



تعیین لبه داده‌های میدان گرانی با استفاده از روش آماری CCMS

مصطفی موسی پور یاسوری^{۱*} و وحید ابراهیم زاده اردستانی^۲

۱- کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران
۲- استاد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: mousapour@ut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

تعیین لبه یک تفسیر کیفی و روشی سریع برای بدست آوردن اطلاعات از بی‌هنجاری‌های مولد میدان گرانی است. در تعیین لبه دقت در برآورد مرز بی‌هنجاری‌ها و تفکیک بی‌هنجاری‌های که دامنه آنها با هم تداخل دارد بسیار مهم است. از جمله معایب روش‌های تعیین لبه، حساس بودن به نوفه؛ حساس بودن به عمق بی‌هنجاری، برآورد لبه بزرگتر از مقدار واقعی، عدم تفکیک بی‌هنجاری‌ها و .. است. به همین دلیل روش‌های متنوعی برای تعیین لبه معرفی شده است. بیشتر روش‌های تعیین لبه بر پایه گرادیان‌ها قرار دارند. گرادیان‌ها به نوفه حساس هستند. به منظور افزایش دقت در تعیین لبه از روش‌های آماری استفاده شده است. روش نیمه آماری *NSTD* و روش کاملاً آماری *CCMS* از جمله آنها هستند. در این مقاله از روش‌های برپایه گرادیان مشهور زاویه تتا (*Theta*)، گرادیان کل افقی (*THD*)، زاویه تیلت (*Tilt angle*)، زاویه تیلت هذلولوی (*HTA*)، روش نوین برپایه گرادیان *NTHD*، روش نیمه آماری *NSTD* و روش کاملاً آماری *CCMS* در تعیین لبه داده‌های مصنوعی و واقعی استفاده شده است. قضاوت اینکه کدام روش جواب بهتری در همه داده‌ها گرانی دارد، کمی دشوار است اما در این مقاله با در نظر گرفتن شرایطی مانند نوفه‌ای، بی‌هنجاری‌های تداخل یافته، دقت لبه برآوردی و تاثیر عمق بی‌هنجاری در تعیین لبه توانایی روش‌های مختلف بررسی و مقایسه شده است. نتایج تعیین لبه داده‌ها مصنوعی نشان می‌دهد که روش‌های تنها بر پایه گرادیان قرار دارند به تداخل دامنه بی‌هنجاری‌ها و نوفه حساس هستند و در روش‌های که از تعداد گرادیان‌های کمتری استفاده می‌کنند نوفه کمتری وجود دارد. روش‌های *NSTD*، *NTHD* و *CCMS* که از حرکت پنجره‌ها حاصل می‌شوند به نوفه حساسیت کمتری دارند. این روش‌ها مرز بی‌هنجاری با دامنه‌های مختلف را آشکار می‌کنند و بی‌هنجاری‌های که دامنه آنها با هم تداخل داشته را به خوبی تفکیک می‌کنند. در همه روش‌های تعیین لبه این مقاله افزایش عمق بی‌هنجاری باعث شده است که دقت تعیین لبه کاهش یابد. در مجموع بررسی‌ها نشان می‌دهد که *CCMS* نتایج بهتری در تعیین لبه داده‌های مصنوعی ارائه داده است. در داده‌های واقعی نیز نتایج روش *CCMS* بهتر از سایر روش‌ها است. نتایج تعیین لبه این روش در داده‌های واقعی بر روی نقشه بوگه نشان داده شده است این نحوه نمایش پیچیدگی‌های نقشه تعیین لبه را کاهش می‌دهد که می‌تواند برای مفسر بسیار مفید باشد.

تعیین لبه
تفسیر کیفی
روش آماری
ضریب همبستگی
انحراف معیار

۱- مقدمه

تعیین لبه یک تفسیر کیفی از داده‌های میدان گرانی است. در نقشه بی-هنجاری که ناشی از چند توده است و دامنه‌ها با هم تداخل دارند، تعیین لبه بسیار با اهمیت است و تشخیص اینکه بی‌هنجاری ناشی از چند توده است کار راحتی نیست. بدست آوردن هرگونه اطلاعات از روش‌های مختلف تعیین لبه برای مفسر می‌تواند حائز اهمیت باشد.

روش‌های مختلفی برای تعیین لبه میدان گرانی وجود دارد. معمولاً این روش‌ها براساس گرادیان‌های افقی و قائم تعریف می‌شوند. حساسیت گرادیان‌ها به نوفه و وجود نقاط ضعف دیگری در روش‌های تعیین لبه مانند حساس بودن روش به عمق بی‌هنجاری، برآورد کردن لبه بزرگتر از مقدار واقعی، عدم تفکیک مرز بی‌هنجاری‌ها با دامنه‌های تداخل یافته و ... باعث شده که روش‌های بسیار متنوعی برای تعیین لبه معرفی شود. قضاوت اینکه کدام روش جواب بهتری در همه داده‌ها گرانی دارد، دشوار است؛ اما به طور کلی هر چقدر ضعف‌های اشاره شده را بیشتر پوشش دهند نتایج آنها قابل اعتمادتر است. در بخش زیر به بعضی از روش‌های تعیین لبه بر پایه گرادیان به همراه نقاط ضعف و قوت آنها اشاره شده است. در انتخاب این روش‌ها ساده بودن روش، کارایی بیشتر و محبوبیت روش لحاظ شده است. روش‌های گرادیان کل افقی (THD)، زاویه تتا (Theta)، زاویه تیلت (Tilt Angle) و زاویه تیلت هذلولوی (HTA) و روش نوین بر پایه گرادیان‌ها به نام NTHD استفاده شده است. همچنین از روش نیمه آماری NSTD (Cooper and Cowan, 2008) و روش آماری CCMS (Xu et al., 2015) در تعیین لبه استفاده شده است. NSTD از انحراف معیار گرادیان‌ها حاصل می‌شود اما در CCMS از گرادیان‌ها استفاده نمی‌شود. این روش کاملاً آماری است و بر پایه ضریب همبستگی و انحراف معیار قرار دارد. هر کدام از روش‌های ذکر شده در زیر به تفصیل معرفی شده و سپس از آنها برای تعیین لبه داده‌های مصنوعی و واقعی میدان گرانی استفاده شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است. در این مقاله g_x گرادیان افقی در راستای x ؛ g_y گرادیان افقی در راستای y و g_z گرادیان قائم در راستای z است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- گرادیان افقی کامل (THD^۱)

روش رایج برای تعیین لبه بی‌هنجاری سطحی است و مقدار بیشینه آن لبه را نشان می‌دهد. این روش بیشترین توجه را به بی‌هنجاری با دامنه بزرگ نشان می‌دهد. در واقع به عمق بی‌هنجاری حساس است و زمانی که بی‌هنجاری‌ها دارای عمق مختلفی باشند جواب مناسبی ارائه نمی‌دهد (Cooper and Cowan, 2008). این روش به دلیل استفاده نکردن از گرادیان قائم به نوفه حساسیت کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. وردزکو و همکاران (Verduzco et al. 2004) این روش را به صورت زیر

معرفی کرده‌اند.

$$THD = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (1)$$

۲-۲- زاویه تیلت (Tilt Angle) و زاویه تیلت هذلولوی (HTA^۲)

میلر و سینف (Miller and Singh, 1994) این روش را معرفی کرده‌اند. در این روش گرادیان قائم با استفاده از THD نرمال شده است. این روش به عمق بی‌هنجاری تقریباً حساس نیست همچنین برای بی‌هنجاری با دامنه بزرگ و کوچک جواب مناسبی دارد. مقدار آن در نزدیکی لبه بی‌هنجاری صفر و در بیرون محدوده آن مثبت است. این نحوه نشان دادن لبه تشخیص مرز بی‌هنجاری را دشوار می‌کند و به همین دلیل این روش برای تعیین لبه به عنوان روش اول انتخاب نمی‌شود.

$$Tilt = \tan^{-1} \left(\frac{g_z}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}} \right) \quad -90 < Tilt < +90 \quad (2)$$

کوپر و کوان (Cooper and Cowan, 2006) با جای استفاده از معکوس تانژانت در زاویه تیلت از معکوس هذلولوی تانژانت استفاده کردند و زاویه تیلت هذلولوی (HTA) را معرفی کردند. مقدار بیشینه این روش مرز بی‌هنجاری را نشان می‌دهد این امر باعث می‌شود تشخیص مرز نسبت به زاویه تیلت آسان‌تر شود. اما به صورت ناخواسته پرنده‌های منفی در نقشه ایجاد می‌کند که باعث پیچیدگی تفسیر می‌شود.

$$HTA = Real \left[\tanh^{-1} \left(\frac{g_z}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}} \right) \right] \quad (3)$$

۲-۳- زاویه تتا (Theta)

لبه برآورد شده در این روش بزرگتر از ابعاد واقعی بی‌هنجاری است با افزایش عمق بی‌هنجاری خطای تعیین لبه نیز افزایش می‌یابد. مزیت آن نسبت به THD این است که به بی‌هنجاری با دامنه‌های مختلف حساس نیست و می‌تواند بی‌هنجاری‌ها را از هم تفکیک کند. این روش توسط وینجز و همکاران (Wijns et al., 2005) معرفی شده است.

$$Theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}} \right) \quad \begin{matrix} 0 < \\ \cos(Theta) < \\ a < 1 \end{matrix} \quad (4)$$

۲-۴- گرادیان افقی نرمال شده (NTHD^۳)

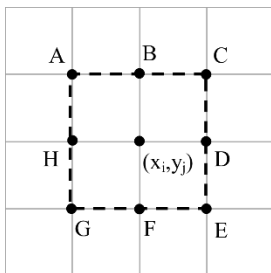
در این روش هر مؤلفه گرادیان کل افقی (THD) با تقسیم بر بیشترین

2 Hyperbolic tilt angle

3 Normalized total horizontal derivative

1 Total horizontal derivative

مولفه مرکزی (i,j) و مولفه‌های اطراف آن را در یک پنجره ۳×۳ نشان می‌دهد.



