)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(x)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{f(x)}{x-\pi}dx \quad . \tag{۱}$$

با توجه به‌اینکه تبدیل هیلبرت ارتباط مستقیمی با تبدیل فوریه دارد، بنابراین رابطه دیگری برای تبدیل هیلبرت با استفاده از تبدیل فوریه $F(\omega)$، به‌صورت زیر تعریف می‌شود (ساندارارجان، ۱۹۹۶):

(۲)

$$H(x)=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\infty}[IF(\omega)\cos(\omega x)-RF(\omega)\sin(\omega x)]d\omega,$$

که $RF(\omega)$ و $IF(\omega)$ قسمت‌های حقیقی و موهومی تبدیل فوریه هستند. تبدیل فوریه تابع $f(x)$ عبارت است از:

(۳)

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(x)\exp(-i\omega x)dx=RF(\omega)-IF(\omega).$$

با دو بار تبدیل هیلبرت گرفتن از یک تابع، همان تابع اولی با علامت منفی حاصل می‌شود.

تبدیل هیلبرت تغییریافته مشابه تبدیل هیلبرت است با این تفاوت که در رابطه (۲) با جای‌گذاری $-x$ به‌جای x، تبدیل هیلبرت تغییریافته $MH(x)$، بدست می‌آید:

(۴)

$$MH(x)=\int_{-\infty}^{\infty}[IF(\omega)\cos(\omega x)+RF(\omega)\sin(\omega x)]d\omega.$$

تفاوت بین این دو تبدیل در اختلاف فاز ایجاد شده است به‌طوری‌که تبدیل هیلبرت تغییریافته اختلاف فازی برابر با ۲۷۰ درجه ایجاد می‌کند، درحالی‌که این دو در سایر ویژگی‌ها مشابه‌اند. اگر از تابعی دو بار تبدیل هیلبرت تغییریافته گرفته شود، تابع اولیه حاصل می‌شود.

۲-۱ تبدیل هیلبرت تغییریافته استوانه افقی

اثر گرانی استوانه افقی از رابطه زیر به‌دست می‌آید (عبدالرحمن، ۲۰۰۱):

$$g(x)=A\frac{z}{(x^2+z^2)^q}, \tag{۵}$$

که $A=2\pi G\rho R^2$ ضریب دامنه و تابعی از تباین چگالی و شعاع است.

با استفاده از رابطه‌های (۳) و (۵)، قسمت‌های حقیقی و موهومی تبدیل فوریه استوانه افقی تابع $g(x)$ عبارت‌اند از:

$$R(\omega)=-A\pi e^{-\omega z}$$

$$I(\omega)=0. \tag{۶}$$

با توجه به معادلات فوق و معادلات (۲) و (۴) تبدیل

هیلبرت و تبدیل هیلبرت تغییریافته استوانه افقی به‌صورت زیر محاسبه شده است:

$$H(x) = -A\frac{x}{x^2+z^2} \tag{۷}$$

$$MH(x) = A\frac{x}{x^2+z^2} \tag{۸}$$

در نقطه برخورد تبدیل هیلبرت تغییریافته *MH(x)* و گرانی *g(x)* در $x = x_1$ داریم:

$$MH(x) = g(x)$$
$$z = x_1 \tag{۹}$$

از رابطه (۹) ملاحظه می‌شود که عمق مرکز استوانه تا سطح برابر با طول نقطه برخورد گرانی و تبدیل هیلبرت تغییریافته است.

۳- ۲ تبدیل هیلبرت تغییریافته کره

اثر گرانی کره به‌صورت رابطه زیر است (عبدالرحمن، ۲۰۰۱):

$$g(x) = A\frac{z}{(x^2+y^2)^{3/2}}, \tag{۱۰}$$

که $A=4/3\pi G\rho R^3$ ضریب دامنه و تابعی از تباین چگالی و شعاع است.

