



## ارائه روشی جدید برای تعیین مرز توده ها و ساختارهای زمین شناسی با استفاده از مدول تانسور گرادیان

### میدان پتانسیل

وحید زارعی<sup>۱</sup>، رسول حمیدزاده مقدم<sup>۲\*</sup> و حسن خیرالهی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند؛ تبریز؛ ایران

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند؛ تبریز؛ ایران

۳- دانشجوی دکتری؛ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ تهران؛ ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۳

\* نویسنده مسئول مکاتبات: hamidzadeh@sut.ac.ir

#### چکیده

تعیین مرز افقی توده های مغناطیسی یکی از اهداف مهم در اکتشافات مغناطیس سنجی است. در این راستا روش های متعددی پیشنهاد شده؛ که بر پایه مشتقات میدان پتانسیل بنا شده اند. در سال های اخیر با اندازه گیری مستقیم داده های تانسور گرادیان میدان پتانسیل، روش های جدیدی ارائه شده؛ که به دلیل استفاده از نه مولفه میدان دارای دقت بسیار بالایی در تعیین مرز ساختارها و توده های مولد بی هنجاری نسبت به سایر روش های پیشین می باشند. این مولفه ها را می توان به طور غیرمستقیم از داده های میدان پتانسیل نیز محاسبه کرد. هدف از این پژوهش ارائه یک فیلتر جدید با عنوان مدول افقی نرمال شده (Normalized Horizontal Modulus) بر پایه داده های تانسور گرادیان میدان پتانسیل است؛ که با دقت بسیار بالایی مرز ساختارها و توده ها را نمایش می دهد و نسبت به دیگر روش های تعیین مرز هیچگونه اعوجاجی نداشته و لبه کاذب نمایش نمی دهد. این فیلتر در حقیقت از تانسور گرادیان میدان پتانسیل برای نرمال کردن مدول افقی میدان پتانسیل استفاده می کند و کمترین مقدار آن مرز افقی ساختارها و توده ها را نمایش می دهد. همچنین این پژوهش روشی برای محاسبه مولفه های تانسور گرادیان میدان پتانسیل معرفی می کند. روش های ارائه شده بر روی داده های مغناطیسی مصنوعی با نوفه و بدون نوفه اعمال شد و با سایر فیلترهای تعیین مرز مانند Tilt، THDR و ED مقایسه شد. نتایج از کارایی بالای روش پیشنهادی حکایت می کند. همچنین این روش بر روی داده های مغناطیس هوابرد منطقه ورزقان اعمال شد و مرز گسل ها و شکستگی های منطقه با دقت خوبی تعیین گردید.

#### واژگان کلیدی

مغناطیس سنجی  
تعیین مرز  
گرادیان افقی  
مدول های تانسور گرادیان  
ورزقان

## ۱- مقدمه

(2010) روش سیگنال تحلیلی جهت دار را برای تعیین مرز توده‌های مولد بی‌هنجاری معرفی کرد. با این حال روش مذکور نمی‌تواند لبه آنومالی‌هایی با اندازه متفاوت را به طور همزمان مشخص کند. در راستای غلبه بر این محدودیت (Yuan et al., 2014) روش سیگنال تحلیلی جهت دار مرتبه دوم را پیشنهاد داد. (Yuan and Geng, 2014) مشتق افقی کل جهت دار و مشتق افقی کل جهت دار تعمیم یافته را معرفی کرد؛ که دارای دقت بالاتری نسبت به فیلترهای سیگنال تحلیلی جهت دار مرتبه اول و دوم می‌باشد. (Yuan et al., 2016) فیلتر زاویه تتا جهت دار افقی (ED) را معرفی کرد؛ که دارای دقت بالاتری نسبت به روش‌های قبلی می‌باشد. نقطه ضعف روش ED وجود اعوجاج در مرزهای برآوردی، علی‌رغم دقت بالای آن است. برای غلبه بر این مشکل روش  $NHM^2$  پیشنهاد می‌شود؛ که دارای دقت و صحت بالایی در تعیین مرزهای برآوردی بوده و عاری از اعوجاج است.

جدول ۱. انواع فیلترهای تعیین مرز توده‌های مولد بی‌هنجاری

| نام اختصاری | روش‌های تعیین مرز                         |
|-------------|-------------------------------------------|
| ASTA        | Analytic signal of tilt angle             |
| STM         | Second-order theta map                    |
| ILP         | Improved local phase                      |
| TDX         | normalized horizontal tilt angle          |
| NAS         | normalized analytic signal                |
| BTHD        | Balanced total horizontal derivative      |
| ITM         | improved normalized horizontal tilt angle |
| CLP         | corresponding improved local phase        |
| INH         | improved normalized horizontal tilt angle |

## ۲- روش پژوهش

(Pedersen and Rasmussen, 1990) ماتریس تانسور گرادیان میدان پتانسیل را به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

$$PGT = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 F}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xx} & F_{xy} & F_{xz} \\ F_{yx} & F_{yy} & F_{yz} \\ F_{zx} & F_{zy} & F_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن  $PGT$  یک ماتریس متقارن بوده و اثر ماتریس آن صفر می‌باشد. بنابراین ماتریس  $PGT$  حاوی پنج مولفه مستقل  $F_{yz}, F_{yy}, F_{xz}, F_{xy}, F_{xx}$  است. هرچند در اندازه‌گیری داده‌های گرادیان میدان پتانسیل شش مولفه  $F_{zz}, F_{yz}, F_{yy}, F_{xz}, F_{xy}, F_{xx}$  معلوم می‌شود.

در سال‌های اخیر (Yuan et al., 2016) روش تتا جهت دار افقی (ED) را به صورت زیر معرفی کرده‌اند؛ که بیشترین مقدار آن مرز توده‌ها را نشان می‌دهد.

به طور کلی داده‌های مورد استفاده برای تشخیص لبه افقی توده‌های زمین‌شناسی به دو صورت، داده‌های میدان پتانسیل و داده‌های تانسور گرادیان میدان پتانسیل اندازه‌گیری می‌شوند. داده‌های تانسور گرادیان میدان پتانسیل در حقیقت مشتقات مرتبه دوم داده‌های میدان پتانسیل بوده و با توجه به این که حاوی نه مولفه سیگنال شامل  $F_{xx}, F_{xy}=F_{yx}, F_{xz}=F_{zx}, F_{yy}, F_{yz}=F_{zy}, F_{zz}$  می‌باشند؛ اطلاعات بیشتری را نسبت به داده‌های میدان پتانسیل معمولی در اختیار قرار می‌دهند (Pedersen and Rasmussen, 1990). بر این اساس روش‌های تشخیص لبه توده‌های زمین‌شناسی را می‌توان به دو دسته، روش‌های مبتنی بر داده‌های میدان پتانسیل معمولی و روش‌های مبتنی بر ماتریس داده‌های تانسور گرادیان میدان پتانسیل تقسیم‌بندی کرد.

روش‌های مبتنی بر داده‌های میدان پتانسیل خود شامل سه نوع فیلترهای متداول، فیلترهای متوازن شده و فیلترهای حذف لبه کاذب می‌باشند. فیلترهای متداول مانند مشتق قائم، مشتق افقی کل، سیگنال تحلیلی، انحراف معیار نرمال شده و ... بیشتر برای تعیین لبه افقی توده‌های کم عمق معرفی شده‌اند (Nabighian, 1972; Cordell and Grauch, 1982). روش‌های متوازن شده مانند  $STM, ILP, TDX, \text{Theta map, Tilt angle}$  و ... برای بدست آوردن همزمان مرز توده‌های سطحی و عمیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Miller and Singh, 1994; Wijns et al., 2005; Ansari and Alamdar, 2011; Ma, 2013; Cooper and Cowan, 2006). روش‌هایی مانند  $NAS, BTHD, ITM, CLP, INH$  و ... نیز برای از بین بردن لبه‌های کاذب ایجاد شده در روش‌های فوق‌الذکر معرفی شده‌اند (Li et al., 2014; Ma et al., 2015). در جدول ۱ نام کامل هر یک از روش‌های تعیین مرز ذکر شده در بالا آمده است.

