فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحهٔ ۷۱-۸۶

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

محمد برازش[1] و سید هانی متولی عنبران[2*]

۱.دانشجوی کارشناسی ارشد، مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ، ایران
۲. استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسهٔ 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 نقطهٔ مشخص خواهیم داشت. مناسب‌ترین انحناها آن‌هایی هستند که که از تقاطع یک صفحهٔ 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 برروی منابع وابسته به مقدار تباین خصوصیت فیزیکی موردنظر دارای بیشینه هستند. آنومالی‌ها را می‌توان با یک رابطهٔ 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 ویژهٔ وابسته به مدلی خاص و مستقل از مدل نامیده می‌شوند. ابتدا توابع ویژه از میدان پتانسیل تبدیل‌یافته محاسبه می‌شوند و با استفاده از انحنای سطح این توابع ویژه، می‌توان مکان و نوع چشمه را تخمین زد. روش آنالیز تخمین عمق با استفاده از نشانگرهای انحنا بر روی‌داده‌های مصنوعی بدون نوفه و همراه با نوفه به‌کاربرده شد. در نهایت این روش بر روی‌داده‌های 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 درجهٔ دوم، میدان پتانسیل.

۱. مقدمه

تکنیک‌های خودکار زیادی طراحی‌شده است که می‌تواند در تمام آنومالی‌های مغناطیسی و گرانی به‌منظور برآورد سریع عمق، بر روی‌داده‌های شبکه‌ای و پروفیلی اعمال شود. سالم و همکاران (۲۰۰۵) با حل یک رابطهٔ 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 رابطهٔ همگن اویلر صدق می‌کنند و می‌توان به‌صورت هم‌زمان نوع چشمه و مکان آن را برای یک پنجره با ابعاد مشخص به دست آورد. احمد عباس و فدی (۲۰۱۴) با تعریف یک تابع مقیاس از کسر دو مشتق جزئی میدان از 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 انحنای توابع ویژهٔ متقارنی بررسی می‌گردد که بر روی چشمه‌های آنومالی دارای ماکزیمم است. این توابع ویژه توسط فیلیپس و همکاران (۲۰۰۷) به دودستهٔ وابسته به مدلی خاص و مستقل از مدل تقسیم شد. توابع ویژهٔ وابسته به مدلی خاص، نظیر بزرگی گرادیان افقی (HGM) (کوردل و گراوچ، ۱۹۸۲؛ روئست و پیلکینگتون، ۱۹۹۳) و مقدار مطلق میدان، برای تعیین مکان برخی منابع خاص که نوع چشمه از قبل مشخص است، استفاده می‌شود و از داده‌های گرانی، شبه‌گرانی و داده‌های مغناطیسی برگردان به قطب شده، قابل‌محاسبه است. توابع ویژهٔ مستقل از مدل

*نگارنده رابط: E-mail: motavalli@ut.ac.ir

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

برای به‌دست‌آوردن مکان چشمه، ابتدا در یک پنجرهٔ ۳*۳ یک سطح درجهٔ دوم به تابع ویژهٔ موردنظر برازش می‌شود که با استفاده از ضرایب این سطح می‌توان مکان و بزرگی قلهٔ تابع را به دست آورد. علاوه بر تعیین مکان و بزرگی قلهٔ تابع، با استفاده از منفی‌ترین انحنای سطح درجهٔ دوم (روبرتس، ۲۰۰۱) می‌توان عمق و اندیس ساختاری را تخمین‌زد. تابع ویژهٔ عدد موج محلی این امکان را فراهم می‌کند تا بتوانیم اندیس ساختاری را نیز از عمق محاسبه‌شده برای چشمه به دست آوریم. نشانگر اندیس شکل (SHI) به‌عنوان 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 به‌منظور حذف تخمین‌های نادرست اندیس ساختاری نیز بررسی شده است.

۲. روش پژوهش

ایدهٔ 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 رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$S(x,y,z)=\frac{\alpha}{(X^2+Y^2+Z^2)^{\beta}}, \qquad (۱)$$

متغیرهای بالا به‌صورت 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 نقطهٔ 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 اتعریف می‌شود (روبرتس، ۲۰۰۱)؛ بنابراین، برای داده‌های شبکه‌ای عمق Z، با استفاده از رابطهٔ انحنا و به دست آوردن مشتق‌های لازم و یک‌سری ساده‌سازی‌های ریاضیاتی برحسب مقدار و انحنای تابع ویژهٔ $S(x,y,z)$ در مکان پیک، با رابطهٔ (۲) بیان می‌شود:

$$Z=\sqrt{-\frac{2\beta S(x_0,y_0,z)}{K_{neg}(x_0,y_0,z)}}, \qquad (۲)$$

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

۲. ۱. توابع ویژهٔ یک مدل خاص

توابع ویژهٔ یک مدل خاص، از بزرگی گرادیان افقی (HGM - Horizontal Gradient Magnitude) (رابطهٔ ۳)، میدان و یا مقدار مطلق یک نوع تبدیل‌یافتهٔ میدان پتانسیل‌مشاهده‌ای P محاسبه می‌شود.

$$HGM(x,y)=\sqrt{(\frac{\partial P}{\partial x})^2+(\frac{\partial P}{\partial y})^2}, \qquad (۳)$$

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

۲. ۲. توابع ویژهٔ مستقل از مدل

این نوع توابع ویژه بر روی چشمه‌های دوبعدی به فرم رابطهٔ (۱) است و از میدان پتانسیل مشاهده‌ای یا شکل تغییریافتهٔ میدان قابل‌محاسبه است. این توابع قابل‌تعمیم به سه بعد است که دو نمونه از این توابع در ادامه ارائه می‌گردد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

۲. ۳. گرادیان کلی (TG - Total Gradient)

گرادیان کلی (TG) به‌صورت رابطهٔ (۴) تعریف می‌شود (نبیغیان، ۱۹۷۲؛ فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$TG(x,y)=\sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^2}, \qquad (۴)$$

به‌منظور تخمین عمق با استفاده از رابطهٔ (۲)، ضروری است که یک اندیس ساختاری فرض کنیم ($SI_{assumed}$) و β را با رابطهٔ $\beta=(SI_{assumed}+1)/2$ 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 مرتبهٔ انتگرال، یک عدد صحیح یا کسری است (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸؛ پیلکینگتون و کیتینگ، ۲۰۰۵؛ فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

۲. ۴. عدد موج محلی (LW - Local Wavenumber)

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

$$LW(x,y)=\frac{\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial z}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial^2 P}{\partial y\partial z}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\frac{\partial P}{\partial z}}{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^2} \qquad (۵)$$

عدد موج محلی یک میدان پتانسیل که به‌وسیلهٔ چشمهٔ ایزولهٔ دوبعدی در (h_0,z_0) تولیدشده، به‌صورت رابطه (۶) است:

$$LW(h)=\frac{-(SI+1)Z}{H^2+Z^2} \qquad (۶)$$

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

$$LW(h)=\frac{-(SI-VI+1)Z}{H^2+Z^2} \qquad (۷)$$

که $H=h-h_0$ و محور h در جهت عمود بر امتداد چشمهٔ دوبعدی در نظر گرفته شده است. بنابراین در روابط (۶) و (۷) به ترتیب $\alpha=-(SI+1)Z$ و $\alpha=-(SI-VI+1)Z$ و در هردو رابطه، $\beta=۱$ است.