تبدیل هیلبرت کره با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده و به‌صورت زیر است:

(۱۱)

$$MH(x) = \frac{2A}{\pi xz}\left\{B\ln\left|\frac{1-u_1}{1+u_1}\right| + C\ln\left|\frac{1-u_2}{1+u_2}\right| + D\frac{\pi}{2} + F\left(\frac{\pi}{2}+\frac{1}{2}\right)\right\}$$

که متغیرها به شکل زیر تعریف می‌شوند:

(۱۲)

$$u_1 = \frac{z}{x} + \sqrt{(\frac{z}{x})^2+1}$$
$$u_2 = \frac{z}{x} - \sqrt{(\frac{z}{x})^2+1}$$
$$B = \frac{(1-u_2{}^2)^2}{(u_2-u_1)(1+u_2{}^2)^2}$$
$$C = \frac{(1-u_1{}^2)^2}{(u_1-u_2)(1+u_1{}^2)^2}$$
$$D = 1 + B(-\frac{z}{x} - \sqrt{(\frac{z}{x}^2)+1}) + C(-\frac{z}{x} + \sqrt{(\frac{z}{x})^2+1})$$
$$F = -2\{1 - C\sqrt{(\frac{z}{x})^2+1} + B\sqrt{(\frac{z}{x})^2+1}\}$$

در نقطه برخورد تبدیل هیلبرت تغییریافته MH(x) و گرانی *g(x)* در $x = x_1$ داریم:

$$MH(x) = g(x)$$

$$z \cong x_1 \tag{۱۳}$$

با توجه به رابطه (۱۳)، عمق مرکز کره باتقریب بسیار خوبی برابر محل تقاطع گرانی و تبدیل هیلبرت تغییریافته است.

۴ بررسی کاربرد روش تبدیل هیلبرت تغییریافته روی مدل‌های مصنوعی

به‌منظور ارزیابی روش تبدیل هیلبرت تغییریافته، با استفاده از نرم‌افزار مَت‌لَب، به طراحی مدل‌های مصنوعی می‌پردازیم. بدین‌منظور دو مدل مصنوعی شامل استوانه افقی و کره طراحی می‌کنیم، به‌طوری‌که مختصات و عمق این مدل‌ها برای ما مشخص است. نمودارها و مقادیر گرانی مربوط به مدل‌ها محاسبه می‌شوند و در ادامه با روش تبدیل هیلبرت تغییریافته عمق مدل برآورد می‌شود. هدف، نشان دادن بهترین انطباق بین مقادیر مفروض اولیه و مقادیر برآوردشده برای عمق مدل‌ها است.

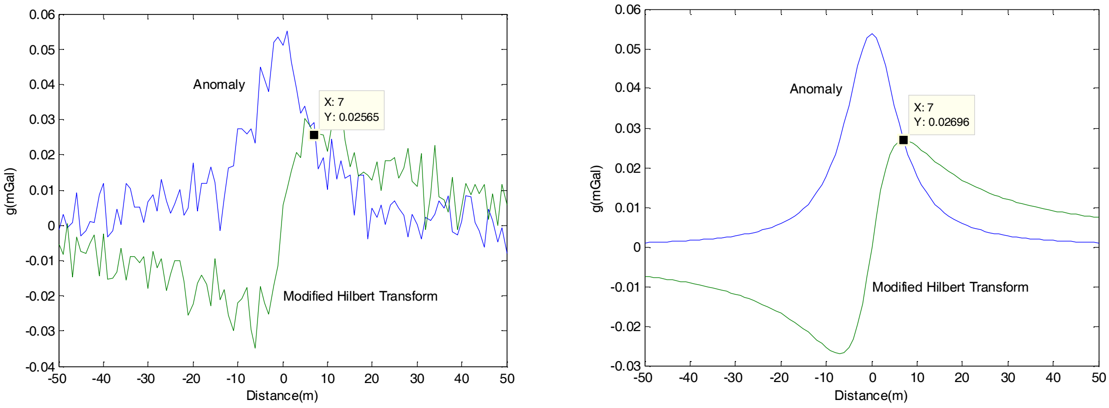
۴-۱ مدل مصنوعی استوانه افقی

اولین مدل مصنوعی مورد بررسی استوانه افقی با تباین چگال ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در اینجا نتایج برای سه مدل متفاوت در دو وضعیت بدون نوفه و با اِعمال نوفه تصادفی بررسی شده است (شکل‌های ۱ تا ۳). اثر گرانی، تبدیل هیلبرت و تبدیل هیلبرت تغییریافته برای مدل‌ها محاسبه شده‌اند و نتایج حاصله به همراه درصد خطای برآورد عمق در وضعیت اِعمال نوفه تصادفی

درجدول ۱ آورده شده است.

