

تخمین عمق و مرز بی‌هنجاری‌های گرانی با استفاده از روش‌های اویلر بهبودیافته و کمیت تجانس فاز

سیمین مرادی^{۱*} و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷)

چکیده

روش‌های میدان پتانسیل نقشی اساسی در اکتشافات ژئوفیزیکی دارند. یکی از اهداف اصلی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، تعیین محل و تخمین عمق ناهنجاری‌های مغناطیسی و گرانی است. به منظور افزایش دقت در تعیین مشخصه‌های چشمه‌های زیرسطحی، همواره روش‌های تفسیر کمی داده‌های میدان پتانسیل نظیر روش اویلر استاندارد دستخوش تغییراتی شده‌اند و برای بهبود اطمینان به نتایج، تعمیم‌هایی صورت گرفته است. در این پژوهش، برای تعیین محل و تخمین عمق بی‌هنجاری گرانی، تعمیم دیگری از اویلر استاندارد با استفاده از روش تجزیه مقدار منفرد و نسبت گرادیان افقی به سیگنال تحلیلی به کار گرفته شده است. همچنین کمیت تجانس فاز نیز برای تفسیر دقیق‌تر نتایج بر داده‌ها اعمال شد. از این دو روش برای تخمین عمق و تعیین محل داده‌های گرانی معدن منگنز صفو استفاده شده است. نتایج اویلر بهبودیافته در مقایسه با اویلر استاندارد، انطباق بیشتری با مرز بی‌هنجاری نشان می‌دهد. همچنین بازه تخمین عمق (نمودار میله‌ای) در اویلر بهبودیافته کوچک‌تر از اویلر استاندارد است که این خود نشان‌دهنده عملکرد بهتر اویلر بهبودیافته نسبت به اویلر استاندارد است. هنگام تعیین محل بی‌هنجاری، برای بررسی بیشتر و جهت افزایش اعتبار تفسیر، کمیت تجانس فاز نیز بر داده‌های مصنوعی و واقعی (معدن صفو) اعمال شده است.

کلمه‌های کلیدی: اویلر استاندارد، اویلر بهبودیافته، تجزیه مقدار منفرد، تجانس فاز

۱ مقدمه

روش گرانی‌سنجی نقش مهمی در کارهای ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی ایفا می‌کند. تفسیر درست و منطقی داده‌های گرانی دید خوبی از زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه برای مفسر فراهم می‌کند و اجرام زمین‌شناسی را برجسته‌تر و واضح‌تر نشان می‌دهد (نیقیان و همکاران، ۲۰۰۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۴ و گوا و همکاران، ۲۰۱۴)؛ بنابراین تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی سبب درک کلی منشأ بی‌هنجاری و موقعیت منابع بی‌هنجاری می‌شود. در سال‌های گذشته، روش‌های مختلفی مبتنی بر استفاده از مشتقات داده‌های گرانی برای تعیین مشخصه‌های منابع زیرسطحی ارائه شده است. روش اوایلر را که روشی بنیادی و اساسی جهت تفسیر داده‌های میدان پتانسیل (گرانی و مغناطیس) است، اولین بار تامپسون (۱۹۸۲) برای برآورد عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی (داده‌های پروفیل) معرفی کرد. سپس رید و همکاران (۱۹۹۰) این روش را برای داده‌های شبکه (سه‌بعدی) تعمیم و گسترش دادند. واهمامیخت اوایلر روشی خودکار است که مکان و عمق منابع زیرسطحی را تخمین می‌زند. به بیان دیگر، این روش به‌عنوان یک مرزیاب و تخمین‌گر عمق عمل می‌کند. واهمامیخت اوایلر تلاش می‌کند مختصات منابع ساده را از داده‌های میدان پتانسیل تخمین بزند. بر اساس فرضی قوی، منابع هندسه ساده‌ای دارند، نظیر کره، لوله‌های عمودی، صفحات عمودی و...؛ بنابراین با در نظر گرفتن شاخص ساختاری برای این اشکال ساده هندسی، نتایج اوایلر می‌تواند مطمئن و به واقعیت زمین‌شناسی نزدیک باشد. در مناطقی که به لحاظ زمین‌شناسی پیچیده هستند، تعیین شاخص ساختاری مشکل است و می‌تواند سبب شود نتایج از واقعیت زمین‌شناسی دور باشند؛ بنابراین به‌منظور توسعه روش اوایلر مطالعات گسترده‌ای در جهت کاهش و حذف اثر شاخص ساختاری انجام شده است. سالم و همکاران (۲۰۰۸) روشی را بر اساس مشتقات زاویه تیلت توسعه دادند که معادله

خطی ساده‌ای شبیه به معادله اوایلر سه‌بعدی است. در این روش، مکان افقی و عمق منابع مغناطیسی بدون مشخص کردن اطلاعات قبلی درباره ماهیت منابع (شاخص ساختاری) تخمین زده می‌شود. بیکی (۲۰۱۰) با به‌کارگیری سیگنال تحلیلی در واهمامیخت اوایلر، امکان تشخیص خودکار شاخص ساختاری و همچنین کاهش اثر تداخلی منابع مجاور را فراهم آورد. وانگ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از ترکیب زاویه تیلت و واهمامیخت اوایلر سه‌بعدی، توانستند پارامترهای مکان منابع زیرسطحی را درست تشخیص دهند. در این پژوهش روش اوایلر بهبود یافته با استفاده از نسبت گرادیان افقی به سیگنال تحلیلی و تجزیه مقدار منفرد و کمیت تجانس فاز (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷) بررسی شده است.

۲ روش تحقیق

معادله همگن اوایلر، میدان پتانسیل و مؤلفه‌های گرادیان آن و مکان منبع را با درجه همگنی به هم مرتبط می‌کند. گفتنی است درجه همگنی با شاخص ساختاری تعریف می‌شود. تامپسون (۱۹۸۲) جهت برآورد عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از چشمه‌هایی که تقریباً دو‌بعدی را می‌توان برای آنها اعمال کرد، برای اولین بار اوایلر استاندارد را به‌کاربرد. اوایلر استاندارد برای چشمه‌هایی با تقریب دو‌بعدی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(x-x_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial x} + (z-z_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial z} = -N \Delta f(x) \quad (1)$$

بازآرایی عبارت بالا به رابطه زیر منجر می‌شود:

$$x_0 \frac{\partial \Delta f}{\partial x} + z_0 \frac{\partial \Delta f}{\partial z} = x \frac{\partial \Delta f}{\partial x} + N \Delta f(x) \quad (2)$$

که (x_0, z_0) موقعیت منبع دو‌بعدی، Δf میدان کل و (x, z) مختصات نقطه برداشت داده هستند. استفاده از معادله (۲) به معنای توانایی جدا کردن بی‌هنجاری از محیط اطراف آن است. Δf فقط اطلاعات یک چشمه مشخص را می‌دهد، درحالی‌که در عمل چنین نیست و مقدار مطلق بی‌هنجاری

سطحی استفاده کرد.

اولین بار نیقیان (۱۹۷۲) سیگنال تحلیلی را برای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دو بُعدی به کار برد. سیگنال تحلیلی را می‌توان به صورت ترکیبی از گرادبان‌های قائم و

افقی یک بی‌هنجاری میدان پتانسیل تعریف کرد:

$$A(x, z) = \frac{\partial F}{\partial x} - i \frac{\partial F}{\partial z} \quad (7)$$

با این تعریف، سیگنال تحلیلی عددی مختلط است، اما آنچه در تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل اهمیت دارد، دامنه سیگنال تحلیلی است که برای یک چشمه دو بُعدی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$|A(x)| = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} \quad (8)$$

دامنه سیگنال تحلیلی تابعی متقارن و زنگوله‌ای شکل است که بیشینه مقدار آن در بالای مرز بی‌هنجاری قرار می‌گیرد و به عنوان یک آشکارساز لبه عمل می‌کند. گفتنی است برای تفسیر کمی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل به ویژه تخمین عمق از این روش استفاده نمی‌شود مگر اینکه با سایر روش‌ها مانند واهمامیخت اویلر ترکیب شود.

دامنه سیگنال تحلیلی سه بُعدی برای یک بی‌هنجاری میدان پتانسیل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$|AAS_0| = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} \quad (9)$$

که F بی‌هنجاری میدان پتانسیل است.