شکل ۱: نحوه قرار گیری مولفه مرکزی (i,j) و مولفه‌های همسایه آن در یک پنجره ۳×۳

ضریب همبستگی بین مرکز پنجره و مولفه‌های اطراف به صورت زیر محاسبه می‌شود. برای هر مولفه مرکز پنجره (i,j) ضریب همبستگی به نام‌های R_{0-A}, R_{0-B}, R_{0-C}, R_{0-D}, R_{0-E}, R_{0-F}, R_{0-G} و R_{0-H} وجود دارد.

$$R_{0-K} = \frac{cov(\sigma_{ij-0}, \sigma_{ij-K})}{\sqrt{D(\sigma_{ij-0}) \cdot D(\sigma_{ij-K})}} \quad (8)$$

K=A, B, C, D, E, F, G, H

D نشان دهنده انحراف معیار و cov بیانگر کوواریانس است. برای محاسبه این دو، مولفه‌های اطراف A, B, C, D, E, F, G و H نیز لازم است. به عبارت دیگر برای محاسبه ضریب همبستگی مولفه مرکزی (x_i, y_j)، داده‌های ۸ پنجره اطراف آن نیاز است. شکل (۲) این موضوع را نشان می‌دهد. از داده‌های پنجره صفر (0) و پنجره یک (1) برای محاسبه R_{0-A} استفاده می‌شود. برای محاسبه R_{0-B} از داده‌های پنجره صفر (0) و پنجره دو (2) استفاده می‌شود و به همین ترتیب R_{0-H} از داده‌های پنجره صفر (0) و پنجره هشت (8) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} cov(\sigma_{ij-0}, \sigma_{ij-K}) &= \frac{1}{M} \sum_{g=1}^M (\sigma_{ij-0-g} - \overline{\sigma_{ij-0}}) \cdot (\sigma_{ij-K-g} - \overline{\sigma_{ij-K}}) \\ D(\sigma_{ij-0}) &= \frac{1}{M} \sum_{g=1}^M (\sigma_{ij-0-g} - \overline{\sigma_{ij-0}})^2 \\ D(\sigma_{ij-K}) &= \frac{1}{M} \sum_{g=1}^M (\sigma_{ij-K-g} - \overline{\sigma_{ij-K}})^2 \\ \overline{\sigma_{ij-0}} &= \frac{1}{M} \sum_{g=1}^M \sigma_{ij-0-g}, \quad \overline{\sigma_{ij-K}} = \frac{1}{M} \sum_{g=1}^M \sigma_{ij-K-g} \end{aligned} \quad (9)$$

K=A, B, C, D, E, F, G, H

M تعداد مولفه‌های موجود در پنجره، $\overline{\sigma_{ij-0}}$ مقدار میانگین حاصل از پنجره صفر در شکل (۲) و $\overline{\sigma_{ij-K}}$ مقدار میانگینی است که از پنجره‌های ۱ تا ۸ نشان داده شده در شکل (۲) بدست می‌آید. D(σ_{ij-0}) از پنجره صفر و D(σ_{ij-K}) از پنجره‌های ۱ تا ۸ بدست می‌آید.

مقدار آن در ناحیه مجاور، نرمال می‌شود. به اینصورت که ابتدا پنجره با ابعاد m و n بر روی داده‌های THD حرکت می‌کند. مولفه مرکز پنجره به بیشترین مقدار THD در آن پنجره تقسیم می‌شود. با حرکت پنجره نقشه NTHD بدست می‌آید. هر چه ابعاد پنجره بزرگتر باشد نوفه کمتری در نقشه دیده می‌شود اما استفاده از پنجره با ابعاد بزرگ باعث می‌شود. بی‌هنجاری‌های کوچک دیده نشود. در این روش نقص روش THD برطرف شده به طوری که این روش به عمق بی‌هنجاری حساس نیست. NTHD توسط ما و لی (Ma and Li, 2012) به صورت زیر ارائه شده است:

$$NTHD(i,j) = \frac{THD(i,j)}{\max(THD(i-m:i+m; i-n:j+n))} \quad (5)$$

(i و j مولفه داده‌ها است)

۵-۲-انحراف معیار نرمال شده، روش نیمه آماری NSTD^۱

این روش ترکیبی از روش آماری و گرادیان‌های افقی و قائم است و به صورت زیر تعریف می‌شود (Cooper and Cowan, 2008):

$$NSTD = \frac{\sigma(g_z)}{\sigma(g_x) + \sigma(g_y) + \sigma(g_z)} \quad (6)$$

انحراف معیار σ، از حرکت پنجره مربعی بر روی مولفه‌های گرادیان‌ها بدست می‌آید. مقدار بیشینه آن لبه بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. در این روش نیز پنجره با ابعاد بزرگ نوفه را در نقشه NSTD کاهش می‌دهد.

۶-۲-روش کاملاً آماری CCMS^۲

این روش کاملاً آماری است و در آن از گرادیان‌ها استفاده نمی‌شود. پنجره‌های بر روی داده‌ها میدان گرانی حرکت می‌کند. برای هر مولفه میانگین مربعات به صورت زیر محاسبه می‌شود (Lin, 1996):

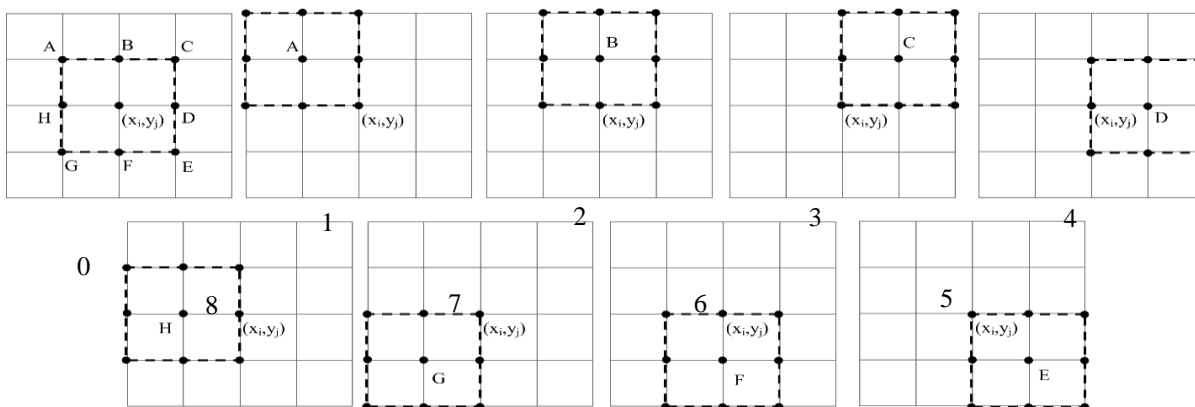
$$\sigma(i,j) = \left[\frac{1}{N} \sum_{d=i-p}^{i+p} \sum_{e=j-q}^{j+q} (f(x_d, y_e) - \overline{f_{ij}})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\overline{f_{ij}} = \frac{1}{N} \sum_{d=i-p}^{i+p} \sum_{e=j-q}^{j+q} f(x_d, y_e)$$

i و j مربوط به مولفه مرکز پنجره، p تعداد مولفه‌های پوشش داده شده توسط نیم پنجره در راستای x، q تعداد مولفه‌های پوشش داده شده توسط نیم پنجره در راستای y، N تعداد مولفه‌های پنجره و $\overline{f_{ij}}$ مقدار میانگین بدست آمده از مولفه‌های پنجره است. میانگین مربعات مرکز هر پنجره σ_{ij-0} و مولفه‌های اطراف مولفه مرکزی σ_{ij-A}, σ_{ij-B}, σ_{ij-C}, σ_{ij-D}, σ_{ij-E}, σ_{ij-F}, σ_{ij-G} و σ_{ij-H} نامیده می‌شود. شکل (۱) نحوه قرار گیری

1 Normalized standard deviations

2 Correlation coefficient of multidirectional standard deviations

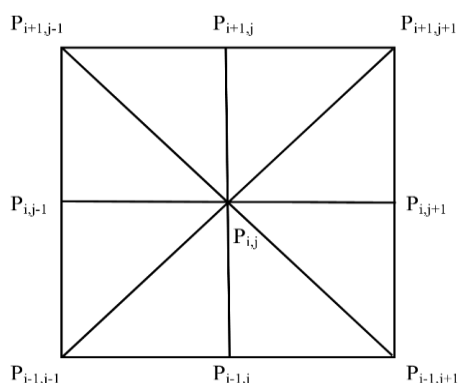


شکل ۲: نمایش مولفه مرکزی و پنجره‌های اطراف آن مورد استفاده در محاسبه ضریب همبستگی هر مولفه

آمده از رابطه (۷) به جای پارامتر N_2 مشابه پارامتر N_1 تعریف می‌شود. در نهایت تعیین لبه به روش آماری CCMS به صورت زیر تعریف می‌شود (Xu et al., 2015):

$$NN = N_1.N_2 \quad (13)$$

پارامتر NN مقداری بین ۰ تا ۱۶ دارد. بر روی لبه بی‌هنجاری مقدار آن بین ۱ تا ۱۶ و در سایر نقاط صفر است.



