

تخمین عمق به روش جدید اویلر RDAS و مقایسه آن با نتایج مدل سازی؛ مطالعه موردی: داده های گرانی معدن هماتیت

مصطفی موسی پور یاسوری^۱ و وحید ابراهیم زاده 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: ۹۵/۱۰/۲۷، پذیرش نهایی: ۹۶/۸/۲)

چکیده

تخمین عمق ساختارهای زمین شناسی یکی از مهم ترین اهداف مطالعات ژئوفیزیکی است. واهمامیخت اویلر (اویلر استاندارد) یکی از روش های معروف و پرکاربرد در تخمین عمق است. بر پایه اویلر استاندارد روش های متنوعی برای کاهش خطای تخمین عمق معرفی شده است. در این پژوهش از روش جدیدی به نام اویلر RDAS استفاده شده است. این روش با استفاده از اویلر استاندارد به دست می آید و بر پایه گرادیان اول قائم و مشتقات سیگنال تحلیلی استوار است. بررسی داده های گرانی مصنوعی نشان می دهد که اویلر RDAS، در تخمین عمق این داده ها، خطای کمتری از اویلر استاندارد دارد. همچنین از این دو روش برای تخمین عمق داده های گرانی ناشی از توده هماتیت، واقع در استان کرمان، استفاده شده است. جواب های اویلر RDAS در مقایسه با اویلر استاندارد انطباق بیشتری با مرز آنومالی ها دارد و همچنین برای هر آنومالی، جواب ها در بازه قائم کوچکتری قرار دارند که می تواند ملاکی برای دقیق تر بودن جواب های اویلر RDAS باشد. برای بررسی بیشتر با استفاده از وارون سازی به روش کاماچو داده های گرانی معدن هماتیت مدل سازی شده است. افزون بر این، نتایج مدل سازی با نتایج تخمین عمق اویلر مقایسه شده است. در این مقایسه ۱۰ نقطه بر روی آنومالی ها مشخص شده و عمق دقیق آنومالی ها برای این نقاط نشان داده شده است. خطای میانگین مجذور مربعات بین جواب های اویلر و مدل سازی محاسبه شده است. این خطا، بین اویلر RDAS و مدل سازی، کمترین مقدار است که نشان می دهد جواب های اویلر RDAS به جواب های مدل سازی نزدیک است. بنابراین می توان گفت جواب های اویلر RDAS و مدل سازی از اویلر استاندارد دقیق تر است.

واژه های کلیدی: اویلر استاندارد، تخمین عمق، داده های گرانی، سیگنال تحلیلی، ضریب ساختاری، واهمامیخت اویلر.

۱. مقدمه

خطا وجود دارد. برای کاهش اثر ناشی از ضریب ساختاری روش های جدید اویلر استاندارد به گونه ای ارائه شده اند که برای تخمین عمق نیازی به ضریب ساختار نداشته باشند. مطالعات زیادی برای توسعه این روش انجام گرفته است. باربوسا و همکاران (۱۹۹۹) روشی را برای تخمین درست ضریب ساختاری ارائه داده اند. این روش توانست تا حدودی مشکل انتخاب ضریب ساختاری را حل کند اما واگرایی جواب ها که از معادله اویلر استاندارد به وجود می آید همچنان وجود دارد. سالم و همکاران (۲۰۰۳) برای اولین بار سیگنال تحلیلی و اویلر استاندارد را با هم ترکیب کرده و روشی به نام AN-EUL را معرفی کردند که می تواند پارامترهای چشمه و ضریب ساختاری

برای تخمین عمق داده های گرانی روش های مختلفی وجود دارد. از جمله این روش ها واهمامیخت اویلر (اویلر استاندارد) است (رید و همکاران، ۱۹۹۰). اویلر استاندارد بر پایه مشتقات میدان پتانسیل و ضریب ساختاری تعریف می شود و می توان با استفاده از آن مشخصات چشمه را برآورد کرد. از مشکلات اویلر استاندارد تعیین ضریب ساختاری است. ضریب ساختاری عددی است که کاملاً به شرایط چشمه بستگی دارد. رابطه بین ضریب ساختاری با خطای تخمین عمق رابطه ای خطی است. اشتباه در انتخاب ضریب ساختاری می تواند باعث ایجاد خطایی قابل توجه در تخمین عمق شود. همچنین در انتخاب ضریب ساختاری درست برای داده های واقعی همواره

وارون‌سازی غیرخطی کاماچو و همکاران (۲۰۰۲) برای مدل‌سازی استفاده شده است. این روش توانایی وارون‌سازی را، به صورت متمرکز، دارد و برای شناسایی توده‌هایی که تباین چگالی بالایی دارند، مناسب است. برای مقایسه نتایج اویلر و نتایج مدل‌سازی تعداد ۱۰ نقطه بر روی آنومالی‌ها مشخص شده است. محاسبه خطای میانگین مجذور مربعات بین جواب‌های اویلر و مدل‌سازی نشان می‌دهد که جواب‌های اویلر RDAS به نتایج مدل‌سازی نزدیک است.

۲. روش تحقیق

اویلر استاندارد با استفاده از مشتقات میدان پتانسیل به صورت زیر تعریف می‌شود (تامسون، ۱۹۸۲؛ رید، ۱۹۹۰):

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

که در آن f میدان پتانسیل مشاهده‌ای است و z, y, x مختصات نقطه برداشت که معلوم هستند. z_0, y_0, x_0 مختصات چشمه، B مقدار میدان کل منطقه‌ای و یا پتانسیل آشفته است که مجهول هستند. N ضریب ساختاری است که به ساختار چشمه وابسته است و نیاز به اطلاعات اولیه از چشمه دارد. $\frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial x}$ به ترتیب نشان‌دهنده گرادیان افقی در راستای x, y هستند و $\frac{\partial f}{\partial z}$ گرادیان اول قائم است. روست و همکاران (۱۹۹۲) سیگنال تحلیلی با میدان پتانسیل f را به صورت زیر تعریف کردند:

$$A(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} + i \frac{\partial f(x, y)}{\partial z} \quad (2)$$

دامنه سیگنال تحلیلی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right]^2 + \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial z}\right]^2} \quad (3)$$

هانگ و همکاران (۱۹۹۵) نشان دادند که اگر ضریب ساختاری برای میدان پتانسیل N باشد، ضریب ساختاری برای سیگنال تحلیلی $N+1$ است و در معادله اویلر به صورت زیر صدق می‌کند:

را تخمین بزنند. این روش به دلیل استفاده از مشتقات درجه سوم، باعث افزایش نوفه در داده‌ها می‌شود. سالم و همکاران (۲۰۰۸) روش اویلر تیلر را برای تفسیر داده‌های مغناطیسی معرفی کردند. این روش از افزایش خطای ناشی از انتخاب ضریب ساختاری نادرست جلوگیری می‌کند. این روش حجم محاسبات را افزایش می‌دهد. بیکی (۲۰۱۰) نشان داد که دامنه سیگنال تحلیلی را می‌توان مستقیم به معادلات همگن اویلر وارد کرد و مشخصات ساختارهای زمین‌شناسی را محاسبه کرد؛ همچنین نشان داد که استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی در تخمین عمق بهتر از سیگنال تحلیلی عمل می‌کند. بر پایه یافته‌های سالم و همکاران (۲۰۰۸) و ژانگ (۲۰۱۰) ترکیب اویلر استاندارد و سیگنال تحلیلی باعث کاهش نوفه در تخمین ضریب ساختاری و عمق می‌شود. روش‌های گوناگون دیگری نیز معرفی شده‌اند. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مقالات سالم و همکاران (۲۰۰۷a) و (۲۰۰۷b)، کوپر (۲۰۱۵ و ۲۰۱۴)، ما (۲۰۱۴)، کیتینگ (۱۹۹۸)، کیتینگ و همکاران (۲۰۰۴)، کلینگ و مارسون (۱۹۹۱)، مارسون و کلینگ (۱۹۹۳)، بیکی (۲۰۱۳) و هسو (۲۰۰۲) رجوع کرد.

در این پژوهش از روش جدید اویلر که ترکیبی از واهمامیخت اویلر و سیگنال تحلیلی است، استفاده شده است. این روش اویلر RDAS نام دارد که با استفاده از اویلر استاندارد به دست می‌آید و بر پایه گرادیان اول قائم و مشتقات سیگنال تحلیلی قرار دارد. استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی در تخمین عمق بهتر از سیگنال تحلیلی عمل می‌کند. توانایی این روش با استفاده از مدل‌های مصنوعی مختلف سنجیده شده است. اویلر RDAS در تخمین عمق داده‌های مصنوعی بهتر از اویلر استاندارد عمل کرده است. همچنین در داده‌های واقعی، نتایج اویلر RDAS، در مقایسه با اویلر استاندارد، در بازه کوچک‌تری قرار دارند و انطباق بیشتری با مرز آنومالی‌ها دارند. برای مقایسه نتایج اویلر در داده‌های واقعی از مدل‌سازی معکوس استفاده شده است. در این پژوهش از روش

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial x_1} & \frac{\partial r}{\partial y_1} & \frac{\partial r}{\partial z_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r}{\partial x_n} & \frac{\partial r}{\partial y_n} & \frac{\partial r}{\partial z_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \frac{\partial r}{\partial x_1} + y_1 \frac{\partial r}{\partial y_1} + z_1 \frac{\partial r}{\partial z_1} \\ \vdots \\ x_n \frac{\partial r}{\partial x_n} + y_n \frac{\partial r}{\partial y_n} + z_n \frac{\partial r}{\partial z_n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

برای هر پنجره معادله ماتریس توسط روش کمترین مربعات به صورت زیر حل می شود و مقادیر مجهول (x_0, y_0, z_0) برای هر پنجره به دست می آید:

$$Ax = D \\ x = (A^T A)^{-1} A^T D \quad (13)$$

۳. مدل سازی

مدل سازی های مختلفی برای نشان دادن کارایی روش بیان شده انجام گرفته است. چهار مدل گرانی جهت تعیین مشخصات چشمه بر روی این روش امتحان شده و نتایج آن با اوایلر استاندارد مقایسه شده است. اثر گرانی مدل مصنوعی با استفاده از رابطه ریاضی پلوف (گرکنز، ۱۹۸۹) تولید شده است:

$$g = Gp \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[Z_k \arctan \frac{x_i y_j}{Z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (14)$$

که در آن

$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2} \\ \mu_{ijk} = (-1)^{i+j+k} \quad (15)$$

و p تباین چگالی بلوک با چگالی محیط در بر گیرنده آن، G ثابت جهانی گرانش و $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3, z_1, z_2, z_3$ محدوده بلوک است.