برای تخمین عمق از عدد موج محلی ضرورتی ندارد یک اندیس ساختاری فرض کنیم. زمانی که عمق تخمین زده شد، می‌توان با استفاده از روابط (۶) و (۷) اندیس ساختاری را برحسب عمق و مقدار پیک به دست آورد (روابط ۸ و ۹):

$$SI_{est}=-LW(h_0)\,Z_{est}-1 \qquad (۸)$$

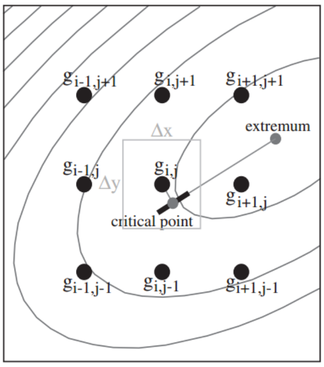
$$SI_{est}=-LW(h_0)\,Z_{est}+VI-1 \qquad (۹)$$

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

۲. ۵. تعیین مکان قلهٔ برآمدگی با استفاده از انحنا

در این بخش چگونگی استفاده از نشانگرهای انحنا برای تعیین بیشینه یا کمینه و جهت‌گیری سطحی که به یک تابع شبکه‌ای g(x,y) برازش شده است، بیان می‌گردد. هانسن و دریدر (۲۰۰۶) روشی مبتنی بر عبور یک پنجرهٔ ۳*۳ بر روی شبکه داده و تعیین مکان هر نقطهٔ بحرانی مناسب نزدیک مرکز پنجره را معرفی کرده‌اند. اولین گام این است که درون هر پنجره، ضرایب سطح درجهٔ دوم (رابطهٔ ۱۰) عبوری از ۹ نقطهٔ پنجره تعیین گردد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\begin{aligned}&A+Bx+Cy+Dx^2\\&+Exy+Fy^2\approx g(x,y),\end{aligned} \qquad (۱۰)$$



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

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

$$\begin{aligned}
A &= \frac{1}{9}[5g_{i,j} + 2(g_{i+1,j} + g_{i-1,j} + g_{i,j+1} + g_{i,j-1}) \\
&\quad -(g_{i+1,j+1} + g_{i+1,j-1} + g_{i-1,j+1} + g_{i-1,j-1})] \\
B &= \frac{1}{6\Delta x}[g_{i+1,j+1} + g_{i+1,j} + g_{i+1,j-1} \\
&\quad -(g_{i-1,j+1} + g_{i-1,j} + g_{i-1,j-1})] \\
C &= \frac{1}{6\Delta y}[g_{i+1,j+1} + g_{i,j+1} + g_{i-1,j+1} \\
&\quad -(g_{i+1,j-1} + g_{i,j-1} + g_{i-1,j-1})] \\
D &= \frac{1}{6(\Delta x)^2}[g_{i+1,j+1} + g_{i+1,j} + g_{i+1,j-1} + g_{i-1,j+1} \\
&\quad + g_{i-1,j} + g_{i-1,j-1} - 2(g_{i,j+1} + g_{i,j} + g_{i,j-1})] \\
E &= \frac{1}{4\Delta x\Delta y}[g_{i+1,j+1} + g_{i-1,j-1} - g_{i+1,j-1} - g_{i-1,j+1}] \\
F &= \frac{1}{6(\Delta y)^2}[g_{i+1,j+1} + g_{i,j+1} + g_{i+1,j-1} + g_{i-1,j+1} \\
&\quad + g_{i+1,j-1} + g_{i,j-1} + g_{i-1,j-1} - 2(g_{i+1,j} + g_{i,j} + g_{i-1,j})]
\end{aligned} \tag{۱۱}$$

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

$$\begin{aligned}
x_e &= \frac{2FB - CE}{E^2 - 4DE} \\
y_e &= \frac{2CD - BE}{E^2 - 4DE},
\end{aligned} \tag{۱۲}$$

ماتریس انحنا برحسب مشتقات مرتبهٔ دوم میدان و برای یک سطح درجهٔ دوم با رابطهٔ (۱۳) تعریف می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\partial^2 g}{\partial x^2} & \dfrac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} \\ \dfrac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} & \dfrac{\partial^2 g}{\partial y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2D & E \\ E & 2F \end{pmatrix}, \tag{۱۳}$$

ویژه مقادیر ماتریس بالا توسط روابط (۱۴) داده‌شده‌اند:

$$\begin{aligned}
K_{pos} &= D + F + \sqrt{(D-F)^2 + E^2} \\
K_{neg} &= D + F - \sqrt{(D-F)^2 + E^2},
\end{aligned} \tag{۱۴}$$

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

ویژه مقادیر ماتریس انحنا، انحناهای اصلی سطح درجهٔ دوم را ارائه می‌کند. اگر هردو ویژه‌مقدار منفی باشند، اکسترمم سطح ماکزیمم است و اگر هر دو مثبت باشند، مینیمم است و اگر علامت مختلف داشته باشند، اکسترمم نقطهٔ زینی است. ویژه مقادیر همچنین می‌توانند برای تعیین ماهیت امتداد حاکم سطح درجهٔ دوم استفاده شوند. اگر دو ویژه‌مقدار برابر باشند سطح دارای امتداد حاکم نیست. اگر ویژه‌مقدار با مقدار بزرگ‌تر منفی باشد، امتداد حاکم یک برآمدگی یا تپه است و اگر ویژه‌مقدار با مقدار بزرگ‌تر مثبت باشد، امتداد حاکم تشتک مانند شبیه ظرف است (جدول ۱).

ویژه‌مقدار $K_<$ با کوچک‌ترین بزرگی (K_{pos} در مورد برآمدگی یا تپه) دارای ویژه‌بردار $e_< = (e_{<x}, e_{<y})$ است که به امتداد سطح درجهٔ دوم اشاره می‌کند. ویژه‌مقدار $K_>$ که دارای بزرگ‌ترین مقدار است (K_{neg} در مورد برآمدگی یا تپه) دارای ویژه‌مقدار $e_> = (e_{>x}, e_{>y})$ است که به جهت عمود به امتداد سطح درجهٔ دوم اشاره می‌کند. ویژه‌بردارهای ماتریس انحنا برای یک سطح درجهٔ دوم توسط رابطهٔ (۱۵) تعریف می‌شود:

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 \\ (K-2D)/E \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} (K-2F)/E \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } E \neq 0 \\ \begin{pmatrix} 1 \\ E/(K-2F) \end{pmatrix} & \text{if } K \neq 2F \\ \begin{pmatrix} E/(K-2D) \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } K \neq 2D \end{cases} \tag{۱۵}$$

هر سطح درجهٔ دومی که دارای اکسترمم ماکزیمم یا امتداد غالب در طول برآمدگی است، یک سطح مناسب برای تعیین مکان چشمه است. خط عبوری از مرکز پنجره (۰،۰) و (x_0, y_0) دارای معادلهٔ $y = (e_{>y}/e_{>x})x$ یا $x = (e_{>x}/e_{>y})y$ است. با جایگزینی این رابطه درون رابطهٔ سطح درجهٔ دوم، مشتق‌گیری و برابر با صفر قرار دادن آن، مکان نقطهٔ بحرانی به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
x_0 &= -\frac{Be_{>x}^{\ 2} + Ce_{>x}e_{>y}}{2(De_{>x}^{\ 2} + Ce_{>x}e_{>y} + Fe_{>y}^{\ 2})} \\
y_0 &= -\frac{Ce_{>y}^{\ 2} + Be_{>x}e_{>y}}{2(De_{>x}^{\ 2} + Ce_{>x}e_{>y} + Fe_{>y}^{\ 2})}
\end{aligned} \tag{۱۶}$$

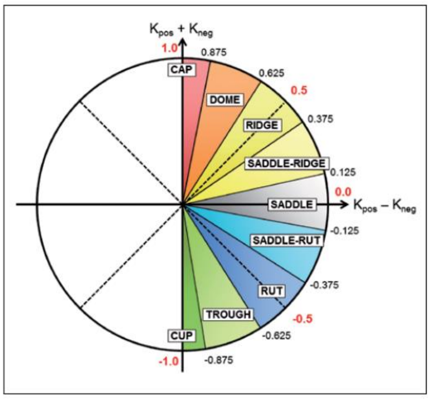
به‌منظور به‌کارگیری موفق رابطهٔ تخمین عمق دو فرض باید اعمال شود:

۱. چشمه باید دوبعدی باشد (به‌جز چشمه‌های نقطه‌ای).
۲. انحنا در جهت عمود بر امتداد با بعد بی‌نهایت محاسبه شود.

