



مقاله پژوهشی

توانایی فیلتر لجستیک بهبود یافته در تعیین گوشه ها و مرزهای جانبی آنومالی های گرانی و مغناطیسی توزگولو ترکیه

احمدالوندی^{۱*}، هازل دنیز توکتای^۲، لوآن ثان فام^۳

۱. اداره پژوهش، نوآوری و فناوری، دانشگاه جامع علمی کاربردی، واحد استان همدان، ایران، aalvandi@uast.ac.ir

۲. گروه مهندسی ژئوفیزیک، دانشگاه استانبول، استانبول، ترکیه، hazel.deniztoktay@iuc.edu.tr

۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه علوم، دانشگاه ملی ویتنام، هانوی، ویتنام، luanpt@hus.edu.vn

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۶ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰

چکیده

مهم ترین مشکل استفاده از فیلترهای تعیین گوشه، تعیین مرز آنومالی های گرانی و مغناطیسی با عمق متفاوت و ادغام اثر آنومالی های مجاور است که به صورت پخش و هاله ای در نقشه های ژئوفیزیکی نمایان می شوند. برای رفع این مشکل در سال های اخیر، فیلترهای مختلف با کارایی متفاوتی ارائه شده است. معمولاً فیلترهای تعیین گوشه ترکیبی از گرادیان های افقی و قائم با مرتبه های مختلف برای تعیین مرز و گوشه آنومالی های گرانی و مغناطیسی با کیفیت و دقت متفاوت است. در این پژوهش کارایی فیلترهای تعیین گوشه آنومالی های میدان پتانسیل شامل فیلترهای مشتق (مشتق افقی کل)، سیگنال تحلیلی، فاز محلی (زاویه تیلت، زاویه تتا، تانژانت های پیربولیک زاویه تیلت و مشتق کل افقی نرمال سازی شده)، پردازش تصویر (فیلتر سایه روشن)، عملگر مشتق تعمیم یافته و فیلتر جدید لجستیک بهبود یافته بر روی داده های میدان پتانسیل، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. کارایی فیلترهای تعیین گوشه بر روی دو مدل مصنوعی گرانی و مغناطیسی مختلط بدون نوفه و همراه با نوفه گاوسی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد، فیلتر لجستیک بهبود یافته در مقایسه با سایر فیلترهای تعیین گوشه، دقت و کیفیت بهتری در تعیین گوشه و مرز آنومالی ها با دامنه های مختلف دارد و از ترسیم مرزهای غیرواقعی و کاذب که کار تفسیر را سخت تر می کند، اجتناب می کند. همچنین میزان حساسیت این فیلتر نسبت به نوفه بر روی نقشه های ادامه فراسو در مقایسه با فیلترهای فازی و مرسوم به مراتب کمتر است. در ادامه، اعمال این فیلتر بر روی داده های گرانی بوگه منطقه توزگولو (دریاچه نمک) ترکیه نشان داده که این فیلتر به خوبی قادر به تشخیص مرز آنومالی ها، حتی آنومالی های عمیق محدوده مورد مطالعه است. در مجموع نتایج به دست آمده به کمک فیلترهای تعیین گوشه به ویژه فیلتر لجستیک بهبود یافته می تواند به خوبی در تفسیر کیفی برای مدل سازی سه بعدی آنومالی های زیرسطحی و تعیین مرز و شناسایی گسل های اولیه و ثانویه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

میدان پتانسیل، فیلتر لجستیک بهبود یافته، فیلترهای تعیین گوشه، دریاچه نمک، ترکیه.

۱- مقدمه

فیلترهای تعیین گوشه در مراحل تفسیر داده‌های گرانی و مغناطیسی و تعیین مرزهای ساختارهای زمین‌شناسی، خطوط گسل و یا واحدهای سنگی با چگالی یا طبیعت مغناطیسی متفاوت، به کاربرده می‌شوند [۶]. این فیلترها اصولاً بر مبنای گرادیان‌های افقی و قائم داده‌های گرانی و مغناطیسی تصحیح یافته به قطب تعریف می‌شوند. البته به دلیل استفاده از مشتقات میدان پتانسیل، تاحدی میزان تاثیر نوفه در فیلترهای تعیین گوشه زیاد بوده است که این موضوع باعث ایجاد ابهام در تفسیر نقشه‌های آنومالی گرانی و مغناطیسی می‌شود [۲۱]. همچنین نیاز به آشکارسازی بهتر آنومالی‌های عمیق با دامنه ضعیف‌تر در کنار آنومالی‌های سطحی با دامنه قوی‌تر منجر به معرفی فیلترهای گوناگونی با کیفیت و توانایی متفاوت در دهه‌های اخیر شده است. مرسوم‌ترین فیلتر تعیین مرز، فیلتر گرادیان افقی کل (THD) است که توسط کوردل و گراوچ^۱ (۱۹۸۵) با استفاده از گرادیان‌های افقی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی معرفی شده است. سیگنال تحلیلی (AS) از جمله روش‌هایی است که نبیغیان^۲ (۱۹۷۲)، روئست^۳ و همکاران (۱۹۹۲) معرفی کرده‌اند و به طور گسترده در تفسیر آنومالی‌های مغناطیسی و گرانی از آن استفاده شده است [۱۸]. میلر و سینگ^۴ (۱۹۹۴)، زاویه تیلت (TA) را به عنوان یک فیلتر فاز محلی برای برجسته‌سازی همزمان مرز آنومالی‌های مغناطیسی و گرانی عمیق و کم‌عمق معرفی کردند. این فیلتر برابر با معکوس تانژانت نسبت مشتق قائم به مشتق افقی کل است. وینز^۵ و همکاران (۲۰۰۵)، فیلتر زاویه تتا (TM) را که برابر با نسبت مشتق افقی کل به سیگنال تحلیلی است را برای تعیین گوشه آنومالی‌های میدان پتانسیل معرفی کردند. این فیلتر در قیاس با زاویه تیلت دقت مناسب‌تری در تعیین مرز آنومالی‌های عمیق دارد و تفسیر آن ساده‌تر است [۲۶]. کوپر و کوآن^۶ (۲۰۰۶)، فیلتر مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده (TDX) را که نسبت گرادیان افقی کل به قدر مطلق مشتق قائم است را معرفی کردند. فیلتر مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، معکوس فیلتر زاویه تیلت است. فیلتر دیگر تعیین گوشه، فیلتر زاویه تیلت هایپربولیک (HTA) است. این فیلتر در مقایسه با فیلتر زاویه تیلت، دقت مناسب‌تری در تعیین مرز آنومالی دارد [۱۰] [۱].

