

تعیین مرز آنومالی‌های میدان گرانی با استفاده از گرادیان کل افقی نرمال‌شده (NTHD)

وحید انتظارسعادت^۱ و سید هانی متولی عنبران^{۲*}

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

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

(دریافت: ۹۴/۱/۳۰، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

به دلیل اهمیت زیاد تعیین مرزهای آنومالی در تفسیر نقشه‌های گرانی و مغناطیس، روش‌های گوناگونی برای تعیین آن‌ها وجود دارند. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از فیلتر زاویه تیلت (T)، فیلتر مشتق افقی کل زاویه تیلت (THDT)، فیلتر تیلت، فیلتر TDx، فیلتر زاویه تیلت هدلولوی (HTA) و غیره. فیلترهای فاز محلی قابلیت‌های زیادی دارند اما همراه با ضعفی عمده و آن کاهش دقت آن‌ها در رویارویی با منابع عمیق است. این تحقیق توانایی روش گرادیان کل افقی نرمال‌شده (NTHD) را در تعیین مرز آنومالی‌ها، بررسی و آن را با سایر روش‌های مرسوم مقایسه می‌کند. به منظور بررسی کارایی فیلتر NTHD، این فیلتر روی مدل مصنوعی مکعب اعمال گردید و برای بررسی بیشتر، به مدل مکعب مصنوعی نويز گوسین اضافه شد و سپس این فیلتر روی داده‌های حاوی نويز اعمال شد؛ نتایج در هر دو مورد کارایی بسیار بالای این فیلتر را نشان دارند. علاوه بر این، فیلتر NTHD و دیگر فیلترهای ذکر شده روی مدل‌های مصنوعی مکعبی ترکیبی با عمق‌های مختلف و در مجاورت هم، به کار بسته شد که تقریباً تمام روش‌ها در تعیین مرز آنومالی‌های سطحی موفق عمل کردند؛ اما فیلتر NTHD در مقایسه با فیلترهای دیگر جزئیات بیشتری را در دسترس قرار می‌دهد؛ به طوری که در تعیین مرز آنومالی‌های عمیق قرار گرفته در مجاورت آنومالی‌های سطحی، بهبود واضحی نشان می‌دهد. نهایتاً فیلتر NTHD روی داده‌های واقعی توده معدنی موبرون (Mobrun) کانادا اعمال شد و نتایج آن با مطالعات قبلی تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آنومالی‌های گرانی، تعیین مرز آنومالی، توده معدنی موبرون کانادا، فیلتر NTHD، فیلترهای فاز محلی، مشتق افقی کل.

۱. مقدمه

روش‌های تعیین مرز لبه‌های آنومالی‌های گرانی یکی از مراحل مهم در تفسیر نقشه‌های گرانی هستند. در این روش‌ها با محاسبه گرادیان افقی و قائم میدان پتانسیل، سعی در تعیین مرز آنومالی‌ها داریم. محاسبه گرادیان افقی داده‌ها موجب می‌شود که بیشترین مقدار گرادیان افقی روی مرز توده‌ها قرار گیرد و بنابراین باعث ایجاد تمایز بین توده و سایر نقاط نقشه می‌شود. مشتق قائم عرض بی‌هنجاری‌ها را باریک‌تر و موقعیت آن‌ها را با دقت بیشتری مشخص می‌کند (کوپر و کوان، ۲۰۰۴). با مشتق‌گیری قائم از داده‌ها، کمینه مقدار مشتق قائم روی مرز توده قرار می‌گیرد؛ البته شایان ذکر است که در مرتبه‌های بالاتر مشتق قائم، این فیلتر کارایی خود را از دست می‌دهد؛ چرا که هم‌زمان با بی‌هنجاری‌ها، نوفه‌های موجود در نقشه‌ها نیز برجسته می‌گردد (کوان و کوپر، ۲۰۰۵). کوپر و کوان (۲۰۰۸) همچنین روش NSTD را که می‌توانست تا حدودی لبه‌های با دامنه بزرگ و