۳-۱. مدل شماره ۱

در این مدل، هدف مکعبی به ابعاد ۱۵ متر و در عمق ۱۵ متری قرار دارد. تباین چگالی آن ۱ گرم بر سانتی متر مکعب است. مشخصات این مدل در جدول ۱ و اثر گرانی آن بر حسب میکروگال در شکل ۱ آمده است.

$$(x - x_0) \frac{\partial A}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial A}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial A}{\partial z} = -(N + 1)A \quad (4)$$

اگر از معادله ۱ نسبت به Z مشتق گرفته شود و B مقداری ثابت باشد ($\frac{\partial B}{\partial z} = 0$) می توان نوشت (گوا و همکاران، ۲۰۱۴):

$$(x - x_0) \frac{\partial f_z}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f_z}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial f_z}{\partial z} = -(N + 1)f_z \quad (5)$$

که در آن $f_z = \frac{\partial f}{\partial z}$ است. معادلات ۴ و ۵ به ترتیب در f_z و A ضرب شده است. بعد از محاسباتی مختصر، اوایلر RDAS به صورت زیر به دست می آید (گوا و همکاران، ۲۰۱۴):

$$(x - x_0) \left(\frac{\partial A}{\partial x} f_z - \frac{\partial f_z}{\partial x} A \right) + (y - y_0) \left(\frac{\partial A}{\partial y} f_z - \frac{\partial f_z}{\partial y} A \right) + (z - z_0) \left(\frac{\partial A}{\partial z} f_z - \frac{\partial f_z}{\partial z} A \right) = 0 \quad (6)$$

اگر Γ نسبت مشتق اول به سیگنال تحلیلی باشد، مشتق Γ نسبت به X, Y, Z را می توان به صورت زیر نوشت (گوا و همکاران، ۲۰۱۴):

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\frac{\partial A}{\partial x} f_z - \frac{\partial f_z}{\partial x} A}{|A|^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial r}{\partial y} = \frac{\frac{\partial A}{\partial y} f_z - \frac{\partial f_z}{\partial y} A}{|A|^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial r}{\partial z} = \frac{\frac{\partial A}{\partial z} f_z - \frac{\partial f_z}{\partial z} A}{|A|^2} \quad (9)$$

معادلات ۷ تا ۹ در معادله ۶ جا گذاری می شود.

$$(x - x_0) \left(\frac{\partial r}{\partial x} \right) + (y - y_0) \left(\frac{\partial r}{\partial y} \right) + (z - z_0) \left(\frac{\partial r}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

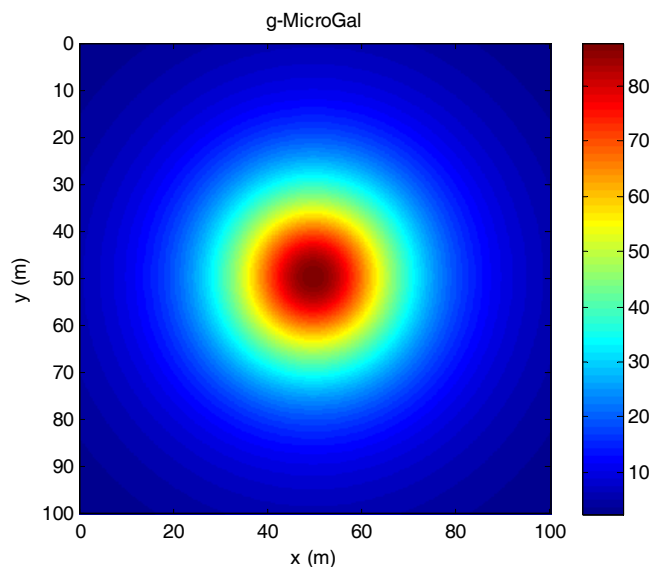
در نهایت اوایلر RDAS به صورت معادله ۱۰ نوشته می شود:

$$x_0 \frac{\partial r}{\partial x} + y_0 \frac{\partial r}{\partial y} + z_0 \frac{\partial r}{\partial z} = x \frac{\partial r}{\partial x} + y \frac{\partial r}{\partial y} + z \frac{\partial r}{\partial z} \quad (11)$$

اگر در هر پنجره n داده وجود داشته باشد، می توان رابطه فوق را به صورت ماتریسی زیر نوشت:

جدول ۱. مشخصات مدل شماره ۱.

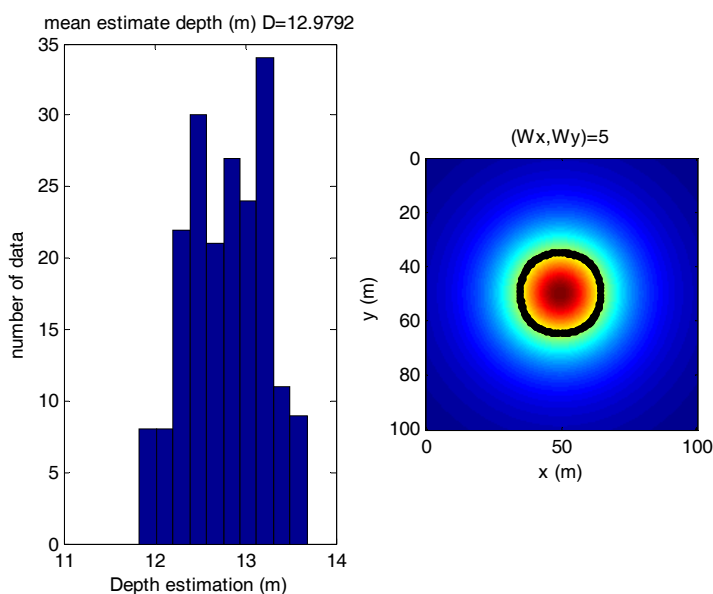
مدل شماره ۱	عرض (متر)	طول (متر)	عمق بالا (متر)	عمق پایین (متر)	تباين چگالي (g/cm^3)
مکعب	۱۵	۱۵	۱۵	۳۰	۱



شکل ۱. اثر گرانی مدل شماره ۱ (بر حسب میکروگال).

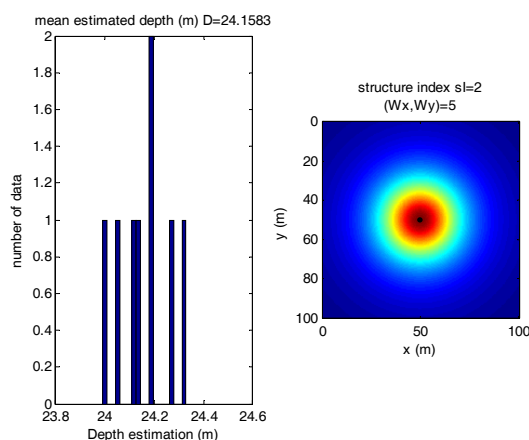
و 11×11 برای این مدل استفاده شده است. بازه جواب این پنجره‌ها بین ۱۰ تا ۱۶ متر بوده است و متوسط جواب بین ۱۲ تا ۱۲/۵ متر است. افزایش طول پنجره باعث می‌شود که جواب‌ها در مختصات قائم دچار پراکندگی شوند. به عبارت دیگر طول بازه تمرکز جواب‌ها افزایش می‌یابد.

از بین پنجره‌های مختلف امتحان‌شده برای اوپلر RDAS، پنجره با پهنای 5×5 مناسب تشخیص داده شد. عمق به‌دست‌آمده در بازه ۱۲ تا ۱۴ متر قرار دارد و عمق متوسط این بازه ۱۳ متر است که با خطای ۲ متر عمق بالایی مکعب را نشان می‌دهد. همچنین پنجره با پهنای 7×7 ، 9×9

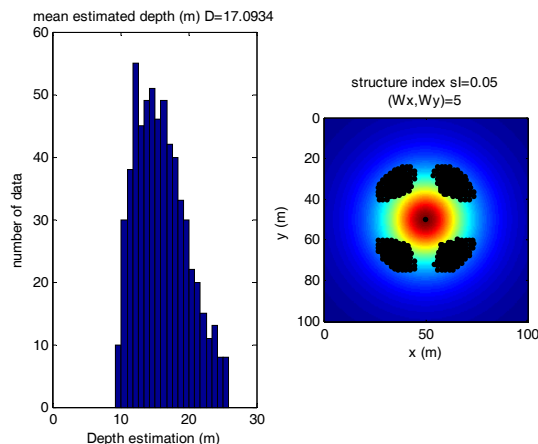

 شکل ۲. نتایج تخمین عمق اوپلر RDAS با پهنای پنجره 5×5 بر روی مدل شماره ۱.

مناسب تشخیص داده شد. جواب‌های به‌دست‌آمده با ضریب ساختاری ۰/۰۵ در بازه ۱۰ تا ۲۵ متر قرار دارد و عمق متوسط این بازه در حدود ۱۷ متر است که با اختلاف ۲ متر عمق بالایی مکعب را نشان می‌دهد. جواب‌های اویلر استاندارد برای کره گرانی در مرکز جسم قرار دارد (هسو، ۲۰۰۲). جواب‌های ضریب ساختاری ۲ نیز در مرکز آنومالی دارد و مقدار آن ۲۴ متر است که به مرکز مدل نزدیک است (مرکز مدل: ۲۲/۵). بنابراین فرض انتخاب ضریب ساختاری کره برای این مدل فرض درستی بوده است. خطای تخمین عمق اویلر استاندارد با ضریب ساختاری ۲ با توجه به مرکز مدل در حدود ۱/۵ متر است. طول بازه تمرکز جواب اویلر RDAS در حدود ۲ متر و طول بازه تمرکز جواب اویلر استاندارد با ضریب ساختاری ۰/۰۵ در حدود ۱۵ متر است. بنابراین اویلر RDAS در مقایسه با ضریب ساختاری ۰/۰۵ جواب مناسب‌تری ارائه می‌دهد. به دلیل اینکه ضریب ساختاری ۲ مرکز مدل و اویلر RDAS لبه و عمق بالایی مدل را نشان می‌دهد، نتایج این دو تخمین عمق قابل مقایسه نیست. اما هر دو با خطای کمی نتایج مناسبی را ارائه می‌دهند.

برای تخمین عمق مدل شماره ۱ از اویلر استاندارد نیز استفاده شده است. انتخاب ضریب ساختاری در روش اویلر استاندارد برای داده‌های واقعی همواره به‌عنوان یک چالش مطرح است. اما در داده‌های مصنوعی انتخاب ضریب ساختاری مکعب نیز یک چالش است. بیکی (۲۰۱۰) ضریب ساختاری مکعب گرانی را با استفاده از روش ارائه‌شده نزدیک به صفر برآورد کرده است. همچنین در این مقاله برای مکعب از ضریب ساختاری ۰/۲ در اویلر استاندارد استفاده شده است. مارسون و کلینگل (۱۹۹۳) از ضریب ساختاری ۰/۰۵ برای مکعب استفاده کرده‌اند. در این مقاله نیز از ضریب ساختاری ۰/۰۵ (نزدیک به صفر) برای مکعب گرانی استفاده شده است. در مدل شماره ۱ به دلیل اینکه نسبت ابعاد مکعب به عمق بالایی مکعب مقداری کوچک است، می‌توان مکعب را کره فرض کرد و از ضریب ساختاری کره استفاده کرد. ضریب ساختاری کره برابر با ۲ است. نتایج اویلر استاندارد با استفاده از ضریب ساختاری ۰/۰۵ و ۲ در شکل ۳ نشان داده شده است. برای این دو ضریب ساختاری از بین پنجره‌های امتحان شده با پهناهای گوناگون، پنجره با پهنا ۵×۵



(ب)



(الف)

شکل ۳. نتایج اویلر استاندارد مدل شماره ۱ با پهنا ۵×۵ پنجره: الف: ضریب ساختاری ۰/۰۵؛ ب: ضریب ساختاری ۲.