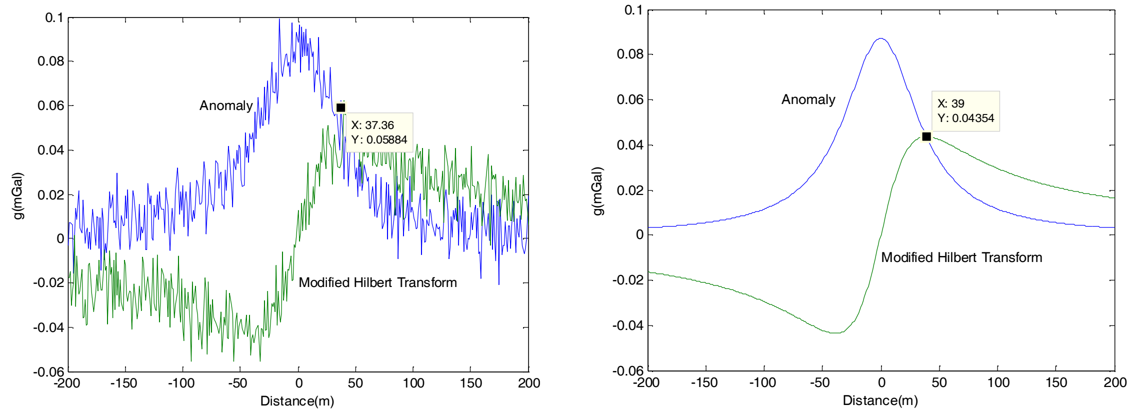
جدول ۱. نتایج حاصل از اعمال روش روی مدل مصنوعی استوانه افقی.

مدل	شعاع (m)	عمق مفروض اولیه (m)	درصد نوفه	عمق محاسبه شده (m)	عمق محاسبه شده با اعمال نوفه (m)	درصد خطا
مدل ۱	۳	۷	۳	۷	۷	۰
مدل ۲	۹	۳۹	۱۴	۳۹	۳۷/۳۶	۴/۲
مدل ۳	۱۴	۷۶	۱۶	۷۶	۷۲/۲۷	۴/۸



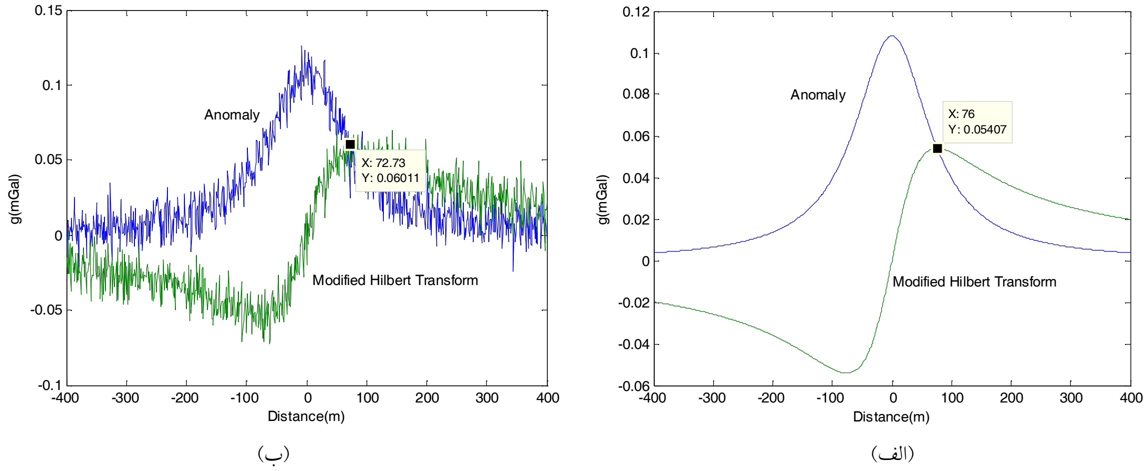
(ب) (الف)

شکل ۱. (الف) برآورد عمق استوانه افقی به شعاع ۳ متر و در عمق ۷متری. (ب) برآوردعمق استوانه افقی به شعاع ۳ متر و در عمق ۷ متری با اِعمال ۳٪ نوفه.