البته ایجاد کانتورهای کاذب منفی در نقشه، از معایب این فیلتر به شمار می‌رود. علاوه بر فیلترهای گرادیان و فیلترهای فازی که به صورت گسترده و مرسوم در تعیین گوشه آنومالی‌های میدان پتانسیل استفاده می‌شود، برخی پژوهشگران از فیلترهای پردازش تصویر، مانند فیلتر سایه روشن (SS) نیز در تفسیر نقشه‌های میدان پتانسیل استفاده کرده‌اند. عمده مزیت این فیلتر، حساسیت کمتر آن نسبت به سایر فیلترها به نوفه است از طرفی با تغییر ارتفاع منبع نورانی از سطح داده‌ها و آزمایش منبع نورانی، می‌توان به تفسیر بهتری دست پیدا کرد [۹]. البته کوپر و کوآن در سال ۲۰۱۱ با استفاده از ترکیب روابط فیلترهای فاز محلی و فیلتر سایه روشن، فیلتر عملگر مشتق تعمیم‌یافته (GDO) را نیز معرفی کردند. این فیلتر نسبت به عمق قرارگیری آنومالی و نوفه دارای حساسیت کمتری نسبت به فیلترهای زاویه تیلت، نقشه تتا، سایه روشن و نظایر آن است. از طرفی قابلیت کنترل حساسیت جهتی فیلتر عملگر مشتق تعمیم یافته، این فیلتر را نسبت به فیلتر زاویه تمایل و نقشه تتا متمایز ساخته است. این فیلتر در نرم‌فزارهای تجاری مانند ژئوسافت ۲۰۱۵ اهمیت خوبی دارد [۲۲]. فام^۷ و همکاران (۲۰۲۰) فیلتر جدید تابع لجستیک بهبود یافته (IL) را برای تعیین گوشه آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی با استفاده از مفهوم تابع لجستیک و نسبت گرادیان قائم THD به دامنه گرادیان افقی THD معرفی کردند. این روش در مقایسه با سایر روش‌های تعیین گوشه که تا امروز معرفی شده حساسیت کمتری نسبت به نوفه و دقت بالاتری نیز در تشخیص مرز و گوشه آنومالی‌های مغناطیسی و گرانی دارد [۲۰]. البته باید دقت شود که به فیلترهای تعیین گوشه آنومالی نمی‌توان به عنوان یک مرجع بدون خطا در تشخیص لبه‌ها و ناپیوستگی‌ها اطمینان کرد [۲۱] و [۲۲]. در این پژوهش برای بررسی توانایی و قابلیت فیلترهای اشاره شده ابتدا دو مدل مصنوعی گرانی و مغناطیسی مختلط (بدون نوفه و همراه با نوفه گاوسی) بررسی و در نهایت این روش‌ها بر روی داده‌های میدانی محدوده توزگولو^۸ (دریاچه نمک) ترکیه اعمال و با یکدیگر مقایسه شده است. هدف اصلی این پژوهش ضمن معرفی فیلتر جدید لجستیک بهبود یافته، بررسی برخی از فیلترهای متداول تعیین مرز آنومالی‌های مغناطیسی و گرانی است که در سال‌های اخیر

^۱Wijns^۲Cooper and Cowan^۳Pham^۴Tuzgolu^۱Cordell and Grauch^۲Nabighian^۳Roest^۴Miller and Singh

محبوبیت بیشتری دارد.

برابر با صفر است. البته الزاما این فیلتر، یک فیلتر تعیین گوشه نیست [۲۰].

۲-۴- هایپربولیک زاویه تیلت

فیلتر هایپربولیک زاویه تیلت به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود [۱۰]:

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

در این فیلتر از قسمت حقیقی تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت برای تعیین گوشه آنومالی استفاده می‌شود. مقدار ماکزیمم HTA گوشه آنومالی را در نقشه ترسیم شده مشخص می‌کند. حساسیت این فیلتر به نوفه در مقایسه با فیلتر زاویه تیلت در نقشه‌های ادامه فراسو، کمتر است. البته کانتورهای منفی ایجاد شده با این فیلتر، باعث پیچیده‌تر شدن تفسیر می‌شود. این فیلتر بیشتر مرز افقی آنومالی‌های دایره‌ای را آشکار می‌کند [۱۰].

۲-۵- نقشه تتا

فیلتر نقشه تتا به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود [۲۶]:

$$TM = \cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{|AS|} \quad (5)$$

در این فیلتر مشتق افقی کل با دامنه سیگنال تحلیلی بهنجار شده است. اندازه زاویه تتا نیز بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند. دقت تشخیص گوشه با فیلتر تتا از فیلتر مشتق افقی کل و زاویه تیلت بیشتر و حساسیت آن نیز نسبت به افزایش عمق کمتر است.

۲-۶- مشتق کل افقی نرمال سازی شده

فیلتر مشتق کل افقی نرمال سازی شده در واقع مشتق افقی کل است که با گردایان قائم آنومالی نرمالیزه شده است. این فیلتر به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود [۱۰]:

$$TDX = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial F}{\partial z}\right|} \right] \quad (6)$$

این فیلتر در مقیاسه با فیلتر زاویه تیلت، جای صورت و مخرج کسر عوض شده است و در تعیین گوشه آنومالی رفتاری شبیه به فیلتر زاویه تتا دارد. البته این فیلتر در تعیین مرز آنومالی‌های عمیق از فیلتر مشتق افقی کل عملکرد بهتری دارد.

۲- فرمول بندی فیلترهای تعیین گوشه

در این بخش روابط حاکم بر فیلترهای تعیین گوشه آنومالی‌های میدان پتانسیل بررسی و ارایه شده است.

۲-۱- مشتق افقی کل

فیلتر مشتق افقی کل به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۸] و [۱۰]:

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

که در آن:

F مقدار آنومالی گرانی و یا آنومالی مغناطیسی تصحیح یافته به قطب $\frac{\partial F}{\partial x}$ و $\frac{\partial F}{\partial y}$ گردایان‌های افقی آنومالی گرانی و یا مغناطیسی

مقدار ماکزیمم THD گوشه‌های آنومالی را مشخص می‌کند.

