

تعیین لبه‌های بی‌هنجاری‌های گرانی با استفاده از فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی ارتقا یافته

مجتبی بابایی^{۱*} و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^۲، و الهام امیریان^۳

^۱ استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تویسرکان، تویسرکان، ایران
^۲ استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳ کارشناس ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹)

چکیده

تشخیص لبه‌های چشمه‌های بی‌هنجاری، یک ابزار ضروری در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است. روش‌های زیادی برای تشخیص لبه‌ها وجود دارد که بسیاری از آنها شامل فیلترهای بالا گذر بر اساس مشتقات داده‌های میدان پتانسیل است. در این مقاله از یک روش تشخیص لبه‌ی جدید به نام فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی پیشرفته (Enhanced Mathematical Morphology) یا EMM استفاده می‌شود. فیلتر EMM به صورت نسبت فرسایش مشتق افقی کل به اتساع مشتق افقی کل و یا ترکیبی از این دو عملگر تعریف می‌شود. این فیلتر می‌تواند لبه‌های منابع کم عمق و عمیق حتی با چگالی کم را به طور هم‌زمان نمایش دهد. فیلتر EMM به محاسبه مشتقات عمودی نیازی ندارد که همین امر باعث می‌شود این روش از نظر محاسباتی پایدار باشد. در این مقاله ضمن ارائه رابطه جدیدی برای فیلتر EMM، ابتدا این فیلتر به منظور اعتبار سنجی روش، بر روی داده‌های مصنوعی با و بدون نوفه اجرا و سپس بر روی داده‌های واقعی گنبد نمکی قم آزمایش شد و مرز بی‌هنجاری معلوم گردید.

واژه‌های کلیدی: تشخیص لبه، فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی ارتقا یافته، فرسایش، اتساع، گنبد نمکی قم

۱ مقدمه

نقشه‌های ژئوفیزیکی عموماً برای نشان دادن گسل‌ها، مرزهای بین لایه‌ها و منابع زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های مختلفی برای تخمین مرز ساختارهای زمین‌شناسی، به کمک بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل وجود دارد. در همه روش‌ها، تغییرات یک کمیت در سرتاسر نقشه و به‌خصوص در محدوده بی‌هنجاری بررسی می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش مشتق افقی کل (کوردل و گراوچ، ۱۹۸۵)، روش مشتق افقی کل زاویه تیلت (آریسوی و اونال، ۲۰۱۳)، سیگنال تحلیلی (روئست و همکاران، ۱۹۹۲؛ اردستانی و متولی، ۲۰۰۷)، سیگنال تحلیلی گرادیان افقی (بورناس و بیکر، ۲۰۰۱)، گرادیان افقی به‌هنجار شده با زاویه تیلت (میلر و سینگ، ۱۹۹۴)، و روش مشتق کلی افقی زاویه تیلت (وردوزکو و همکاران، ۲۰۰۴) اشاره نمود. با به‌هنجار کردن مشتق کل افقی به دامنه‌ی سیگنال تحلیلی، روشی به نام نقشه تنا برای تعیین مرز بی‌هنجاری معرفی شده است (وینز و کوالژیک، ۲۰۰۵). روشی برای آشکارسازی لبه‌های بی‌هنجاری بر مبنای گرادیان افقی میدان کل گرانی ارائه شد (کوپر و کوان، ۲۰۰۶). زاویه تیلت هذلولوی توسط کوپر و کوان در ۲۰۰۶ و همچنین وارون تانژانت هذلولوی برای تخمین لبه بی‌هنجاری به کار رفت (مینگ و همکاران، ۲۰۱۳). کوپر و کوان این فیلترها را با هم مقایسه کردند و فیلترهای جدیدی را بر مبنای فاز میدان‌های پتانسیل معرفی نمودند که به‌عنوان آشکارساز لبه عملکرد بهبود یافته‌ای داشتند و یکی از نمونه‌های آن زاویه تیلت هذلولوی است (کوپر و کوان، ۲۰۱۱). سرچلیک و کافادر (۲۰۱۲) تحلیل ویژه مقادیر تانسور ساختاری را برای تخمین لبه پیشنهاد دادند. علاوه بر روش‌های مذکور که بیشتر بر مبنای مشتقات میدان‌های پتانسیلی است، از روش پردازش تصویر و با تعریف عملگر ریخت‌شناسی ریاضی ارتقا یافته برای آشکارسازی لبه‌ها استفاده شده است (لی‌لی و

همکاران، ۲۰۱۳). در این مقاله ضمن پیشنهاد رابطه‌ای جدید برای این عملگر، از این روش در آشکارسازی لبه‌های چند مدل مصنوعی و بی‌هنجاری گرانی مربوط به گنبد نمکی قم استفاده شده است.

۲ تئوری روش

داده‌های گرانی یک بی‌هنجاری که بر روی نقاط یک شبکه برداشت شده را می‌توان برای رسم پربندهای هم-پتانسیل و یا هم‌شدت میدان گرانی به کار بست. علاوه بر این با استفاده از نرم‌افزارهایی نظیر سرفر (Surfer) می‌توان تصاویری که نشان‌دهنده‌ی تغییرات پتانسیل یا میدان گرانی یا مشتقات آنها و حاصل از بی‌هنجاری است را به دست آورد. این تصاویر را می‌توان مبنای کار قرار داد و با تکنیک‌های پردازش تصویر، مراحل سودمند در جهت شناسایی بی‌هنجاری، بر روی آنها اجرا نمود. در این مقاله از عملگر EMM که در بخش‌های بعدی تعریف خواهد شد برای تعیین لبه بی‌هنجاری استفاده می‌شود. در بخش اول این عملگر روی تصاویر حاصل از داده‌های مصنوعی کره و مکعب اعمال می‌شود و به‌عبارتی تکنیک اعتبارسنجی می‌گردد. در بخش بعدی روش را بر روی داده‌های واقعی به کار برده و نتایج گزارش خواهد شد.

