

# آزمون ثابت بودن چگالی با تانسور گرادیان به منظور به کارگیری صحیح روش فضای گرادیان

نعیم موسوی<sup>۱</sup> و وحید ابراهیمزاده اردستانی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۱۵)

## چکیده

یکی از روش‌های تفسیر داده‌های گرانی که به منظور تعیین عمق ساختار مدفون از آن استفاده می‌شود، روش نمودار فضای گرادیان است. در گام نخست، پارامترهای لازم از قبیل طول و زاویه از نمودار گرادیان افقی برحسب گرادیان قائم یا همان نمودار فضای گرادیان، استخراج می‌شود. سپس با انتقال این پارامترها روی نمودار گرادیان قائم برحسب نیمرخ، امکان تعیین عمق فراهم می‌آید. یکی از شرط‌های استفاده از روش نمودار فضای گرادیان، ثابت بودن چگالی محدوده بی‌هنجاری است که در صورت برقرار نشدن این شرط، تفسیر نادرست است. برای بررسی یکنواخت بودن چگالی بی‌هنجاری، می‌توان آن را به صورت یک مکعب در نظر گرفت که خود به چهار مکعب یا منشور تقسیم می‌شود. اگر چگالی و اندازه همه منشورها یکسان باشد، نمودار مؤلفه GYX دارای چهار قله متقارن خواهد بود. بررسی تقارن موجود بین قله‌های نمودار مؤلفه GYX تانسور گرادیان نشان می‌دهد که تغییر فاکتور چگالی در هر یک از منشورهای مدل به صورت بر هم خوردن تقارن نمودار ظاهر می‌شود. از این رو نمودار پیش‌گفته در نقش ابزار تعیین ثابت بودن چگالی یا به عبارت دیگر ابزاری برای انتخاب داده‌های قابل تفسیر در روش نمودار فضای گرادیان که نیازمند شرط ثابت بودن چگالی در کل حجم بی‌هنجاری است، مطرح است. آزمون مؤلفه GYX تانسور گرادیان در مورد داده‌های واقعی نشان داد که چگالی در قسمت نخست از نیمرخ داده‌ها با تقریب قابل قبول، ثابت است. به کارگیری روش نمودارهای فضای گرادیان در تفسیر این قسمت از نیمرخ، نتایج قابل قبولی در تعیین عمق بی‌هنجاری را به دنبال داشت که در مقایسه با نتایج به دست آمده از روش اویلر در تعیین عمق از دقت زیادی برخوردار بود. باتلر که مبدع روش تفسیر هندسی به کمک نمودارهای فضای گرادیان است، فهرست‌نامه‌ای عرضه کرده است که در آن شکل نمودار فضای گرادیان کلیه ساختارهای متداول در تفاسیر ژئوفیزیکی به چشم می‌خورد. از این رو چنانچه محاسبات به درستی صورت گیرد، نمودار فضای گرادیان، مشابه یکی از شکل‌های پیشنهادی خواهد بود. در تفسیر بخش دوم از نیمرخ مشاهده شد که نمودار فضای گرادیان حاصل با هیچ یک از نمودارهای پیشنهادی باتلر شباهت ندارد لذا امکان به کارگیری آن روش وجود نخواهد داشت. آزمون ثابت بودن چگالی برای قسمت دوم با نیمرخ داده‌های واقعی صورت گرفت و معلوم شد که چگالی در این قسمت از نیمرخ، ثابت نیست.

**واژه‌های کلیدی:** نمودار فضای گرادیان، تانسور گرادیان، چگالی، گرانی، تعیین عمق، گرادیان افقی و قائم

## The test of density constancy by gradient tensor for suitable usage of gradient space plot method

Naeim Mousavi<sup>1</sup> and Vahid Ebrahimzade Ardestani<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysics, University of Tehran

(Received: 16 May 2011, accepted: 5 May 2013)

## Summary

Gradient Space Plot (GSP) is a structural method for gravity data interpretation, which is used for depth estimation of buried structures. In this structural interpretation, determination of depth, size, geometry and density contrast using a gravity gradient is proposed. In 1995, a general procedure for classifying and analyzing gravity gradient profile data over 2D structures was presented completely by Butler. In that research, it was shown that GSP, i.e. plots of horizontal gradient versus vertical gradient, present the complete magnitude and phase information on the gradient profiles simultaneously. To perform this method, necessary parameters like length and angle are initially extracted from the gradient space plot. Then, they are transmitted to a plot of vertical gradient versus profile, which leads to depth estimation. It is worth remarking that a comparison of measured or calculated gradient space plots to a model gradient space plot catalogue allows a rapid, qualitative determination of structure or geometry. Here, we suppose the anomaly is similar to one of the presented structures in the Butler Catalogue. We know that the Butler method requires no quantitative information or assumptions regarding the density contrasts. In these structures, for a correct interpretation, the density is assumed to be constant. To assess the density consistency, we model any arbitrary anomaly with a series of right rectangular prism pairs, overlaid with their sides and parallel to x-axis. In previous research a method was developed to determine the gradient tensor components, based on a model consisting of four right rectangular prisms of the same size. On the other hand, a change in the density value for any prism leads to different values of a GYX plot peaks. Hence, a GYX plot can be used as an attribute to show a change in density over the anomaly. In other words, it is employed as a tool to select interpretable data in the GSP method in which the density of the considered anomaly should be constant.

A 3D plot of the GYX component for the gravity gradient tensor produces a pair of peaks which lie above and below the model surface. The number of the peaks is equal to the number of the prisms. The most important feature of this plot is the complete symmetry that exists in its peak values which can be obtained from the constant density in all prisms. In the case of four prisms, we have four peaks the amplitudes of which are proportional to density contrasts of any prism. It can be possible to avoid the perspective issues by 3D rotating in a cyclic way. The 2D plots contain more accurate information to the size of the peaks. Application of the gradient tensor test for real data showed that the density was constant in the area of the first part of the profile. In the first section of the profile, present interpretation compared favorably with the Euler method. The density constancy test for the second part of the profile was performed. The density in this part of the profile was not constant. Therefore, the reason for an ill-posed usage of GSP was shown. Space plots due to this section of profile were not similar to those of the Butler catalogue.