فیلترهای مبتنی بر داده‌های تانسور گرادیان میدان پتانسیل ( $PGT^1$ ) نیز با از انحنای و مقادیر ویژه ماتریس  $PGT$  و یا از روش‌های جهت دار ماتریس  $PGT$  استفاده می‌کنند. در سال‌های اخیر روش‌های متعددی بر مبنای استفاده از ویژگی انحنای ماتریس  $PGT$  توسط افرادی چون (Hansen and Deridder, 2006; Phillips et al., 2007; Cooper, 2009; Zhou et al., 2013; Zhou and Geng, 2014; Wang et al., 2015) مقادیر ویژه ماتریس  $PGT$  توسط افرادی چون (Sertcelik and Kafadar, 2012; Oruç et al., 2013; Zhou et al., 2013; Yuan et al., 2014; Zuo and Hu, 2015) برای تشخیص لبه توده‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی ارائه شده است.

از روش‌های جهت دار ماتریس  $PGT$  برای تعیین مرز ساختارها و توده‌های زمین‌شناسی (Oruç and Keskinsezer, 2008) زاویه تیلت جهت دار را با استفاده از مشتقات تیلت و تانسور گرادیان گرانی معرفی کرده‌اند. Beiki

1 Potential-field gradient tensors

2 Normalized horizontal modulus

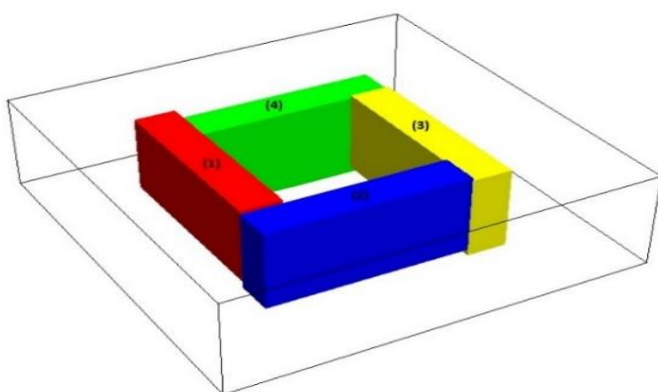
### ۳- مدل مصنوعی

در راستای بررسی کارایی روش پیشنهادی ابتدا یک مدل مغناطیسی مصنوعی مطابق شکل ۱ متشکل از چهار دایک عمودی با خودپذیری مغناطیسی یکسان SI ۰/۰۲ و عمق قرارگیری متفاوت ۱۵۰ متر (دایک ۱)، ۲۰۰ متر (دایک ۲)، ۲۵۰ متر (دایک ۳) و ۳۰۰ متر (دایک ۴)، ساخته شد. در جدول ۲ مشخصات کامل توده‌های تشکیل دهنده مدل مصنوعی ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات توده‌های تشکیل دهنده مدل مصنوعی شکل ۱.

| مشخصات توده‌ها | امتداد | شیب (درجه) | عرض*طول (متر) | ساسپتیویلیته (SI) | عمق (متر) |
|----------------|--------|------------|---------------|-------------------|-----------|
| توده (۱)       | N-S    | ۹۰         | ۵۰۰*۲۵۰۰      | ۰/۰۲              | ۱۵۰       |
| توده (۲)       | E-W    | ۹۰         | ۵۰۰*۲۵۰۰      | ۰/۰۲              | ۲۰۰       |
| توده (۳)       | N-S    | ۹۰         | ۵۰۰*۲۵۰۰      | ۰/۰۲              | ۲۵۰       |
| توده (۴)       | E-W    | ۹۰         | ۵۰۰*۲۵۰۰      | ۰/۰۲              | ۳۰۰       |

با توجه به فرضیات بالا، میدان مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی برای موقعیت قطب مغناطیسی (زاویه میل ۹۰ درجه، زاویه انحراف صفر درجه) بدست آمد و در ادامه داده‌های عددی متناظر تانسور گرادیان مغناطیسی با مشتق‌گیری مرتبه دوم از داده‌های اولیه محاسبه گردید. بایستی توجه کرد که در اینجا چون میدان مغناطیسی در موقعیت قطب مغناطیسی محاسبه شده، نیاز به تبدیل به قطب داده‌ها نبود؛ ولی در سایر موارد پس از محاسبه میدان مغناطیسی باید از تبدیل به قطب یافته داده‌ها استفاده کرد.



شکل ۱. نمایش سه بعدی و دو بعدی از مدل مصنوعی.

$$ED = \text{Theta}X + \text{Theta}Y \quad (2)$$

که در آن  $\text{Theta}X$  و  $\text{Theta}Y$  به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} \text{Theta}X = -\frac{\sqrt{F_{yx}^2 + F_{yy}^2}}{\sqrt{F_{xx}^2 + F_{xy}^2 + F_{xz}^2}} \\ \text{Theta}Y = -\frac{\sqrt{F_{xx}^2 + F_{yx}^2}}{\sqrt{F_{yx}^2 + F_{yy}^2 + F_{yz}^2}} \end{cases} \quad (3)$$

(Wu et al., 2017) مدول تانسور گرادیان میدان پتانسیل را به صورت رابطه آتی تعریف کردند:

$$M = \sqrt{(F_{xx})^2 + (F_{xy})^2 + (F_{xz})^2 + (F_{yx})^2 + (F_{yy})^2 + (F_{yz})^2 + (F_{zx})^2 + (F_{zy})^2 + (F_{zz})^2} \quad (4)$$

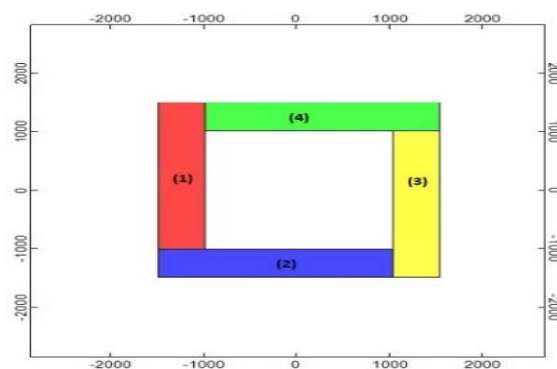
در این پژوهش مدول افقی تانسور گرادیان ( $HM^1$ ) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود؛ که در حقیقت مولفه‌های افقی تانسور گرادیان میدان پتانسیل است.

$$HM = \sqrt{(F_{xx})^2 + (F_{xy})^2 + (F_{yx})^2 + (F_{yy})^2} \quad (5)$$

بر پایه دو معادله ۴ و ۵ یک روش جدید برای تشخیص لبه توده‌ها و ساختارها به صورت زیر معرفی می‌شود:

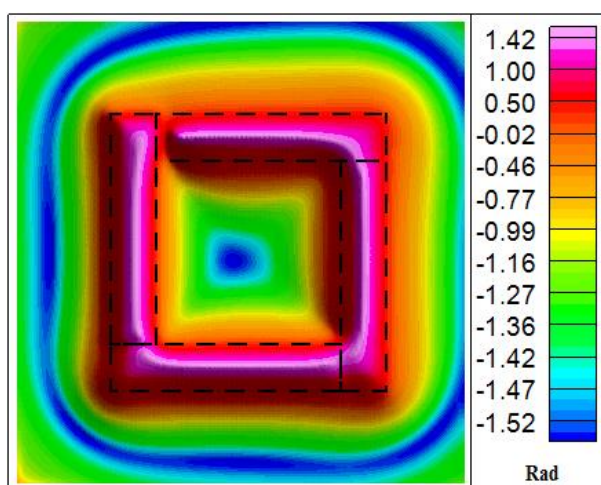
$$NHM = \frac{HM}{M} \quad (6)$$

در رابطه (۶)  $NHM$  مدول افقی نرمال شده<sup>۲</sup> بوده؛ که بدون بعد بوده و کمترین مقدار آن مرز توده‌های مولد بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. در ادامه روش پیشنهادی با دیگر فیلترهای تشخیص مرز Tilt، THDR و ED بر روی مدل مصنوعی با نوفه و بدون نوفه اعمال گردید و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد.