۳ ریخت‌شناسی ریاضی

ریخت‌شناسی ریاضی (Mathematical Morphology) یا به‌اختصار MM یک نظریه ریاضی است که به کمک آن، تصاویر با استفاده از مجموعه‌ها توصیف می‌شوند. این تکنیک، به‌عنوان ابزار تشخیص و تحلیل تصویر، گسترش یافت (سرا، ۱۹۶۵، ۱۹۸۳). اساساً ریخت‌شناسی ریاضی از شکل‌های مختلف از عنصر ساختاری (Structural Element) یا SE، برای تشریح و استخراج جزئیات هندسی تصویر استفاده می‌کند و بر مبنای عملگرهای پایه-ای فرسایش (Erosion) و اتساع (Dilation) تعریف

عملگر فرسایش، $\varepsilon(X)$ ، یا تفریق مینکوفسکی با رابطه (۲) تعریف می‌شود (جیل و کیمل، ۲۰۰۲):

$$\varepsilon(X) = \{x | \forall s \in S, x-s \in X\}. \quad (2)$$

مراحل عملیات فرسایش نیز به این صورت است که ابتدا عنصر ساختاری در هر نقطه از نقاط مجموعه X قرار داده می‌شود و در صورتی که عنصر ساختاری زیرمجموعه X شود ($SE \cap X = SE$) سلول مبدأ جزئی از پاسخ فرسایش به حساب می‌آید و در غیر این صورت آن سلول حذف می‌شود.

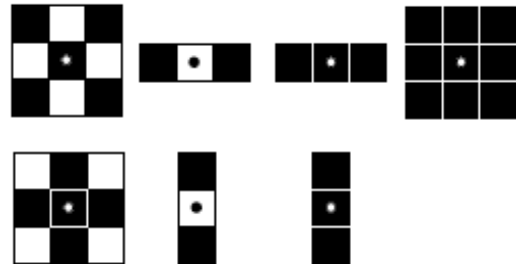
۲-۳ تشخیص لبه‌ها در داده‌های میدان پتانسیل توسط فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی پیشرفته (روش EMM)

چنان‌که در بخش قبل اشاره شد عنصر ساختاری، یک اپراتور پایه ریخت‌شناسی ریاضی است که برای هم‌آمیختگی با تصویر و نتیجه‌گیری درباره اینکه یک شکل به‌طور متناسب در تصویر جا می‌گیرد یا خیر استفاده می‌شود. عنصر ساختاری صرفاً ابزاری در تکنیک ریخت‌شناسی ریاضی است که با اعمال آن بر روی تصویر می‌توان مرز تصویر را نشان داد. این ابزار در ژئوفیزیک و میدان پتانسیل به‌خودی‌خود معنای خاصی ندارد و برای هر تصویری از جمله تصاویر خروجی ناشی از داده‌های میدان پتانسیلی و یا هر تصویر دودویی شده دیگری به کار بست. دو نوع عنصر ساختاری معمول، به شکل مربع و لوزی با ماتریس‌های 3×3 و با درایه‌های صفر و یک را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد (جیل و کیمل، ۲۰۰۲):

$$SE = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad SE = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

عملگر اتساع، داده‌ها را با تغییر مقادیر «۰» به «۱» گسترش و عملگر فرسایش با تغییر مقادیر «۱» به «۰» منقبض

می‌شود. ریخت‌شناسی می‌تواند روی یک مجموعه محدود به کار گرفته شود و می‌توان آن را بر روی تصاویر خاکستری (یا زیرمجموعه‌ای از تصاویر) به کار برد. می‌توان یک تصویر را به‌صورت مجموعه‌ای از صفر و یک‌ها تعریف کرد که آن را تصویر دودویی می‌نامند. عملگرهای ریخت‌شناسی نحوه‌ی اعمال عنصر ساختاری بر روی تصویر را توضیح می‌دهند. عنصر ساختاری معمولاً نسبت به تصویر کوچک‌تر است و در بیشتر موارد متقارن در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌هایی از عنصر ساختاری را نشان می‌دهد:



شکل ۱. مثال‌هایی از عناصر ساختار دودویی ساده؛ سلول سیاه بخشی از عنصر را نشان می‌دهد و سلول سفید جزء عنصر نیست. سلول با دایره نشانه مبدأ است (لی‌لی و همکاران، ۲۰۱۳).

۱-۳ تعریف اتساع و فرسایش

اتساع یا $\delta(X)$ که جمع مینکوفسکی نیز نامیده می‌شود، برای مجموعه (یا یک تصویر دودویی شده) X و عنصر ساختاری SE با رابطه (۱) تعریف می‌شود (جیل و کیمل، ۲۰۰۲):

$$\delta(X) = \{x | \forall s \in S, x+s \in X\}. \quad (1)$$

برای انجام عملیات اتساع روی تصویر، عنصر ساختاری در هر نقطه از تصویر قرار گرفته و در صورتی که عنصر ساختاری با مجموعه سلول‌هایی که ارزش ۱ دارند برهم‌نهی (سلول مشترک) داشته باشد مبدأ عنصر ساختار، بخشی از تصویر اتساع‌یافته در نظر گرفته می‌شود.

رفت. این فیلتر را می‌توان به‌طور مستقیم بر روی داده‌های گرانی به کار برد و یا بر روی خروجی هر یک از فیلترها نظیر مشتقات قائم یا افقی، نقشه تتا و ... به کار برد. برای این کار لازم است در ابتدا نقشه داده‌های گرانی یا فیلترهای مذکور دودویی شوند. این کار با نرم‌افزار متلب با دستور "im2bw(I)" انجام‌پذیر است.

۴-۱ مدل مصنوعی کره

در مدل‌سازی ژئوفیزیکی معمولاً از کره به دلیل تقارن هندسی، به‌عنوان اولین تقریب استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز، کره به‌عنوان اولین مدل مصنوعی، در پنج حالت متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱). در این حالت‌ها عمق و تباین چگالی متفاوتی برای کره در نظر گرفته شده و نتیجه برای حالت ثبت گردیده است. تعیین مرز با کاربرد فیلتر EMM برای این پنج مدل آورده شده است (شکل ۲). مرز واقعی برای هر یک از مدل‌های مصنوعی با خطوط نقطه‌چین قرمز نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود فیلتر پیشنهادی، به‌خوبی مرز بی‌هنجاری را معلوم کرده است. برای مدل‌های شماره ۴ و ۵ تباین چگالی ناچیزی در نظر گرفته شده است. باین‌حال ملاحظه می‌شود که این فیلتر قابلیت آشکارسازی لبه‌های این دو مدل را نیز دارد و این امر نشان‌دهنده توانایی این روش در تعیین مرز است.