۳-۲. مدل شماره ۲

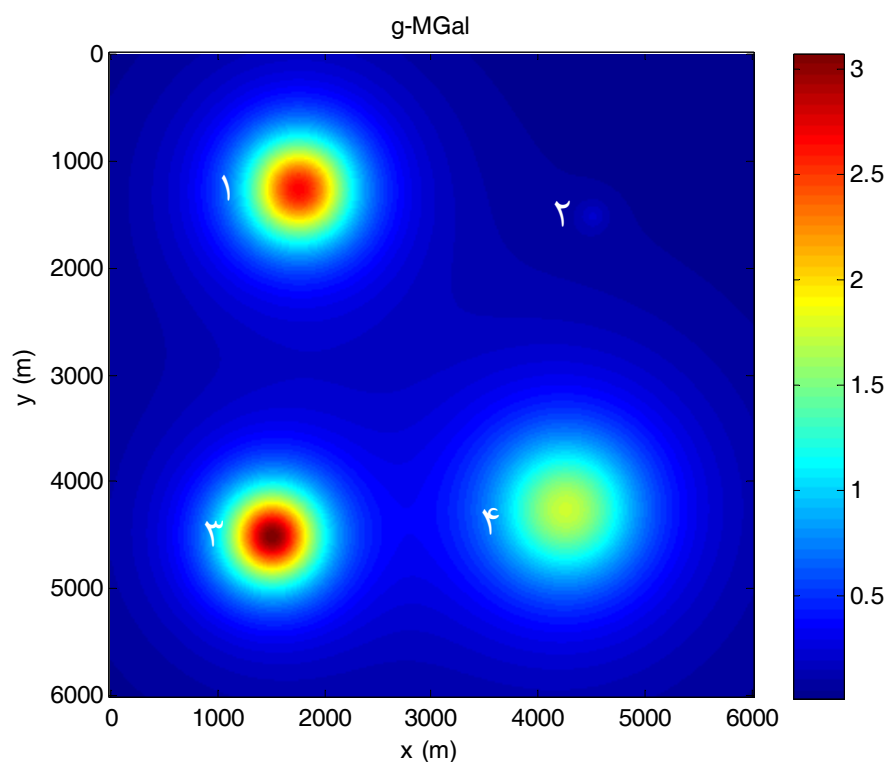
در این مدل از دو مکعب به ابعاد ۵۰۰ متر در عمق‌های ۳۰۰ و ۵۰۰ متر و دو کره به شعاع ۱۵۰ و ۵۰۰ متر است، استفاده شده است. تباین چگالی هر کدام برابر با ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. مشخصات این مدل در جدول ۲ و اثر گرانی مدل بر حسب میلی‌گال در شکل ۴ نشان داده

شده است.

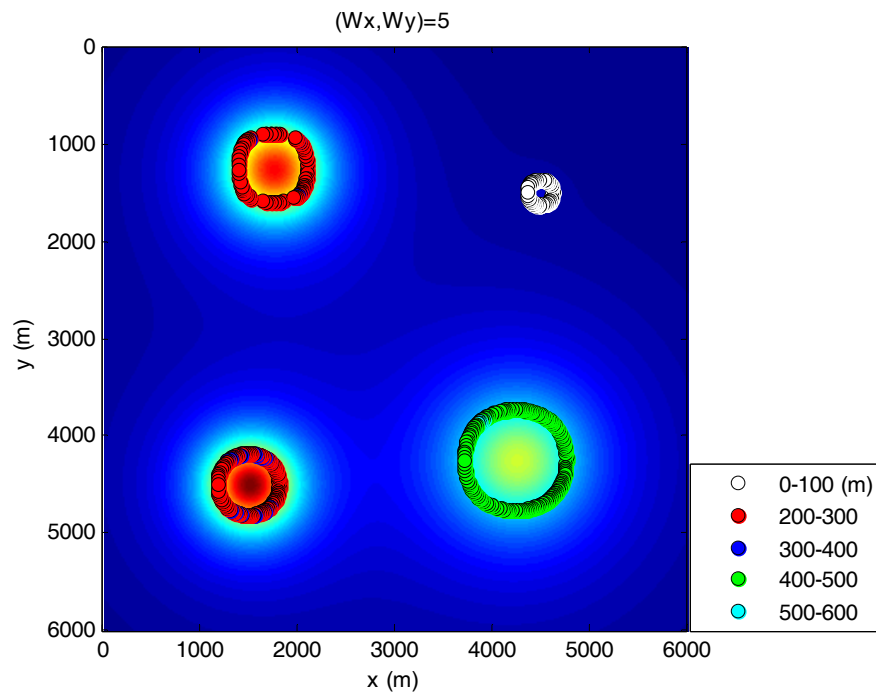
برای تخمین با استفاده از اوپلر RDAS در بین پهناهای پنجره‌های مختلف امتحان شده، پهنای ۵×۵ مناسب تشخیص داده شد. نتایج تخمین عمق این پنجره در شکل ۵ نشان داده شده است. از نمایش دوبعدی برای بهتر نشان دادن نتایج اوپلر RDAS استفاده شده است. شکل ۶ نمایش دوبعدی تخمین عمق شکل ۵ است.

جدول ۲. مشخصات مدل مصنوعی شماره ۲.

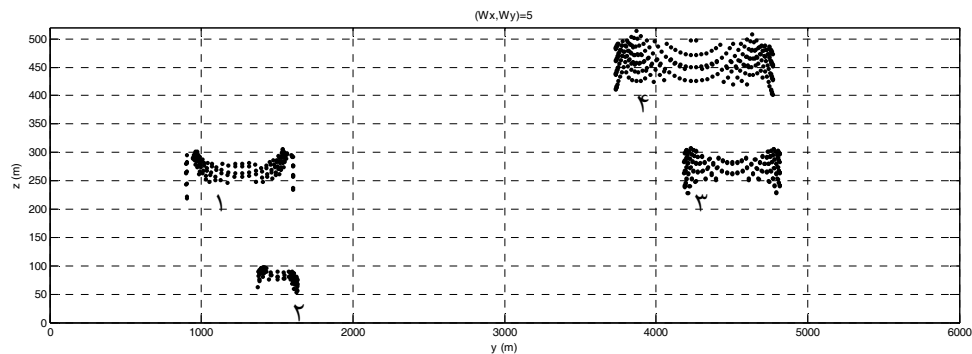
تباین چگالی (g/cm ³)	مرکز جسم (متر)	عمق پایین (متر)	عمق بالا (متر)	ابعاد / شعاع (متر)	مدل شماره ۲
۱	۵۵۰	۸۰۰	۳۰۰	۵۰۰×۵۰۰×۵۰۰	مکعب شماره ۱
۱	۱۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	کره شماره ۲
۱	۵۰۰	۸۰۰	۲۰۰	۳۰۰	کره شماره ۳
۱	۷۵۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰×۵۰۰×۵۰۰	مکعب شماره ۴



شکل ۴. اثر گرانی مدل دوم.



شکل ۵. نتایج اویلر RDAS مدل دوم با پهنای پنجره 5×5 (بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر جوابی وجود ندارد).



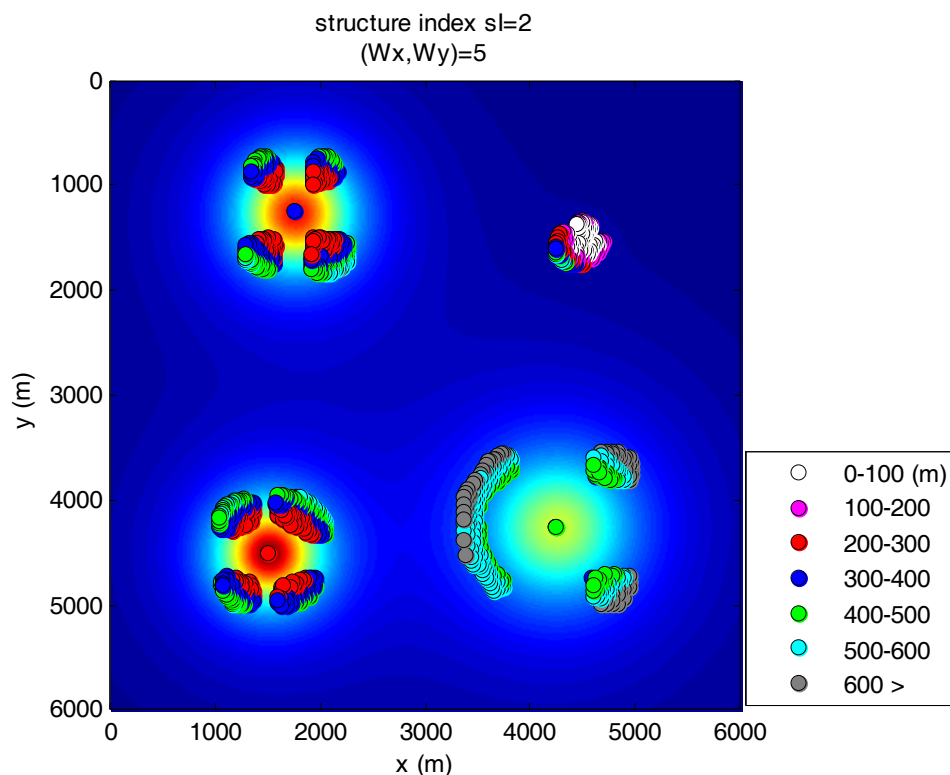
شکل ۶. نمایش دوبعدی نتایج اویلر RDAS برای مدل شماره ۲ با پهنای پنجره 5×5 (اعداد وسط شکل شماره جسم در جدول ۲ است).