کوچک را همزمان آشکار کند، ارائه دادند. زو و همکاران (۲۰۱۵) روش CCMS (coefficient of multidirectional standard) را ارائه دادند که کاملاً آماری و بدون استفاده از مشتقات است. از جمله روش‌های کلاسیک در تعیین مرز آنومالی‌ها، روش دامنه سیگنال تحلیلی است که اولین بار نیقیان (۱۹۷۴) آن را برای پردازش داده‌های مغناطیس بیان کرد. کلینگل و همکاران (۱۹۹۱) استفاده از دامنه سیگنال تحلیلی را برای پردازش داده‌های گرانی پیشنهاد دادند که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$|AS(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

که در آن، f بیانگر داده‌های گرانی یا مغناطیس برداشت شده است و مقدار بیشینه این فیلتر روی لبه آنومالی‌های چشمه بی‌هنجاری میدان پتانسیل قرار می‌گیرد.

$$HTA = \text{Real} \left(\tanh^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right) \right) \quad (4)$$

در این فیلتر به جای اینکه همانند فیلتر زاویه تیلت، از تابع معکوس تانژانت گرفته شود، معکوس هذلولوی تانژانت گرفته شده است و در آن Real بیانگر قسمت حقیقی فیلتر است. بیشینه مقدار این فیلتر بیانگر مرز آنومالی و لبه توده است.

۳.۲. فیلتر TDX

فیلتر TDX طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود و عبارت است از نرمال‌شده تابع گرادیان کل افقی. در این رابطه نرمال‌سازی با مشتق قائم داده‌های پتانسیل صورت می‌گیرد که باعث می‌شود فیلتر به نوفه‌ها حساس تر شود. بیشینه این فیلتر در محل لبه‌ها اتفاق می‌افتد.

$$TDX = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|} \right) \quad (5)$$

با توجه به اینکه فیلترهای تیلت، گرادیان افقی زاویه تیلت و تتا در مقاله عابدی و همکاران (۲۰۱۴) به تفصیل شرح داده شده‌اند، این مقاله از اشاره بیشتر به تئوری فیلترهای یاد شده، اجتناب کرده و برای جزئیات بیشتر به عابدی و همکاران (۲۰۱۴) ارجاع می‌دهد.

۳. مدل مصنوعی

به منظور بررسی نحوه عملکرد فیلترهای نام برده شده، آن‌ها را روی مدل‌های مصنوعی ساخته شده در محیط متلب به کار می‌بندیم. مدل مصنوعی به کاررفته، مدل مصنوعی مکعب است. اثر گرانی یک مکعب منفرد در راستای قائم به صورت زیر تعریف می‌شود (پلوف، ۱۹۷۵):

$$g = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (6)$$

فیلترهای فاز محلی از جمله فیلترهای مرسوم در تعیین مرز آنومالی‌ها هستند که از مشتقات افقی و قائم میدان پتانسیل در تعیین مرز آنومالی‌ها بهره می‌برند. از جمله فیلترهای فاز محلی، فیلترهای زاویه تیلت (T)، مشتق افقی کل زاویه تیلت (THDT)، تتا، زاویه تیلت هذلولوی (HTA) و TDX هستند. در این تحقیق سعی داریم تا فیلتر Normalized Total Horizontal Derivative (NTHD) را معرفی و آن را با پنج روش مطرح تعیین مرز آنومالی‌ها مقایسه کنیم و با توجه به مدل‌های مصنوعی ترکیبی به توانایی هر کدام در مواجهه با نوع خاصی از آنومالی پی ببریم.

۲. معرفی روش

۲.۱. فیلتر گرادیان کل افقی نرمال‌شده (NTHD)

فیلتر گرادیان کل افقی نرمال‌شده، نسبت گرادیان کل افقی به بیشترین گرادیان کل افقی مقادیر مجاور است. در واقع در این روش گرادیان کل افقی به وسیله بیشترین مقادیر این تابع برای مقادیر مجاور هر مؤلفه، نرمال می‌شود. در این روش به محاسبه مشتقات قائم نیازی نیست که باعث می‌شود نتایج محاسبات پایدارتر باشند. این فیلتر به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) بیان می‌شود:

$$NTHD(i, j) = \frac{fx_{tot}(i, j)}{\max[fx_{tot}(i-m : i+m, j-n : j+n)]} \quad (2)$$

$$fx_{tot} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

که در آن، fx_{tot} بیانگر گرادیان کل افقی است و m و n ابعاد پنجره برای نرمال‌سازی است و $NTHD(i, j)$ نتیجه را برای مؤلفه (i, j) به دست می‌دهد. این محاسبات به راحتی در حوزه مکان و فرکانس قابل اجرا هستند (ما و لی، ۲۰۱۲). بیشترین مقدار این فیلتر در لبه‌های توده آنومالی قرار می‌گیرد.