در بررسی مدل‌های مختلف کره نتایجی به دست می‌آید که در زیر به آنها اشاره شده است:

- ۱- با افزایش عمق بی‌هنجاری پاسخ گرانی ضعیف می‌شود ولی لبه‌یابی با فیلتر EMM در عمق‌های مختلف برای این مدل، به‌خوبی انجام می‌شود.
- ۲- برای بی‌هنجاری‌های با تباین چگالی ناچیز، پاسخ گرانی ضعیف می‌شود باین‌حال فیلتر EMM به‌خوبی مرز بی‌هنجاری را به نمایش می‌گذارد.

(فشرده) می‌کند (بینت و همکاران، ۲۰۱۱). به‌عبارت‌دیگر فرسایش مرزهای تصویر حاصل از چشمه بی‌هنجاری را فشرده می‌سازد و عملکرد اتساع آن را گسترش می‌دهد. هر دو عملگر فرسایش و اتساع می‌توانند در تعیین و نمایش مرزهای منابع عمیق به کار گرفته شوند. عملگر EMM که به‌صورت نسبت فرسایش مشتق افقی کل به اتساع مشتق افقی کل تعریف می‌شود برای تشخیص مرزهای منابع به کار رفته است (لی و همکاران، ۲۰۱۳):

$$EMM1 = \frac{Erosion(F, SE)}{Dilation(F, SE)} \quad (۳)$$

صورت و مخرج رابطه (۳) به‌ترتیب فرسایش و اتساع مجموعه یا تصویر F را با SE نشان می‌دهند. می‌توان این عملگر را با ترکیب متفاوتی از دو عملگر اتساع و فرسایش تعریف کرد. در این مقاله، این فیلتر به‌صورت جدید:

$$EMM2 = \frac{Erosion(F, SE) - Dilation(F, SE)}{Dilation(F, SE)} \quad (۴)$$

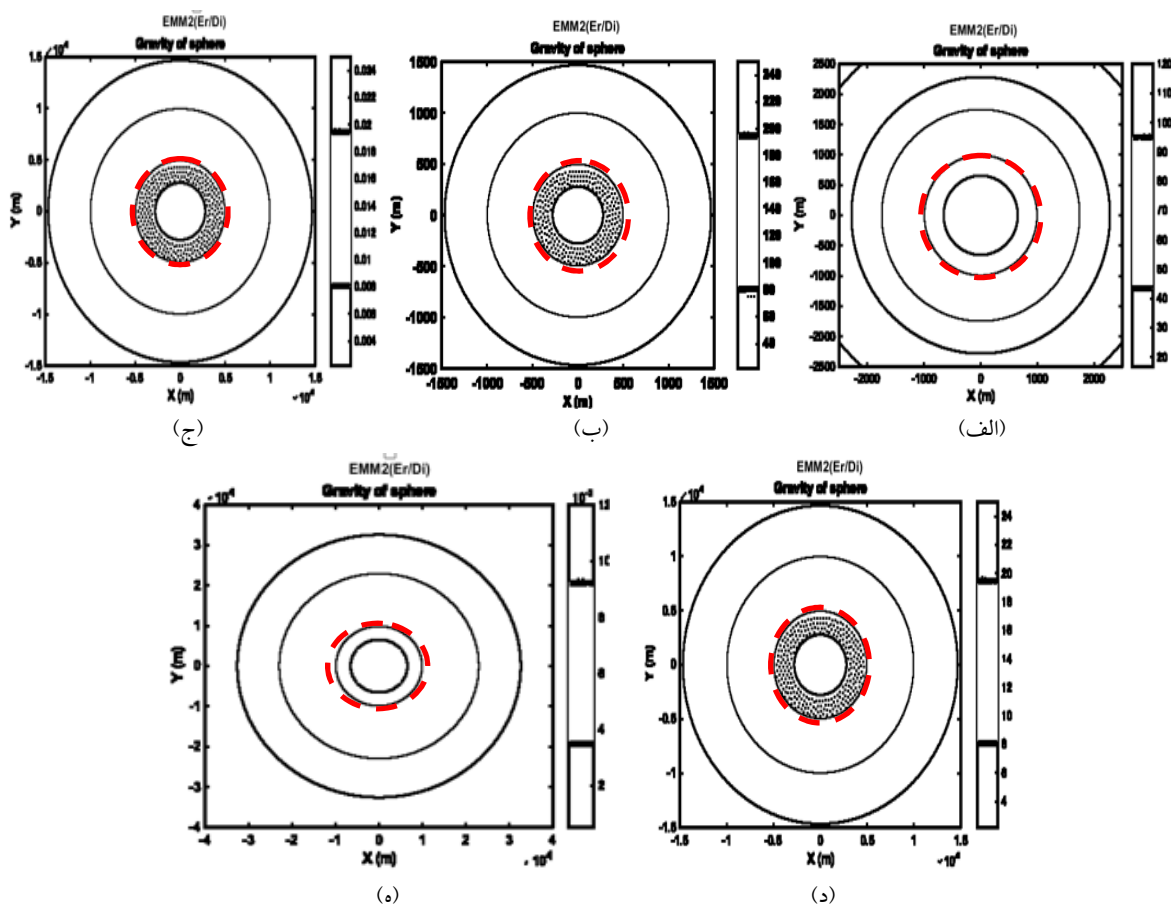
ارائه و از آن استفاده شد. در فیلتر پیشنهادی، از تفاضل دو عملگر در صورت کسر استفاده شده است که منجر به تخمین واضح‌تر مرز بی‌هنجاری گردید. از آنجاکه عنصر ساختاری مربع به نوبه حساس نیست (ژائو و چن، ۲۰۰۸؛ سرا، ۱۹۸۳)، در این تحقیق از دو عنصر ساختاری مربع 3×3 برای محاسبه فرسایش و اتساع داده استفاده می‌شود.

۴ اعمال روش بر روی مدل‌های مصنوعی

در این بخش چند مدل مصنوعی شامل مدل کره، یک مکعب، سه مکعب هم‌عمق و سه مکعب با عمق‌های متفاوت طراحی می‌شود. همچنین در مواردی به داده‌های مدل‌های مصنوعی، نوبه با درصد متفاوت اضافه شده و سپس فیلتر EMM بر روی تصاویر حاصل از داده‌های گرانی حاصل از این مدل‌ها و به‌منظور تخمین لبه به کار

جدول ۱. مشخصات هندسی و فیزیکی کره‌های مورد مطالعه.