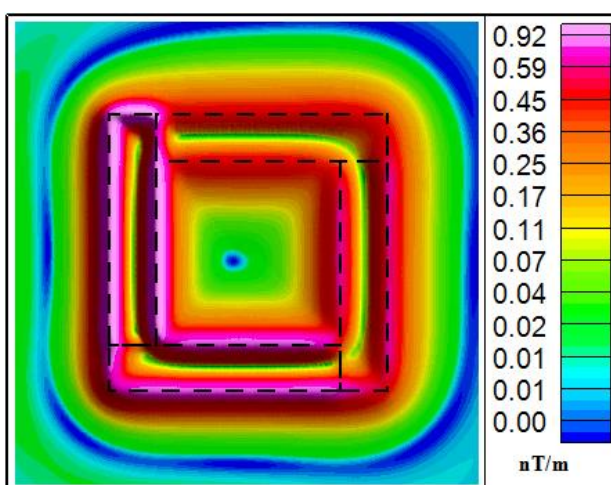


تمایل در تعیین موقعیت توده‌های عمیق و سطحی بهتر عمل کرده؛ ولی از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشد. در شکل ۲. ج نتایج حاصل از اعمال فیلتر ED بر روی داده‌های مصنوعی آورده شده است و نشان می‌دهد که روش ED از دقت بسیار بالایی در تعیین مرز توده‌ها برخوردار می‌باشد. اما مشکل این روش این است که در بعضی از موقعیت‌ها مرزهای برآوردی اعوجاج داشته و ممکن است باعث تعیین مرزهای غیر واقعی شود. با توجه به این که کمترین مقدار روش NHM مرز توده‌ها را نشان می‌دهد، اعمال روش NHM بر روی داده‌های مدل مصنوعی (شکل ۲. د) حاکی از کارایی بسیار خوب این روش می‌باشد، که در مقایسه با فیلترهای دیگر مرز توده‌ها را به صورت دقیق نمایش داده و اعوجاج نشان نمی‌دهد. بنابراین از دقت و صحت بالایی نسبت به سایر روش‌های اعمال شده برخوردار است.

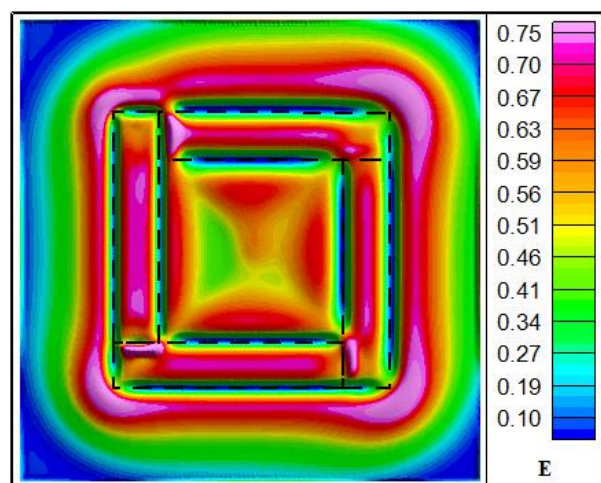
به منظور مقایسه بهتر روش NHM با دیگر روش‌های تعیین مرز، یک روش از فیلترهای متداول (THDR)، یک روش از فیلترهای متوازن شده (Tilt angle) و یک روش از فیلترهای جهتی ماتریس PGT (ED) انتخاب و از آنها جهت تعیین مرز توده‌های مسبب بی‌هنجاری استفاده شد. شکل ۲ نتایج حاصل از اعمال فیلترهای THDR، Tilt، ED و NHM بر روی داده‌های مغناطیسی مدل مصنوعی شکل ۱ را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار روش THDR مرز توده‌های مسبب آنومالی را نشان می‌دهد با توجه به شکل ۲. الف روش THDR در تعیین موقعیت توده‌ها موفق بوده ولی مرز توده‌ها را به خوبی نمایش نداده و پهنای آنومالی را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. همچنین این روش حساس به عمق بوده و مرز برآوردی برای توده‌های عمیق پخش شدگی دارد. کنتور صفر روش زاویه تمایل مرز افقی توده‌های مولد بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲. ج روش زاویه



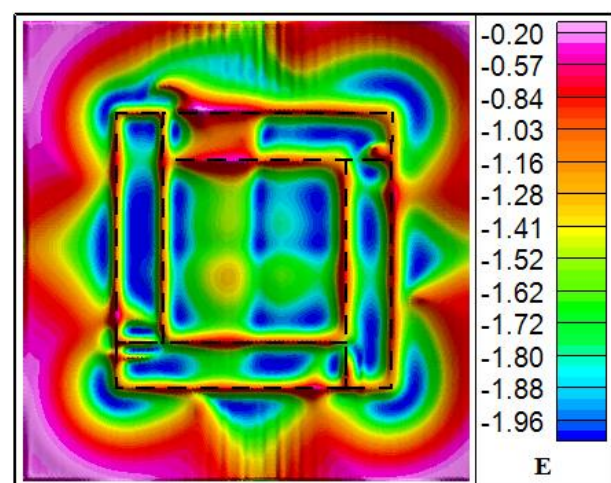
(ب)



(الف)



(د)

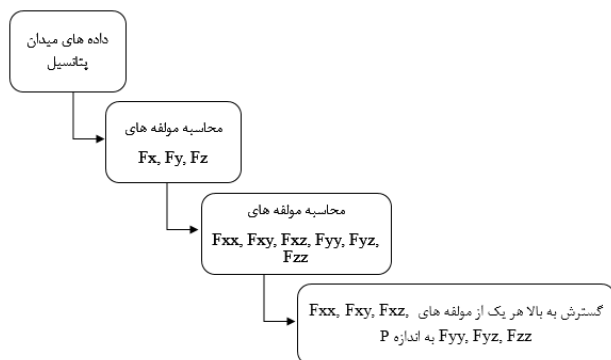


(ج)

شکل ۲. نتایج اعمال فیلترهای تعیین مرز بر روی داده‌های مغناطیسی مدل مصنوعی در شکل ۱. الف) THDR، ب) Tilt angle، ج) ED، د) NHM.

مقدار  $P$  بیشتر باشد به همان اندازه میزان نوفه در داده ها کاهش می‌یابد؛ ولی این مقدار نباید به اندازه ای بزرگ باشد که باعث از بین رفتن اطلاعات در داده‌ها شود. مقدار  $P$  بسته به میزان نوفه در داده‌ها، ارتفاع داده‌برداری، عمق توده‌های مغناطیسی، در داده‌ها متفاوت بوده و از مقادیر با ارتفاع پایین‌تر شروع شده و تا زمانی که تفکیک پذیری کافی در داده‌ها قابل مشاهده باشد، ادامه می‌یابد. با توجه به توضیحات بالا مقدار  $P$  در اینجا ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است. دیاگرام مربوط به نحوه اندازه‌گیری تانسور گرادیان مغناطیسی از داده‌های مغناطیسی با میزان نوفه بالا، در شکل ۴ آورده شده است همچنین شش مولفه تانسور گرادیان میدان مغناطیسی محاسبه شده با روش فوق در شکل ۵ نمایش داده شده است. این مولفه جهت محاسبه روش‌های ED و NHM استفاده شده است. روش‌های Tilt و THDR نیز به شکل مرسوم بر روی داده‌های میدان مغناطیسی اعمال شده‌اند.