**Keywords:** Gradient space plot, gradient tensor, density, gravity, depth estimation, GXZ & GZZ

## ۱ مقدمه

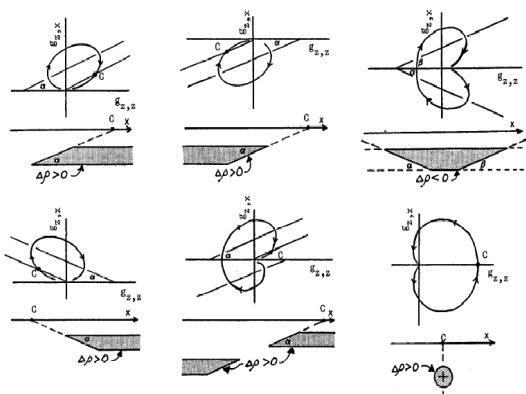
در ۱۹۳۶ شروع شد و آنزولیکا (۱۹۷۵)، فاکلویز (۱۹۷۶) و پدرسون (۱۹۸۹) آن را ادامه دادند. افراد یادشده از گرادیان برای تعیین مرزهای بی‌هنجاری‌هایی که به شکل کره هستند استفاده کرده‌اند. معمولاً به کارگیری روش‌های

تلاش‌های قرن گذشته، اهمیت نمودارهای فضای گرادیان در تفسیر را هرچند با کاربرد محدود و به صورت کمکی، روشن ساخت. به کارگیری گرادیان احتمالاً از زمان اوژن

رابطه (۵) با اعمال تبدیل هیلبرت بر مؤلفه افقی میدان مؤلفه قائم حاصل می شود. این میدان می تواند میدان گرادیان گرانی باشد.

## ۲ روش برآورد عمق با استفاده از گرادیانها

این روش بر پایه استخراج چند پارامتر از دو نمودار در فضای گرادیان نهاده شده است و براساس شباهت بی هنجاری موردنظر با یکی از ساختارهای ذکر شده در فهرست نامه باتلر آغاز می شود (شکل ۱). در اکثر موارد



شکل ۱. فهرست نامه ساختارهای زمین شناسی متداول و نمودار فضای گرادیان آنها (باتلر، ۱۹۹۵).

که حتی امکان تصویر کردن ابعاد بی هنجاری امکان پذیر نیست، باز هم عمق دو نقطه از نیم رخ را می توان محاسبه کرد (موسوی و اردستانی، ۲۰۱۰). برای به کارگیری این روش در ابتدا تعیین می کنیم که بی هنجاری مورد بررسی به کدام یک از ساختارهای عرضه شده در فهرست نامه باتلر شبیه است. نمودار فضای گرادیان داده موردنظر باید شبیه به نمودار موجود در فهرست نامه برای ساختار مفروض باشد در غیر این صورت بنا بر شکل نمودار فضای گرادیان مدل دیگری را برای بی هنجاری انتخاب می کنیم. سپس با ترسیم خطوط عمود بر محورهای قائم و افقی نمودار گرادیان که در نقطه صفر آنها قرار دارند مبدا دلخواه برای محاسبات بعدی را به دست می آوریم. هر

تفسیر ژئوفیزیکی برای ساختارهای کروی به بهترین نتایج ممکن منتهی می شود. نقطه نظرات آنان روی ساختارهای ساده که تناسب بارزی با توانایی های روش تفسیر به کمک نمودارهای فضای گرادیان داشت، بررسی شد. ساختارهای زمین شناسی متعددی در طبیعت که قابلیت تفسیر با این روش را داشتند مورد بررسی قرار گرفتند. فهرست نامه ای از سوی باتلر در ۱۹۹۵ تهیه شد که همه ساختارها و یا بی هنجاری هایی را که می توان با روش حاضر تفسیر کرد، معرفی می کند. این روش تفسیر مستقیم با نمودارهای فضای گرادیان، اطلاعاتی در زمینه هندسه بی هنجاری، عمق و چگالی آن را به دست می دهد (باتلر، ۱۹۹۵). نمودارهای دوبعدی فضای گرادیان شامل گرادیان قائم گرانی بر حسب طول نیم رخ و گرادیان افقی بر حسب گرادیان قائم هستند (رائو و همکاران، ۱۹۹۱). روابط زیر بر گرادیان های افقی و قائم حاکم اند:

$$g_{zx} = \frac{\partial g_z}{\partial x}, \quad (1)$$

گرادیان قائم با اثر دادن تبدیل هیلبرت بر گرادیان افقی حاصل می شود. تبدیل هیلبرت به صورت زیر است:

$$F(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x')}{x' - x} dx', \quad (2)$$

رابطه (۳) در واقع همان همامیخت  $f(x)$  و  $\frac{1}{x\pi}$  است، در نتیجه

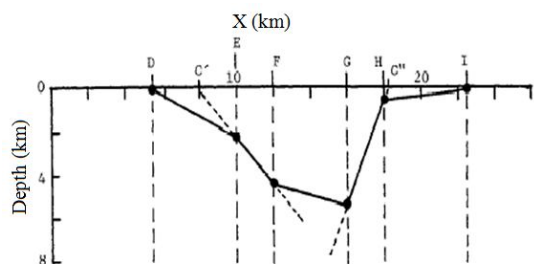
$$F(x) = H[f(x)], \quad (3)$$

اگر  $f(x)$  مشتق قائم و  $f(x)$  مشتق افقی میدان گرانی باشد تبدیل هیلبرت به صورت زیر نوشته می شود:

$$f(z) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x)}{z - x} dx, \quad (4)$$

که با نماد اختصاری رابطه فوق را می توان به صورت زیر نوشت

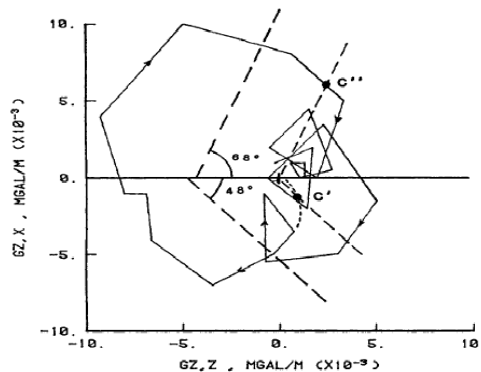
$$g_{zz} = \frac{\partial g_{zx}}{\partial z} = \text{hilbert}(g_{zx}), \quad (5)$$



شکل ۴. عمق به‌دست آمده برای حوزه رسوبی به کمک روش نمودار فضای گرادیان (باتلر، ۱۹۹۵).