مدل	قطر (m)	تباين چگالي (kg/m^3)	عمق بالایی (m)	میدان برداشت (m)	طول گام (m)
کره ۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰	۱۵۰۰ تا ۱۵۰۰	۲۰
کره ۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰ تا ۱۵۰۰	۲۰
کره ۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰۰	۱۵۰۰ تا ۱۵۰۰	۱۰۰
کره ۴	۱۰۰۰	۱	۹۰۰۰	۱۵۰۰ تا ۱۵۰۰۰	۱۰۰
کره ۵	۱۰۰۰	۱	۱۹۰۰۰	۴۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰	۱۰۰



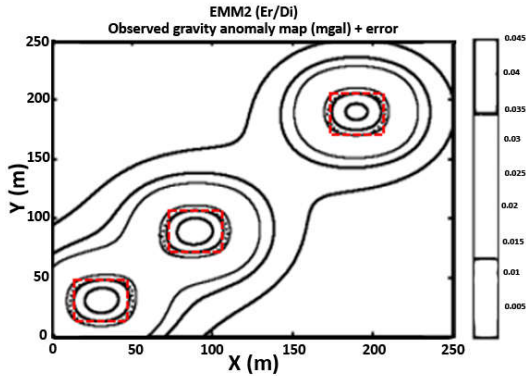
شکل ۲. تعیین لبه‌های کره‌های مدل مذکور در جدول ۱ با استفاده از فیلتر EMM.

۲-۴ مدل مصنوعی مکعب

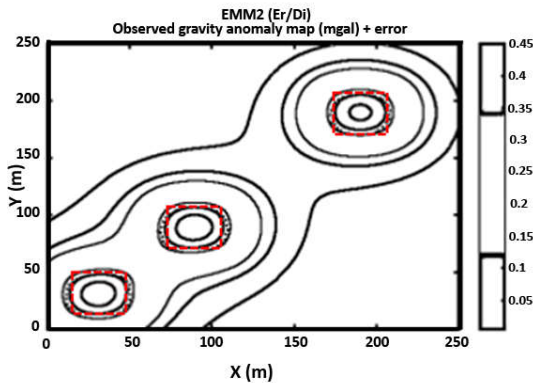
مکعب به دلیل داشتن ابعاد هندسی خاص، برای مطالعات تشخیص لبه بسیار مورد توجه بوده و در شبیه‌سازی مخازن نفتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این تحقیق، مکعب به‌عنوان دومین مدل مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

نخستین مدل، مکعبی با ابعاد ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر، عمق بالایی ۲۰ متر، تباين چگالی ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۳۰ متر؛ و مدل دوم، مکعبی با همان ابعاد، تباين چگالی و عمق بالایی مدل قبلی و ضخامت ۵۰ متر در نظر گرفته می‌شوند. خروجی فیلتر EMM برای این دو مدل به‌ترتیب در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب نمایش

تباين چگالی ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-ب).



(الف)



(ب)

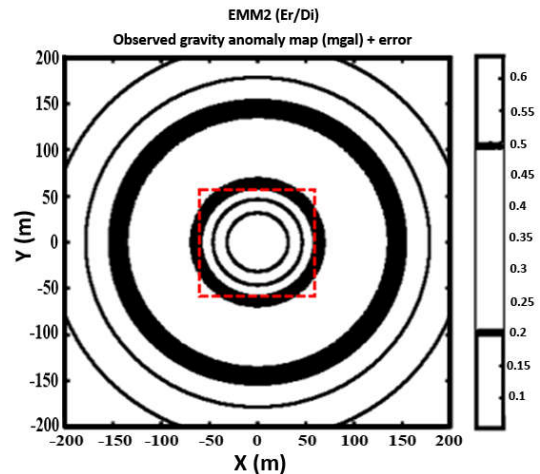
شکل ۴. مدل سه مکعب هم عمق (الف) با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، (ب) با چگالی ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب.

مدل دیگر مورد بررسی، سه مکعب با عمق‌های متفاوت است که به صورت پلکانی قرار می‌گیرند که ترتیب قرارگیری مکعب‌ها به شرح جدول زیر است:

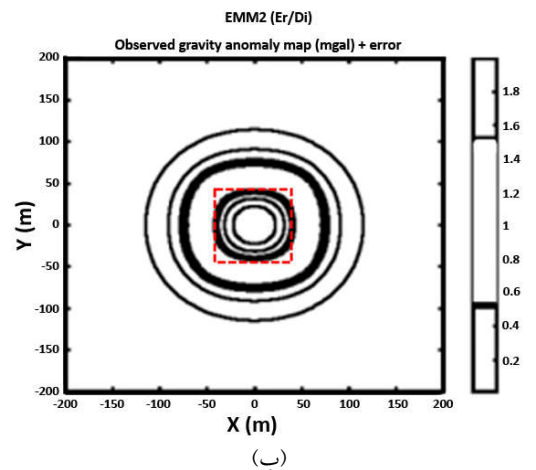
جدول ۲. مشخصات مکعب‌ها در مدل پلکانی.

چگالی (kg/m^3)	عمق پایینی (متر)	عمق بالایی (متر)	ابعاد مکعب (متر)
۱۰۰۰	۱۰	۲	۵۰ در ۵۰ در ۸
۱۰۰۰	۲۰	۱۰	۵۰ در ۵۰ در ۱۰
۱۰۰۰	۳۰	۲۰	۵۰ در ۵۰ در ۱۰

داده شده است. بر روی شکل‌ها، محدوده‌ی مدل با خطوط نقطه‌چین قرمز نشان داده شده است.