۲-۱ تجزیه مقدار منفرد

یکی از مهم‌ترین روش‌های تجزیه ماتریس‌ها تجزیه بر اساس مقادیر منفرد است. در این روش هر ماتریس X با درایه‌های حقیقی را می‌توان به صورت حاصل ضرب یک ماتریس متعامد L ، یک ماتریس قطری S با درایه‌های حقیقی مثبت و ترانواده یک ماتریس متعامد R نوشت (گیلبرت، ۱۹۸۰):

Δf به ندرت معلوم است. در واقع میدان‌های منطقه‌ای یا اثر ناشی از بی‌هنجاری‌های مجاور تقریباً همواره وجود دارد. برای رفع این مشکل، میدان زمینه B تعریف می‌شود به طوری که:

$$F(x) = \nabla f(x) + B \quad (3)$$

بنابراین معادله اویلر در حالت کلی تر و نزدیک به واقعیت با در نظر گرفتن رابطه (۳) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_0 \frac{\partial F}{\partial x} + z_0 \frac{\partial F}{\partial z} + NB = x \frac{\partial F}{\partial x} + NF \quad (4)$$

اگر n تعداد داده‌های موجود در هر پنجره باشد، شکل ماتریسی معادله (۴) به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_1} & \frac{\partial F}{\partial z_1} & N \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial x_n} & \frac{\partial F}{\partial z_n} & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ z_0 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \frac{\partial F}{\partial x_1} + z_0 \frac{\partial F}{\partial z_1} + NF_1 \\ \vdots \\ x_n \frac{\partial F}{\partial x_n} + z_n \frac{\partial F}{\partial z_n} + NF_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

معادله (۵) با سه مجهول (x_0, z_0, B) را می‌توان با استفاده از روش کمترین مربعات حل کرد. روش پیشنهادی شامل تنظیم مقدراری مناسب برای شاخص ساختاری منبع ایجاد کننده بی‌هنجاری و سپس حل دستگاه با وارون‌سازی کمترین مربعات است.

رید و همکاران (۱۹۹۰) وارون‌سازی اویلر را برای داده‌های شبکه به صورت زیر تعمیم دادند:

$$(x-x_0) \frac{\partial F}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial F}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial F}{\partial z} = N(B-F) \quad (6)$$

که $\left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}\right)$ گرادبان‌های افقی در راستای x و y ، $\frac{\partial F}{\partial z}$ گرادبان اول قائم، N شاخص ساختاری، B نماینده میدان‌های منطقه‌ای و F بی‌هنجاری میدان مشاهده‌ای است. معادله اویلر مستلزم استفاده از مشتقات میدان است که می‌توان آنها را با اندازه‌گیری یا محاسبه به دست آورد. با افزایش درجه مشتق‌گیری، بی‌هنجاری بیشتر تحت تأثیر نوفه قرار می‌گیرد و همین مسئله سبب می‌شود نوفه و آثار سطحی تقویت شوند. به همین جهت، می‌توان از فیلترهایی نظیر فیلتر ادامه فراسو به منظور کاهش آثار

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} + (y-y_0) \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial z} + (z-z_0) \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} + \frac{d(z-z_0)}{dz} \frac{\partial F}{\partial z} = -N \frac{\partial F}{\partial z} \quad (14)$$

سیس معادلات (۱۲) و (۱۳) به ترتیب در $\frac{\partial F}{T \partial y}$ و $\frac{\partial F}{T \partial x}$ ضرب می‌شوند که

$$T = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}$$

سیگنال تحلیل در حالت سه‌بعدی است. با اضافه کردن این دو رابطه و انجام دادن عملیات ریاضی مختصر، رابطه زیر به دست می‌آید (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷):

$$(x-x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = -(N+1)T \quad (15)$$

در مرحله بعد، معادلات (۱۴) و (۱۵) به ترتیب در T و $\frac{\partial F}{\partial x}$ ضرب می‌شوند و با کم کردن این دو معادله، رابطه زیر برای اویلر بهبودیافته حاصل می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷):

$$(x-x_0) \left[T \frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + (y-y_0) \left[T \frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)}{\partial y} - \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (z-z_0) \left[T \frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)}{\partial z} - \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] = 0 \quad (16)$$

اگر R نسبت مشتق افقی $\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)$ به سیگنال تحلیلی (T) باشد $\left(R = \frac{\partial F}{T \partial x}\right)$ ، مشتق R نسبت به x ، y و z برابر است با (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷):

$$\frac{\partial R}{\partial x} = \frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)}{\partial x} \cdot T - \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (17)$$

$$\frac{\partial R}{\partial y} = \frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)}{\partial y} \cdot T - \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (18)$$

$$\frac{\partial R}{\partial z} = \frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)}{\partial z} \cdot T - \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (19)$$

با جای گذاری معادلات (۱۷) تا (۱۹) در معادله (۱۶) رابطه نهایی اویلر بهبودیافته به صورت زیر باز آرایی می‌شود:

$$(x-x_0) \frac{\partial R}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial R}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial R}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

$$X_{m \times n} = L_{m \times m} S_{m \times n} R_{n \times n}^T \quad (10)$$

ستون‌های ماتریس $L_{m \times m}$ از بردارهای ویژه ماتریس XX^T و ستون‌های ماتریس $R_{n \times n}$ از بردارهای ویژه ماتریس $X^T X$ تشکیل شده‌اند. $S_{m \times n}$ ماتریسی قطری است که درایه‌های قطر آن، مقادیر منفرد غیر صفر ماتریس XX^T یا $X^T X$ هستند. یکی از کاربردهای تجزیه مقادیر منفرد، تقریب یک ماتریس با یک ماتریس رتبه پایین تر است. از کاربردهای این تقریب می‌توان به کاهش نوفه در داده‌ها اشاره کرد. نوفه موجود در داده‌ها سبب افزایش مقادیر منفرد کوچک و نزدیک به صفر می‌شود و همین مسئله سبب پراهمیت جلوه دادن جملات آخر ماتریس می‌شود و نقش مخربی در ساختار اصلی ماتریس ایجاد می‌کند؛ بنابراین چنین تقریبی می‌تواند جملات کم‌اهمیت را حذف و به این ترتیب نوفه را کاهش دهد.

رابطه (۶) با استفاده از روش ذکر شده (تجزیه مقدار منفرد و تقریب رتبه پایین ماتریس) به صورت زیر بازنویسی می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷):

$$(x-x_0) \frac{\partial (I_k S_k \Gamma_k^T)}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial (I_k S_k \Gamma_k^T)}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial (I_k S_k \Gamma_k^T)}{\partial z} = -N (I_k S_k \Gamma_k^T - B) \quad (11)$$

حال با تعریف $F = I_k S_k \Gamma_k^T$ و فرض ثابت بودن میدان زمینه (B) ، از معادله (۶) به ترتیب در جهت‌های x ، y و z مشتق گرفته می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷):

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{d(x-x_0)}{dx} \frac{\partial F}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} + (z-z_0) \frac{\partial^2 F}{\partial z \partial x} = -N \frac{\partial F}{\partial x} \quad (12)$$

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} + (y-y_0) \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{d(y-y_0)}{dy} \frac{\partial F}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial^2 F}{\partial z \partial y} = -N \frac{\partial F}{\partial y} \quad (13)$$

موجک به یکی از روش‌های انتخابی برای به‌دست آوردن اطلاعات فرکانس محلی تبدیل شده است. استفاده از موجک برای تجزیه و تحلیل فرکانس محلی را ابتدا مورلت (۱۹۸۲) برای تجزیه و تحلیل سیگنال ژئوفیزیکی توسعه داد. این رویکرد شامل استفاده از یک بانک فیلتر برای بررسی سیگنال است. فیلترها همگی از تغییر مقیاس‌های یک موج ایجاد می‌شوند که هر مقیاس برای تشخیص فرکانس‌های خاصی از سیگنال طراحی شده است. آنچه در این پژوهش استفاده شده است، رویکرد مورلت بر مبنای موجک‌های مبتنی بر توابع گابور است.

تابع انرژی محلی برای یک پروفیل یک‌بعدی با رابطه (۲۳) تعریف می‌شود (ونکاتش و اوونز، ۱۹۸۹):

$$E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)} \quad (23)$$

که $H(x)$ تبدیل هیلبرت $F(x)$ است.