شکل ۳: موقعیت P_{ij} و مولفه‌های اطراف آن

۳-مدل سازی

برای مقایسه توانایی روش‌های تعیین لبه ذکر شده دو مدل میدان گرانی مصنوعی تولید شده است. برای تولید اثر گرانی مدل مصنوعی از رابطه ریاضی پلوف (Plouff, 1976) استفاده شده است:

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

که در آن،

ضریب همبستگی مقداری بین -۱ تا +۱ دارد. +۱ نشان دهنده همبستگی بسیار بالا و -۱ نشان دهنده رابطه معکوس بین مولفه ij و مولفه‌های اطراف آن است. ضریب همبستگی صفر نشان دهنده عدم ارتباط بین این مولفه‌ها است. قدر مطلق ضریب همبستگی نزدیک به یک نشان دهنده نوسانات ضعیف داده و مقدار نزدیک به صفر نشان دهنده نوسانات شدید است. با تعریف M_{0-K} این نوسات به بازه ۰ تا ۲ منتقل می‌شود.

$$M_{0-K} = 1 - R_{0-K} \quad (10)$$

$K=A, B, C, D, E, F, G, H,$

لبه احتمالی داده‌ها با استفاده از P_{ij} به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P_{i,j} = \sqrt[8]{M_{0-A} \cdot M_{0-B} \cdot M_{0-C} \cdot M_{0-D} \cdot M_{0-E} \cdot M_{0-F} \cdot M_{0-G} \cdot M_{0-H}} \quad (11)$$

P_{ij} بزرگ مربوط به نوسانات شدید بین داده‌ها است که می‌تواند ناشی از بزرگترین و کوچکترین مقدار σ_{ij} باشد. بزرگترین مقدار σ_{ij} نشان دهنده لبه بی‌هنجاری است و کوچکترین مقدار آن با لبه بی‌هنجاری ارتباطی ندارد. برای اینکه P_{ij} بزرگ نشان دهنده لبه بی‌هنجاری باشد از روش ماکزیمم محلی استفاده می‌شود (بلکلی، ۱۹۸۶). این روش مقایسه بین مولفه مرکز پنجره (P_{ij}) با مولفه‌های همسایه آن در ۴ راستا (افقی، عمودی و ۲ قطری) است (شکل (۳)).

$$\begin{aligned} P_{i-1,j} < P_{i,j} > P_{i+1,j} \\ P_{i-1,j-1} < P_{i,j} > P_{i+1,j+1} \\ P_{i,j-1} < P_{i,j} > P_{i,j+1} \\ P_{i+1,j-1} < P_{i,j} > P_{i-1,j+1} \end{aligned} \quad (12)$$

به ازای برقرار بودن هر شرط یک مقدار به پارامتر N_1 اضافه می‌شود. N_1 در بازه ۰ تا ۴ قرار دارد. در رابطه (۱۲) با جاگذاری σ_{ij} (بدست

۱-۳-مدل شماره ۱

این مدل شامل دو مکعب مستطیل به ابعاد $40 \times 40 \times 30$ و $10 \times 10 \times 5$ متر است. مکعب کوچک بر روی مکعب بزرگ قرار دارد. تباین چگالی مکعب کوچک $1000-$ و تباین چگالی مکعب بزرگ $1000+$ کیلوگرم بر متر مکعب است. دامنه بی‌هنجاری‌ها در نقشه گرانی با هم تداخل دارد. مشخصات این مدل در جدول (۱) و نحوه قرار گرفتن مکعب‌ها به صورت نیم رخ عرضی در شکل (۴) نشان داده شده است.

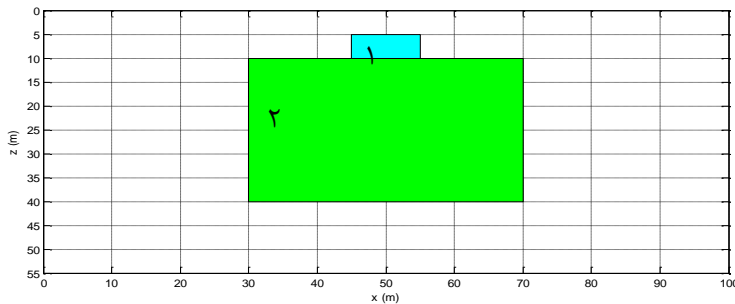
$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2} \quad (15)$$

$$\mu_{ijk} = (-1)^{i+j+k}$$

و ρ تباین چگالی بلوک با چگالی محیط در بر گیرنده آن، G ثابت جهانی گرانش ($6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$) و $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ محدوده بلوک است.

جدول ۱: مشخصات مدل شماره ۱

| مدل شماره ۱ | طول (متر) | عرض (متر) | عمق بالا (متر) | عمق پایین (متر) | تباین چگالی (kg/m^3) |
|-------------|-----------|-----------|----------------|-----------------|--|
| مکعب ۱ | ۱۰ | ۱۰ | ۵ | ۱۰ | -۱۰۰۰ |
| مکعب ۲ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۰ | ۴۰ | +۱۰۰۰ |



شکل ۴: نیم رخ عرضی نحوه قرار گرفتن مکعب‌های مدل شماره ۱

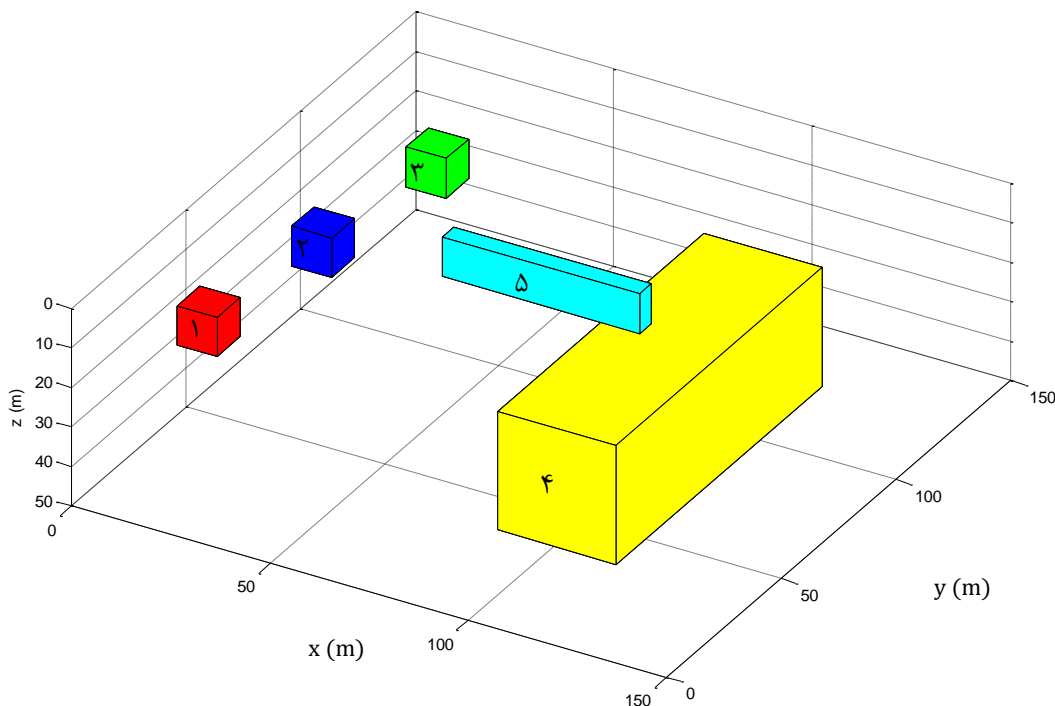
مکعب مستطیل به ابعاد $50 \times 5 \times 10$ در عمق ۵ متر و $30 \times 90 \times 30$ در عمق ۱۵ متری قرار دارد. مشخصات این مدل در جدول (۲) و نحوه قرار گرفتن مکعب‌ها در شکل (۵) آمده است.