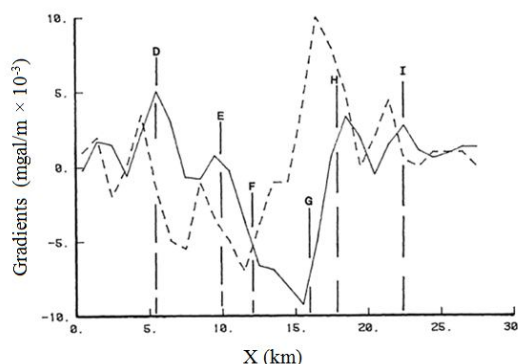
شرط اصلی درست بودن نتایج تفسیر با این روش ثابت بودن چگالی بی‌هنجاری یا به‌عبارت‌دیگر یکنواختی توزیع جرم در محدوده مورد بررسی است. در ۱۹۹۲ مونتانا، مایکس و همکارانشان برای تهیه برنامه‌ای که بتواند مؤلفه‌های تانسور گرادیان گرانی را به‌دست آورد مدلی را پیشنهاد کردند که از چهار منشور مکعب مستطیل راست گوشه هم‌اندازه تشکیل می‌شد (شکل ۵). اگر یک بی‌هنجاری در قالب این مدل و به‌صورت منشوری در نظر گرفته شود آنچه باعث تفاوت گرانی حاصل از آن در نقاط متفاوت است، اندازه و چگالی منشورها است که با ثابت نگه داشتن اندازه منشورها، تنها عامل متغیر چگالی است. همچنین می‌توان برای پوشش کامل یک بی‌هنجاری با این منشورهای هم‌اندازه، از پهلوی هم قرار دادن واحد مدل در راستای طول منشورهای پیشنهاد شده استفاده کرد که پارامتر متغیر بین منشورهای موجود در مدل، فقط چگالی خواهد بود. تغییر در چگالی هریک از منشورها باعث تغییر شکل نمودارهای مؤلفه‌های تانسور می‌شود، نمودارهای تانسور گرادیان می‌توانند به‌نوعی بیانگر تغییرات چگالی بی‌هنجاری باشند. در این بین مؤلفه  $GYX$  تانسور گرادیان به‌منزله روش امتحان ثابت بودن چگالی، ابزار دقیقی را فراهم می‌آورد که شرط اولیه در روش نمودارهای دو‌بعدی فضای گرادیان بررسی می‌کند؛ علاوه بر اینکه دانستن ثابت بودن چگالی به‌خودی‌خود

نمودار فضای گرادیان به شکل یک یا دو بیضی تلفیق شده است.

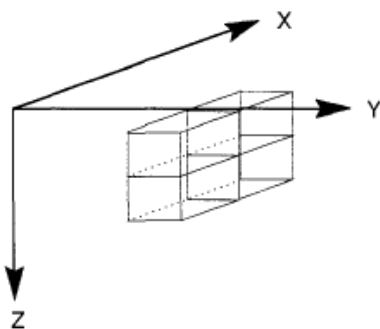


شکل ۲. نمودار فضای گرادیان یک حوزه رسوبی (باتلر، ۱۹۹۵).

از مبدا به‌دست آمده در امتداد قطر بزرگ بیضی رسم می‌کنیم تا نمودار را قطع کند (شکل ۲). با حفظ طول و زاویه پاره‌خط‌های به‌دست آمده آنها را روی نمودار گرادیان قائم برحسب نیم‌رخ (شکل ۳) رسم می‌کنیم، به‌گونه‌ای که در محدوده قرارگیری بی‌هنجاری باشند و از سمت بالا با حفظ زاویه اصلی خود به امتداد نیم‌رخ محدود شوند (شکل ۳). این خطوط که نیم‌رخ را در سطح قطع می‌کنند صفحه‌ای را تشکیل می‌دهند که امتداد عمود بر نیم‌رخ معرف عمق است. واحد مقیاس بندی عمق باید برابر با فاصله نقاط موجود در نیم‌رخ باشد.

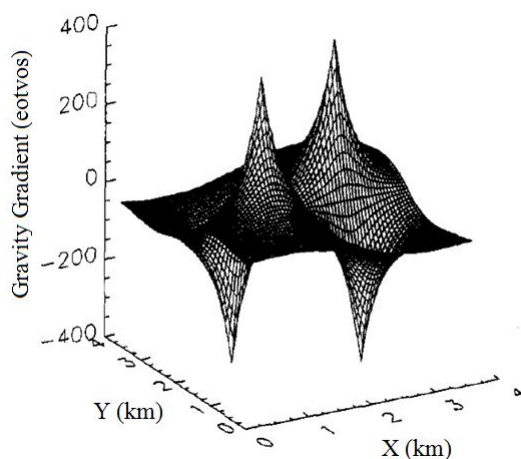


شکل ۳. نمودار گرادیان برحسب نیم‌رخ یک حوزه رسوبی. نمودار خط ممند مربوط به گرادیان قائم و خط‌چین نشان دهنده گرادیان افقی است (باتلر، ۱۹۹۵).



شکل ۵. هندسه منشورهای مکعب مستطیل راست گوشه که برای محاسبه تانسور گرادیان گرانی استفاده شدند. مدل از دو منشور مکعب مستطیل در راستاهای X و Z و یک منشور در راستای Y تشکیل شده است (مونتانا و همکاران، ۱۹۹۲).

در شبیه سازی بی هنجاری با مدل مورد نظر در این تحقیق، همیشه دو لایه افقی از منشورها وجود دارد که بررسی تغییرات چگالی در یک لایه افقی از آنها صورت می گیرد و سپس با لایه بعدی مقایسه می شود و علاوه بر نبود تقارن چهارجانبه، این مطلب دلیل کافی برای کنار گذاشتن مؤلفه های  $GZZ$ ،  $GZX$  و  $GZY$  است؛ زیرا تقارن کامل (هم اندازه بودن قله ها و توالی بالا و پایین بودن قله ها در دو راستای X و Y) در نمودار شکل ۶ بیانگر یکسان بودن چگالی هر چهار منشور هم اندازه شکل ۵



شکل ۶. نمودار سه بعدی مؤلفه  $GYX$  از تانسور گرادیان گرانی مربوط به مدل شکل ۱ (مونتانا و همکاران، ۱۹۹۲).

ارزشمند است و در افزایش دانسته ها از هدف زیرزمینی مورد بررسی، مؤثر است.