۲-۲- سیگنال تحلیلی (مشتق کل)

دامنه سیگنال تحلیلی به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود [۲۴]:

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

که در آن، $\frac{\partial F}{\partial z}$ گردایان قائم آنومالی گرانی و یا آنومالی مغناطیسی تصحیح یافته به قطب است. ماکزیمم مقدار سیگنال تحلیلی بر روی لبه‌های آنومالی قرار می‌گیرد.

۲-۳- زاویه تیلت

فیلتر زاویه تیلت، یک فیلتر فاز محلی متداول در تعیین گوشه آنومالی‌های میدان پتانسیل است که به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود [۱۷]:

$$TA = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (3)$$

در این فیلتر مشتق قائم آنومالی گرانی و یا مغناطیسی استفاده از گردایان افقی کل (THD)، نرمالیزه شده است. تفسیر نقشه زاویه تیلت نسبت به سیگنال تحلیلی آسان‌تر است اما باید در نظر داشت که این فیلتر در تعیین مرز آنومالی‌های عمیق در مقایسه با سایر فیلترهای فاز محلی (مشتق کل افقی نرمال سازی شده، هایپربولیک زاویه تیلت، نقشه تتا) تا حدودی ناکارآمد است. مقدار زاویه تیلت در بالای آنومالی مثبت و در گوشه‌های آنومالی

۷-۲- فیلتر پردازش تصویری اثر سایه روشن

فیلتر اثر سایه روشن یک فیلتر دورسنجی است که بر اساس مدل لامبریتان^۱ به صورت رابطه ۷ تعریف می شود [۹]:

$$S = \frac{1 + (-\cos\theta \tan\varphi \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)) + (-\sin\theta \tan\varphi \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right))}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \sqrt{1 + (-\cos\theta \tan\varphi)^2 + (-\sin\theta \tan\varphi)^2}}} \quad (7)$$

که در آن:

θ : ارتفاع منبع نورانی (یا جهت گرادیان) از سطح داده‌ها

φ : آزیموت منبع نورانی (یا جهت گرادیان) از سطح داده‌ها

θ در راستای قائم و φ در خلاف جهت عقربه‌های ساعت سنجیده می‌شود باید در نظر داشت که فیلتر اثر سایه روشن در بین فیلترهای دورسنجی کیفیت مناسبی دارد و می‌تواند به عنوان روش کمکی در کنار سایر فیلترهای تعیین گوشه آنومالی استفاده شود [۹] و [۱۱]. این فیلتر با هر درجه حساسیتی برای کسب نتیجه دلخواه قابل استفاده است. البته برای چشمه‌های قائم و بدون زاویه (مانند دایک قائم) و آنومالی‌های منفرد مانند کره، ترجیحا بهتر است از زوایای صفر و ۹۰ درجه برای ترسیم نقشه‌ها استفاده شود [۲۳]. مفسر در انتخاب زوایای فیلتر به منظور کسب نتیجه دلخواه آزاد و به ازای هر مقدار زاویه، گوشه‌های آنومالی با کیفیت متفاوت تعیین می‌شود.

۸-۲- فیلتر عملگر مشتق تعمیم یافته

فیلتر عملگر مشتق تعمیم یافته از سیگنال تحلیلی برای بالانس یک ترکیب از مشتقات افقی و قائم استفاده می‌کند که به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود [۱۱]:

$$GDO = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \sin\theta + \frac{\partial F}{\partial y} \cos\theta\right) \cos\varphi + \frac{\partial F}{\partial z} \sin\varphi}{AS} \quad (8)$$

که در آن:

θ : آزیموت با محور y

φ : ارتفاع زاویه‌ای

عملگر مشتق تعمیم یافته فاقد دیمانسیون است و مشتق میدان پتانسیل در هر سه بعد را شامل می‌شود که به ازای ارتفاع زاویه‌ای صفر و یا ۹۰ درجه بهترین پاسخ برای ترسیم مرزهای افقی چشمه‌های قائم و آنومالی‌های منفرد شبیه منشور، استوانه افقی، کره و نظایر آن معمولا حاصل می‌شود [۲۳]. فیلتر GDO با توجه به مقدار φ به لبه‌ها، یا تمام چشمه و یا هر جایی در بین آن‌ها می‌تواند پاسخ دهد و مانند فیلتر SS مفسر در انتخاب

زوایای θ و φ برای کسب نتیجه دلخواه کاملا آزاد است [۱۱]:

۹-۲- فیلتر لجستیک بهبود یافته

فیلتر لجستیک بهبود یافته به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود

[۲۰]:

$$IL = \frac{1}{1 + \exp\left[-P \left(\frac{\frac{\partial THD}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial y}\right)^2}} - 1 \right) + 1\right]} \quad (9)$$

که در آن:

$\frac{\partial THD}{\partial z}$: گرادیان قائم THD

دامنه گرادیان افقی THD: $\sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial y}\right)^2}$

P : یا کنترل‌کننده فیلتر یک عدد ثابت و مثبت بین صفر تا ۱۰

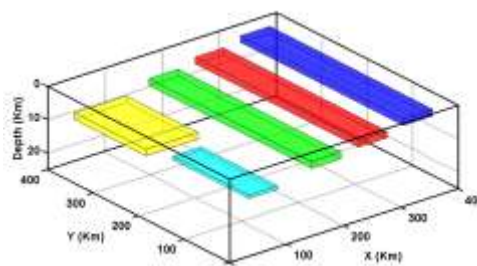
البته بهترین مقدار برای متغیر P ، انتخاب یکی از اعداد صحیح بین ۲ تا ۵ است که مقدار آن توسط مفسر انتخاب و تعیین می‌شود [۲۰]. این فیلتر در واقع ترکیبی از گرادیان‌های افقی و تابع لجستیک است که در مقایسه با فیلترهای فازی و مرسوم، کیفیت و دقت مناسب‌تری در تعیین مرز افقی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی دارد و از ترسیم مرزهای غیرواقعی و کاذب که کار تفسیر نقشه‌های تعیین گوشه را با مشکل مواجه می‌کند، اجتناب می‌کند [۲۰]. همچنین با افزایش عمق قرارگیری منبع مولد آنومالی، پاسخ این فیلتر بر روی تصاویر تا حدود زیادی کیفیت خود را از دست نمی‌دهد و مرزهای افقی به صورت هاله‌ای و پخش نمایان نمی‌شوند. ضمنا این فیلتر وضوح و عملکرد خوبی در تفکیک و برآورد مرز توده‌های مختلط و مجاور هم دارد و به خوبی دامنه‌های مختلف مربوط به چشمه‌های گوناگون را از یکدیگر تفکیک و مجزا می‌کند. مقدار ماکزیمم فیلتر لجستیک بهبود یافته به طور همزمان بر روی مرزهای افقی با دامنه‌های قوی و ضعیف نیز قرار می‌گیرد. همچنین این فیلتر در شرایط نوفه‌ای نیز به دلیل مستقل بودن آن از عمق چشمه برای تعیین مرز ساختارهای عمیق زمین‌شناسی و تعیین مرز ساختارهای زیرسطحی مولد آنومالی با عمق‌های متفاوت، عملکرد مطلوبی بر روی نقشه‌های ادامه فراسو دارد. البته در این فیلتر نیز مرز آنومالی، پهن‌تر از مقدار واقعی ترسیم می‌شود که این مشکل در تمام فیلترهای تعیین مرز مانند فیلتر مشتق افقی کل، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، زاویه تنا و نظایر آن مشترک است [۲۰].