۲.۲. فیلتر زاویه تیلت هذلولوی

اولین بار کوپر و کوان (۲۰۰۶) استفاده از فیلتر زاویه تیلت هذلولوی را پیشنهاد کردند که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

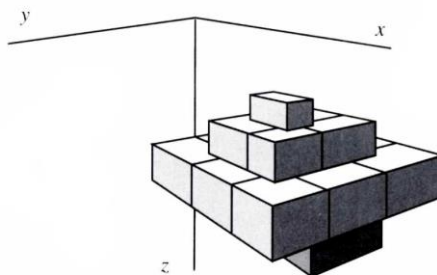
گرانشی متناظر با آن مکعب‌ها را داریم که راستای بردار گرانش همه این داده‌ها، راستای قائم است. ما می‌توانیم اثر گرانشی مکعب‌های مختلف را برای سطح برداشت یکسان به صورت اسکالر با هم جمع کنیم؛ بدین طریق می‌توان با استفاده از یک مکعب، اثر گرانشی چندین مکعب را به دست آورد. ابتدا فیلتر NTHD را روی مدلی مصنوعی که اطلاعات آن در جدول ۲ آمده است، به کار می‌بندیم؛ البته در شکل ۲، قسمت الف و ب حاوی نوینز نیستند.

که در رابطه (۶) ρ تباین چگالی، γ ثابت جهانی گرانش، $R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$ و $\mu_{ijk} = (-1)^i(-1)^j(-1)^k$ است. ابعاد مکعب مدل مصنوعی در رابطه بالا به وسیله $Z_1 < Z < Z_2$ ، $Y_1 < Y < Y_2$ ، $X_1 < X < X_2$ تعریف می‌شود و به منظور ساختن مدل ترکیبی در این مقاله از نرم‌افزار متلب استفاده شده است؛ به طوری که یک سطح برداشت تعریف می‌شود و اثر گرانی هر مکعب در آن سطح برداشت با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. در نهایت به ازای مکعب‌های مختلف، داده‌های

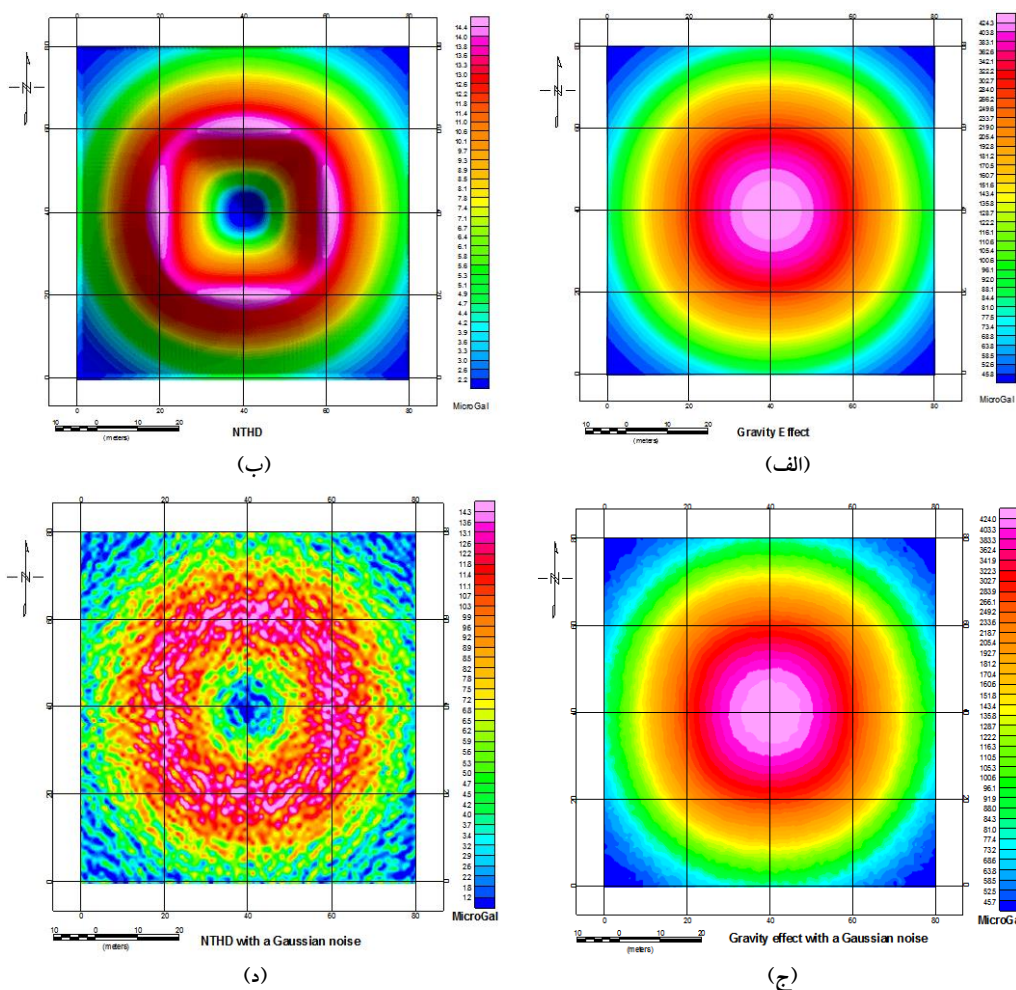
جدول ۱. مشخصات فیلترهای اشاره شده در این پژوهش به همراه روابط مربوط به آن‌ها