### ۳ تعیین تغییرات چگالی با مؤلفه تانسور گرادیان

مؤلفه های تانسور گرادیان ابزارهای ژئوفیزیکی مفیدی هستند که رفتار بی هنجاری را توصیف می کنند. هر یک از مؤلفه های تانسور مفهوم خاصی در ژئوفیزیک و تعبیر متفاوتی دارند. روابطی مشابه با (۶) و (۷) که بین مشتقات مؤلفه های میدان گرانی و به صورت متناظر، تبدیل فوریه آنها برقرار است (مایکس و هینوجوسا، ۲۰۰۱)، برای سایر مؤلفه ها نیز وجود دارد.

$$g_x \Leftrightarrow G_x = \left( \frac{-ik_x}{|k|} \right) G_z, \quad (6)$$

$$\frac{\partial g_x}{\partial z} = \frac{\partial g_z}{\partial x} \Leftrightarrow |k| G_x = (-ik_x) G_z, \quad (7)$$

با روابط مشابه با (۶) و (۷) می توان همه مؤلفه ها را بر حسب تبدیل فوریه مؤلفه قائم بازنویسی کرد و براساس آنچه در روابط (۸) و (۹) (مایکس و هینوجوسا، ۲۰۰۱) مشاهده می شود، برای تشکیل تانسور استفاده کرد.

$$[k(k)] = \begin{bmatrix} \frac{-k_x^2}{|k|} & \frac{-k_x k_y}{|k|} & -ik_x \\ \frac{-k_x k_y}{|k|} & \frac{k_y^2}{|k|} & -ik_y \\ -ik_x & -ik_y & |k| \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$T_{ij} = f^{-1} \{ [k(k)] G_z(k) \}, \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $f^{-1}$  دلالت بر عمل وارون تبدیل فوریه دارد و  $T_{ij}$  تانسور گرادیان است. نمودارهای  $GXX$  و  $GYY$  برای بررسی اثر چهار منشور موجود در مدل مناسب نیستند، زیرا اجزا و قله های موجود در آنها فاقد تقارن هستند.

دایره‌های توخالی بین نقاط A و B در شکل ۷ مشخص شده است.

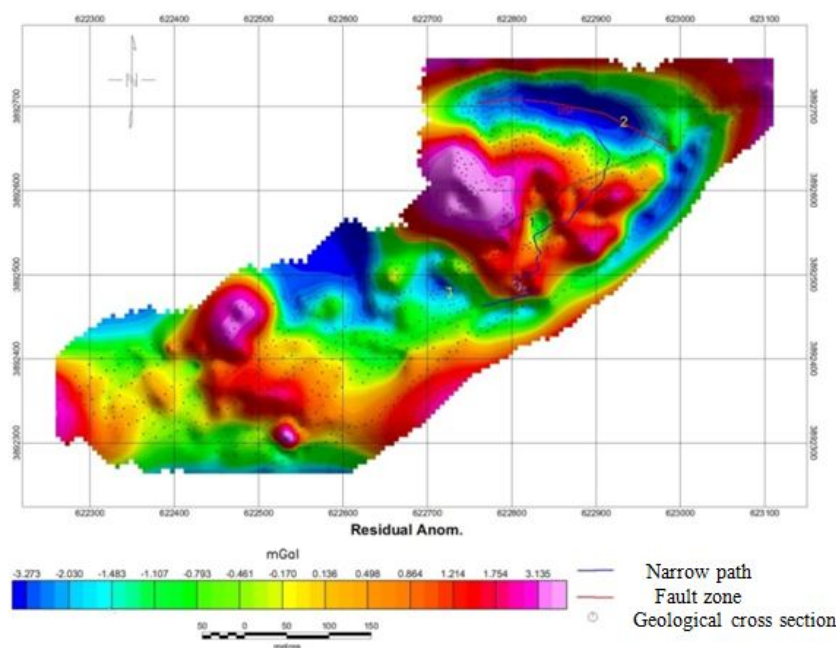
نگاه اجمالی به نمودار مؤلفه گرانی باقی‌مانده، برحسب طول نیم‌رخ نشان می‌دهد که در قسمت اولیه نیم‌رخ یک چشمه مثبت گرانی قرار دارد. محل جدایی این قسمت از نیم‌رخ و ادامه آن که در حکم قسمت اول قلمداد می‌شود با خط عمودی مشخص شده است.

چشمه مثبت یکی از مدل‌هایی است که در فهرست‌نامه نمودارهای فضای گرادیان موجود است و انتظار می‌رود که روند تفسیر، با مشکل مواجه نشود. برای حصول اطمینان از کارآمدی روش موردنظر، از آزمون ثابت بودن چگالی استفاده می‌کنیم. در مرحله نخست نمودار سه‌بعدی مؤلفه GYX آن ترسیم می‌شود (شکل ۹). نمای سه‌بعدی که از نمودار مؤلفه GYX در این شکل نمایش داده شده است نشان می‌دهد که نمودار دارای دو جفت قله است که به صورت متوالی در بالا و پایین صفحه افق قرار دارند.

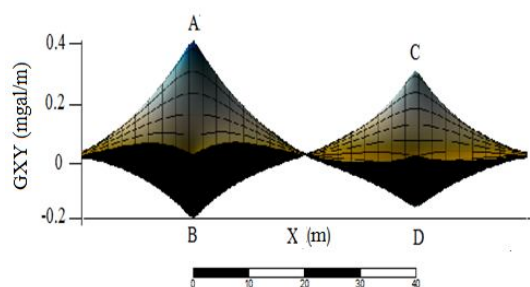
است. هم‌اندازه بودن قله‌های موازی با محور  $y$  نشان‌دهنده یکسان بودن چگالی منشورهای روی یکدیگر و هم‌اندازه بودن قله‌های موازی با محور  $x$  نشان‌دهنده یکسان بودن چگالی دو منشور روی یکدیگر با دو منشور روی یکدیگر مجاور است. اگر فقط دو منشور روی هم وجود داشت، نمودار تنها دو قله می‌داشت.

#### ۴ تفسیر گرادیان - داده بخش اول نیم‌رخ

برای بررسی کارایی مؤلفه تانسور گرادیان و تاثیر نتایج آن بر روش نمودارهای فضای گرادیان از داده‌های به‌دست آمده از عملیات داده برداری در سایت «چشمه بل» در کناره راست رودخانه سیروان و بین روستاهای هجیج بزرگ و نوین در شهرستان پاوه، استان کرمانشاه استفاده شده است. داده موردنظر مربوط به یک نیم‌رخ با فواصل شبکه حدود ۱۰ متر است. طول نیم‌رخ کمتر از ۲۰۰ متر است و نقاط عرضی برداشت شده در پهنای کمتر از ۵۰ متر نسبت به نیم‌رخ هستند. نیم‌رخ به صورت

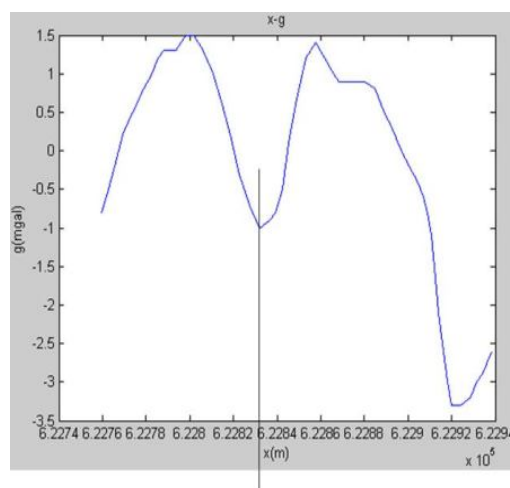


شکل ۷. نمودار گرانی باقی‌مانده منطقه داده‌برداری شده و نیم‌رخ مورد بررسی که به صورت دایره‌های توخالی از نقطه A تا B ادامه می‌یابد.