۲-۳-مدل شماره ۲

این مدل شامل ۵ مکعب با ابعاد و عمق‌های مختلف است. سه مکعب مربع با ابعاد ۱۰ متر در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر قرار دارند. دو

جدول ۲: مشخصات مدل شماره ۲

| مدل شماره ۱ | طول (متر) | عرض (متر) | عمق بالا (متر) | عمق پایین (متر) | تباین چگالی (kg/m^3) |
|-------------|-----------|-----------|----------------|-----------------|--|
| مکعب ۱ | ۱۰ | ۱۰ | ۵ | ۱۵ | +۱۰۰۰ |
| مکعب ۲ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۲۰ | +۱۵۰۰ |
| مکعب ۳ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۵ | ۲۵ | +۱۰۰۰ |
| مکعب ۴ | ۳۰ | ۹۰ | ۱۵ | ۴۵ | +۵۰۰ |
| مکعب ۵ | ۵۰ | ۵ | ۵ | ۱۵ | -۵۰۰ |



شکل ۵: نحوه قرار گرفتن مکعب‌های مدل شماره ۲

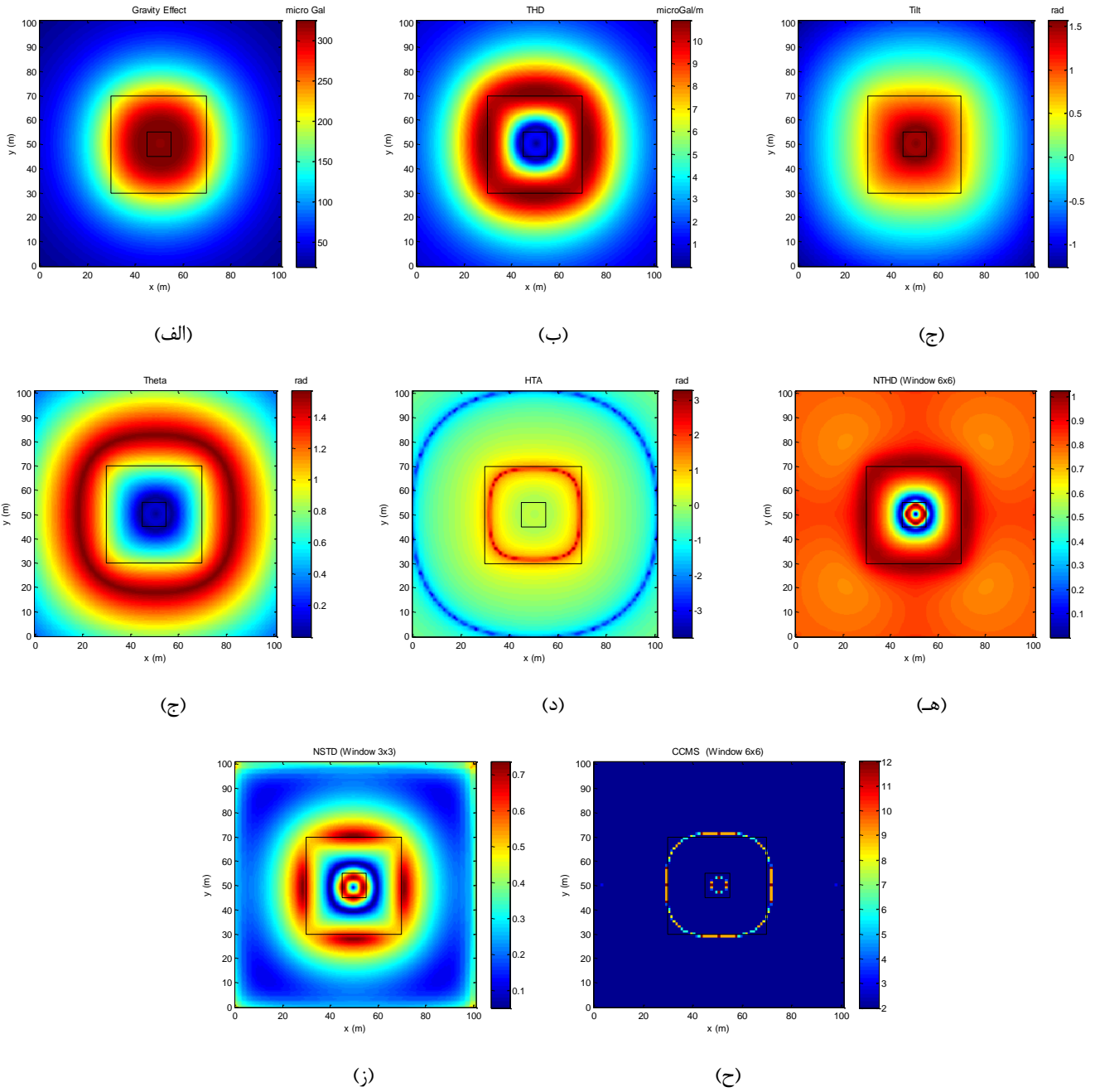
۴- تعیین لبه ۱

۴-۱- تعیین لبه مدل شماره ۱

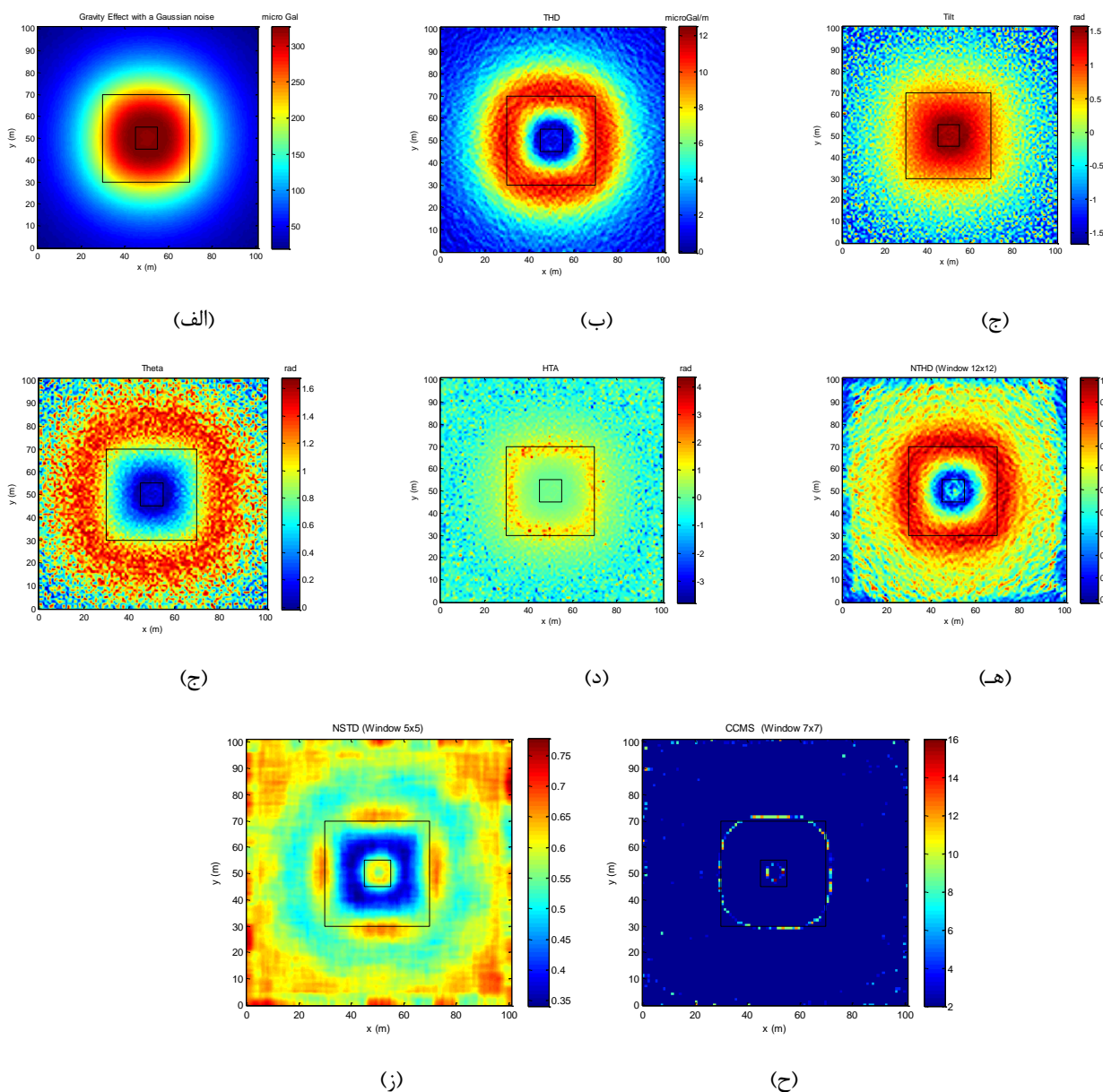
شکل (۶) اثر گرانی مدل شماره ۱ به همراه تعیین لبه انجام شده بر روی آن را نشان می‌دهد. مطابق شکل در روش‌های که بر پایه گرادیان قرار دارند بی‌هنجاری کوچک (مکعب شماره ۱) در حضور بی‌هنجاری بزرگ (مکعب شماره ۲) پنهان مانده است. روش THD و HTA عرض مکعب شماره ۲ را بدون خطا و روش‌های Tilt و Theta ۵۰ درصد خطا (۲۰ متر بزرگتر) نشان می‌دهد. روش‌های NTHD با پنجره ۶×۶، NSTD با پنجره ۳×۳ و CCMS با پنجره ۶×۶ عرض مکعب شماره ۱ را ۲ متر کوچکتر و عرض مکعب شماره ۲ را بدون خطا برآورد کرده‌اند. برای بررسی توانایی روش‌های تعیین لبه در حضور نوفه، یک درصد اختلاف بین کمینه و بیشینه اثر میدان گرانی مدل شماره ۱ به عنوان نوفه با توزیع گوسی به داده‌های گرانی آن اضافه شده است. نوفه در بازه [۳،-۳-

[میکروگال قرار دارد. شکل (۷) اثر گرانی همراه با نوفه و تعیین لبه انجام شده بر روی آن را نشان می‌دهد. برای کاهش نوفه در روش‌های NTHD، NSTD و CCMS ابعاد پنجره بزرگتر شده است. اما بزرگ شدن ابعاد پنجره باعث می‌شود بی‌هنجاری‌های کوچک حذف شوند. لذا باید در انتخاب ابعاد پنجره دقت کرد تا بی‌هنجاری‌های کوچک همراه نوفه حذف نشوند. بهترین حالت پنجره در روش NTHD پنجره با ابعاد ۱۲×۱۲ است که با استفاده از آن نوفه تا حدودی تعدیل یافته اما لبه مکعب کوچک حذف شده است. نتایج روش NSTD با پنجره ۵×۵ کاملاً شفاف نیست اما در مقایسه با NTHD مناسب‌تر به نظر می‌رسد. روش CCMS با پنجره ۷×۷ در مقایسه با NSTD نوفه کمتر و تعیین لبه شفاف‌تری را نشان می‌دهد و دقت تعیین لبه آن تقریباً مانند شرایط بدون نوفه است. سایر روش‌ها نوفه شدیدی را نشان می‌دهند و از کیفیت مناسبی برخوردار نیستند.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۲، ۱۳۹۸.



