



## بهبود دقت محاسبات در تعیین موقعیت فضایی (Spatial Locating) ساختارهای زمین‌شناسی مدفون، با مقیدسازی روش تخمین عمق اوپلر - واهم آمیخت ۳ بعدی بوسیله ترکیب مشتقات زاویه تیلت (Tilt)

سینا شیرانی<sup>۱</sup>، علی نجاتی کلاته<sup>۲\*</sup> و امین روشندل کاهو<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۲- دپارتمان ژئوفیزیک شرکت افاق پویندگان اکسیر (APEX)
- ۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷

\* نویسنده مسئول مکاتبات: nejati@shahroodut.ac.ir

### چکیده

### واژگان کلیدی

فیلترهای مشتقات افقی و قائم زاویه کجی به‌طور گسترده‌ای، با نمادهای  $(TDR)$  و  $(TDX)$  برای تفسیر داده‌های مغناطیسی استفاده می‌شوند. ما از ترکیب این فیلترها بصورت  $TDR-TDX$  و  $TDR+TDX$  که بر مبنای خواص توابع مثلثاتی و تعاریف اولیه هریک از این دو فیلتر برای طراحی یک لایه مقید کننده استفاده می‌کنیم که پنجره داده متحرک دی کانولوشن اوپلر را مقید به انجام عملیات داده برداری وسایر محاسبات لازم فقط بر روی این نقاط مشخص شده در لایه مقید کننده ( $Constraining Mask$ ) می‌کند. فیلتر  $TDR-TDX$  پیک‌های تیزی بالای مراکز منابع تولید می‌کند، در حالی که فیلتر  $TDR+TDX$  باعث ایجاد پهنه مسطح انومالی بر روی آن‌ها می‌شود. با توجه به رویکرد روش‌های قبلی که از فیلتر لاپلاسین یا سیگنال تحلیلی برای محدود کردن حرکت داده برداری پنجره واهم آمیخت اوپلر استفاده می‌کنند، ما راه‌حلی را برای پنجره‌های متمرکز در نقاطی که (۱) دارای مقادیر مثبت  $TDR-TDX$  هستند، و (۲) در فلات  $TDR-TDX$  موجود می‌باشند، محاسبه می‌کنیم. استفاده از هر دو معیار ضمن کاهش تعداد موارد نادرست، انتخاب نقاط مربوط به منبع را بهبود می‌بخشد. روش بیان شده در مدل‌های مصنوعی متفاوت با ویژگی‌های متفاوت فیزیکی بصورت عاری از نویز و هم بصورت الوده به نویز گوسی شکل و همچنین بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد یکی از زون‌های مهم ایران هم از لحاظ ساختاری و هم از نظر فعالیت‌های ماگمایی مورد آزمایش قرار دادیم. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از یک لایه فیلتر مقید کننده پنجره داده برداری در فرایند تخمین عمق واهم آمیخت اوپلر که مبتنی بر ترکیب گرادیان‌های قائم و افقی زاویه کجی می‌باشد، راه‌حلی تولید شده در فرایند تخمین عمق اوپلر را، نسبت به واهم آمیخت اوپلر معمولی و همچنین نسبت به روش  $ANEUL$ ، دارای تراکم و پیوستگی بسیار بالاتر، تشخیص دقیق‌تر مکان قرارگیری منابع مولد انومالی‌های میدان پتانسیل و همچنین یکی دیگر از ویژگی‌های مهم این روش حساسیت کمتر به نوفه‌ها دارند.

روش‌های میدان پتانسیل  
واهم آمیخت اوپلر  
مشتق زاویه تیلت  
بی‌هنجاری مغناطیسی

در چندین دهه گذشته چندین روش تفسیر نیمه اتوماتیک برای پردازش و تفسیر مجموعه داده‌های میدان پتانسیل ارائه شده است. روشی که اغلب استفاده می‌شود، روش واهم آمیخت اوپلر است که توسط تامپسون (۱۹۸۲) معرفی شده و به داده‌های مغناطیسی گریدبندی شده توسط رید و همکاران (۱۹۹۰) عمومیت داده شده است (Reid et al., 1990). اولین الگوریتم‌های واهم آمیخت اوپلر از یک پنجره متحرک استفاده می‌کنند که کل مجموعه داده را اسکن می‌کند تا عمق را تخمین بزند و معمولاً تعداد زیادی از حل‌های نادرست را به همراه سایر نقاط تولید می‌کند. کاربرد موفقیت‌آمیز واهم آمیخت اوپلر به عوامل موثری از جمله جداسازی موثر حل‌های معنی‌دار (معرف یک ویژگی زمین‌شناسی) از حل‌های غیرفیزیکی که در واقع هیچگونه منشأ زمین‌شناسی در ساختارهای زمینی مورد مطالعه ندارند، در کنار فاکتورهای دیگری از جمله انتخاب مناسب شاخص ساختاری و ابعاد پنجره متحرک بستگی دارد. تامپسون (۱۹۸۲) اولین معیار پذیرش برای راه‌حل‌های معنی‌دار را پیشنهاد می‌کند که در آن عمق‌های تخمین زده شده در ابتدا نرمال‌سازی می‌شوند و با در نظر گرفتن میزان درصد خطای استاندارد برای هر یک از آن‌ها، هر کدام از عمق‌های بدست آمده که خارج از بازه‌ی این میزان از خطای استاندارد قرار داشته باشند، متعاقباً حذف خواهند شد (Thompson, 1982). همچنین باربوسا و همکاران (۱۹۹۹) پیشنهاد کردند راه‌حلی که نرم‌های باقیمانده آن‌ها کمتر از بیشینه مقادیر از پیش تعریف شده برای آن‌ها می‌باشند نیز حذف خواهند شد (Barbosa et al., 1999). در هر دو معیار پارامترهای مناسب با آزمون و خطا انتخاب می‌شوند و هیچکدام از آن‌ها بصورت اتوماتیک و خودکار قادر به بررسی اصالت حل‌های تولید شده برای عمق توده‌ها و ساختارهای زیر سطحی نمی‌باشند.

همچنین فیتزجرالد و همکاران (۲۰۰۴) یک لیست جامع از معیارهای پذیرش مرتبط با یکدیگر را ارائه دادند (FitzGerald et al., 2004). فیرهید و همکاران (۱۹۹۴) روش دیگری را مطرح کردند، که واهم آمیخت اوپلر را در مناطقی محاسبه می‌کند که مشتق افقی کل به جای حذف راه‌حل‌های نادرست در یک مرحله پس از پردازش، حداکثر باشد (Fairhead et al., 1994). از آنجا که فقط یک منطقه خاص از ناهنجاری مورد واکاوی قرار خواهد گرفت، بنا براین تعداد راه‌حل‌های نادرست و هزینه محاسباتی کاهش می‌یابد (Silva and Barbosa, 2003). سیلوا و باربوسا (۲۰۰۳) پیشنهاد دادند که نقاطی که دارای اصالت منبع هستند (به این معنی که یک عامل فیزیکی سبب تولید آنومالی ناشی از آن توده زیر سطحی بوده) با استفاده از برآوردهای تحلیلی برای موقعیت منبع افقی و عمودی مشخص شود. بعد از آن، ملو و همکاران (۲۰۱۳) یک الگوریتم واهم آمیخت اوپلر را به کار گرفتند که از این برآوردها استفاده می‌کند. آن‌ها رگرسیون چند جمله‌ای و آنالیز خوشه‌ای را برای انتخاب بهترین راه‌حل برای هر منبع ایجاد کننده ترکیب کردند (Melo et al., 2013).

همچنین روش فیرهید و همکاران (۱۹۹۴) توسط سانتوس و سوزا (۲۰۰۳)

و کاتالان و مارتین داویلا (۲۰۰۳) از طریق واهم آمیخت اوپلر مکانی مجدداً مورد بررسی قرار گرفت، که از ایده‌ی تعیین بیشینه‌های دامنه‌ی سیگنال تحلیلی برای انتخاب مکان پنجره‌ها به منظور تولید حل‌های با منابع واقعی استفاده می‌کند. این روش به طور گسترده‌ای در تفسیر داده‌های صحرایی اعمال شده است (Ebbing et al., 2007; Aziz et al., 2013; Ruppel et al., 2018; Olesen et al., 2004). شایان ذکر است که ادغام انتگرال دامنه سیگنال تحلیلی *ASA* و دی‌کانولشن اوپلر مدت‌هاست که در کارهای پژوهشی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین این تکنیک‌ها ممکن است با تصحیحاتی از معادلات اوپلر ترکیب شوند (Roest et al., 1992; Pawlowski et al., 1995; Reid, 1995). اگرچه باید در نظر گرفت که *ASA* از یک میدان پتانسیل، هارمونیک نیست (Blakely, 1996) و این فرضی است که غالباً در محاسبه‌ی مشتق عمودی استفاده می‌شود (Miller, H. G., & Singh, V. 1994). با وجود پیشرفت در تخمین عمق چشمه آنومالی‌های زیر سطحی توسط واهم آمیخت اوپلر ابتدایی، عزیز و همکارانش (۲۰۱۳) (Aziz, A, et al., 2013) با اشاره به اینکه اوپلر مکانی به دلیل تطابق نادرست بین مراکز منابع و حداکثر مقادیر *ASA*، که تحت تاثیر مشتق عمودی با محتوای بالای نویز و تداخل بین منابع قرار دارد، نتایج نادرست با درصد بالایی از عدم قطعیت را ایجاد می‌کند.

در طول مطالعات مختلفی روش واهم آمیخت اوپلر به منظور تخمین عمق منابع زیر سطحی مورد توجه محققان قرار گرفته است و تکنیک‌هایی برای فیلتر کردن حل‌های قابل اعتماد و دارای منشأ فیزیکی بدست آمده توسط روش اوپلر پیشنهاد شده است. یکی از ایده‌های هوشمندانه به منظور جانمایی دقیق حل‌های معادله اوپلر و همچنین تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی استفاده از روش‌های لبه‌یابی و یا افزایش شدت آنومالی و بالا بردن وضوح مکانی آنومالی‌های موجود می‌باشد.

(Salem and Ravat, 2003; Keating and Pilkington, 2004; Eshaghzadeh et al., 2018; Pham et al., 2021) اگر فیلتر تقویت کننده دامنه میدان‌های اندازه‌گیری شده، تعیین مکان دقیق چشمه‌های آنومالی را به درستی به انجام نرساند، روش‌های مختلف واهم آمیخت اوپلر با پنجره‌های هدایت متحرک ممکن است از منابع غافل شوند یا عمق آن‌ها را با خطای بالایی ارزیابی کنند.

در کشور ما نیز مطالعات بسیاری با استفاده از انواع روش‌های کمی و کیفی از جمله حالت‌های گوناگون روشن تخمین عمق واهم آمیخت اوپلر ۳ بعدی نیز به منظور اکتشاف انواع کانسارها انجام شده که عمده آن‌ها به نتایج قابل قبولی رسیده‌اند. علمدار و همکاران (۱۳۸۸) با تلفیق دو روش اوپلر دی-کانولشن و سیگنال تحلیلی به تخمین بهتری از شاخص ساختاری دست یافتند و همچنین علمدار و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از سیگنال تحلیلی و اوپلر عمق و نوع توده‌های مولد بی‌هنجاری مغناطیسی را در معدن سنگ آهن مرکزی ایران (باقی) بررسی کردند (علمدار و همکاران، ۱۳۸۸؛ علمدار و همکاران، ۱۳۹۱).

موسی پور و اردستانی (۱۳۹۷) از دو روش اوپلر استاندارد و ترکیب سیگنال

بصورت کاملاً متقاطع باشد، بطوریکه تقریباً همگی دایک‌ها حداقل یکبار یکدیگر را قطع نمایند. هدف اصلی از نحوه‌ی جانمایی دایک‌های منشوری به منظور ایجاد تداخل در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی میدان مغناطیسی تولید شده توسط آن‌ها می‌باشد. بدین‌گونه میتوان با استفاده از این مدل مصنوعی، کارایی و توانایی روش مورد استفاده را در وضعیت‌های دشوار مراحل تفسیر کمی داده‌ها (تغییرات عمقی دایک‌ها، متقاطع بودن دایک‌ها و تداخل پاسخ‌های میدان ناشی از آن‌ها)، را تحت شرایط استاندارد مورد سنجش و ارزیابی کامل قرار گیرد. داده‌های میدانی مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های مغناطیس هوابرد برداشت شده در خلال سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۶ توسط شرکت آیروسرویس (Aeroservice) با فاصله‌ی خطوط برداشت ۷/۵ کیلومتر و بعضاً بسته به شرایط محیطی در بعضی مناطق با فواصل کمتر برداشت شده است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های مربوط به زون مرکزی بلوک لوت که حاوی ساختارهای خطی و گسل‌های عمیق قابل توجهی می‌باشند، استفاده شده است.

## ۲- تشریح مفاهیم و مبانی ریاضیات روش مورد مطالعه

همانطور که در بخش قبل نیز ذکر شد روش پیشنهادی، ترکیبی از فیلترهای مشتق عمودی و افقی زاویه کجی است که گرادیان افقی و قائم تابع میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده که بطور مثال با  $f$  نمایش داده می‌شود، برابر با مقادیر زیر خواهد بود (Miller and Singh, 1994; Cooper and Cowan, 2006).

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

$$VDR(f) = \frac{\partial f}{\partial z} \quad (2)$$

با استفاده از ویژگی‌های عملگر  $x = \text{Arc tan } y$  کاملاً قابل تشخیص می‌باشد که هر دو رابطه‌ی بالا یعنی معادلات (۱،۲) و (۲،۲) در بازه‌ی  $[-\pi/2, \pi/2]$  دارای مقادیر یکسانی خواهند بود. بنابراین ویژگی معادلات ذکر شده و استفاده از خاصیت‌های عمگر آرک تانژانت خواهیم داشت:

$$y = \tan x \quad x = \text{Arc tan } y \quad (3)$$

$$x \in [-\pi/2, \pi/2], \quad y \in \mathcal{R}$$

همچنین با در نظر گرفتن رابطه‌ی  $|\text{Arc tan } (x)| = \text{Arc tan } (|x|)$  خواهیم داشت:

تحلیل و اوپلر استاندارد ( $RDAS$ ) برای تخمین عمق داده‌های گرانی ناشی از توده‌ی هماتیت، واقع در استان کرمان، استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل شده، جواب‌های اوپلر  $RDAS$  در مقایسه با اوپلر استاندارد انطباق بیشتری با محل آنومالی‌ها دارد و همچنین برای هر آنومالی، جواب‌ها در بازه‌ی قائم کوچک‌تری قرار دارند (موسی پور و اردستانی، ۱۳۹۷).