شماره فیلتر	نام فیلتر	معادله فیلتر
۱	دامنه سیگنال تحلیلی	$ AS(x, y) = \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}$
۲	گرادیان کل افقی نرمال شده	$NTHD(i, j) = \frac{fx_{tot}(i, j)}{\max[fx_{tot}(i-m : i+m, j-n : j+n)]}$ $fx_{tot} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$
۳	فیلتر زاویه تیلت	$T = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right)$
۴	گرادیان کل افقی زاویه تیلت	$THDT = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$
۵	تنا	$\cos \theta = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}}$
۶	زاویه تیلت هذلولوی	$HTA = \text{Real} \left(\tanh^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right) \right)$
۷	TDX	$TDX = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\left \frac{\partial f}{\partial z} \right } \right)$

$P(x, y, z)$



شکل ۱. نمایش شماتیک توده‌ای سه‌بعدی از مکعب‌ها (بلیکلی، ۱۹۹۵)



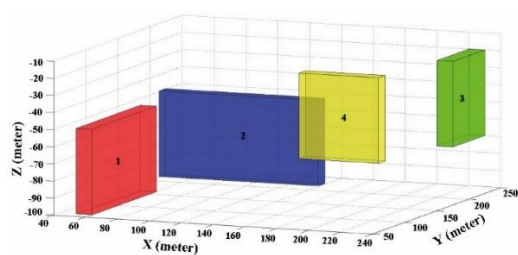
شکل ۲. (الف) اثر گرانی مدل مصنوعی جدول ۲ بدون نویز، (ب) نتیجه به کار بستن فیلتر NTHD برای پنجره ۱×۱ روی مدل مصنوعی جدول ۲ بدون نویز، (ج) اثر گرانی مدل مصنوعی جدول ۲ به همراه ۵ درصد نویز گوسین و (د) نتیجه به کار بستن فیلتر NTHD برای پنجره ۱×۱ روی مدل مصنوعی جدول ۲ به همراه ۵ درصد نویز گوسین.

جدول ۲. مشخصات مدل مصنوعی مکعب منفرد به همراه ۵ درصد نویز گوسین

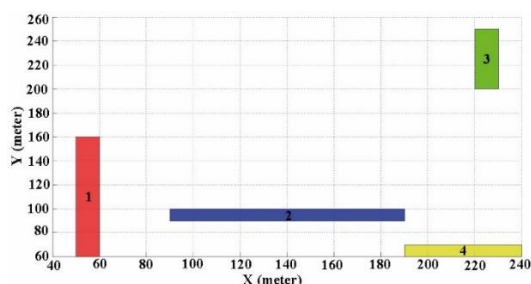
$x_1(m)$	$x_2(m)$	$y_1(m)$	$y_2(m)$	$z_1(m)$	$z_2(m)$	$\rho(g/cm^3)$
۲۰	۶۰	۲۰	۶۰	۱۰	۳۰	۱,۵