شکل ۶: اثر گرانی مدل شماره ۱ و تعیین لبه‌های انجام شده بر روی آن (الف) اثر گرانی (ب) THD (ج) Tilt (د) Theta (ه) HTA (و) NTHD با پنجره ۶×۶ (ز) NSTD با پنجره ۳×۳ (ح) CCMS با پنجره ۶×۶



شکل ۷: اثر گرانی همراه با نوفه گوسی مدل شماره ۱ و تعیین لبه‌های انجام شده بر روی آن (الف) اثر گرانی همراه با نوفه (ب) THD (ج) Tilt (د) Theta (ه) HTA (و) NTHD با پنجره ۱۲×۱۲ (ز) NSTD با پنجره ۵×۵ (ح) CCMS با پنجره ۷×۷

حالی که هر سه مکعب ابعاد یکسانی دارند). روش‌های Tilt و Theta عرض مکعب‌های ۱، ۲ و ۳ را به ترتیب ۱۴، ۲۰ و ۲۶ متر بزرگتر برآورد کرده اند (به ترتیب ۱۴۰، ۲۰۰ و ۲۶۰ درصد خطا). نتایج سایر روش‌ها تقریباً نزدیک به هم است. به ترتیب شماره عرض مکعب‌ها را ۱، ۵ و ۱۰ متر بزرگتر برآورد شده است (به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد خطا). مقایسه نتایج تعیین لبه بر روی این سه مکعب اهمیت دقیق بودن روش تعیین لبه را به روشنی نشان می‌دهد. یکی دیگر از دلایل اهمیت تعیین لبه تفکیک مرز بی‌هنجاری‌ها است که در مقایسه نتایج تعیین لبه

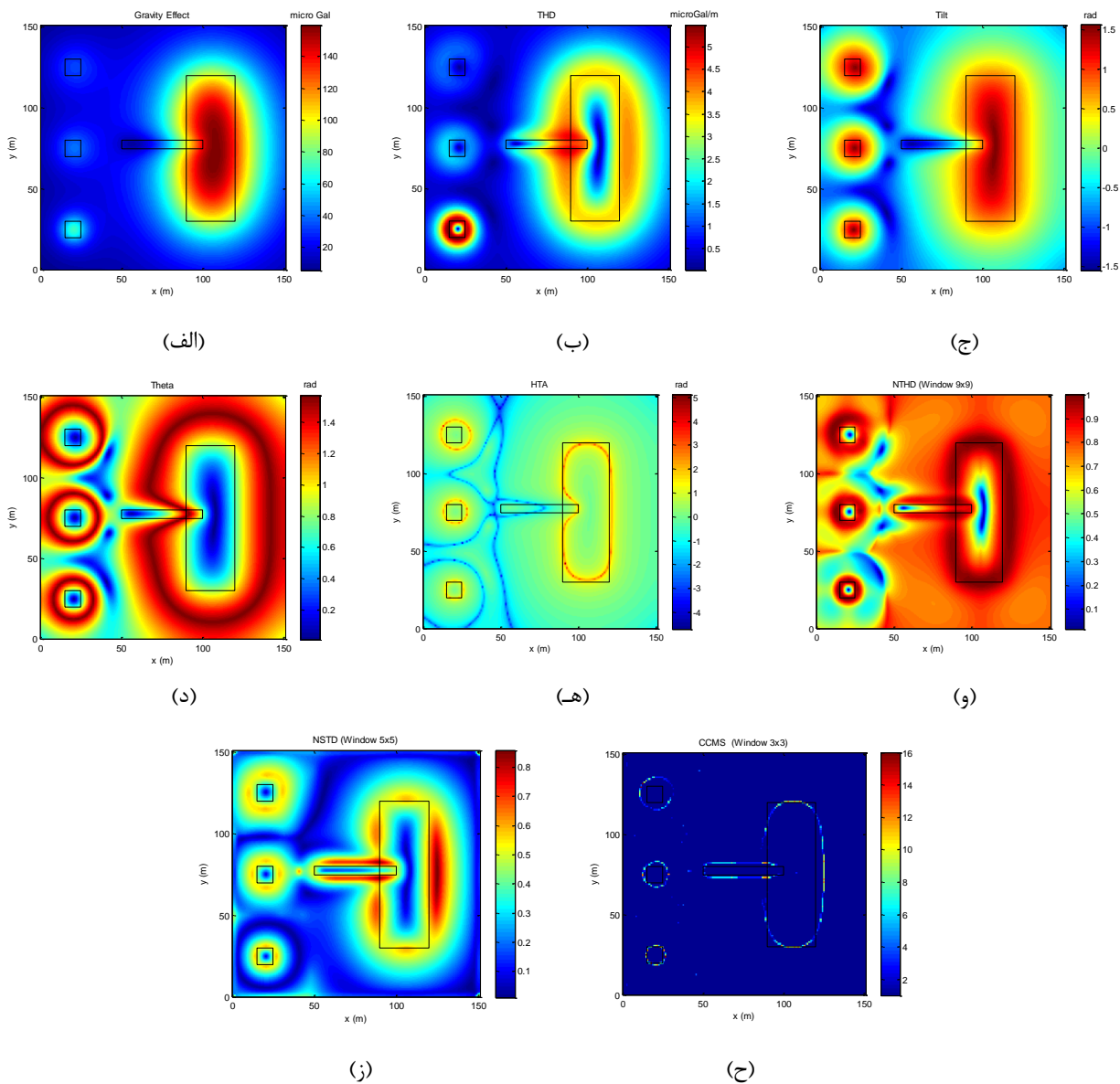
۲-۴- تعیین لبه مدل شماره ۲

اثر گرانی مدل شماره ۲ و تعیین لبه انجام شده بر روی آن در شکل (۸) نشان داده شده است. در روش‌های تعیین لبه افزایش عمق بی‌هنجاری باعث می‌شود لبه برآوردی مقداری بزرگتر از مقدار واقعی داشته باشد. برای نشان دادن این نقص؛ در این مدل مکعب شماره ۱، ۲ و ۳ با ابعاد ثابت ۱۰ متر به ترتیب در اعماق ۵، ۱۰ و ۱۵ متر قرار داده شده است. همه روش‌ها به غیر از THD لبه‌های مکعب را تشخیص داده‌اند. در سایر روش‌ها لبه برآوردی با افزایش عمق مکعب افزایش یافته است (در

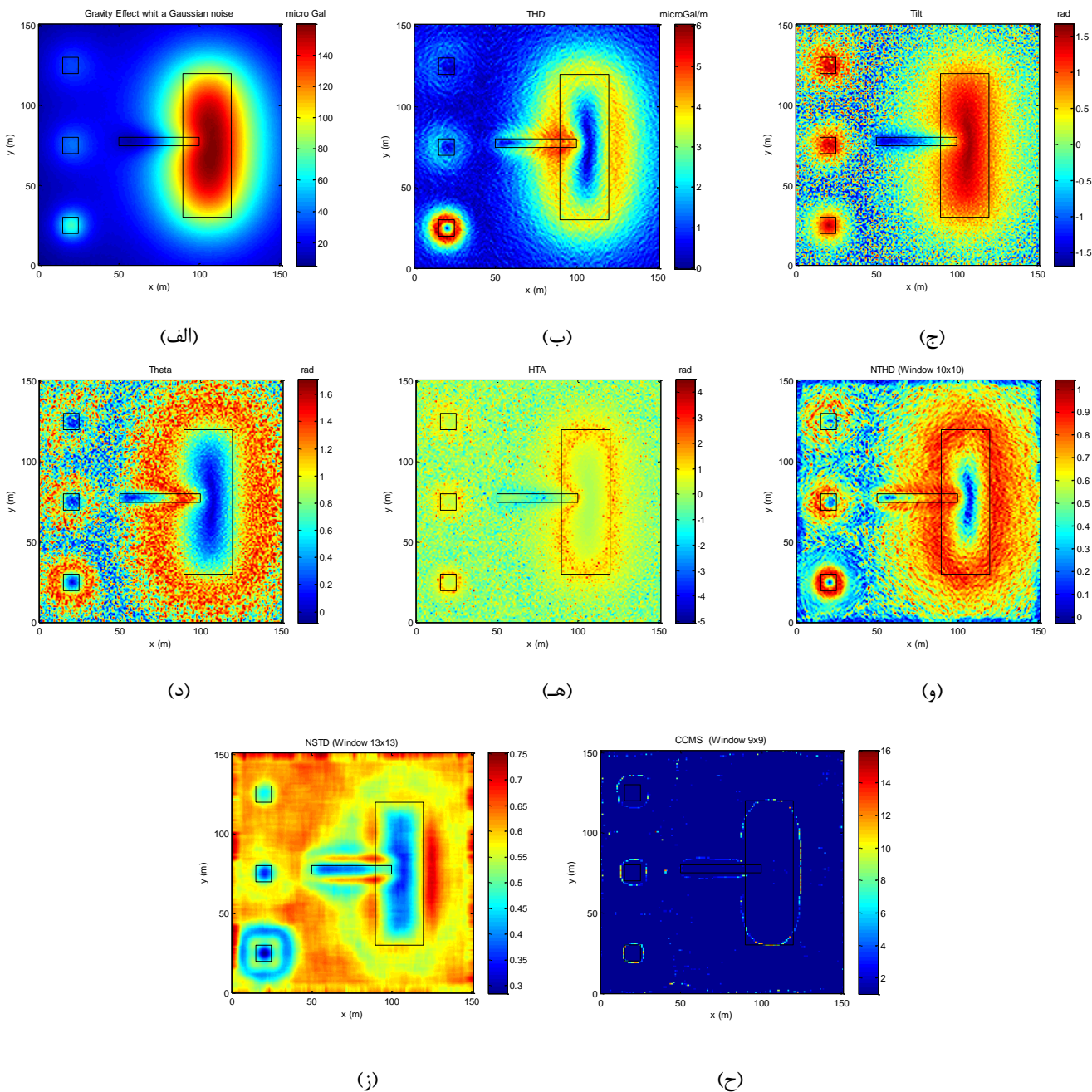
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۲، ۱۳۹۸.

عنوان نوفه با توزیع گوسی در نظر گرفته شده است. نوفه در بازه $[-1/5, +1/5]$ میکروگال قرار دارد. شکل (۹) اثر میدان گرانی همراه با نوفه و تعیین لبه انجام شده بر روی آن را نشان می‌دهد. روش‌های برپایه گرادینان در شرایط نوفه‌ای نتایج خوبی نشان نمی‌دهند و تنها در تشخیص مرز مکعب شماره ۱ و ۴ تا حدودی موفق بوده‌اند. روش‌های NTHD و NSTD در تعیین لبه مکعب شماره ۲ و ۳ با حضور نوفه ناتوان بوده‌اند. در این روش‌ها افزایش ابعاد پنجره به حذف نوفه کمکی نکرده است همچنین نوفه در تشخیص مرز سایر مکعب‌ها نیز تاثیر مخرب داشته است. در شرایط نوفه‌ای تنها نتایج روش CCMS مناسب است. در این روش نسبت به شرایط بدون نوفه دقت عرض برآوردی مکعب‌ها تغییری نکرده و تنها خطای مکعب شماره ۴ افزایش یافته است.

مکعب‌های شماره ۴ و ۵ مشخص می‌شود. مرز این بی‌هنجاری با استفاده از روش‌های NTHD، NSTD و CCMS با دقت خوبی مشخص و تفکیک شده است در حالی که روش‌های THD، Tilt، Theta و HTA در تفکیک مرز بی‌هنجاری شماره ۴ و ۵ (بی‌هنجاری مثبت و منفی) ناتوان بوده‌اند. در عرض برآوردی مکعب شماره ۴ بیشترین خطا مربوط به روش‌های Tilt و Theta است که عرض مکعب را ۴۲ متر بزرگتر برآورد کرده‌اند (۱۴۰ درصد خطا). روش‌های THD، NTHD و NSTD عرض این مکعب را ۴ متر بزرگتر (۱۳ درصد خطا) و روش‌های HTA و CCMS ۱ متر بزرگتر (۳ درصد خطا) برآورد کرده‌اند (در $y=100$). عرض برآوردی مکعب شماره ۵ توسط روش‌های NTHD، NSTD و CCMS ۴ متر بزرگتر از مقدار واقعی است (۸۰ درصد خطا). برای این مدل نیز، یک درصد اختلاف بین بیشینه و کمینه اثر میدان گرانی به



شکل ۸: اثر گرانی مدل شماره ۲ و تعیین لبه‌های انجام شده بر روی آن (الف) اثر گرانی و شماره مکعب‌ها (ب) THD (ج) Tilt (د) Theta (ه) HTA (و) NTHD (ز) پنجره ۹×۹ (ح) پنجره ۵×۵ (ط) پنجره ۳×۳



شکل ۹: اثر گرانی همراه با نوفه گوسی مدل شماره ۲ و تعیین لبه‌های انجام شده بر روی آن (الف) اثر گرانی همراه با نوفه (ب) THD (ج) Tilt (د) Theta (ه) HTA (و) NTHD با پنجره ۱۰×۱۰ (ز) NSTD با پنجره ۱۳×۱۳ (ح) CCMS با پنجره ۹×۹

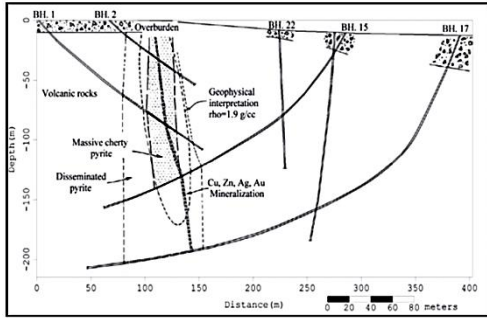
است. بعد از استخراج داده از کتاب گرانت و وست (۱۹۶۵) به منظور تعیین لبه، نقشه گرانی منطقه با فاصله شبکه بندی ۵×۵ متر رسم شده است. نتایج حفاری چگالی توده معدنی را حدود ۴/۶ و چگالی سنگ میزبان را ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب نشان می‌دهد. طول ماده معدنی در حدود ۳۰۰ متر، عرض آن در حدود ۳۰ متر، عمق بالایی ۱۷ متر و عمق پایینی آن در حدود ۱۸۷ متر است (Grant and West, 1965). شکل ۱۰ برش عرضی حاصل از گمانه‌های اکتشافی و داده‌های ژئوفیزیکی

۵- بررسی داده‌های واقعی گرانی معدن سولفید موبرون کانادا (Mobrun)

توده سولفید موبرون در نزدیکی شهر نوراندا (Noranda) در ایالت کبک کانادا با مختصات ۱۲°، ۲۳°، ۴۸° شمالی و ۵۴°، ۰۰°، ۷۸° غربی واقع شده است. سنگ میزبان توده معدنی سنگ‌های آتشفشانی پراکامبرین میانی است. داده‌برداری در طول ۱۳ پروفیل انجام شده است که فاصله پروفیل‌ها از هم ۶۰ متر و فاصله داده‌ها بر روی پروفیل ۳۰ متر

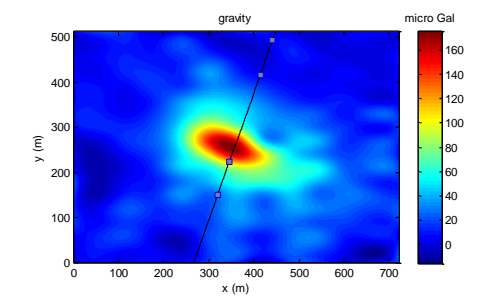
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۲، ۱۳۹۸.

کمتری را نشان می‌دهند. با توجه به عرض برآوردی و کیفیت تعیین لبه روش‌های THD و CCMS نتایج مناسب‌تری ارائه داده‌اند. نتایج تعیین لبه روش CCMS بر روی نقشه بوگه نشان داده شده است. این نحوه نمایش پیچیدگی‌های تفسیر را کاهش می‌دهد که در شرایط نوفه‌ای می‌تواند به عنوان مزیت روش CCMS محسوب شود.

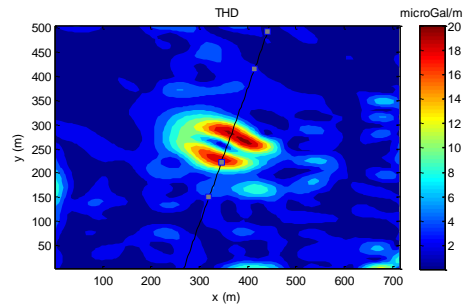


شکل ۱۰: برش عرضی حاصل از گمانه‌های اکتشافی و داده‌های ژئوفیزیکی بروی داده‌های گرانی معدن سولفید موبرون (Grant and West, 1965)

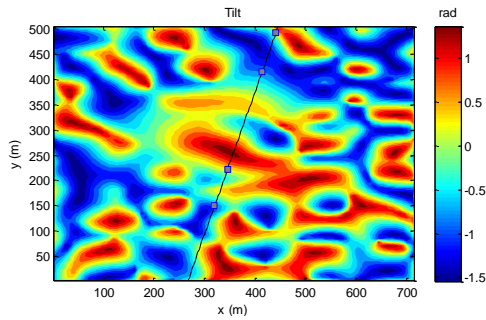
بروی این پروفیل را نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) مختصات ۴ چاه گمانه به نام‌های BH1, BH2, BH15 و BH17 در راستای پروفیل AB مشخص شده است. شکل (۱۱) تعیین لبه انجام شده بر روی نقشه بوگه باقی‌مانده را نشان می‌دهد. عرض ماده معدنی در راستای پروفیل AB برای روش‌های مختلف تعیین لبه برآورد شده است. روش‌های THD و NTHD با CCMS با ۸۶ درصد خطا عرض ماده معدنی را ۵۶ متر را نشان می‌دهند. روش NSTD با ۱۰۶ درصد خطا عرض ۶۱ متری، روش Tilt و Theta با ۱۷۶ درصد خطا عرض ۸۳ متری و روش HTA با ۴۶ درصد خطا عرض توده را ۴۴ متر نشان می‌دهد. شکل (۱۲) تعیین لبه انجام شده در راستای پروفیل AB را نشان می‌دهد. از لحاظ کیفیت تعیین لبه (شکل ۱۱)، روش HTA و Tilt دو بی‌هنجاری را نشان می‌دهند (بی‌هنجاری بزرگ زیر بی‌هنجاری اصلی منطقه). که این نتیجه با نتایج سایر تحقیقات انجام شده بر روی این داده همخوانی ندارد (آقاجانی و همکاران ۱۳۸۹، رضایی و همکاران، ۲۰۱۷). این نشان می‌دهد که HTA هرچند خطایی کمتری دارد اما نمی‌توان به نتایج آن کاملاً اعتماد کرد. روش THD و CCMS در مقایسه با NTHD و NSTD نوفه