(ب) (الف)

شکل ۲. (الف) برآورد عمق استوانه افقی به شعاع ۹ متر و در عمق ۳۹متری. (ب) برآورد عمق استوانه افقی به شعاع ۹ متر و در عمق ۳۹متری با اعمال ۱۴٪ نوفه.



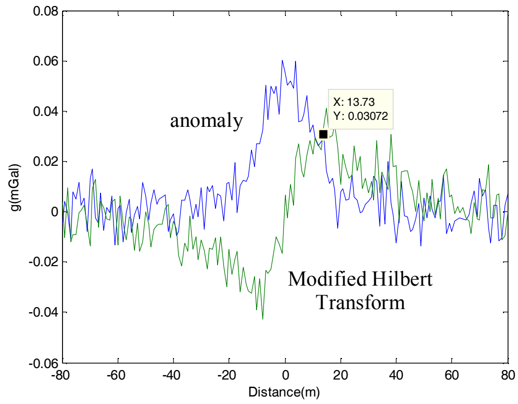
شکل ۳. (الف) برآورد عمق استوانه افقی به شعاع ۱۴ متر و در عمق ۷۶متری. (ب) برآورد عمق استوانه افقی به شعاع ۱۴ متر و در عمق ۷۶متری با اِعمال ٪۱۶ نوفه.

۴-۲ مدل مصنوعی کره

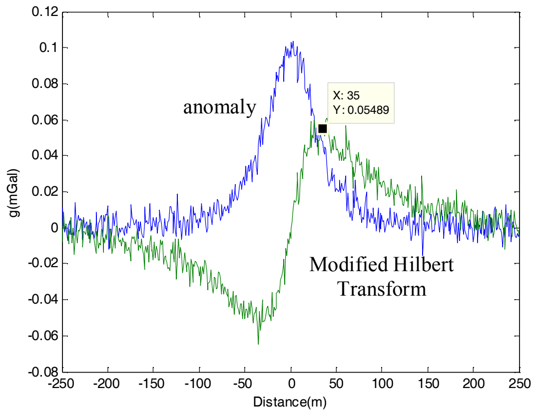
دومین مدل مصنوعی به‌کار رفته، کره دوبُعدی با تباین چگالی یک گرم بر سانتی‌متر مکعب است. میزان نوفه اِعمال شده روی مدل‌ها ۱۲، ۷، ۶ درصد انتخاب شده است. اثر گرانی، تبدیل هیلبرت تغییریافته برای این مدل‌ها محاسبه شده (شکل۴ الف تا ج) و نتایج حاصل به‌همراه درصد خطای محاسبه عمق در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از اعمال روش روی مدل مصنوعی کره.

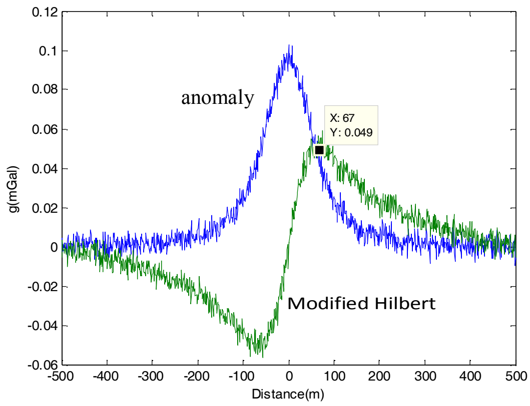
مدل	شعاع (m)	عمق مفروض اولیه (m)	درصد نوفه	عمق محاسبه شده با اعمال نوفه (m)	درصد خطا
مدل ۱	۶	۱۳	۱۲	۱۳/۷۳	۵/۶
مدل ۲	۱۶	۴۲	۷	۳۵	۱۶
مدل ۳	۲۵	۸۳	۶	۶۷	۱۹