در اینجا راهی برای ارزیابی درستی این شرایط ارائه شده است. برای یک سطح درجهٔ دوم S یک سری نشانگرها به دست می‌آید که دو نمونه از آن‌ها منفی‌ترین انحنا (K_{neg}) و مثبت‌ترین انحنا (K_{pos}) است. از بزرگی K_{neg} نسبت به K_{pos} به‌منظور تعیین تقعر سطح (برآمدگی یا تشتک) استفاده شده است. به علاوه در مورد برآمدگی، K_{pos} با برداری همراه است که به جهت کشیدگی سطح درجه‌دوم اشاره می‌کند؛ بنابراین K_{neg} همراه با برداری است که به جهت عمود بر امتداد چشمه اشاره می‌کند و برای محاسبهٔ تخمین عمق در رابطهٔ (۲) مناسب است. کیفیت تخمین‌های عمق با محاسبهٔ اندیس شکل از رابطهٔ (۱۷) قابل ارزیابی است:

$$SHI = \frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left[\frac{K_{neg}+K_{pos}}{K_{neg}-K_{pos}}\right] \qquad (۱۷)$$

SHI در گسترهٔ ۱− و ۱+ قرار دارد و می‌تواند به‌صورت یک زاویه در صفحهٔ $(K_{pos}-K_{neg})\times(K_{pos}+K_{neg})$ دیده شود (شکل ۲). SHI دسته‌بندی راحتی از اشکال، از فنجان کروی ($SHI=-۱$) تا کلاهک محدب کروی ($SHI=+۱$) را فراهم می‌کند. SHI برای ارزیابی همگرایی تابع ویژهٔ S از فرم تحلیلی که شرایط دوبعدی کامل را فرض می‌کند، مناسب است. اگر سطح S به‌صورت محلی به شکل یک برآمدگی است ($SHI=+۰/۵$)، آنومالی گرانی به‌احتمال زیاد از یک چشمهٔ گسترده نشأت گرفته که می‌توان آن را از نقطهٔ مشاهده‌ای بی‌نهایت در نظر گرفت. چشمه‌های غیرایده‌آل از شکل ایده‌آل S انحراف خواهند داشت و SHI از مقدار ایده‌آل ۰/۵ واگرا می‌شود. در یک دسته‌بندی دیگر (براود، ۲۰۱۳) شکل‌هایی که SHI آن‌ها بین ۰/۳۷۵ و ۰/۶۲۵ قرار دارند، می‌توانند به‌عنوان برآمدگی در نظر گرفته شوند (شکل ۲). براود (۲۰۱۳) بازهٔ مذکور را به عنوان معیاری مناسب به منظور بررسی برقراری شرط دوبعدی برای حذف تخمین‌های نادرست عمق از توابع ویژهٔ خاص اعمال کرد. در این مقاله، این معیار برای حذف تخمین‌های نادرست اندیس ساختاری از عدد موج محلی نیز به کار رفته است.



شکل ۲. نمایش اندیس شکل (SHI) به‌عنوان یک زاویه در صفحهٔ $(K_{pos}-K_{neg})\times(K_{pos}+K_{neg})$ (براود، ۲۰۱۳)

جدول ۱. نوع اکسترمم و امتداد غالب یک سطح درجهٔ دوم؛ انواع اکسترمم از ویژه‌مقادیر ماتریس انحنا تعیین می‌شوند. اگر دو ویژه‌مقدار دارای بزرگی برابر باشند، هیچ امتداد غالبی وجود ندارد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

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

برای برخی از مدل‌ها که تعدادی از آن‌ها توسط براود (۲۰۱۳) معرفی‌شده است، توابع ویژهٔ مدل خاص با رابطهٔ (۱۸) تعریف می‌شوند:

$$S(x,y,z)=\frac{\alpha Z}{X^2+Y^2+Z^2} \tag{۱۸}$$

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

$$\alpha = Z\times S(x_0,y_0,z) \tag{۱۹}$$

با مقایسهٔ مقدار محاسبه‌شده 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 (براود، ۲۰۱۳).

در زیر الگوریتمی برای به دست آوردن مکان چشمه‌ها با اعمال روش توصیف‌شده در بالا ارائه‌شده است:

- به یک پنجرهٔ ۳*۳ از داده‌های تابع ویژه با مبدأ در مرکز آن‌یک سطح درجهٔ دوم برازش می‌کنیم و از معادلهٔ ۱۱ ضرایب آن را می‌یابیم (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

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

- اگر سطح دارای ماکزیمم است، مکان آن را از رابطهٔ ۱۲ محاسبه می‌کنیم و اگر این ماکزیمم در طول برآمدگی قرار داشته باشد مقدار نقطهٔ بحرانی را نیز از رابطهٔ (۱۶) به دست می‌آوریم. اگر ماکزیمم یا نقطهٔ بحرانی نزدیک مرکز پنجره نباشد، پنجره را حرکت می‌دهیم و برای پنجرهٔ جدید عملیات بالا را انجام می‌دهیم، در غیر این صورت با استفاده از ضرایب به‌دست‌آمده از سطح درجهٔ دوم بزرگی تابع ویژه را در آن نقطه (ماکزیمم یا نقطهٔ بحرانی) می‌یابیم (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

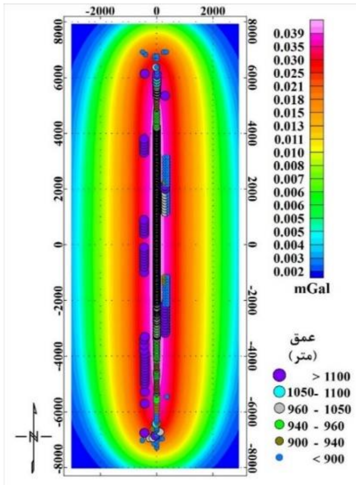
- با استفاده از بزرگی تابع ویژه، فرض اندیس ساختاری در صورت نیاز و منفی‌ترین انحنای سطح درجهٔ دوم عمق را از رابطهٔ ۲ به دست می‌آوریم. برای حذف تخمین‌های نادرست عمق از رابطهٔ (۱۷) استفاده کرده و از مقادیر عمقی خارج از بازهٔ $۰/۶۲۵ \le SHI \le ۰/۳۷۵$ صرف‌نظر می‌کنیم. این معیار را بر روی اندیس ساختاری به‌دست‌آمده از عدد موج محلی نیز اعمال می‌کنیم. با معلوم بودن چشمه، فاکتور هندسی (رابطهٔ ۱۹) می‌تواند معیار دیگری برای حذف تخمین‌های نادرست با توجه به مقادیر مجاز به‌دست‌آمده از اطلاعات زمین‌شناسی باشد.