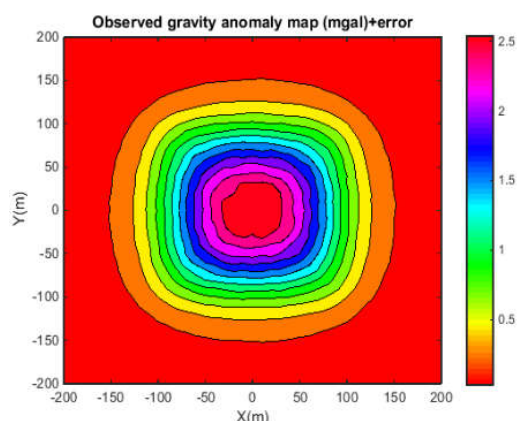
(الف)



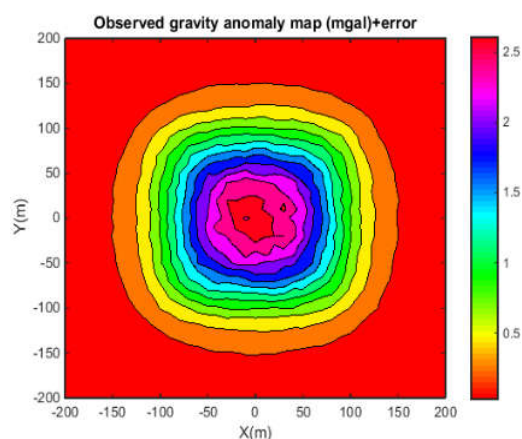
(ب)

شکل ۳. خروجی فیلتر EMM برای مدل مکعب (الف) با ضخامت ۳۰ متر، (ب) با ضخامت ۵۰ متر.

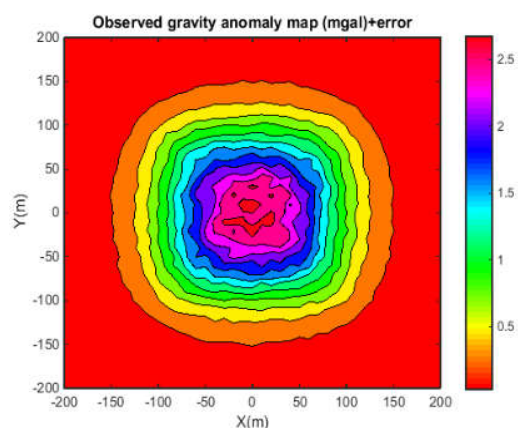
دو مدل بعدی که برای اعتبارسنجی روش، مورد مطالعه قرار می‌گیرند هر یک شامل سه مکعب است. در ترکیب اول، سه مکعب به ابعاد ۵۰ متر در ۵۰ متر، ضخامت ۳۰ متر، عمق بالایی ۱۰ متر و تباين چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب (شکل ۴-الف)، و در ترکیب دوم سه مکعب با همان ابعاد، عمق بالایی، ضخامت و البته



(الف)



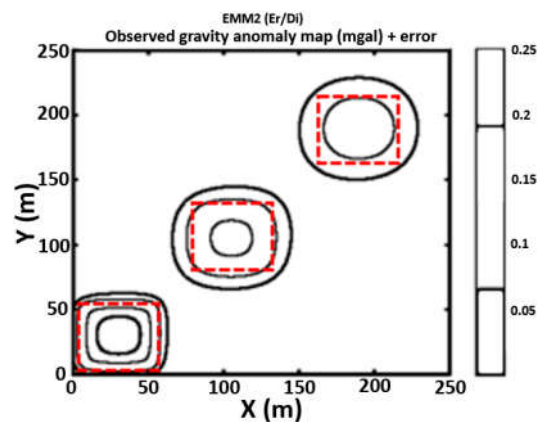
(ب)



(ج)

شکل ۶. پاسخ گرانی مدل مصنوعی سه مکعب درون هم با نوفه‌های (الف) ۵ درصد، (ب) ۱۰ درصد، و (ج) ۱۵ درصد

نتیجه اعمال فیلتر EMM در شکل ۴ آورده شده است:

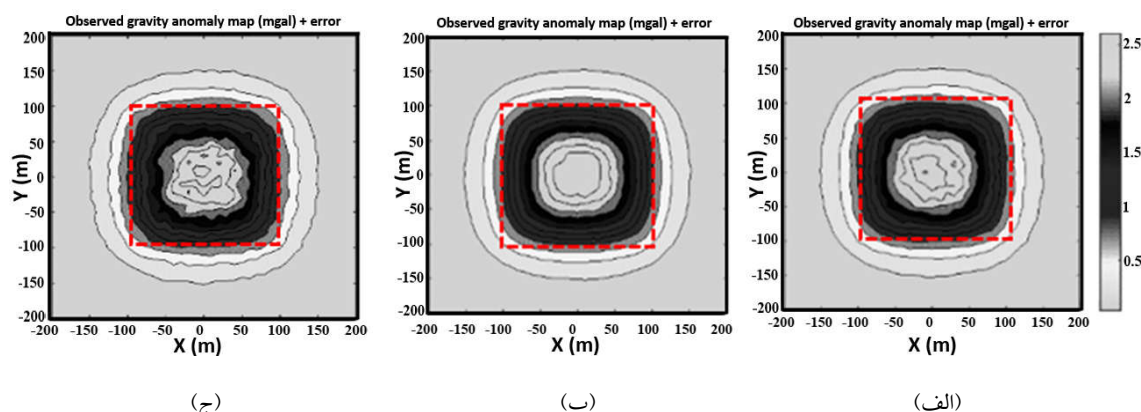


شکل ۵. خروجی فیلتر EMM برای مدل سه مکعب پله‌ای. در عمق کم، گوشه‌های مکعب به خوبی مشخص شده‌اند. با افزایش عمق، محدوده جسم معلوم است؛ با این حال گوشه‌ها به خوبی مشخص نمی‌شوند.