شکل ۱۰. تصویر نمودار سه‌بُعدی شکل ۹. بر صفحه  $X-Z$ .

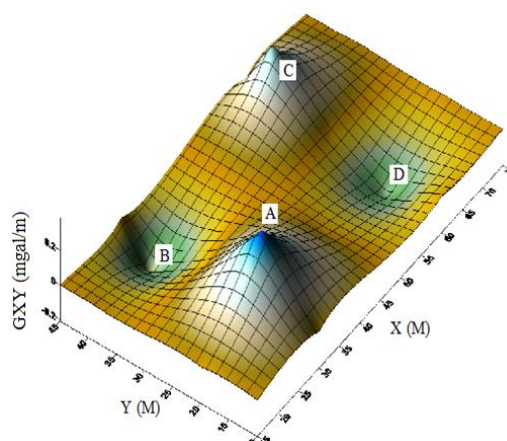
در نمودار شکل ۱۰ می‌توان با تقریب کم گفت که این محدوده از داده‌ها دارای چگالی ثابت‌اند و این نکته علاوه بر ساختار شناخته شده این بخش از نیم‌رخ (چشمه مثبت)، دلایلی هستند که ضریب اطمینان صحت عمل روش نمودار فضای گرادیان را بالا می‌برد. در نمودارهای شکل ۱۱-ب، ۱۲، و همه زیربخش‌های شکل ۱۶ از نماد  $gv$  به عنوان  $GZZ$  یعنی همان مؤلفه قائم گرادیان و از نماد  $gh$  به منزله  $GZX$  یعنی مؤلفه افقی گرادیان استفاده شده است. نام انتخاب شده برای نمودار گرادیان قائم برحسب طول نیم‌رخ « $X-gv$ » و نام برگزیده برای نمودار گرادیان قائم برحسب گرادیان افقی «نمودار فضای گرادیان» است. ابتدا نمودارهای موردنظر در فضای گرادیان ترسیم می‌شوند. نمودار فضای گرادیان مربوط به بخش اول از نیم‌رخ واجد شرایط لازم برای استخراج دو طول و دو زاویه موردنیاز نیست. دلیل آن قرار گرفتن هر دو پاره‌خط  $OA$  و  $OB$  در یک ربع شمال غربی است. با دقت در نمودار توپوگرافی نیم‌رخ می‌توان برداشت کرد که نمودار فضای گرادیان دارای چرخیدگی است. با تعیین میانگین نیم‌رخ که با خط‌چین در شکل ۱۱-الف نمایش داده شده است و می‌توان آن را در حکم نماینده تقریبی نیم‌رخ انتخاب کرد، مقدار چرخش آن نسبت به افق مشخص می‌شود. نمودار شکل ۱۱-ب برای تفسیر با روش نمودار فضای گرادیان مناسب است. پاره‌خط‌های  $OA$  و  $OB$  از شکل



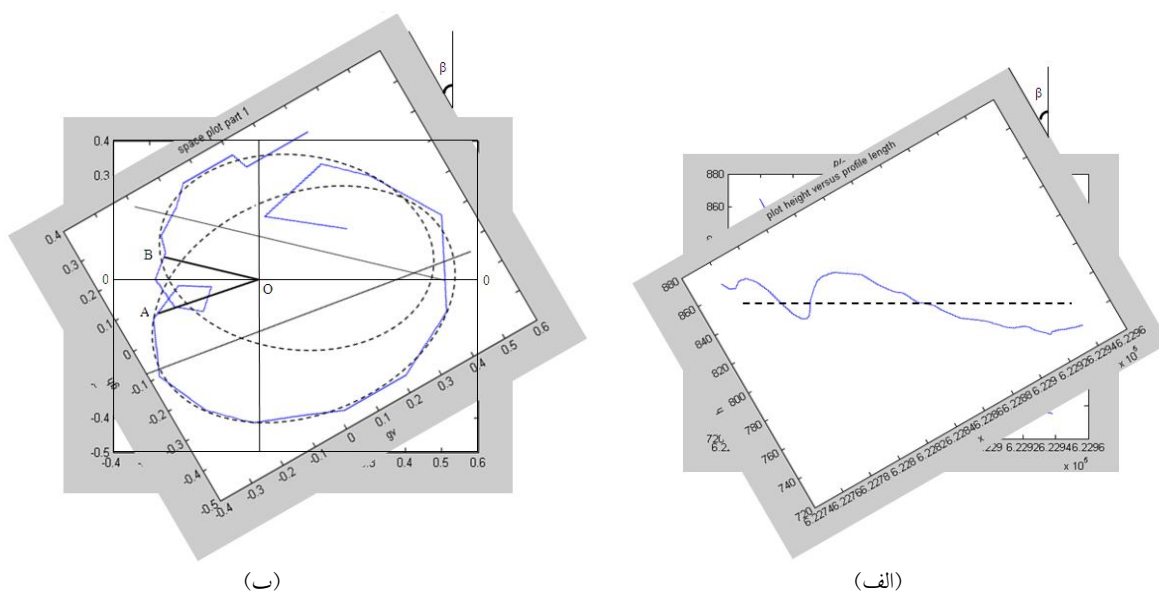
شکل ۸. نمودار دو‌بُعدی گرانی باقی‌مانده نیم‌رخ و خط عمودی که چشمه مثبت را از بقیه نمودار جدا می‌کند.

این حالت مانند نمودار متعلق به مدل فرضی است و بیان می‌کند که بی‌هنجاری از چهار منشور با آرایش مشابه با آنچه در شکل ۵ آمده، تشکیل شده است.