است و عمق بالایی را نشان می‌دهد. همچنین خطای تخمین عمق، به ترتیب شماره، برابر با $8/5$ ، 24 ، $36/5$ و 6 درصد است. خطای تخمین عمق با استفاده از عمق بالایی اشکال هندسی محاسبه شده است. اویلر RDAS در تخمین عمق مکعب دقیق‌تر عمل کرده است. در تخمین عمق این مدل، با استفاده از اویلر استاندارد، پنجره با پهنای 5×5 مناسب تشخیص داده شد. در انتخاب بهترین پهنای پنجره، کوچک‌ترین طول بازه جواب در بین پنجره‌های مختلف لحاظ شده است. در بین ضریب ساختاری‌های

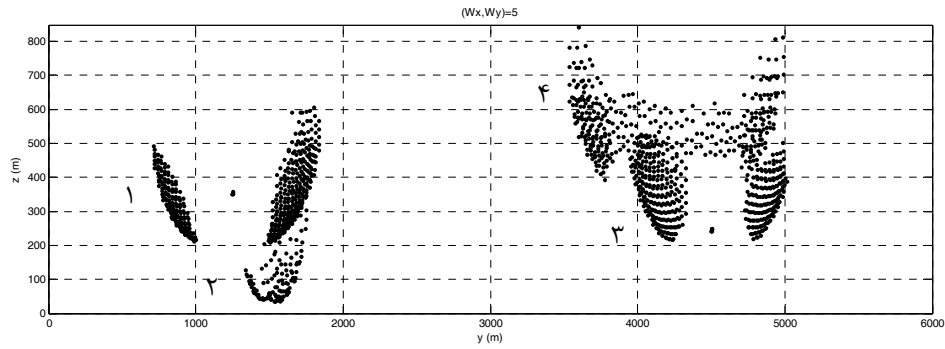
بازه تمرکز جواب برای مکعب شماره ۱ در بازه $304-245$ متر، کره شماره ۲ در بازه $98-54$ متر، کره شماره ۳ در بازه $306-240$ متر و مکعب شماره ۴ در بازه $515-426$ متر قرار دارد. بازه تمرکز جواب، بیشترین تعداد جواب در یک محدوده است. در این بازه، جواب‌هایی که فاصله بیشتری با این محدوده دارند لحاظ نمی‌شوند. بنابراین متوسط این بازه به عنوان جواب در نظر گرفته می‌شود. متوسط عمق برآوردی اویلر RDAS برای اشکال هندسی شماره ۱ تا ۴ به ترتیب برابر $274/5$ ، 76 ، 273 و 470 متر

توجه به انتخاب ضریب ساختاری ۲، عمق به دست آمده برای مرکز جسم را نشان می دهد. خطای تخمین عمق با توجه به مرکز اشکال هندسی به ترتیب ۳۵، ۳۴، ۲۸ و ۱۷/۶ درصد است. در جدول ۳ نتایج اویلر RDAS و اویلر استاندارد مقایسه شده است. با توجه به جدول طول بازه تمرکز جواب اویلر استاندارد، به ترتیب شماره مدل، ۲۸۸، ۱۰۹، ۲۸۴ و ۴۵۰ متر است. طول این بازه در اویلر RDAS، ۵۹، ۴۴، ۶۶ و ۸۹ متر است. طول بازه تمرکز جواب ها با استفاده از اویلر RDAS از ۶۵ متر (کره شماره ۲) تا ۳۶۱ متر (مکعب شماره ۴) بهبود یافته است. در تخمین عمق کره شماره ۳، اویلر RDAS ۳ درصد خطای بیشتر از اویلر استاندارد نشان می دهد اما طول بازه تمرکز جواب آن ۲۱۸ متر کوچک تر است؛ بنابراین کیفیت تخمین عمق آن بیشتر است. در تخمین عمق سایر اشکال هندسی نیز اویلر RDAS بازه تخمین عمق کوچک تر، درصد خطای کمتر و تعیین لبه بهتری را نشان می دهد.

مختلف استفاده شده برای این مدل ضریب ساختاری ۲ بهترین نتایج را ارائه می دهد (برای مکعب شماره ۴ به دلیل کوچک بودن نسبت ابعاد مکعب به عمق آن می توان از ضریب ساختاری کره استفاده کرد. برای مکعب شماره ۱ ضریب ساختاری کره را نمی توان استفاده کرد. محدودیت انتخاب ضریب ساختاری در مدل ترکیبی خود را نشان می دهد). شکل ۷ نتایج تخمین عمق اویلر استاندارد را برای مدل شماره ۲ نشان می دهد. با توجه به شکل مختصات افقی برآوردی کیفیت خوبی ندارد. شکل ۸ پراکندگی قائم جواب ها را به صورت دوبعدی نشان می دهد. با توجه به شکل، بازه تمرکز جواب به صورت حدودی برای مکعب شماره ۱ بین ۲۱۲ تا ۵۰۰ متر، برای کره شماره ۲ بین ۴۴ تا ۱۵۳ متر، برای کره شماره ۳ بین ۲۱۸ تا ۵۰۲ متر و برای مکعب شماره ۴ بین ۳۹۳ تا ۸۴۳ متر است. متوسط عمق برآوردی در این بازه، به ترتیب شماره مدل، برابر با ۳۵۶، ۹۸/۵، ۳۶۰ و ۶۱۸ متر است. با



شکل ۷. نتایج اویلر استاندارد با پهنای پنجره ۵×۵ و ضریب ساختاری ۰/۰۵ بر روی مدل شماره ۲.



شکل ۸. نمایش دو بعدی نتایج اویلر استاندارد برای مدل شماره ۲ با ضریب ساختاری ۲ و پهنای پنجره ۵×۵ (اعداد وسط شکل شماره جسم در جدول ۲ است).

جدول ۳. مقایسه نتایج اویلر استاندارد و اویلر RDAS مدل شماره ۲.

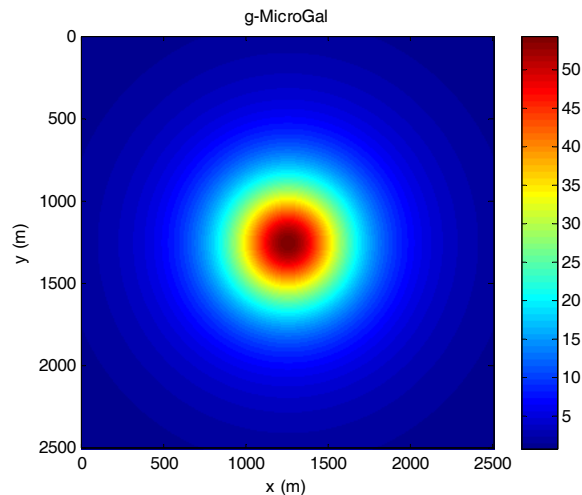
مدل	اویلر RDAS				اویلر استاندارد با ضریب ساختاری ۲			
	بازه تمرکز (متر)	طول بازه (متر)	متوسط بازه (متر)	خطا (با توجه به عمق بالایی) (درصد)	بازه تمرکز (متر)	طول بازه (متر)	متوسط بازه (متر)	خطا (با توجه به عمق مرکز) (درصد)
مکعب شماره ۱	۲۴۵-۳۰۴	۵۹	۲۷۴/۵	۸/۵	۲۱۲-۵۰۰	۲۸۸	۳۵۶	۳۵
کره شماره ۲	۵۴-۹۸	۴۴	۷۶	۲۴	۴۴-۱۵۳	۱۰۹	۹۸/۵	۳۴
کره شماره ۳	۲۴۰-۳۰۶	۶۶	۲۷۳	۳۶/۵	۲۱۸-۵۰۲	۲۸۴	۳۶۰	۲۸
مکعب شماره ۴	۴۲۶-۵۱۵	۸۹	۴۷۰	۶	۳۹۳-۸۴۳	۴۵۰	۶۱۸	۱۷/۶

۳-۳. مدل شماره ۳

در این مدل، مکعب به ابعاد ۱۰۰ متر در عمق ۳۰۰ تا ۴۰۰ مشخصات مدل به ترتیب در شکل ۹ و جدول ۴ نشان داده شده است. اثر گرانی بر حسب میکروگال و

جدول ۴. مشخصات مدل مصنوعی شماره ۳.

مدل شماره ۳	عرض (m)	طول (m)	عمق بالا (m)	عمق پایین (m)	تباين چگالي (g/cm^3)
مکعب	۱۰۰	۱۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۱

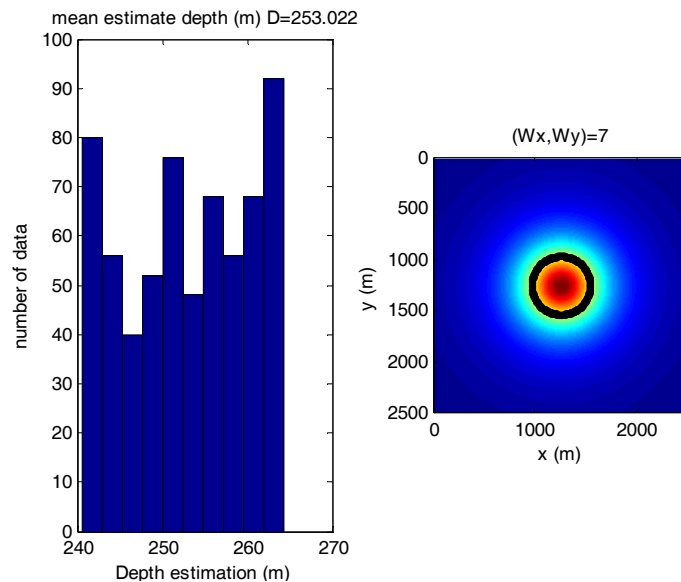


شکل ۹. اثر گرانی مدل شماره ۳.

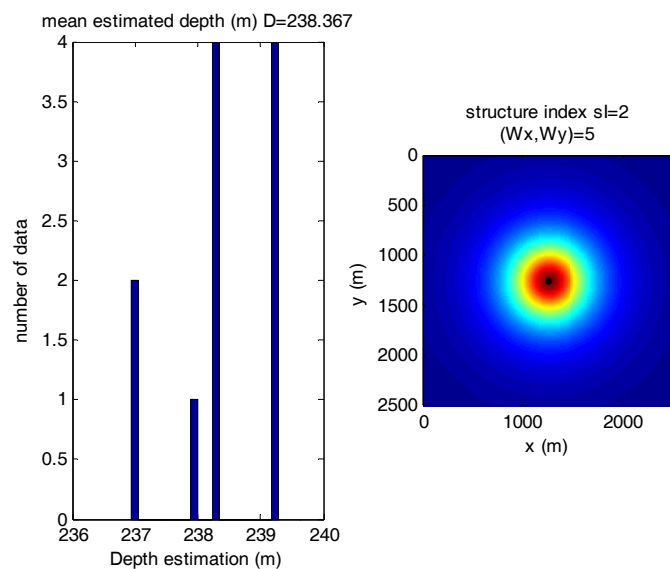
برآوردی با ضریب ساختاری ۰/۰۵ خطای کمی دارد (۳/۴ درصد) اما طول بازه پراکندگی جواب بیش از دو برابر ابعاد مدل است که باعث می‌شود این تخمین عمق مناسب نباشد.

نتایج به‌دست‌آمده از اجرای برنامه اویلر استاندارد در محیط نرم‌افزار متلب (نوشته‌شده توسط نگارنده) با نتایج حاصل از اویلر استاندارد در نرم‌افزار ژئوسافت مقایسه شده است. در تخمین عمق با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت، پنجره با پهنای ۵×۵ و ضریب ساختاری ۲ استفاده شده است. نتایج اویلر ژئوسافت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. عمق تخمینی نزدیک به ۲۰۰ متر است. از ضریب ساختاری ۰/۰۵ نیز در اویلر ژئوسافت استفاده شده است. عمق تخمینی با فاصله از مرکز آنومالی افزایش می‌یابد و در نزدیکی مرکز آنومالی ۱۶۰ متر و در گوشه‌های آنومالی ۴۰۰ متر است. نتایج حاصله از کد متلب نوشته‌شده توسط نگارنده با نتایج اویلر ژئوسافت تقریباً مطابقت دارد. اویلر RDAS در مقایسه با اویلر استاندارد با ضریب ساختاری ۰/۰۵ طول بازه جواب کوچک‌تری دارد و در مقایسه با اویلر استاندارد با ضریب ساختاری ۲ خطای کمتری دارد.