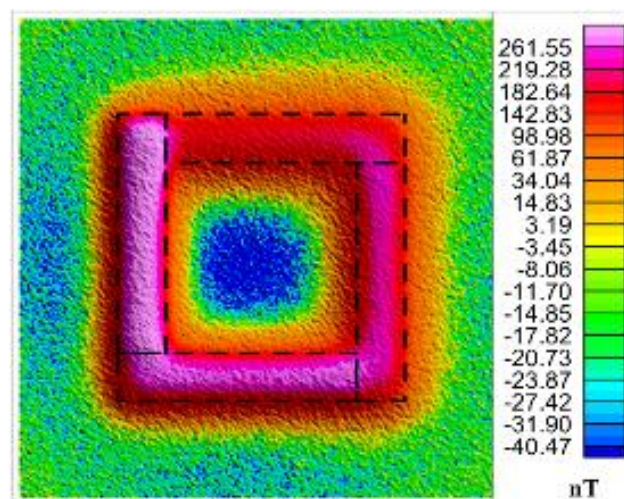
شکل ۶. نتایج حاصل از اعمال فیلترهای THDR، Tilt، ED و NHM بر روی داده های مغناطیسی شکل ۱ با ۱۰ درصد نوفه تصادفی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، میزان نوفه در نقشه THDR به حدی است که این فیلتر هیچ گونه مرزی را عملاً نتوانسته مشخص کند. همچنین فیلتر Tilt تا حدودی در برآورد موقعیت توده موفق بوده؛ ولی با این حال میزان نوفه در نقشه حاصله بیشتر می‌باشد. نقشه حاصل از فیلترهای ED و NHM دارای دقت بالایی در تعیین مرزها بوده؛ ولی مرزهای برآوردی در روش ED اعوجاج دارد. مقایسه نتایج حاصل از فیلترهای ED و NHM در صورت وجود و عدم وجود نوفه در داده‌ها، حاکی از تاثیر پذیری کمتر روش NHM نسبت به نوفه بوده و مرزهای برآوردی دارای دقت و صحت بالایی می‌باشند.



شکل ۴. نحوه اندازه گیری تانسور گرادیان مغناطیسی از داده های

مغناطیسی با میزان نوفه بالا.

در راستای بررسی کارایی فیلتر پیشنهادی، در محیط‌های دارای نوفه‌دار مقداری نوفه تصادفی گوسین به داده‌های مغناطیسی مدل مصنوعی شکل ۱ اعمال گردید؛ که برابر با انحراف معیار ۱۰٪ دامنه بیشترین مقدار بی-هنجاری مغناطیسی می‌باشد. میدان مغناطیسی حاصل از آن در شکل ۳ آمده است. برای محاسبه روش‌های ED و NHM پس از آن که میدان مغناطیسی حاصل از داده‌های نوفه‌دار محاسبه شد؛ باید هر یک از تانسورهای گرادیان مغناطیسی محاسبه شود.



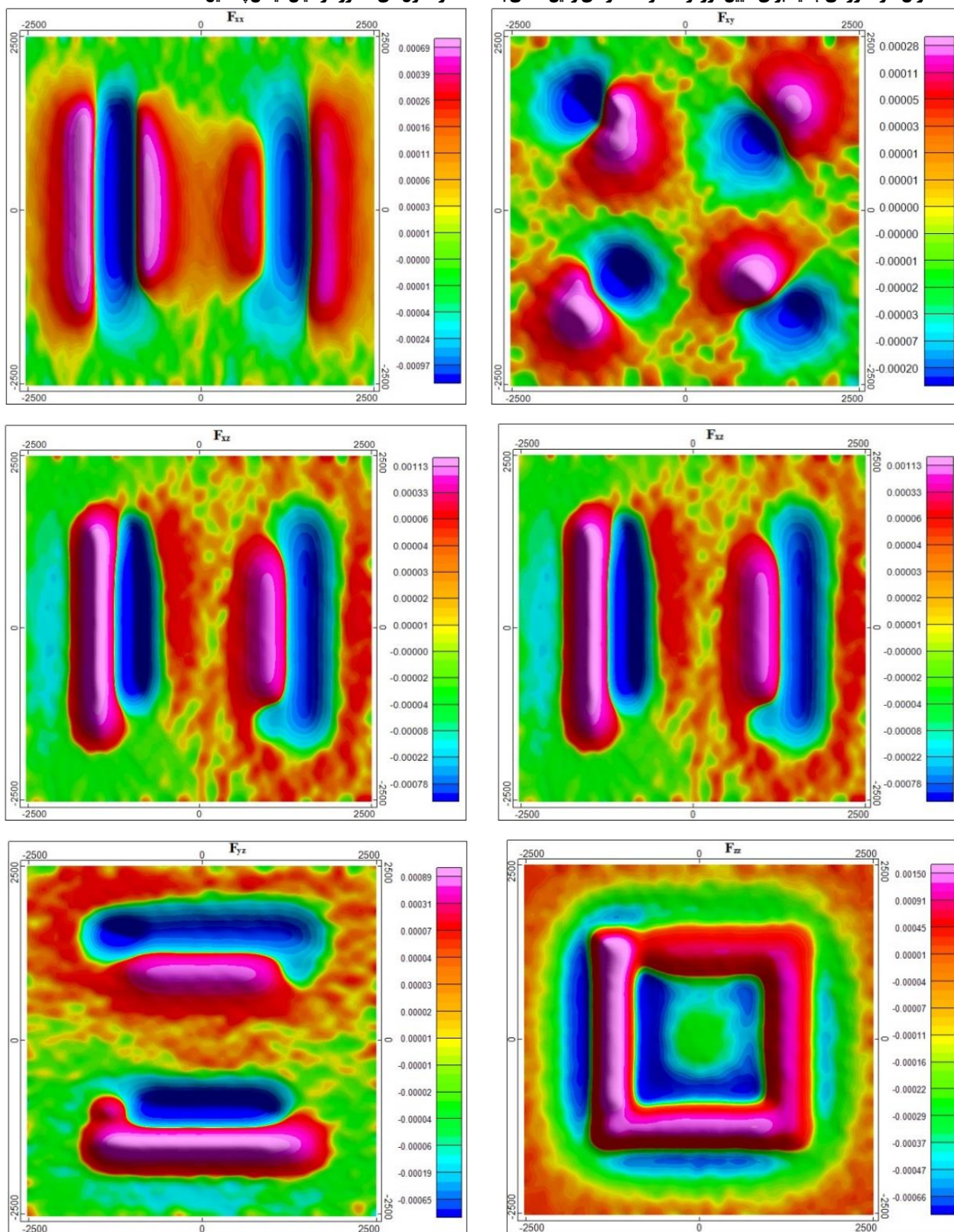
شکل ۳. نقشه میدان مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی شکل ۱ با ۱۰

درصد نوفه تصادفی.