با استفاده از ضرب سیگنال موردنظر در موجک‌های فرد (M_n^o) و موجک‌های زوج (M_n^e) در مقیاس n ، روابط $H(x)$ و $F(x)$ به‌دست می‌آیند:

$$F(x) = \sum_n I(x) * M_n^e \quad \& \quad H(x) = \sum_n I(x) * M_n^o \quad (24)$$

و به این ترتیب رابطه زیر برای مجموع دامنه‌های مؤلفه‌های فرکانسی استفاده می‌شود:

$$\sum_n A_n(x) = \sum_n \sqrt{(I(x) * M_n^e)^2 + (I(x) * M_n^o)^2} \quad (25)$$

در تعریفی جامع‌تر، رابطه تجانس فاز به‌صورت زیر بیان می‌شود (کووسی، ۱۹۹۹):

$$PC(x) = \frac{\sum_n \sum_n (W_n(x) (|A_n(x) \cos(\theta_n(x) - \bar{\theta}(x))| - |\sin(\theta_n(x) - \bar{\theta}(x))|)) - T}{\varepsilon + \sum_n \sum_n A_n(x)} \quad (26)$$

که T ، آستانه تخمین نوفه، W ، تابع وزن و ε عددی کوچک برای جلوگیری از صفر شدن مخرج است. رویکرد اتخاذ شده این گونه است که ابتدا در هر مکان در تصویر موردنظر، انرژی در هر جهت محاسبه می‌شود و

همان‌طور که در معادله (۲۰) مشخص است، به هیچ شاخص ساختاری برای معادله مذکور نیاز نیست.

۲-۲ تجانس فاز

تجانس فاز ابزاری برای استخراج ویژگی‌ها در قسمت‌های مختلف یک تصویر است که می‌تواند لبه‌ها و گوشه‌های یک تصویر یا سیگنال را آشکارسازی کند. تجانس فاز یک اندازه‌گیری بدون بُعد است و از این رو معیاری مطلق از اهمیت نقاط ویژگی در یک تصویر را ارائه می‌دهد. طیف گسترده‌ای از ویژگی‌ها باعث ایجاد نقاطی با تجانس فاز زیاد می‌شوند. مقادیر تجانس فاز از حداکثر یک که نشان‌دهنده یک ویژگی بسیار مهم است تا صفر که نشان‌دهنده اهمیت نداشتن ویژگی است، متغیر است. این کمیت اجازه می‌دهد مقادیر آستانه ثابت در کلاس‌های گسترده‌ای از تصاویر اعمال شوند. مقادیر آستانه را می‌توان از قبل تعیین کرد و لازم نیست به‌صورت تجربی برای تصاویر مختلف تعیین شوند.

مورون و اوونز (۱۹۸۷) تابع تجانس فاز را از نظر گسترش سری فوریه یک سیگنال در محل x با رابطه زیر تعریف کردند:

$$PC(x) = \max_{\bar{\theta}(x) \in [0, \pi/2]} \frac{\sum_n A_n \cos(\theta_n(x) - \bar{\theta}(x))}{\sum_n A_n} \quad (21)$$

که A_n دامنه مؤلفه فوریه است. θ_n فاز محلی مؤلفه فوریه در موقعیت x است و $\bar{\theta}_n$ میانگین زاویه فاز محلی تمام عبارات فوریه در نقطه موردنظر است.

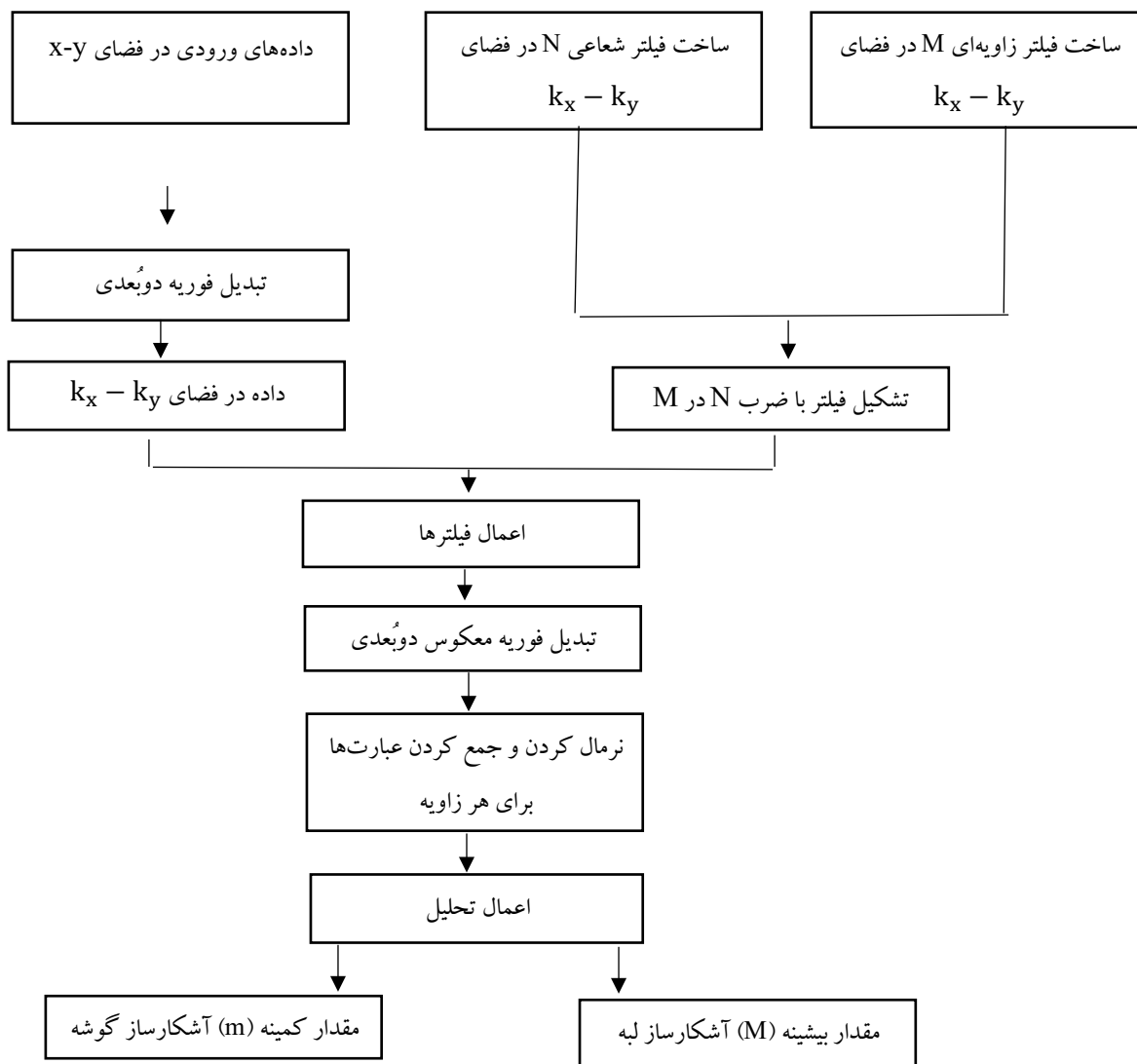
ونکاتش و اوونز (۱۹۸۹) رابطه تجانس فاز با انرژی را به‌صورت زیر بیان می‌کنند:

$$E(x) = PC(x) \sum_n A_n \quad (22)$$

بنابراین تابع انرژی محلی به‌طور مستقیم با تابع تجانس فاز متناسب است. به همین جهت مقادیر بیشینه انرژی محلی با مقادیر بیشینه تجانس فاز مطابقت دارد. به‌تازگی تبدیل

تشکیل مجموع انرژی در تمام جهت‌ها و تقسیم کردن بر مجموع تمام جهت‌ها و مقیاس‌های دامنه‌های پاسخ موجک منفرد در آن مکان در تصویر، فرایند نرمال‌سازی انجام می‌شود (کووسی، ۱۹۹۹).

با کم کردن اثر نوفه تخمینی، پاسخ‌های کاذب حذف می‌شوند. در مناطقی از تصویر که گسترش فرکانس کم است، وزندهی بر اساس گسترش فرکانس و همچنین کاهش پاسخ‌های کاذب لحاظ می‌شود؛ بنابراین ضریب وزندهی به انرژی در هر جهت اعمال می‌شود. سپس با



شکل ۱. نحوه ساخت فیلترها و روند کلی محاسبات کمیت تجانس فاز.