داده‌ها، ماتریس داده‌ها را با ماتریس نویز جمع می‌کنیم. برای بررسی بیشتر توانایی فیلتر NTHD در مقایسه با سایر فیلترهای نام برده شده، فیلترهای گفته شده بر مجموعه‌ای از مدل‌های مصنوعی مکعبی ترکیبی با ابعاد مختلف و اعماق متفاوت که در کنار یکدیگر ساخته شده‌اند، اعمال شد. مشخصات این مدل‌ها در جدول ۳ آمده و شکل سه بعدی و دوبعدی مکعب‌ها در شکل ۳ موجود است. به ترتیب رنگ‌های قرمز، آبی، سبز و زرد بیان‌کننده مدل‌های ۱ تا ۴ هستند.

همان‌طور که در شکل ۲-ب مشخص است، فیلتر NTHD لبه‌های مدل مصنوعی مکعبی را با دقت زیادی مشخص کرده است و در لبه‌های توده دارای مقدار بیشینه شده است. در شکل ۲-ج به همان مدل مصنوعی ۵ درصد نویز گوسین اضافه شده است که با وجود نویز، این فیلتر لبه‌های مکعب را به خوبی نمایش داده است (شکل ۲-د). نحوه اضافه کردن نویز گوسین به داده‌ها با استفاده از دستور randn(a,b) در محیط متلب است که در آن a و b ابعاد ماتریس نویز است و باید با ابعاد ماتریس داده‌های گرانشی مدل مصنوعی برابر باشد و در نهایت برای افزودن نویز به



(الف)



(ب)

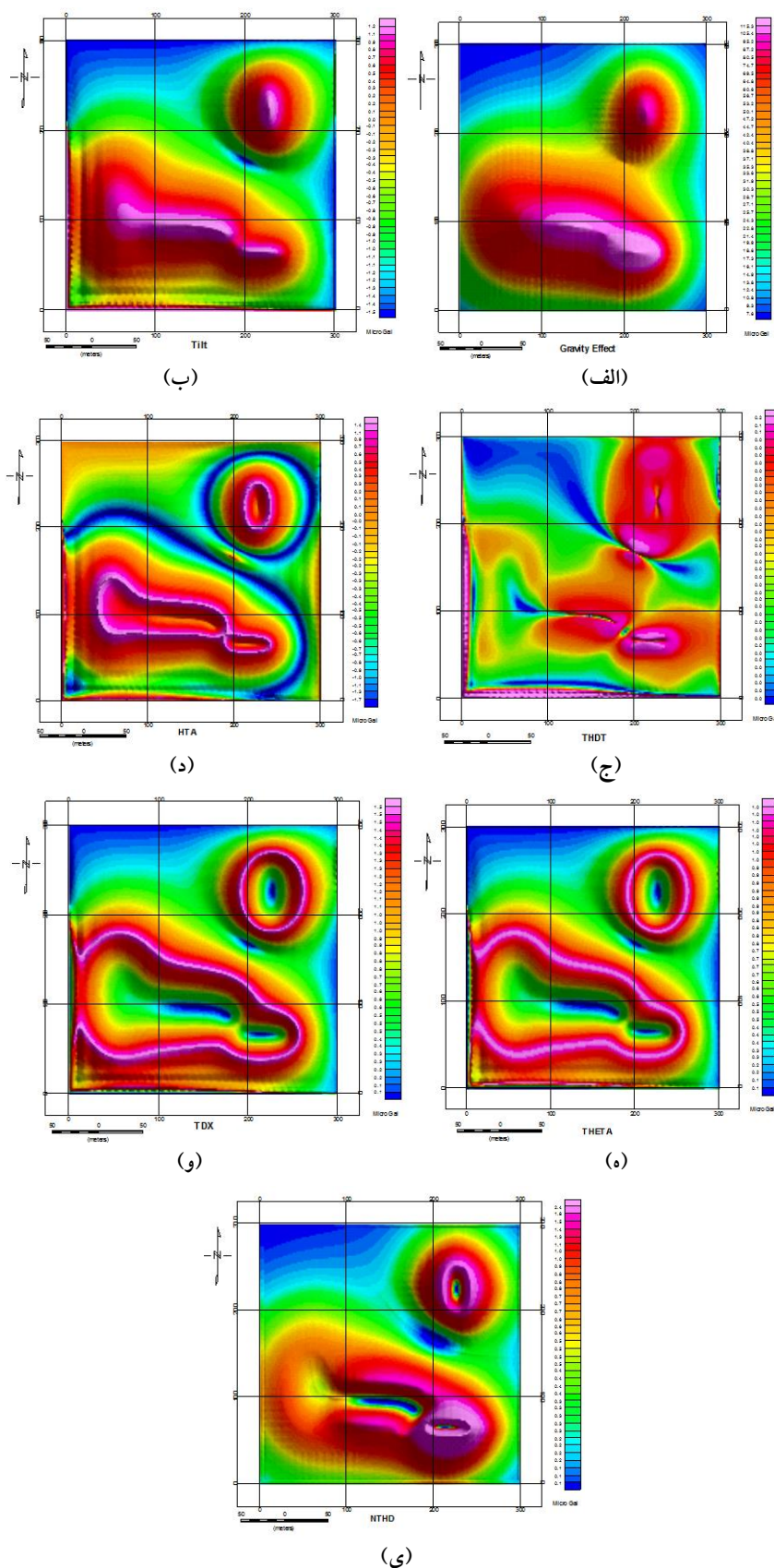
شکل ۳. (الف) نمایش سه‌بعدی مکعب‌های مدل مصنوعی ترکیبی جدول ۳ و (ب) نمایش دوبعدی مکعب‌های مدل مصنوعی ترکیبی جدول ۳؛ اثر گرانشی این مکعب‌ها که اطلاعات آن‌ها در جدول ۳ آمده است و در اعماق و موقعیت‌های مکانی مختلفی هستند با استفاده از نرم‌افزار متلب و رابطه ۶ محاسبه شده است و با هم (به‌زای نقاط برداشت داده یکسان) جمع شده‌اند که نتیجه گرانشی آن‌ها را در شکل ۴-الف مشاهده می‌کنید.