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴.(الف) برآورد عمق کره به شعاع ۶ متر، در عمق ۱۳ متری با اعمال ۱۲٪ نوفه. (ب) برآورد عمق کره به شعاع ۱۶ متر، در عمق ۴۲متری با اعمال ۶٪ نوفه. (ج) برآورد عمق کره به شعاع ۲۵ متر و در عمق ۸۳ متری با اعمال ۷٪ نوفه.

۵ اِعمال روش تبدیل هیلبرت تغییریافته روی داده‌های واقعی

در این بخش روش روی داده‌های واقعی اِعمال می‌شود. بدین‌منظور از دو سری داده تصحیح‌یافته گرانی استفاده شده است. برداشت داده‌ها را بخش گرانی‌سنجی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، عملی ساخته است. داده‌های واقعی مورد استفاده مربوط به عملیات میکروگرانی‌سنجی در منطقه آباده، استان فارس و عملیات اکتشافی در منطقه هواسان–استان ایلام است.

۵–۱ منطقه آباده

مجموعه نخست داده‌های مورد استفاده مربوط به عملیات اکتشاف سنگ معدن باریت در منطقه آباده، استان فارس است. سنگ‌های زمینه عمدتا از نوع سنگ آهک هستند.

از آنجا که شکل این بی‌هنجاری را می‌توان به‌صورت یک استوانه افقی تجسم کرد، از روش حاضر برای برآورد عمق این بی‌هنجاری استفاده می‌شود.

قدیمی‌ترین واحد تشکیلات با جنس سیلت استون، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های آذرین مربوط به دوران

ژوراسیک است که با یک روراندگی در کنار تشکیلات سنگ آهکی کرتاسه قرار گرفته است. بیرون‌زدگی‌های کانسار باریت عمدتا در سنگ آهک بلورین مربوط به دوران سوم دیده شده است که با یک روراندگی در کنار واحدهای با سن ژوراسیک قرار گرفته است.

عملیات گرانی‌سنجی روی شبکه‌ای شامل ۲۰۰ نقطه برداشت با فاصله بین ایستگاهی ۵ تا ۱۰ متر صورت پذیرفته است. نقشه بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده مربوط به منطقه آباده در نرم‌افزار ژئوسافت رسم و در شکل(۵-الف) نشان داده شده است. ناحیه موردنظر یک بی‌هنجاری به شکل استوانه افقی با تباین چگالی مثبت است که در بخش جنوبی نقشه دیده می‌شود.

داده‌های مورد استفاده از نیم‌رخAB به طول ۱۰۵ متر و به فاصله ایستگاهی ۱/۹ متر انتخاب شده‌اند و در مجموع ۵۷ داده گرانی موجود است. تبدیل هیلبرت تغییریافته نقاط روی نیم‌رخ محاسبه شده و منحنی آن به‌همراه اثر گرانی نقاط در شکل (۶- ج) نمایش داده شده است. مقدار عمق به‌دست آمده با استفاده از روش تبدیل هیلبرت تغییریافته، با اطلاعات حاصل از حفاری و همچنین نتایج حاصل از اِعمال روش اویلر (شکل ۶. ب) انطباق خوبی دارد (جدول ۳).

۵-۲ منطقه هواسان

داده‌های مورد استفاده در این بخش مربوط به عملیات میکروگرانی‌سنجی در منطقه هواسان، استان ایلام است که به‌منظور اکتشاف زون‌های کارستی برداشت شده است.