۳. اعمال روش روی دادهٔ مصنوعی بدون نوفه

این روش در این مقاله ابتدا به داده‌های گرانی مصنوعی بدون نوفهٔ تولیدشده توسط یک استوانهٔ افقی با طول متناهی (۱۴ کیلومتر از ۷۰۰۰– تا ۷۰۰۰ متر) موازی با محور y اعمال‌شده است. این مثال، آزمایشی برای برقراری شرط دوبعدی با معیارهای اندیس شکل و فاکتور هندسی است. مؤلفهٔ قائم میدان گرانی با رابطهٔ (۲۰) داده‌شده است (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰):

$$g_z=-\frac{\alpha}{2}(z-z_0)\frac{\frac{y-y_1}{r_1}-\frac{y-y_2}{r_2}}{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2} \tag{۲۰}$$

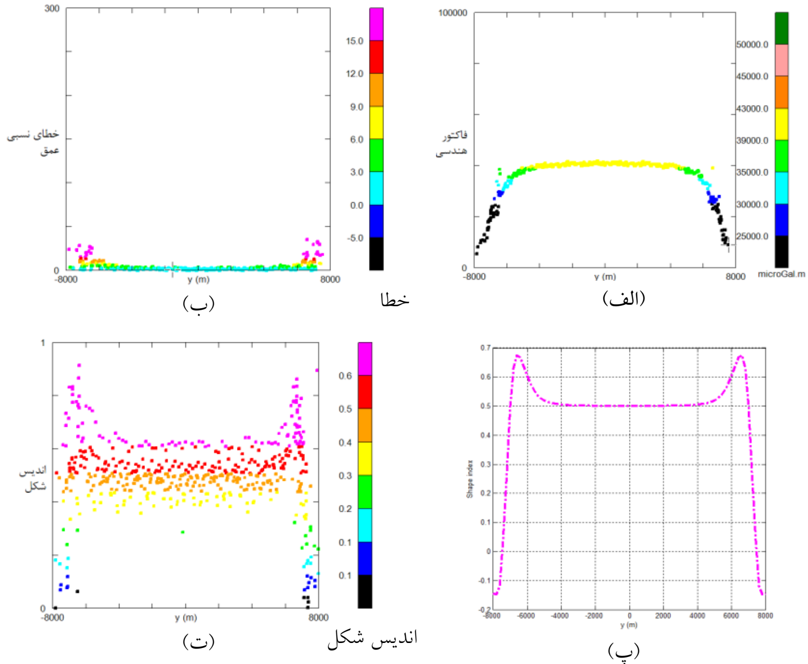
که y_1 و y_2 مختصات دو انتهای استوانه و $r_i=\left[(x-x_0)^2+(y-y_i)^2+(z-z_0)^2\right]^{1/2}, i=1,2$ است. تخمین عمق همان‌طور که در بالا بیان شد، برای تابع ویژهٔ مدل خاص (در اینجا مقدار مطلق میدان) با فرض مدل استوانهٔ افقی نامتناهی ($\beta=۱$) محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نقاطی که در آن تخمین عمق انجام گرفته است، مستقیماً روی محور استوانه و در جهت امتداد آنومالی قرار دارند؛ به‌جز نقاط انتهایی که تعداد زیادی از نقاط، اطراف انتهای خمیدهٔ آنومالی پخش‌شده‌اند.



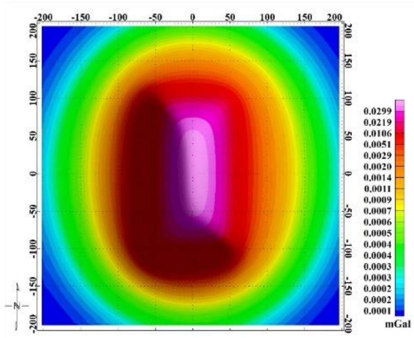
شکل ۳. تخمین عمق‌های یک استوانهٔ افقی با طول متناهی (۱۴ کیلومتر) و شعاع ۱۰۰ متر با استفاده از توابع ویژهٔ یک مدل خاص که در عمق ۱ کیلومتری زیر نقاط مشاهده‌ای قرار دارد. تباین چگالی جرمی $+100 Kg/m^3$ است. داده‌های پس‌زمینه مقادیر g_z را نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.

فاکتور هندسی از رابطهٔ (۱۹) محاسبه شد و در شکل ۴–الف نشان داده‌شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود فاکتور هندسی برای تمام نقاطی که با معیار SHI به‌دست‌آمده‌اند، تقریباً برابر با مقدار نظری ۴۲۰۰۰μGal.m است. با رسم خطای نسبی عمق محاسبه‌ای به‌عنوان تابعی از فاصله در طول استوانه، می‌توان تأثیرات طول متناهی را مشاهده کرد.

(شکل ۴–ب): با نزدیک‌شدن به دو انتهای استوانه خطای عمق محاسباتی شروع به افزایش می‌کند. 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 می‌کند (شکل ۴–ت). برای اطلاعات بیشتر به شکل ۲ مراجعه شود. با نزدیک‌شدن به انتهای استوانه این مقدار تا حدود ۰/۶۷ افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که شکل محلی سطح بیشتر گنبدی شکل است تا برآمدگی (Ridge). سپس SHI کاهش‌یافته و با عبور از برآمدگی به مقدار صفر (زینی‌شکل)، جایی که آنومالی ناپدید می‌شود، می‌رسد. این مثال نشان می‌دهد که نقاط نادرست را می‌توان با محدود کردن مقادیر SHI نزدیک ۰/۵ حذف کرد.

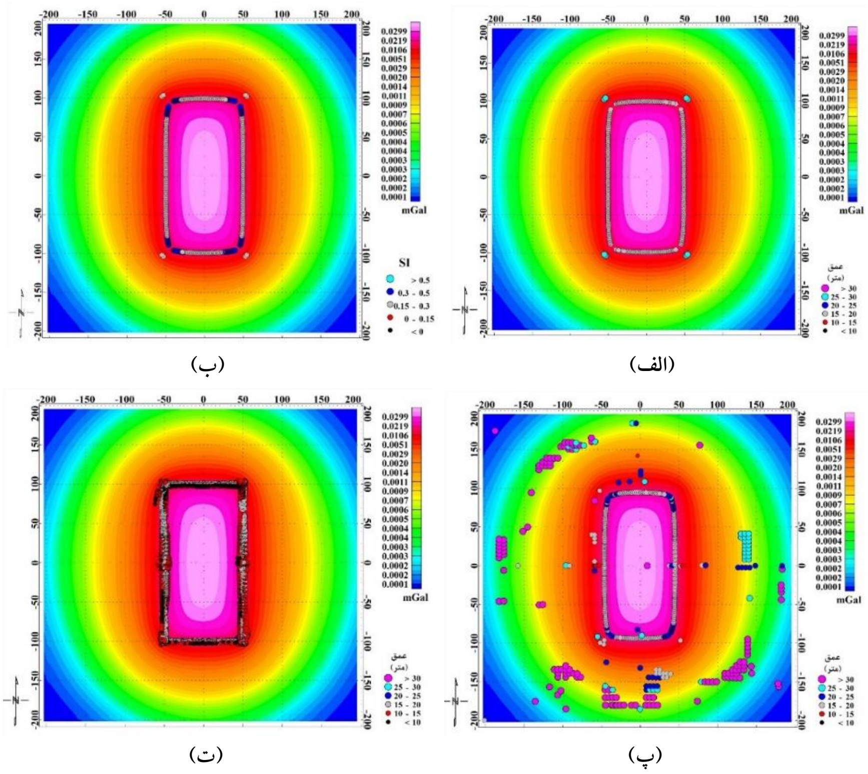


شکل ۴. (الف) فاکتور هندسی محاسبه‌شده از رابطهٔ (۱۹) برای مدل استوانه‌ای شکل ۳ در امتداد طول استوانه، **(ب)** خطای نسبی عمق محاسبه‌شده در امتداد طول استوانه، **(پ)** اندیس شکل (SHI) بر روی محور استوانه و **(ت)** اندیس شکل (SHI) محاسبه‌شده در مکانی که عمق‌ها به دست آمده‌اند.