با توجه به این که تانسور گرادیان میدان پتانسیل در حقیقت مشتقات مرتبه دوم از داده‌های میدان پتانسیل است و این موضوع که با افزایش مرتبه مشتق میزان نوفه در داده‌ها افزایش می‌یابد؛ هنگام محاسبه تانسورهای گرادیان میدان پتانسیل از داده‌های میدان مغناطیسی با نوفه بالا، میزان نوفه در داده‌ها به قدری تقویت می‌شود که عملاً استفاده از تانسورهای حاصله در فیلترهای مبتنی بر ماتریس PGT، با مشکل مواجه می‌شود. برای غلبه بر این مشکل پیشنهاد شد به جای استفاده از مولفه‌های مشتق مرتبه دوم، از مولفه‌های مشتق مرتبه دوم ادامه فراسو داده شده استفاده شود. بدین صورت که ابتدا تمامی تانسورهای گرادیان میدان مغناطیسی محاسبه می‌شود؛ سپس هر یک از آنها به طور جداگانه به اندازه مقدار  $P$ ، گسترش به بالا داده می‌شوند. باید توجه داشت که اندازه  $P$  در تمامی مراحل ثابت بوده و مقدار آن توسط مفسر تعیین می‌گردد. هر چقدر

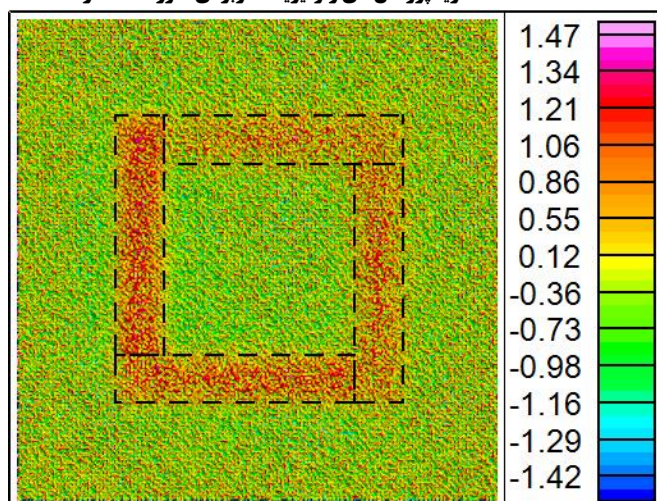


زارعی و همکاران / ارائه روشی جدید برای تعیین مرز توده‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی با استفاده از مدول‌های تانسور گرادیان میدان پتانسیل، صفحات ۲۶۹–۲۸۱

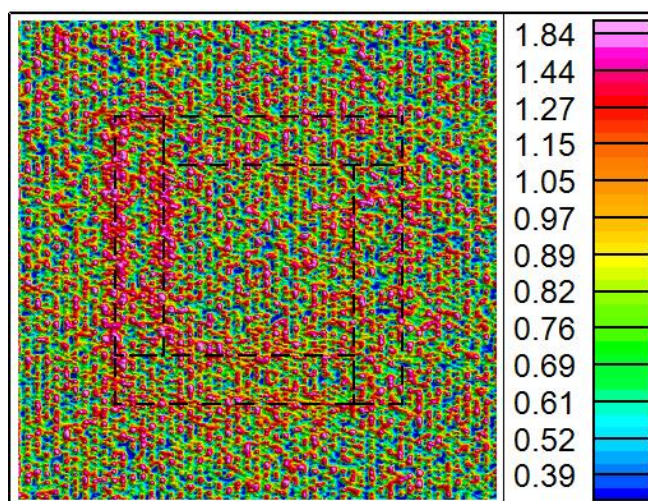


شکل ۵. تانسورهای گرادیان مغناطیسی محاسبه شده از داده‌های مغناطیسی کل برای مدل مصنوعی شکل ۱ با ۱۰ درصد نوفه تصادفی.

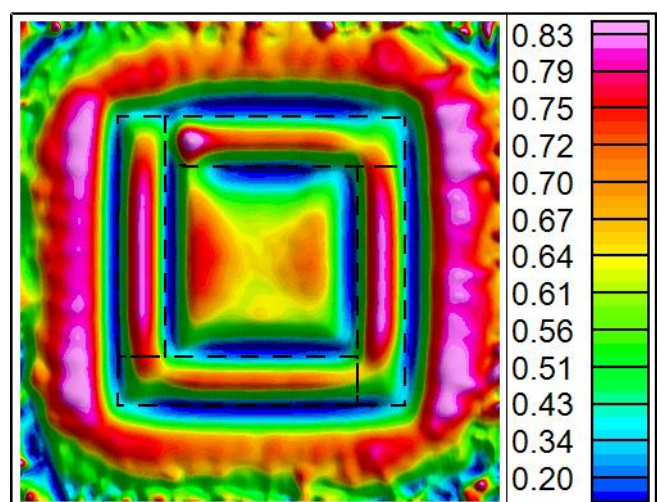




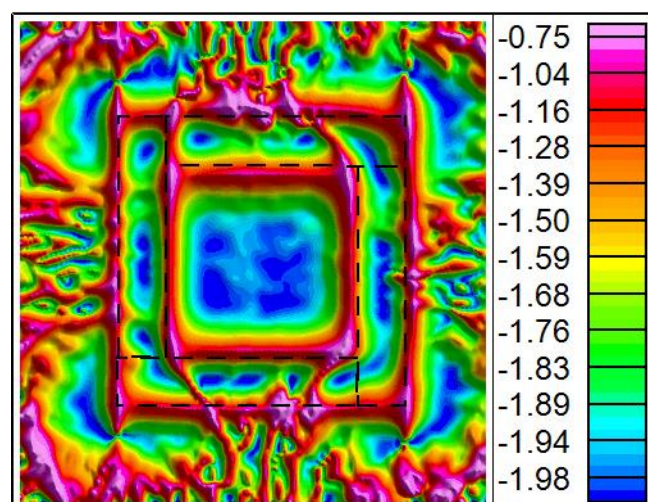
(ب)



(الف)



(د)



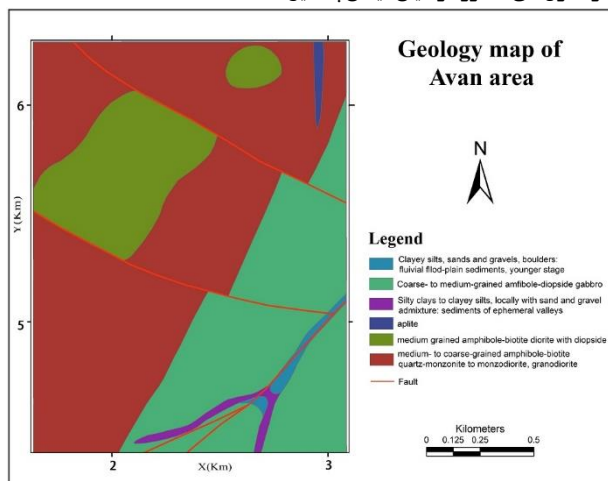
(ج)

شکل ۶. نتایج اعمال فیلترهای تعیین مرز بر روی داده‌های مغناطیسی مدل مصنوعی شکل ۱ با ۱۰ درصد نوفه تصادفی (الف THDR، ب Tilt angle، ج) ED، د NHM).

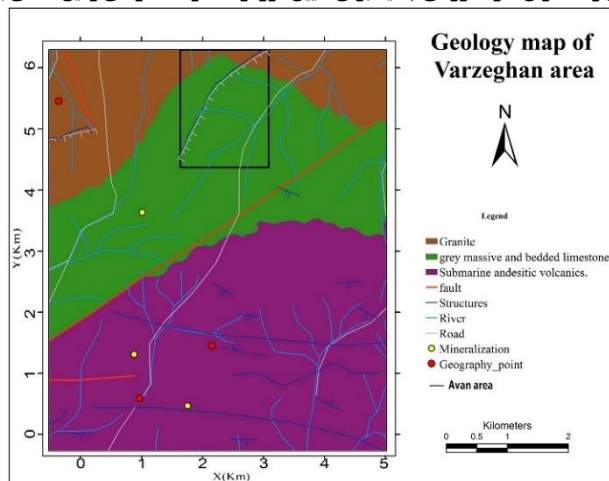
#### ۴- داده‌های واقعی

۴۰ متر برداشت شده است. در شکل ۸ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی منطقه ورزقان همراه با نقشه انتقال به قطب یافته آنها آورده شده است. پس از انتقال به قطب داده‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه، لازم است تانسورهای گرادیان متناظر برای منطقه مورد مطالعه محاسبه گردد. بدین منظور ابتدا مشتقات مرتبه دوم داده‌های انتقال به قطب داده شده محاسبه شد. از آنجا که با عمل مشتق‌گیری میزان نوفه در داده‌ها تقویت شده و کاهش تفکیک‌پذیری در نقشه‌ها را سبب می‌شود؛ برای غلبه بر این مشکل فیلتر ادامه فراسو با ارتفاع‌های مختلف بر روی مولفه‌های مشتق اعمال گردید. نتایج نشان می‌دهد که برای ارتفاع ۳۰۰ متر تفکیک‌پذیری نقشه‌ها قابل قبول است؛ به نحوی که با اعمال فیلتر ادامه فراسو با ارتفاع ۳۰۰ متر بر روی مولفه‌های مشتق، میزان نوفه در داده‌ها کاهش یافته و اطلاعات مفید از بین نمی‌رود و به راحتی می‌توان نقشه‌های حاصله را تفسیر کرد.