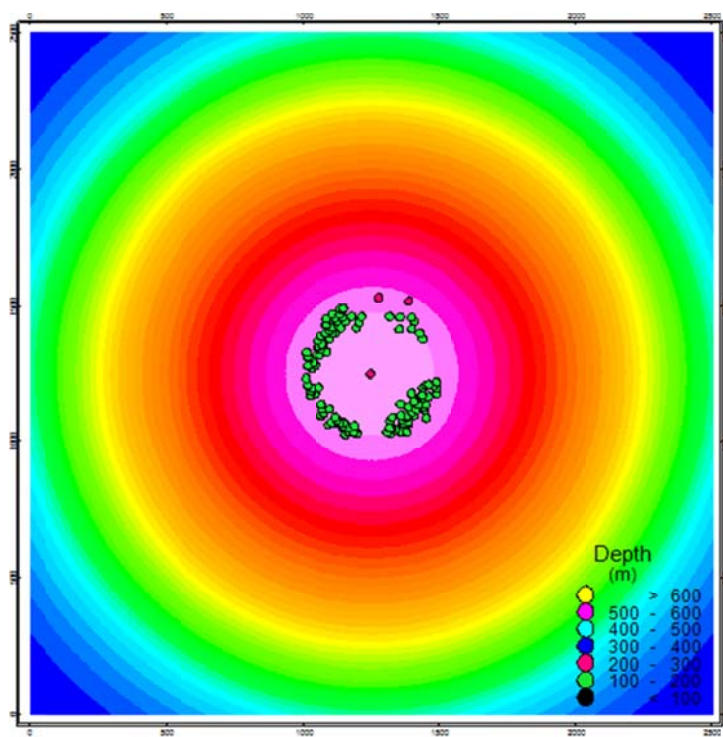
در تخمین عمق مدل شماره ۳ با استفاده از اویلر RDAS در بین پنجره‌های مختلف امتحان‌شده، پنجره با پهنای ۷×۷ مناسب تشخیص داده شد. در شکل ۱۰ نتایج این تخمین عمق نشان داده شده است. تمرکز جواب در بازه ۲۴۱ تا ۲۶۴ متر است (طول بازه، ۲۳ متر). عمق متوسط ۲۵۳ متر است که با خطای ۴۷ متری (۱۵ درصد) عمق بالایی مکعب را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه نسبت ابعاد مکعب به عمق آن کوچک‌تر از ۱ است (۰/۳۳) مانند مدل شماره ۱، از ضریب ساختاری کره ۲ در اویلر استاندارد استفاده شده است. از بین پنجره‌های مختلف امتحان‌شده، پنجره با پهنای ۵×۵ مناسب تشخیص داده شد. جواب‌های به‌دست‌آمده مرکز آنومالی را نشان می‌دهند. این نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. عمق تخمینی در بازه ۲۳۷ تا ۲۳۹ متر قرار دارد و متوسط عمق برآوردی ۲۳۸ متر است. این عدد از مرکز مکعب ۱۱۲ متر فاصله دارد (۳۲ درصد خطا). از ضریب ساختاری ۰/۰۵ نیز در اویلر استاندارد استفاده شده است. کوچک‌ترین بازه پراکندگی قائم جواب‌ها با استفاده از پهنای پنجره ۱۱×۱۱ به دست آمده است. طول این بازه ۲۱۱ متر و عمق متوسط برآوردی از این بازه ۳۱۰ متر است. هرچند عمق متوسط



شکل ۱۰. نتایج اویلر RDAS با پهنای پنجره ۷×۷ بر روی مدل شماره ۳.



شکل ۱۱. نتایج اوپلر استاندارد (کد متلب) با پهنای پنجره ۵×۵ و ضریب ساختاری ۲ بر روی مدل شماره ۳.



شکل ۱۲. نتایج اوپلر استاندارد نرم افزار ژئوسافت با پهنای پنجره ۵×۵ و ضریب ساختاری ۲ بر روی مدل شماره ۳.

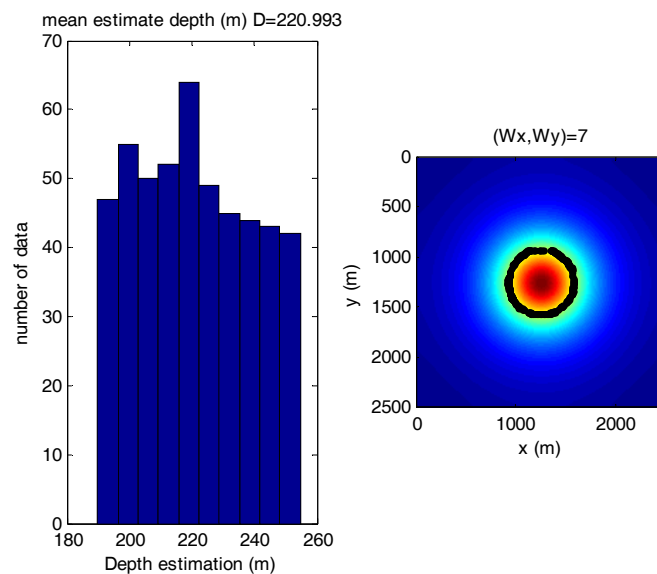
۳-۴ داده های دارای نوفه

شماره ۳ اضافه شده است. نقشه گرادین ها به نوفه حساس است. افزایش درجه گرادین نیز باعث افزایش نوفه در نقشه می شود. روش RDAS از ترکیب مشتقات سیگنال تحلیلی و مشتق قائم استفاده می کند؛ بنابراین به نوفه

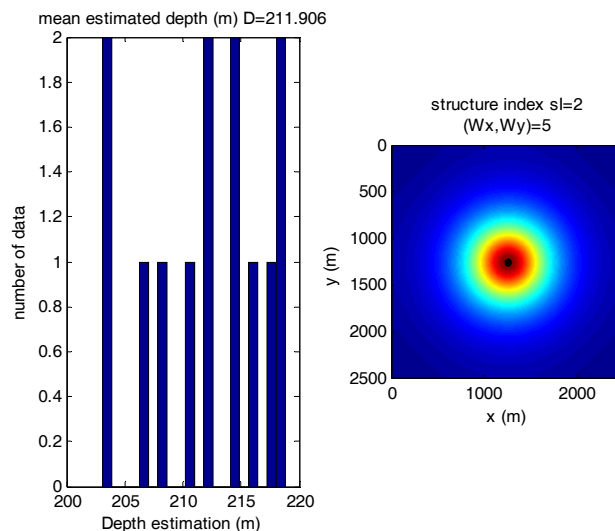
نوفه تصادفی گوسی با استفاده از دستور randn در محیط نرم افزار متلب تولید شده است. یک درصد ماکزیمم سیگنال گرانی به عنوان نوفه به داده های گرانی مدل

(طول بازه، ۶۲ متر). متوسط این مقدار یعنی ۲۲۱ متر به عنوان جواب انتخاب می شود (۲۶ درصد خطا). در این بررسی از اوپلر استاندارد با ضریب ساختاری ۲ استفاده شده است. از ضریب ساختاری ۰/۰۵ به دلیل بزرگ بودن بازه پراکندگی جواب استفاده نشده است (نتایج مدل شماره ۳). شکل ۱۴ نتایج اوپلر استاندارد را نشان می دهد. بازه تخمین عمق در حدود ۲۰۳ تا ۲۱۹ متر و متوسط آن ۲۱۲ متر است. خطای تخمین عمق با توجه به مرکز مکعب (۳۵۰ متر) در حدود ۳۹ درصد است.

حساس است. خطای تخمین عمق اوپلر RDAS برای داده های دارای نوفه بسیار زیاد است. در تخمین عمق داده های دارای نوفه، توسط روش هایی نظیر فیلتر فراسوی، نوفه موجود در داده ها را کاهش می دهند. در این بررسی برای کاهش نوفه از فیلتر فراسوی ۵۰ متر استفاده شده است. توانایی روش اوپلر RDAS با نوفه کاهش یافته بررسی شده است. شکل ۱۳ نتایج تخمین عمق اوپلر RDAS برای نوفه کاهش یافته را نشان می دهد. با توجه به شکل، بازه تخمین عمق در حدود ۱۹۲ تا ۲۵۴ متر است



شکل ۱۳. نتایج اوپلر RDAS بر روی مدل شماره ۳ دارای نوفه با فراسوی ۵۰ متر.

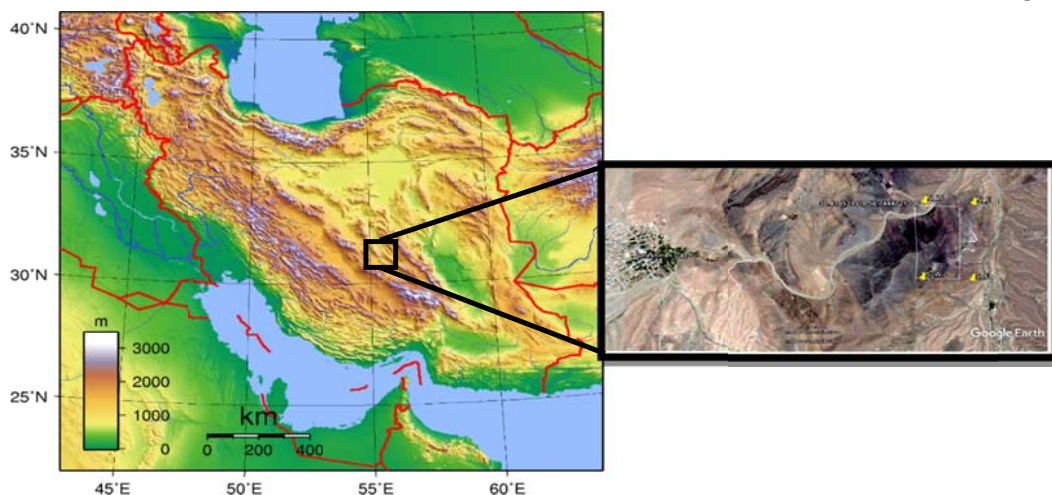


شکل ۱۴. نتایج اوپلر استاندارد بر روی مدل شماره ۳ دارای نوفه با فراسوی ۵۰ متر.

قرار دارد (شکل ۱۵). تعداد ۷۵۰ نقطه در امتداد پروفیل‌های شرقی- غربی برداشت شده‌اند. فواصل نقاط در روی پروفیل حدود ۱۰ متر و فواصل پروفیل‌ها از یکدیگر حدود ۳۰ متر است. مختصات نقاط بعد از علامت‌گذاری بر روی زمین با استفاده از GPS دو فرکانسه تریپل و در سیستم مختصات UTM برداشت شده‌اند. مقادیر شتاب جاذبه نسبی زمین بین این نقاط توسط دستگاه گراویمتر CG3 برداشت شده است. بعد از تصحیحات هوای آزاد، بوگه و توپوگرافی نقشه آنومالی بوگه محاسبه شده است. نقشه توپوگرافی منطقه نیز با استفاده از دستگاه‌های نقشه‌برداری اشاره شده، در مقیاس ۱:۱۰۰۰ متر تهیه شده است (شکل ۲۱). این داده‌ها توسط بخش گرانی‌سنجی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برداشت شده است.