شکل ۵. اثر گرانی منشوری در عمق ۱۰ متری با ابعاد $۱۰۰\times۲۰۰\times۱۰\,m^{۳}$ و با چگالی $۱۰۰\,{Kg}/{m^{۳}}$

این مثال همچنین نشان می‌دهد که شرط دوبعدی تا فاصلهٔ کوتاهی از انتهای آنومالی برقرار است. به‌عنوان مثال دوم روش بالا به یک مکعب در عمق ۱۰ متر به ابعاد $۱۰۰\times۲۰۰\times۱۰\,m^{۳}$ و با چگالی $۱۰۰\,{Kg}/{m^{۳}}$ اعمال شد. شکل ۵ اثر گرانی این مکعب را نشان می‌دهد. در این مثال رویکردی متفاوت از مثال اول دنبال شده است. با فرض عدم اطلاع از نوع چشمهٔ آنومالی ابتدا تابع عدد موج محلی به‌منظور 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 ویژهٔ عدد موج محلی به‌دست‌آمده است، نشان می‌دهد. اکثر عمق‌های برآوردی از این روش همانند مثال قبل در محدودهٔ وسط تا کف چشمه (۲۰–۱۵) قرار دارد. اندیس ساختاری برای این چشمهٔ آنومالی با استفاده از رابطهٔ (۸) تقریباً برابر با مقدار ۰/۲ به دست آمد (شکل ۶–ب). به‌منظور تخمین عمق از تابع ویژهٔ سیگنال تحلیلی، از مقدار اندیس ساختاری به‌دست‌آمده در بالا برای به دست آوردن مقدار β استفاده شد و سپس از رابطهٔ (۲) عمق تخمین زده شد (شکل ۶–پ). نتیجهٔ تخمین عمق با استفاده از روش رابطهٔ همگن اویلر (تامپسون، ۱۹۸۲) نیز با فرض اندیس ساختاری ۰/۲ برای مقایسه در شکل ۶–ت نمایش داده‌شده است که به‌خوبی با نتایج به‌دست‌آمده در بالا انطباق دارد.



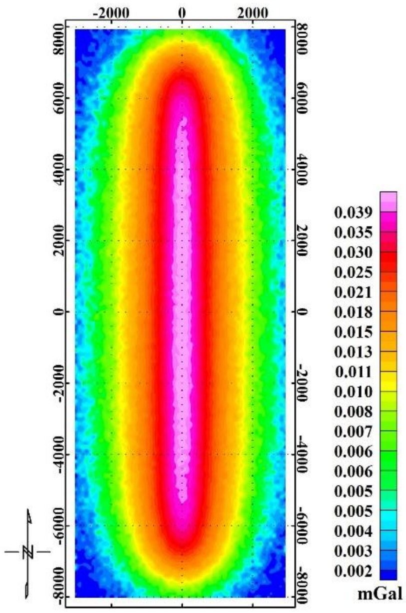
شکل ۶. (الف) نتایج تخمین عمق از تابع ویژهٔ عدد موج محلی پس از اعمال معیار SHI برای مدل مکعبی **در عمق ۱۰ متری با ابعاد** $۱۰۰\times۲۰۰\times۱۰\,m^{۳}$، (ب) نتایج تخمین اندیس ساختاری پس از اعمال معیار SHI که از رابطهٔ (۸) برآورد شده است. **(پ)** نتایج تخمین عمق با استفاده از تابع ویژهٔ سیگنال تحلیلی پس از اعمال معیار SHI با فرض اندیس ساختاری ۰/۲ که از تابع ویژهٔ عدد موج محلی به دست آمد. **(ت)** نتایج تخمین عمق از روش همگن اویلر با فرض اندیس ساختاری ۰/۲. تصویر پس‌زمینه مقادیر g_z را نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.

۴. اعمال روش روی دادهٔ مصنوعی با نوفه

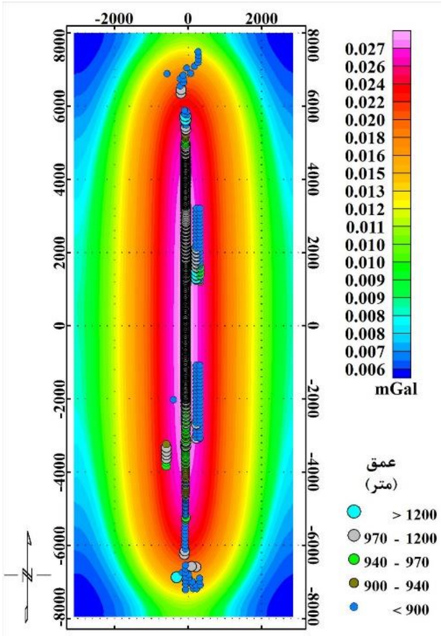
برای بررسی کارایی در مقابل اضافه‌شدن نویز، این روش به مدل استوانه‌ای نویز گاوسی نسبتاً بالا با میانگین صفر و انحراف معیار ۵۰۰ μGal اعمال شد (شکل ۷). در ادامه نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری روش انحنا برای این مدل ارائه می‌گردد.

۴. ۱. نتایج توابع ویژهٔ مدل خاص

در این مورد برای نمایش نتایج تخمین عمق، تابع ویژهٔ قدر مطلق میدان را با فرض اندیس ساختاری ۱ انتخاب می‌کنیم. ازآنجاکه نشانگرهای انحنا از مشتقات مرتبهٔ 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 فاصلهٔ ارتفاعی ۵۰۰ متر قبل از اعمال روش استفاده‌شده 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 نوفهٔ گاوسی با میانگین صفر و انحراف معیار ۵۰۰ μGal.



شکل ۸. نتیجه تخمین عمق از توابع ویژهٔ 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 بافاصلهٔ ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصلهٔ فراسو با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.

۴. ۲. نتایج گرادیان کلی

شکل ۹ نتیجهٔ تخمین عمق با استفاده از تابع ویژهٔ گرادیان کلی پس از اعمال معیار SHI را نشان می‌دهد. برای مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از گرادیان کلی با نتایج توابع ویژهٔ مدل خاص، در اینجا نیز اندیس ساختاری ۱ انتخاب‌شده 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 ویژهٔ مدل خاص بسیار نزدیک است.

۴. ۳. نتایج عدد موج محلی

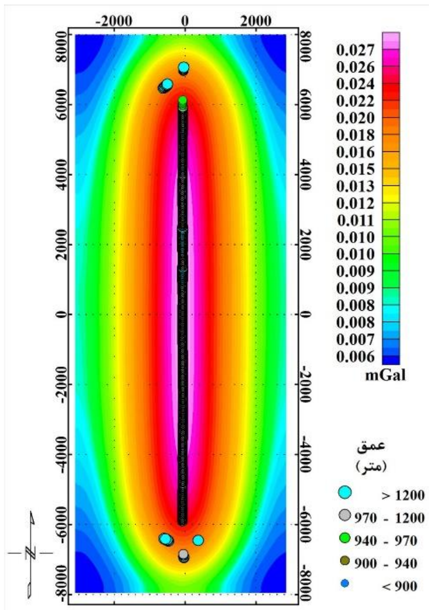
مشابه با گرادیان کلی به علت استفاده از مشتق قائم و مشتقات مرتبهٔ دوم در تابع عدد موج محلی، اعمال فیلترهای مناسب برای از بین بردن تأثیرات نوفه ضروری است. نتایج تخمین عمق به‌دست‌آمده از این تابع پس از اعمال معیار

SHI در شکل ۱۰ نشان داده‌شده است. همانند دو تابع ویژهٔ قبل نتایج با مقدار واقعی تطابق خوبی دارد.