روش‌های ED، Tilt، THDR و NHM بر روی داده‌های مغناطیسی هوابرد منطقه ورزقان (شمال غرب ایران) اعمال شد. این منطقه بر روی زون زمین ساختی البرز-آذربایجان واقع شده و قسمتی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین-شناسی سیه‌رود می‌باشد. در شکل ۷ الف نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه آمده است. این منطقه دارای یک محیط زمین‌شناسی بسیار پیچیده از لحاظ تکتونیکی بوده و فعالیت‌هایی ماگمایی در الیگومیوسن سبب نفوذ توده‌ای با ترکیب گابرو تا دیوریت در داخل رسوبات کرتاسه شده و باعث ایجاد گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان در منطقه شده است. داده‌های مغناطیسی هوابرد منطقه مورد مطالعه توسط سازمان زمین-شناسی و اکتشافات معدنی کشور، با فواصل خطوط برداشت ۲۵۰ متر، فاصله نمونه‌برداری ۳ متر در راستای شمالی-جنوبی و با ارتفاع پرواز ثابت

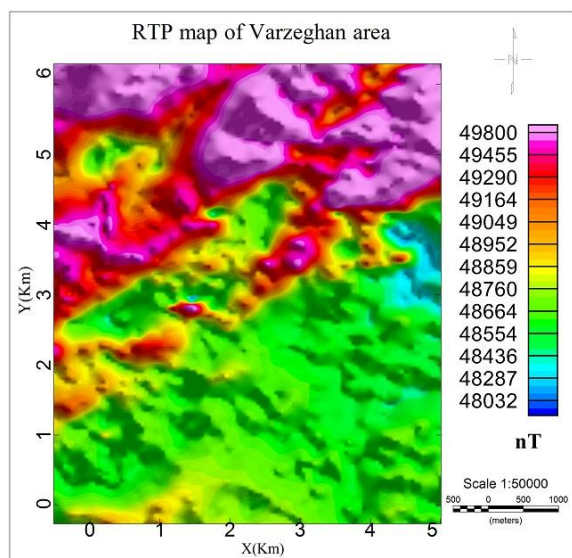


(ب)

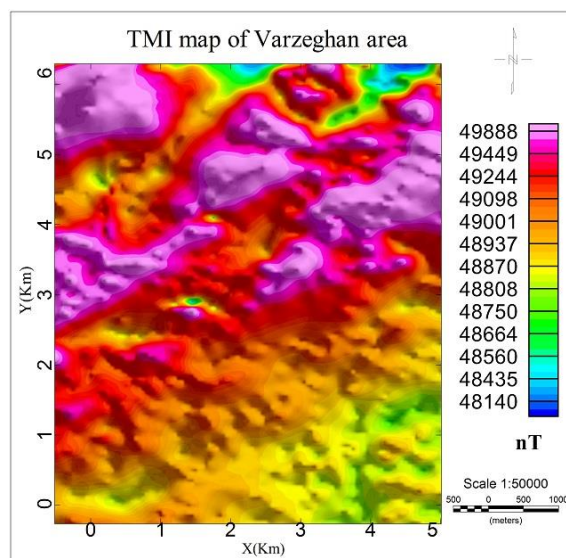


(الف)

شکل ۷. الف) نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه ورزقان، ب) نقشه ۱:۲۵۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه آوان.



(ب)



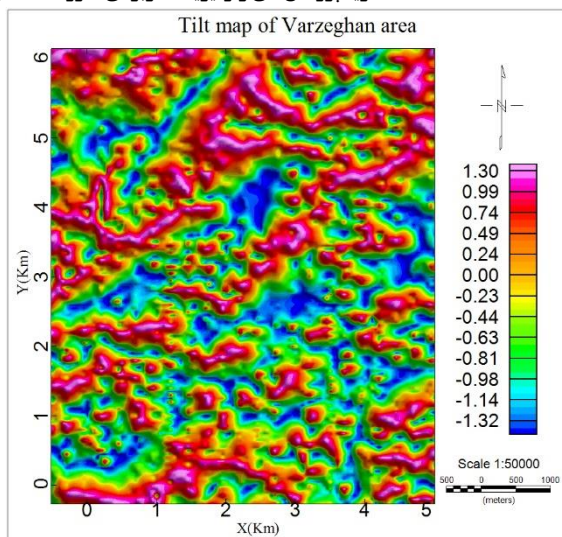
(الف)

شکل ۸. الف) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی منطقه ورزقان، ب) نقشه تبدیل به قطب داده‌های مغناطیسی منطقه ورزقان.

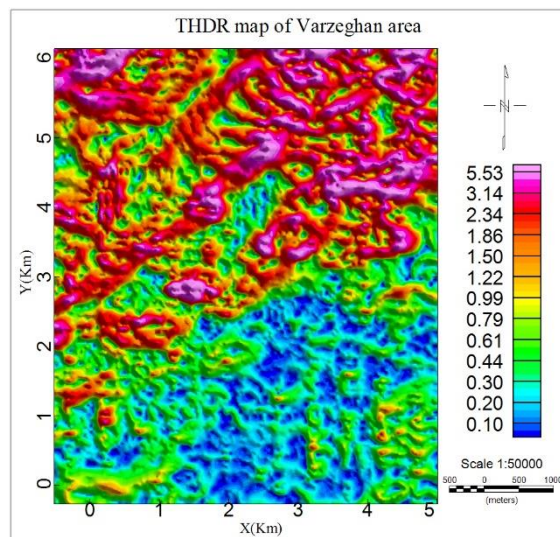
مرز ساختارهای منطقه نمی‌باشند. فیلترهای ED و NHM با دقت بالایی مرز ساختارهای منطقه را مشخص کرده‌اند؛ اما با توجه به شکل ۹ ج. فیلتر ED در برخی مناطق اعوجاج نشان داده و با توجه به آن تصور اولیه حاکی از وجود یک شکستگی و گسل دیگر نیز در آن منطقه است؛ که نتایج بررسی‌های صحرایی این موضوع را تایید نمی‌کند. نتایج فیلتر NHM حاکی از نمایش دقیق مرز ساختارها و توده‌های مسبب آنومالی بوده و هیچ‌گونه اعوجاجی بر روی نقشه مشاهده نمی‌شود.