^۱Lamberitan model

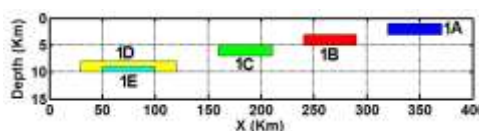
۳- مدل‌سازی مصنوعی

۳-۱- مدل گرانی

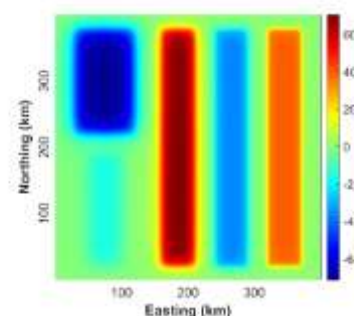
در این بخش توانایی فیلترهای پیشنهاد شده برای تعیین گوشه آنومالی مصنوعی گرانی مختلط با نوفه و بدون نوفه بررسی شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱- الف) نمایش سه بعدی آنومالی گرانی مصنوعی، ب) نمایش دوبعدی آنومالی گرانی مصنوعی و پ) آنومالی گرانی ایجاد شده با ۵ منشور مدفون بر حسب میلی گال

نمایش دوبعدی و سه بعدی مدل گرانی به همراه آنومالی گرانی تولید شده بر حسب میلی گال در شکل ۱ نمایش داده شده است. پارامترهای مدل مصنوعی نیز در جدول ۱ شرح داده شده است. مدل اول در یک شبکه منظم 401×401 در جهت شمال به جنوب و شرق به غرب با فاصله نمونه برداری یک کیلومتر در محیط برنامه متلب تولید شده است. سه مدل 1A، 1B و 1C دارای اندازه یکسان اما عمق و چگالی‌های متفاوت اند. کمترین عمق در مدل مصنوعی اول مربوط به چشمه 1A و بیشترین عمق مربوط به چشمه 1E است. ۴ چشمه‌های 1A، 1B، 1C و 1D دارای ضخامت یکسان و چشمه 1E دارای کمترین ضخامت است

(جدول ۱).

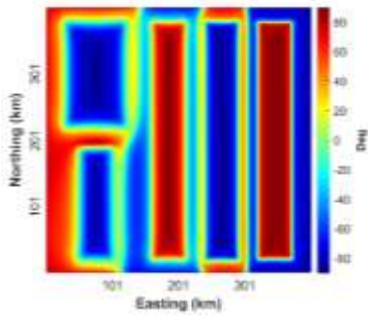
جدول ۱- پارامترهای چگالی و هندسی مدل اول

پارامترها/ برجسب مدل	1A	1B	1C	1D	1E
عمق بالا (کیلومتر)	۱	۳	۵	۸	۹
عمق پایین (کیلومتر)	۳	۵	۷	۱۰	۱۰
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰٫۵	-۰٫۵	۱	-۱	-۰٫۵
عرض (کیلومتر)	۵۰	۵۰	۵۰	۹۰	۵۰
طول (کیلومتر)	۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۶۰	۱۷۰

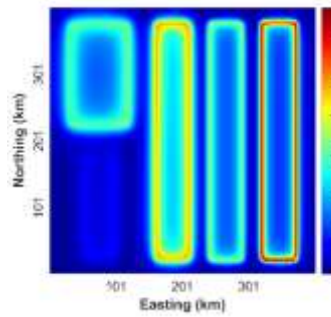
نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر THD، AS، TA، TM، HTA، TDX، SS (با ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه)، GDO (با ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه) و فیلتر IL در شکل ۲ نمایش داده شده است. از آنجا که هدف مقایسه روش‌های گوناگون در مدل‌های مصنوعی نزدیک کردن پارامترها و شرایط به مدل‌ها و آنومالی‌های واقعی است، ابتدا مدل‌های بدون نوفه بررسی و سپس مدل مصنوعی گرانی با ۵ درصد نوفه گاوسی بررسی و تست شده است. نتایج به دست آمده از روش‌های THD، AS، TA، TM، HTA، TDX، SS (ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه)، GDO (ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه) و فیلتر IL برای مدل مصنوعی آلوده به نوفه در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در شکل ۲ الف) و ب) به ترتیب از روش‌های THD و AS استفاده شده که مرز افقی چشمه‌های دارای عمق کمتر (منشور A، B و C) مشخص شده اما مرز چشمه‌های عمیق به صورت تار و ناواضح نمایش داده شده است. البته AS در تعیین گوشه آنومالی‌ها نسبت به THD ضعیف‌تر عمل می‌کند و مرز توده‌های کم عمق نیز به صورت تار و پهن نمایش داده شده است. به طور کلی فیلترهای THD و AS برای تعیین گوشه منابع عمیق پاسخگو نیستند و قادر به تعیین لبه‌های منابع عمیق و کم عمق به طور همزمان نیستند. [۲۰]. در شکل ۲ پ) و ت) از فیلترهای TA و HTA برای تعیین گوشه مدل مصنوعی اول استفاده شده که در هر دو روش، سیگنال‌های حاصل از چشمه‌های کم عمق و عمیق متعادل شده است که فیلتر HTA توانایی و وضوح بیشتری نسبت به TA دارد. البته از سویی بزرگترین ضعف این فیلتر، ترسیم منحنی‌های پربندی در بین ساختارهای عمیق و کم عمق است که به

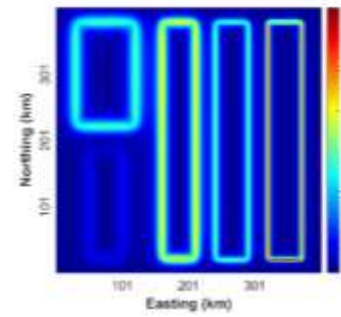
صورت ناخواسته در نقشه نمایان می‌شود و کار تفسیر آن را مشکل می‌کند.