۴-۱. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

بافت غالب منطقه مورد مطالعه از رسوبات آذر آواری کامبرین بالایی و دونین تشکیل شده است. رسوبات دونین عمدتاً از آهک دولومیتی تشکیل شده‌اند. رسوبات آذر آواری کامبرین عمدتاً از ریولیت، ریوداسیت و توف است که بیرون‌زدگی‌هایی از اکسید آهن (هماتیت) به رنگ سیاه و با شیب (در حدود ۳۰ درجه و به سمت غرب) و لایه‌بندی دیگر طبقات دیده می‌شود.



شکل ۱۵. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

جواب‌های اویلر RDAS در داده‌های همراه با نوفه پراکندگی قائم بیشتری در مقایسه با داده‌های بدون نوفه دارند. طول بازه تمرکز جواب برای داده‌های بدون نوفه ۲۳ متر و برای داده‌های دارای نوفه ۶۲ متر است. همچنین خطای تخمین عمق از ۱۵ درصد به ۲۶ درصد رسیده است. بازه تمرکز جواب اویلر استاندارد در داده‌های بدون نوفه ۲ متر و در داده‌های همراه با نوفه ۱۶ متر است و خطای تخمین عمق از ۳۲ درصد به ۳۹ درصد افزایش پیدا کرده است. وجود نوفه در داده‌ها کیفیت تخمین عمق اویلر RDAS و اویلر استاندارد را کاهش می‌دهد. افزایش طول بازه جواب و افزایش درصد خطا به معنی کاهش کیفیت تخمین عمق است. بنابراین هرچند اویلر RDAS به دلیل استفاده از مشتقات درجه بالا به نوفه حساس است و دقت آن کاهش می‌یابد اما این نقص را با استفاده از روش‌های کاهش نوفه می‌توان تا حدودی برطرف کرد. به‌طوری که برای داده‌های دارای نوفه (این مدل) نتایج اویلر RDAS در مقایسه با اویلر استاندارد خطای کمتری دارد.

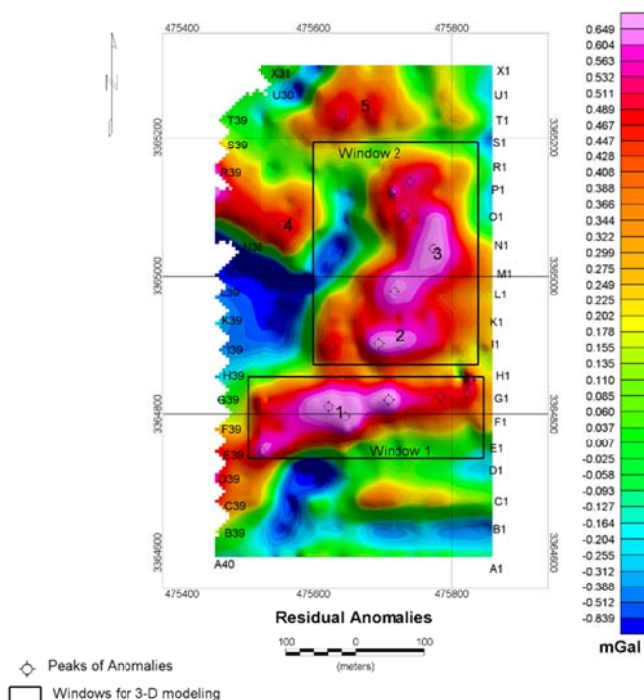
۴. بررسی داده‌های واقعی

به منظور بررسی توانایی روش بیان‌شده در تخمین عمق، از داده‌های گرانی سایت معدن هماتیت واقع در استان کرمان استفاده شده است. سایت در نظر گرفته‌شده در شمال غربی شهر کرمان و در ۳ کیلومتری روستای چشمه‌گز

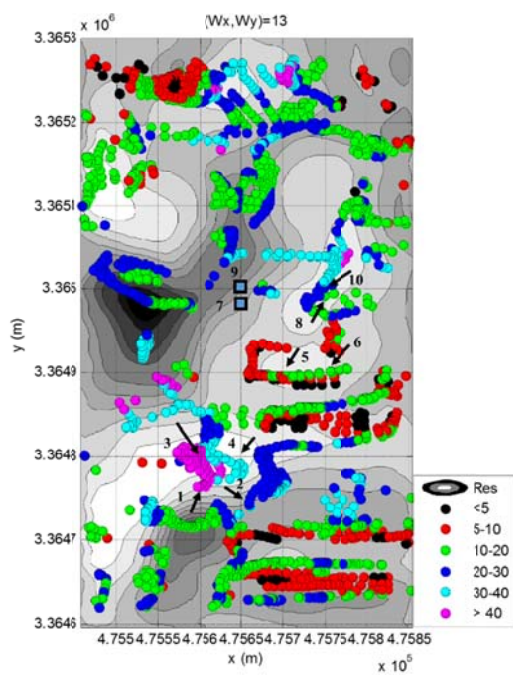
۴-۲. تخمین عمق اوایلر داده‌های گرانی منطقه

نقشه باقی‌مانده منطقه بعد از تصحیحات به صورت شکل ۱۶ به دست آمده است. هماتیت چگالی بیشتری از محیط در برگیرنده خود دارد. در شکل ۱۶ آنومالی‌های مثبت مشخص شده با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ احتمال وجود هماتیت را نشان می‌دهند. همچنین پنجره‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی در این شکل نشان داده شده است. با استفاده از تخمین عمق اوایلر، عمق بالایی توده بررسی شده است. برای کاهش نوفه داده‌ها، فیلتر فراسوی ۳ متر بر روی داده‌ها اعمال شده است. در دقت جواب‌های اوایلر، منطبق‌بودن جواب‌ها بر روی مرز آنومالی و کوچک‌تر بودن بازه پراکندگی قائم جواب‌ها لحاظ شده است. برای هر دو روش اوایلر استفاده‌شده در این پژوهش، پهنای پنجره 13×13 مناسب تشخیص داده شده است. در تعیین ضریب ساختاری اوایلر استاندارد، منطبق‌بودن جواب‌های اوایلر بر روی مرزهای آنومالی لحاظ شده است.

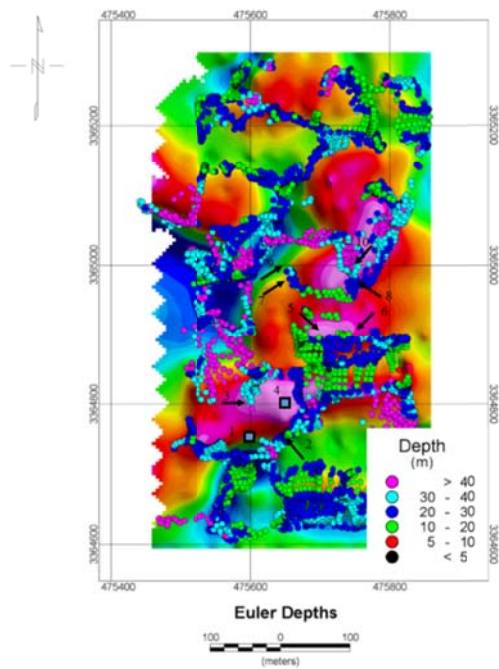
نتایج اوایلر RDAS و اوایلر استاندارد با ضریب ساختاری یک، به ترتیب در شکل ۱۷ و ۱۸ آمده است. در تخمین عمق اوایلر استاندارد از هر دو روش محاسبه‌ای (کد متلب نوشته شده توسط نگارنده و نرم‌افزار ژئوسافت) استفاده شده است. نتایج تخمین عمق با استفاده از هر دو روش تقریباً یکسان است. اختلاف در بعضی نقاط به تفاوت در نحوه محاسبه گرادینان‌ها برمی‌گردد. با توجه به شکل ۱۷ جواب‌های اوایلر استاندارد بر مرز آنومالی‌ها منطبق نیست. در مقایسه با اوایلر استاندارد، اوایلر RDAS جواب منطبق بر مرز آنومالی‌ها می‌دهد (شکل ۱۸). در جدول ۶ پراکندگی قائم جواب‌ها مقایسه شده است. در اوایلر RDAS بازه جواب‌ها در مقایسه با اوایلر استاندارد کوچک‌تر است. نتایج اوایلر RDAS در مقایسه با اوایلر استاندارد از لحاظ منطبق‌بودن بر مرز آنومالی و کوچک‌تر بودن بازه قائم جواب‌ها کیفیت بهتری دارد و جواب دقیق‌تری محسوب می‌شود.



شکل ۱۶. نقشه باقی‌مانده معدن هماتیت کرمان، شماره‌های داخل شکل نشان‌دهنده بیشترین احتمال وجود هماتیت و پنجره‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی.

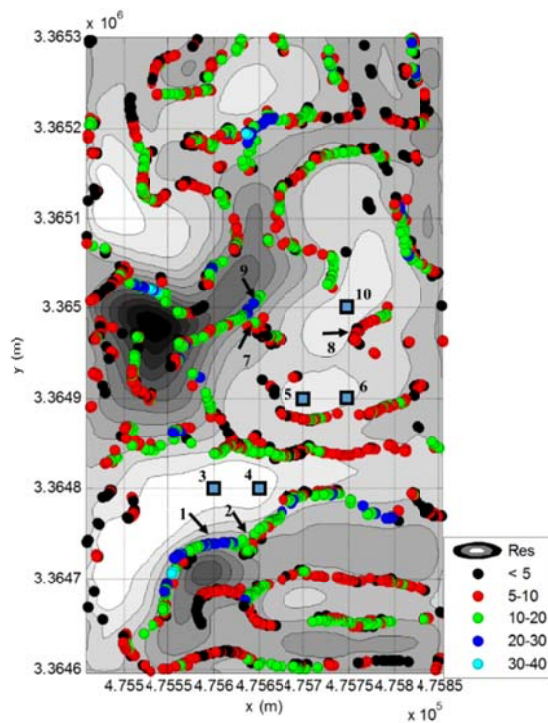


(ب)



(الف)

شکل ۱۷. نتایج اوپلر استاندارد با ضریب ساختاری یک؛ الف. با استفاده از نرم افزار ژئوسافت، ب. استفاده از کد متلب نوشته شده توسط نگارنده، نقاط ۱ تا ۴ در محدوده آنومالی شماره ۱، نقاط ۵ و ۶ در محدوده آنومالی شماره ۲ و نقاط ۷ تا ۱۰ در محدوده آنومالی شماره ۳.



شکل ۱۸. نتایج تخمین عمق اوپلر RDAS.

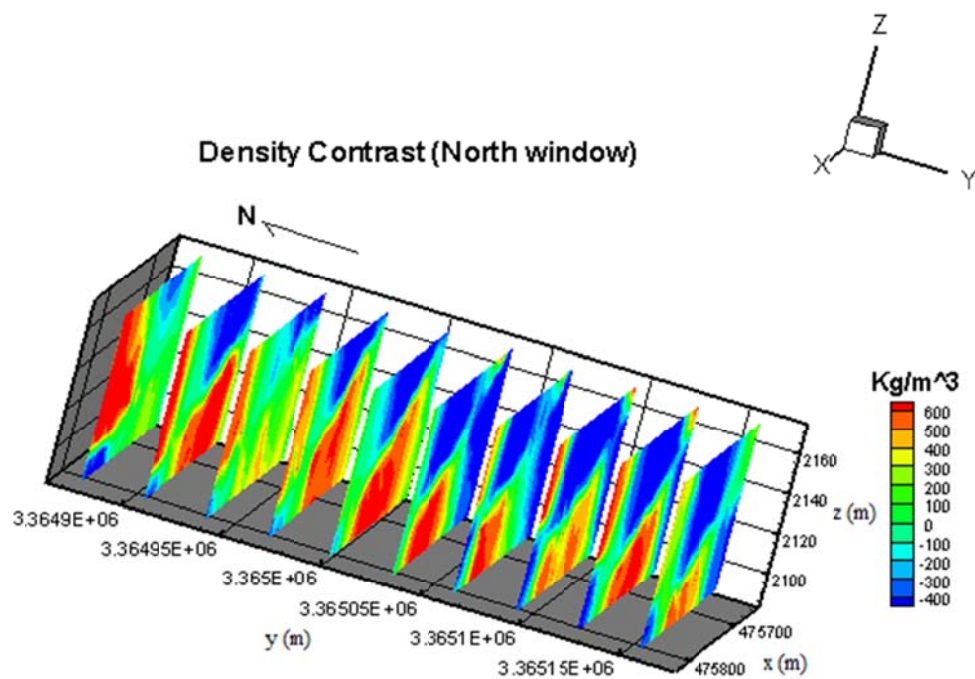
جدول ۶. مقایسه نتایج تخمین عمق اوایلر برای آنومالی‌های مختلف معدن هماتیت.

شماره آنومالی	اوایلر استاندارد (ژئوسافت) (متر)	اوایلر استاندارد (کد متلب) (متر)	اوایلر RDAS (متر)
۱	۱۰-۴۰	۱۰-۴۰	۵-۲۰
۲	۱۰-۳۰	۵-۲۰	۵-۱۰
۳	۱۰-۴۰	۱۰-۴۰	۵-۲۰

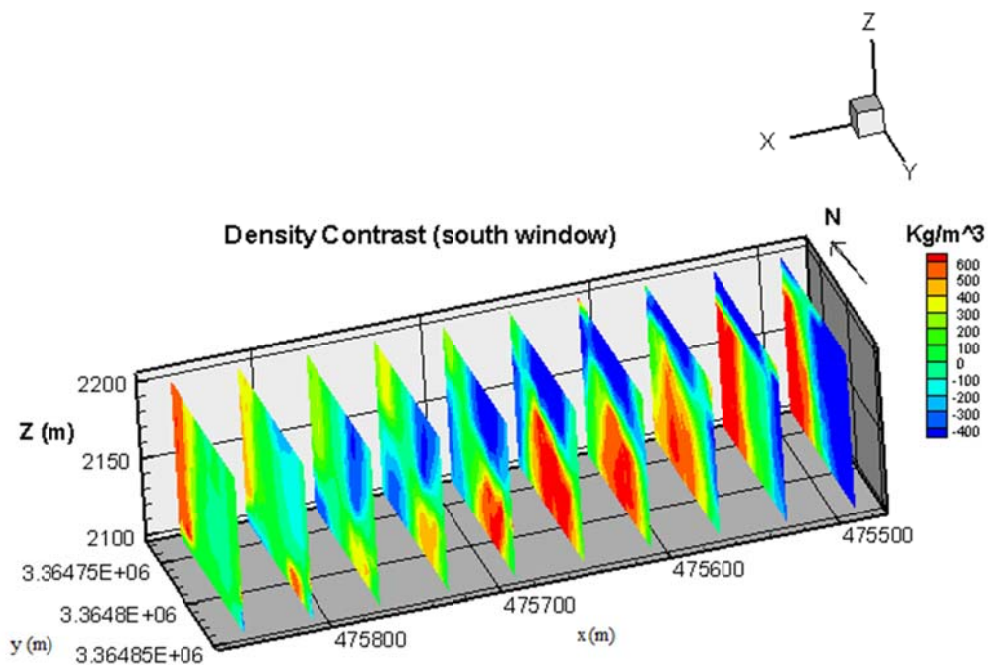
۵. وارون‌سازی داده‌های واقعی

از روش کاماچو و همکاران (۲۰۰۲) و با استفاده از نرم‌افزار ارائه‌شده، برای مدل‌سازی داده‌های گرانی معدن هماتیت استفاده شده است. در انجام مدل‌سازی از دو پنجره شمالی و جنوبی به نام window 1 و window 2، مشخص شده در شکل ۱۶، استفاده شده است. در مدل‌سازی ارتفاع مطلق لحاظ شده است. برای مدل‌سازی معکوس داده‌ها در محدوده تعیین‌شده حداقل و حداکثر اختلاف اولیه چگالی ۴۰۰- تا ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. حداکثر عمق در نظر گرفته‌شده برای شبکه‌بندی سطح زیر زمین برای پنجره شمالی ۱۰۰ متر (از ۲۲۰۰ تا ۲۱۰۰ متر) و برای پنجره جنوبی ۱۶۰ متر (از ۲۱۶۰ تا ۲۰۰۰ متر) است. نتایج مدل‌سازی برای دو پنجره شمالی و جنوبی به صورت مقاطع قائم و به ترتیب در شکل ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. مطابق شکل بخشی از سلول‌ها با چگالی مثبت و بخشی با چگالی منفی نمایش داده شده است. چگالی مثبت نشان‌دهنده هماتیت بوده و با آنومالی‌های مثبت مشخص‌شده در نقشه باقی‌مانده (شکل ۱۶) مطابقت دارد. شیب مدل‌سازی مطابق با توپوگرافی محدوده است. در پنجره جنوبی (شکل ۲۰)، محدوده آنومالی شماره ۱ از $X=475600$ متر تا $X=475650$ متر است. برای پنجره شمالی (شکل ۱۹) محدوده آنومالی شماره ۲ از $X=475700$ متر تا $X=475750$ متر و $Y=3364900$ متر و محدوده آنومالی شماره ۳ از $X=475650$ تا $X=475750$ و $Y=33655000$ است. برای مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج تخمین عمق اوایلر تعداد ۱۰ نقطه بر روی آنومالی‌ها در نظر گرفته شده است. این

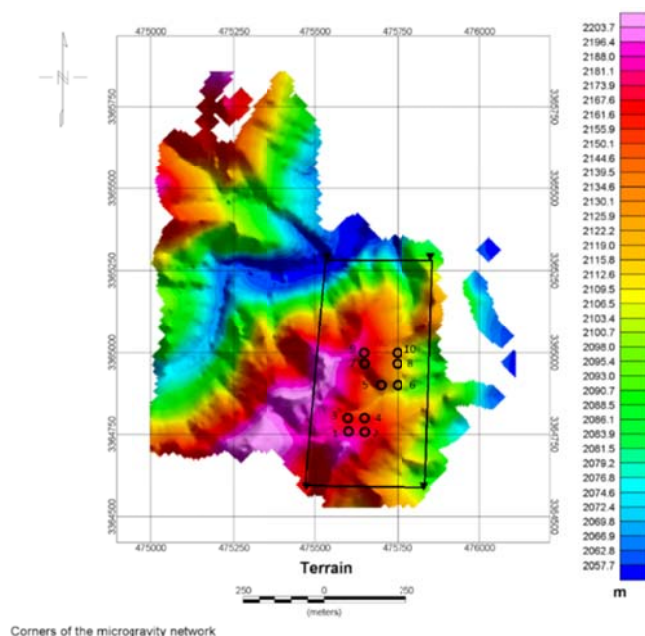
نقاط بر روی نقشه توپوگرافی شکل ۲۱ و همچنین بر روی نتایج تخمین عمق اوایلر استاندارد (شکل ۱۷) و اوایلر RDAS (شکل ۱۸) مشخص شده است. نقاط ۱ تا ۴ در محدوده آنومالی شماره ۱، نقاط ۵ و ۶ در محدوده آنومالی شماره ۲ و نقاط ۷ تا ۱۰ در محدوده آنومالی شماره ۳ قرار دارند. عمق توده هماتیت در مدل‌سازی با استفاده از ارتفاع توپوگرافی و ارتفاع بالایی توده به دست آمده است و نشان‌دهنده عمق نسبت به سطح زمین است. در جدول ۷ عمق به دست آمده از مدل‌سازی برای این نقاط نشان داده شده است و با نتایج اوایلر استاندارد و اوایلر RDAS مقایسه شده است. برای برخی نقاط تخمین عمق اوایلر جوابی ندارد که در جدول مشخص شده است. خطای جذر میانگین مربعات (RMS) با استفاده از عمق اوایلر و عمق مدل‌سازی محاسبه شده است. خطای RMS برای مقایسه بین دو چیز قابل تغییر به کار می‌رود که هیچ کدام به عنوان استاندارد شناخته نمی‌شوند. در مقایسه بین نتایج چند روش مختلف، جواب‌های دو روشی که خطای آن کمترین مقدار است، به عنوان معیار انتخاب می‌شود. خطای RMS بین اوایلر استاندارد و عمق مدل‌سازی، با کد متلب برابر با ۱۱/۴۳ و برای اوایلر ژئوسافت برابر با ۸/۵ است. خطای RMS بین نتایج اوایلر RDAS و نتایج مدل‌سازی برابر با ۲/۶۶ است. نتایج اوایلر RDAS با نتایج مدل‌سازی هم‌خوانی دارد، در واقع نتایج این دو تأییدکننده یکدیگر هستند. به همین دلیل می‌توان گفت جواب‌های آن‌ها قابل اعتمادتر است. بنابراین با توجه به خطای کمتر RMS، جواب‌های اوایلر RDAS و مدل‌سازی از اوایلر استاندارد دقیق‌تر هستند.



شکل ۱۹. مدل سازی معکوس انجام گرفته برای پنجره شمالی مشخص شده در شکل ۱۶.



شکل ۲۰. مدل سازی معکوس انجام گرفته برای پنجره جنوبی مشخص شده در شکل ۱۶.



Corners of the microgravity network

شکل ۲۱. نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به همراه محدوده برداشت و نقاط محدود به آنومالی.

جدول ۷. نتایج مدل‌سازی و مقایسه آن با نتایج اوپلر برای داده‌های واقعی.