به همین دلیل مولفه‌های مشتق به صورت جداگانه ۳۰۰ متر گسترش به بالا داده شد و معادل عددی آنها محاسبه گردید و در ادامه از آنها جهت محاسبه روش‌های ED و NHM استفاده شد. فیلترهای THDR و Tilt نیز به صورت مرسوم بر روی داده‌های مغناطیسی منطقه اعمال گردید. شکل ۹ نتایج حاصل از فیلترهای THDR، Tilt، ED و NHM بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه ورزقان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فیلترهای THDR و Tilt فقط توانسته‌اند مرز توده‌هایی با میزان خودپذیری مغناطیسی بالا نسبت به سنگ‌های اطراف را نمایش دهند و قادر به تعیین

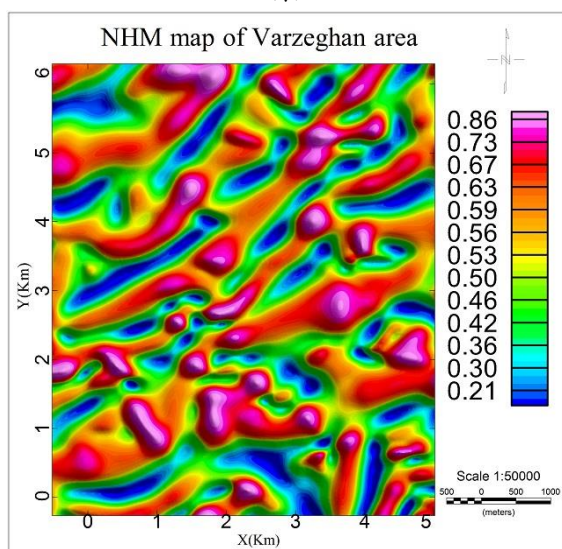




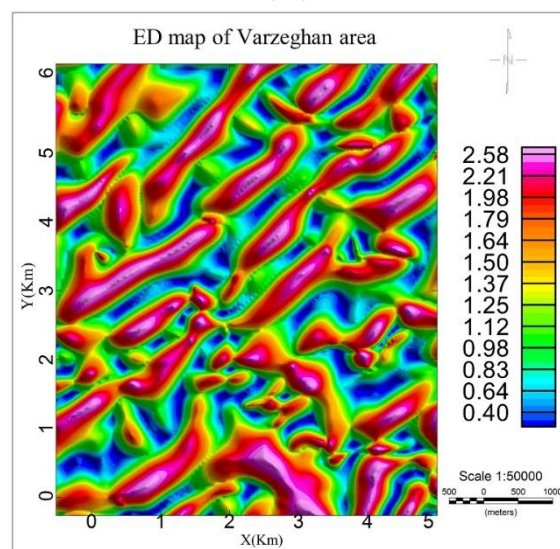
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹. نتایج حاصل از اعمال فیلترهای الف (THDR، ب) Tilt، ج) ED، د) NHM، بر روی داده‌های مغناطیسی هوابرد منطقه ورزقان..

تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی بزرگ مقیاس کند.

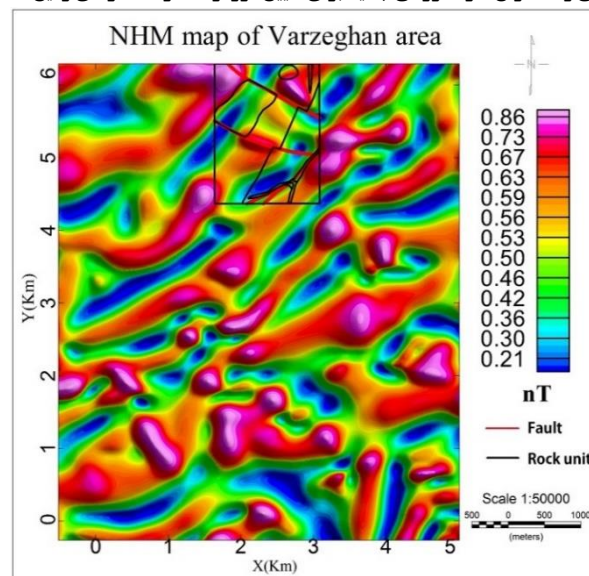
## ۵- نتایج

مطالعات بر روی روش‌های تعیین مرز توده‌های مولد بی‌هنجاری حاکی از دقت بسیار بالای روش‌های مبتنی بر داده‌های تانسور گرادیان میدان پتانسیل می‌باشد. بررسی‌ها بر روی فیلتر ED نشان داد که این روش علی‌رغم دقت بالا، دارای اعوجاج در مرزهای برآوردی بوده؛ که ممکن است باعث تشخیص مرزهای غیر واقعی شود. در راستای غلبه بر این مشکل روش جدید NHM برای تعیین مرز ساختارها و توده‌ها پیشنهاد شد که در حقیقت نرمال شده مدول افقی تانسور گرادیان میدان پتانسیل می‌باشد. کمترین مقدار فیلتر NHM مرز ساختارها و توده‌های مولد بی‌هنجاری را نمایش می‌دهد.

به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از اعمال روش NHM بر روی داده‌های مغناطیسی منطقه ورزقان، بهتر است نتایج حاصله با نقشه‌های زمین‌شناسی بزرگ مقیاس مقایسه گردد. از آنجایی که برای کل منطقه نقشه زمین‌شناسی با دقت بالا تهیه نشده و تنها برای بخشی از منطقه مورد مطالعه تحت عنوان منطقه آوان نقشه زمین‌شناسی بزرگ مقیاس موجود است. بنابراین صحت‌سنجی نتایج تنها بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه آوان (شکل ۷ ب) انجام شده است. در شکل ۱۰ نقشه حاصل از روش NHM آمده است؛ که بر روی آن مرز افقی گسل‌ها و لیتولوژی‌های منطقه آوان مشخص شده است. با توجه به آن نتایج حاصله نه تنها با مرز گسل‌های و لیتولوژی‌های منطقه، تطابق دارد؛ بلکه جزئیات بیشتری نیز نمایش می‌دهد. از آنجایی که منطقه مورد مطالعه دارای پوشش جنگلی و مترکم است؛ نتایج روش NHM می‌تواند کمک زیادی در

## ۷- منابع

- Ansari, A. and K. Alamdar (2011). "A new edge detection method based on the analytic signal of tilt angle (ASTA) for magnetic and gravity anomalies." *Iranian Journal of Science and Technology (Sciences)* 35(2): 81-88.
- Beiki, M. (2010). "Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location." *Geophysics* 75(6): I59-I74.
- Cooper, G. (2009). "Balancing images of potential-field data." *Geophysics* 74(3): L17-L20.
- Cooper, G. and D. Cowan (2006). "Enhancing potential field data using filters based on the local phase." *Computers & Geosciences* 32(10): 1585-1591.
- Cordell, L. and V. Grauch (1982). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1982, Society of Exploration Geophysicists: 246-247.
- Hansen, R. and E. Deridder (2006). "Linear feature analysis for aeromagnetic data." *Geophysics* 71(6): L61-L67.
- Li, L., D. Huang, L. Han and G. Ma (2014). "Optimized edge detection filters in the interpretation of potential field data." *Exploration Geophysics* 45(3): 171-176.
- Ma, G. (2013). "Edge detection of potential field data using improved local phase filter." *Exploration Geophysics* 44(1): 36-41.
- Ma, G., C. Liu and D. Huang (2015). "The removal of additional edges in the edge detection of potential field data." *Journal of Applied Geophysics* 114: 168-173.
- Miller, H. G. and V. Singh (1994). "Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources." *Journal of Applied Geophysics* 32(2-3): 213-217.
- Nabighian, M. N. (1972). "The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation." *Geophysics* 37(3): 507-517.
- Oruç, B. and A. Keskinsezer (2008). "Structural setting of the northeastern Biga Peninsula (Turkey) from tilt derivatives of gravity gradient tensors and magnitude of horizontal gravity components." *Pure and applied geophysics* 165(9): 1913-1927.
- Oruç, B., I. Sertçelik, Ö. Kafadar and H. Selim (2013). "Structural interpretation of the Erzurum Basin, eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief." *Journal of Applied Geophysics* 88: 105-113.
- Pedersen, L. and T. Rasmussen (1990). "The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps." *Geophysics* 55(12): 1558-1566.
- Phillips, J. D., R. O. Hansen and R. J. Blakely (2007). "The use of curvature in potential-field interpretation." *Exploration Geophysics* 38(2): 111-119.
- Sertçelik, I. and O. Kafadar (2012). "Application of edge detection to potential field data using eigenvalue analysis of structure tensor." *Journal of Applied Geophysics* 84: 86-94.
- Wang, J., X. Meng and F. Li (2015). "Improved curvature gravity gradient tensor with principal component analysis and its application in edge detection of gravity data." *Journal of Applied Geophysics* 118: 106-114.
- Wijns, C., C. Perez and P. Kowalczyk (2005). "Theta map: Edge detection in magnetic data." *Geophysics* 70(4): L39-L43.
- Wu, H., L. Li, C. Xing and S. Zhang (2017). "A new method of edge detection based on the total horizontal derivative and the modulus of full tensor gravity gradient." *Journal of Applied*



شکل ۱۰. نقشه فیلتر NHM به همراه نقشه ۱:۲۵۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه آوان.