۳ مدل‌سازی

به‌منظور تولید داده‌های مصنوعی مکعب با ابعادی که بین مختصات (X_1, Y_1, Z_1) و (X_2, Y_2, Z_2) قرار دارد، از رابطه پلوف استفاده می‌شود (بلیکلی، ۱۹۹۵):

(۲۷)

$$g = G \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} [A]$$

۳-۱ مدل مصنوعی شماره یک

در این مدل، هدف مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 20$ است که در عمق ۲۰ متری قرار دارد. مشخصات این مدل در جدول ۱ آورده شده

$$A = z_k \tan^{-1} \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i)$$

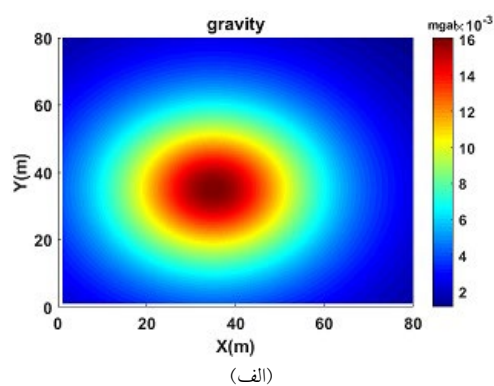
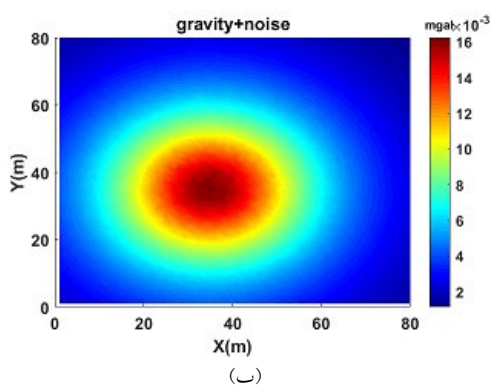
که $R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$ و $\mu_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k$ است.

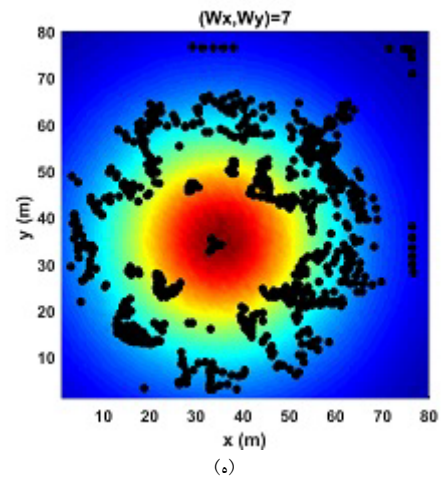
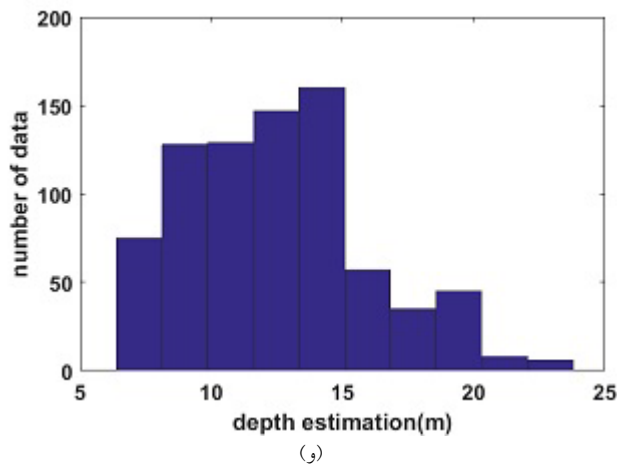
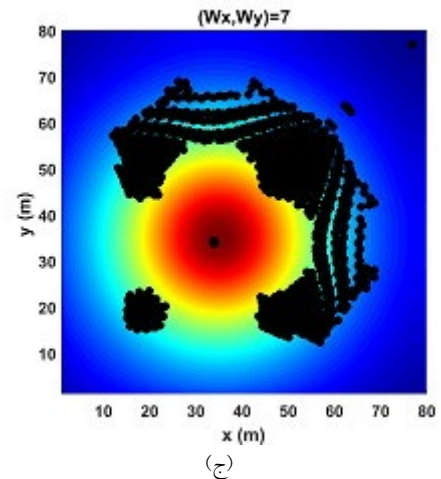
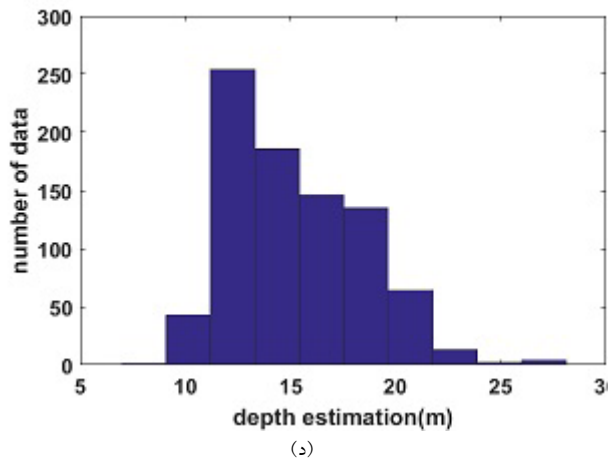
جدول ۱. مشخصات مدل مصنوعی شماره یک.

شماره مدل	طول در امتداد x (m)	طول در امتداد y (m)	ضخامت در امتداد z (m)	عمق بالایی (m)	چگالی (g/cm^3)	شاخص ساختاری
۱	۱۰	۱۰	۲۰	۲۰	۱	۰/۰۵

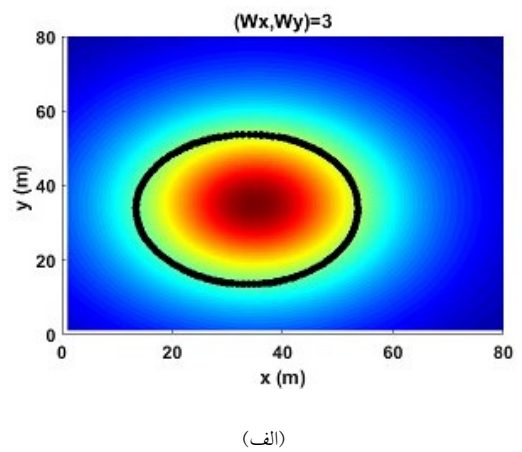
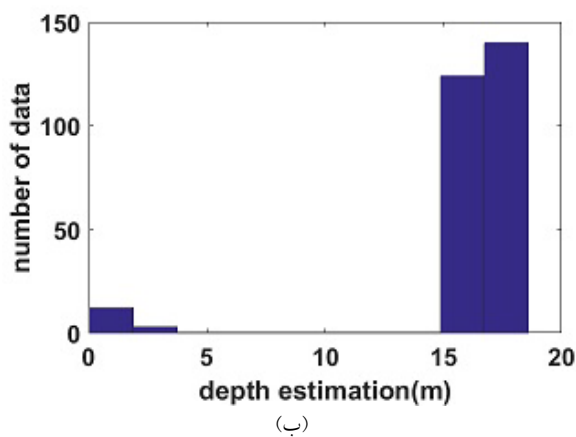
افقی حاصل از اعمال اویلر بهبودیافته پذیرفتنی است و نقاط تمرکز بهتری روی مرز بی‌هنجاری دارند. همچنین بازه تخمین عمق در نمودار میله‌ای (بافت‌نگار) به‌دست‌آمده از اعمال اویلر بهبودیافته، در مدل‌های بدون نوفه و آمیخته به نوفه در مقایسه با اویلر استاندارد کوچک‌تر است که همین موضوع دلیلی بر عملکرد بهتر اویلر بهبودیافته است؛ بنابراین مقایسه کلی نتایج دو روش نشان می‌دهد اویلر بهبودیافته در مقایسه با اویلر استاندارد در تعیین مختصات افقی و انطباق نقاط با مرز بی‌هنجاری و تعیین عمق، نتایج پذیرفتنی و مطمئن‌تری ارائه می‌دهد. شکل‌های ۴-الف و ۴-ب نتایج اعمال کمیت تجانس فاز را بر مدل‌های بدون نوفه و آمیخته به نوفه نشان می‌دهند.