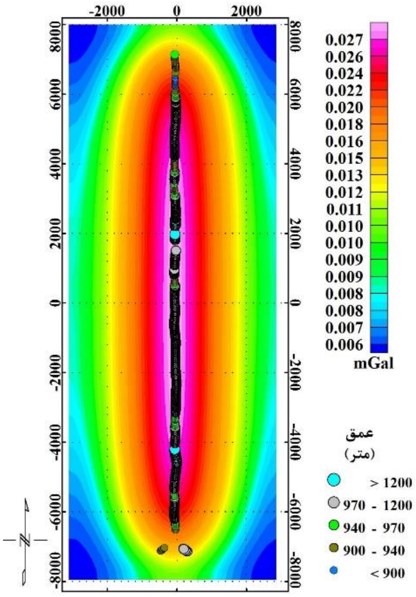
در اینجا معیار SHI به اندیس ساختاری محاسبه‌شده از رابطهٔ ۸ اعمال‌شده است (شکل ۱۱). همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده‌شده، اندیس ساختاری که از این معادله تخمین زده‌شده است تقریباً برابر با مقدار ۱/۲ است که به مقدار تئوری اندیس ساختاری برای استوانه نزدیک است و از رابطهٔ ۲۰ مشهود است.

۴. ۴. مقایسهٔ نتایج تخمین عمق از انحنا با روش اویلر

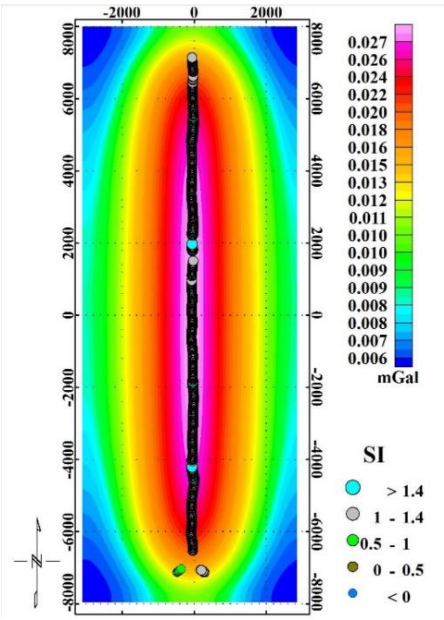
به‌منظور نمایش توانایی روش تخمین عمق از انحنا، نتایج تخمین عمق از روش اویلر با فرض اندیس ساختاری ۱ را برای مقایسه در شکل ۱۲ نشان داده‌ایم. همان‌طور که از این شکل قابل‌مشاهده است، نتایج روش انحنا با نتایج به‌دست‌آمده از روش اویلر تطابق زیادی دارد.



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 فاصلهٔ ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصلهٔ فراسو با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.



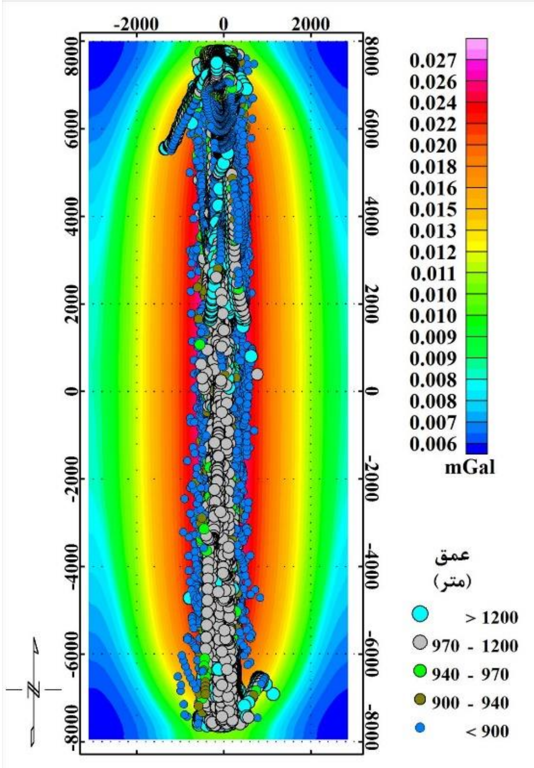
شکل ۱۰. نتیجه تخمین عمق از عدد موج محلی برای مدل مصنوعی در حضور نوفه؛ داده‌های پس‌زمینه مقادیر g_z را پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو با فاصلهٔ ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصلهٔ فراسو با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.



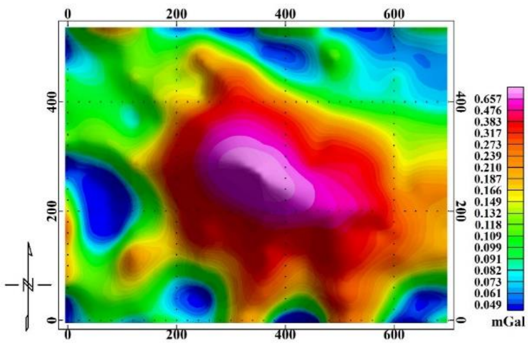
شکل ۱۱. اندیس ساختاری تخمین زده‌شده از عدد موج محلی؛ داده‌های پس‌زمینهٔ مقادیر g_z را نشان می‌دهد. اندیس‌های ساختاری با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از اندیس‌های تخمین زده‌شده رسم شده‌اند. این شکل اندیس ساختاری را برای این مدل تقریباً ۱/۲ تخمین زده است.

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)
عمق	۳۰	۲۹/۴	۳۳/۳
اندیس ساختاری	–	۰/۷۷	۰/۷۸



شکل ۱۲. نتایج تخمین عمق به‌دست‌آمده از روش اویلر بر روی‌داده‌های مصنوعی حاصل از استوانهٔ افقی در حضور نوفه؛ داده‌های پس‌زمینه مقادیر g_z را پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو بافاصلهٔ ارتفاعی ۵۰۰ متر نشان می‌دهد. تخمین عمق‌ها پس از حذف فاصلهٔ فراسو با نقاط رنگی به‌عنوان تابعی از عمق رسم شده‌اند.



شکل ۱۳. آنومالی گرانی باقیماندهٔ معدن سولفیدی موبرون

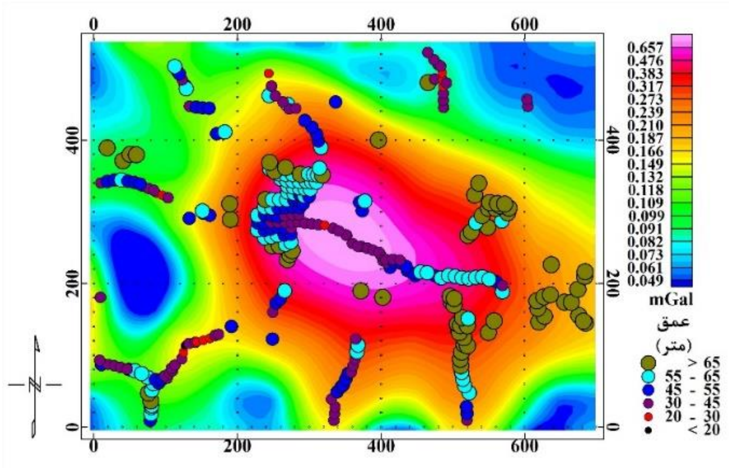
۵. اعمال روش روی‌داده‌های واقعی

شکل ۱۳ نقشهٔ آنومالی باقیماندهٔ 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 فاصلهٔ پروفیل‌ها و داده‌های روی پروفیل ۱۰ متر است. میانگین چگالی تودهٔ معدنی که از نمونه‌برداری گمانه‌ها به‌دست‌آمده است برابر g/cm^3 ۴/۶ و میانگین چگالی سنگ میزبان g/cm^3 ۲/۷ است. عمق بالایی که توسط روش ارائه‌شده در بالا به دست آمد تقریباً با نتایج به‌دست‌آمده از روی و همکاران (۲۰۰۰)، عیسی (۲۰۱۲) و اطلاعات حفاری (گرانت و وست، ۱۹۶۵) تطابق دارد (جدول ۲).