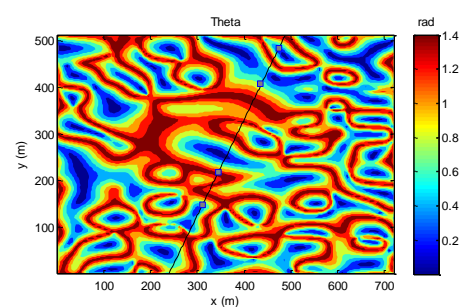
(الف)



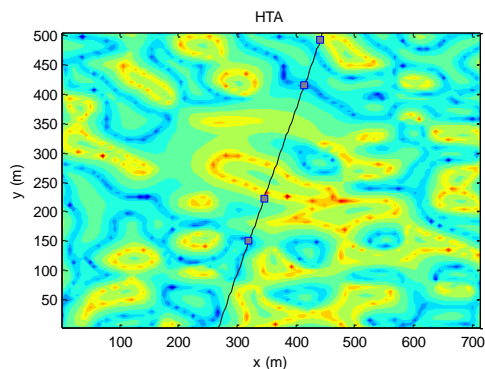
(ب)



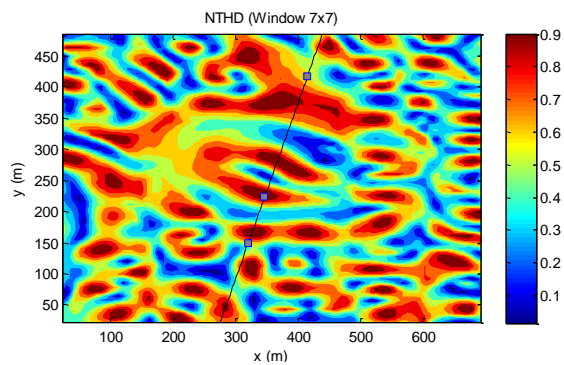
(ج)



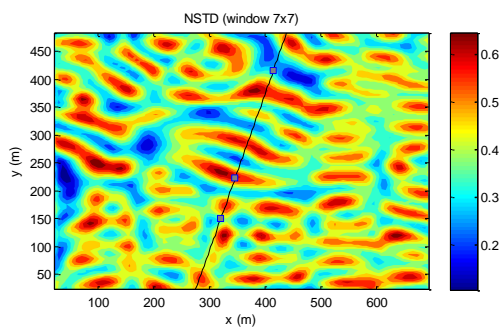
(د)



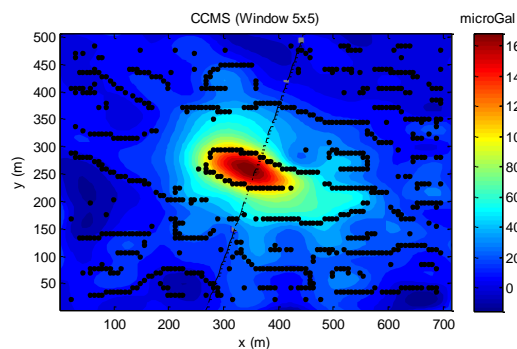
(هـ)



(و)

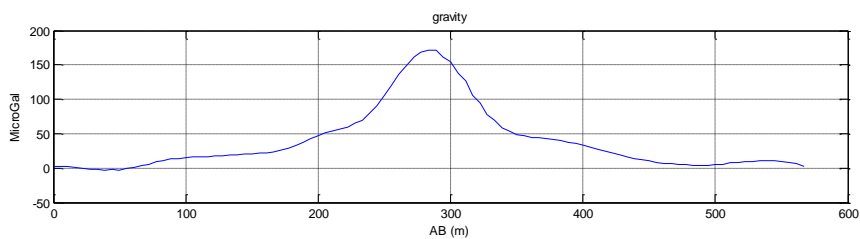


(ز)

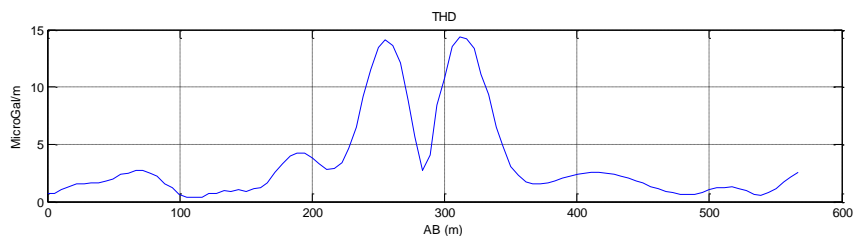


(ح)

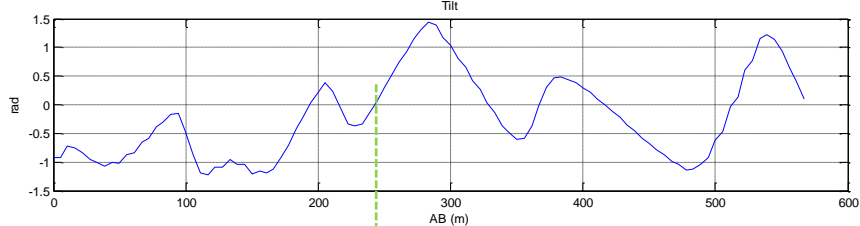
شکل ۱۱: نقشه بوگه باقی‌مانده معدن سولفید موبرون و تعیین لبه انجام شده بر روی آن به همراه موقعیت گمانه‌های اکتشافی (الف) نقشه بوگه باقی‌مانده (ب) THD (ج) Tilt (د) Theta (هـ) HTA (و) NTHD با پنجره ۷×۷ (ز) NSTD با پنجره ۷×۷ (ح) CCMS با پنجره ۵×۵



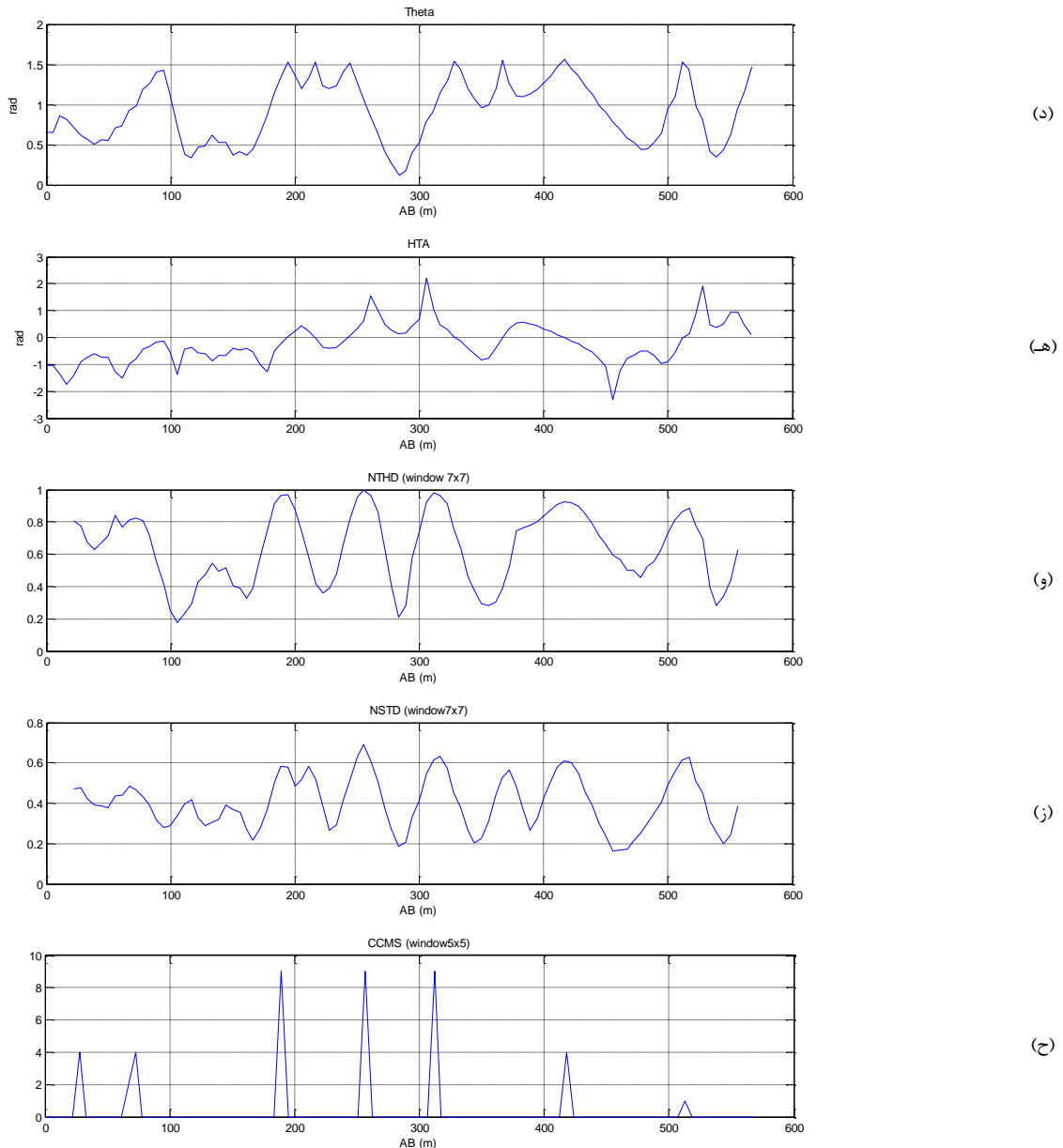
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۱۲: اثر گرانی و تعیین لبه در راستای پروفیل AB (خطوط قرمز و سبز مرز برآوردی روش‌ها را نشان می‌دهند) (الف) نقشه بوگه باقی‌مانده (ب) THD (ج) Tilt (د) Theta (ه) HTA (و) NTHD (ز) NSTD (ح) CCMS