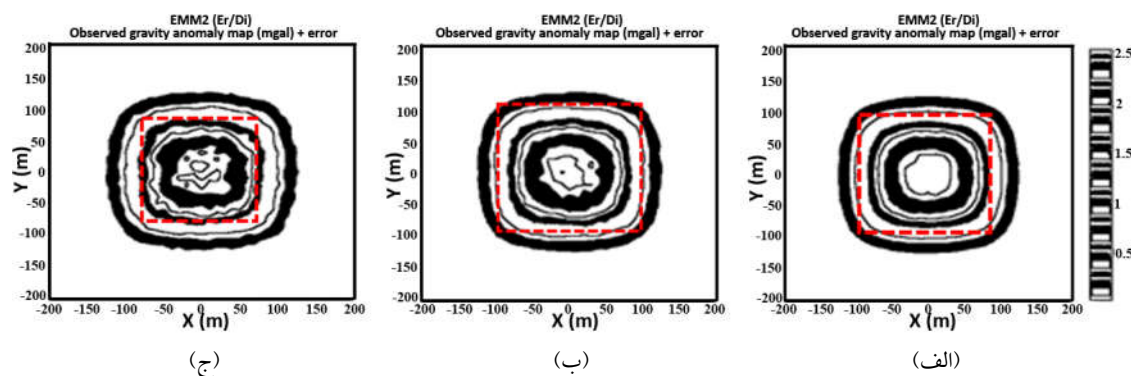
۳-۴ پاسخ گرانی مدل مصنوعی با نوفه

در این بخش، مکعبی به ابعاد ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر، ضخامت ۳۰ متر، عمق بالایی ۲۰ متر و تباین چگالی با محیط میزبان ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب را در نظر می‌گیریم. میدان برداشت از ۲۰۰- تا ۲۰۰+ متر در دو جهت x و y با فاصله‌ی نقاط برداشت ۱۰ متر طراحی شده است و به داده‌های گرانی این مدل مصنوعی، ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد نوفه اضافه می‌شود. در شکل ۶ به ترتیب در قسمت-های الف، ب و ج پاسخ گرانی برداشت شده از این مدل نشان داده شده‌اند.

در شکل ۷ تصویر دودویی شده‌ی این مدل که برای تهیه آن از نرم‌افزار متلب استفاده شده را مشاهده می‌کنیم. فیلتر EMM بر روی پاسخ گرانی داده‌های مصنوعی مکعب‌های شکل ۶ اعمال و نتایج در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۷. تصویر دودویی شده مکعب با نوفه‌ی (الف) ۵ درصد، (ب) ۱۰ درصد، و (ج) ۱۵ درصد.



شکل ۸. اعمال فیلتر *EMM* بر روی پاسخ گرانی داده‌های مصنوعی مکعب با نوفه‌ی (الف) ۵ درصد، (ب) ۱۰ درصد، و (ج) ۱۵ درصد... با وجود نوفه در داده‌ها، مرز بی‌هنجاری با دقت قابل قبول معلوم شده است.

و در مسیر جاده قم- ساوه قرار دارد. گنبد نمکی قم محدوده‌ای به وسعت ۶/۵ کیلومتر مربع و به ارتفاع حدود ۲۸۵ متر را می‌پوشاند و حجمی برابر ۴۶۵ کیلومتر مکعب را در بالای سطح زمین در برمی‌گیرد. در تصویر ماهواره‌ای شکل ۹، رنگ کوه نمک تیره‌تر از دیگر عوارض زمین‌شناسی است.

منطقه مورد بررسی در محدوده عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۴ درجه ۴۷ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۰ درجه ۳۸ دقیقه تا ۵۰ درجه ۴۴ دقیقه به وسعت ۱۵۰ کیلومتر مربع است. جزئیات ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی نیز در نقشه زمین‌شناسی آن منطقه در شکل ۱۰ به نمایش درآمده است.

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود با اضافه کردن نوفه، فیلتر *EMM* پایدار است و به‌خوبی لبه‌های مکعب‌ها را آشکارسازی می‌کند.

۵ مدل واقعی

در این بخش، روش ریخت‌شناسی ریاضی ارتقا یافته برای لبه‌یابی در مورد بی‌هنجاری طبیعی گنبد نمکی قم به کار برده شد.

۵-۱ زمین‌شناسی منطقه گنبد نمکی قم

داده‌های حقیقی به کار رفته در این مقاله از اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی گنبد نمکی قم استخراج شده است. این گنبد در ۲۵ کیلومتری شمال غربی شهر قم

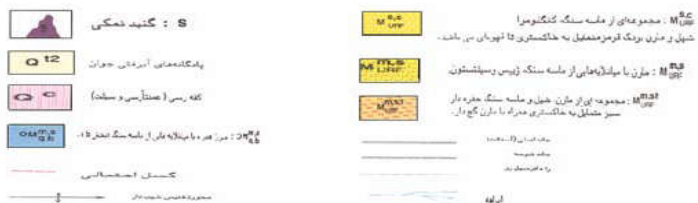
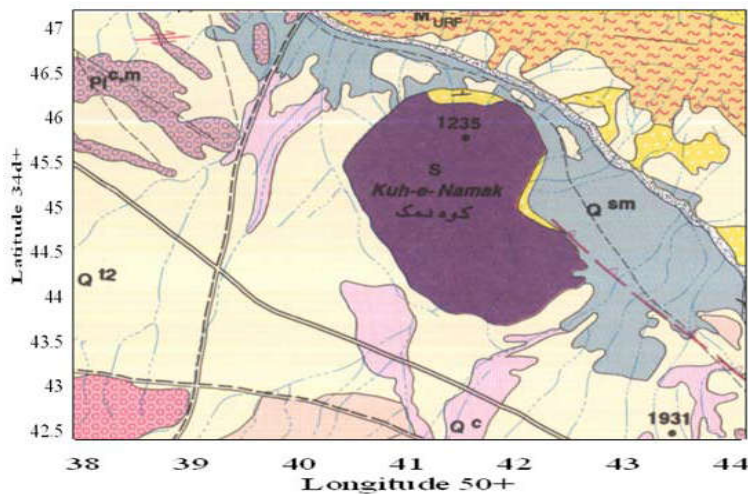
هستند. تأثیر این ساختار زمین‌شناسی به صورت افزایش مقدار گرانی از جنوب غربی به شمال شرقی است. شکل ۱۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی را با طول و عرض جغرافیایی مربوط نشان می‌دهد. دامنه تغییرات گرانی در کل داده‌ها از ۱۰- تا ۱۵ میلی‌گال است. در این شکل طول جغرافیایی منطقه تقریباً از ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۴ دقیقه حدود ۱۳ کیلومتر درازا دارد و عرض جغرافیایی منطقه نیز تقریباً از ۳۴ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۷ دقیقه ادامه دارد (حدود ۱۰ کیلومتر است).



شکل ۹. تصویر ماهواره‌ای منطقه؛ گنبد نمکی در غرب شهرستان قم سمت شرق گنبد دارای ساختار سنگی و سمت غرب دارای ساختار رسوبی است (www.earthgoogle.com).