همچنین مطالعات نشان می‌دهد که در هنگام محاسبه مولفه‌های تانسور گرادیان میدان پتانسیل از داده‌های میدان پتانسیل با میزان نوفه بالا، به دلیل افزایش نوفه در هنگام مشتق‌گیری عملاً استفاده از تانسورهای گرادیان میدان پتانسیل غیرممکن باشد. بدین منظور پیشنهاد شد که پس از محاسبه این مولفه‌ها، هر یک از آنها به اندازه P به طرف بالا گسترش داده شود؛ تا اثر نوفه در آنها به حداقل برسد. سپس از آنها در محاسبه فیلترهای مبتنی بر تانسور گرادیان میدان پتانسیل استفاده شود. روش پیشنهادی NHM بر روی داده‌های مصنوعی با نوفه و بدون نوفه اعمال شد و با سایر روش‌های تشخیص مرز Tilt، THDR و ED مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش ED هیچگونه اعوجاجی نداشته و حساسیت کمتری به نوفه دارد. روش‌های Tilt و THDR علی‌رغم توانایی تعیین موقعیت توده‌های مولد بی‌هنجاری، برای تعیین مرز گسل‌ها و شکستگی‌های توصیه نمی‌شود. همچنین روش‌های فوق بر روی داده‌های مغناطیس‌هاورد منطقه ورزقان اعمال شد و ساختارهای منطقه با دقت بالایی مشخص شده و با سایر روش‌های تعیین مرز مقایسه گردید. در ادامه نتایج حاصل از روش NHM با نقشه ۱:۲۵۰۰۰ منطقه آوان مقایسه شد؛ که نتایج حاکی از دقت بالای روش پیشنهادی در تعیین مرز گسل‌ها و لیتولوژی‌های منطقه بود.

## ۶- تشکر و قدردانی

نگارندگان از مساعدت و همکاری سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های ژئوفیزیک‌هاورد منطقه ورزقان کمال تشکر را دارند.

- Directional Analytic Signal. 76th EAGE Conference and Exhibition 2014.
- Zhou, S. and M. Geng (2014). "Comment on "Structural interpretation of the Erzurum Basin, eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief" by B. Oruç et al. (2013)." Journal of Applied Geophysics 111: 393-394.
- Zhou, W., X. Du and J. Li (2013). "The limitation of curvature gravity gradient tensor for edge detection and a method for overcoming it." Journal of Applied Geophysics 98: 237-242.
- Zuo, B. and X. Hu (2015). "Edge detection of gravity field using eigenvalue analysis of gravity gradient tensor." Journal of Applied Geophysics 114: 263-270.
- Geophysics 139: 239-245.
- Yuan, Y., J.-Y. Gao and L.-N. Chen (2016). "Advantages of horizontal directional Theta method to detect the edges of full tensor gravity gradient data." Journal of Applied Geophysics 130: 53-61.
- Yuan, Y. and M. Geng (2014). Directional total horizontal derivatives of gravity gradient tensor and their application to delineate the edges. 76th EAGE Conference and Exhibition 2014.
- Yuan, Y., D. Huang, Q. Yu and P. Lu (2014). "Edge detection of potential field data with improved structure tensor methods." Journal of Applied Geophysics 108: 35-42.
- Yuan, Y., Q. Yu and M. Geng (2014). Edge Detection of Potential Field Gradient Tensor Data with Horizontal Second Order





## A new method of edge detection of magnetized structures using the modulus of full tensor potential field gradient

Vahid Zareie<sup>1</sup>; Rasoul Hamidzadeh Moghadam<sup>1\*</sup>; Hassan Kheyrollahi<sup>2</sup>

1. Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

2. Ph.D. Student, Geological survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 9 July 2018; Accepted: 24 November 2018

Corresponding author: hamidzadeh@sut.ac.ir

### Keywords

Geomagnetic  
Edge Detection of Magnetic Anomalies  
The Modulus of Full Tensor Potential Field  
Gradient

### Extended Abstract

#### Summary

Edge detection of causative bodies is important in the interpretation of potential field data. There are many methods that can be employed to detect and enhance the edges. In recent years, many filters have been presented based on potential field gradient tensor data. Because of using nine signal components, these methods have a very high accuracy compared to previous proposed methods in this regard. In this paper, normalized horizontal modulus

(NHM) method, based on the potential field gradient tensor data, has been proposed. This method makes use of the modulus of potential field gradient tensor to normalize the horizontal modulus of potential field gradient tensor. The minimum value of NHM specifies the edge of magnetized structures. The proposed method with very high degree of precision delineates the edges of anomalies and does not show distraction. This new filter is tested on synthetic data and finally, it has been applied to the aeromagnetic data of the Varzaghan area, and as a result, the location of faults in the area has been determined with high accuracy.

### Introduction

The potential-field gradient tensors are the second derivatives of potential-field data. Since the potential-field gradient tensor data contains nine signal components, their interpretation allows a high resolution and detailed investigation of geological structures. The methods based on the potential field gradient tensor (PGT) matrix use curvature or eigenvalue of the PGT matrix or directional methods of the PGT matrix. In the directional methods of the PGT matrix, in order to provide a more detailed map of the subsurface, Oruç and Keskinsezer (2008) have defined the directional tilt angles filters. Mikhailov et al. (2007) and Beiki (2010) have proposed the directional analytic signal to delineate the edges. However, this technique cannot display the edge of amplitude size of different anomalies simultaneously. Yuan and Yu (2015) have introduced second order directional analytic signal method and then, proposed a normalization method, which can display the large and small amplitude edges simultaneously. Yuan et al. (2016) have proposed horizontal directional theta (ED) method as an edge detection method based on the gravity gradient tensor that can weaken the above defects. It has higher resolution compared to the previous filters for delineating edges. However, for complex geological situations, the mentioned methods have some restrictions for edge detection. In this paper, to overcome these restrictions, NHM method has been proposed, and compared to other methods produces more detailed results.

### Methodology and Approaches

The NHM is defined as follows:

$$NHM = \frac{HM}{M}$$

where HM is the horizontal modulus of the potential field gradient tensor and M is the modulus of potential field gradient tensor. The minimum value of NHM specifies the edges of magnetized structures. The NHM method beside tilt angle, total horizontal derivative of the tilt angle (THDR) and ED methods has been applied on synthetic magnetic data, and their results have compared. Moreover, the NHM is applied on aeromagnetic data from Varzaghan area.

### Results and Conclusions

The results of applying the tilt angle, THDR, and NHM methods on synthetic magnetic data have shown that the THDR method has been succeeded in determining the position of the bodies, however, the edges of the deeper bodies have not been recognized clearly. The tilt angle method can recognize the edges of the shallow and deep bodies simultaneously but with low accuracy. The ED method possesses high precision and high accuracy in identifying the edges, but in its

results, some distortions can be observed. The NHM method of the total intensity data can display the edges of the bodies more accurately while no distortion is seen in the results of the NHM method. Therefore, the NHM filter, compared to other filters, produces more detailed results. The proposed method has been applied on the aeromagnetic data from Varzeghan area, and as a result, the recognized edges of the geological structures are found to be precise and clear.

---