برای بررسی کمی نمودار، از تصویر نمودار سه‌بُعدی  $x-y-gxy$  بر صفحه  $x-gxy$  (شکل ۱۰) استفاده می‌شود. در این شکل حالت پرسپکتیو از نمودار گرفته شده است و در راستای محور  $y$  به نمودار نگاه می‌شود که تنها مقطع شامل  $x$  و  $gradient$  در آن مشخص است.

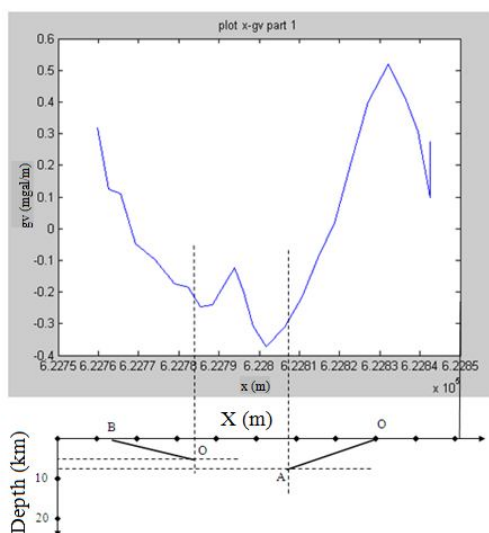


شکل ۹. نمودار سه‌بُعدی مؤلفه  $GYX$  برای بخش اول از نیم‌رخ.



شکل ۱۱. الف) نمودار توپوگرافی نیم‌رخ که تا قرار گرفتن میانگین آن در راستای افق چرخانده شده است و ب) نمودار چرخیده فضای گرادیان بخش اول به همان میزان که نمودار توپوگرافی چرخیده است، زاویه چرخش  $\beta = -30^\circ$  نسبت به راستای قائم است.

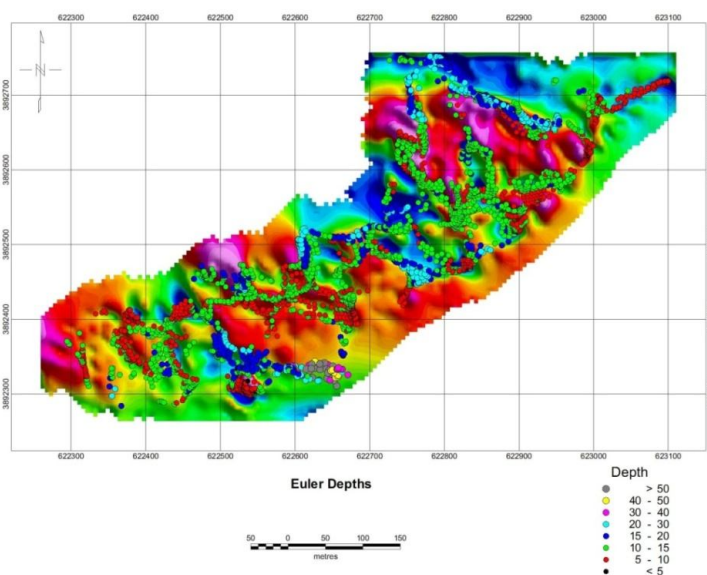
۵ بررسی ناکارمدی روش نمودار فضای گرادیان در بخش دوم نیم‌رخ  
 بخش دوم نیم‌رخ مربوط به داده‌هایی است که در شکل ۸ در قسمت راست خط عمود واقع شده‌اند. بررسی ظاهری



شکل ۱۲. نمودار گرادیان قائم برحسب طول نیم‌رخ که عمق ۲ نقطه از بی‌هنجاری را مشخص می‌کند.

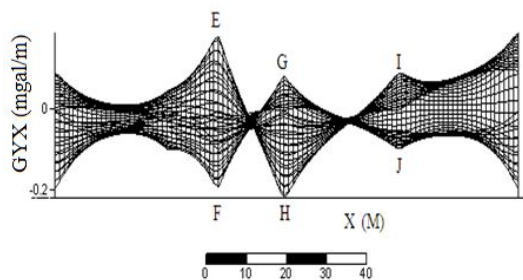
۱۱-ب استخراج می‌شوند و برای تعیین عمق دو نقطه در نمودار شکل ۱۲ به کار می‌روند.  
 نمودار  $x-gv$  چندان مناسب نیست اما از اصول یک نمودار خوش‌شکل تبعیت می‌کند، لذا این امکان وجود دارد که از روی این نمودار چارچوب کلی برای تعیین عمق نقاط را ترسیم کرد. عمق‌های به‌دست آمده از این عملیات برای این دو نقطه از نیم‌رخ ۴ و ۱۰ متر هستند. برای بررسی درستی این نتیجه، تعیین عمق داده‌ها به روش اوپلر صورت پذیرفته است که در این قسمت از نیم‌رخ، عمق بین ۵-۱۰ متر و ۱۰-۱۵ متر برآورد شده است (شکل ۱۳). برای روش نمودار فضای گرادیان این مقدار اختلاف، قابل قبول است و حتی می‌توان گفت نتایج به‌دست آمده حاکی از دقت و صحت به‌کارگیری این روش در مورد این قسمت از نیم‌رخ است.





شکل ۱۳. نمودار تعیین عمق به روش اولیفر، بخش انتخاب شده از نیم‌رخ در بلوکی با طول ۶۲۲۸۰۰-۶۲۲۹۰۰ و عرض ۳۸۹۲۵۰۰-۳۸۹۲۶۰۰ واقع شده است.

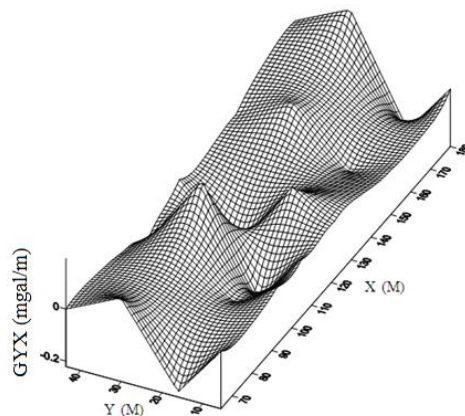
پرسپکتیو بخش دوم از نیم‌رخ نشان می‌دهد که اولاً می‌توان چند جفت قله را در این نمودار در نظر گرفت یعنی نیم‌رخ از محیط‌های گوناگون با چگالی‌های متفاوت عبور کرده است، ثانیاً اگر چه اندازه قله‌ها ظاهراً برابر نیست اما توالی بالا و پایین بودن قله‌ها از نوعی تقارن ناقص خبر می‌دهد. برای جمع‌بندی نهایی که صحت هریک از تعابیر فوق را نشان دهد ضمن دوران نمودار، حالتی مدنظر است که بتوان از پهلو به نمودار نگاه کرد.