در این مطالعه ما با ارائه یک روش کارآمد و با دقت بالاتر در تعیین محل منشأ آنومالی‌ها نسبت به روش اوپلر مکانی برای داده‌های مغناطیس‌سنجی محل قرارگیری و عمق چشمه‌های آنومالی مغناطیسی مربوط به ویژگی‌های زمین‌شناسی را تعیین خواهیم کرد. در این روش با استفاده از مفهوم زاویه کجی و گرادیان‌های آن در راستاهای افقی ( $TDX$ ) و قائم ( $TDR$ ) نقاطی حاصل می‌شوند که روش اوپلر و پنجره متحرک آن تنها محدود به اندازه‌گیری و تخمین عمق مربوط به این نقاط خواهند شد. (Miller and Singh, 1994; Cooper and Cowan, 2006). به عبارت دیگر در حالت اول از ترکیب گرادیان‌های فیلتر زاویه کجی که دو گرادیان از یکدیگر تفریق می‌شوند، با حاصل شدن مجموعه‌ای از آنومالی‌های میدان مغناطیسی روش اوپلر ملزم به محاسبه و تخمین عمق‌های مربوط به چشمه‌های آنومالی قرار گرفته فقط در این مناطق خواهد بود. از طرفی حالت دوم ترکیب گرادیان‌های فیلتر زاویه کجی که حاصل جمع آن‌ها می‌باشد بطور واضح نشان دهنده‌ی منطقه اثر آنومالی‌های شدت میدان مغناطیسی خواهد بود و به عبارتی پهنه‌های آنومالی مغناطیسی را نمایش خواهد داد که با برچیدن و حذف اثرات ناشی از متفاوت بودن عمق قرارگیری چشمه‌های آنومالی محدود اثر آنومالی شدت میدان مغناطیسی را نمایش می‌دهد. مناطقی که روش تخمین عمق اوپلر مقید به محاسبه و اندازه‌گیری عمق منابع مغناطیسی می‌باشند در حوالی پیک‌های  $TDR - TDX$  واقع شده‌اند (Castro et al., 2018). از آنجا که تشخیص و تفکیک منشأ پیک‌های تولید شده در این دو روش لبه‌یابی (منبع از نویز) آسان نیست، ما فقط نقاطی از  $TDR - TDX$  را انتخاب می‌کنیم که در پهنه‌های مشخص شده توسط ترکیب دیگری از فیلترها یعنی  $TDR + TDX$  قرار می‌گیرند. در ابتدا با استفاده از داده‌های مصنوعی مختلف در حالت عاری از نوفه و در شرایطی که پاسخ میدان اندازه‌گیری شده آلوده به درصد مشخصی از نوفه گوسی خواهد بود اعمال خواهیم کرد. در گام بعدی با اعمال روش بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی واقعی نشان می‌دهیم که این روش قادر به انتخاب راه‌حلی از راه‌های آمیخت اوپلر است که به وضوح به منابع مسبب تولید آنومالی مربوط هستند و همچنین تعداد راه‌حل‌های نادرست را به میزان قابل توجهی کاهش خواهد می‌دهد. برای میزان کارایی و انجام یک ارزیابی استاندارد در کنار اعمال روش مورد نظر فیلتر سیگنال تحلیلی را نیز استفاده نموده و نتایج حاصل از تخمین عمق روش معرفی شده را با نتایج حاصل از تخمین عمق منابع مغناطیسی مولد آنومالی‌ها، بوسیله روش  $AN-EU$  نیز محاسبه و تعیین گردید. لازم به ذکر است که مدل‌های مصنوعی تولید شده کاملاً هدفمند انتخاب گردیده‌اند. به نحوی که سعی شده تا با قرار دادن دایک‌های زیر سطحی در عمق‌های مختلف و همچنین با انتخاب زوایای مناسب، موقعیت قرارگیری دایک‌ها نسبت به یکدیگر

$$\Delta = \phi \implies \begin{aligned} \cot(|TDR|) &= \tan(TDX) \\ \cot(|TDR|) & \\ -\tan(TDX) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

در این مرحله با توجه به رابطه و تعریف ابتدایی توابع مثلثاتی تانژانت و کتانژانت و با بکارگیری روابط تبدیل جمع به ضرب توابع مثلثاتی رابطه قبل را بسط داده و بصورت زیر نمایش داده خواهد شد:

$$\begin{aligned} \frac{\cos(|TDR|) - \sin(TDX)}{\sin(|TDR|) - \cos(TDX)} & \\ = \frac{\cos(|TDR|) \cos(TDX) - \sin(TDX) \sin(|TDR|)}{\sin(|TDR|) \cos(TDX)} & \quad (8) \\ = 0 & \end{aligned}$$

حاصل کسر بالا برابر است با:

$$\frac{\cos(|TDR| + TDX)}{\sin(|TDR|) \cos(TDX)} = 0 \quad (9)$$

برای حل این معادله همگن باید صورت کسر را برابر با مقدار صفر قرار دهیم:

$$\text{If } ; \cos(|TDR| + TDX) = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Then } ; |TDR| + TDX &= \frac{\pi}{2} \text{ or } \pi + \frac{\pi}{2} \\ |TDR| &= \frac{\pi}{2} - TDX \end{aligned} \quad (11)$$

بنابراین در نهایت با حل رابطه‌ی قبل خواهیم داشت:

$$|TDR| = \pi/2 - TDX = \begin{cases} TDR - TDX = -\pi/2, & \text{if } TDR > 0 \\ TDR + TDX = \pi/2, & \text{if } TDR < 0 \end{cases} \quad (12)$$

به منظور تفسیر نتایج بدست آمده از اعمال فیلتر مشتق زاویه‌ی تیلت، همیشه در محل وجود منابع مولد آنومالی ما دارای مقادیر مثبت و بیشینه

$$\begin{aligned} |TDR| &= \text{Arctan} \left( \frac{\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|}{\sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}} \right) \\ &= \text{Arc cot} \left( \frac{\sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}}{\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

معرف مشتق کل قائم زاویه کجی یا زاویه تیلت TDR که در این رابطه که در  $\text{Arc tan}(x)$  می‌باشد. با اعمال دوباره‌ی ویژگی جابجایی عملگر معادله (۴،۲) بصورت تساوی زیر تعریف می‌شود:

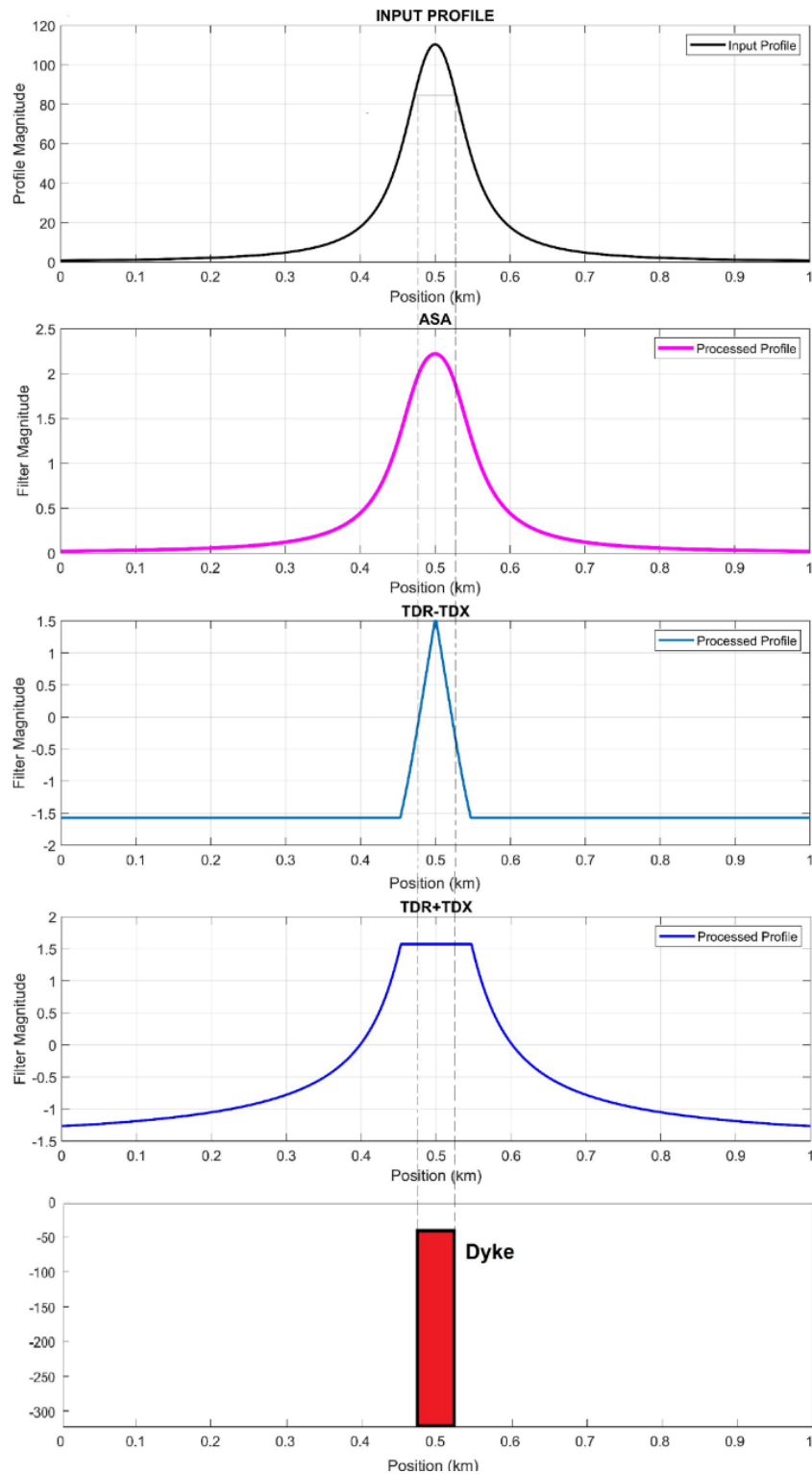
$$\Delta = \left( \frac{\sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}}{\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|} \right) = \cot(|TDR|) \quad (5)$$

با این وجود بنابراین برای مشتق افقی کل زاویه تیلت خواهیم داشت:

$$TDX = \text{Arc tan} \left( \frac{\sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}}{\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|} \right) \quad (6)$$

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

همانطور که قبلاً اثبات کردیم مشتق قائم کل و مشتق افقی کل زاویه تیلت یعنی کمیات TDR, TDX در بازه‌ی  $[-\pi/2, \pi/2]$  باهم برابر خواهند بود پس:



شکل ۱: نمایش پاسخ اعمال فیلترهای مختلف بر روی یک عارضه دایکی شکل که بصورت یک برش عرضی نشان داده شده است. به ترتیب از بالا به سمت پایین همانطور که در بالای هر منحنی دو بعدی ذکر شده است ابتدا پاسخ میدان مغناطیسی TMI بر روی یک برش عرضی دایک مورد نظر محاسبه و نمایش داده شده است در نمودار دوم نتایج حاصل از اعمال فیلتر TDR-TDX نشان داده شده است و نمودار سوم نیز تغییرات حاصل از اعمال فیلتر TDR+TDX بر روی مقطع عرضی مورد نظر که در مرکز آن یک دایک قائم حضور دارد نشان داده شده است.

دامنه آنومالی خواهیم بود (Miller and Singh, 1994). همچنین اعمال فیلتر  $TDR + TDX$  تولید پهنه های مسطحی در دامنه  $+\frac{\pi}{2}$

### ۳- طراحی فرایند مقیدسازی واهم آمیخت اوپلر

یکی از روش‌های سریع برای تفسیر داده‌های میدان پتانسیل روش اوپلر واهم آمیخت است؛ که به راحتی می‌تواند تخمین صحیحی از عمق بی‌هنجاری مورد نظر ارائه دهد. اساس این روش بر مبنای معادلات دیفرانسیل جزئی اوپلر بنا شده است، که با معرفی کمیتی به نام شاخص ساختاری می‌توان موقعیت توده‌ها را به کمک اندازه‌گیری میدان پتانسیل روی یک پروفیل (حالت دو بعدی) یا نقشه (حالت سه بعدی) به وسیله‌ی تقسیم آن‌ها به پنجره‌های اندازه‌گیری متوالی به دست آورد. از مزیت‌های این روش تخمین عمق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (الف) در هر موقعیت و عرض جغرافیایی کاربرد دارد، (ب) عدم نیاز به در اختیار داشتن اطلاعات اولیه مانند پارامترهای مغناطیسی‌شدگی توده نیاز ندارد، (ج) در فرایند پردازش داده‌ها از هیچ مدل زمین‌شناسی خاص استفاده نمی‌شود. (Reid et al., 2014),

روش تخمین عمق اوپلر اولین بار توسط هود (۱۹۶۳) ارائه شد. تامپسون (۱۹۸۲) و رید (۱۹۹۰) از این روش به ترتیب در حالت دو و سه بعدی، استفاده نمودند (Reid et al., 2014; Thompson, 1982). در سال ۱۹۹۱ کلینگل و همکاران نخستین بار این روش را برای داده‌های گرانی به کار بردند. در سال ۲۰۰۱ ماشایاندیو و همکاران با حذف شاخص ساختاری از معادله‌ی اوپلر دی‌کانولوشن، روش مذکور را بسط داده و آن را اوپلر دی‌کانولوشن تعمیم‌یافته نام نهادند. هانسن (۲۰۰۲) روش اوپلر را برای تعداد چشمه‌های بیشتر در آن واحد تعمیم داد. علمدار و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از تلفیق دو روش اوپلر دی‌کانولوشن و سیگنال تحلیلی به تخمین بهتری از شاخص ساختاری دست یافتند.

تابع  $f(v)$  که تابعی از متغیرهای  $(v_1, v_2, v_3, \dots)$  است، تابع همگن از درجه  $n$  است؛ هرگاه داشته باشیم:

$$f(tv) = t^n f(v) \quad (13)$$

$t$  یک عدد حقیقی است. اگر تابع  $f$  نسبت به  $v$  مشتق‌پذیر باشد، آنگاه رابطه زیر را معادله‌ی اوپلر می‌نامند:

$$\nabla \nabla f_v(V) = n f(V) \quad (14)$$

اگر  $f$  تابعی از  $(x, y, z)$  باشد، آنگاه روابط (۱۳) و (۱۴) بر حسب متغیرهای  $(x, y, z)$  به شکل زیر بازنویسی می‌شود (۱۹):

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad (15)$$

اثر گرانی یا مغناطیسی اشکال مختلف هندسی را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت:

در محل مرکز منشأ آنومالی‌ها خواهد کرد. این در حالی است که پهنه‌های مسطح آنومالی تولید شده در  $TDR - TDX$  دارای دامنه  $\frac{\pi}{2} -$  از مرکز چشمه‌های مولد آنومالی خواهد بود که به تعبیری مرکز نقشه آنومالی تولیدی از اعمال این فیلتر دقیقاً مرکز آنومالی را نمایش خواهد داد. برای این هدف اقدام به تولید یک بررسی جامع بر روی مدل دو بعدی و اعمال فیلترهای مورد نظر بر روی آن خواهیم کرد. در شکل (۱) که معرف مدل دو بعدی از یک دایک قائم با پهنای عرضی ۵۰ متر که در عمق ۵۰ متری نسبت به سطح زمین در زیر سطح قرار داده شده است. مقدار خودپذیری مغناطیسی برای این دایک قائم عدد ۰,۰۲۷۵ واحد SI در نظر گرفته شده و کمیت‌های شدت میدان مغناطیسی کل، سیگنال تحلیلی، و فیلترهای  $TDR+TDX, TDR-TDX$  نیز برای این مدل دو بعدی محاسبه و نمایش داده شده‌اند. در ارتباط با تاثیر حضور نویزها در دو فیلتر پیشنهادی این نکته قابل ذکر است که احتمال آلوده شدن بوسیله نویزها در هر دو فیلتر امکان‌پذیر است، اما فیلترهای ارائه شده دارای خاصیتی است که سبب برتری روش مذکور در خصوص میزان تاثیر نوفه‌های تصادفی و قابل تشخیص بودن یا نبودن آن‌ها نسبت سایر روش‌های سابق می‌گردد. بر طبق مدل نمایش داده شده در شکل (c.1) پاسخ کمیت اندازه‌گیری شده بصورت یک پهنه‌ی مسطح (Plateau) آنومالی در نمودار و نقشه حاصله پدیدار می‌شود که وجود این نواحی بستگی مستقیم به وجود ساختارها و ویژگی‌های زمین‌شناسی دارد و موقعیت مکان قرارگیری این نواحی دقیقاً بر روی مختصات مکانی توده‌های مولد خود خواهد بود. این در حالی است که نمود نوفه‌های گوسی و تصادفی در آنومالی‌های میدان مغناطیسی و سایر میدان‌های اندازه‌گیری شده بصورت کاملاً تیز و با محتوای فرکانسی بسیار بالاتر از حد زمینه است و به همین علت به وضوح قابل تشخیص می‌باشند.

با دقت در شکل ۱ قابل مشاهده است که بخش‌هایی از نمودارهای حاصل از اعمال هر یک از فیلترها و همینطور منحنی شدت میدات مغناطیسی کل TMI ناشی از دایک قائم، توسط خط‌چین‌های با رنگ مشکی احاطه شده‌اند. با دقت به منحنی حاصل از اعمال فیلتر  $TDR-TDX$  که در پنل سوم از شکل (۱) نمایش داده شده است، در خواهیم یافت که مقادیر مثبت این ارائه دهنده‌ی محل منابع زیر سطحی می‌باشند و به تعبیری محل تقاطع مرزهای دایک مفروض با نقطه دارای مقدار صفر از فیلتر مزبور نشان دهنده‌ی لبه‌های منابع و آنومالی میدان پتانسیل خواهند بود. از آنجایی که فیلتر  $TDR+TDX$  محدوده اثر میدان و پهنه‌ی مسطحی (Plateau) از آنومالی ناشی از توده یا ساختارهای زمین‌شناسی را ارائه می‌دهد کاملاً بدیهی است که نتایج حاصل از اعمال  $TDR-TDX$  در مقایسه با منحنی حاصل از اعمال فیلتر  $TDR+TDX$  موقعیت قرارگیری و پارامترهای مکانی اجسام زیرزمینی را با در بازه‌ی مکانی به مراتب محدودتر نمایش می‌دهد.