شماره	مختصات شماره (متر)	ارتفاع نقطه (متر)	ارتفاع در مدل‌سازی (متر)	عمق در مدل‌سازی (متر)	عمق RDAS (متر)	عمق اوپلر استاندارد (ژئوسافت) (متر)	عمق اوپلر استاندارد (کد متلب) (متر)
۱	X=۴۷۵۶۰۰ y=۳۳۶۴۷۵۰	Z=۲۱۶۰	۲۱۴۰	۲۰	۲۰	---	۴۵
۲	X=۴۷۵۶۵۰ y=۳۳۶۴۷۵۰	Z=۲۱۶۰	۲۱۴۰	۲۰	۱۵	۲۳	۲۵
۳	X=۴۷۵۶۰۰ y=۳۳۶۴۸۰۰	Z=۲۱۵۵	۲۱۳۰	۲۵	---	۳۲	۴۱
۴	X=۴۷۵۶۵۰ y=۳۳۶۴۸۰۰	Z=۲۱۵۵	۲۱۲۰	۳۵	---	---	۳۸
۵	X=۴۷۵۷۰۰ y=۳۳۶۴۹۰۰	Z=۲۱۳۶	۲۱۳۰	۶	۷	۱۱	۱۰
۶	X=۴۷۵۷۵۰ y=۳۳۶۴۹۰۰	Z=۲۱۱۵	۲۱۱۰	۵	۷	۲۰	۱۰
۷	X=۴۷۵۶۵۰ y=۳۳۶۴۹۶۰	Z=۲۱۵۵	۲۱۴۰	۱۵	۱۰	۲۳	---
۸	X=۴۷۵۷۵۰ y=۳۳۶۴۹۶۰	Z=۲۱۱۸	۲۱۱۰	۸	۷	۲۰	۱۸
۹	X=۴۷۵۶۵۰ y=۳۳۶۵۰۰۰	Z=۲۱۵۵	۲۱۳۵	۲۰	۲۱	۲۷	---
۱۰	X=۴۷۵۷۵۰ y=۳۳۶۵۰۰۰	Z=۲۱۱۶	۲۱۰۰	۱۶	---	۲۵	۲۷

۶. نتیجه گیری

ترتیب در حدود ۵ و ۲۰ متر است و با استفاده از اویلر استاندارد این عمق‌ها در حدود ۵ و ۴۰ متر است. جواب‌های اویلر RDAS در مقایسه با اویلر استاندارد انطباق بیشتری با مرز آنومالی‌ها دارد و بازه قائم جواب‌ها کوچک‌تر است که می‌تواند ملاکی برای دقیق‌تر بودن جواب‌های اویلر RDAS باشد. از مدل‌سازی معکوس به روش کاماچو و با استفاده از نرم‌افزار ارائه‌شده، برای بررسی بیشتر آنومالی‌های گرانی استفاده شده است. کمترین و بیشترین عمق بالایی به‌دست‌آمده برای این آنومالی‌ها ۵ تا ۳۵ متر است. برای مقایسه نتایج مدل‌سازی با جواب‌های اویلر تعداد ۱۰ نقطه در محدوده آنومالی مشخص شد و عمق دقیق برآوردی این نقاط با استفاده از اویلر استاندارد، اویلر RDAS و مدل‌سازی نشان داده شد. خطای RMS بین جواب‌های اویلر و جواب‌های مدل‌سازی محاسبه شد. در مقایسه بین نتایج چند روش مختلف که هیچ‌کدام به‌عنوان استاندارد شناخته نمی‌شوند، جواب‌های دو روشی که خطای RMS آن کمترین مقدار است به‌عنوان معیار انتخاب می‌شود. این خطا برای اویلر استاندارد کدملتب برابر با ۱۱/۴۳، برای اویلر استاندارد ژئوسافت برابر با ۸/۵ و برای اویلر RDAS ۲/۶۶ است. با توجه به خطای کمتر RMS، جواب‌های اویلر RDAS و مدل‌سازی در مقایسه با اویلر استاندارد دقیق‌تر هستند.

مراجع

- Barbosa, V. C., Silva, J. B. and Medeiros, W. E., 1999, Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution. *Geophysics*, 64(1), pp.48-60.
- Beiki, M., 2010, Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location. *Geophysics*, 75(6), pp. I59-I74.
- Beiki, M., 2013, TSVD analysis of Euler deconvolution to improve estimating magnetic source parameters: An example from the Åsele area, Sweden. *Journal of Applied Geophysics*, 90, pp. 82-91.
- Cooper, G. R. J., 2014, Euler deconvolution in a radial coordinate system. *Geophysical Prospecting*, 62(5), pp. 1169-1179.
- Cooper, G. R., 2015, Using the analytic signal

روش‌های متنوع تخمین عمق بر اساس اویلر استاندارد وجود دارد. در این پژوهش از روش جدید اویلر RDAS استفاده شده است. در این روش از مشتقات سیگنال تحلیلی و گرادینان اول قائم در معادله اویلر استفاده می‌شود. استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی در تخمین عمق بهتر از سیگنال تحلیلی عمل می‌کند. همچنین در این روش مشکل انتخاب ضریب ساختاری وجود ندارد که باعث می‌شود دقت تخمین عمق افزایش یابد. بررسی داده‌های گرانی مصنوعی نشان می‌دهد که اویلر RDAS در تخمین عمق این داده‌ها از اویلر استاندارد خطای کمتری دارد و بازه تمرکز جواب کوچک‌تری نیز به دست می‌دهد. این روش بر روی داده‌های مصنوعی دارای نوفه نیز امتحان شده است. اویلر RDAS به دلیل استفاده از مشتقات درجه بالا به نوفه حساس است. بررسی نشان می‌دهد که اگر نوفه موجود در داده‌ها توسط روش‌های نظیر فیلتر فراسو کاهش یابد، این روش می‌تواند تخمین عمق مناسبی ارائه دهد. در این پژوهش عمق آنومالی گرانی ناشی از توده هماتیت، واقع در استان کرمان، با استفاده از اویلر استاندارد و اویلر RDAS برآورد شده است. برای کاهش نوفه این داده‌ها از فیلتر فراسوی ۳ متر استفاده شده است. در نقشه باقی‌مانده منطقه مورد مطالعه، سه توده هماتیت محتمل وجود دارد. کمترین و بیشترین عمق بالایی این توده‌ها با استفاده از اویلر RDAS به

- amplitude to determine the location and depth of thin dikes from magnetic data. *Geophysics*, 80(1), pp. J1-J6.
- Camacho, A. G., Montesinos, F. G. and Vieira, R., 2002, A 3-D gravity inversion tool based on exploration of model possibilities. *Computers & Geosciences*, 28(2), pp. 191-204.
- Guo, C. C., Xiong, S. Q., Xue, D. J., and Wang, L. F., 2014, Improved Euler method for the interpretation of potential data based on the ratio of the vertical first derivative to analytic signal. *Applied Geophysics*, 11(3), 331-339.
- Gerkens, A., 1989. *Foundation of exploration geophysics*.
- Hsu, S. K., 2002, Imaging magnetic sources using Euler's equation. *Geophysical prospecting*,

- 50(1), pp. 15-25.
- Huang, D., Gubbins, D., Clark, R. A. and Whaler, K. A., 1995, May. Combined study of Euler's homogeneity equation for gravity and magnetic field. In 57th EAGE Conference and Exhibition.
- Keating, P. B., 1998, Weighted Euler deconvolution of gravity data. *Geophysics*, 63(5), pp. 1595-1603.
- Keating, P. and Pilkington, M., 2004, Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophysical prospecting*, 52(3), pp. 165-182.
- Klingele, E. E., Marson, I. and Kahle, H. G., 1991, Automatic Interpretation of Gravity Gradiometric Data in Two Dimensions: Vertical GRADIENT1. *Geophysical Prospecting*, 39(3), pp. 407-434.
- Marson, I. and Klingele, E. E., 1993, Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation. *Geophysics*, 58(11), pp.1588-1595.
- Ma, G., 2014, The application of extended Euler deconvolution method in the interpretation of potential field data. *Journal of Applied Geophysics*, 107, 188-194.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of twodimensional magnetic bodies with polygonal crosssection:Its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, 37(3), 507-517.
- Reid, A. B., Allsop, J. M. and Granser, H., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, 55(1), 80-91.
- Roest, W. R., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, 57,116-125.
- Salem, A., Elawadi, E., and Ushijima, K., 2003, Depth determination from residual gravity anomaly data using a simple formula. *Computers & geosciences*, 29(6), 801-804.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., and Smith, R., 2007a, Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 26(12), 1502-1505.
- Salem, A., Smith, R., Williams, S., Ravat, D. and Fairhead, D., 2007b, Generalized magnetic tilt-Euler deconvolution. In 2007 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, D., Smith, R., and Ravat, 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), 31-37.
- Zhang, F. X., Zhang, X. Z., Zhang, F. Q., Sun, J. P., Qiu, D. M. and Xue, J., 2010, Study on geology and geophysics on structural units of Hulin Basin in Heilongjiang province: *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(5), 1170-1176.

Depth estimation using the new method of Euler RDAS and comparison with modelling results, Case Study: gravity data of hematite mine

Mousapour Yasori, M.¹ and Ebrahimzadeh Ardestani, V.^{2*}

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

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

(Received: 16 Jan 2017, Accepted: 24 Oct 2017)

Summary

Depth estimation of geological structures is one of the most important objectives in geophysical studies. Euler deconvolution (standard Euler) is a well-known method in the depth estimation. Based on standard Euler, various methods are introduced to reduce error of the depth estimation. In this study we have used a new method called Euler RDAS. This method is based on the standard Euler. In this method derivatives of analytic signal and first vertical are used in Euler equation. Applying derivatives of analytic signal for depth estimation is better than the analytic signal. There is no problem of choosing structural index in this method which increases accuracy in the depth estimation. To examine the performance of this method, depths of several synthetic models are estimated and their results are compared to that of the standard Euler. In all models, results of the RDAS Euler shows fewer errors in high depth model in comparison to that of the standard Euler. This method was tested on synthetic data with noise. RDAS Euler sensitive to noise due to usage of high-degree derivatives is less than the standard Euler. Study shows that if the noise in the data is reduced by methods such as filter upward, it can provide an appropriate estimate of the depth. In this study, the depth of gravity anomalies caused by the masses of hematite located in Kerman, has estimated using standard Euler and RDAS Euler. Upward continued by 3 m has been used for reducing noise in this data. There are 3 possible hematite masses in residual map of the study area. The minimum of high depth anomalies indicates masses of hematite, which is calculated using RDAS Euler and was about 5 meters and a maximum of high depth is about 20 meters. The minimum depth obtained using standard Euler for this anomaly is about 5 meters and the maximum depth is about 40 meters. Responses of RDAS Euler is more compatible that of standard Euler with the boundary anomalies and has smaller vertical interval which can be a criterion for more precise solutions of the RDAS Euler. For further examination, the gravity data of hematite mine is used with inverse modeling of Camacho method. Minimum and maximum upper depths obtained for these anomalies are 5 to 35 meters, respectively. In addition, the modeling results is compared with the results of depth estimation of Euler. To this, 10 points in the anomalies area are pointed and the calculated depth of these points using standard Euler, RDAS Euler and modeling are shown. Root mean square error (RMS) between Euler's and modeling results is calculated. In comparison of the results in different methods, which are not standard, results of two methods that have the lowest RMS error is considered as the selection criteria. RMS for standard Euler with MATLAB code, Geosoft, and RDAS Euler are equal to 11.43, 8.5, and 2.66 respectively. The results of two methods among these three methods which are used to estimate the depth of hematite masses are close hence they can be more reliable results. Therefore, due to fewer errors of RMS of RDAS Euler and modelling results are more accurate than that of the standard Euler.

Keywords: Euler deconvolution; standard Euler; analytic signal; depth estimation; structural index; gravity data.

*Corresponding author:

ebrahimz@ut.ac.ir