محل موردنظر برای بررسی‌های میکروگرانی‌سنجی منطقه در نظر گرفته شده برای احداث سد مخزنی هواسان (محور قدیم) در استان ایلام در نزدیکی شهر سر پل ذهاب است. سایت موردنظر جزو رشته کوه‌های زاگرس است که عمده تشکیلات زمین‌شناسی مربوط به رسوبات دوران دوم است که از پایین به بالا شامل تشکیلات امیران- تله زنگ - آسماری و در رو نهشته‌های دوران چهارم است. تشکیلات امیران به رنگ خاکستری متمایل به سبز شامل تناوبی از مارن- ماسه سنگ و سیلت استون ضعیف تا مقاوم است. سازندهای تله زنگ و آسماری از آهک‌های کرم تا خاکستری و آهک بلوری مقاوم نازک تا ضخیم لایه تشکیل شده که سازند تله زنگ در وسط هوازده است

داده‌های گرانی در طول ۹ پروفیل و با فاصله ایستگاهی ۵۰ متر برداشت شده و جمعا حدود ۱۰۰ نقطه اندازه گیری شده‌اند. نقشه بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده داده‌های واقعی منطقه هواسان، در نرم‌افزار ژئوسافت رسم شده و در شکل (۶. الف) نمایش داده شده است. بی‌هنجاری موردنظر دربخش مرکزی نقشه واقع شده ویک تباین چگالی منفی با سنگ میزبان خود را نشان می‌دهد.

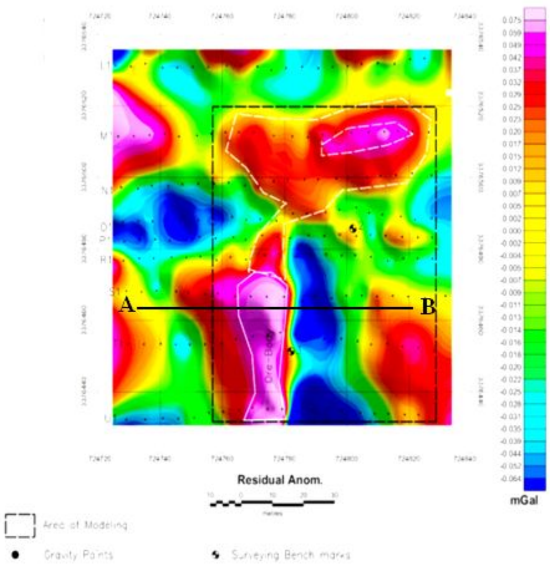
جدول۳. نتایج تخمین عمق داده‌های واقعی.

بی‌هنجاری	عمق (m)	
	روش تبدیل هیلبرت تغییریافته	روش اویلر
منطقه آباده	۶/۳۲	بین ۴ تا ۸ متر
منطقه هواسان	۳۳/۵۹	بین ۳۰ تا ۴۰ متر

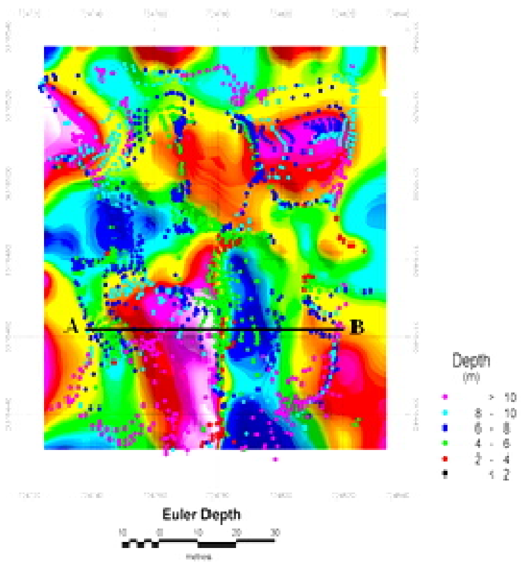
به منظور اِعمال روش تبدیل هیلبرت تغییریافته روی داده‌های واقعی منطقه هواسان، از داده‌های روی نیم‌رخ A’B’ استفاده شده است. تبدیل هیلبرت تغییریافته ۴۰ نقطه از این نیم‌رخ به‌صورت عددی محاسبه و منحنی مربوط به آن به‌همراه اثر گرانی این نقاط در شکل (۶-ج) نشان داده

شده است. از محل تلاقی منحنی‌های تبدیل هیلبرت تغییریافته و گرانی، مقدار عمق بی‌هنجاری محاسبه و با نتایج به‌دست آمده از جواب‌های اویلر (شکل ۶- ب) مقایسه شده است (جدول ۳).