جدول ۳. مشخصات مدل‌های مصنوعی ترکیبی به‌کاررفته در نقشه‌های الف تا ی

	۱	۲	۳	۴
$x_1(m)$	۵۰	۹۰	۲۲۰	۱۹۰
$x_2(m)$	۶۰	۱۹۰	۲۳۰	۲۴۰
$y_1(m)$	۶۰	۹۰	۲۰۰	۶۰
$y_2(m)$	۱۶۰	۱۰۰	۲۵۰	۷۰
$z_1(m)$	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰
$z_2(m)$	۱۰۰	۸۰	۷۰	۶۰
$\rho(g/cm^3)$	۱	۱	۱	۱

شکل ۴ (ب تا و) مشاهده می‌گردد که هیچکدام برای توده‌های شماره ۱ و ۲ که به ترتیب دارای بیشترین عمق هستند، مرزی نشان نمی‌دهند و این دو توده را یکجا نشان می‌دهند، ولی برای توده‌های ۳ و ۴ که توده‌های سطحی هستند، با دقت زیادی (۳-۲ متر) مرز آن‌ها را تعیین کرده‌اند. این در حالی است که فیلتر NTHD علاوه بر تعیین لبه توده‌های سطحی با دقت زیاد، مرز توده‌های عمیق را نیز با دقت خوبی تعیین و این دو توده را از هم جدا کرده است که مزیت این روش در مقایسه با سایر روش‌ها محسوب می‌شود.

تقریباً همه روش‌ها در برآورد مرز و لبه آنومالی‌های سطحی و نزدیک به سطح نتایج قابل‌قبولی به دست می‌دهند، اما بیشتر آن‌ها در مواجهه با توده‌های عمیق (۵۰-۴۰ متر) دقت خود را از دست می‌دهند؛ چرا که با افزایش عمق چشمه آنومالی اثر گرانی چشمه در سطح برداشت داده‌ها کمتر می‌شود. همچنین با وجود نویز در داده‌ها که مؤلفه‌ای اجتناب‌ناپذیر است و با توجه به حساس بودن فیلترها به نویز به دلیل استفاده از مشتقات قائم در آن‌ها، با افزایش عمق چشمه آنومالی و همین‌طور وجود نویز، دقت فیلترها کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از فیلترهای مختلف