۶- بحث و نتیجه گیری

در روش‌های جدید تعیین لبه با استفاده از روش‌های آماری سعی شده است دقت و تفکیک مرز بی‌هنجاری را افزایش دهند. روش نیمه آماری NSTD و روش کاملاً آماری CCMS از جمله این روش‌ها است. در این مقاله توانایی این روش‌ها با روش‌های متداول و بر پایه گرادیان THD, Theta, Tilt و روش نوین NTHD مقایسه شده است. همه روش‌های تعیین لبه با افزایش عمق بی‌هنجاری، لبه بی‌هنجاری را بزرگتر از لبه واقعی را نشان می‌دهند. با استفاده از داده‌های مصنوعی این نقص به خوبی نشان داده شده است. مدل‌های مصنوعی به گونه‌ای است که بتوان دقت، قدرت تفکیک بی‌هنجاری‌ها و حساسیت به نوفه روش‌های تعیین لبه را باهم مقایسه کرد. در داده‌های مصنوعی بدون نوفه، دقت روش‌های THD, HTA, NTHD, NSTD و CCMS تقریباً با هم برابر

تعیین لبه داده‌های گرانی، یک تفسیر کیفی است و یکی از روش‌های مهم کسب اطلاعات از داده‌های گرانی به حساب می‌آید. در تعیین لبه برآورد دقیق مرز بی‌هنجاری‌ها و تفکیک مرز آن‌ها دارای اهمیت است. روش‌های تعیین لبه معمولاً بر پایه گرادیان‌ها قرار دارند و بر این اساس روش‌های متنوعی برای تعیین لبه معرفی شده است. حساسیت گرادیان‌ها به نوفه باعث شده است که روش‌های تعیین لبه نیز به نوفه حساس باشند. بنابراین در انتخاب روش تعیین لبه برای تفسیر داده‌ها تعداد و درجه گرادیان‌ها به کار برده شده اهمیت دارد. همچنین باید به دقت روش تعیین لبه و توانایی آن در تفکیک مرز بی‌هنجاری‌ها باید توجه کرد.

- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), pp.1585-159.
- Cooper, G.R. and Cowan, D.R., 2008. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics*, 73(3), pp.H1-H4. Castagna, J.P., 1993, Petrophysical imaging using AVO: The Leading Edge, 12, 172-179.
- Grant, F.S. and West, G.F., 1965. Interpretation theory in applied geophysics. New York, NY : McGraw-Hill.
- Lin, H., 1996, Morden statistics; Economy & Management Press, Beijing, 58-190.
- Ma, G. and Li, L., 2012. Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative. *Computers & Geosciences*, 41, pp.83-87.
- Miller, H.G. and Singh, V., 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3), pp.213-217.
- Plouff, D., 1976. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. *Geophysics*, 41(4), pp.727-741.
- Rezaie, M., Moradzadeh, A., Nejati Kalate, A. (2017). '3D gravity data-space inversion with sparseness and bound constraints', *Journal of Mining and Environment*, 8(2), pp. 227-235. doi: 10.22044/jme.2015.558
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C., 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), pp.116-119.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005. Theta map: edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70(4), pp.L39-L43.
- Xu, M.L., Yang, C.B., Wu, Y.G., Chen, J.Y. and Huan, H.F., 2015. Edge detection in the potential field using the correlation coefficients of multidirectional standard deviations. *Applied Geophysics*, 12(1), pp.23-34.
- است. روش‌های Theta و Tilt بیشترین خطاها را نشان می‌دهند. مطابق نتایج مدل‌های مصنوعی، روش‌های NTHD، NSTD و CCMS توانایی تفکیک بی‌هنجاری‌های تداخل یافته را دارند در حالی که روش‌های متکی بر گرادیان در تفکیک مرز بی‌هنجاری‌ها دچار ضعف بوده‌اند. در داده‌های مصنوعی دارای نوفه گوسی روش‌های مبتنی بر گرادیان نوفه شدیدی نشان می‌دهند. نوفه کیفیت تعیین لبه روش‌های NTHD و NSTD را نیز کاهش می‌دهد. در این روش‌ها با افزایش طول پنجره نوفه تضعیف شده اما اثر بی‌هنجاری‌های کوچک حذف می‌شود. تنها روش کاملاً آماری CCMS در حضور نوفه دارای دقت و قدرت تفکیک بی‌هنجاری مناسبی است.
- در تفسیر داده‌های واقعی از داده‌های گرانی معدن موبرون کانادا استفاده شده است. مقدار لبه برآوردی همه روش‌ها در داده‌های واقعی نیز بزرگتر از عرض توده برآورد شده توسط گمانه‌ها بوده است. کمترین خطا (۴۶ درصد) مربوط روش HTA است و بیشترین خطا (۱۷۶ درصد) مربوط به روش Theta و Tilt است. روش‌های THD، NTHD و CCMS ۸۶ درصد خطا دارند و روش NSTD ۱۰۶ درصد خطا دارد. HTA و Tilt یک بی‌هنجاری نزدیک به بی‌هنجاری اصلی نشان می‌دهند که با نتایج سایر تحقیقات همخوانی ندارد. لذا با وجود خطایی کم نمی‌توان به نتایج کلی آن تکیه کرد. از نظر کیفیت تعیین لبه روش THD و CCMS کمترین نوفه را نشان می‌دهند. مزیت روش CCMS نمایش نتایج تعیین لبه بر روی نقشه گرانی است که باعث کاهش پیچیدگی‌های تفسیر می‌شود.

۷- منابع

آفاجانی، حمید، مرادزاده، علی، زنگ، هوالین. (۱۳۸۹). 'برآورد موقعیت افقی و ژرفای بی‌هنجاری‌های گرانی به کمک گرادیان کل بهنجار شده'، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، ۱۹(۷۶)، pp. 169-176. doi: 10.22071/gsj.2010.55676



Edge detection of gravity anomalies using CCMS statistical method

Mostafa Mousapour Yasoori^{1*}; Vahid Ebrahimzadeh Ardestani²

1- M.Sc. institute of Geophysics, university of Tehran, Tehran, Iran
2 - Professor; institute of Geophysics, university of Tehran, Tehran, Iran

Received: 20 October 2018; Accepted: 1 March 2019

Corresponding author: mousapour@ut.ac.ir

Keywords

Edge detection
Qualitative interpretation
Statistical method
Correlation coefficient
Standard deviation
Edge detection
Qualitative interpretation

Extended Abstract

Summary

Edge detection is a fast and qualitative interpretation method to achieve information from potential field (e.g. gravity) anomalies. In the edge detection methods, the separation of overlapping amplitudes of anomalies and accuracy of edge detection are very important. There are various methods for edge detection. Most of these methods are based on the gradients of the potential field data. The gradients are sensitive to noise. Statistical methods have been used to increase the accuracy of edge detection. Normalized standard deviations (NSTD) and correlation coefficient of multidirectional standard deviations (CCMS) are

among these methods.

Introduction

There are several edge detection methods based on gradients of data. Each of these methods has some strengths and some weaknesses. In the selection of these methods for a particular case, simplicity and better performance are considered. These methods include: total horizontal derivative (THD), Theta angle, Tilt angle, hyperbolic tilt angle (HTA) and a new method based on the gradients, called normalized total horizontal derivative (NTHD). In addition, the semi-statistical method of NSTD and statistical method of CCMS are among these methods that have been explained in this paper. The NSTD method is obtained from the standard deviation of the gradients, however, the CCMS method does not use the gradients. This method is completely a statistical method, which is based on correlation coefficient and standard deviation.

Methodology and Approaches

In this paper; after examining the above-stated edge detection methods, they have been applied on both synthetic and real data. The performances of these methods are compared in the presence of noisy data, overlapping amplitudes of anomalies and their accuracies in edge detection.

Results and Conclusions

The results of applying the above-stated edge detection methods on the synthetic data show that the gradient-based edge detection methods are sensitive to noise, depths of anomalies and overlapping amplitudes of anomalies. The NTHD, NSTD and CCMS methods are less sensitive to noise than the other edge detection methods. These methods detect anomalies with different depths and separate anomalies with overlapping amplitudes. In all of these methods, as the depths of anomalies increase, the accuracy of edge detection decrease. This study show that the CCMS method has the best result when applied on the synthetic data. Furthermore, applying the CCMS method on the real data yields better results in comparison with the other edge detection methods. The results of edge detection by this method have been shown on the bouguer map. Thus, this method reduces complexities of edge detection that can be useful for the interpreter.