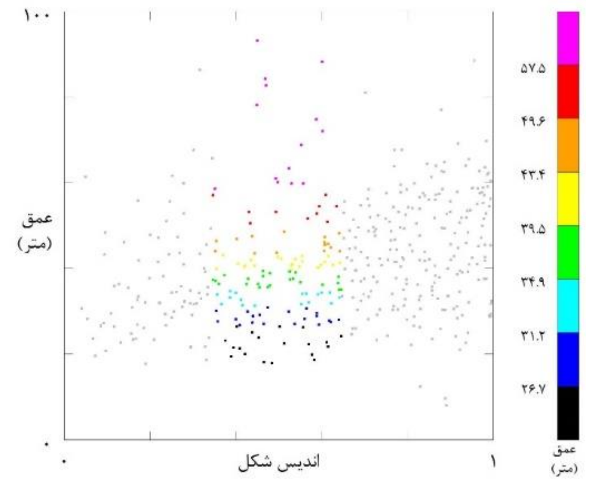
۵. ۱. نتایج توابع ویژهٔ یک مدل خاص

برای نمایش نتایج توابع ویژهٔ یک مدل خاص، مدل استوانهٔ قائم را با اندیس ساختاری ۱ انتخاب کردیم. نتایج تخمین عمق با استفاده از این مدل در شکل ۱۴–الف نشان داده‌شده 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 استفاده‌شده، مدل تقریباً مناسبی است. با محدود کردن مقادیر SHI در بازهٔ ۰/۶۲۵–۰/۳۷۵ می‌توان تعدادی از تخمین عمق‌های نادرست را حذف کرد.

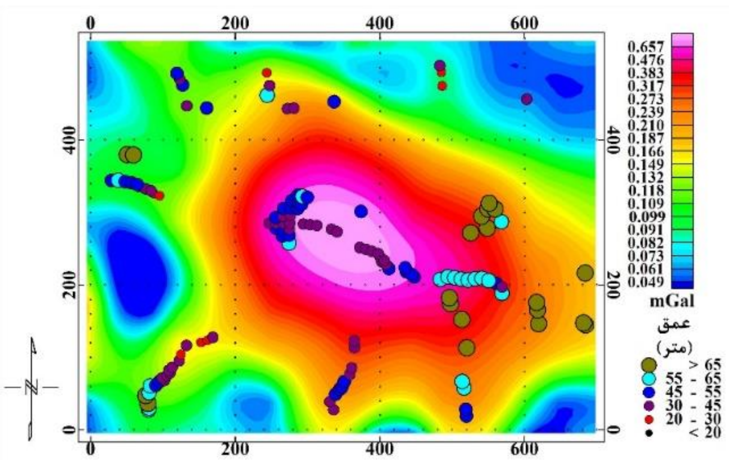
شکل ۱۴–ب نقاط حذف‌شده از تخمین عمق را به رنگ خاکستری نشان می‌دهد. شکل ۱۴–پ تخمین عمق‌ها را پس از اعمال معیار SHI نشان می‌دهد. مکان‌های تخمین عمق شده به‌خوبی در امتداد آنومالی برآورد شده است.



(الف)



(ب)

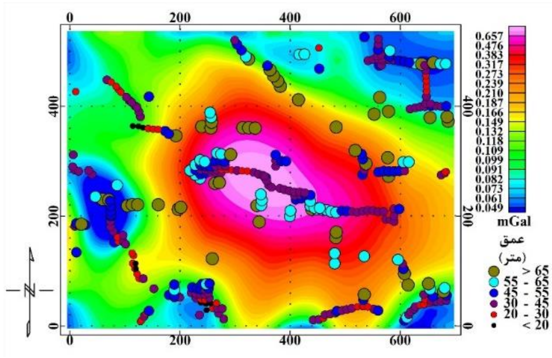


(پ)

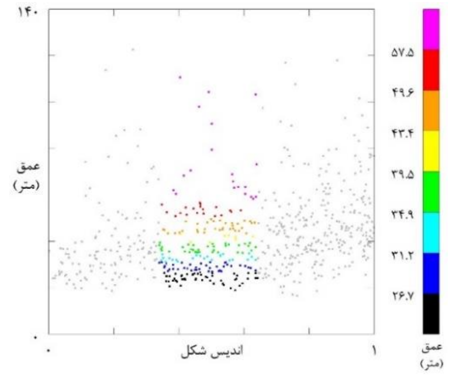
شکل ۱۴. نتایج تابع ویژهٔ یک مدل خاص برای آنومالی شکل ۱۳. (الف) تخمین عمق‌های روش انحنا با فرض مدل استوانهٔ قائم با اندیس ساختاری ۱. (ب) اندیس شکل به‌عنوان تابعی از تخمین عمق؛ نقاط خاکستری نقاط حذف‌شده از تخمین عمق با معیار SHI هستند. (پ) تخمین عمق‌های قسمت الف پس از اعمال شرط قسمت ب؛ تصویر پس‌زمینه نقشهٔ آنومالی باقیماندهٔ گرانی پس از ادامه فراسو به‌اندازهٔ ۲۰ متر را نشان می‌دهد.

۵. ۲. نتایج گرادیان کلی

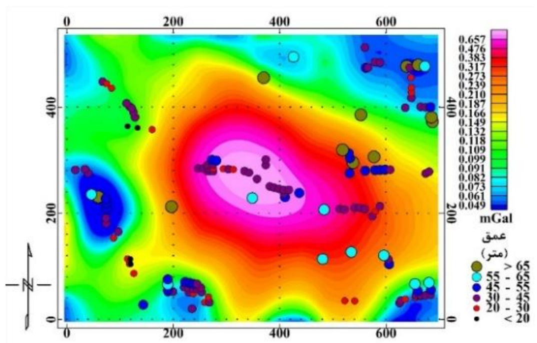
نتایج تخمین عمق برای این تابع ویژه با فرض اندیس ساختاری ۰/۷ در شکل ۱۵–الف نشان داده‌شده است. برای هموارسازی داده‌ها برای محاسبهٔ مشتقات موردنیاز فیلتر ادامه فراسو به فاصلهٔ ارتفاعی ۲۰ متر بر داده‌ها اعمال شده است. شکل ۱۵–ب اندیس شکل را به‌عنوان تابعی از عمق نشان می‌دهد. این شکل نقاط عمقی حذف‌شده را پس 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 به‌دست‌آمده از مطالعات قبلی (جدول ۲) نزدیک است و با توابع ویژهٔ مدل خاص تطابق خوبی دارد.