جدول ۱: شاخص ساختاری معادله اویلر برای مدل‌های ساده زمین شناسی (Reid A, 1995)

شاخص ساختاری	میدان مغناطیسی	میدان گرانشی
۰	کنتاکت	دایک و سیل
۱	دایک و سیل	استوانه افقی و قائم
۲	استوانه افقی و قائم	کره یا دوقطبی نقطه ای
۳	کره یا دوقطبی نقطه ای	-----

برای به دست آوردن چهار مجهول  $B$  و  $Z_0$  و  $Y_0$  و  $X_0$  ابتدا یک پنجره با پهنای مناسب انتخاب می‌شود. این پنجره روی داده‌های دوبعدی و یا سه‌بعدی به حرکت در می‌آید (Stavrev, P. Y., 1997) (شکل ۲). در هر پنجره، معادله اویلر با استفاده از داده‌های درون پنجره حل می‌شود. اگر فرض شود در هر پنجره  $n$  داده وجود دارد، می‌توان رابطه (۱۸) را در هر پنجره به صورت رابطه (۱۹) نوشت (Reid A, 1995).

$$N \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta T_1}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_1}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \Delta T_2}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_2}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$x \frac{\delta f(x,y,z)}{\delta x} + y \frac{\delta f(x,y,z)}{\delta y} + z \frac{\delta f(x,y,z)}{\delta z} = n f(x,y,z) \quad (16)$$

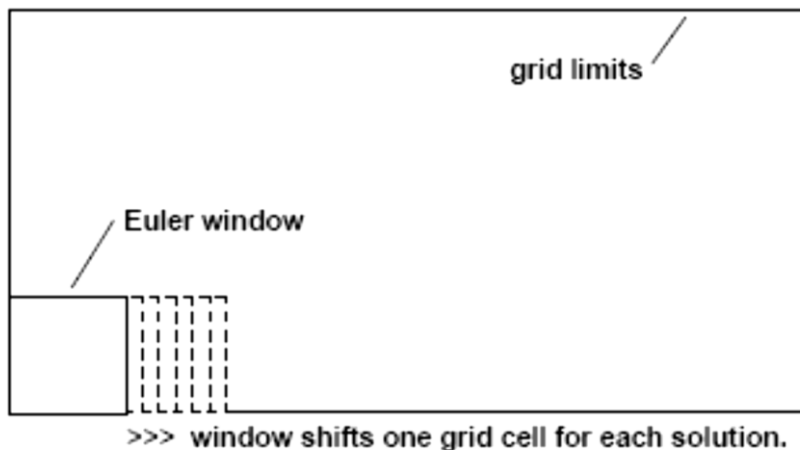
در این رابطه  $a$  مقدار ثابت،  $r$  فاصله توده تا نقطه‌ی اندازه‌گیری و  $f$  داده‌های میدان پتانسیل گرانی و مغناطیس است. طبق رابطه (۱۷)، میدان‌های گرانی و مغناطیس تابعی همگن از درجه  $-N$  هستند، که با توجه به شرایط هندسی چشمه‌ی پتانسیل، می‌توان  $N$  را تغییر داد. تامپسون (۱۹۸۲) نشان داد که معادله اویلر را برای داده‌های میدان پتانسیل می‌توان به صورت زیر نوشت (Thompson, 1982).

$$f = \frac{a}{r^N} \rightarrow F = ar^{-N} \equiv ar^n \Rightarrow n = -N \quad (17)$$

در این رابطه  $a$  مقدار ثابت،  $r$  فاصله توده تا نقطه اندازه‌گیری و  $f$  داده‌های میدان پتانسیل گرانی و مغناطیس است. طبق رابطه (۱۷)، میدان‌های گرانی و مغناطیس تابعی همگن از درجه  $-N$  هستند؛ که با توجه به شرایط هندسی چشمه‌ی پتانسیل، می‌توان  $N$  را تغییر داد. تامپسون (۱۹۸۲) نشان داد که معادله اویلر را برای داده‌های میدان پتانسیل می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$x_0 \frac{\delta f}{\delta x} + y_0 \frac{\delta f}{\delta y} + z_0 \frac{\delta f}{\delta z} + NB = x \frac{\delta f}{\delta x} + y \frac{\delta f}{\delta y} + z \frac{\delta f}{\delta z} + Nf \quad (18)$$

در این رابطه  $(X_0, Y_0, Z_0)$  موقعیت چشمه‌ی پتانسیل و  $(X, Y, Z)$  موقعیت نقطه‌ی اندازه‌گیری،  $B$  مقدار میدان ناحیه‌ای که به پارامتر متعادل‌کننده معروف است و  $N$  شاخص ساختاری که به هندسه توده بستگی دارد و بیانگر نرخ میرایی میدان پتانسیل نسبت به فاصله است.



شکل ۲: نمایش شماتیک نحوه جابجایی وسازوکار پنجره داده برداری در روش تخمین عمق واهم آمیخت اوپلر ۳ بعدی

اعمال روش‌های مورد نظر بر داده‌هایی که در شرایط محیطی برداشت شده‌اند و شامل تمام ویژگی‌ها و یا موانع سد کننده بر سر راه پردازش و تفسیر می‌باشند. بدین منظور ما با بازپردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد مربوط به نواحی جنوب شرق ایران که شامل مریند پلوتونیک و زون بخیه‌ای سیستان و همچنین شامل بخش‌های از ایالت حاوی واحدهای آتشفشانی ناشی از ماگماتیسم بلوک لوت. این مناطق بدلیل حوادث تکتونیکی اعمال شده در طول بازه‌های مختلف زمین‌شناسی و رخداد‌های فرورانش در فازهای مختلف و در زون‌های متعدد و به تبع آن ماگماتیسم شدید آن‌ها سبب شده که هم از لحاظ ویژگی‌های ساختاری و وجود گسل-های آشکار و مدفون متعدد و همچنین رخداد‌های کانی‌زایی بسیار غنی و قابل توجه محققان علوم زمین قرار گیرد. واهم آمیخت اوپلر با استفاده از یک پنجره به اندازه‌ی ۱۰ گرید نقطه بر داده‌ها اعمال شد، و از آنجایی که ساختارهای هدف ما دایک‌ها و ساختارهای خطی مانند گسل‌ها هستند، شاخص ساختاری برابر با یک است (Stavrev, P. Y., 1997).

#### ۱-۴ مدل مصنوعی

پارامترهای مربوط به دایک‌های بکار رفته شده در مدل مصنوعی اول در جدول شماره (۱) بطور کامل تشریح شده است. همچنین به منظور آزمودن روش مورد نظر از لحاظ مقدار حساسیت به آلوده شدن توسط نوفه‌های گوسی و از دست دادن میزان وضوح پاسخ میدان‌های اندازه‌گیری شده ناشی از آنومالی‌های زیر سطحی مدل مصنوعی دیگری را تولید نمودیم که همانند مدل اول پس از اعمال فیلتر و تخمین عمق منابع آنومالی‌ها توسط روش واهم آمیخت اوپلر مقید شده به مکان‌های تعیین شده توسط فیلترهای معرفی شده در این پژوهش، در نهایت با پاسخ‌های حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی هم در مورد افزایش وضوح و حذف اثرات ناشی از تغییرات عمقی و هم در خصوص مقادیر و تعداد حل‌هایی که با بکار بردن روش واهم آمیخت اوپلر مقید شده بر روی مکان‌های مشخص گردیده توسط فیلتر ASA مورد ارزیابی و مقایسه دقت عملکرد قرار خواهند

در اینجا  $N$  شاخص ساختاری برای دایک‌های نازک یک است. در این مرحله طراحی و نحوه اعمال یک قید محدود کننده، به منظور مقید کردن روش واهم آمیخت اوپلر و به عبارتی برچیدن تا حد امکان راه حل‌های نادرست تولید شده در عملیات تخمین عمق واهم آمیخت اوپلر ۳ بعدی را تشریح خواهیم کرد.

همانطور که به یاد داریم هدف از حل معادله‌ی واهم آمیخت اوپلر ۳ بعدی، یافتن مکان منبع  $(X_0, Y_0, Z_0)$  و محاسبه‌ی یک میدان ناحیه‌ای  $B$  با استفاده از مضمون حداقل مربعات خطا می‌باشد که همگنی معادله‌ی اوپلر را نیز ارضا خواهد کرد.

قید اعمال شده به روش اوپلر در حقیقت بصورت یک ماسک فیلتر عمل خواهد کرد که که نقاط مشخص شده به عنوان نواحی ماسک در نقش مراکز پنجره‌ی متحرک ذکر شده در روش اوپلر بازی می‌کنند.

نقاط تشکیل دهنده‌ی قید ماسک فیلتر برآمده از اعمال دو فیلتر پیشنهادی می‌باشند که این نقاط بطور همزمان دارای مقادیر مثبت در منحنی یا نقشه‌ی  $TDR - TDX$  و همینطور بطور تقریبی دارای مقدار  $+\pi/2$  در نتایج حاصله از فیلتر  $TDR + TDX$  باشند.

در این مرحله با بکارگیری یک روش تمام اتوماتیک و در نظر گرفتن پنجره-ی با ابعاد  $3*3$  بصورت متحرک که تمام نقشه  $TDR+TDX$  را اسکن نموده، پیک‌ها و دامنه‌های با طول موج بسیار کوتاه موجود در نقشه‌ی مذکور، که معرف نویزها یا نوفه‌های سفید می‌باشند را حذف خواهند شد.

#### ۴- نتایج و بحث

در این مطالعه روش ارائه شده را بر روی دو دسته از داده‌های مصنوعی ذکر شده در بخش مقدمه که هر یک با در نظر گرفتن آزمودن توانایی‌ها و کارایی روش پیشنهادی طراحی شده‌اند، مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. همچنین از داده‌های مغناطیس هوابرد برداشت شده در کشور به منظور



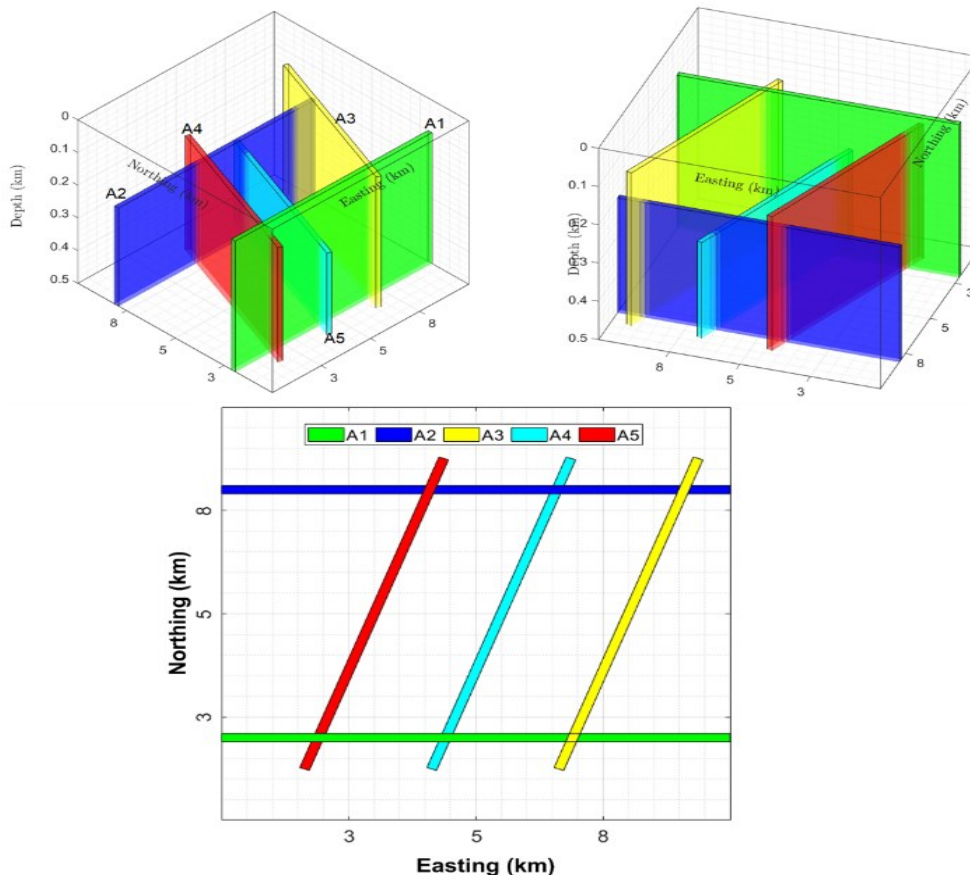
**نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۲، ۱۴۰۱.**

بر این، روش‌های تفسیر کمی مبتنی بر مدل‌های دایک و منشور مانند، می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند در تفسیر پروژه‌های اکتشافی از قبیل اکتشافات ذخایر هیدروکربنی و منابع معدنی نقش بسیار ارزشمندی را ایفا نماید (Dentith and Mudge, 2014).

اولین مدل مصنوعی تولید شده متشکل از ۵ منشور با جهت‌گیری‌های متفاوت و عمق‌های مختلف نسبت به یکدیگر است (شکل ۳). این مدل ۵ منشوری با عمق‌های مختلف با هدف شبیه‌سازی جهت‌گیری‌های مختلف ساختارهای مغناطیسی زمین‌شناسی و دایک‌های دارای این ویژگی با یکدیگر و یا سایر ساختارهای زمین‌شناسی با مفهوم مشابه بوده است (شکل ۳). داده‌های تولید شده در قطب‌های مغناطیسی تولید شده و دارای مقادیر زاویه میل  $I=90$  درجه و زاویه انحراف  $D=0$  درجه می‌باشد و تحت یک میدان مغناطیسی خارجی به شدت  $57000$  نانو تسلا قرار گرفته است (شکل ۶). همچنین مقدار خودپذیری مغناطیسی هر یک از آن‌ها عدد  $SI$   $0.0275$  پارامترهای هندسی اجسام در جدول ۲ ذکر شده است.

گرفت.

در نظر گرفتن مدل دایکی شکل ۱ و بطور کلی مدل‌های منشوری (Prismatic) (شکل ۳ و ۷) برای تجزیه و تحلیل داده‌های مغناطیسی دارای مزایا و کاربردهای وسیعی است که برخلاف اینکه شامل استفاده‌های بسیار خاص می‌باشد (McGrath and Hood, 1970) اما می‌توان آن را به طیف وسیعی از ساختارهای زمین‌شناسی دو بعدی قابل توجه تعمیم داد که در اغلب فرایندهای اکتشافی فارغ از نوع و تیپ هدف مورد اکتشاف، می‌توان آن را به طیف وسیعی از ساختارهای زمین‌شناسی تعمیم داد (McGrath and Hood, 1970). به عنوان مثال، همانطور که توسط نلسون (۱۹۸۸) نشان داده شده است، ورق نازک و مدل‌های متقاطع می‌توانند نشان دهنده و معرف یک مدل زمین ساختاری بصورت موارد محدود کننده‌ای از مدل دایک باشند (Nelson, 1988). علاوه



شکل ۳: موقعیت مکانی منشورهای دایک مانند در فضای ۳ بعدی (X,Y,Z پهنال بالا) و همچنین در صفحه مختصات (X,Y پهنال پایین) (به نحوه و تعداد قطع شدن منشورها (Crossover) و همچنین قرارگیری هر یک از این منشورهای دایک مانند در عمق‌های متفاوت از یکدیگر توجه شود)

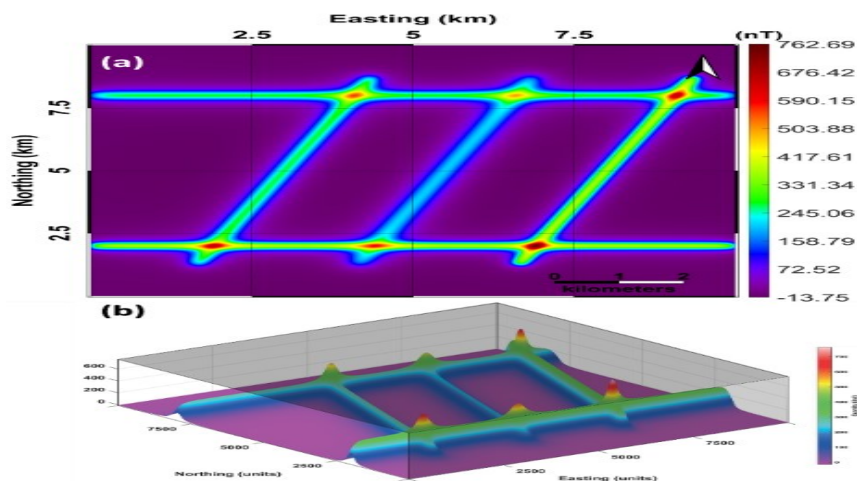
شیرانی و همکاران، بهبود دقت محاسبات در تعیین موقعیت فضایی (Spatial Locating) ساختارهای زمین‌شناسی مدفون، صفحات ۷۹-۱۰۵.

اندازه‌گیری شده و مقدار تاثیر اختلاف‌های عمقی بر روی پاسخ هریک از منشورها قابل مشاهده است (شکل ۵). در گام بعدی می‌خواهیم با استفاده از بیشینه مقادیر دامنه‌های اندازه‌گیری شده و با اعمال روش تخمین عمق اوپلر، روش‌های AN-EUL و روش ارائه شده در این پژوهش می‌باشد، را با یکدیگر مقایسه نموده است (شکل ۶).