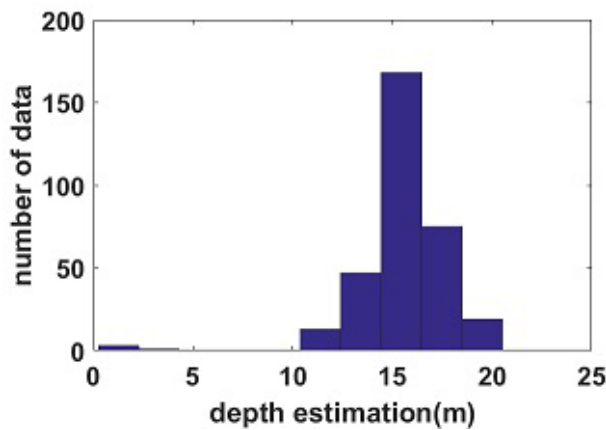
شکل‌های ۲-الف و ۲-ب به ترتیب اثر گرانی مدل را برای داده بدون نوفه و آمیخته به نوفه (یک درصد) نشان می‌دهند. شکل‌های ۲-ج و ۲-د به ترتیب مختصات افقی و بافت‌نگار عمق حاصل از اعمال اویلر استاندارد بر مدل را نمایش می‌دهند. شکل‌های ۲-ه و ۲-و نیز خروجی حاصل از اویلر استاندارد را در مدل آمیخته به نوفه نشان می‌دهند. در ادامه، اویلر بهبودیافته بر مدل مکعب شماره یک اعمال شد. شکل‌های ۳-الف تا ۳-د نتایج اعمال این روش را در مدل‌های بدون نوفه و آمیخته به نوفه نمایش می‌دهند. همان‌طور که خروجی‌ها نشان می‌دهند، مختصات افقی به‌دست‌آمده از اویلر استاندارد در مدل (داده بدون نوفه و آمیخته به نوفه)، کیفیت مناسبی ندارد و نقاط بر مرز بی‌هنجاری منطبق نیستند، درحالی‌که کیفیت مختصات



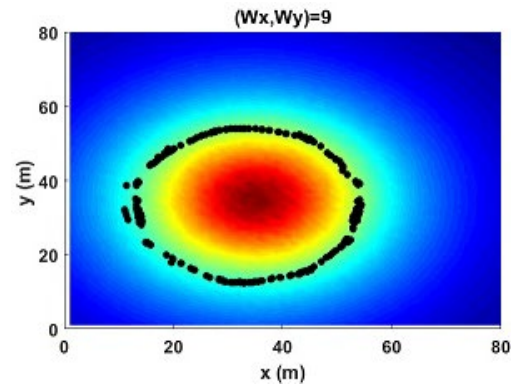


شکل ۲. (الف) اثر گرانی مکعب شماره یک (ب) اثر گرانی مدل مکعب شماره یک آمیخته با نوفه (ج) نتیجه اعمال اوپلر استاندارد بر مدل مکعب شماره یک (د) بافت‌نگار عمق مدل مکعب شماره یک (ه) نتیجه اعمال اوپلر استاندارد بر مدل مکعب شماره یک آمیخته با نوفه (و) بافت‌نگار عمق مدل مکعب شماره یک (آمیخته با نوفه).



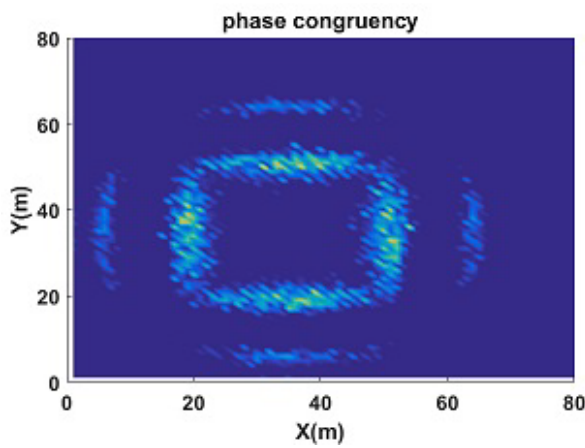


(د)

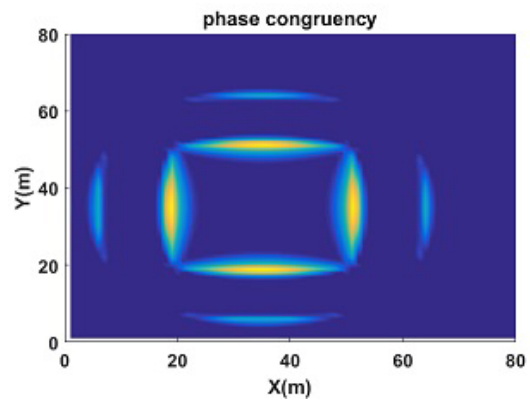


(ج)

شکل ۳. (الف) نتیجه اعمال اویلر بهبودیافته بر مدل مکعب شماره یک (ب) بافت‌نگار عمق به‌دست‌آمده از اویلر بهبودیافته (ج) نتیجه اعمال اویلر بهبودیافته بر مدل مکعب (آمیخته به نوفه) (د) بافت‌نگار عمق به‌دست‌آمده از اویلر بهبودیافته (آمیخته به نوفه).



(ب)



(الف)

شکل ۴. (الف) نتیجه اعمال تجانس فاز بر مدل مکعب شماره یک (ب) نتیجه اعمال تجانس فاز بر مدل مکعب.

۲ مدل مصنوعی شماره دو

مدل مکعب مفروض در یک شبکه 80×80 قرار داده شده و فاصله نقاط شبکه از یکدیگر ۱ متر است.

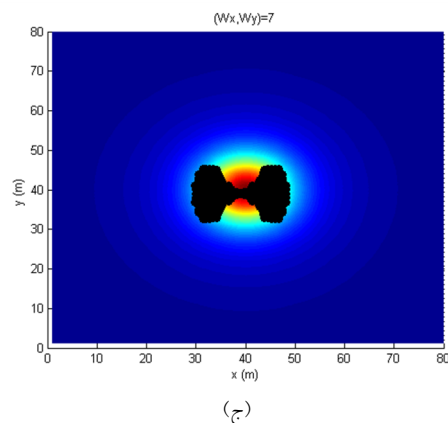
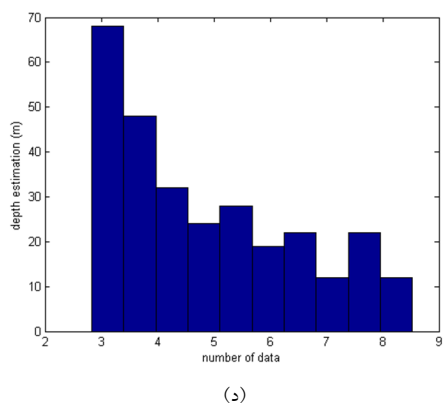
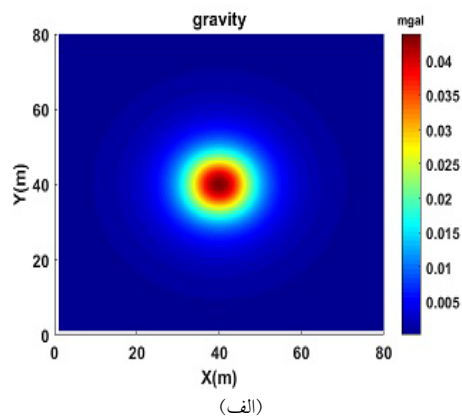
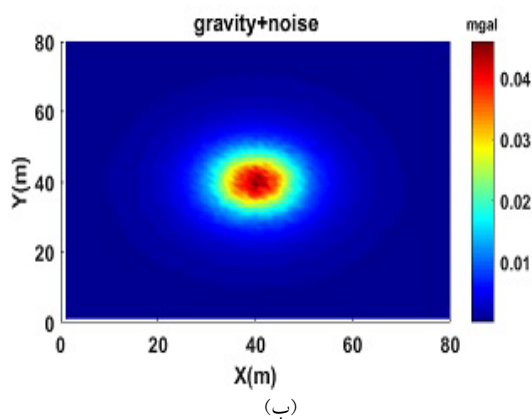
در این مدل، هدف مکعبی به ابعاد ۱۰ متر واقع در عمق ۵ متری است. مشخصات این مدل در جدول ۲ آمده است.

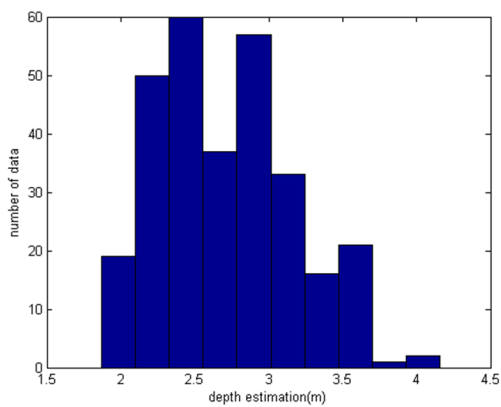
جدول ۲. مشخصات مدل مصنوعی شماره دو.