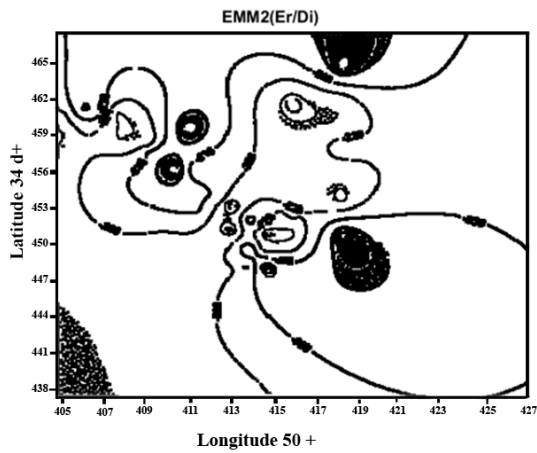
۵-۲ لبه‌یابی بی‌هنجاری گنبد نمک قم
 مشتق افقی گرانی بوگه کامل داده‌های گرانی گنبد نمکی قم در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. استفاده از این فیلتر قبل از اعمال فیلتر اصلی به تعیین بهتر مرز بی‌هنجاری کمک می‌کند.

به‌طور کلی در تصویر ماهواره‌ای و نقشه زمین‌شناسی منطقه شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است که این منطقه تحت تأثیر دو ساختار زمین‌شناسی متفاوت قرار دارد. در بخش شرقی گنبد، ساختار زمین‌شناسی به صورت سنگی (رسوبی میوسن سازند قم) و در سمت غربی رسوبات کوارترنر



شکل ۱۰. نقشه زمین‌شناسی منطقه (سازمان زمین‌شناسی کشور).

حال با اعمال فیلتر EMM بر روی نقشه‌ی دودویی بی-هنجاری گنبد نمکی قم لبه‌یابی این بی‌هنجاری توسط فیلتر EMM انجام شده و نتیجه به‌دست‌آمده در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

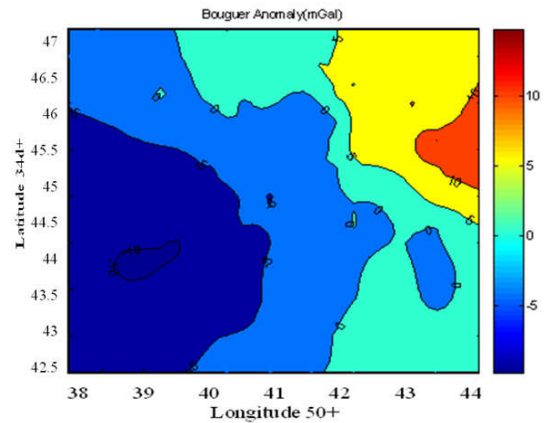


شکل ۱۴. لبه‌یابی بی‌هنجاری گنبد نمکی قم به کمک فیلتر EMM.

با توجه به نتیجه کاربرد روش EMM مشاهده می‌شود که فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی پیشرفته با دقت خوبی لبه‌های بی‌هنجاری را آشکارسازی می‌کند و می‌توان از این روش به‌عنوان یک روش قابل اعتماد در بحث لبه‌یابی استفاده نمود. همچنین بررسی این روش منجر به نتایج مفیدی شد که در زیر تشریح می‌شوند.

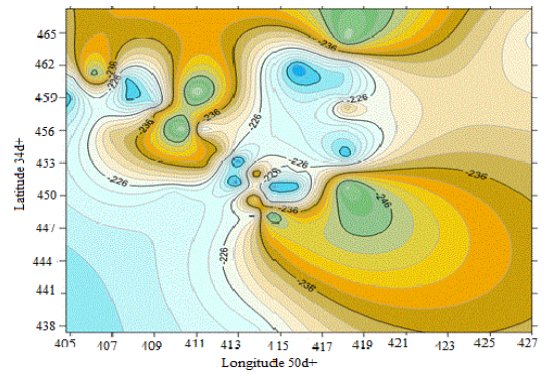
۶ نتیجه‌گیری

فیلتر تشخیص لبه EMM که به‌صورت نسبت فرسایش مشتق افقی کل به اتساع مشتق افقی کل تعریف می‌شود برای بهبود شناسایی لبه‌های منابع به کار رفت. این فیلتر بر روی هر دو نوع داده مصنوعی و واقعی آزمایش شد و معلوم شد که با افزایش عمق بی‌هنجاری و کاهش تباين چگالی بی‌هنجاری با محیط میزبان پاسخ گرانی ضعیف می‌شود ولی لبه‌یابی با فیلتر EMM در عمق‌های مختلف و تباين چگالی پایین به‌خوبی انجام می‌شود. همچنین چون در این روش از مشتقات قائم استفاده نمی‌شود روشی

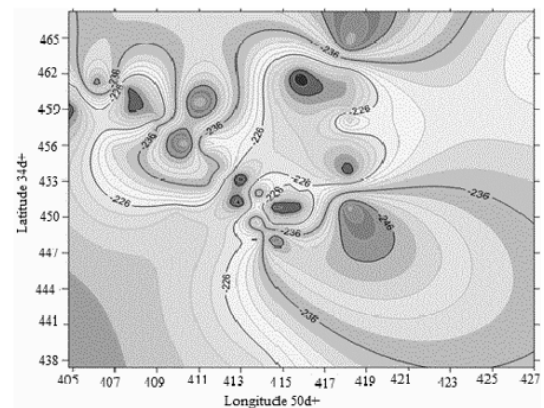


شکل ۱۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی و گرانی بوگه کامل آن با استفاده از نرم‌افزار سرفر بر اساس داده‌های برداشت‌شده.

برای اعمال فیلتر EMM، ابتدا لازم است نقشه دودویی بی‌هنجاری گنبد نمکی قم تهیه شود. این نقشه در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۲. مشتق افقی بی‌هنجاری گنبد نمکی قم.



شکل ۱۳. نقشه دودویی بی‌هنجاری گنبد نمکی قم.