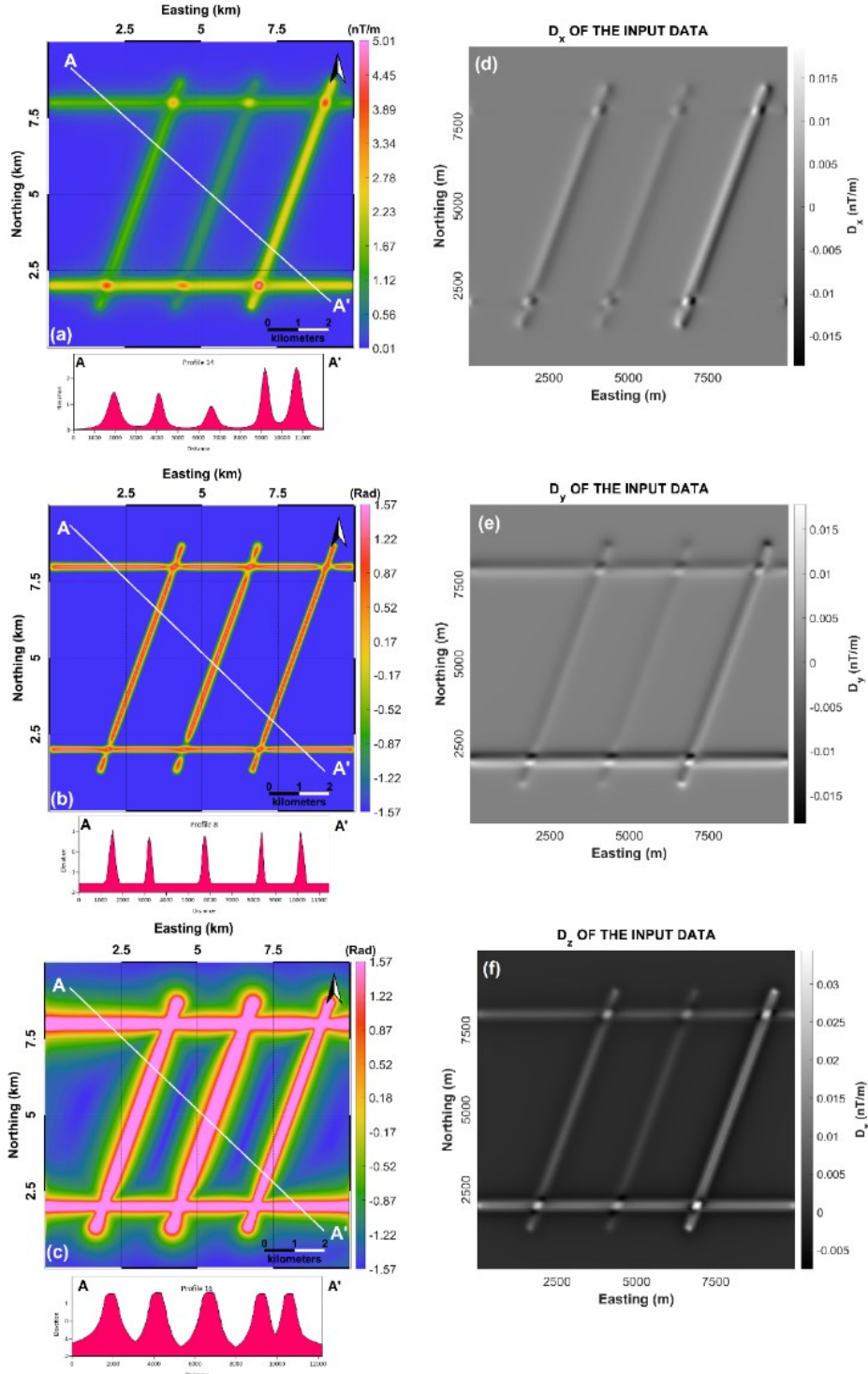
شکل ۴ شدت مغناطیسی کل (TMI) مدل نشان داده شده را نشان می‌دهد. در ادامه با اعمال فیلترهای مورد استفاده در این پژوهش نقشه‌های مربوط به تغییرات سیگنال تحلیل ASA بر روی منشورها و نتایج حاصل از اعمال فیلترهای TDR-TDX و TDX+TDR را در شکل ۵ به ترتیب نشان داده شده است. همچنین در این شکل علاوه بر نمایش نقشه‌های حاصل از فیلترها با انتخاب یک پروفیل که تمامی منشورها را قطع کرده و یک مقطع عرضی دو بعدی از میزات تغییرات شدت پاسخ‌های

جدول ۲: پارامترهای مکانی و موقعیت قرار گیری مدل‌های مصنوعی

پارامترهای هندسی	A1	A2	A3	A4	A5
طول (کیلومتر)	۱۰	۱۰	۸	۸	۸
عرض (کیلومتر)	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲
ضخامت (کیلومتر)	۵	۵	۵	۵	۵
X (کیلومتر)	۵	۵	۸	۵٫۵	۳
Y (کیلومتر)	۲	۸	۵	۵	۵
Azimuth (deg)	۹۰	۹۰	۲۰	۲۰	۲۰



شکل ۴: (a) مقدار شدت میدان مغناطیسی کل محاسبه شده برای منشورهای متقاطع با عمق‌های متفاوت (b) نمایش سه بعدی از شدت میدان محاسبه شده به منظور مشاهده دقیق‌تر و درک روشن‌تر از میزان تاثیر عمق‌های متفاوت در شدت میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده است.



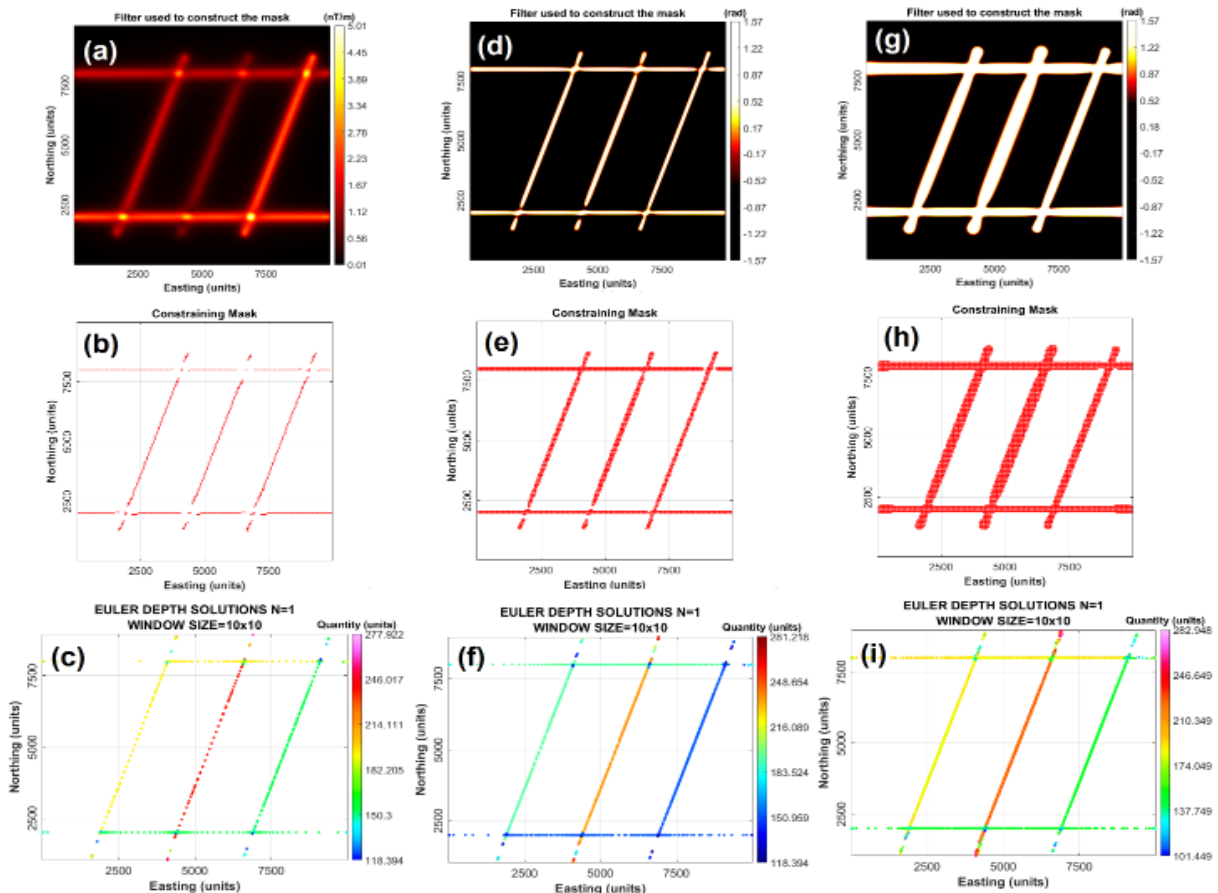
شکل ۵: (a) نقشه مقدار سیگنال تحلیلی محاسبه شده برای منشورهای متقاطع به همراه نمایش یک مقطع عرضی از پروفیل نمایش داده شده A-A' (b) نمایش نقشه حاصل از اعمال فیلتر TDR-TDX به همراه مقطع عرضی از پروفیل مذکور (b) نقشه حاصل از بکار بردن فیلتر TDR+TDX به همراه مقطع عرضی از پروفیل انتخابی مشتقات میدان مغناطیسی تولید شده در راستاهای افقی و قائم

عنوان انجام فرایند اعمال فیلترها بر روی داده‌های شدت میدان مغناطیسی و تعیین نقاط دارای بیشینه مقدار دامنه پاسخ در هر نقشه و انجام عملیات تخمین عمق اوپلر منتها با این قید که این عملیات تنها بر روی نقاط تعیین

در شکل ۶ تمام نقشه‌هایی که نمایش داده شده معرف مراحل گام به گام مقیدسازی تخمین عمق داده‌های میدان پتانسیل روش تخمین عمق اوپلر با استفاده از روش های مذکور است که ابتدا با برداشتن گام نخست با

بی‌هنجاری‌ها فارغ از تفاوت‌های عمق که دارند به میزان بهتر و آنومالی‌های قوی‌تری آشکار می‌کنند. عامل کارایی بهتر در آشکارسازی منابع آنومالی‌ها به دلیل قرارگیری نقاط مشخص شده به عنوان فیلتر مقیدکننده (Constraining Mask) دقیقاً در بالای عوامل ایجاد کننده‌ی آن‌ها شناسایی می‌شوند (شکل ۶).

شده به عنوان (Constraining Mask) که در هر دو روش مورد استفاده این نقاط به عنوان موقعیت تعیین شده برای منابع آنومالی هستند (شکل ۶). ما الگوریتم پیک یاب پیشنهاد شده توسط بلیکلی و سیمپسون (۱۹۸۶) را روی نقشه ASA با اعمال فیلتر هنینگ می‌کنیم. در مورد این مدل مصنوعی، هر دو روش راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر را تولید می‌کنند که محدود به مناطقی می‌باشند که معرف منابع ایجاد کننده آنومالی‌ها است. اما در محل منشورهای عمیق‌تر روش ارائه شده نسبت به روش ANEUL تراکم بیشتری از نقاط حل‌های حاصله از معادله اوپلر تولید می‌کند (شکل ۶). پروفیل‌های شکل ۵ نشان می‌دهد که پیک‌های تولید شده با شیب‌های تند (شکل b ۵) و مناطق مسطح تولید شده (شکل c ۵)



شکل ۶: نقشه‌ی مراحل انجام فرایند اعمال فیلترهای مورد نظر، تعیین نقاط پیشینه‌ی مربوط به هر یک از فیلترهای اعمال شده، تعریف ابعاد پنجره متحرک و اندیس ساختاری اجسام و مشاهده‌ی نتایج جایجا شدن پنجره متحرک به وسیله‌ی راه‌حل‌های تولید شده در نتیجه‌ی اعمال روش تخمین عمق واهم آمیخت اوپلر ۳ بعدی (داده‌های مربوط به مدل مصنوعی حاوی ۱۰ درصد نوفه گوسی می‌باشد). (a) اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی مدل مصنوعی مورد نظر ASA، (b) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی مدل مصنوعی و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اوپلر (Constraining Mask)، (c) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر ۳ بعدی با استفاده از روش AN-EUL، (e) اعمال فیلتر TDR-TDX بر روی مدل مصنوعی مورد نظر ASA، (f) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر TDR-TDX بر روی مدل مصنوعی و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اوپلر (Constraining Mask)، (g) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر ۳ بعدی با استفاده از روش TDR-TDX، (h) اعمال فیلتر TDR+TDX بر روی مدل مصنوعی مورد نظر ASA، (i) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر TDR+TDX بر روی مدل مصنوعی و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اوپلر (Constraining Mask)، (j) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر ۳ بعدی با استفاده از روش TDR+TD

**نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۲، ۱۴۰۱.**

حالی که چند نقطه بدون ریشه واقعی از منابع مولد آنومالی متناسب با عمق کمترین سطح را تولید می‌کند. در مقابل، نقاط بوجود آمده از اعمال روش سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های شدت میدان مغناطیسی که همان نقاط موجود در فیلتر ماسک کننده می‌باشند (Constraining Mask)، نه-تنها شامل نقاط حاصل از منابع مولد آنومالی‌ها می‌باشند، بلکه تعداد بیشماری از نقاط که منتسب به نوفه‌های گوسی می‌باشند و دارای هیچگونه ریشه از چشمه‌های آنومالی واقعی نیستند را شامل می‌شود. این نقاط مقیدکننده سبب خواهد شد که حل‌های تخمین عمق اعمال شده را احاطه کنند که توسط ابر متراکمی از راه‌حل‌های غیر واقعی احاطه شده‌اند. راه‌حل‌های نادرست همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، می‌توانند بدون تاثیر بر راه‌حل‌های مربوط به ساختارها یا منابع واقعی آنومالی حذف و برچیده شوند. با این حال، در موقعیت‌هایی که راه‌حل‌های مربوط به منبع واقعی دارای فواصل عمق مشابه با نویزهای تصادفی هستند مانند منابع کم‌عمق، ممکن است که با درصد احتمال بسیار بالا به اشتباه با تخمین عمق آنومالی‌های ناشی شده از نویزهای تصادفی اشتباه شوند و متعاقباً عمق این نویزها بجای عمق قرارگیری منابع واقعی با عمق کم تخمین زده شوند.

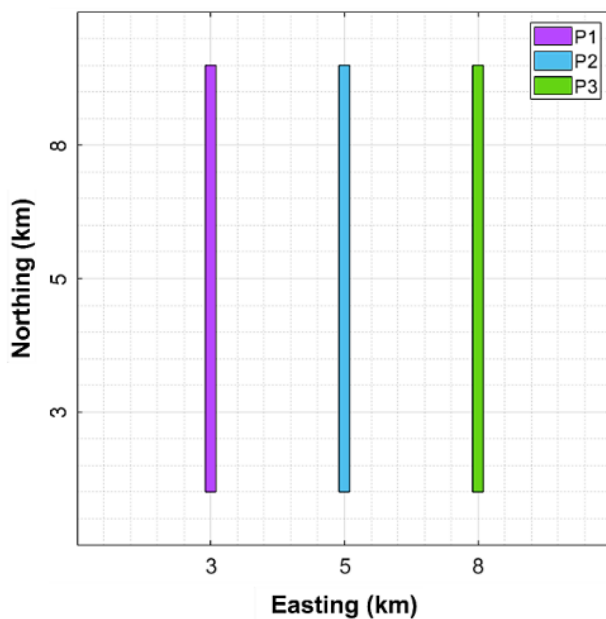
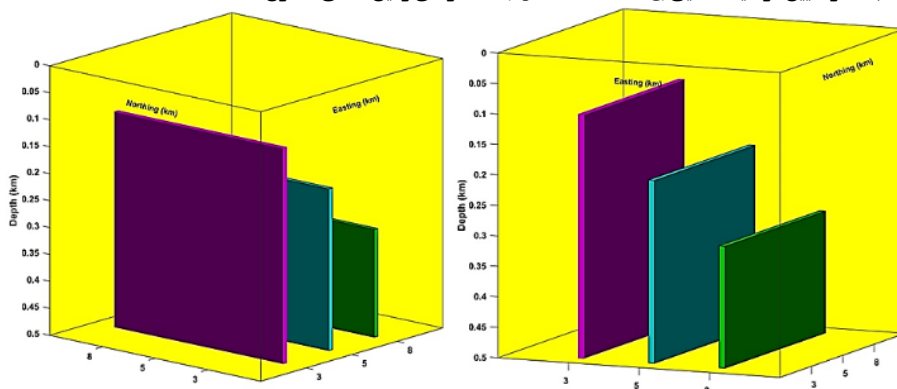
در شکل ۸ شدت مغناطیسی کل مدل مصنوعی دوم را که شامل ۳ منشور قائم (شکل ۷) و با آلودگی به نویز گوسی به میزان ۱۰٪ است، نشان داده شده است. باید توجه داشت که بسیاری از بیشینه دامنه‌های آنومالی تولید شده یا پیک‌هایی بدون منشا واقعی زمین‌شناسی در نقشه‌های TDR- و TDX قابل مشاهده می‌باشند. به همین دلیل تفکیک نویزهای گوسی و بدون منشا از بیشینه دامنه آنومالی‌های که ناشی از وجود یک چشمه‌ی زمین‌شناسی می‌باشند را دشوار نموده است. وجود نویز سبب شکل‌گیری بسیاری از آنومالی‌های بیشینه مصنوعی که ریشه‌ی زمین‌شناسی ندارند، در نتایج حاصل شده از اعمال فیلتر TDR+TDX می‌شود، اما نکته حائز اهمیت در این نقشه که سبب جلوگیری از ایجاد اختلال در روند شناسایی چشمه‌های منابع آنومالی می‌باشد، تشکیل فلات‌ها یا همان سطوح مسطح از آنومالی می‌باشد که نویزها توانایی ایجاد این چنین نواحی مسطح از آنومالی‌ها را دارا نمی‌باشند (شکل ۶). پیک‌های نادرست ASA دامنه‌ی کمتری نسبت به TDR+TDX دارند، اما برخی از بی-هنجاری‌های نادرست با فرکانس پایین وجود دارد که می‌تواند با منابع که دارای حساسیت کمتری می‌باشند، مخدوش شود. شکل ۹ نشان می‌دهد که برای داده‌های آلوده به نوفه‌های تصادفی، روش ارائه شده در این پژوهش (روش بر پایه ترکیبات مشتقات افقی و قائم از زاویه تیلت) مجموعه‌ای متراکم از نقاط منصوب به چشمه مولد آنومالی‌ها را تولید می‌کند، در

جدول ۳: پارامترهای مکانی و موقعیت قرارگیری مدل‌های مصنوعی شامل ۳ منشور دایک مانند

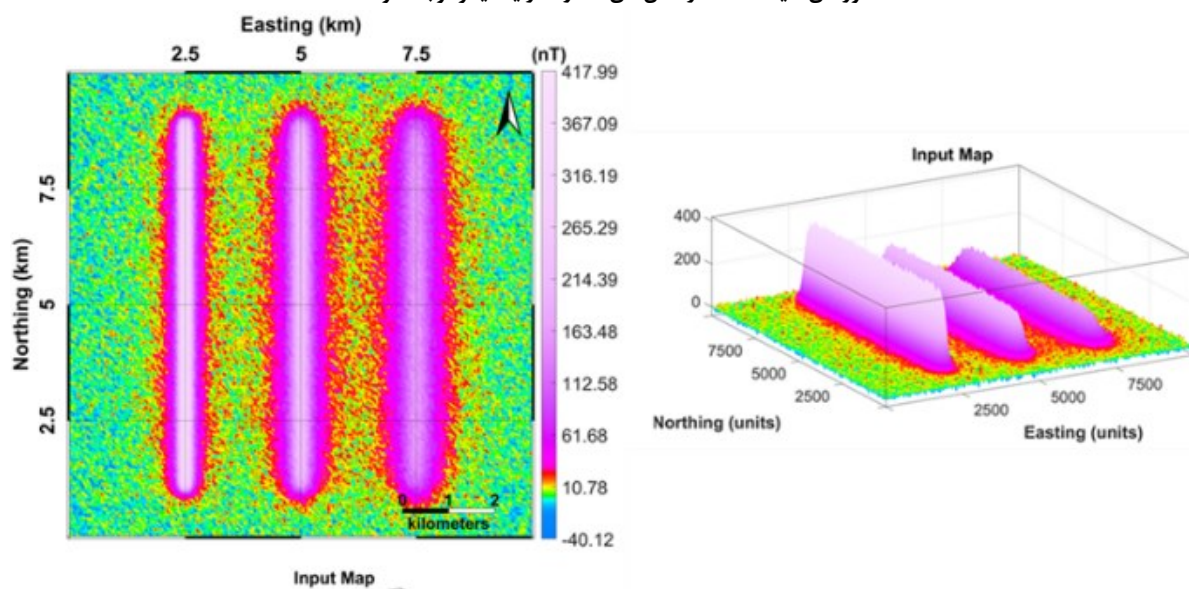
پارامترهای هندسی	P1	P2	P3
طول (کیلومتر)	۸	۸	۸
عرض (کیلومتر)	۰,۲	۰,۲	۰,۲
ضخامت (کیلومتر)	۲۰	۲۰	۲۰
X (کیلومتر)	۲,۵	۵	۷,۵
Y (کیلومتر)	۵	۵	۵
Azimuth (deg)	۰	۰	۰



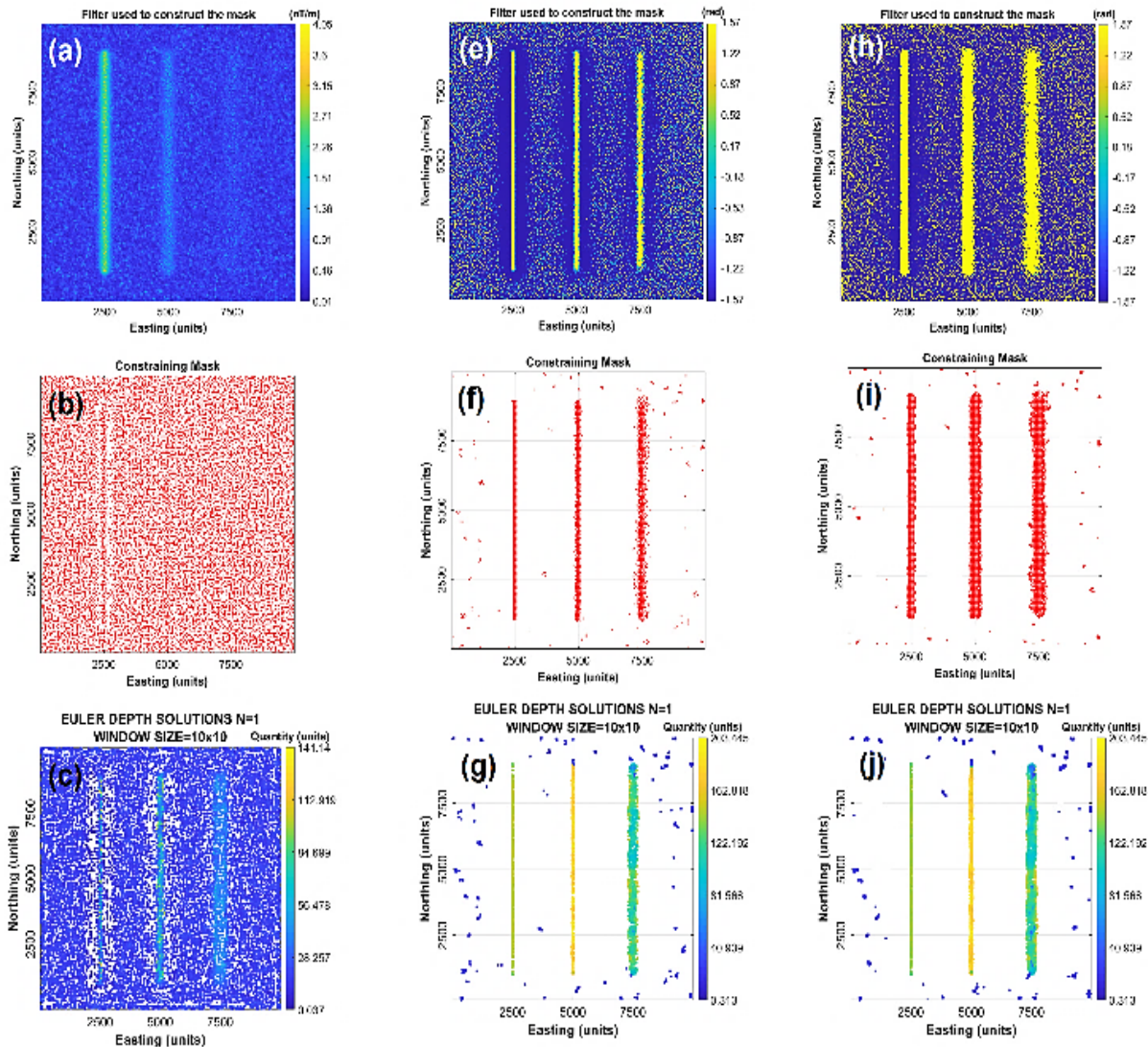
شیرانی و همکاران، بهبود دقت محاسبات در تعیین موقعیت فضایی (Spatial Locating) ساختارهای زمین‌شناسی مدفون، صفحات ۷۹-۱۰۵.



شکل ۷: موقعیت مکانی منشورهای دایک مانند در فضای ۳ بعدی  $(X, Y, Z)$  (پنل بالا) و همچنین در صفحه مختصات  $(X, Y)$  (پنل پایین) (به نحوه قرارگیری هر یک از این منشورهای دایک مانند در عمق‌های متفاوت از یکدیگر توجه شود)



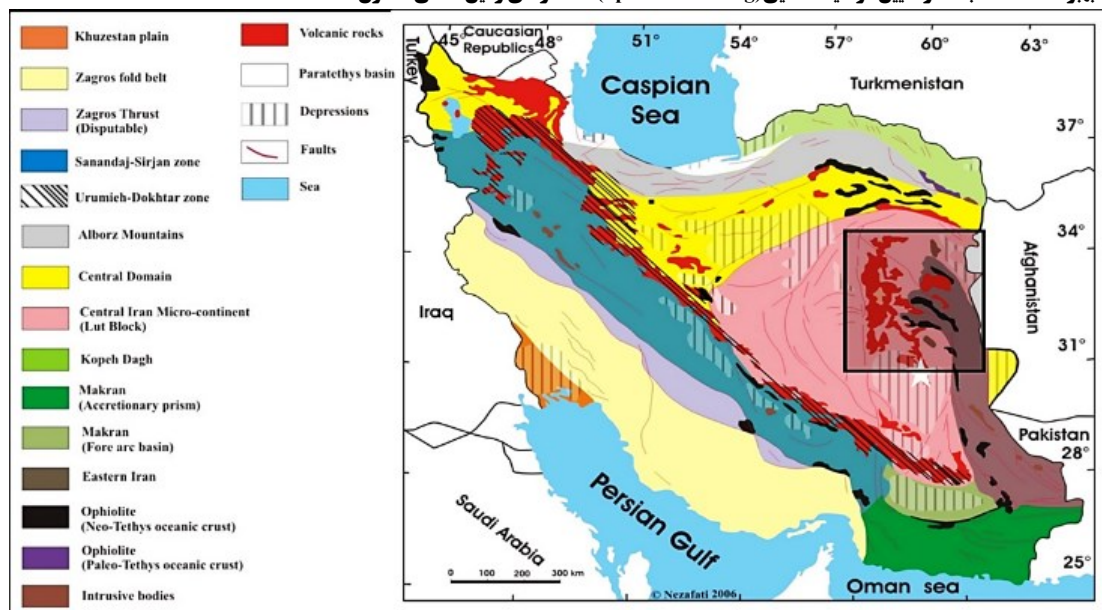
شکل ۸: شدت میدان مغناطیسی کل TMI، داده‌های مربوط به مدل مصنوعی حاوی ۱۰ درصد توزیع نوفه گوسی می‌باشد.



شکل ۹: نقشه‌ی مراحل انجام فرایند اعمال فیلترهای مورد نظر، تعیین نقاط بیشینه‌ی مربوط به هر یک از فیلترهای اعمال شده، تعریف ابعاد پنجره متحرک و اندیس ساختاری اجسام و مشاهده‌ی نتایج جایجا شدن پنجره متحرک به وسیله‌ی راه‌حل‌های تولید شده در نتیجه‌ی اعمال روش تخمین عمق واهم آمیخت اوپلر ۳ بعدی (داده-های مربوط به مدل مصنوعی حاوی ۱۰ درصد نوفه گوسی می‌باشد). (a) اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی مدل مصنوعی مورد نظر ASA، (b) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی مدل مصنوعی و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اوپلر (Constraining Mask)، (c) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر ۳ بعدی با استفاده از روش AN-EUL، (e) اعمال فیلتر TDR-TDX بر روی مدل مصنوعی مورد نظر ASA، (f) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر TDR-TDX بر روی مدل مصنوعی و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اوپلر (Constraining Mask)، (g) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر ۳ بعدی با استفاده از روش TDR-TDX، (h) اعمال فیلتر TDR+TDX بر روی مدل مصنوعی مورد نظر ASA، (i) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر TDR+TDX بر روی مدل مصنوعی و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اوپلر (Constraining Mask)، (j) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر ۳ بعدی با استفاده از روش TDR+TDX

خاورترین بخش خرد قاره ایران مرکزی است واقع شده است، مرز خاوری آن با گسل نهندان و حوضه فلیشی خاور ایران و مرز باختری آن با گسل نایبند و بلوک طیس مشخص می‌شود (شکل ۱۰)، (Alavi, 1991).

اعمال روش بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد محدوده مورد مطالعه در بخش شمالی کویر لوت و همچنین زون سیستان که



شکل ۱۰: جایگاه کویر لوت و خرده قاره ایران مرکزی (بر اساس (Alavi, 1991) و موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی آن)

#### ویژگی‌های زمین ساختی و زمین شناسی زون مورد مطالعه

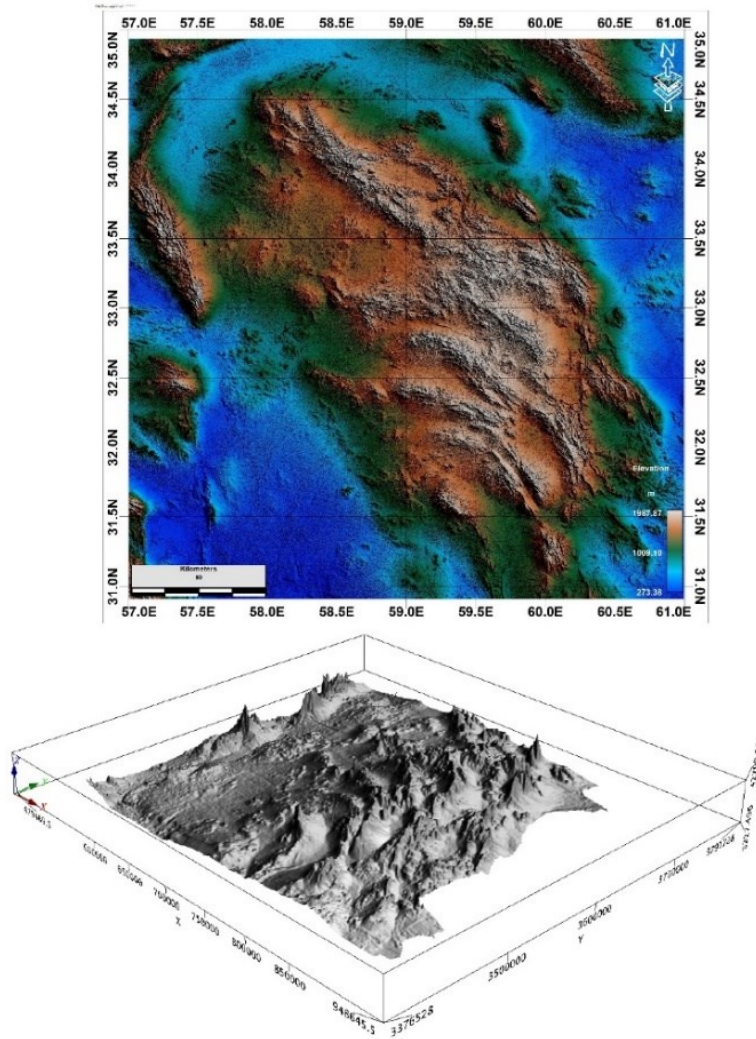
بلوک لوت با درازایی حدود ۹۰۰ کیلومتر، شرقی‌ترین بخش خرد قاره ایران مرکزی است. مرز خاوری آن با گسل نهندان و حوضه فیلیشی خاور ایران و مرز باختری آن با گسل نایبند و بلوک طبس مشخص می‌شود، همچنین مرز شمالی این بلوک به فروافتادگی جنوب کاشمر و مرز جنوبی آن به فرونشست جازموریان بسته می‌شود (شکل ۱۰). تنها رخنمون‌های دوران پالئوزوئیک در بلوک لوت تنها می‌توان به سنگ آهک‌های پرمین اشاره نمود که در بعضی نقاط بیرون زدگی دارند. در طی پالئوزوئیک و اوایل تریاس سازندهای یکسان در جنوب و مرکز لوت و ناحیه شتری- طبس مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد آن زمان تمام این بخش-ها در زیر دریای واحدی بوده و رسوب‌گذاری مشابهی صورت گرفته است (Berberian, 1977). سنگ‌های رسوبی مربوط به رسوبات کم عمق و تخریبی تریاس (مانند سازند سرخ شیل و سازند نایبند) گسترش محدود داشته ولی سنگ‌های ژوراسیک (مانند گروه شمشک، سازند آب حاجی و سازند آهکی پرورده) بیش از دیگر تشکیلات دوران مزوزوئیک در بلوک لوت گسترش یافته‌اند. سنگ‌های کرتاسه در بلوک لوت، دو رخساره متفاوت دارند. در جنوب بیرجند، ردیف‌های کرتاسه فیلیش گونه‌اند و همراه با مجموعه‌های افیولیتی شرق ایران بصورت ورقه‌های برخوردی، و از پهنه فیلیشی شرق ایران به حاشیه شرقی لوک لوت جابجا شده و نابرجا به حساب می‌آیند (آقناباتی، ۱۳۸۳) (شکل ۱۱).

سنگ‌های اتوسن ویژگی‌های نزدیک به البرز به ویژه ایران مرکزی دارند.

بدین ترتیب که از اتوسن میانی تکاپوهای آتشفشانی با خاستگاه گوناگون آغاز می‌شود که ممکن است تا اتوسن بالایی-الیگوسن ادامه یابند. نهشته-های سیلتی-رسی غرب لوت (سازند لوت) نوعی از نهشته‌های دریاچه‌ای پلیوسن هستند. نهشته‌های بادی کواترنری در بلوک لوت وسعت زیادی دارند. گسترده‌ترین بادرفتهای ماسه‌ای ایران را می‌توان در شرق دشت لوت دید که گستره‌ای بیش از ۱۵۰۰۰ کیلومتر مربع را می‌پوشاند و به آن‌ها دریای ریگ گفته می‌شود آقناباتی، (۱۳۸۳).

ماگماتیسم و شناخت ساختارهای خطی مغناطیسی در زون مورد مطالعه یکی از ویژگی‌های بارز بلوک لوت، فعالیت‌های ماگماتیسمی گسترده آنست که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است، به طوریکه ضخامت واحدهای آتشفشانی ترشیری در بلوک لوت حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر تخمین زده شده است. سنگ‌هایی از قبیل داسیت‌ها، آندزیت‌ها، اینگنیمبرایت‌ها و توف‌های وابسته در این میان دارای اهمیت هستند. کانسارهای شرق ایران نیز غالباً در رابطه با همین فعالیت‌های ماگمایی تشکیل شده‌اند. ماگماتیسم همراه فاز سیمین پسین (ژوراسیک فوقانی-کرتاسه تحتانی) در بلوک لوت شامل نفوذ پگماتیت‌ها و گرانیت‌هایی مثل گرانیت شاه‌کوه، چهار فرسخ و سرخ‌کوه و دگرگونی همبری همراه با آن‌ها رخساره پیرکسن-هورنفلس و دگرگونی حرارتی و تشکیل آندالوزیت، گارنت، سیلیمانیت شیبست بوده است (Berberian, 1977).





شکل ۱۱: نقشه‌ی توپوگرافی زون حاوی واحدهای زمین‌شناسی آتشفشانی در بخش مرکزی بلوک لوت (این ناحیه بر طبق شواهد زمین‌شناسی فعال‌ترین منطقه از دید ماگماتیسم می‌باشد). پنل پایین در این شکل همان محدوده‌ی توصیف شده را ولی با دید ۳ بعدی در دستگاه مختصات کارتزین نمایش می‌دهد.

است که گسترش آن در اکثر نقاط دیده می‌شود. این فعالیت تنها به ائوسن محدود نبوده بلکه در چند مرحله دیگر (الیگوسن آغازی، میوسن میانی و پلیوسن نیز تکرار گردیده و آتشفشان‌های فعال و نیمه فعال کنونی را باید دنباله همین مراحل دانست. در یک جمع‌بندی ساده شاید بتوان آتشفشان‌های بلوک لوت را به دو بخش قدیم و جوان تفکیک نمود (امامی، ۱۳۷۹). الف- سنگ‌های آتشفشانی پالئوژن که بیشتر اسیدی- حدواسط بوده و شامل سنگ‌های ریولیتی تا آندزیتی می‌باشند (شکل ۱۲). ب- سنگ‌های آتشفشانی نئوژن و کواترنری که کم و بیش بازیک و عمدتاً از نوع بازالتی هستند. این ماگماتیسم بطور مشخص محدود به گسل‌ها و شکستگی‌های محدود کننده بلوک لوت می‌باشد. در منتهی الیه جنوبی گسل نایبند و سایر گسل‌های شمالی- جنوبی، فوران‌های آلکالن نوین صورت گرفته که بیشتر از نوع بازالتیت و تفریت می‌باشد. ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی منسوب به ترشیری در منطقه بشرویه، آن‌ها را در محدوده سنگ‌های آلکالن و کالک آلکالن با پتاسیم بالا و گاهی شوشونیتی قرار می‌دهد. سبترترین واحدهای آتشفشان‌زاد ایران به سن ائوسن هستند که

این فاز با کانی‌سازی نیز همراه بوده است مثل قلع در گرانیت شاه‌کوه و تنگستن در چاه کلب و چاه پلنگی و مس- مولیبدن پورفیری سرخ‌کوه (آقباتی، ۱۳۸۳). فعالیت ماگمایی لوت شمالی از کرتاسهٔ پسین، یعنی بیش از ۷۷ میلیون سال پیش، آغاز شده و ۵ میلیون سال ادامه داشته است سنگ‌های ماگمایی از نوع گدازه‌های بازالتی، آندزیتی، داسیتی، ریولیتی و همچنین مقدار کمتری نفوذی‌های نیمه عمیق هستند. ویژگی‌های ژئوشیمیایی این سنگ‌ها نشان می‌دهد که همه از نوع کلسیمی- قلیایی هستند و همهٔ شکل‌های آتشفشانی کنارهٔ قاره، مرز صفحه‌های همگرا در آن‌ها دیده می‌شوند. تعیین سن پرتوسنجی با روش روبیدیم- استرونیوم مشخص می‌کند که خاستگاه بیشتر سنگ‌ها از گوشته و به دور از هرگونه درآمیزی پوسته است. تنها در برخی از ایگنیمبریت‌های پر سیلیس، نشانه‌هایی از آرایش پوست‌های دیده می‌شود (امامی، ۱۳۷۹). به دنبال فاز فشاری کرتاسه پایانی که با دگرگونی، چین‌خوردگی، بالآمدگی و جابجایی افیولیت‌ها همراه بوده، فاز کششی مهمی در سرتاسر ایران به جز زاگرس و کپه داغ حکم‌فرما گردیده است و نتیجه آن آتشفشان‌های شدید ائوسن

گرفتن زاویه میل و انحراف به ترتیب  $51/5^\circ$  و  $3/4^\circ$  درجه، سبب حذف نامتقارنی‌های ایجاد شده به وسیله میدان ناحیه‌ای و پلاریزاسیون غیر عمودی خواهیم شد (شکل ۱۳).

در گام بعدی با اعمال فیلترهایی ترکیبات مشتقات افقی و قائم زاویه تیلت و فیلتر سیگنال تحلیلی نقشه‌های مربوط به هر کدام را تولید نموده که در شکل ۱۴ قابل مشاهده می‌باشند. مانند روند عملیات اعمال شده بر روی مدل‌های مصنوعی مفروض، باید در این مرحله پس از تعیین نقاط بیشینه بدست آمده، از هریک از روش‌ها استفاده نموده و نقشه شامل نقاط مقید کننده‌ی (Constraining Mask) عملیات تخمین عمق اوپلر را تولید نماییم.

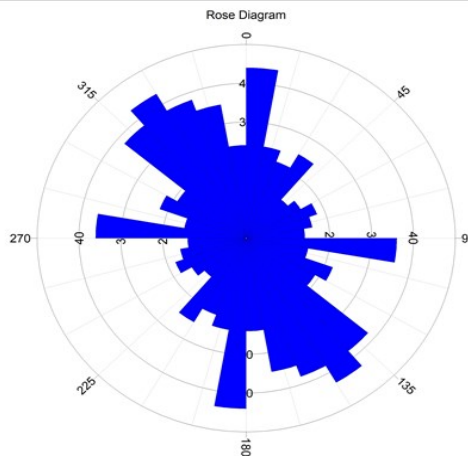
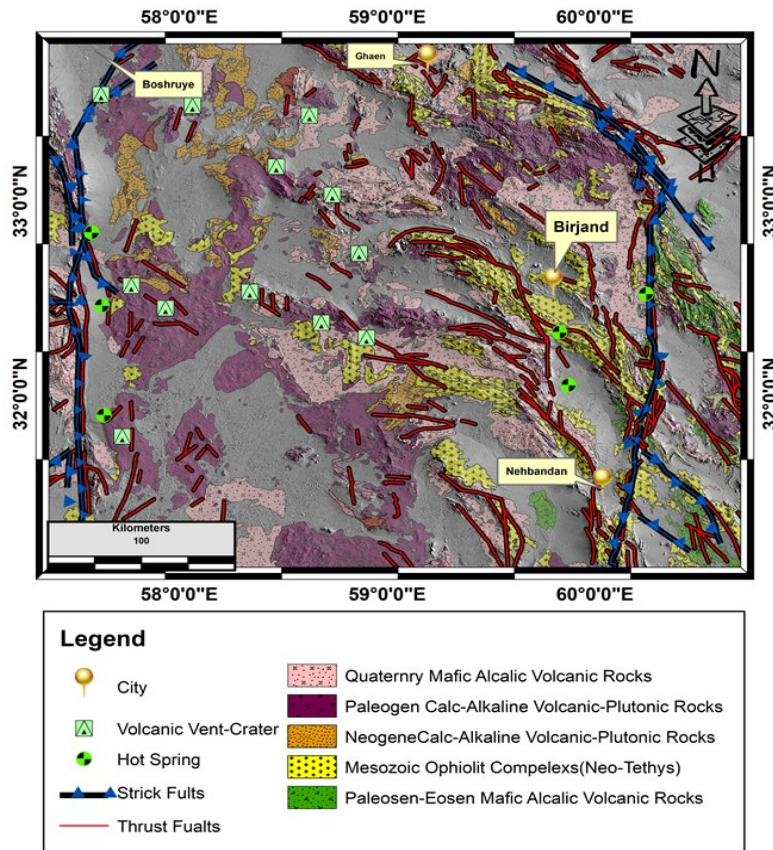
بر خلاف آنومالی‌هایی که بر اثر تغییرات جرم حجمی در لایه‌های زیر سطحی ایجاد شده‌اند، آنومالی‌های مغناطیسی بر اثر تغییرات خودپذیری لایه‌های زیر سطحی ایجاد شده اما تشخیص آن‌ها به وسیله‌ی حواس مشکل بوده و به همین دلیل است که عوامل متعددی در تعیین شکل این آنومالی‌ها موثر است. آنومالی‌های مغناطیسی تابعی از دو متغیر وابسته به هم مانند خودپذیری مغناطیسی مواد زیر سطحی (عامل اسکالر) و همچنین جهت میدان مغناطیسی اصلی زمین (عامل برداری) می‌باشند. به عبارتی شکل یک آنومالی مغناطیسی فقط به ابعاد فیزیکی و خودپذیری مغناطیسی توده بستگی ندارد، بلکه به جهت پلاریزاسیون توده و جهت میدان ناحیه‌ای نیز وابسته است (Hinze, 1990). مفهوم آن این است که دو آنومالی مشخص با خودپذیری مغناطیسی برابر در دو نقطه مختلف بر روی زمین با یکدیگر برابر نیستند. یک توده متقارن در قطب‌های مغناطیسی که جهت میدان ناحیه‌ای و پلاریزاسیون در آن‌ها عمودی است، یک آنومالی متقارن تولید می‌کند (Peace et al., 2018).

به ویژه در کمان ماگمایی ارومیه- بزمان، کوه‌های خاور ایران، بلوک لوت، جنوب بینالود، بخش جنوبی البرز و شمال باختری آذربایجان رخنمون دارند. در منطقه بلوک لوت، آتشفشانی‌های ائوسن در دو ناحیه خاور بشرویه و خاور نایبندان (سه چنگی) برونزد دارند که شامل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری اسیدی با برتری با سنگ‌های آذرآواری و ایگنیمبریتی است. سنگ‌های حدواسط، دو روند کلی کلسیمی-قلیایی (داسیت، آندزیت و آندزی بازالت) و قلیایی بازالت قلیایی، تراکی بازالت و تراکی آندزیت دارند. در خاور نایبندان (سه چنگی)، مجموعه آتشفشانی ائوسن از نوع جریان‌های داسیتی-آندزیتی همراه با آذرآواری با مقدار کمی آندزیت و جریان بازالتی از جمله واحدهای زمین‌شناسی ولکانیک موجود در منطقه می‌باشد. ردیف-های آذرآواری این مجموعه سن پرتوسنجی ۴۹ میلیون سال (ائوسن میانی) دارد (آقابانی، ۱۳۸۳).

نظریات تکتونیکی مختلفی در مورد شکل‌گیری بلوک لوت وجود دارد که اغلب آن‌ها وجود یک چرخه کامل کوه‌زایی شدن شامل تشکیل ریف، تشکیل اقیانوس بین بلوک لوت و افغان، فرورانش پوسته اقیانوسی، بسته شدن اقیانوس و تصادم لوت و افغان را مطرح نموده است (Camp and Griffs, 1982; Tirrul, et al., 1983). برخی تئوری‌ها نیز تشکیل بلوک لوت را مربوط به شرایط کشتی میدانند. (Jung et al., 1983) همچنین نظریه فرورانش دو سویه نامتقارن با زاویه شیب فرورانش زیاد به سمت بلوک لوت و زاویه شیب فرورانش کم به سمت بلوک افغان نیز برای ماگماتیزم بلوک لوت ارائه شده است (Arjmandzadeh et al., 2011).

فعالیت ماگمایی در بلوک لوت قابل تقسیم به دو بخش شمال و جنوب لوت است که عمده این رخدادها مربوط به دوره ترشیری به وسعتی در حدود  $300 \times 400$  کیلومتر است (Berberian, 1977).

در این بخش، روش‌های ذکر شده و اعمال شده بر روی داده‌های مصنوعی، بر روی داده‌ی مغناطیسی هوابرد برداشت شده از بخش شرق و جنوب شرقی ایران با فاصله خطوط برداشت ۷,۵ کیلومتر اعمال شده است.



شکل ۱۲: نقشه زمین‌شناسی بخش مرکزی بلوک لوت (پنل بالا) و نمایش رز دیاگرام برای تشخیص راستای روندهای ساختاری موجود در زون مورد مطالعه (پنل پایین)

و محل مرز ساختارها یا ویژگی‌های تکتونیکی مانند گسل‌هایی با تیپ‌های متفاوت قابل مشاهده است. بطور مثال دو گسل واضح و معروف در ناحیه مورد مطالعه گسل‌های نایبند و نهبندان می‌باشند که با اعمال فیلتر  $TDR-TDX$  حتی مکان‌هایی که این گسل‌ها دارای انقطاع و ناپیوستگی هستند نیز تشخیص داده شده و بطور کامل در تشخیص این موارد با دقت بالا و بدون انتخاب نقاطی بدون وجود ریشه یا منشأ زمین‌شناسی عمل کرده است. همچنین با در نظر گرفتن اینکه این منطقه در یک زون فرورانش قرار گرفته است، بنابراین فرایند ماگماتیسم رخ داده در اثر رویداد خود را در عمق‌های مختلف و در بسیاری از مناطق بصورت

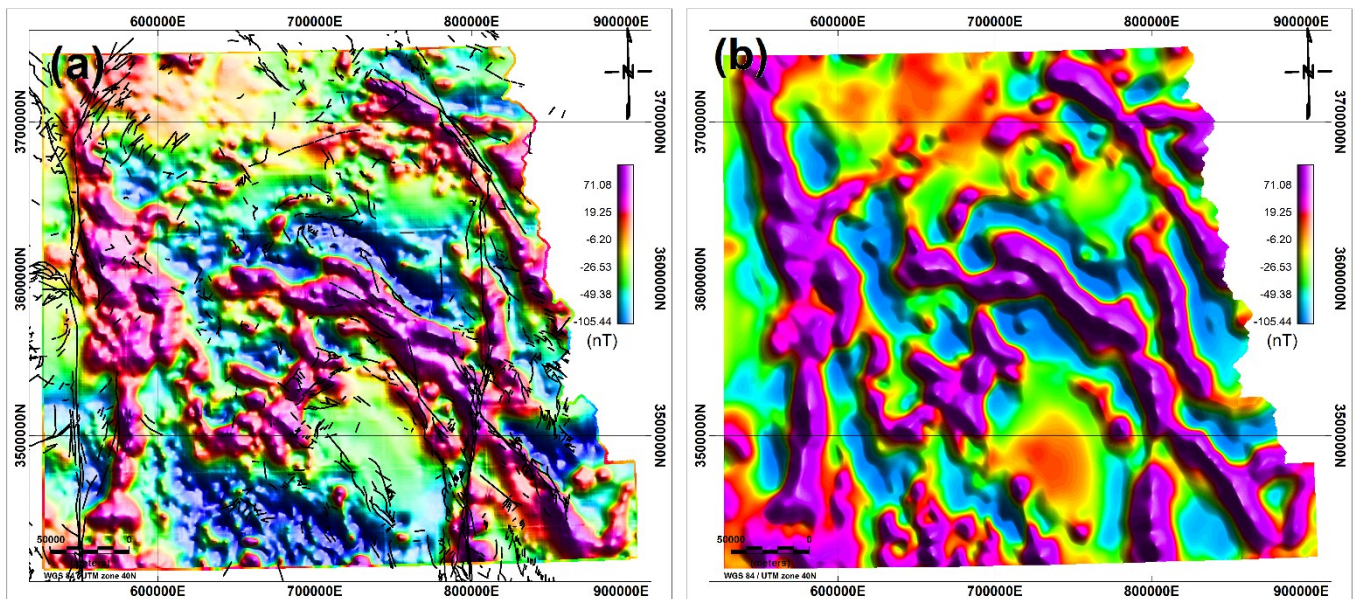
بنابراین با اعمال فیلتر برگردان به قطب دیفرانسیلی ( $DRTP$ ) بر روی داده‌های شدت میدان مغناطیسی منطقه مورد مطالعه، با در نظر

روش‌های ارائه شده تحت عناوین ترکیبات  $TDR+TDX$  و  $TDR-TDX$  بر روی داده‌های برگردان به قطب دیفرانسیلی اعمال شده و نتایج آن‌ها به علاوه نتایج حاصل از اعمال فیلتر آنالیز سیگنال تحلیل در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. در این شکل همانطور که در نقشه‌های مربوط به نقشه‌ی زمین‌شناسی مربوط به محدوده مورد مطالعه نشان داده شد، با دقت در نقاط تعیین شده در روش  $TDR-TDX$  کاملاً تطابق بین نقاط تعیین شده



مکان‌های قرارگیری چشمه‌های آبگرم، موقعیت جغرافیایی دهانه‌های آتشفشانی موجود در مرزهای این مقادیر، خوشبختانه گواهی بر میزان کارایی و صحت نتایج بدست آمده با در نظر گرفتن رزولوشن داده‌های مغناطیس‌سنجی مورد استفاده می‌باشد. شکل ۱۴ ستون دوم حاصل بکارگیری روش فیلتر  $TDR+TDX$  بر روی داده‌های میدان مغناطیسی برگردان به قطب دیفرانسیلی شده می‌باشد. با توجه به نکات بسیار ارزشمندی که در ارتباط با نحوه شکل‌گیری واحدهای زمین‌شناسی در زون شرق و جنوب‌شرقی ایران (منطقه مورد مطالعه) بیان شد قسمت اعظمی از بخش مرکزی فعالیت‌های مربوط به ماگماتیسم بلوک لوت در دوران‌های مختلف زمین‌شناسی شدت و وسعت زیادی داشته است.

واحدهای آذرین و آتشفشانی قابل شناسایی می‌باشند که تمام این واحدهای مختلف آتشفشانی شکل گرفته در سطح زمین در اثر وجود یا تقاطع گسل‌های عمیق موجود در این زون تشکیل یافته‌اند. از طرفی درک و شناخت نحوه ارتباط یا پیوست این آنومالی‌های مغناطیسی به یکدیگر، چه در عمق و چه در سطح، از منظر شناسایی گسل‌های مدفون و همچنین درک نحوه ارتباط یا شبکه‌های درزه گسلی‌های عمیق بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به منظور بررسی بیشتر آنومالی‌ها و مناطق تعیین شده با استفاده از فیلتر  $TDR-TDX$  به عنوان نواحی با بیشینه دامنه پاسخ آنومالی که بر طبق توضیحات قبل کاملاً نشان داده شد که نقاط مشخص شده در این نواحی دقیقاً با مرز ساختارها، و گسل‌ها منطبق می‌باشد و با تصویر کردن



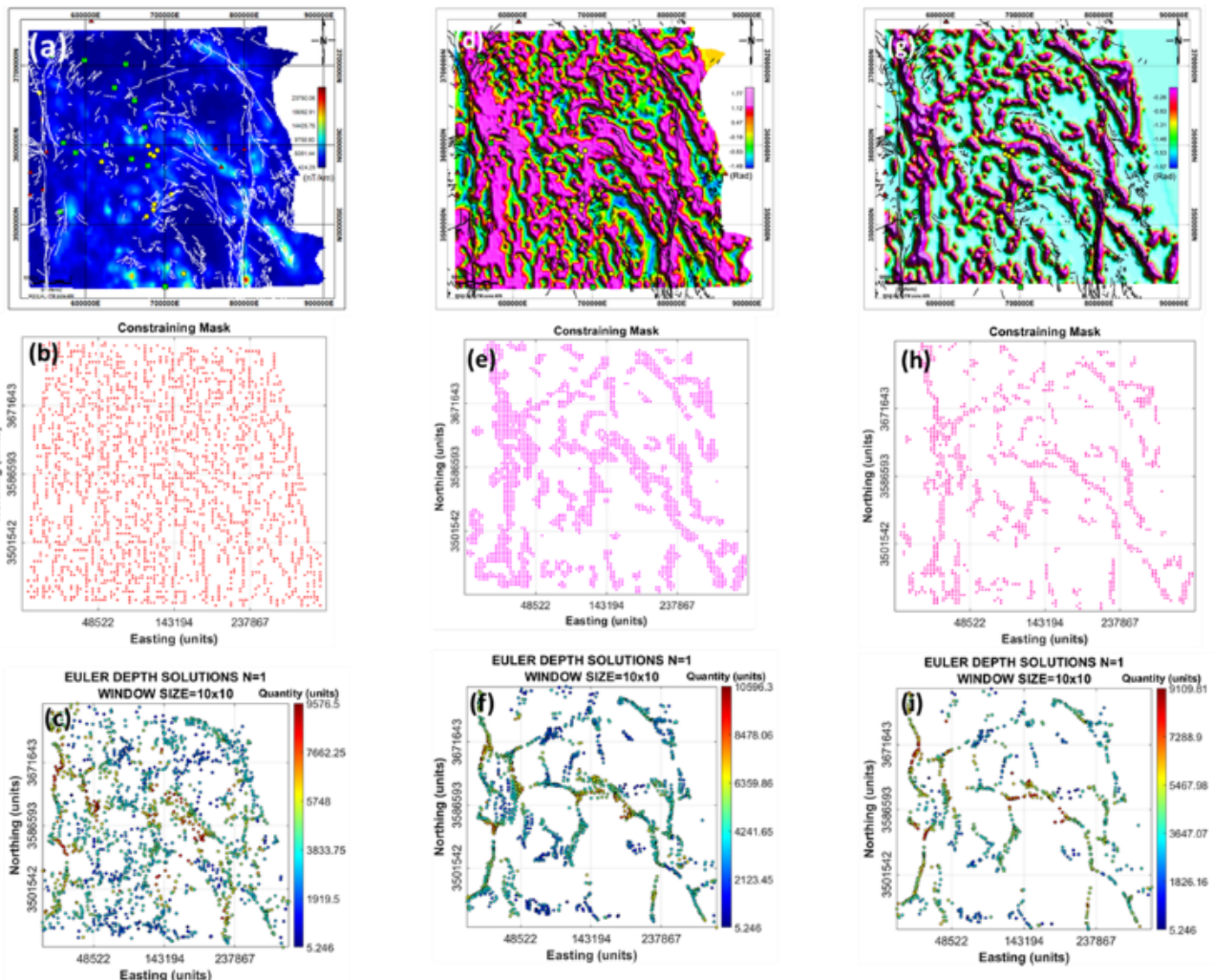
شکل ۱۳: نقشه (a) شدت میدان مغناطیسی محاسبه شده کل در بلوک مورد مطالعه TMI، (b) نقشه حاصل از اعمال فیلتر برگردان به قطب دیفرانسیلی

آتشفشانی موجود در منطقه کاملاً مبین تشخیص درست و کارآمد این فیلتر در تشخیص منابع مولد آنومالی هستند که بخش قابل توجهی از این منابع در زیر رسوبات مدفون بوده و در سطح هیچگونه رخنمونی نداشتند. مقادیر عمق‌های تخمین زده شده هم از نظر مقدار عمق و هم از منظر مکان تشخیص داده شده به عنوان پهنه‌های مسطح مولد آنومالی نیز با شواهد و یافته‌های زمین‌شناسی کاملاً هم‌خوانی دارند. ساختارهای تکوتونیک و گسل‌ها نقاط محافظ  $TED$  عمدتاً بر روی خطوط قرار گرفته‌اند، و راه‌حل‌های واهم آمیخت اوپلر مربوط به آن‌ها محدود به مقادیر معقولی است. علاوه بر این، راه‌حل‌های واهم آمیخت اوپلر محاسبه شده توسط روش‌های ارائه شده دارای تراکم و پیوستگی بیشتر و توزیعی به‌طور یکنواخت در محل منشأ آنومالی‌ها هستند. همچنین میتوان اظهار داشت که تعداد نقاطی که بصورت پراکنده در فیلترهای مقید کننده  $TDR+TDX$  و  $TDR-TDX$  وجود دارند و تقریباً تمام نقاط شناسایی شده به عنوان منشأ مولد آنومالی‌ها همگی در راستای دایک‌ها یا ساختارهای دارای تباین خودپذیری مغناطیسی هستند. در مقابل روش  $ANEUL$  تعداد راه‌حل‌هایی که بصورت

همچنین از طرفی چون بخش جنون و جنوب‌شرقی منطقه مورد مطالعه پوشیده از رسوبات کواترنری و ماسه بادی می‌باشد به همین علت احتمال وجود واحدهای آذرین یا بطور کلی واحدهای زمین‌شناسی آتشفشانی با توجه به همبستگی که بین نفوذ توده‌های ولکانیکی به نزدیک سطح و شکل‌گیری یا وجود انواع گسل‌ها یا درز و شکستگی‌ها می‌باشد به همان نسبت هم کشف سایر گسل‌های مدفون در زیر این رسوبات محتمل خواهد بود. از طرفی با در نظر گرفتن محیط‌های میزبان کانی‌سازی و یا جنس واحد در برگرفته توده‌ی معدنی در این ناحیه اکثر قریب بالاتفاق اندیس‌های معدنی شناخته شده در واحدها ولکانیکی و آذرآواری از قبیل واحدهای اندزیتی، اندزیت-بازالت‌ها، داسیت‌ها، ریوداسیت‌ها، و غیره تشکیل شده‌اند. از همین رو شناسایی واحدهای ولکانیکی که خاصیت خودپذیری مغناطیسی بالاتری از محیط در برگرفته‌ی خود نیز دارند از نظر اکتشاف پتانسیل‌های معدنی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهند بود. با بررسی نتایج حاصل از اعمال فیلتر  $TDR+TDX$  و همپوشانی آن با واحدهای

ناحیه تشخیص داده شود به میزان زیادی خطا را وارد محاسبات مربوط به تخمین عمق خواهد کرد.

پراکنده و نامرتب با روند ساختارها و یا آنومالی‌های مغناطیسی مشخص در بلوک مورد مطالعه می‌باشد. همچنین بدیهی است که هر چه تعداد نقاط راه‌حل‌های تخمین اولیه بدون منشایی منطبق بر واقعیت زمین‌شناسی



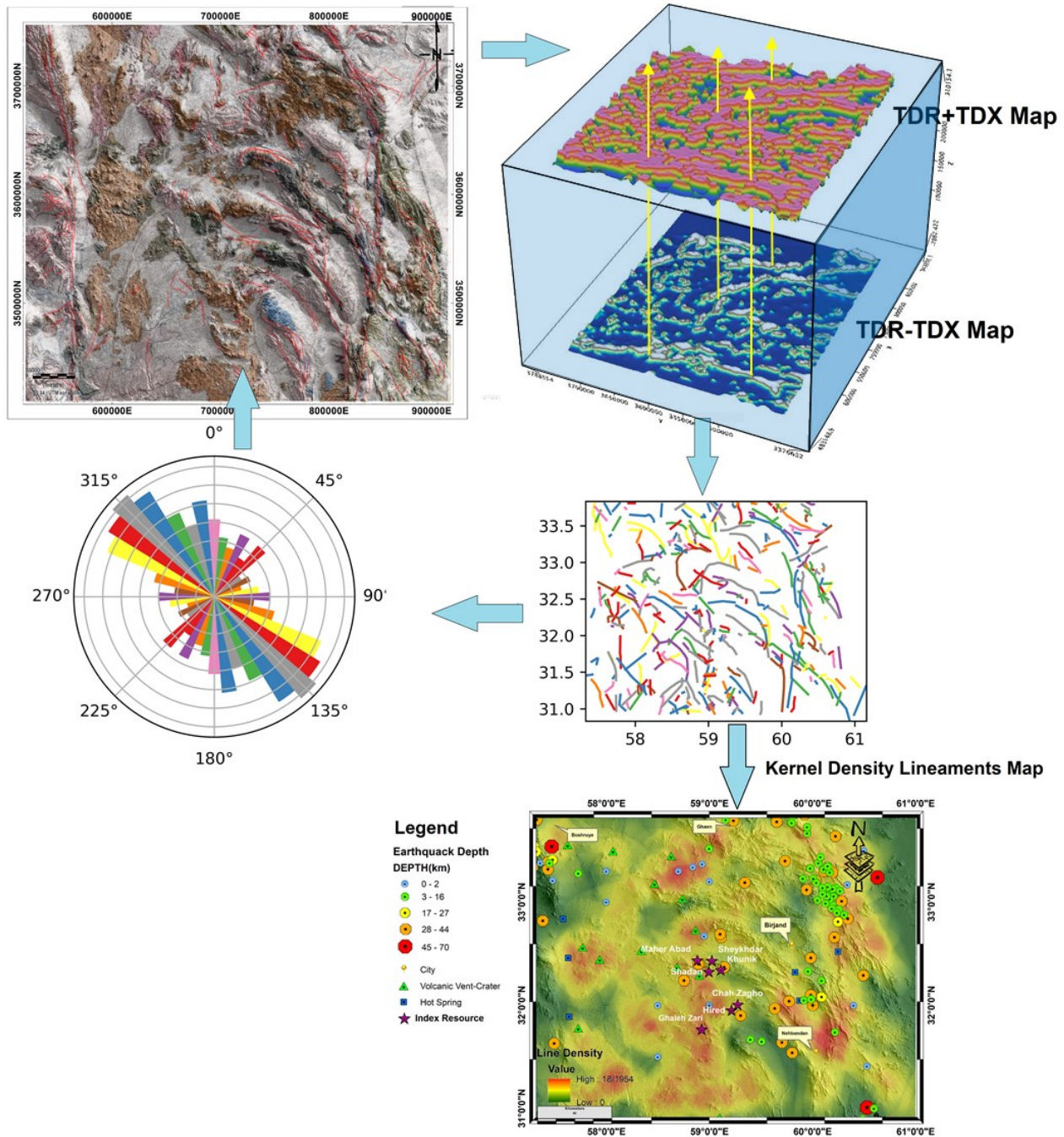
شکل ۱۴: نقشه‌ی مراحل انجام فرایند اعمال فیلترهای مورد نظر، تعیین نقاط بیشینه‌ی مربوط به هر یک از فیلترهای اعمال شده، تعریف ابعاد پنجره متحرک و اندیس ساختاری اجسام و مشاهده‌ی نتایج جابجا شدن پنجره متحرک به وسیله‌ی راه‌حل‌های تولید شده در نتیجه‌ی اعمال روش تخمین عمق واهم آمیخت اولیه ۳ بعدی (داده-های مربوط به مدل مصنوعی حاوی ۱۰ درصد نوفه گوسی می‌باشد). (a) اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های هوابرد مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه ASA، (b) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های هوابرد مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اولیه (Constraining Mask)، (c) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اولیه ۳ بعدی با استفاده از روش AN-EUL، (e) اعمال فیلتر TDR-TDX بر روی داده‌های هوابرد مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اولیه (Constraining Mask)، (f) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر TDR-TDX بر روی داده‌های هوابرد مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اولیه (Constraining Mask)، (g) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اولیه ۳ بعدی با استفاده از روش TDR-TDX، (h) اعمال فیلتر TDR+TDX بر روی داده‌های هوابرد مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه ASA، (i) نقشه‌ی حاصل از اعمال فیلتر TDR+TDX بر روی داده‌های هوابرد مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه‌ی آن ایجاد نقشه‌ی نقاط مقید کننده‌ی تخمین عمق اولیه (Constraining Mask)، (j) نمایش تعداد راه‌حل‌های تخمین عمق اولیه ۳ بعدی با استفاده از روش TDR+TDX.

عمق‌های هر روش مبرهن خواهد بود. چند نقطه پراکنده واقع در خارج از خط، بیش از حد را فراهم می‌کند. علاوه بر این، توزیع نقاط کمتری به هم پیوسته و یکنواخت روی خطوط اصلی در نتایج این روش وجود دارد.

با توجه تفسیر و توصیفات کاملی که در ارتباط به وضعیت و ماهیت ساختارها و واحدهای زمین‌شناسی در این بلوک از ایران گفته شد، با کمی دقت در مقادیر عمق‌های تخمین زده شده متناسب با نحوه شکل‌گیری ساختار مرتبط با آن کاملاً میزان دقت و میزان خطای موجود در تخمین



شیرانی و همکاران، بهبود دقت محاسبات در تعیین موقعیت فضایی (Spatial Locating) ساختارهای زمین‌شناسی مدفون، صفحات ۷۹-۱۰۵.



شکل ۱۵: نمایش فرایند استخراج عوارض ساختاری با اعمال فیلترهای معرفی شده در این مطالعه مانند انواع گسل‌ها، شکستگی‌ها، واحدهای زمین‌شناسی که از لحاظ هندسی دارای ساختاری کشیده و یا خطی می‌باشند، همراه با یک بررسی دقیق که به صورت نظیر به نظیر برای هر یک از خطواره‌های استخراج شده از مرحله قبل با گسل‌ها یا انواع ساختارهایی که در نقشه‌های معتبر زمین‌شناسی توسط پیمایش‌های منطقه‌ای که در مقیاس‌های متفاوتی به وسیله سازمان زمین‌شناسی تهیه و تولید می‌شوند و همچنین یک همپوشانی با داده‌ها و نقشه‌های توپوگرافی که به صورت نمایش ۳ بعدی با استفاده از Hillshade حاصل می‌شود تا بتوان یک دید کاملاً واقعی از محیط مورد مطالعه را به دست آورد. همچنین پس از تایید نهایی هر یک از ساختارها میتوان با استفاده از یک روش زمین آماری مانند روش مورد استفاده شده در این مطالعه (روش تولید چگالی ویژگی‌های برداری با استفاده از انتگرال آماری کرنل) همبستگی بین ساختارهای تعیین شده در طول فرایند توصیف شده بالا با اندیس‌های موجود مانند چشمه‌های آبگرم، دهانه‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی، اندیس‌های معدنی شناخته شده و غیره مورد بررسی قرار داد.

## ۵- نتیجه‌گیری

یکی از دشواری‌های استفاده از روش واهم آمیخت اوپلر به منظور تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی این است که نیاز به بررسی و صحت‌سنجی تعداد زیادی از راه‌حل‌های تولید شده به منظور کاهش میزان خطا و برچیدن این راه‌حل‌های نادرست دارد. اگرچه به منظور برچیدن این راه‌حل‌های نادرست و کاهش خطا از روش‌های پس از پردازش به صورت سنتی از روش‌های پس از پردازش استفاده می‌شده است، اما روش ارائه شده نشان داد که به میزان قابل توجهی توانسته تعادلی منطقی بین تعداد راه‌حل‌های حذف شده و تعداد راه‌حلی که به منظور تخمین عمق و شناسایی منابع مولد آنومالی ایجاد نماید که صورت و سهولت انجام سایر پردازش‌ها و همچنین استفاده از روش واهم آمیخت اوپلر را آسانتر نموده است. در این روش تکنیک‌های مورد استفاده در تخمین عمق اوپلر به منظور هدفمند نمودن حرکت پنجره تخمین اوپلر به میزان قابل توجهی نسبت به روش‌های سابق بهبود بخشیده شد که این امر با تولید فیلترهای جدید با استفاده از ترکیبات گرادیان‌های افقی و قائم زاویه‌ی تیلت به منظور ایجاد نقشه نشان‌دهنده لبه‌ها و مرکز ساختار و آنومالی و در حالت دوم میتوان فیلتر تولید شده را یک فیلتر بالانس کننده یا متعادل ساز در نظر گرفت که یکی از مهمترین خاصیت‌های این فیلتر برچیدن تاثیر تفاوت‌های عمقی منابع زیر سطحی بر میزان شدت آنومالی‌های می‌باشد. بدین صورت آنومالی‌های عمیق و وسیعتر سبب ناپدید شدن یا عدم تشخیص اثرات آنومالی‌های سطحی‌تر در نقشه شدت میدان اندازه‌گیری نخواهد شد. اثر بخشی Tilt Euler deconvolution به دلیل محدود کردن راه‌حل‌های پهنه‌های آنومالی تولید شده توسط TDR+TDX سبب عدم نیاز به ابزارهای هموار کننده داده‌ها، مانند فیلتر واهم آمیخت است. چنین استراتژی برای تشخیص مقادیر بیشینه دامنه‌ی آنومالی واقعی -TDR از TDX نیز ممکن است برای سایر تکنیک‌های کمی‌سازی مفید باشد. علی‌رغم این واقعیت که ما از ترکیب فیلترهای مشتق شیب زاویه کجی برای ساختن مقیدکننده‌ی راه‌حل‌های تخمین عمق اوپلر برای منابع شبه مانند استفاده کرده‌ایم، فیلترهای مختلف لبه‌یابی میتوانند برای ساختارهای مختلف زمین‌شناسی متناسب با ماهیت هر کدام قابل استفاده باشند. با این حال، TED به راحتی می‌تواند معیارهای دیگر را برای انتخاب نقاط محافظ ترکیب کند. به عنوان مثال، نقاط نزدیک لبه‌های منبع ممکن است نسبت به نقاط نزدیک به مراکز منابع، برآورد عمق بهتری برای تماس‌ها و اجسام ضخیم ارائه دهند. در این حالت، بهترین انتخاب، انتخاب نقاط نزدیک به قله‌های TDX به جای مقادیر مثبت TDR-TDX است، زیرا TDX حداکثر در نزدیکی لبه‌های منبع است (شکل ۱۵).

## ۶- منابع

- امامی، م.ه.، ۱۳۷۹، ماگماتیسیم در ایران، سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۷۱، صفحه ۶۲۲
- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمینشناسی ایران، سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور، صفحه ۶۰۶
- موسی پور یاسوری، ابراهیم زاده اردستانی، & وحید. بهبود محاسبه گرادیان اول و دوم قائم با استفاده از تبدیل کسینوس. پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۴(۲)، ۴۱۳-۴۲۷. علمدار کمال، & انصاری
- عبدالحمید. (۱۳۹۱). برآورد مرز توده‌های مغناطیسی با استفاده از گرادیان افقی بی‌هنجاری شبه گرانی. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷
- علمدار کمال، & انصاری عبدالحمید. (۱۳۸۸). استفاده از فیلتر مشتق قائم با مرتبه‌های متفاوت در تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل. مجله ژئوفیزیک ایران
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103(8), pp.983-992.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M. and Homam, S.M., 2011. Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut block, eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3), pp.283-296.
- Aziz, A.M., Sauck, W.A., Shendi, E.A.H., Rashed, M.A. and Abd El-Maksoud, M., 2013. Application of analytic signal and Euler deconvolution in archaeo-magnetic prospection for buried ruins at the ancient city of Pelusium, NW Sinai, Egypt: a case study. *Surveys in Geophysics*, 34(4), pp.395-411.
- Barbosa, V.C., Silva, J.B. and Medeiros, W.E., 1999. Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution. *Geophysics*, 64(1), pp.48-60.
- Berberian, M. and Mohajer-Ashjai, A., 1977. Seismic risk map of Iran, a proposal. *Geol. Surv. Iran*, 40, pp.121-148.
- Blakely, R.J., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge university press.
- Blakely, R.J. and Simpson, R.W., 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51(7), pp.1494-1498.

- FitzGerald, D., Reid, A., & McInerney, P., 2004. New discrimination techniques for Euler deconvolution. *Computers and Geosciences*, 30(5), 461-469.
- Florio, G., Fedi, M. and Pasteka, R., 2006. On the application of Euler deconvolution to the analytic signal. *Geophysics*, 71(6), pp.L87-L93.
- Hinze, W.J., 1990. The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. In *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I: Review and Tutorial* (pp. 75-126). Society of Exploration Geophysicists.
- Jung, H.J.G., Fahey, G.C. and Merchen, N.R., 1983. Effects of ruminant digestion and metabolism on phenolic monomers of forages. *British Journal of Nutrition*, 50(3), pp.637-651.
- Keating, P. and Pilkington, M., 2004. Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophysical prospecting*, 52(3), pp.165-182.
- McGrath, P.H. and Hood, P.J., 1970. The dipping dike case: A computer curve-matching method of magnetic interpretation. *Geophysics*, 35(5), pp.831-848.
- Melo, F.F., Barbosa, V.C., Uieda, L., Oliveira, V.C. and Silva, J.B., 2013. Estimating the nature and the horizontal and vertical positions of 3D magnetic sources using Euler deconvolution. A single Euler solution per anomaly. *Geophysics*, 78(6), pp.J87-J98.
- 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.
- Nelson, J.B., 1988. Comparison of gradient analysis techniques for linear two-dimensional magnetic sources. *Geophysics*, 53(8), pp.1088-1095.
- Olesen, O., Smethurst, M.A., Torsvik, T.H. and Bidstrup, T., 2004. Sveconorwegian igneous complexes beneath the Norwegian–Danish Basin. *Tectonophysics*, 387(1-4), pp.105-130.
- Pawlowski, J., Lewis, R., Dobush, T. and Valleau, N., 1995, January. An integrated approach for measuring and processing geophysical data for the detection of Unexploded Ordnance. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1995* (pp. 965-977). Society of Exploration Geophysicists.
- Reid, A.B., 1995, January. Euler deconvolution: Past, present and future—A review. In 65th SEG meeting, Houston, USA, Expanded Abstracts (pp. 272-273).
- de Barros, A., Bongiolo, S., de Souza, J., Ferreira, F.J.F. and de Castro, L.G., 2013. GRAV MAG PRISM: a matlab/octave program to generate gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. *Brazilian Journal of Geophysics*, 31(3), pp.347-363.
- Camp, V.E. and Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 15(3), pp.221-239.
- Castro, F.R., Oliveira, S.P., de Souza, J. and Ferreira, F.J.F., 2018. Combining tilt derivative filters: new approaches to enhance magnetic anomalies. *Brazilian Journal of Geophysics*, 36(3), pp.1-9.
- Catalán, M., Davila, J.M. and ZEE Working Group, 2005. A magnetic anomaly study offshore the Canary Archipelago. In *Geophysics of the Canary Islands* (pp. 129-148). Springer, Dordrecht.
- 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.1585-1591.
- CPRM. 2011. Aerogeophysical project Paraná-Santa Catarina: survey and processing of magnetometric and gamma-ray spectrometric data. *Lasa Prospecções: Technical Report* (In Portuguese).
- De Almeida, F.F.M., 1986. Regional distribution and tectonic relations of the post-palaeozoic magmatism in Brazil. *Brazilian Journal of Geosciences*, 16(4), 325-349 (In Portuguese).
- Dentith, M. and Mudge, S.T., 2014. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.
- Ebbing, J., Skilbrei, J.R. and Olesen, O., 2007. Insights into the magmatic architecture of the Oslo Graben by petrophysically constrained analysis of the gravity and magnetic field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B4).
- Eshaghzadeh, A., Dehghanpour, A. and Kalantari, R.A., 2018. Application of the tilt angle of the balanced total horizontal derivative filter for the interpretation of potential field data. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 59(2).
- Fairhead, J.D., Bennett, K.J., Gordon, D.R.H., & Huang, D., 1994. Euler: Beyond the “black box”. In 64th Annual International Meeting, Expanded Abstracts (pp. 422-424). SEG.



- Stavrev, P.Y., 1997. Euler deconvolution using differential similarity transformations of gravity or magnetic anomalies [Link]. *Geophysical Prospecting*, 45(2), pp.207-246.
- Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47(1), pp.31-37.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1), pp.134-150.
- Williams, S.E., Fairhead, J.D. and Flanagan, G., 2005. Comparison of grid Euler deconvolution with and without 2D constraints using a realistic 3D magnetic basement model. *Geophysics*, 70(3), pp.L13-L21.
- Williams, S., Fairhead, J.D. and Flanagan, G., 2003. Grid based Euler deconvolution: Completing the circle with '2D constrained Euler'. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003* (pp. 576-579). Society of Exploration Geophysicists.
- Pham, L.T., Oksum, E., Vu, M.D., Vo, Q.T., Du Le-Viet, K. and Eldosouky, A.M., 2021. An improved approach for detecting ridge locations to interpret the potential field data for more accurate structural mapping: A case study from Vredefort dome area (South Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 175, p.104099.
- Pham, L.T., Oksum, E., Do, T.D., Nguyen, D.V. and Eldosouky, A.M., 2021. On the performance of phase-based filters for enhancing lateral boundaries of magnetic and gravity sources: a case study of the Seattle uplift. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2), pp.1-11.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.T. and Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55(1), pp.80-91.
- Reid, A.B., Ebbing, J. and Webb, S.J., 2014. Avoidable Euler errors—the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophysical Prospecting*, 62(5), pp.1162-1168.
- Roest, W.R., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), pp.116-125.
- Ruppel, A., Jacobs, J., Eagles, G., Läufer, A. and Jokat, W., 2018. New geophysical data from a key region in East Antarctica: Estimates for the spatial extent of the Tonian Oceanic Arc Super Terrane (TOAST). *Gondwana Research*, 59, pp.97-107.
- Salem, A. and Ravat, D., 2003. A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data. *Geophysics*, 68(6), pp.1952-1961.
- Santos, T.A., 2003, September. Euler deconvolution applied to potential field data from the Parnaíba basin, Brazil. In *8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society* (pp. cp-168). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Silva, J.B. and Barbosa, V.C., 2003. 3D Euler deconvolution: Theoretical basis for automatically selecting good solutions. *Geophysics*, 68(6), pp.1962-1968.
- Peace, A.L., Welford, J.K., Geng, M., Sandeman, H., Gaetz, B.D. and Ryan, S.S., 2018. Rift-related magmatism on magma-poor margins: Structural and potential-field analyses of the Mesozoic Notre Dame Bay intrusions, Newfoundland, Canada and their link to North Atlantic Opening. *Tectonophysics*, 745, pp.24-45.



## Improvement of the accuracy of calculations in determination of the spatial location of buried geological structures by restricting the Euler-3D deconvolution depth estimation method using combination of Tilt angle derivatives

Sina Shirani<sup>1,2</sup>, Ali Nejati Kalateh<sup>3\*</sup> and Amin Roshandel Kaho<sup>3</sup>

1- PhD Candidate, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

2- Department of Geophysics, Afagh Pouyandegan Exir Earth Resource Exploration Company, Mashhad, Iran.

3- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Received: 2 January 2021; Accepted: 6 April 2021

Corresponding author: nejati@shahroodut.ac.ir

### Keywords

Potential methods  
Euler deconvolution  
Magnetic anomaly  
Tilt derivatives

### Extended Abstract

#### Summary

Local phase filters such as vertical tilt derivative (TDR) and horizontal tilt derivative (TDX) are extensively used to interpret magnetic data. We use two combinations of these filters, namely TDR - TDX and TDR + TDX, to design a constraining mask that guides the Euler deconvolution moving data window. The TDR - TDX filter produces sharp peaks over the centers of the sources, while the TDR + TDX filter generates plateaus over them. Motivated by previous

approaches that make use of Laplacian filter or analytic signal to constrain the Euler deconvolution window, we compute the solutions for windows centered at points that (1) have positive values of TDR - TDX and (2) are contained in the plateaus of TDR+ TDX. The use of both criteria improves the selection of source-related points while reducing the number of spurious ones. Our method is tested on synthetic anomalies due to dike-like sources, and also, on field data from an area in southeast of Iran. The experiments show that the use of a constraining mask based on combined tilt filters produces Euler solutions that are more contiguous and less sensitive to noise than the traditional methods.

### Introduction

In this research work, we focus on estimating the depth of magnetic anomalies due to dikes. The dike model is useful for the analysis of magnetic data because, despite being a very specific application (Blakely, 1996), it can be generalized to a range of significant two-dimensional geological structures (McGrath and Hood, 1970). For instance, the thin sheet and the contact models can be seen as limiting cases of the dike model, as demonstrated by Nelson (1988). In addition, quantitative methods based on dike models are important interpretation tools in mineral and hydrocarbon prospecting (McGrath and Hood, 1970) besides being essential in studies ahead of coal mining (Dentith and Mudge 2014).

### Methodology and Approaches

In this study, an approach termed Tilt Euler deconvolution has been proposed. This method combines vertical (TDR) and horizontal (TDX) tilt derivatives (Miller and Singh 1994; Cooper and Cowan 2006) to design a mask that restricts the regions where the Euler deconvolution is computed. These regions are located around the peaks of TDR - TDX combined filter. Because it is not easy to distinguish source-related peaks from noise, we select only TDR - TDX points that fall within plateaus defined by another combination of filters, namely TDR + TDX. Using synthetic and field data, we demonstrate that our method is capable of selecting solutions that are clearly related to causative sources as well as capable of significantly decreasing the number of spurious solutions. The synthetic model has been used to assess the robustness of the Euler deconvolution algorithm against interference between sources as well as noise.

### Results and Conclusions

Interpreting magnetic anomalies using Euler deconvolution demands handling a huge number of spurious solutions. Although post-processing procedure are traditionally used, our method is found to be capable of removing spurious solutions while preserving a significant number of physical solutions that makes the sources location easily recognized. We have improved the previously proposed techniques for Euler deconvolution using a combination of vertical (TDR) and horizontal (TDX) tilt derivatives. Our method can better distinguish noise from true anomalies. The effectiveness of tilt Euler

**2022, VOL 8, No 2**

deconvolution is due to constraining solutions to the plateaus of  $TDR + TDX$ , and avoiding the need of data smoothing tools, such as the Henning convolution filter. Such an strategy to distinguish true maximal values of  $TDR - TDX$  from noise might be useful to other semi quantitative techniques.

---