(الف)

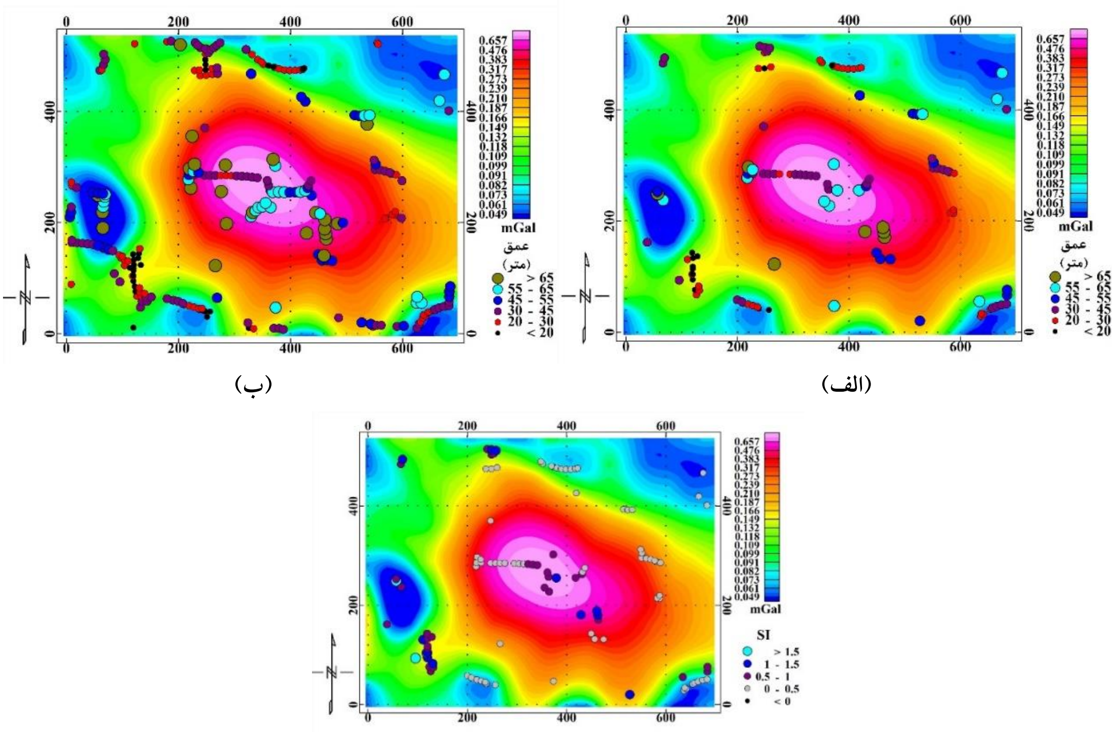


(ب)



(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) 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 و حذف فاصلهٔ فراسو؛ تصویر پس‌زمینه نقشهٔ آنومالی باقیمانده گرانی پس از ادامه فراسو به‌اندازهٔ ۲۰ متر را نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

(پ)

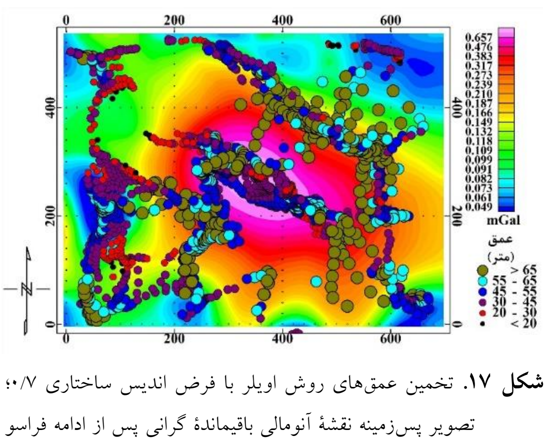
شکل ۱۶. نتایج عدد موج محلی برای آنومالی شکل ۱۳؛ (الف) تخمین عمق‌های محاسبه‌شده از عدد موج محلی. (ب) تخمین عمق‌های محاسبه‌شده از عدد موج محلی پس از اعمال معیار SHI. (پ) اندیس ساختاری محاسبه‌شده از عدد موج محلی پس از اعمال معیار SHI. این شکل مقدار اندیس ساختاری را بر روی آنومالی تقریباً ۰/۷ نشان می‌دهد. تصویر پس‌زمینه نقشهٔ آنومالی باقیماندهٔ گرانی پس از ادامه فراسو به‌اندازهٔ 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 داده‌شده است و شکل ۱۶–ب تخمین عمق را پس از اعمال معیار SHI نمایش می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از این تابع به نتایج توابع ویژهٔ 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. مقایسهٔ نتایج تخمین عمق از روش انحنا با روش اویلر

شکل ۱۷ تخمین عمق‌های به‌دست‌آمده از روش اویلر با فرض اندیس ساختاری ۰/۷ را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که عمق‌های برآوردی از روش اویلر تطابق خوبی با عمق‌های برآوردی از روش انحنا و در نتیجه مقدار عمق بالایی به‌دست‌آمده از مطالعات قبلی (جدول ۲) دارد.



شکل ۱۷. تخمین عمق‌های روش اویلر با فرض اندیس ساختاری ۰/۷؛ تصویر پس‌زمینه نقشهٔ آنومالی باقیماندهٔ گرانی پس از ادامه فراسو به‌اندازهٔ ۲۰ متر را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج تخمین عمق به‌دست‌آمده از روش‌های انحنا و اویلر برای مدل مصنوعی و داده‌های واقعی این تحقیق.

مدل		محدودهٔ عمقی به‌دست‌آمده از روش اویلر بر روی چشمه (متر)	محدودهٔ عمقی به‌دست‌آمده از روش انحنا بر روی چشمه (متر)			عمق واقعی بالا-پایین مدل (متر)
			مدل خاص	گرادیان کلی	عدد موج محلی	
مدل مصنوعی	استوانهٔ افقی	۱۱۵۰–۹۸۰	۱۱۰۰–۹۹۰	۱۱۰۰–۹۸۰	۱۱۵۰–۹۸۰	۱۱۰۰–۹۰۰
	مکعب	۱۸–۱۲	–	۱۸–۱۶	۱۷–۱۵	۲۰–۱۰
مدل واقعی		۴۰–۳۰	۴۰–۳۵	۴۰–۳۵	۴۵–۳۰	۳۰–۱۸۷ (بر گرفته از جدول ۲)

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله توابع ویژهٔ آنومالی‌های 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 می‌کند تا از دامنه و انحنای توابع ویژه بر روی چشمه، مکان، عمق و اندیس ساختاری چشمه را تخمین بزنیم. به علت اینکه انحنا از مشتق دوم توابع محاسبه می‌شود، اعمال فیلتر برای دستیابی به نتایج بهتر بر روی‌داده‌ها ضروری است. توابع ویژه به دودستهٔ مدل خاص و مستقل از مدل تقسیم‌بندی و نشان داده شد که چگونه در یک پنجرهٔ ۳*۳ می‌توان مکان پیک‌ها و برآمدگی‌های توابع ویژه را تعیین کرد و از مقدار پیک و انحنای محلی در پیک، مکان چشمه و اندیس ساختاری را به دست آورد.

کیفیت پاسخ های به‌دست‌آمده می‌تواند با اعمال آستانه‌هایی بر روی اندیس شکل، فاکتور هندسی یا عمق تخمینی ارزیابی شود. معیارهای اندیس شکل و فاکتور هندسی می‌توانند اثری شدید بر روی تعداد تخمین عمق‌های معتبر داشته باشد. گرچه این روش کاهش محتوای اطلاعاتی به نظر می‌رسد، بااین‌حال راهی مؤثر برای افزایش اعتماد مفسر به تفسیر درست است. این روش بر روی‌داده‌های مصنوعی استوانهٔ افقی متناهی و منشور با لبه‌های 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 استفاده از تابع ویژهٔ عدد موج محلی، عمق و پس از آن اندیس ساختاری محاسبه شد و اندیس ساختاری به‌دست‌آمده به‌عنوان ورودی تابع ویژهٔ گرادیان کلی به کار گرفته شد. سرانجام این روش بر روی داده‌های گرانی معدن سولفیدی موبرون واقع در کانادا آزمایش شد که با نتایج روش دیگر اعمال‌شده مطابقت خوبی را نشان داد. این نتایج در جدول ۳ نمایش داده‌شده 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.

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., Agarval, 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.

Journal of the Earth and Space Physics, Vol. 43, No. 1, Spring 2017, P. 6

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 Mobrun 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