شکل ۱۴. زاویه دید در امتداد محور  $Y$  از پهلو نمودار سه‌بعدی شکل ۱۰.

آرایش قله‌های  $E$ ،  $F$ ،  $G$  و  $H$  نشان می‌دهد که بی‌هنجاری در این قسمت از نیم‌رخ دارای تقارن تقریبی

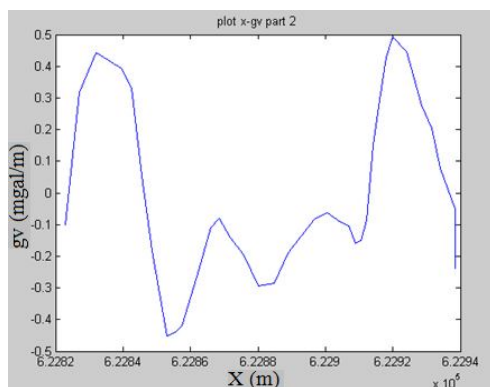
شکل نمودار گرانی باقی‌مانده در این بخش از نیم‌رخ مدل خاصی که در فهرست‌نامه باتلر به آن اشاره شده باشد را تداعی نمی‌کند. برای اطمینان بیشتر از اینکه بی‌هنجاری محدوده موردنظر شباهت خاصی به یکی از مدل‌های فهرست‌نامه دارد یا خیر، نمودار سه‌بعدی مؤلفه  $GYX$  ترسیم می‌شود تا تناسب این بخش از داده‌ها برای استفاده از روش نمودار فضای گرادیان سنجیده شود. اگر چگالی



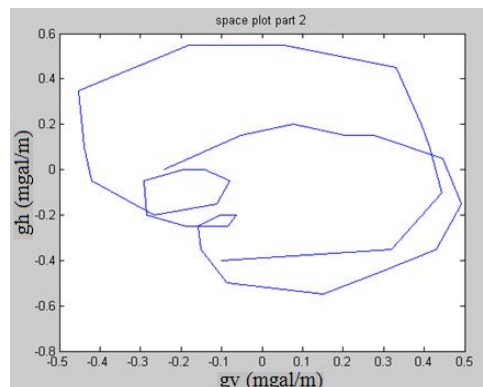
شکل ۱۴. نمودار سه‌بعدی مؤلفه  $GYX$  برای بخش دوم نیم‌رخ. داده‌های انتخاب شده برای تفسیر ثابت باشد، امکان عملی ساختن روش قطعاً وجود خواهد داشت. بررسی نمای

این بدین معنی است که در این قسمت از بی‌هنجاری ثابت فرض کردن چگالی غیرممکن است و استفاده از روش نمودار فضای گرادیان حتی با تفکیک بی‌هنجاری به قسمت‌های کوچک‌تر، توصیه نمی‌شود.

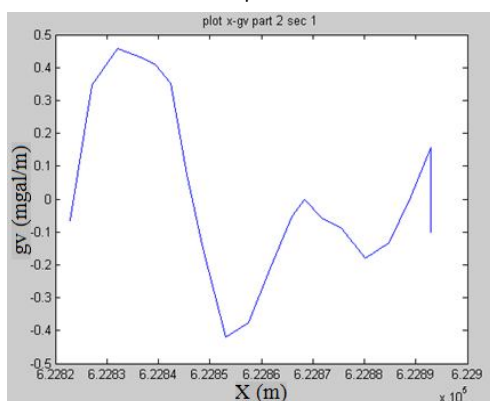
است اما به‌رحال قله G از E کوتاه‌تر است و اندازه قله‌های بالا و پایین در هیچیک از قله‌ها یکسان نیست. این بدان معنی است که در جفت قله E-F، منشور متصور در پایین کم‌چگال‌تر است و در جفت قله H-G برعکس.



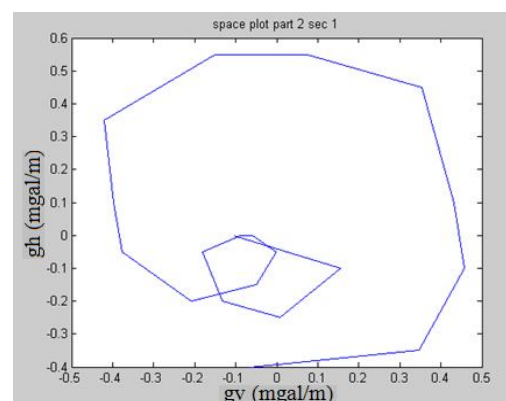
(ب)



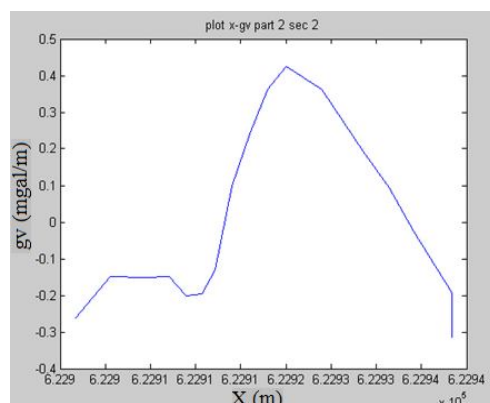
(الف)



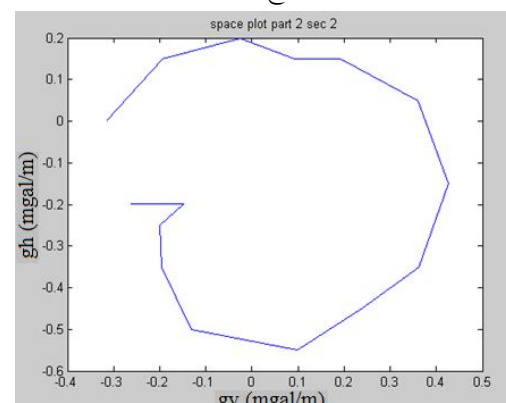
(د)



(ج)



(ه)



(و)

**شکل ۱۶.** نمودار فضای گرادیان مربوط به (الف) بخش دوم، (ج) بخش دوم قسمت اول و (ه) بخش دوم قسمت دوم از نیم‌رخ و نمودارگرادیان قائم برحسب طول نیم‌رخ مربوط به (ب) بخش دوم، (د) بخش دوم قسمت اول و (و) بخش دوم قسمت دوم از نیم‌رخ.

## ۶ نتیجه گیری

که حاکی از تطابق مطلوب نتایج بود. آزمون حاضر برای این بخش از نیم‌رخ روشن ساخت که نمودار مولفه موردنظر از تانسور گرادیان، دارای چهار قله با تقارن کافی و اندازه‌های به نسبت برابر است.

در ادامه برای تفسیر بخش دوم نیم‌رخ با روش نمودار فضای گرادیان آزمون ثابت بودن چگالی صورت گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بی‌هنجاری مربوط به این قسمت از نیم‌رخ، دارای چگالی یکسانی نیست و با تفکیک بی‌هنجاری براساس ثابت بودن تقریبی چگالی در آن مناطق، امکان استفاده از روش نمودار فضای گرادیان به وجود می‌آید. نمودارهای فضای گرادیان مربوط به قسمتی از نیم‌رخ که براساس نتایج روش مؤلفه GYX تانسور گرادیان انتخاب شده بود، قابل تفسیر بود و عمق تعیین شده در آنها نیز با سایر روش‌ها تطابق دارد. این مهم نشان می‌دهد که ابزار انتخاب شده، کارآمدی کافی در گزینش داده‌ها به منظور تفسیر به روش نمودار فضای گرادیان را دارد و به مثابه ابزاری کمکی در احراز شرط اولیه روش فوق منجر به عمومیت بیشتر این روش در تفسیر داده‌های ناشناخته متنوع می‌شود. رویکرد جدید به شیوه آزمون برقراری شرایط اولیه روش باتلر، به نحوی می‌تواند به منزله عمومیت بخشیدن به این روش تفسیری باشد زیرا با گزینش بخشی از نیم‌رخ یا به طور کلی داده‌ها که شرط ثابت بودن چگالی در آنها برقرار است، امکان کاربرد مؤثر و نتیجه‌بخش این روش فراهم می‌آید.

## تشکر و قدردانی

صمیمانه از پیشنهادات دکتر الن رید، استاد دانشگاه لیدز انگلستان و سردبیر مجله ژئوفیزیکال پراسپکتینگ که این کار را مورد مطالعه قرار داده و اصلاحات ارزشمندی بدان افزوده است، سپاسگزاری می‌شود.

در روش تفسیر به کمک نمودارهای فضای گرادیان، به برآورد چگالی بی‌هنجاری موردنظر نیاز نیست. اگرچه این روش تفسیر هندسی نیازمند چگالی مستقل است اما فرض بر آن است که چگالی ساختار مورد بررسی ثابت و یکنواخت باشد. چنانچه یک بی‌هنجاری با چهار مکعب جایگزین شود، با تعیین چگالی هریک از مکعب‌ها می‌توان رفتار چگالی کل شکل را توصیف کرد. نمودار مولفه GYX تانسور گرادیان برای این چهار مکعب شامل چهار قله است که در صورت یکسان بودن چگالی همه مکعب‌های هم‌اندازه، قله‌ها دامنه یکسان دارند.

موقعیت قله‌ها نیز در نمودار متقارن است. چنانچه این نمودار فاقد تقارن لازم باشد، می‌توان ادعا کرد که بی‌هنجاری دارای چگالی ثابت نیست. گاهی اوقات چگالی بی‌هنجاری در بخش‌های گوناگون حجم آن تغییرات زیادی دارد و نمودار مولفه تانسور گرادیان بیش از چهار قله دارد. تعداد جفت قله‌ها گویای تنوع چگالی ساختار است. برای سهولت بررسی قله‌های نمودار می‌توان آن را روی یکی از صفحات جانبی آن تصویر کرد که در این صورت اندازه قله‌های بالا و پایین صفحه و همچنین مقایسه اندازه جفت قله‌های دو ناحیه همجوار، تسهیل می‌شود. آزمون حاضر که به منظور بررسی مقدماتی به کارگیری صحیح و کارآمد روش نمودار فضای گرادیان صورت می‌گیرد، روی داده واقعی به انجام رسیده است. در ابتدا با ترسیم نمودار دو بُعدی گرانی باقی‌مانده داده‌های واقعی، تصویرسازی کلی از نوع بی‌هنجاری و تعداد آنها صورت پذیرفت. سپس با انتخاب قسمت اول از نیم‌رخ که مربوط به یک چشمه مثبت بود، روش نمودار دو بُعدی فضای گرادیان برای تعیین عمق بکار رفت. در تعیین عمق به محاسبه عمق دو نقطه در لبه بی‌هنجاری اکتفا شد و برای بررسی درستی عمق‌ها، نتایج این روش با نتایج روش اوپلر برای تعیین عمق مقایسه شد

- Mohan, N. L., Sundararajan, N., Seshagiri, R. S. V., 1982, Interpretation of some two dimensional magnetic bodies using Hilbert transforms: *Geophysics*, **47**, 376-387.
- Montana, C. J., Mickus, K. L., Peeples, W. J., 1992, Program to calculate the gravitational field and gravity gradient tensor resulting from a system of right rectangular prisms: *Computers and Geosciences*, **18**(5), 587-602.
- Mousavi, N., 2009, Using 3-d gravity gradient space plots instead of 2-d; a forward step for basin analysis: *SAGA 2009*, 292-295.
- Mousavi, N., Ebrahimzadeh-Ardestani, V., 2010, General usage techniques of 2-d gradient geometrical analysis for gravity data of any geologic structure: *Proceeding of Iranian Geophysical Society 14<sup>th</sup> conference*, Tehran 11-13 May.
- Ram, B. H. V., and Rao, D. A., 1991, Application of the Hilbert transform for gravity and magnetic interpretation: *Pure Appl. Geophys.*, **135**, 589-599.
- Shuey, R. T., 1972, Applications of Hilbert transforms to magnetic profiles: *Geophysics*, **37**, 1043-1045.
- منابع  
 ابراهیم‌زاده‌اردستانی، و.، ۱۳۸۹، گرانی‌سنجی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران.
- Butler, D. K., 1995, Generalized gravity gradient analysis for 2-d inversion: *Geophysics*, **60**(4), 1018-1028.
- Fajkiewicz, Z. J., 1976, Gravity vertical gradient measurements for detection of small geological and anthropogenic forms: *Geophysics*, **41**, 1016-1030.
- Hammer, S., Anzoleaga, R., 1975, Exploring for stratigraphic traps with gravity gradient: *Geophysics*, **40**, 256-268.
- Marson, I., Klingele, E. E., 1993, Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-d interpretation: *Geophysics*, **58**, 1588-1595.
- Mickus, K. L., Hinojosa, J. H., 2001, The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity, a Fourier transform technique: *J. Appl. Geophys.*, **46**, 159-174.