شماره مدل	طول در امتداد X (m)	طول در امتداد Y (m)	ضخامت در امتداد Z (m)	عمق بالایی (m)	چگالی (g/cm^3)	شاخص ساختاری
۲	۱۰	۱۰	۵	۵	۱	۰/۰۵

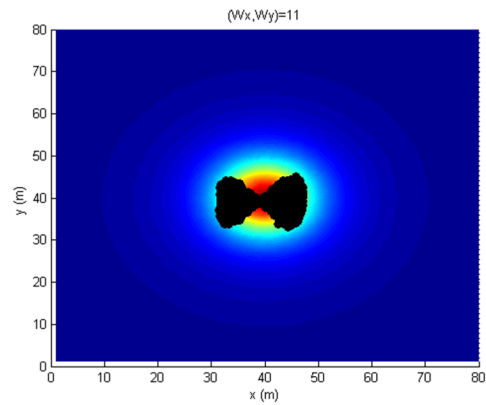
میله‌ای به‌دست آمده از اویلر بهبودیافته در مدل‌های بدون نوفه و آمیخته به نوفه در مقایسه با اویلر استاندارد کوچک‌تر است که همین موضوع دلیلی بر عملکرد بهتر اویلر بهبودیافته است؛ بنابراین مقایسه کلی نتایج دو روش نشان می‌دهد اویلر بهبودیافته در مقایسه با اویلر استاندارد در تعیین مختصات افقی و انطباق نقاط با مرز بی‌هنجاری و تعیین عمق، نتایج پذیرفتنی و مطمئن‌تری دارد. شکل‌های ۷-الف و ۷-ب به ترتیب نتایج اعمال کمیت تجانس فاز را بر مدل‌های بدون نوفه و آمیخته به نوفه نشان می‌دهند. این روش با هدف تعیین محل قرارگیری مدل زیرسطحی استفاده می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، این روش نیز در تعیین محل (مختصات افقی) مدل، نتایجی پذیرفتنی دارد و به‌این ترتیب، مقایسه نتایج روش مبتنی بر گرادیان (اویلر استاندارد و اویلر بهبودیافته) و تجانس فاز، امکان تفسیر مطمئن‌تری را فراهم می‌کند.

شکل‌های ۵-الف و ۵-ب به ترتیب اثر گرانی مدل را برای داده بدون نوفه و داده آمیخته به نوفه (پنج درصد) نشان می‌دهند. شکل‌های ۵-ج و ۵-د به ترتیب مختصات افقی و بافت‌نگار عمق حاصل از اعمال اویلر استاندارد بر مدل را نمایش می‌دهند. شکل‌های ۵-ه و ۵-و نیز خروجی حاصل از اعمال اویلر استاندارد را بر مدل آمیخته به نوفه نشان می‌دهند. در ادامه، اویلر بهبودیافته بر مدل مکعب اعمال شد. شکل‌های ۶-الف تا ۶-د نتایج اعمال این روش را بر مدل بدون نوفه و آمیخته به نوفه نمایش می‌دهند. همان‌طور که خروجی‌ها نشان می‌دهند، مختصات افقی به‌دست آمده از اعمال اویلر استاندارد بر مدل (داده بدون نوفه و آمیخته به نوفه)، کیفیت مناسبی ندارد و نقاط تمرکز مناسبی روی مرز بی‌هنجاری ندارند، درحالی‌که کیفیت مختصات افقی حاصل از اعمال اویلر بهبودیافته، پذیرفتنی و تعداد نقاط محدود است و تمرکز بهتری روی مرزهای بی‌هنجاری دارند. همچنین بازه تخمین عمق در نمودار



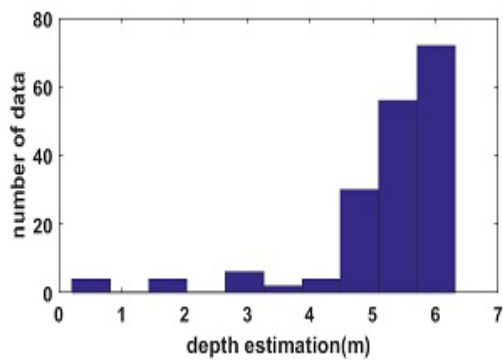


(و)

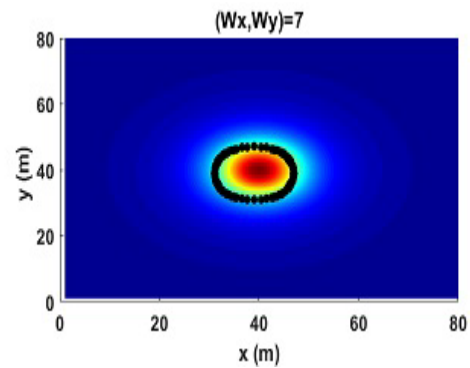


(ه)

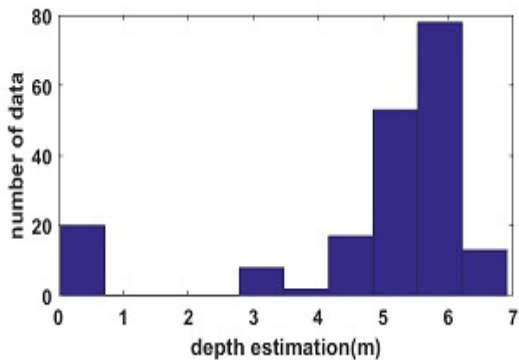
شکل ۵. (الف) اثر گرانی مکعب شماره دو (ب) اثر گرانی مدل مکعب شماره دو آمیخته با نوفه (ج) نتیجه اعمال اویلر استاندارد بر مدل مکعب شماره دو (د) بافت‌نگار عمق مدل مکعب شماره دو (ه) نتیجه اعمال اویلر استاندارد بر مدل مکعب شماره دو آمیخته با نوفه (و) بافت‌نگار عمق مدل مکعب شماره دو (آمیخته با نوفه).



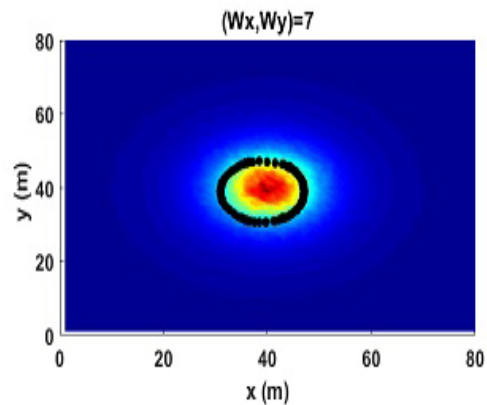
(ب)



(الف)

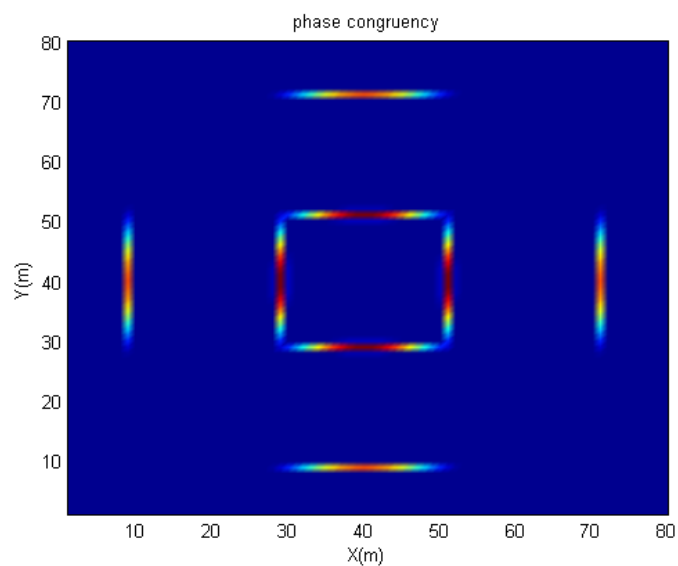


(د)

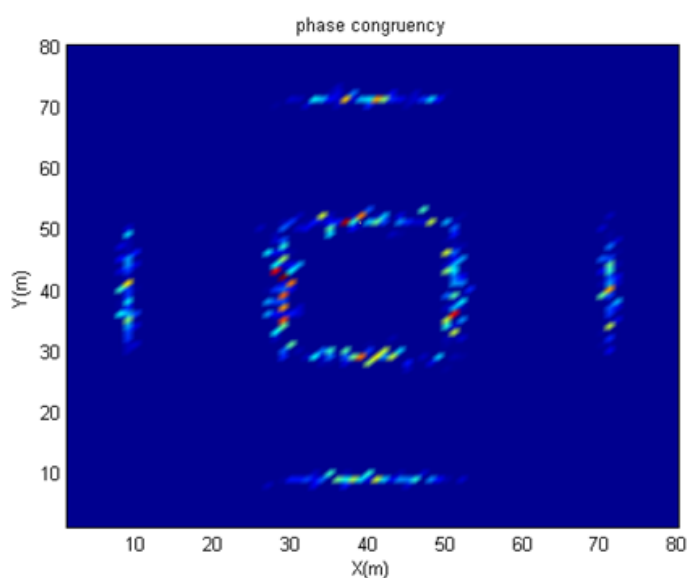


(ج)

شکل ۶. (الف) نتیجه اعمال اویلر بهبودیافته بر مدل مکعب شماره دو (ب) بافت‌نگار عمق به‌دست‌آمده از اویلر بهبودیافته (ج) نتیجه اعمال اویلر بهبودیافته بر مدل مکعب دو (آمیخته به نوفه) (د) بافت‌نگار عمق به‌دست‌آمده از اویلر بهبودیافته (آمیخته به نوفه)



(الف)



(ب)

شکل ۷. (الف) نتیجه اعمال تجانس فاز بر مدل مکعب (ب) نتیجه اعمال تجانس فاز بر مدل مکعب آمیخته با نوفه.