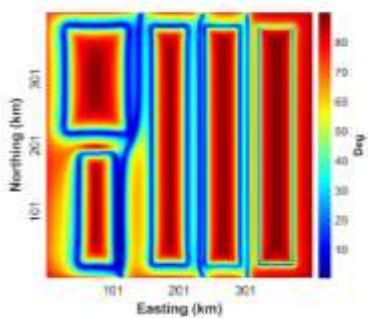
(ا)



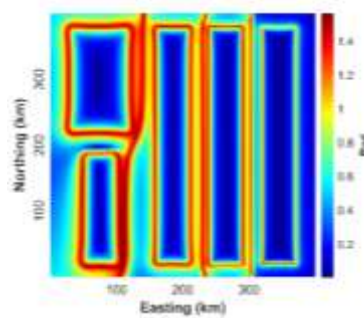
(ب)



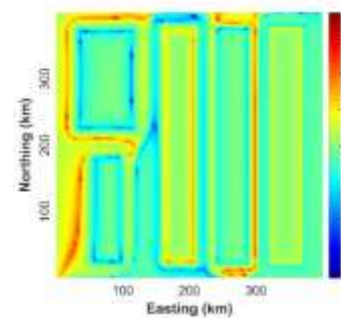
(ج)



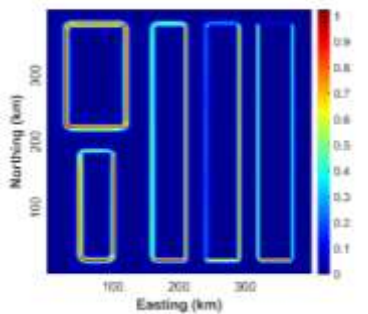
(د)



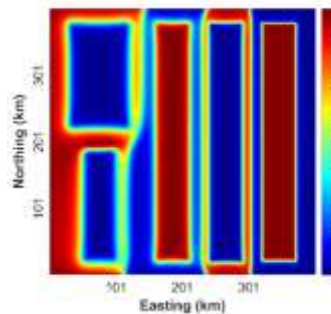
(ه)



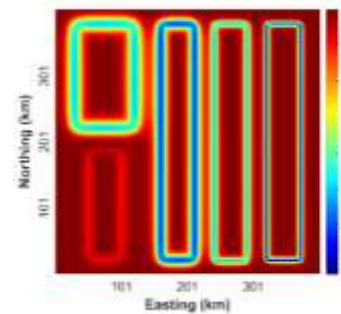
(و)



(ز)

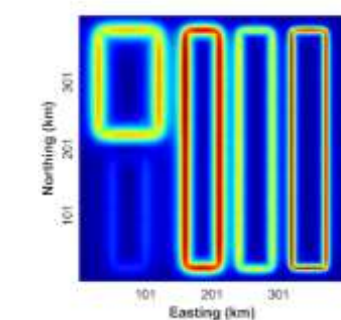
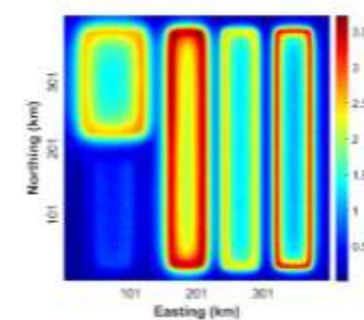
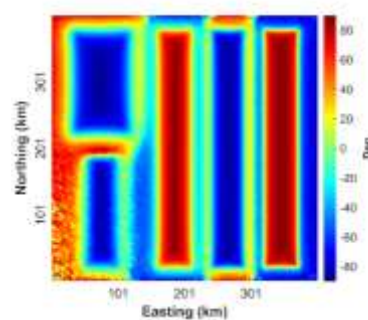


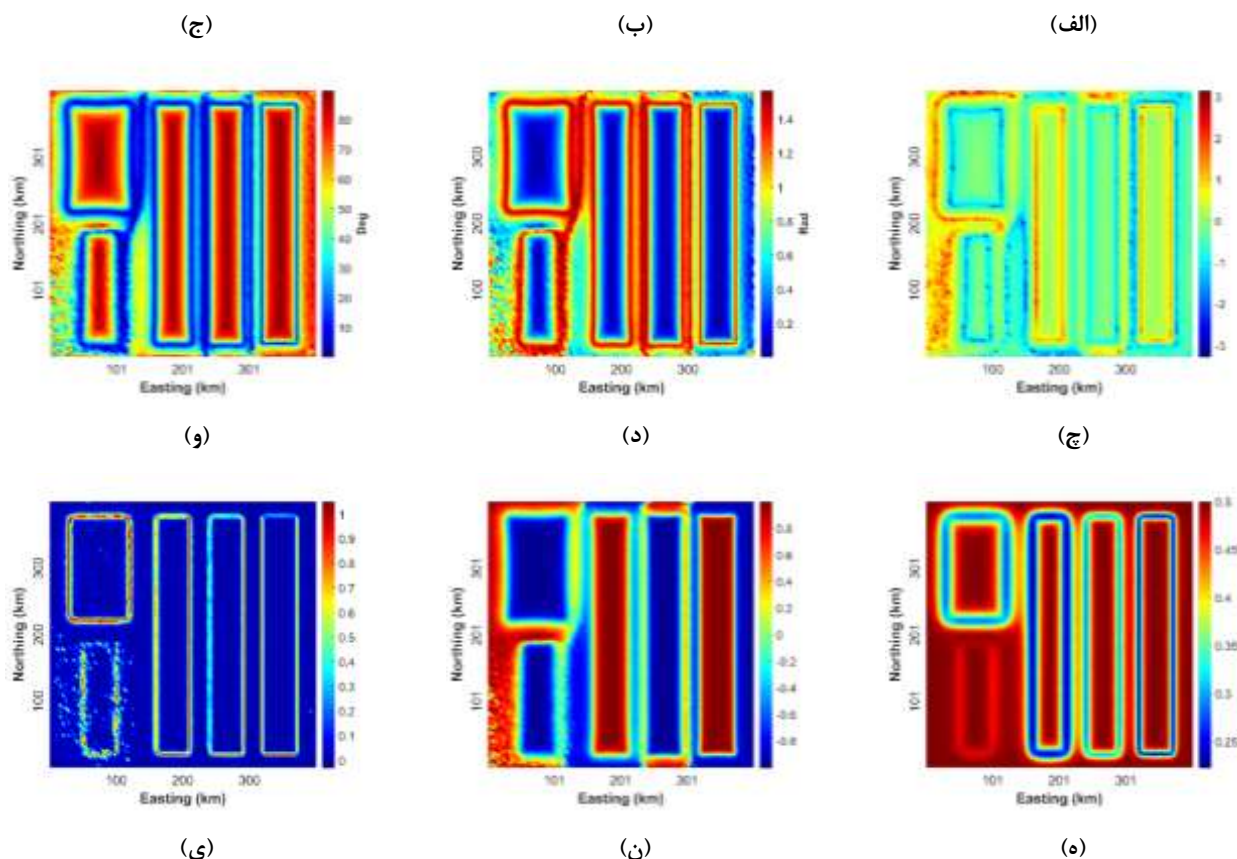
(ح)