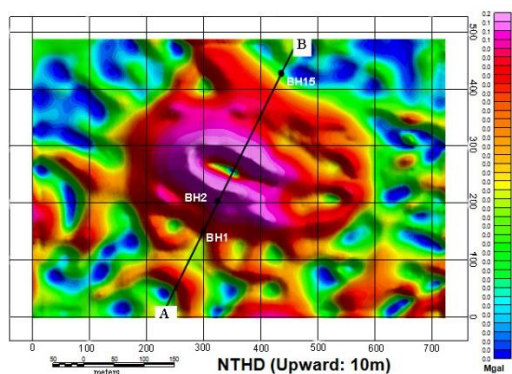
شکل ۴. (الف) پاسخ گرانی مکعب‌های موجود در جدول ۳؛ ابعاد تصویر ۳۰۰×۳۰۰ متر است، (ب) نقشه زاویه تیلت روی داده‌های گرانی، (ج) نقشه مشتق افقی کل روی داده‌های گرانی، (د) زاویه تیلت هذلولوی روی داده‌های گرانی، (ه) نقشه نتیجه تأثیر فیلتر تنا روی داده‌های گرانی، (و) نقشه TDX داده‌های گرانی و (ی) نقشه گرادیان کل افقی نرمال‌شده روی داده‌های گرانی برای پنجره ۱×۱

نقطی که این فیلتر دارای بیشترین مقدار است، لبه‌های توده را به ما نشان می‌دهد. در شکل ۶ تعدادی از گمانه‌های BH1، BH2، و BH15 حفر شده در نزدیکی معدن موبرون کانادا که روی پروفیل AB قرار دارند، نشان داده شده که در شکل ۷ این گمانه‌ها به صورت دوبعدی به تصویر کشیده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۷ نیز دیده می‌شود، گمانه اکتشافی BH2 در نزدیکی مرز معدن قرار دارد و مورد مناسبی برای راستی‌آزمایی فیلتر تعیین مرز است. با توجه به مختصات مکانی گمانه اکتشافی BH2 (شکل‌های ۶ و ۷) و راستای حفر این گمانه (شکل ۷) و نتایج اعمال فیلتر NTHD روی این معدن (شکل ۶)، مشاهده می‌شود که نتایج با نتایج مطالعات قبلی و گمانه‌های اکتشافی تطابق خوبی دارد (گرانت و وست، ۱۹۶۵).

۴. کاربرد روی داده‌های واقعی گرانی‌سنجی

شکل ۵ نقشه آنومالی بوگه باقیمانده داده‌های مربوط به معدن موبرون (Mobrun) کانادا را نشان می‌دهد (اقتباس از گرانت و وست، ۱۹۶۵). داده‌برداری‌ها در ۱۳ پروفیل انجام گرفته است که فاصله بین پروفیل‌ها ۶۰ متر و فاصله داده‌ها روی پروفیل‌ها ۳۰ متر است. میانگین چگالی توده معدنی که از نمونه‌برداری‌های گمانه‌ها به دست آمده است، 4.6 g/cm^3 و میانگین چگالی سنگ میزبان 2.7 g/cm^3 است که تباین چگالی برابر 1.9 g/cm^3 است (گرانت و وست، ۱۹۶۵). به منظور حذف نوفه‌های موجود در داده‌ها، داده‌ها ۱۰ متر فراسو شده‌اند و سپس از فیلتر NTHD برای تعیین مرز توده استفاده شده که نتایج در شکل ۶ موجود است.