۴ داده واقعی

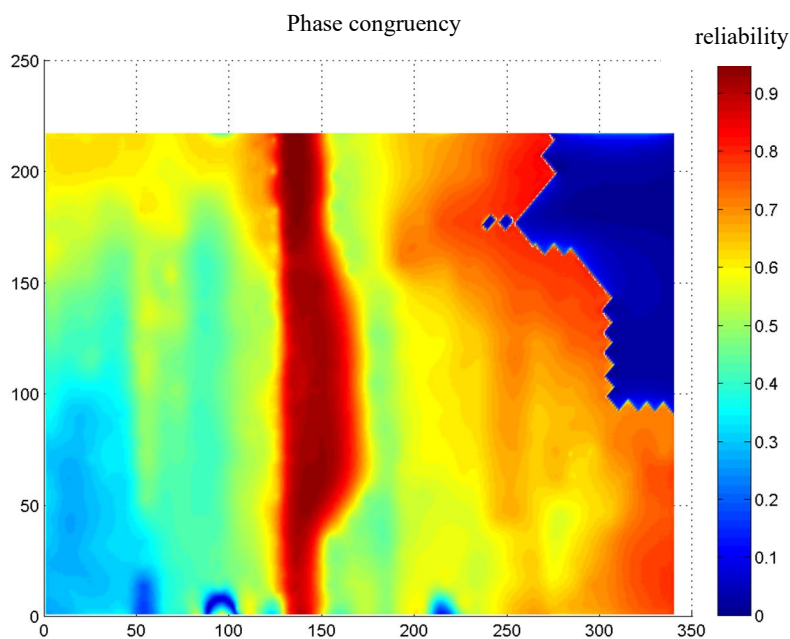
غرب روراندگی اصلی زاگرس) فرض شده است؛ از این رو باید توالی افیولیتی را لیتولوژی غالب در محدوده در نظر گرفت. بر اساس مطالعات انجام شده درباره نمونه‌های مقاطع صیقلی، کانی‌های اکسید منگنز به خصوص کانی پیرولولزیت، کانی‌های اصلی در مناطق کانه‌زا هستند. مقدار

کانسار منگنز صفو در شمال غرب ایران و در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری شمال شهر چالدران واقع شده است. محدوده مطالعاتی صفو در بسیاری از تقسیم‌بندی‌های ارائه شده برای نواحی ساختاری ایران، جزء ناحیه افیولیت ملائز (آمیزه رنگین) خوی-ماکو (بخشی از نواحی افیولیتی در شمال

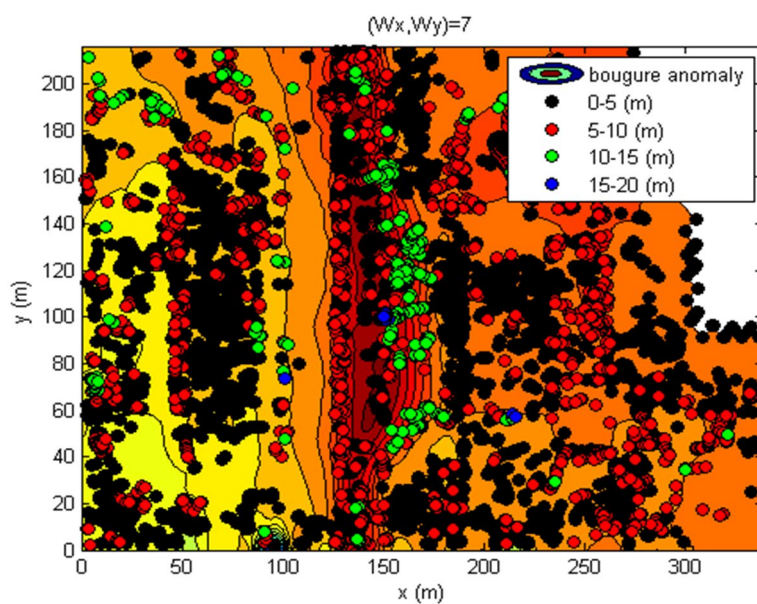
دستگاه مختصات UTM است. به علت توپوگرافی شدید، در گوشه شمال شرقی داده گرانی کمتری برداشت شده است. شایان ذکر است داده‌ها با استفاده از دستگاه CG3 با دقت ۵ میکروگال برداشت شده‌اند. همچنین عملیات برداشت داده روی شبکه‌ای با ۶۰۴ نقطه برداشت با فاصله ایستگاهی بین ۵ تا ۱۰ متر انجام شده است.

اکسید منگنز در بخش‌های مختلف نهشته صفو بین ۷/۴ و ۶۹/۱ درصد است.

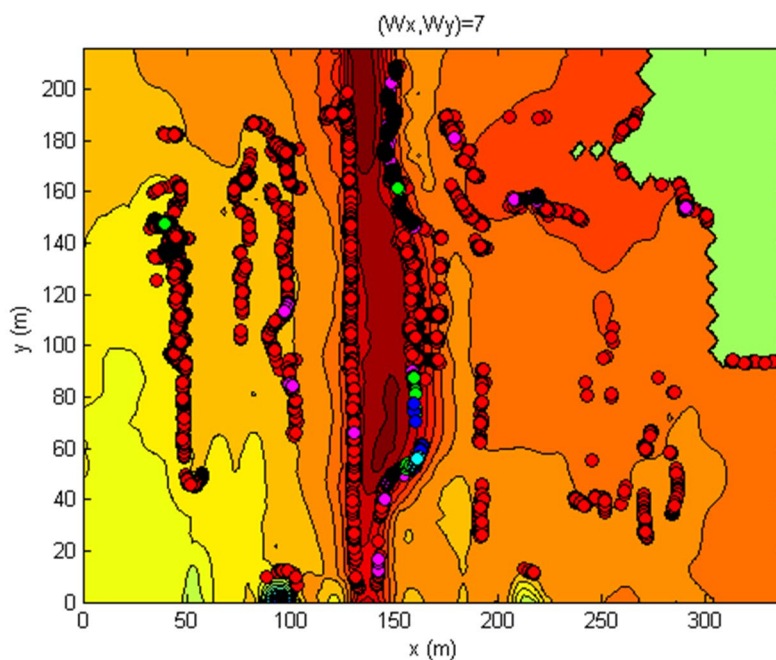
محل موردنظر پیرامون یکی از بیرون‌زدگی‌های معادن منگنز صفو و در مستطیلی قرار دارد که مختصات گوشه منتهی‌الیه جنوب غربی آن ۴۳۸۲۷۶ و ۴۳۴۲۹۷۱ و مختصات گوشه شمال شرقی آن ۴۳۸۶۰۹ و ۴۳۴۳۱۸۷ در



شکل ۸. نتایج اعمال کمیت تجانس فاز بر داده‌های معدن صفو.



(الف)



(ب)

- 0-5(m) ●
- 5-10(m) ●
- 10-15(m) ●
- 15-20(m) ●
- 20-25(m) ●

شکل ۹. الف) نمایی از بی‌هنجاری معدن صفو و اعمال روش اوایلر استاندارد (ب) اعمال اوایلر بهبودیافته بر داده گرانی معدن منگنز صفو.

نقشه‌های تجانس فاز نیز مرز بی‌هنجاری را با دقت بیشتری نشان می‌دهند؛ بنابراین مقایسه نتایج (تعیین مرز بی‌هنجاری) دو روش مذکور می‌تواند مفسر را در رسیدن به یک تفسیر با اعتبار زیاد هدایت کند.