(ط)

شکل ۲- تعیین گوشه آنومالی گرانی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف: الف) گرادبان افقی کل، ب) نقشه سیگنال تحلیلی، ج) زاویه تیلت، چ) هایپربولیک زاویه تیلت، د) مشتق کل افقی نرمال سازی شده، و) نقشه تنا، ه) سایه روشن، ن) عملگر مشتق تعمیم یافته، ی) فیلتر لجستیک بهبود یافته ($P=2$ فرض شده است)





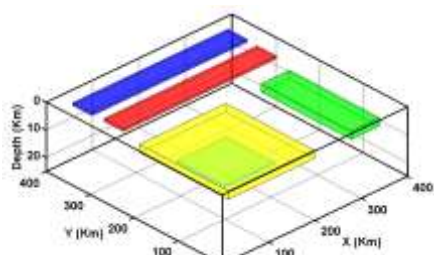
شکل ۳- تعیین گوشه آنومالی گرانی مصنوعی آلوده به نوفه با فیلترهای مختلف پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو (یک کیلومتر): (الف) گرادیان افقی کل، (ب) نقشه سیگنال تحلیلی، (ج) زاویه تیلت، (چ) هایپربولیک زاویه تیلت، (د) مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، (و) نقشه تنا، (ه) سایه روشن، (ن) عملگر مشتق تعمیم یافته، (ی) فیلتر لجستیک بهبود یافته ($P=2$ فرض شده است)

بیشتر برای ساختارهای کروی مناسب است [۹]. در شکل ۲ (ی) از فیلتر IL در تعیین مرز آنومالی‌های گرانی استفاده شده است. تفسیر این فیلتر به دلیل عدم نمایش چشمه‌ها به صورت پخش و هاله‌ای و حذف پربندهای جعلی و اضافی به مراتب آسان‌تر و تصویر کیفیت و دقت مناسب‌تری در مقایسه با سایر فیلترهای تعیین گوشه دارد. به طور کلی قرار گرفتن ماکزیمم دامنه بر روی لبه آنومالی و متعادل ساختن سیگنال‌ها، از ویژگی‌های اساسی این فیلتر است.

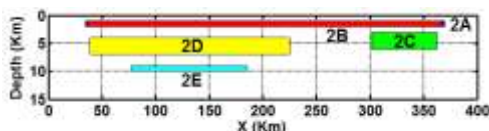
در ادامه نتایج به دست آمده بر روی مدل مصنوعی گرانی آغشته به نوفه بررسی شده است (شکل ۳) که نتایج تقریباً مشابهی در تعیین گوشه با مدل عاری از نوفه در شکل ۲ دارد. برای کاهش اثرات نوفه، فیلتر ادامه فراسو (۱ کیلومتر) نیز بر روی داده‌ها اعمال شده است. در شکل ۳ (الف) و (ب) به ترتیب از روش‌های THD و AS استفاده شده که مرز منابع عمیق تعیین نشده و با افزایش عمق چشمه‌ها، از وضوح نتایج کاسته و مقدار ماکزیمم دامنه پهن‌تر و مرزها با دقت کمتری مشخص شده است. همچنین میزان تاثیرپذیری از نوفه در نقشه سیگنال تحلیلی به

در شکل ۲ (د) از فیلتر TDX و شکل ۲ (و) از فیلتر TM استفاده شده که نتایج تقریباً مشابهی در تعیین گوشه آنومالی‌های گرانی در وضعیت بدون نوفه دارند و مرز آنومالی‌های عمیق و کم‌عمق به طور همزمان ترسیم شده است. در نقشه زاویه تنا مقدار مینیمم بر روی مرز و در نقشه مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده مقدار ماکزیمم بر روی مرز چشمه‌ها قرار گرفته است. البته ترسیم خطوط پربندی کاذب مینیمم و ماکزیمم در بین چشمه‌ها و پهن‌تر نشان دادن لبه چشمه‌ها، بزرگترین مشکل در تفسیر تصاویر است. در شکل ۲ (ه) و (ن) فیلترهای پردازش تصویری SS و GDO در تعیین گوشه آنومالی‌های گرانی مصنوعی به کار برده شده که در تعیین مرز آنومالی‌های سطحی و عمیق، فیلتر GDO دارای پاسخ مناسب‌تری نسبت به SS است. در نقشه GDO مرز افقی منابع عمیق و کم‌عمق به طور همزمان تعیین شده است البته لبه منابع با افزایش عمق پهن‌تر شده است. در نقشه SS لبه چشمه ID به صورت پهن و چشمه عمیق 1E به صورت تار و ناواضح ترسیم شده است. با تغییر زوایای می‌توان نتایج مختلفی کسب کرد اما در هر صورت به طور همزمان مرز آنومالی‌های عمیق و کم عمق مشخص نمی‌شود و این فیلتر

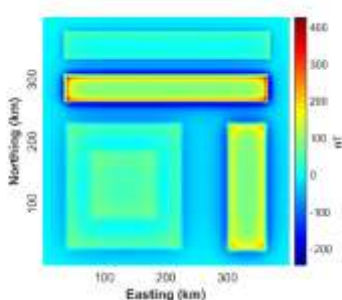
آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی، وابستگی شدیدی به زاویه میل مغناطیسی دارند [۲۰] بهتر است از داده‌های تصحیح یافته به قطب استفاده شود، بنابراین با فرض زاویه میل مغناطیسی زمین، ۹۰ درجه و زاویه انحراف مغناطیسی زمین صفر درجه، داده‌ها تولید شده است. در این مدل دو چشمه 2A و 2B دارای اندازه و عمق یکسان اما دارای خودپذیری متفاوت‌اند. کمترین عمق در مدل مصنوعی دوم مربوط به چشمه‌های 2A و 2B و بیشترین عمق مربوط به چشمه 2E است. ۳ چشمه 2A، 2B و 2E دارای ضخامت یکسان و چشمه‌های 2C و 2D دارای بیشترین ضخامت‌اند (جدول ۲). نتایج اعمال فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر AS، THD، TA، TM، HTA، TDX، SS (با ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه)، GDO (با ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه) و فیلتر IL در شکل ۵ نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۴- الف) نمایش سه بعدی آنومالی مغناطیسی، ب) نمایش دوبعدی آنومالی مغناطیسی، پ) آنومالی مغناطیسی ایجاد شده با ۵ منشور مدفون بر حسب نانو تسلا

جدول ۲- پارامترهای چگالی و هندسی مدل دوم

پارامترها/ برچسب مدل	2A	2B	2C	2D	2E
----------------------	----	----	----	----	----

دلیل وجود مشتق قائم در رابطه ۲ نسبت به فیلتر مشتق افقی کل بیشتر است. در شکل ۳ (ج) از فیلتر زاویه تیلت استفاده شده است. اگرچه پربندهای صفر، مرز چشمه‌ها را در این روش نشان می‌دهد اما تولید پربندهای کاذب صفر، کار تفسیر را سخت‌تر می‌کند و مقدار ماکزیمم دامنه زاویه تیلت بر روی چشمه قرار می‌گیرد. البته فیلتر در شرایط نوفه‌ای عملکرد مناسب و پاسخ مناسبی در برابر نوفه دارد. در شکل ۳ (چ)، فیلتر هایپربولیک زاویه تیلت مرز چشمه‌های عمیق و کم عمق را متعادل کرده است اما تولید پربندهای کاذب منفی اطراف منشورهای کم عمق و پربندهای اضافی مثبت در اطراف منشورهای عمیق، از معایب اصلی این فیلتر به شمار می‌آید. همچنین بر خلاف انتظار، مقدار مینیمم دامنه زاویه هایپربولیک زاویه تیلت بر روی مرزهای منابع عمیق قرار گرفته است. در شکل ۳ (د) از فیلتر TDX و شکل ۳ (و) از فیلتر TM استفاده شده است که اگر چه نسبت به فیلترهای گرادیان افقی کل، سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت توانایی بیشتری دارد اما ترسیم خطوط کاذب و جعلی بین چشمه‌ها از بزرگترین نقاط ضعف این فیلترها است. البته مرز واقعی به ویژه در منابع عمیق دورتر از مقدار واقعی نیز ترسیم شده است. در شکل ۳ (ه) از فیلتر سایه روشن و در شکل ۳ (ن) از فیلتر عملگر مشتق تعمیم یافته استفاده شده که فیلتر سایه روشن در تعیین چشمه عمیق 1E ناموفق عمل کرده است. فیلتر GDO در حضور نوفه نیز پاسخگو است. شکل ۳ (ی) توانایی فیلتر IL را در تشخیص گوشه‌های مدل مصنوعی گرانی نمایش داده است. تفکیک پذیری این فیلتر و کیفیت و وضوح تصاویر نسبت به سایر فیلترها بیشتر است. همچنین در این فیلتر از ترسیم پربندهای اضافی و جعلی که در تمام فیلترهای تعیین مرز مرسوم است، اجتناب شده و مرز چشمه‌های عمیق و کم عمق با دقت لازم ترسیم شده است. البته در این مدل وضوح و کیفیت ترسیم مرز افقی چشمه 1E در شرایط نوفه‌ای نامناسب است.

۲-۳- مدل مغناطیسی

در این بخش توانایی فیلترهای تعیین گوشه برای یک آنومالی مصنوعی مغناطیسی مختلط بدون نوفه و آلوده به نوفه گاوسی بررسی شده است.

نمایش دوبعدی و سه بعدی آنومالی به همراه شدت آنومالی مغناطیسی بر حسب نانوتسلا در شکل ۴ نمایش داده شده است. پارامترهای مدل مصنوعی در جدول ۲ شرح داده شده است. مدل در یک شبکه منظم ۴۰۱×۴۰۱ در جهت شمال به جنوب و شرق به غرب با فاصله نمونه برداری یک کیلومتر در محیط برنامه متلب تولید شده است. از آنجا که فیلترهای تعیین گوشه و مرز

عمق بالا (کیلومتر)	۱	۱	۳	۴	۹
عمق پایین (کیلومتر)	۲	۲	۶	۷	۱۰
خودپذیری مغناطیسی (A/m)	۱٫۱	۱٫۵	۱٫۲	۱٫۱	۱٫۳
عرض (کیلومتر)	۵۰	۵۰	۶۰	۱۹۰	۱۰۰
طول (کیلومتر)	۳۴۰	۳۴۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰
زاویه انحراف مغناطیسی (درجه)	۰	۰	۰	۰	۰
زاویه میل مغناطیسی (درجه)	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰

در ادامه به مدل مغناطیسی مصنوعی، ۵ درصد نوفه گاوسی اضافه شده است. نتایج به دست آمده از روش‌های AS، THD، TA، TM، HTA، TDX، SS (با ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه)، GDO (با ارتفاع منبع نورانی ۹۰ درجه و آزیموت منبع نورانی صفر درجه) و فیلتر IL در شکل ۶ نمایش داده شده است.