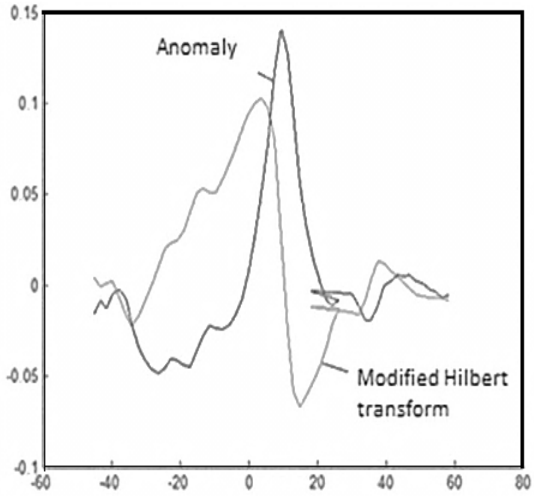
لازم به ذکر است که در استفاده از روش تبدیل هیلبرت تغییریافته شکل بی‌هنجاری به علت تقارن آن کره درنظر گرفته شده است.



(الف)

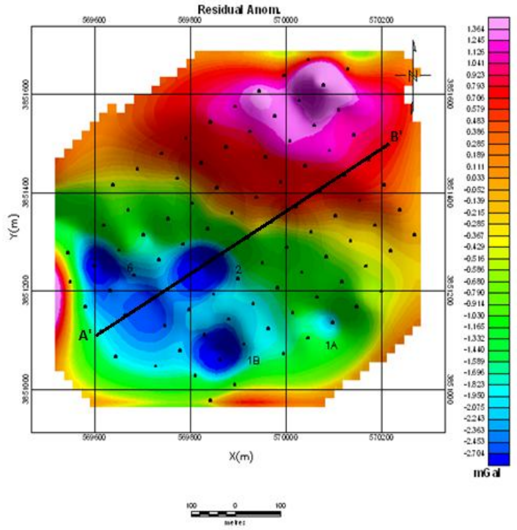


(ب)

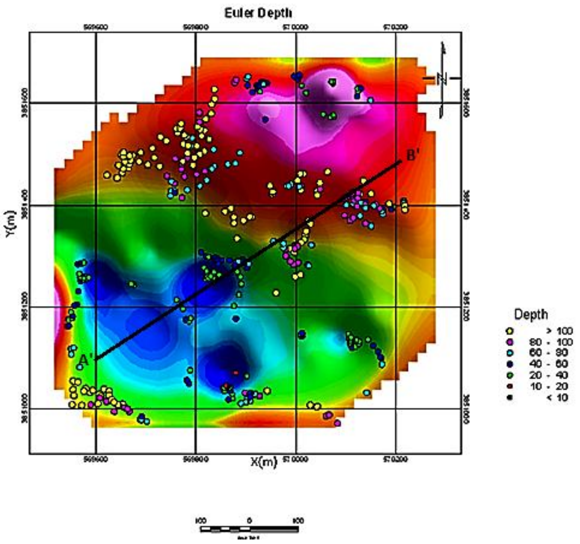


(ج)

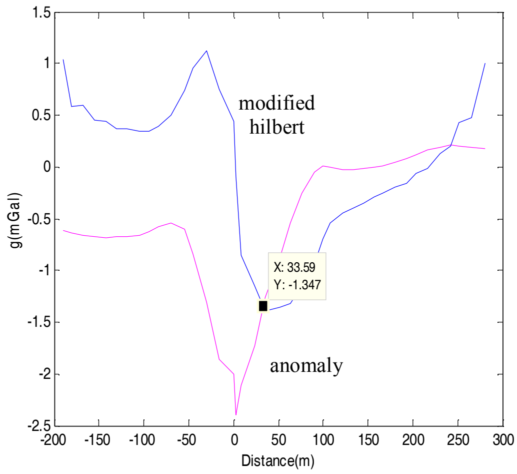
شکل ۵. (الف) نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده منطقه آباده. (ب) جواب‌های اویلر بی‌هنجاری‌های باقیمانده .(ج) اثر گرانی و تبدیل هیلبرت تغییریافته داده‌ها.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶. (الف) نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده منطقه هواسان. (ب) جواب‌های اویلر بی‌هنجاری‌های باقیمانده. (ج) اثر گرانی و تبدیل هیلبرت تغییریافته داده‌ها.