- based on the local phase: *Computers and Geosciences*, **32**, 1585-1591.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., 2011, A generalized derivative operator for potential field data: *Geophysical Prospecting*, **59**, 188-194.
- Guo, J. F., Chen, G. L., 2008, Analysis of selection of structural element in mathematical morphology with application to infrared point target detection: *SPIE*, 6835-68350.
- Lili, Li, Guoqing, Ma, and Xiaojuan, Du, 2013, Edge detection in Potential-Field Data by Mathematical Morphology Filter: *Pure and Applied Geophysics*, **170**, 645-653.
- Miller, H.G., and Singh, V., 1994, Potential field tilt: A new concept for location of potential filed sources: *Journal of Applied Geophysics*, **32**, 213-217.
- Ming, W., Zhi-hong, G., and Luofen, H, 2013, Edge detection of field data using inverse hyperbolic tangent: *Geophysical and Geochemical Exploration*, **37**(4), 655-663.
- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signals: *Geophysics*, **57**(1), 116-125.
- Gil, J. and Kimmel, R., 2002, Efficient dilation, erosion, opening, and closing algorithms: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **24**, 1606-1617.
- Serra, J., 1965, Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature: Ph. D. thesis: University of Nancy, France.
- Serra, J., 1983, *Image Analysis and Mathematical Morphology*: Academic Press.
- Sertcelik, I., and Kafadar, O., 2012, Application of edge detection to potential field data using eigenvalue analysis of structure tensor: *Journal of Applied Geophysics*, **84**, 86-94.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., and Mackenzie, C., 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, **23**, 116-119.
- Wijns, C. C. P. and Kowalczyk, P., 2005, Theta map: edge detection in magnetic data: *Geophysics*, **70**, L39-L43.
- پایدار است و نسبت به نوفه چندان حساس نیست و با وجود نوفه می‌تواند لبه‌ها را به خوبی تشخیص دهد. این روش برای هر دو عمق‌های کم و زیاد به خوبی پاسخ می‌دهد. همچنین فیلتر EMM در مورد بی‌هنجاری‌های چندتایی در کنار هم به خوبی لبه‌ها را مشخص و بی‌هنجاری‌ها را از هم جدا می‌کند. در مورد بی‌هنجاری واقعی مربوط به گنبد نمکی قم، مقایسه نقشه تعیین مرز به دست آمده از مشتق افقی با نقشه حاصل از اعمال فیلتر EMM نشان‌دهنده این است که تعیین مرز به خوبی انجام شده است.

منابع

- Ardestani, V. E. and Motavalli, H., 2007, Constraints of analytic signal to determine the depth of gravity anomalies: *Journal of Earth and Space Physics*, **33**(2), 77-83.
- Arisoy, M. O., and Unal D., 2013, Edge Detection of Magnetic Sources Using Enhanced Total Horizontal Derivative of the Tilt Angle: *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*, **34**(1), 73-82.
- Beant, K., Gurdeep, M., Palak, G., and Jasleen, K., 2011, Mathematical Morphological Edge Detection for Different Applications: A Comparative Study: *International Journal of Computer Science and Technology*, **2**, 216-220.
- Bournas, N., and Baker, H. A., 2001, Interpretation of magnetic anomalies using the horizontal gradient analytic signal: *Annali di Geofisica*, **44**(3), 506-526.
- Cordell, L., and Grauch, V. J. S., 1985, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico, In Hinze W. J. (Ed.). *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*: Society of Exploration Geophysicists, 181-197.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006, Enhancing potential field data using filters

Edge detection of gravity anomalies by enhanced mathematical morphology filter

Mojtaba Babaei^{1*}, Vahid Ebrahimzadeh Ardestani², and Elham Amirian³

¹Assistant Professor, Department of Geophysics, Tuyserkhan Branch, Islamic Azad University, Tuyserkhan, Iran

²Professor, Department of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³M.Sc. of Geophysics, Department of Geophysics, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

(Received: 30 April 2016, Accepted: 29 April 2017)

Summary

Enhancement on the edges of the causative source is a tool in the interpretation of potential field data. There are many methods for recognizing the edges, most of which involve high pass filters based on derivatives of potential field data. In this paper, a new edge detection method is introduced, called the enhanced mathematical morphology (EMM) filter for interpretation of field data. The EMM filter uses the ratio of the erosion of the total horizontal derivative to the dilation of the total horizontal derivative to recognize the edges of the sources, and can display the edges of the bodies simultaneously. Edge detection of the potential field data has been widely used as a significant tool for geophysical exploration technologies, which can delineate the horizontal locations of causative sources. Normally, various high-pass filters are used to recognize the edges of the potential field data (Evjen 1936; Fedi and Florio 2001; Verduzco et al. 2004; Cooper and Cowan 2006; Cooper and Cowan 2011; Ma and Li 2012; Ma 2013).

The EMM filter uses the ratio of the erosion of THD to the dilation of THD to recognize the edges of the source. Mathematical morphology was developed by Matheron and Serra in 1964 (SERRA, 1983); which is an image analysis and recognition tool. The structuring element (SE) is a basic operator in mathematical morphology, used to interact with an image and to draw conclusions about how a shape fits or misses the shapes in the image. SE consists of a matrix of 0s and 1s that can have any arbitrary shape and size. The basic operations of mathematical morphology are dilation and erosion. Dilation is defined as the maximum value in the window ascertained by the SE. Erosion is defined as the minimum value in the window ascertained by the SE. The EMM filter is expressed as (Lili et al., 2013):

$$EMM = \frac{Erosion(F, SE)}{Dilation(F, SE)}$$

where $imerode(F, SE)$ and $imdilate(F, SE)$ represent the erosion and dilation of the THD, respectively.

In this paper, a new relationship is presented for EMM filter that is tested on synthetic data with and without noise as well as the real potential field data in Qom salt dome. The EMM method successfully delineates the edges of the causative sources, which gives better resolution of the deeper source than other filters, and can display the edges of the bodies in a more centralized way. In this article, a new relationship is defined for the EMM filter as:

$$EMM2 = \frac{Erosion(F, SE) - Dilation(F, SE)}{Dilation(F, SE)}$$

The EMM filter was used to recognize the edges of the sources. It can display the edges of the shallow and deep bodies simultaneously. The EMM filter does not require the computation of vertical derivatives, which makes this method computationally stable. The EMM filter is tested on synthetic, and real potential field data in Qom salt dome and the edge detection was done with reasonable results.

Keywords: edge detection, enhanced mathematical morphology, filter, erosion, dilation, Qom salt dome

*Corresponding author: