

بهبود تخمین عمق و اندیس ساختاری چشمه میدان پتانسیل با استفاده از نشانگرهای انحنا

محمد برازش^۱ و سید هانی متولی عنبران^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۵/۲۵، پذیرش نهایی: ۹۵/۳/۲۵)

چکیده

انحنا یکی از مشخصه‌های یک منحنی است که در هر نقطه، مقدار انحراف آن را از یک خط راست تعیین می‌کند. در تعمیم این خصوصیت به سه بعد ما با یک سطح روبه‌رو هستیم که با توجه به تقاطع صفحه با سطح، بی نهایت منحنی و در نتیجه انحنا در یک نقطه مشخص خواهیم داشت. مناسب‌ترین انحناها آن‌هایی هستند که از تقاطع یک صفحه عمود به سطح به دست می‌آیند و انحناهای نرمال نام دارند. منفی‌ترین انحنا یکی از انحناهای نرمال است که در تحلیل و تفسیر کمی آنومالی‌های میدان پتانسیل استفاده می‌شود. آنومالی‌های میدان پتانسیل بر روی منابع وابسته به مقدار تباین خصوصیت فیزیکی موردنظر دارای بیشینه هستند. آنومالی‌ها را می‌توان با یک رابطه ریاضیاتی بیان کرد که این امکان را فراهم می‌کند تا بتوانیم عمق چشمه را از مقدار پیک و مقدار انحنا در پیک بیابیم. این آنومالی‌ها را وابسته به اینکه نوع چشمه از قبل برای ما مشخص باشد یا خیر، می‌توان به دودسته تقسیم‌بندی کرد که توابع ویژه وابسته به مدلی خاص و مستقل از مدل نامیده می‌شوند. ابتدا توابع ویژه از میدان پتانسیل تبدیل‌یافته محاسبه می‌شوند و با استفاده از انحنا سطح این توابع ویژه، می‌توان مکان و نوع چشمه را تخمین زد. روش آنالیز تخمین عمق با استفاده از نشانگرهای انحنا بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه و همراه با نوفه به کار برده شد. در نهایت این روش بر روی داده‌های واقعی از معدن سولفیدی موبرون کانادا با استفاده از توابع ویژه آزمایش شد و با استفاده از عدد موج محلی یک اندیس ساختاری برای این معدن تخمین زده شد.

واژه‌های کلیدی: انحنا، تابع ویژه، تخمین عمق، سطح درجه دوم، میدان پتانسیل.

۱. مقدمه

مرتبه‌های متفاوت نشان دادند که این تابع، از اندیس ساختاری مستقل است و می‌توان عمق چشمه و اندیس ساختاری را از آن به دست آورد.

در این مقاله انحنا توابع ویژه مقارنی بررسی می‌گردد که بر روی چشمه‌های آنومالی دارای ماکزیمم است. این توابع ویژه توسط فیلیپس و همکاران (۲۰۰۷) به دودسته وابسته به مدلی خاص و مستقل از مدل تقسیم شد. توابع ویژه وابسته به مدلی خاص، نظیر بزرگی گرادیان افقی (HGM) (کورددل و گراوچ، ۱۹۸۲؛ روئست و بیلکینگتون، ۱۹۹۳) و مقدار مطلق میدان، برای تعیین مکان برخی منابع خاص که نوع چشمه از قبل مشخص است، استفاده می‌شود و از داده‌های گرانی، شبه گرانی و داده‌های مغناطیسی برگردان به قطب شده، قابل محاسبه است. توابع ویژه مستقل از مدل

تکنیک‌های خودکار زیادی طراحی شده است که می‌تواند در تمام آنومالی‌های مغناطیسی و گرانی به‌منظور برآورد سریع عمق، بر روی داده‌های شبکه‌ای و پروفیلی اعمال شود. سالم و همکاران (۲۰۰۵) با حل یک رابطه خطی برحسب اعداد موج محلی در جهات x و z توانستند مکان افقی و عمق چشمه‌های دوبعدی مغناطیسی را به دست آورند. بیکی و پدرسن (۲۰۱۰) روشی را برای تعیین پارامترهای آنومالی با استفاده از ویژه‌بردارهای تانسور گرادیان گرانی معرفی کردند. بیکی (۲۰۱۰) نشان داد که مشتقات جهتی سیگنال تحلیلی در رابطه همگن اوپلر صدق می‌کنند و می‌توان به‌صورت هم‌زمان نوع چشمه و مکان آن را برای یک پنجره با ابعاد مشخص به دست آورد. احمد عباس و فدوی (۲۰۱۴) با تعریف یک تابع مقیاس از کسر دو مشتق جزئی میدان از

مشاهده‌ای است. α و β ثابت‌های مثبت و محور Z همیشه به سمت پایین مثبت است.

انحنای هر تابع یک‌بعدی با رابطه‌ای بر حسب نسبت مشتقات مراتب اول و دوم آن تعریف می‌شود (روبرتس، ۲۰۰۱)؛ بنابراین، برای داده‌های شبکه‌ای عمق Z ، با استفاده از رابطه‌ی انحنای و به دست آوردن مشتق‌های لازم و یک سری ساده‌سازی‌های ریاضیاتی بر حسب مقدار و انحنای تابع ویژه $S(x, y, z)$ در مکان پیک، با رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$Z = \sqrt{\frac{2\beta S(x_0, y_0, z)}{K_{\text{neg}}(x_0, y_0, z)}} \quad (2)$$

که K_{neg} منفی‌ترین انحنای نام دارد (روبرتس، ۲۰۰۱).

۲.۱. توابع ویژه یک مدل خاص

توابع ویژه یک مدل خاص، از بزرگی گرادیان افقی (HGM - Horizontal Gradient Magnitude) (رابطه ۳)، میدان و یا مقدار مطلق یک نوع تبدیل‌یافته میدان پتانسیل مشاهده‌ای P محاسبه می‌شود.

$$\text{HGM}(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

آتومالی‌های میدان ممکن است بر روی نوع خاصی از چشمه به فرم رابطه (۱) نباشند به همین علت نیاز است که در میدان مشاهده‌ای تغییراتی اعمال شود. تعدادی از این تغییرات توسط فیلیس و همکاران (۲۰۰۷) برای چشمه‌های مختلف گرانی و مغناطیسی به همراه مقادیر β ارائه شده است.

۲.۲. توابع ویژه مستقل از مدل

این نوع توابع ویژه بر روی چشمه‌های دوبعدی به فرم رابطه (۱) است و از میدان پتانسیل مشاهده‌ای یا شکل تغییر یافته میدان قابل محاسبه است. این توابع قابل تعمیم به سه بعد است که دو نمونه از این توابع در ادامه ارائه می‌گردد (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷).

برای تعیین مکان انواع مختلفی از منابع، گرادیان کلی (نیگیان، ۱۹۷۲؛ روئست و همکاران، ۱۹۹۲) و عدد موج محلی (ترستون و اسمیت، ۱۹۹۷؛ اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸) استفاده می‌شود. به منظور تخمین عمق از گرادیان کلی نیاز است تا یک اندیس ساختاری فرض شود اما در تابع ویژه عدد موج محلی یک اندیس ساختاری از عمق تخمینی و مقدار تابع در مکان چشمه قابل محاسبه است.

برای به دست آوردن مکان چشمه، ابتدا در یک پنجره 3×3 یک سطح درجه دوم به تابع ویژه مورد نظر برازش می‌شود که با استفاده از ضرایب این سطح می‌توان مکان و بزرگی قله تابع را به دست آورد. علاوه بر تعیین مکان و بزرگی قله تابع، با استفاده از منفی‌ترین انحنای سطح درجه دوم (روبرتس، ۲۰۰۱) می‌توان عمق و اندیس ساختاری را تخمین زد. تابع ویژه عدد موج محلی این امکان را فراهم می‌کند تا بتوانیم اندیس ساختاری را نیز از عمق محاسبه شده برای چشمه به دست آوریم. نشانگر اندیس شکل (SHI) به عنوان معیاری مناسب برای برقراری شرط دوبعدی بودن چشمه‌ها، این قابلیت را دارد که تعدادی از تخمین‌های نادرست عمق را حذف کند (براود، ۲۰۱۳). در این مقاله این معیار به منظور حذف تخمین‌های نادرست اندیس ساختاری نیز بررسی شده است.

۲. روش پژوهش

ایده اصلی در برآورد عمق، بر اساس انحنای توابع ویژه‌ای است که مستقیماً بر روی چشمه‌ها دارای ماکزیمم هستند. برای داده‌های شبکه‌ای تابع ویژه $S(x, y, z)$ از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$S(x, y, z) = \frac{\alpha}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^\beta} \quad (1)$$

متغیرهای بالا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X = (x - x_0), Y = (y - y_0), Z = (z - z_0)$$

که (x_0, y_0, z_0) مکان چشمه و (x, y, z) مختصات نقطه

می‌توان با استفاده از روابط (۶) و (۷) اندیس ساختاری را برحسب عمق و مقدار پیک به دست آورد (روابط ۸ و ۹):

$$SI_{est} = -LW(h_0)Z_{est} - 1 \quad (8)$$

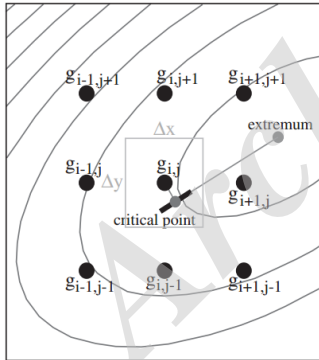
$$SI_{est} = -LW(h_0)Z_{est} + VI - 1 \quad (9)$$

که Z_{est} و SI_{est} به ترتیب اندیس ساختاری و عمق تخمین زده شده از عدد موج محلی است.

۲.۵. تعیین مکان قله برآمدگی با استفاده از انحنا

در این بخش چگونگی استفاده از نشانگرهای انحنا برای تعیین بیشینه یا کمینه و جهت گیری سطحی که به یک تابع شبکه‌ای $g(x,y)$ برازش شده است، بیان می‌گردد. هانس و دریدر (۲۰۰۶) روشی مبتنی بر عبور یک پنجره 3×3 بر روی شبکه داده و تعیین مکان هر نقطه بحرانی مناسب نزدیک مرکز پنجره را معرفی کرده‌اند. اولین گام این است که درون هر پنجره، ضرایب سطح درجه دوم (رابطه ۱۰) عبوری از ۹ نقطه پنجره تعیین گردد (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 \approx g(x,y), \quad (10)$$



شکل ۱. مکان‌های نقاط شبکه برای بررسی قله برآمدگی در تابع ویژه $g(x,y)$ نزدیک $g_{i,j}$ استفاده شده است. پربندها، سطح درجه دوم که به ۹ نقطه داده برازش می‌شود را نشان می‌دهد. اکسترمم سطح در طول امتداد تخمینی و نقطه بحرانی نشان داده شده است که مکانی بر روی قله برآمدگی و نزدیک‌ترین به مرکز پنجره است. چون نقطه بحرانی درون مستطیل خاکستری قرار دارد، به‌عنوان مکان چشمه نگه داشته می‌شود. دامنه در نقطه بحرانی و منفی‌ترین انحنا سطح درجه دوم، به‌منظور برآورد عمق چشمه استفاده می‌شود (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷).

۲.۳. گرادیان کلی (TG - Total Gradient)

گرادیان کلی (TG) به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (نییغان، ۱۹۷۲؛ فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$TG(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^2}, \quad (4)$$

به‌منظور تخمین عمق با استفاده از رابطه (۲)، ضروری است که یک اندیس ساختاری فرض کنیم ($SI_{assumed}$) و β را با رابطه $\beta = (SI_{assumed} + 1) / 2$ تنظیم کنیم. در صورتی که گرادیان کلی از انتگرال عمودی میدان پتانسیل به دست آمده باشد $\beta = (SI_{assumed} - VI + 1) / 2$ خواهد بود که VI به‌عنوان مرتبه انتگرال، یک عدد صحیح یا کسری است (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸؛ پیلکینگتون و کیتینگ، ۲۰۰۵؛ فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷).

۲.۴. عدد موج محلی (LW - Local Wavenumber)

عدد موج محلی سه‌بعدی توسط رابطه (۵) بیان می‌شود (ترستون و اسمیت، ۱۹۹۷؛ فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$LW(x,y) = \frac{\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial z} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \frac{\partial P}{\partial z}}{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^2} \quad (5)$$

عدد موج محلی یک میدان پتانسیل که به‌وسیله چشمه ایزوله دو‌بعدی در (h_0, Z_0) تولید شده، به‌صورت رابطه (۶) است:

$$LW(h) = \frac{-(SI+1)Z}{H^2 + Z^2} \quad (6)$$

و اگر عدد موج محلی از انتگرال عمودی میدان پتانسیل به‌دست آمده باشد:

$$LW(h) = \frac{-(SI - VI + 1)Z}{H^2 + Z^2} \quad (7)$$

که $H = h - h_0$ و محور h در جهت عمود بر امتداد چشمه دو‌بعدی در نظر گرفته شده است. بنابراین در روابط (۶) و (۷) به ترتیب $\alpha = -(SI+1)Z$ و $\alpha = -(SI - VI + 1)Z$ در هر دو رابطه، $\beta = 1$ است.

برای تخمین عمق از عدد موج محلی ضرورتی ندارد یک اندیس ساختاری فرض کنیم. زمانی که عمق تخمین زده شد،

را ارائه می‌کند. اگر هر دو ویژه مقدار منفی باشند، اکستریم سطح ماکزیمم است و اگر هر دو مثبت باشند، مینیمم است و اگر علامت مختلف داشته باشند، اکستریم نقطه زینی است. ویژه مقادیر همچنین می‌توانند برای تعیین ماهیت امتداد حاکم سطح درجه دوم استفاده شوند. اگر دو ویژه مقدار برابر باشند سطح دارای امتداد حاکم نیست. اگر ویژه مقدار با مقدار بزرگ تر منفی باشد، امتداد حاکم یک برآمدگی یا تپه است و اگر ویژه مقدار با مقدار بزرگ تر مثبت باشد، امتداد حاکم تشکک مانند شبیه ظرف است (جدول ۱).

ویژه مقدار $K_<$ با کوچکترین بزرگی (K_{pos} در مورد برآمدگی یا تپه) دارای ویژه بردار (e_x, e_y) است که به امتداد سطح درجه دوم اشاره می‌کند. ویژه مقدار $K_>$ که دارای بزرگترین مقدار است (K_{neg} در مورد برآمدگی یا تپه) دارای ویژه مقدار (e_x, e_y) است که به جهت عمود به امتداد سطح درجه دوم اشاره می‌کند. ویژه بردارهای ماتریس انحنا برای یک سطح درجه دوم توسط رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$(e_x, e_y) = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 \\ (K-2D)/E \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} (K-2F)/E \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } E \neq 0 \\ \begin{pmatrix} 1 \\ E/(K-2F) \end{pmatrix} & \text{if } K \neq 2F \\ \begin{pmatrix} E/(K-2D) \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } K \neq 2D \end{cases} \quad (15)$$

هر سطح درجه دومی که دارای اکستریم ماکزیمم یا امتداد غالب در طول برآمدگی است، یک سطح مناسب برای تعیین مکان چشمه است. خط عبوری از مرکز پنجره $(0,0)$ و (x_0, y_0) دارای معادله $y = (e_y/e_x)x$ یا $x = (e_x/e_y)y$ است. با جایگزینی این رابطه درون رابطه سطح درجه دوم، مشتق گیری و برابر با صفر قرار دادن آن، مکان نقطه بحرانی به دست می‌آید:

$$x_0 = -\frac{Be_{>x}^2 + Ce_{>x}e_{>y}}{2(De_{>x}^2 + Ce_{>x}e_{>y} + Fe_{>y}^2)} \quad (16)$$

$$y_0 = -\frac{Ce_{>y}^2 + Be_{>x}e_{>y}}{2(De_{>x}^2 + Ce_{>x}e_{>y} + Fe_{>y}^2)}$$

به منظور به کارگیری موفق رابطه تخمین عمق دو فرض باید اعمال شود:

اگر یک سیستم مختصات محلی را با قرار دادن مبدأ در مرکز پنجره، $g_{i,j}$ ، فرض کنیم (شکل ۱) آنگاه ضرایب سطح درجه دوم بالا با استفاده از تخمین حداقل مربعات خطی به دست می‌آید (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{9}[5g_{i,j} + 2(g_{i+1,j} + g_{i-1,j} + g_{i,j+1} + g_{i,j-1}) \\ &\quad - (g_{i+1,j+1} + g_{i+1,j-1} + g_{i-1,j+1} + g_{i-1,j-1})] \\ B &= \frac{1}{6\Delta x}[g_{i+1,j+1} + g_{i+1,j} + g_{i+1,j-1} \\ &\quad - (g_{i-1,j+1} + g_{i-1,j} + g_{i-1,j-1})] \\ C &= \frac{1}{6\Delta y}[g_{i+1,j+1} + g_{i,j+1} + g_{i-1,j+1} \\ &\quad - (g_{i+1,j-1} + g_{i,j-1} + g_{i-1,j-1})] \\ D &= \frac{1}{6(\Delta x)^2}[g_{i+1,j+1} + g_{i+1,j} + g_{i+1,j-1} + g_{i-1,j+1} \\ &\quad + g_{i-1,j} + g_{i-1,j-1} - 2(g_{i,j+1} + g_{i,j} + g_{i,j-1})] \\ E &= \frac{1}{4\Delta x\Delta y}[g_{i+1,j+1} + g_{i-1,j+1} - g_{i+1,j-1} - g_{i-1,j-1}] \\ F &= \frac{1}{6(\Delta y)^2}[g_{i+1,j+1} + g_{i,j+1} + g_{i+1,j-1} + g_{i-1,j+1} \\ &\quad + g_{i+1,j-1} + g_{i,j-1} + g_{i-1,j-1} - 2(g_{i+1,j} + g_{i,j} + g_{i-1,j})] \end{aligned} \quad (11)$$

که Δx و Δy فاصله‌های نقاط شبکه در جهت x و y است (شکل ۱). مکان اکستریم (x_e, y_e) سطح درجه دوم با مشتق گیری از آن در جهات x و y و برابر صفر قرار دادن، توسط رابطه (۱۲) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} x_e &= \frac{2FB - CE}{E^2 - 4DE} \\ y_e &= \frac{2CD - BE}{E^2 - 4DE} \end{aligned} \quad (12)$$

ماتریس انحنا بر حسب مشتقات مرتبه دوم میدان و برای یک سطح درجه دوم با رابطه (۱۳) تعریف می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2D & E \\ E & 2F \end{pmatrix} \quad (13)$$

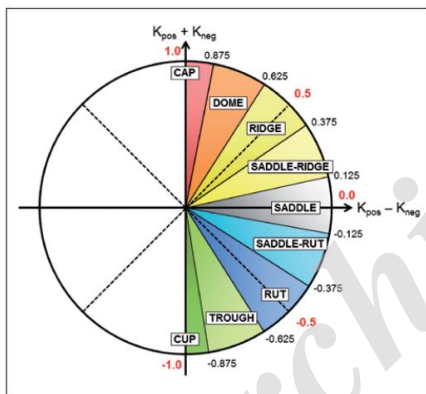
ویژه مقادیر ماتریس بالا توسط روابط (۱۴) داده شده‌اند:

$$\begin{aligned} K_{pos} &= D + F + \sqrt{(D-F)^2 + E^2} \\ K_{neg} &= D + F - \sqrt{(D-F)^2 + E^2} \end{aligned} \quad (14)$$

که K_{neg} منفی ترین انحنا نام دارد و در تخمین عمق چشمه با استفاده از رابطه (۲) مفید است و K_{pos} مثبت ترین انحنا نامیده می‌شود (روبرتس، ۲۰۰۱).

ویژه مقادیر ماتریس انحنا، انحناهای اصلی سطح درجه دوم

مناسب است. اگر سطح S به صورت محلی به شکل یک برآمدگی است (SHI = +۰/۵)، آنومالی گرانی به احتمال زیاد از یک چشمه گسترده نشأت گرفته که می توان آن را از نقطه مشاهده ای بی نهایت در نظر گرفت. چشمه های غیرایده آل از شکل ایده آل S انحراف خواهند داشت و SHI از مقدار ایده آل ۰/۵ واگرا می شود. در یک دسته بندی دیگر (برآود، ۲۰۱۳) شکل هایی که SHI آن ها بین ۰/۳۷۵ و ۰/۶۲۵ قرار دارند، می توانند به عنوان برآمدگی در نظر گرفته شوند (شکل ۲). برآود (۲۰۱۳) بازه مذکور را به عنوان معیاری مناسب به منظور بررسی برقراری شرط دوبعدی برای حذف تخمین های نادرست عمق از توابع ویژه خاص اعمال کرد. در این مقاله، این معیار برای حذف تخمین های نادرست اندیس ساختاری از عدد موج محلی نیز به کار رفته است.



شکل ۲. نمایش اندیس شکل (SHI) به عنوان یک زاویه در صفحه

$$(K_{pos} - K_{neg}) \times (K_{pos} + K_{neg}) \quad (\text{برآود، } 2013)$$

جدول ۱. نوع اکسترمم و امتداد غالب یک سطح درجه دوم؛ انواع اکسترمم از ویژه مقادیر ماتریس انحنا تعیین می شوند. اگر دو ویژه مقدار دارای بزرگی برابر باشند، هیچ امتداد غالبی وجود ندارد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

امتداد غالب	اکسترمم	$ K_{neg} / K_{pos} $	K_{pos}	K_{neg}
برآمدگی	ماکسیمم		< ۰	< ۰
برآمدگی	نقطه زینی	> ۱	> ۰	< ۰
حداقل موج (تشتک)	نقطه زینی	< ۱	> ۰	< ۰
حداقل موج (تشتک)	مینیمم		> ۰	> ۰

۱. چشمه باید دوبعدی باشد (به جز چشمه های نقطه ای).

۲. انحنا در جهت عمود بر امتداد با بعد بی نهایت محاسبه شود.

در اینجا راهی برای ارزیابی درستی این شرایط ارائه شده است. برای یک سطح درجه دوم S یک سری نشانگرها به دست می آید که دو نمونه از آن ها منفی ترین انحنا (K_{neg}) و مثبت ترین انحنا (K_{pos}) است. از بزرگی K_{neg} نسبت به K_{pos} به منظور تعیین تفرع سطح (برآمدگی یا تشتک) استفاده شده است. به علاوه در مورد برآمدگی، K_{pos} با برداری همراه است که به جهت کشیدگی سطح درجه دوم اشاره می کند؛ بنابراین K_{neg} همراه با برداری است که به جهت عمود بر امتداد چشمه اشاره می کند و برای محاسبه تخمین عمق در رابطه (۲) مناسب است. کیفیت تخمین های عمق با محاسبه اندیس شکل از رابطه (۱۷) قابل ارزیابی است:

$$SHI = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{K_{neg} + K_{pos}}{K_{neg} - K_{pos}} \right] \quad (17)$$

SHI در گستره -۱ و +۱ قرار دارد و می تواند به صورت یک زاویه در صفحه $(K_{pos} - K_{neg}) \times (K_{pos} + K_{neg})$ دیده شود (شکل ۲). SHI دسته بندی راحتی از اشکال، از فنجان کروی ($SHI = -1$) تا کلاهک محدب کروی ($SHI = +1$) را فراهم می کند. SHI برای ارزیابی همگرایی تابع ویژه S از فرم تحلیلی که شرایط دوبعدی کامل را فرض می کند،

دوم بزرگی تابع ویژه را در آن نقطه (ماکزیمم یا نقطه بحرانی) می‌یابیم (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷).

- با استفاده از بزرگی تابع ویژه، فرض اندیس ساختاری در صورت نیاز و منفی‌ترین انحنای سطح درجه دوم عمق را از رابطه ۲ به دست می‌آوریم. برای حذف تخمین‌های نادرست عمق از رابطه (۱۷) استفاده کرده و از مقادیر عمقی خارج از بازه $0/625 \leq SHI \leq 0/375$ صرف‌نظر می‌کنیم. این معیار را بر روی اندیس ساختاری به دست آمده از عدد موج محلی نیز اعمال می‌کنیم. با معلوم بودن چشمه، فاکتور هندسی (رابطه ۱۹) می‌تواند معیار دیگری برای حذف تخمین‌های نادرست با توجه به مقادیر مجاز به دست آمده از اطلاعات زمین‌شناسی باشد.

۳. اعمال روش روی داده مصنوعی بدون نوفه

این روش در این مقاله ابتدا به داده‌های گرانی مصنوعی بدون نوفه تولید شده توسط یک استوانه افقی با طول متناهی (۱۴ کیلومتر از -7000 تا 7000 متر) موازی با محور y اعمال شده است. این مثال، آزمایشی برای برقراری شرط دویعدی با معیارهای اندیس شکل و فاکتور هندسی است. مؤلفه قائم میدان گرانی با رابطه (۲۰) داده شده است (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰):

$$g_z = -\frac{\alpha}{2}(z-z_0) \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (20)$$

که y_1 و y_2 مختصات دو انتهای استوانه و $\Gamma_i = [(x-x_0)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_0)^2]^{-1/2}$ ، $i=1,2$ تخمین عمق همان‌طور که در بالا بیان شد، برای تابع ویژه مدل خاص (در اینجا مقدار مطلق میدان) با فرض مدل استوانه افقی نامتناهی ($\beta=1$) محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نقاطی که در آن تخمین عمق انجام گرفته است، مستقیماً روی محور استوانه و در جهت امتداد آنومالی قرار دارند؛ به جز نقاط انتهایی که تعداد زیادی از نقاط، اطراف انتهای خمیده آنومالی پخش شده‌اند.

برای برخی از مدل‌ها که تعدادی از آن‌ها توسط برآورد (۲۰۱۳) معرفی شده است، توابع ویژه مدل خاص با رابطه (۱۸) تعریف می‌شوند:

$$S(x, y, z) = \frac{\alpha Z}{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (18)$$

در این رابطه α فاکتور هندسی نام دارد که به چگالی و ابعاد چشمه وابسته است (برآورد، ۲۰۱۳). این فاکتور را می‌توان از رابطه (۱۸) در مکان چشمه به دست آورد:

$$\alpha = Z \times S(x_0, y_0, z) \quad (19)$$

با مقایسه مقدار محاسبه شده برای α با گستره‌ای از مقادیر مورد انتظار از اطلاعات زمین‌شناسی، تعداد نقاط نادرست می‌تواند کاهش یابد. انتخاب اشتباه منبع نیز می‌تواند مقادیر غیر نرمال α ایجاد کند و بنابراین می‌تواند مشاهده شود (برآورد، ۲۰۱۳).

در زیر الگوریتمی برای به دست آوردن مکان چشمه‌ها با اعمال روش توصیف شده در بالا ارائه شده است:

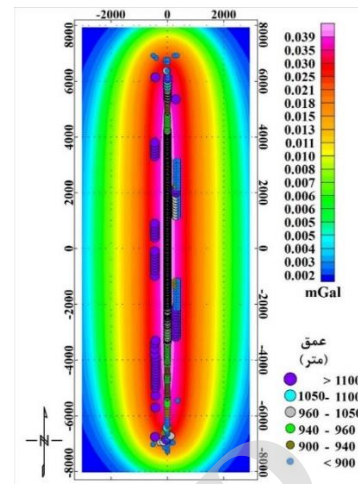
- به یک پنجره 3×3 از داده‌های تابع ویژه با مبدأ در مرکز آن یک سطح درجه دوم برازش می‌کنیم و از معادله ۱۱ ضرایب آن را می‌یابیم (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷).

- با استفاده از روابط مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنا (رابطه ۱۴) و اطلاعات جدول ۱ بررسی می‌کنیم که سطح درجه دوم دارای ماکزیمم است یا خیر و اینکه این ماکزیمم در طول برآمدگی قرار دارد یا نه (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷).

- اگر سطح دارای ماکزیمم است، مکان آن را از رابطه ۱۲ محاسبه می‌کنیم و اگر این ماکزیمم در طول برآمدگی قرار داشته باشد مقدار نقطه بحرانی را نیز از رابطه (۱۶) به دست می‌آوریم. اگر ماکزیمم یا نقطه بحرانی نزدیک مرکز پنجره نباشد، پنجره را حرکت می‌دهیم و برای پنجره جدید عملیات بالا را انجام می‌دهیم، در غیر این صورت با استفاده از ضرایب به دست آمده از سطح درجه

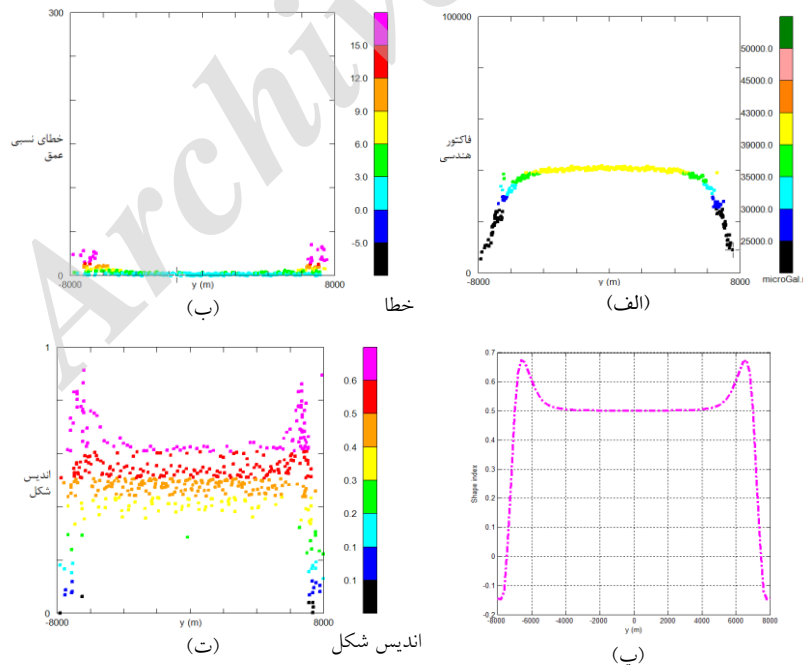
به عنوان تابعی از فاصله در طول استوانه، می توان تأثیرات طول متناهی را مشاهده کرد.

(شکل ۴-ب): با نزدیک شدن به دو انتهای استوانه خطای عمق محاسباتی شروع به افزایش می کند. SHI نیز رفتاری مشابه دارد: بر روی محور استوانه از ۴ کیلومتر تا ۴- کیلومتر مقدار آن ثابت و برابر با مقدار تئوری ۰/۵ است (شکل ۴-پ) و در فواصل خیلی نزدیک به محور استوانه و در مکان عمقها اطراف این مقدار نوسان می کند (شکل ۴-ت). برای اطلاعات بیشتر به شکل ۲ مراجعه شود. با نزدیک شدن به انتهای استوانه این مقدار تا حدود ۰/۶۷ افزایش می یابد و این نشان می دهد که شکل محلی سطح بیشتر گنبدی شکل است تا برآمدگی (Ridge). سپس SHI کاهش یافته و با عبور از برآمدگی به مقدار صفر (زینی شکل)، جایی که آنومالی ناپدید می شود، می رسد. این مثال نشان می دهد که نقاط نادرست را می توان با محدود کردن مقادیر SHI نزدیک ۰/۵ حذف کرد.



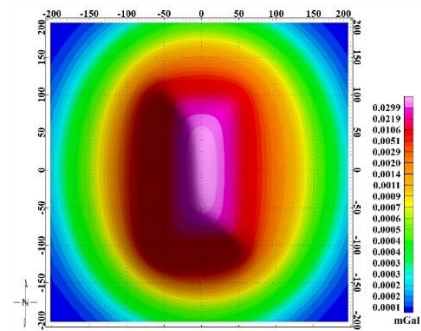
شکل ۳. تخمین عمق های یک استوانه افقی با طول متناهی (۱۴ کیلومتر) و شعاع ۱۰۰ متر با استفاده از توابع ویژه یک مدل خاص که در عمق ۱ کیلومتری زیر نقاط مشاهده ای قرار دارد. تباین چگالی جرمی 100 Kg/m^3 است. داده های پس زمینه مقادیر ρ_c را نشان می دهد. تخمین عمقها با نقاط رنگی به عنوان تابعی از عمق رسم شده اند.

فاکتور هندسی از رابطه (۱۹) محاسبه شد و در شکل ۴-الف نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود فاکتور هندسی برای تمام نقاطی که با معیار SHI به دست آمده اند، تقریباً برابر با مقدار نظری



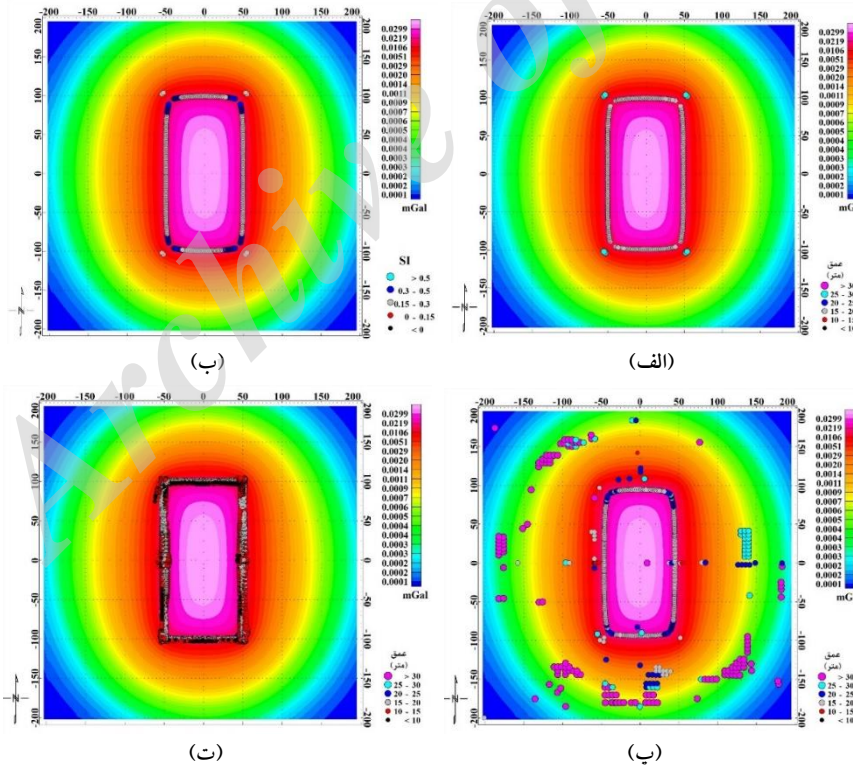
شکل ۴. (الف) فاکتور هندسی محاسبه شده از رابطه (۱۹) برای مدل استوانه ای شکل ۳ در امتداد طول استوانه، (ب) خطای نسبی عمق محاسبه شده در امتداد طول استوانه، (پ) اندیس شکل (SHI) بر روی محور استوانه و (ت) اندیس شکل (SHI) محاسبه شده در مکانی که عمقها به دست آمده اند.

عدد موج محلی به منظور تعیین نوع چشمه (اندیس ساختاری) و تخمین عمق به کار رفته است. شکل ۶-الف و ۶-ب به ترتیب نتایج تخمین عمق و اندیس ساختاری را که از تابع ویژه عدد موج محلی به دست آمده است، نشان می دهد. اکثر عمق های برآوردی از این روش همانند مثال قبل در محدوده وسط تا کف چشمه (۱۵-۲۰) قرار دارد. اندیس ساختاری برای این چشمه آنومالی با استفاده از رابطه (۸) تقریباً برابر با مقدار 0.2 به دست آمد (شکل ۶-ب). به منظور تخمین عمق از تابع ویژه سیگنال تحلیلی، از مقدار اندیس ساختاری به دست آمده در بالا برای به دست آوردن مقدار β استفاده شد و سپس از رابطه (۲) عمق تخمین زده شد (شکل ۶-پ). نتیجه تخمین عمق با استفاده از روش رابطه همگن اوپلر (تامپسون، ۱۹۸۲) نیز با فرض اندیس ساختاری 0.2 برای مقایسه در شکل ۶-ت نمایش داده شده است که به خوبی با نتایج به دست آمده در بالا انطباق دارد.

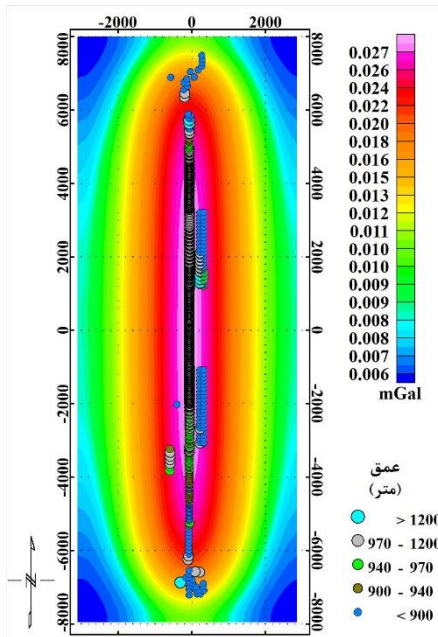


شکل ۵. اثر گرانی منشوری در عمق ۱۰ متری با ابعاد $10 \times 200 \times 10 \text{ m}^3$ و با چگالی 1.0 Kg/m^3

این مثال همچنین نشان می دهد که شرط دوبرعی تا فاصله کوتاهی از انتهای آنومالی برقرار است. به عنوان مثال دوم روش بالا به یک مکعب در عمق ۱۰ متر به ابعاد $10 \times 200 \times 10 \text{ m}^3$ و با چگالی 1.0 Kg/m^3 اعمال شد. شکل ۵ اثر گرانی این مکعب را نشان می دهد. در این مثال رویکردی متفاوت از مثال اول دنبال شده است. با فرض عدم اطلاع از نوع چشمه آنومالی ابتدا تابع



شکل ۶. الف) نتایج تخمین عمق از تابع ویژه عدد موج محلی پس از اعمال معیار SHI برای مدل مکعبی در عمق ۱۰ متری با ابعاد $10 \times 200 \times 10 \text{ m}^3$ ، ب) نتایج تخمین اندیس ساختاری پس از اعمال معیار SHI که از رابطه (۸) برآورد شده است. پ) نتایج تخمین عمق با استفاده از تابع ویژه سیگنال تحلیلی پس از اعمال معیار SHI با فرض اندیس ساختاری 0.2 که از تابع ویژه عدد موج محلی به دست آمد. ت) نتایج تخمین عمق از روش همگن اوپلر با فرض اندیس ساختاری 0.2 . تصویر پس زمینه مقادیر g را نشان می دهد. تخمین عمق ها با نقاط رنگی به عنوان تابعی از عمق رسم شده اند.



شکل ۸. نتیجه تخمین عمق از توابع ویژه مدل خاص با فرض مدل استوانه‌ای نامتناهی برای مدل مصنوعی در حضور نوفه؛ داده‌های پس‌زمینه مقادیر G_z را پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو بافاصله ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصله فراسو با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.

۲.۴. نتایج گرادیان کلی

شکل ۹ نتیجه تخمین عمق با استفاده از تابع ویژه گرادیان کلی پس از اعمال معیار SHI را نشان می‌دهد. برای مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از گرادیان کلی با نتایج توابع ویژه مدل خاص، در اینجا نیز اندیس ساختاری ۱ انتخاب شده است. به علت وجود گرادیان قائم در تابع گرادیان کلی اعمال فیلترهای مناسب جهت تضعیف اثر نوفه ضروری است. عمق‌های تخمینی، به عمق‌های به‌دست‌آمده از توابع ویژه مدل خاص بسیار نزدیک است.

۳.۴. نتایج عدد موج محلی

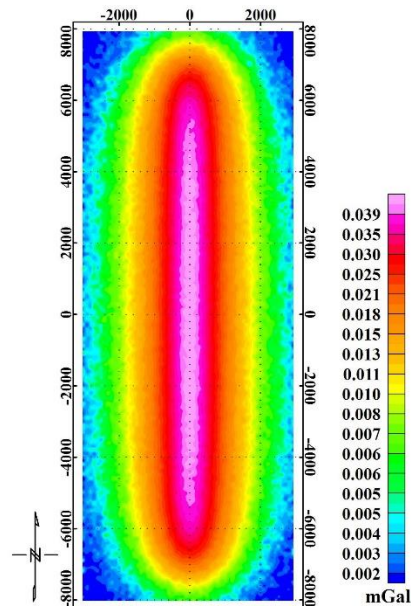
مشابه با گرادیان کلی به علت استفاده از مشتق قائم و مشتقات مرتبه دوم در تابع عدد موج محلی، اعمال فیلترهای مناسب برای از بین بردن تأثیرات نوفه ضروری است. نتایج تخمین عمق به‌دست‌آمده از این تابع پس از اعمال معیار

۴. اعمال روش روی داده مصنوعی با نوفه

برای بررسی کارایی در مقابل اضافه‌شدن نویز، این روش به مدل استوانه‌ای نویز گاوسی نسبتاً بالا با میانگین صفر و انحراف معیار $500 \mu\text{Gal}$ اعمال شد (شکل ۷). در ادامه نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری روش انحنای برای این مدل ارائه می‌گردد.

۴.۱. نتایج توابع ویژه مدل خاص

در این مورد برای نمایش نتایج تخمین عمق، تابع ویژه قدر مطلق میدان را با فرض اندیس ساختاری ۱ انتخاب می‌کنیم. از آنجا که نشانگرهای انحنای مشتقات مرتبه دوم میدان محاسبه می‌شوند، به سطح نویز حساس هستند و وابسته به کیفیت داده، اعمال فیلتر برای هموارسازی داده‌ها ضروری است. در این مورد فیلتر ادامه فراسو به فاصله ارتفاعی ۵۰۰ متر قبل از اعمال روش استفاده شده است. شکل ۸ تخمین عمق را پس از اعمال معیار SHI برای این مورد نشان می‌دهد. عمق‌های به‌دست‌آمده با عمق واقعی استوانه تطابق خوبی دارند.



شکل ۷. آنومالی گرانی مدل استوانه‌ای شکل ۳ در حضور نوفه گاوسی با میانگین صفر و انحراف معیار $500 \mu\text{Gal}$.

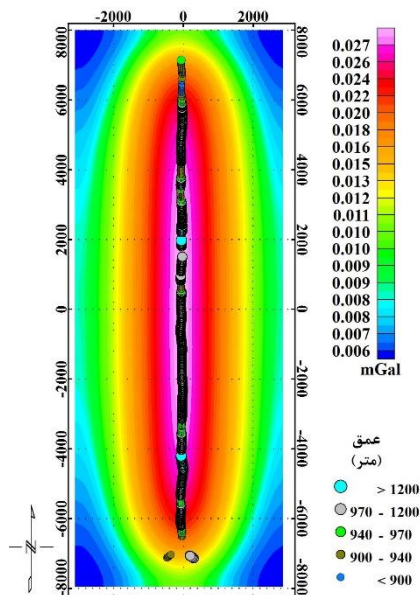
SHI در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانند دو تابع ویژه

قبل نتایج با مقدار واقعی تطابق خوبی دارد.

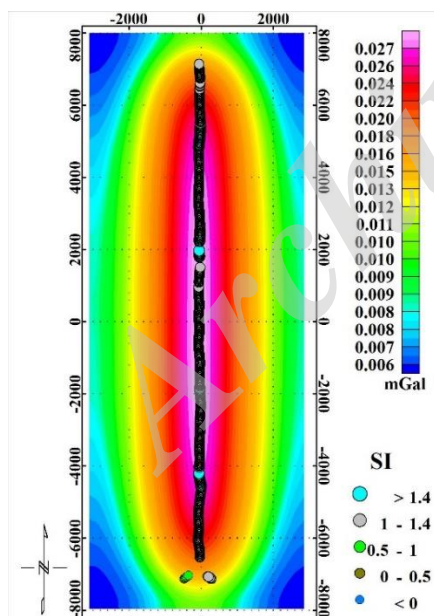
در اینجا معیار SHI به اندیس ساختاری محاسبه شده از رابطه ۸ اعمال شده است (شکل ۱۱). همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده، اندیس ساختاری که از این معادله تخمین زده شده است تقریباً برابر با مقدار ۱/۲ است که به مقدار تئوری اندیس ساختاری برای استوانه نزدیک است و از رابطه ۲۰ مشهود است.

۴.۴. مقایسه نتایج تخمین عمق از انحنا با روش اوپلر

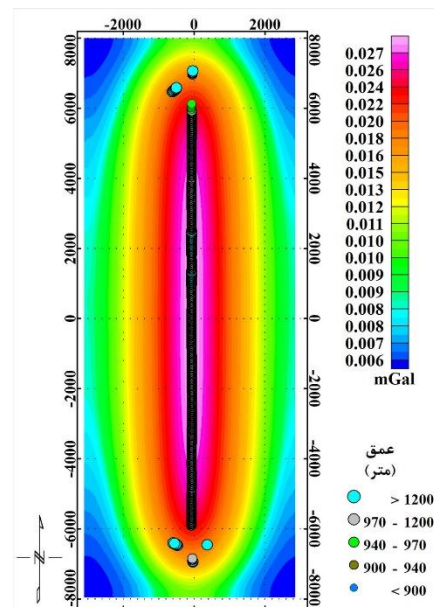
به منظور نمایش توانایی روش تخمین عمق از انحنا، نتایج تخمین عمق از روش اوپلر با فرض اندیس ساختاری ۱ را برای مقایسه در شکل ۱۲ نشان داده ایم. همان طور که از این شکل قابل مشاهده است، نتایج روش انحنا با نتایج به دست آمده از روش اوپلر تطابق زیادی دارد.



شکل ۱۰. نتیجه تخمین عمق از عدد موج محلی برای مدل مصنوعی در حضور نوفه؛ داده‌های پس‌زمینه مقادیر g_z را پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو با فاصله ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصله فراسو با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.



شکل ۱۱. اندیس ساختاری تخمین زده شده از عدد موج محلی؛ داده‌های پس‌زمینه مقادیر g_z را نشان می‌دهد. اندیس‌های ساختاری با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از اندیس‌های تخمین زده شده رسم شده‌اند. این شکل اندیس ساختاری را برای این مدل تقریباً ۱/۲ تخمین زده است.



شکل ۹. نتیجه تخمین عمق از گرادیان کلی با فرض اندیس ساختاری ۱ برای مدل مصنوعی در حضور نوفه؛ داده‌های پس‌زمینه مقادیر g_z را پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو با فاصله ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصله فراسو با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.

جدول ۲. نتایج مطالعات قبلی در برآورد پارامترهای معدن سولفیدی موبرون، کانادا (برگرفته از عیسی، ۲۰۱۲).

گرانت و وست (۱۹۶۵)	روی و همکاران (۲۰۰۱)	عیسی (۲۰۱۲)	
۳۰	۲۹/۴	۳۳/۳	عمق
-	۰/۷۷	۰/۷۸	اندریس ساختاری

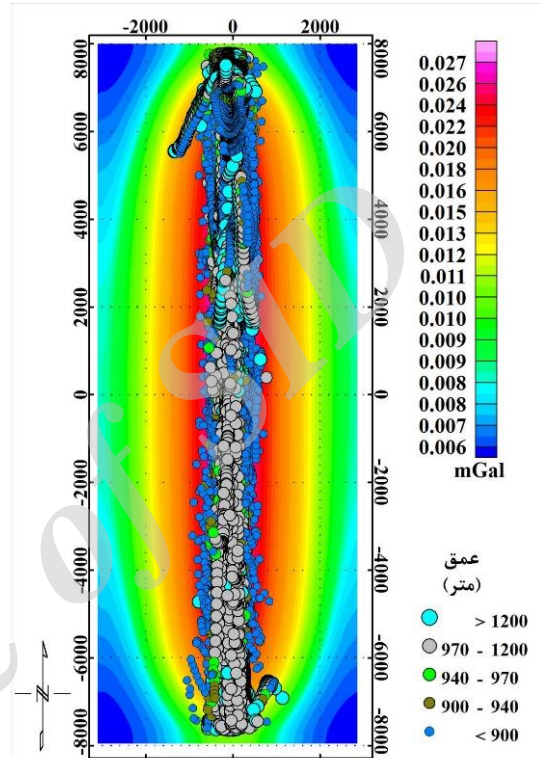
۵. اعمال روش روی داده‌های واقعی

شکل ۱۳ نقشه آنومالی باقیمانده مربوط به معدن سولفیدی موبرون در استان کبک واقع در شرق کاناداست (برگرفته از کتاب گرانت و وست، ۱۹۶۵). داده‌برداری‌ها در ۱۳ پروفیل انجام گرفته است که فاصله پروفیل‌ها و داده‌های روی پروفیل ۱۰ متر است. میانگین چگالی توده معدنی که از نمونه‌برداری گمانه‌ها به دست آمده است برابر g/cm^3 و $4/6$ میانگین چگالی سنگ میزبان $2/7 g/cm^3$ است. عمق بالایی که توسط روش ارائه شده در بالا به دست آمد تقریباً با نتایج به دست آمده از روی و همکاران (۲۰۰۰)، عیسی (۲۰۱۲) و اطلاعات حفاری (گرانت و وست، ۱۹۶۵) تطابق دارد (جدول ۲).

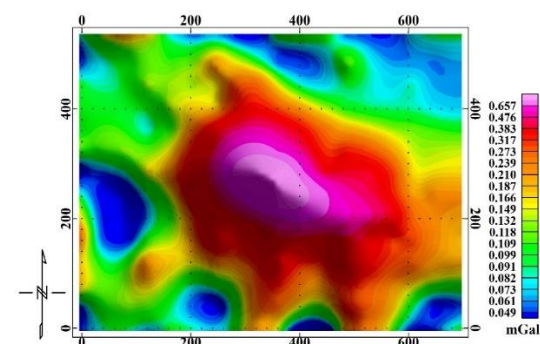
۵.۱. نتایج توابع ویژه یک مدل خاص

برای نمایش نتایج توابع ویژه یک مدل خاص، مدل استوانه‌ای قائم را با اندیس ساختاری ۱ انتخاب کردیم. نتایج تخمین عمق با استفاده از این مدل در شکل ۱۴-الف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود عمق محاسباتی دارای پیوستگی عالی بر روی آنومالی است و با عمق بالایی معدن (جدول ۲) تطابق خوبی دارد. این نشان می‌دهد که مدل استفاده شده، مدل تقریباً مناسبی است. با محدود کردن مقادیر SHI در بازه $0/375-0/625$ می‌توان تعدادی از تخمین عمق‌های نادرست را حذف کرد.

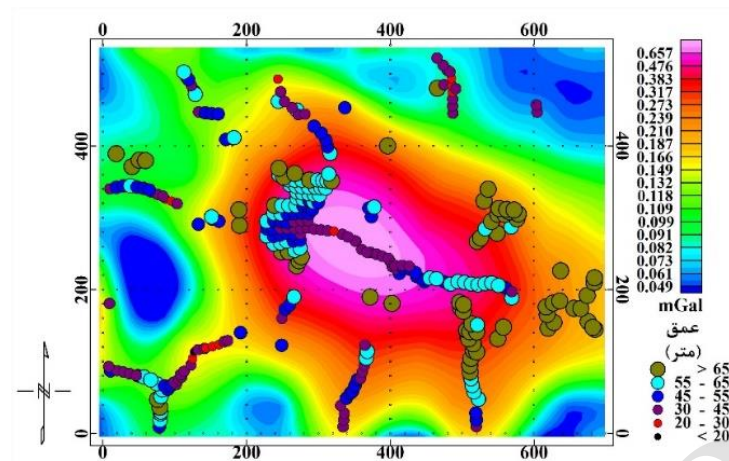
شکل ۱۴-ب نقاط حذف شده از تخمین عمق را به رنگ خاکستری نشان می‌دهد. شکل ۱۴-پ تخمین عمق‌ها را پس از اعمال معیار SHI نشان می‌دهد. مکان‌های تخمین عمق شده به خوبی در امتداد آنومالی برآورد شده است.



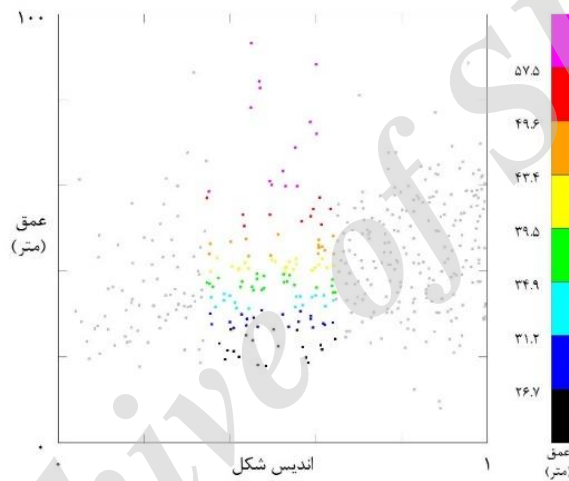
شکل ۱۲. نتایج تخمین عمق به دست آمده از روش اویلر بر روی داده‌های مصنوعی حاصل از استوانه افقی در حضور نوفه؛ داده‌های پس‌زمینه مقادیر z را پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو با فاصله ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصله فراسو با نقاط رنگی به عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.



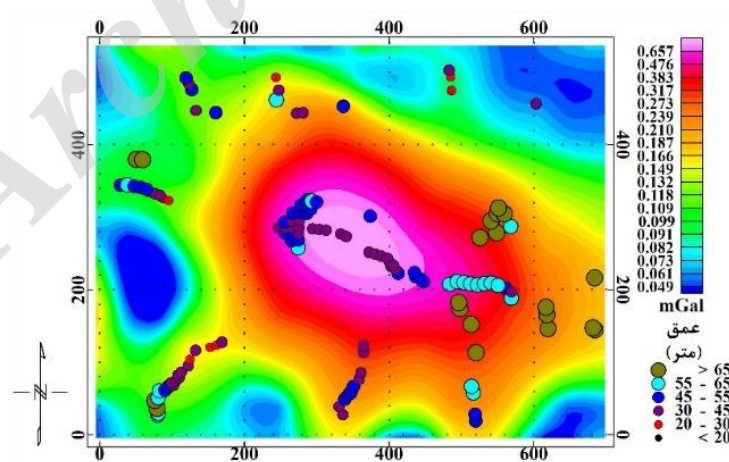
شکل ۱۳. آنومالی گرانی باقیمانده معدن سولفیدی موبرون



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۴. نتایج تابع ویژه یک مدل خاص برای آنومالی شکل ۱۳. (الف) تخمین عمق‌های روش انجنا با فرض مدل استوانه قائم با اندیس ساختاری ۱. (ب) اندیس

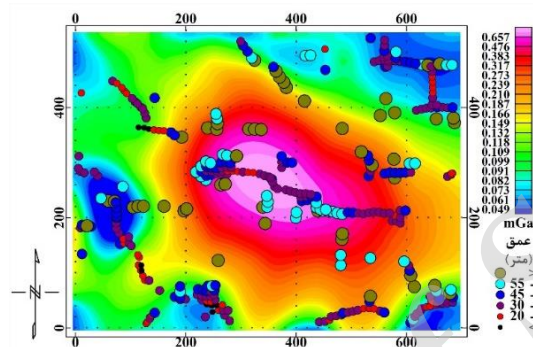
شکل به‌عنوان تابعی از تخمین عمق؛ نقاط خاکستری نقاط حذف‌شده از تخمین عمق با معیار SHI هستند. (پ) تخمین عمق‌های قسمت الف پس از

اعمال شرط قسمت ب؛ تصویر پس‌زمینه نقشه آنومالی باقیمانده گرانی پس از ادامه فراسو به‌اندازه ۲۰ متر را نشان می‌دهد.

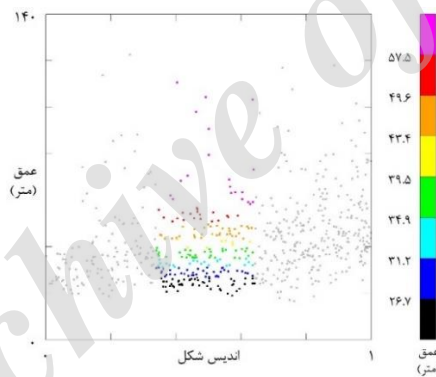
۲.۵. نتایج گرادیان کلی

عمقی حذف شده را پس از اعمال معیار SHI به رنگ خاکستری نشان می‌دهد. شکل ۱۵-پ نتایج تخمین عمق را پس از اعمال معیار SHI نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود تخمین عمق‌ها به مقدار عمق به دست آمده از مطالعات قبلی (جدول ۲) نزدیک است و با توابع ویژه مدل خاص تطابق خوبی دارد.

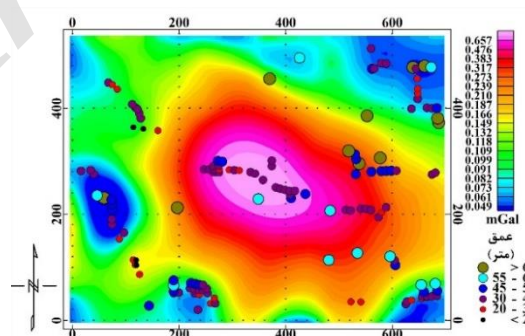
نتایج تخمین عمق برای این تابع ویژه با فرض اندیس ساختاری ۰/۷ در شکل ۱۵-الف نشان داده شده است. برای هموارسازی داده‌ها برای محاسبه مشتقات مورد نیاز فیلتر ادامه فراسو به فاصله ارتفاعی ۲۰ متر بر داده‌ها اعمال شده است. شکل ۱۵-ب اندیس شکل را به عنوان تابعی از عمق نشان می‌دهد. این شکل نقاط



(الف)

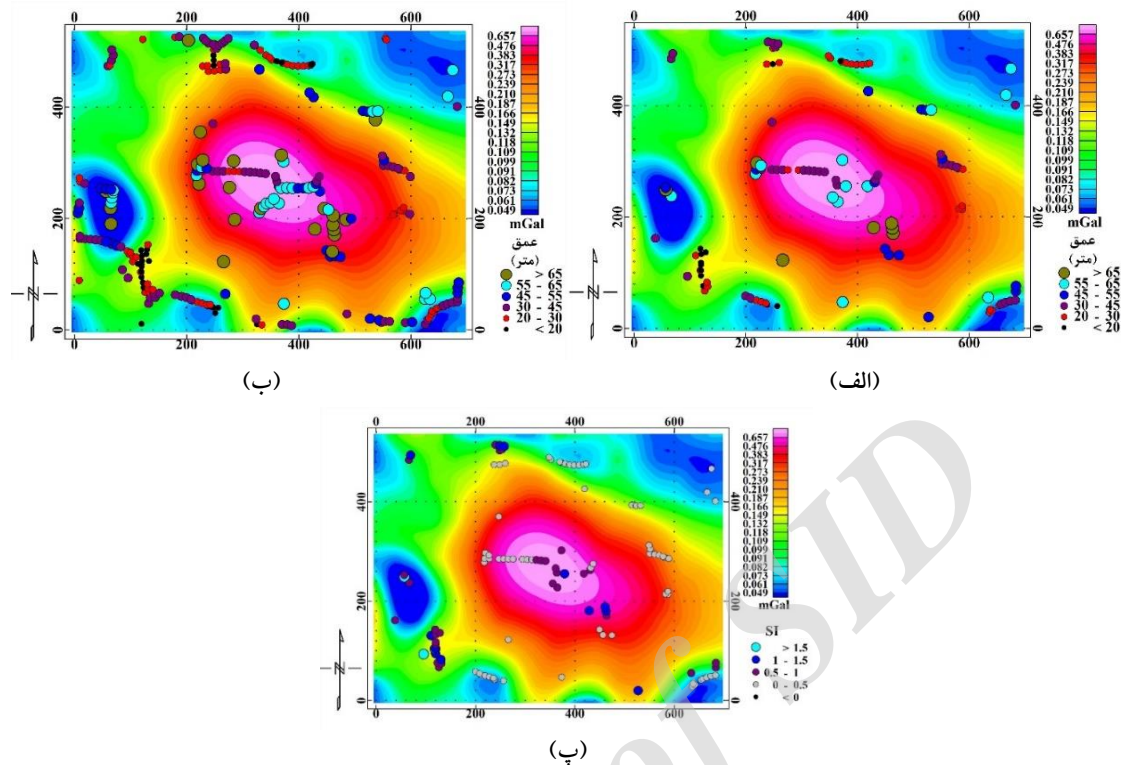


(ب)



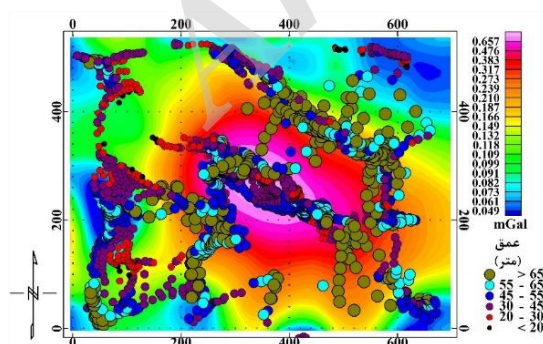
(پ)

شکل ۱۵. نتایج گرادیان کلی برای آنومالی شکل ۱۳. (الف) تخمین عمق‌های روش انحنا با فرض اندیس ساختاری ۰/۷. (ب) اندیس شکل (SHI) به عنوان تابعی از تخمین عمق؛ نقاط خاکستری نقاط حذف شده از تخمین عمق با معیار SHI هستند. (پ) تخمین عمق‌های قسمت الف پس از اعمال شرط قسمت ب و حذف فاصله فراسو؛ تصویر پس زمینه نقشه آنومالی باقیمانده گرانی پس از ادامه فراسو به اندازه ۲۰ متر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. نتایج عدد موج محلی برای آنومالی شکل ۱۳؛ (الف) تخمین عمق‌های محاسبه‌شده از عدد موج محلی. (ب) تخمین عمق‌های محاسبه‌شده از عدد موج محلی پس از اعمال معیار SHI. این شکل مقدار اندیس ساختاری را بر روی آنومالی تقریباً ۰/۷ نشان می‌دهد. تصویر پس‌زمینه نقشه آنومالی باقیمانده گرانی پس از ادامه فراسو به اندازه ۲۰ متر را نشان می‌دهد.

فرض اندیس ساختاری ۰/۷ را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که عمق‌های برآوردی از روش اوپلر تطابق خوبی با عمق‌های برآوردی از روش انحنا و در نتیجه مقدار عمق بالایی به دست آمده از مطالعات قبلی (جدول ۲) دارد.



شکل ۱۷. تخمین عمق‌های روش اوپلر با فرض اندیس ساختاری ۰/۷، تصویر پس‌زمینه نقشه آنومالی باقیمانده گرانی پس از ادامه فراسو به اندازه ۲۰ متر را نشان می‌دهد.

۵.۳. نتایج عدد موج محلی

این تابع ویژه نیز همانند گرادیان کلی به علت حساسیت به سطح نویز، به اعمال فیلتر برای هموارسازی داده‌ها نیاز دارد. نتایج تخمین عمق در شکل ۱۶-الف نشان داده شده است و شکل ۱۶-ب تخمین عمق را پس از اعمال معیار SHI نمایش می‌دهد. نتایج به دست آمده از این تابع به نتایج توابع ویژه مدل خاص و گرادیان کلی بسیار نزدیک است. شکل ۱۶-پ اندیس ساختاری محاسبه‌شده از عدد موج محلی را پس از اعمال شرط SHI نشان می‌دهد. این تابع ویژه، اندیس ساختاری را بر روی آنومالی با مقدار تقریبی ۰/۷ تخمین می‌زند.