۳ نتیجه‌گیری

تبدیل هیلبرت تغییریافته روشی مناسب را برای برآورد عمق بی‌هنجاری‌های گرانی معرفی می‌کند. در این مقاله ابتدا با اِعمال روش روی مدل مصنوعی استوانه افقی در وضعیت بدون اِعمال نوفه تصادفی، مشاهده شد که عمق‌های به‌دست آمده دقیقا منطبق بر مقادیر مفروض اولیه‌اند. با افزودن نوفه تصادفی روی مدل مصنوعی استوانه افقی، نتایج بسیار خوبی به‌دست آوردیم، به‌طوری‌که نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که اثر نوفه تصادفی روی روند تفسیر داده‌های استوانه افقی چشم‌پوشیدنی است. در مورد مدل کره، بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که در عمق‌های کمتر، حتی با اِعمال درصد نوفه بیشتر میزان خطا از ۶ درصد تجاوز نمی‌کند. درحالی‌که برای عمق‌های بیشتر و با وجود

کاهش درصد نوفه اعمال‌شده، خطای محاسبه عمق به ۱۹٪ می‌رسد، که نشان می‌دهد افزایش عمق در مورد مدل کره با افزایش خطای اندازه‌گیری همراه است. در ادامه کارایی روش را با برآورد عمق بی‌هنجاری‌های گرانی مربوط به داده‌های واقعی مورد ارزیابی قرار دادیم. بدین‌منظور از داده‌های واقعی دو منطقه آباده–استان فارس و هواسان– استان ایلام استفاده کردیم. به‌منظور حصول اطمینان از نتایج به‌دست آمده از روش تبدیل هیلبرت تغییریافته، روش برآورد عمق مرسوم واهمامیخت اویلر را به‌منزلهٔ روشی برای مقایسه نتایج به‌کار بردیم. در هر دو مورد عمق‌های برآورد شده انطباق خیلی خوبی با نتایج حاصل از روش اویلر و همچنین اطلاعات به‌دست آمده از حفاری‌ها داشت.

تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب آقای پژمان شهسواری به‌خاطر راهنمایی‌های مفیدشان در اجرای این پژوهش، تشکر وقدردانی کنند.

منابع

Al-Garni Mansour, A., Sirinvas, Y., and Sundararajan N., 2009, Sundararajan transform – An application to geophysical data analysis: Arab J Geosci, **3**, 27-32.

Mohan, N. L., Sundararajan, N., and Seshagiri Rao, S. V., 1982, Interpretation of some two dimentional bodies using the Hilbert transform: Geophysics, **47**(3), 376-387.

Nabighian, MN., 1972, The analytical signal of two dimentional magnetic bodies with polygonal cross section, its properties and use for automated anomaly interpretation: Geophysics, **37**, 507-512.

Sundararajan, N., 1996, A modified Hilbert transform and its application to self-potential interpretation: Journal of Applied Geophysics, **36**, 137-143.

Sundararajan, N., Sirinvas, Y., Laxminarayana and Rao, T., 2000, Sundararajan transform –A tool to interpret potential field anomalies: Exploration Geophysics, **31**, 622-628.

Sundararajan, N., Mohan, N. L., and Seshagiri Rao, S. V., 1983, Gravity interpretation of 2-D fault structures using the Hilbert transform: Journal of Geophysics, **34**, 34-47.

Sundararajan, N., and Narasimha Chary, M., 1993, Direct interpretation of SP anomalies due to spherical structures – A Hilbert transform technique: Gheophys. Trans, **38**, 151-165.