۵ نتیجه‌گیری

یکی از اهداف اکتشافات ژئوفیزیکی، تعیین محل و تخمین عمق بی‌هنجاری زیرسطحی است؛ بنابراین انتخاب روش مناسب برای تعیین محل و تخمین عمق بی‌هنجاری ضروری است. یکی از روش‌های متداول اعمال شده بر داده‌های میدان پتانسیل (گرانی و مغناطیس)، روش اوایلر استاندارد است. اوایلر استاندارد روشی مبتنی بر انتخاب پنجره و وابسته به شاخص ساختاری است. ابعاد پنجره با توجه به کیفیت نتایج انتخاب می‌شود. تعیین شاخص ساختاری نیز با دانستن

شکل‌های ۸ و ۹-الف و ۹-ب به ترتیب نتایج اعمال کمیت تجانس فاز و اوایلر استاندارد و بهبودیافته را بر داده واقعی (معدن منگنز صفو) نشان می‌دهند. با توجه به نتایج می‌توان چنین تفسیر کرد که نقاط حاصل از اوایلر بهبودیافته در مقایسه با اوایلر استاندارد، تمرکز بهتری را روی مرزهای بی‌هنجاری نشان می‌دهند؛ بنابراین اوایلر بهبودیافته در تخمین مرز و تعیین عمق بی‌هنجاری، عملکردی مناسب و نزدیک به واقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (با استناد به اطلاعات معدن‌دار مربوطه و حفاری‌های صورت گرفته) ارائه می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهند تجانس فاز نیز با تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از موجک، ابزار مناسبی برای استخراج ویژگی (لبه) است. در نهایت، می‌توان گفت در اوایلر بهبودیافته تعداد نقاط اوایلر محدود شده است و تمرکز و پیوستگی بهتری روی مرزهای بی‌هنجاری دارند.

از این روش به‌عنوان یک آشکارساز لبه، موقعیت بی‌هنجاری را به‌خوبی نشان می‌دهد. در نهایت می‌توان چنین گفت که مقایسه نتایج تعیین موقعیت بی‌هنجاری زیرسطحی که با استفاده از اویلر بهبودیافته و کمیت تجانس فاز حاصل شده است، اعتبار تفسیر نتایج را افزایش می‌دهد.

منابع

- Beiki, M., 2010, Analytic signals for gravity gradient tensor and their application to estimate source location: *Geophysics*, 75, 159-174.
- Blakely, R. J., 1995, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*: Cambridge University Press.
- Gilbert, S., 1980, *Linear Algebra and Its Applications*, second ed.: Academic Press, New York.
- Guo, L. H., Meng, X. H., and Zhang, G. L., 2014, Three-dimensional correlation imaging for total amplitude magnetic anomaly and normalized source strength in the presence of strong remanent magnetization: *Journal of Applied Geophysics*, 111, 121-128.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., and Giar, D. Wave propagation and sampling theory - Part II: Sampling theory and complex waves. *Geophysics*, 47(2):222-236, February 1982.
- Kovesi, P., 1999, Image features from phase congruency: *Journal of Computer Vision Research*, 1(3), 1-27.
- Morrone, M. C., and Owens, R. A., 1987, Feature detection from local energy: *Pattern Recognition Letters*, 6(5), 303-313.
- 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, 507-517.
- Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. J. S., et al., 2005, Historical development of the gravity method in exploration: *Geophysics*, 70(6), 63ND-89ND.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J., and Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, 55(1), 10-131.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و شناخت ساختار زیرسطحی امکان‌پذیر است. همچنین به‌کارگیری این روش مستلزم آماده کردن مشتقات قائم و افقی داده‌های میدان است. از طرفی، اویلر استاندارد نیز مانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی، در سال‌های گذشته دستخوش تغییراتی شده است. این تغییرات با هدف افزایش دقت نتایج صورت گرفته است. روش اویلر بهبودیافته که در این تحقیق به‌کار گرفته شده است، از نسبت گرادیان افقی میدان به سیگنال تحلیلی و روش تحلیل مؤلفه اصلی بهره گرفته است. این روش مستقل از شاخص ساختاری است و از این جهت حائز اهمیت است. استفاده از روش مؤلفه اصلی نیز با هدف کاهش نوفه در داده‌ها بوده است. کمیت تجانس فاز نیز با هدف تفسیر دقیق‌تر نتایج بر داده‌های میدان اعمال شده است. بعد از اعمال روش‌های ذکرشده، نتایج زیر به‌دست آمده است:

- ۱- بازه تخمین عمق در اویلر بهبودیافته در مقایسه با اویلر استاندارد، کوچک‌تر است؛ از این جهت می‌توان گفت تخمین عمق اویلر بهبودیافته از دقت بیشتری نسبت به اویلر استاندارد برخوردار است؛
- ۲- تعیین مختصات افقی (تعیین مرز بی‌هنجاری) اویلر بهبودیافته در مقایسه با اویلر استاندارد، کیفیت مناسب‌تری دارد. در واقع جواب‌های اویلر بهبودیافته انطباق مناسبی با مرز بی‌هنجاری دارند؛
- ۳- از آنجا که در برداشت داده‌های ژئوفیزیکی مسئله نوفه در داده‌ها یک چالش محسوب می‌شود، ضروری است روش‌هایی به‌کار گرفته شود که به کمک آنها میزان نوفه در داده‌ها کاهش یابد. استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی (تجزیه مقدار منفرد و تقریب رتبه پایین ماتریس) در رابطه نهایی اویلر بهبودیافته، سبب کاهش نوفه در داده‌ها می‌شود؛
- ۴- اعمال کمیت تجانس فاز نیز بر داده‌ها جهت تخمین محل بی‌هنجاری به نتایجی پذیرفتنی منجر می‌شود. استفاده

- Geophysical and Geochemical Exploration, 36(1), 126-132.
- Wang, J., Meng, X., and Li, F., 2017, New improvements for lineaments study of gravity data with improved Euler inversion and phase congruency of the field data: *Journal of Applied Geophysics*, 136, 326-334.
- Venkatesh, S., and Owens, R. A., 1989, An energy feature detection scheme: *The International Conference on Image Processing*, Singapore, 553-557.
- Salem, A., Williams, S., and Fairheard, D., 2008, Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives: *Geophysics*, 73(1), L1-L10.
- Thompson, D. T., 1982, EULDPH-a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, 47(1), 1-129.
- Wang, M., Guo, Z. H., Luo, Y., Luo, F., Guo, H., and Qu, J. H., 2012, The application of tilt-Euler deconvolution method to potential field data processing and interpretation:

Estimation of the depth and boundary of gravity anomalies using improved Euler and phase congruency methods

Simin Moradi^{1*} and Vahid Ebrahimzade Ardestani²

¹ M.Sc., Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
² Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 04 June 2023, Accepted: 18 December 2023)

Summary

In recent decades, the study and recognition of liniments has become an important issue in the field of geosciences. Liniments consider could be a schedule hone for the interpretation of gravity information. Besides, it is imperative for a wide extend of topographical information. Be that as it may, elucidation results of gravity information are found to be exceedingly variable among interpreter and need consistency indeed inside a person. In this manner, modern strategies have been displayed to progress the unwavering quality of basic elucidation, and these methods help interpreters to reach similar results from the same gravity data.

Potential field methods play a fundamental role in geophysical explorations. One of the main goals in the interpretation of potential field data is to determine the location and estimate the depth of magnetic and gravity anomalies. Quantitative interpretation methods of potential field data, such as standard Euler, have always been modified in order to increase the accuracy of determining the characteristics of subsurface sources, and generalizations have been made in order to improve the reliability of the results. Standard Euler method is based on choosing the dimensions of the window and depends on the structural index. Therefore, defining a window with suitable dimensions and moving it within the data grid or profile and choosing the appropriate structural index can provide the results of this method with higher accuracy. Since the lack of accurate determination of the structural index can lead to wrong results in depth estimation, Euler's generalizations are presented to remove the structural index from the calculation process. Quality of the field data poses great influence on the Euler inversion solutions. If the data has low signal-to-noise ratio, the computational process will be masked. This issue makes it difficult to outline boundaries of the causative sources.

In this research, in order to determine the location and estimate the depth of the gravity anomaly, a generalization of the standard Euler approach using the singular value decomposition method and the ratio of the horizontal gradient to the analytical signal have been used. Also, the quantity of phase congruency was applied to the data in order to interpret the results more accurately. Compared to the standard Euler, the results show more compliance with the anomaly boundaries. Moreover, the depth estimation interval (histogram) in the improved Euler is smaller than the standard Euler. For further investigation and increasing the credibility of the interpretation, phase congruency was applied to synthetic and real data aiming at more accurately determining the location of the subsurface anomalies.

Keywords: Standard Euler, improved Euler, singular value decomposition, phase congruency