۵.۴. مقایسه نتایج تخمین عمق از روش انحنا با روش اوپلر
شکل ۱۷ تخمین عمق‌های به دست آمده از روش اوپلر با

جدول ۳. نتایج تخمین عمق به دست آمده از روش های انحنا و اوپلر برای مدل مصنوعی و داده های واقعی این تحقیق.

مدل واقعی بالا-پایین مدل (متر)	محدوده عمقی به دست آمده از روش انحنا بر روی چشمه (متر)			محدوده عمقی به دست آمده از روش اوپلر بر روی چشمه (متر)	مدل	
	مدل خاص	گرادیان کلی	عدد موج محلی		مدل مصنوعی	مدل واقعی
۹۰۰-۱۱۰۰	۹۸۰-۱۱۵۰	۹۸۰-۱۱۰۰	۹۹۰-۱۱۰۰	۹۸۰-۱۱۵۰	مدل استوانه افقی	مدل
۱۰-۲۰	۱۵-۱۷	۱۶-۱۸	-	۱۲-۱۸	مکعب	مدل مصنوعی
۳۰-۱۸۷ (بر گرفته از جدول ۲)	۳۰-۴۵	۳۵-۴۰	۳۵-۴۰	۳۰-۴۰		مدل واقعی

۶. نتیجه گیری

استفاده از تابع ویژه عدد موج محلی، عمق و پس از آن اندیس ساختاری محاسبه شد و اندیس ساختاری به دست آمده به عنوان ورودی تابع ویژه گرادیان کلی به کار گرفته شد. سرانجام این روش بر روی داده های گرانی معدن سولفیدی موبرون واقع در کانادا آزمایش شد که با نتایج روش دیگر اعمال شده مطابقت خوبی را نشان داد. این نتایج در جدول ۳ نمایش داده شده است.

مراجع

- Abbas, M. A., Fedi, M. and Florio, G., 2014, Improving the local wavenumber method by automatic DEXP transformation, *Journal of Applied Geophysics*, 111, 250-255.
- Barraud, J., 2013, Improving identification of valid depth estimates from gravity gradient data using curvature and geometry analysis, *First break*, 31(4).
- Beiki, M., 2010, Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location, *Geophysics*, 75(6), I59-I74.
- Beiki, M. and Pedersen, L. B., 2010, Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies, *Geophysics*, 75(6), I37-I49.
- Cordell, L. and Grauch, V., 1982, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, 1982 SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists.
- Essa, K. S., 2012, A fast interpretation method for inverse modeling of residual gravity anomalies caused by simple geometry, *Journal of Geological Research* 2012.
- Grant, F. S. and West, G. F., 1965, Interpretation theory in applied geophysics, McGraw-Hill Book.

در این مقاله توابع ویژه آنومالی های میدان پتانسیل که بر روی انواع مختلفی از منابع ایزوله دارای پیک است، بررسی گردید. این توابع ویژه دارای یک فرم ریاضیاتی معمول است که این امکان را فراهم می کند تا از دامنه و انحنا توابع ویژه بر روی چشمه، مکان، عمق و اندیس ساختاری چشمه را تخمین بزنیم. به علت اینکه انحنا از مشتق دوم توابع محاسبه می شود، اعمال فیلتر برای دستیابی به نتایج بهتر بر روی داده ها ضروری است. توابع ویژه به دودسته مدل خاص و مستقل از مدل تقسیم بندی و نشان داده شد که چگونه در یک پنجره ۳*۳ می توان مکان پیک ها و برآمدگی های توابع ویژه را تعیین کرد و از مقدار پیک و انحنا محلی در پیک، مکان چشمه و اندیس ساختاری را به دست آورد.

کیفیت پاسخ های به دست آمده می تواند با اعمال آستانه هایی بر روی اندیس شکل، فاکتور هندسی یا عمق تخمینی ارزیابی شود. معیارهای اندیس شکل و فاکتور هندسی می توانند اثری شدید بر روی تعداد تخمین عمق های معتبر داشته باشد. گرچه این روش کاهش محتوای اطلاعاتی به نظر می رسد، با این حال راهی مؤثر برای افزایش اعتماد مفسر به تفسیر درست است. این روش بر روی داده های مصنوعی استوانه افقی متناهی و منشور با لبه های قائم اعمال شد و با استفاده از هر سه تابع ویژه پارامترهای اندیس ساختاری و عمق به دست آمد. در مدل منشوری رویکرد متفاوتی دنبال شده است. در این مدل با

- Hansen, R. and Deridder, E., 2006, Linear feature analysis for aeromagnetic data, *Geophysics* 71(6), L61-L67.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation." *Geophysics*, 37(3), 507-517.
- Phillips, J. D., Hansen, R., O. and Blakely, R., J., 2007, The use of curvature in potential-field interpretation, *Exploration Geophysics*, 38(2), 111-119.
- Pilkington, M. and Keating, P., 2005, The relationship between local wavenumber and analytic signal in magnetic interpretation, *Geophysics*, 71(1), L1-L3.
- Roberts, A., 2001, Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons, *First break*, 19(2), 85-100.
- Roest, W. R. and Pilkington, M., 1993, Identifying remanent magnetization effects in magnetic data, *Geophysics*, 58(5), 653-659.
- Roest, W. R., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57(1), 116-125.
- Roy, L., Agarwal, B. N. P. and Shaw, R. K., 2000, A new concept in Euler deconvolution of isolated gravity anomalies, *Geophysical prospecting*, 48(3), 559-575.
- Salem, A., Ravat, D., Smith, R. S. and Ushijima, K., 2005, Interpretation of magnetic data using an enhanced local wavenumber (ELW) method, *Geophysics*, 70(2), L7-L12.
- Smith, R. S., Thurston, J. B., Dai, T. and MacLeod, I. N., 1998, iSPI TM—The improved source parameter imaging method, *Geophysical Prospecting*, 46(2), 141-151.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 1990, *Applied geophysics*, Cambridge university press.
- Thompson, D., 1982, EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, 47(1), 31-37.
- Thurston, J. B. and Smith, R. S., 1997, Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method, *Geophysics*, 62(3), 807-813.

Archive of SID

Improvement of depth and structural index estimations of potential field sources using curvature attributes

Barazesh, M.¹ and Motavalli-Anbaran, S. H.^{2*}

1. M.Sc. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 16 Aug 2015, Accepted: 14 Jun 2016)

Summary

Interpretation of potential field data generally is quantitative or qualitative. An important factor in the issue of interpretation is how much interpreter is confident on data that provides the information needed to achieve the objectives of the study. Reliance on interpretation can be increased by the use of effective methods for parameters determination of causative sources. Although do most methods do not require knowing the density or susceptibility contrast, but these methods are based on the assumption that the source is a certain type (horizontal slab, vertical dykes, etc.) and two-dimensional. By selecting the wrong type of source, large errors may occur. Despite all these problems, numerous automatic techniques are designed that can be applied over the magnetic or gravity anomalies to quickly estimate the depth of the sources. Curvature method is used to analyze and interpret the potential field anomalies. Potential field anomalies can be transformed into special functions that formed peaks and ridges over isolated sources. All of these special functions have a mathematical form over sources that lead to a common equation, to estimate the depth of the source from the peak value and curvature at the peak. Curvature attributes that are used in this case are mostly negative curvatures. Special functions are divided into two categories: Model-specific special functions and Model-independent special functions. Model-specific special functions are usually calculated from a transformed potential field for locating the specific sources such as a vertical magnetic contact, vertical density contact, etc. The horizontal gradient magnitude (HGM) and observed potential field (absolute value) are two types of model-specific special functions that forms ridges over specific sources. Model-independent special functions are used to calculate locations of various types of sources from the observational or modified potential field. Total gradient (TG), also called the analytic signal, and local wavenumber (LW) fall into this group. Usually, special functions need that the potential field undergoes a transformation, such as reduction-to-pole and vertical derivative. For gridded data, eigenvalues of the curvature matrix associated with quadratic surface is fitted to a special function within 3×3 window, to locate and estimate the depth of sources. Another curvature attributes is shape index that quantitatively stated the local shape in terms of bowl, valley, flat, ridge and dome. Shape index attribute (SHI) and geometry factor provide a way to easily reject some of invalid estimations. In this study, method of curvature attributes has been applied on noisy and noise free synthetic data using Model-specific (HGM and absolute value) and Model-independent special functions (Total gradient and local wavenumber). Finally, this method was tested on real data from Mobern massive sulfide ore of Canada using special functions of two models and a structural index (SI) from local wavenumber special function for a mine was estimated. The results of estimating the depth by this method had a good match with the results of the boreholes. Finally, the depth results of this method were compared with Euler deconvolution method, which shows that the method of using curvature attributes is more accurate in depth estimation.

Keywords: Potential field, Curvature, Special function, Quadratic surface, Depth estimation.

*Corresponding author:

motavalli@ut.ac.ir