با توجه به شکل ۶ و خصوصیات فیلتر NTHD،

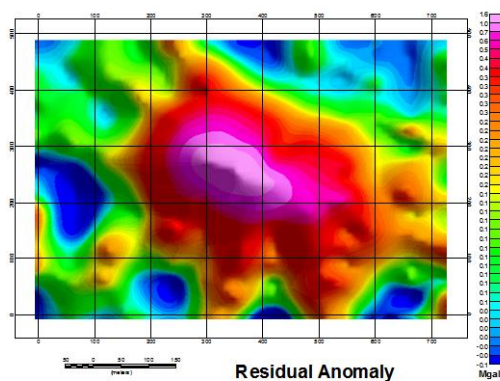


شکل ۶. نقشه نتیجه فیلتر NTHD برای پنجره 1×1 روی داده‌های شکل

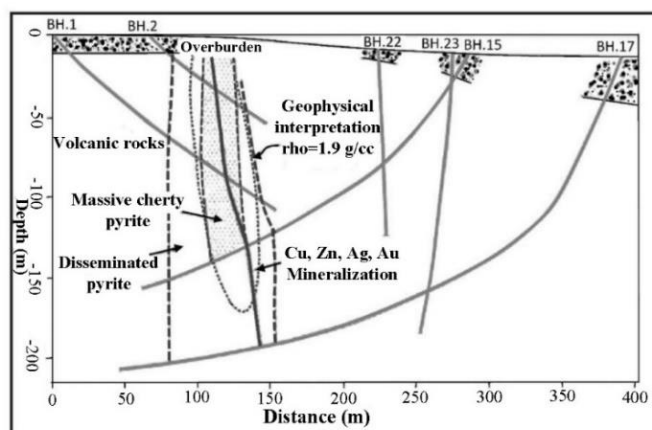
۵ با فراسوی به اندازه ۱۰ متر و موقعیت گمانه‌های BH1،

BH2، BH15 حفر شده روی پروفیل AB (گرانت و وست،

۱۹۶۵)



شکل ۵. نقشه آنومالی بوگه باقی مانده داده‌های گرانی موبرون کانادا



شکل ۷. مقطعی از معدن موبرون سولفید کانادا که در آن موقعیت تعدادی از گمانه‌های حفر شده روی این معدن نمایش داده شده است (گرانت و وست، ۱۹۶۵)

۵. نتیجه گیری

آنومالی‌های عمیق دقت خود را از دست می‌دهند و آنومالی‌های عمیق را به صورت ادغام شده در یکدیگر و یکجا نشان می‌دهند. در نهایت این فیلتر برای تعیین مرز آنومالی معدن موبرون کانادا به کار رفته است که نتایج، با مطالعات قبلی و گمانه‌های حفر شده مطابقت خوبی نشان می‌دهد (گران و وست، ۱۹۶۵).

تشکر و قدردانی

نویسندگان از داوران محترم مقاله که با دیدگاه‌های علمی و ویرایشی ارزشمندشان به بهبود مقاله حاضر کمک شایانی کردند، کمال تشکر را دارند.

مراجع

- Abedi, M., Afshar, A., Ardestani, V. E. and Norouzi, Gh., 2014, Comparison of derivative-based methods by normalized standard deviation approach for edge detection of gravity anomalies, *J. of the Earth and Space Physics*, 40(3), 2014, 13-21.
- Blakely, R. J., 1995, *Potential theory in gravity and magnetic applications*, Cambridge University Press.
- Cooper G. R. J. and Cowan D. R., 2008, Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics, *Geophysics*, 73(3), (H1-H4).
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006, Enhancing potential field data filters based on the local phase, *Computer & Geosciences*, 32, 1585-1591.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2004, Filtering using variable order vertical derivatives, *Computer and Geosciences*, 30, 455-459.
- Cowan, D. R. and Cooper, G. R. J., 2005, Separation filtering using fractional order derivatives, *Exp. Geophys*, 36(4), 393-396.
- Grant, F. S. and West, G. F., 1965, *Interpretation theory in applied geophysics*, McGraw-Hill.
- Klinge, E. E., Marson, I. and Kahle, H. G., 1991, Automatic interpretation of gravity gradiometric data in two dimensions: vertical gradient, *Geophysical Prospecting*, 39, 407-434.
- Ma, G. and Li, L., 2012, Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative, *Computers & Geosciences*, 41, 83-87.
- Nabighian, M. N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section, *Geophysics*, 39(1), 85-92.
- Plouff, D., 1975, derivation of formulas and FORTRAN program to compute gravity anomalies of prisms, National Technical Information Service, PB, 243-526, U. S. Department of Commerce.
- Xu, M., Heng, C. and Huan, F., 2015, Edge detection in the potential field using the correlation coefficients of multidirectional standard deviations, *Applied Geophysics*, 12(1), 23-34.