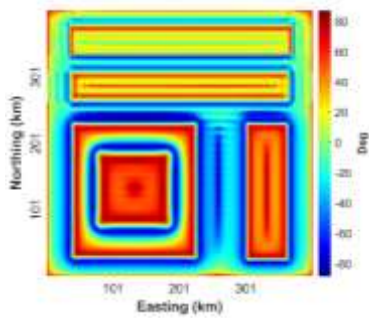
در شکل ۵ (الف) و (ب) به ترتیب از روش‌های THD و AS استفاده شده که هر دو فیلتر عملکرد نامناسبی در تعیین مرز چشمه‌ها دارند و لبه منشورها به صورت تار ترسیم شده است. تنها مرز منشور کم عمق 2B با فیلتر مشتق افقی کل و سیگنال تحلیلی تعیین شده است. در شکل ۵ (ج) و (چ) از فیلترهای TA و HTA برای تعیین گوشه استفاده شده که در قیاس با فیلترهای THD و AS مرز آنومالی‌های عمیق و کم عمق به طور همزمان تعیین شده که فیلتر HTA وضوح بیشتری نسبت به TA دارد. البته تولید کانتورهای منفی در اطراف منشورهای عمیق و کم عمق در این مدل مصنوعی، از معایب اصلی فیلتر HTA محسوب می‌شود. در شکل ۵ (د) از فیلتر TDX و شکل ۵ (و) از فیلتر TM استفاده شده که نتایج تقریباً مشابهی در تعیین گوشه آنومالی‌های مغناطیسی مصنوعی دارند. در این دو فیلتر مرز آنومالی‌های عمیق و کم عمق به طور همزمان ترسیم شده است. در TM مقدار مینیمم بر روی مرز و در نقشه TDX مقدار ماکزیمم بر روی مرز چشمه‌ها قرار گرفته است. البته ترسیم خطوط پربندی کاذب در داخل منشورها و بین آن‌ها، بزرگترین مشکل در تفسیر تصاویر است. البته تفکیک دو چشمه 2A و 2B از یکدیگر در فیلتر TDX نسبت به زاویه تتا آسان‌تر است. در شکل ۵ (ه) و (ن) به ترتیب فیلترهای پردازش تصویری SS و GDO برای تعیین گوشه مدل مصنوعی دوم به کار برده شده که در تعیین مرز و گوشه آنومالی‌ها، فیلتر GDO دارای پاسخ مناسبی است و فیلتر SS کیفیت نامناسبی دارد و مرز منشورهای کم عمق و عمیق در فیلتر سایه روشن به صورت تار و ناواضح رسم شده است. به طور کلی فیلتر SS برای منابع عمیق نامناسب است و قادر نیست به طور همزمان سیگنال‌های

منابع با عمق‌های مختلف را متعادل کند. در شکل ۵ (ی) از فیلتر IL استفاده شده که مشابه نتایج مدل گرانی با نوفه و بدون نوفه، تفسیر این فیلتر به دلیل عدم ترسیم چشمه‌ها به صورت پخش و هاله‌ای و حذف پربندهای اضافی و کاذب به مراتب آسان‌تر و تصویر خروجی کیفیت، وضوح و دقت مناسب‌تری نسبت به سایر فیلترهای تعیین مرز دارد. البته مانند همه فیلترهای تعیین مرز در این فیلتر نیز لبه‌ها به صورت پهن رسم شده است. در این فیلتر سیگنال‌های حاصل از منابع مختلف با پارامترهای هندسی و فیزیکی متفاوت به طور همزمان متعادل شده است.

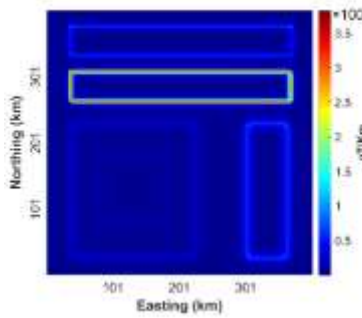
در ادامه تصاویر به دست آمده از مدل مصنوعی مغناطیسی با نوفه گاوسی نیز بررسی شد (شکل ۶) که نتایج تقریباً مشابهی در تعیین گوشه با مدل عاری از نوفه در شکل ۵ را دارد. برای کاهش نوفه، از فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۲ کیلومتر استفاده شده است. کیفیت و توانایی فیلترها بر روی داده‌های ادامه فراسو تست و بررسی شده است. در شکل ۶ (الف) و (ب) به ترتیب از روش‌های THD و AS استفاده شده که هر دو فیلتر عملکرد نامناسبی در تعیین مرز منشورها دارند و با افزایش عمق از وضوح نتایج بسیار کاسته شده است به نحوی که تشخیص مرز واقعی چشمه‌ها امکان‌پذیر نیست. در شکل ۶ (ج) و (چ) به ترتیب از فیلترهای TA و HTA برای تعیین گوشه استفاده شده که بر خلاف مدل اول (گرانی) و شرایط عاری از نوفه برای مدل مغناطیسی، فیلترهای پربولیک زاویه تیلت کیفیت مناسبی ندارد و فیلتر تحت تاثیر نوفه قرار گرفته است. به نحوی که تعیین موقعیت تقریبی چشمه‌ها در فیلتر زاویه تیلت امکان‌پذیر بوده و حتی مرز چشمه عمیق 2E قابل تشخیص است اما فیلترهای پربولیک زاویه تیلت برای چشمه 2A با کمترین عمق و چشمه 2E با بیشترین عمق وضوح و کیفیت کافی ندارد. در شکل ۶ (د) از فیلتر TDX و در شکل ۶ (و) از فیلتر TM استفاده شده که میزان تاثیرپذیری و افت کیفیت تصاویر در نقشه TDX بیشتر است به نحوی که تعیین مرز افقی برای چشمه 2A با کمترین عمق و چشمه 2E با بیشترین عمق امکان‌پذیر نیست. در شکل ۶ (ه) و (ن) به ترتیب فیلترهای پردازش تصویری SS و GDO در تعیین گوشه آنومالی مدل مصنوعی دوم به کار برده شده که در تعیین مرز افقی، فیلتر GDO دارای پاسخ مناسب‌تری است و فیلتر SS از کیفیت نامناسبی دارد به نحوی که در این فیلتر مرز منشورهای کم عمق و عمیق به صورت تار رسم شده است. البته نتایج فیلتر SS در شرایط نوفه‌ای، نشان از پایداری فیلتر در برابر نوفه دارد. در شکل ۶ (ی) از فیلتر لجستیک بهبودیافته برای داده‌های

آسانی امکان‌پذیر است و مرز منشور عمیق و کم‌عمق به طور همزمان تعیین می‌شود. همچنین این فیلتر پایداری مناسبی در برابر نوفه دارد و از کیفیت تصاویر در شرایط نوفه‌ای کاسته نمی‌شود. این فیلتر به طور همزمان سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق را متعادل می‌کند.

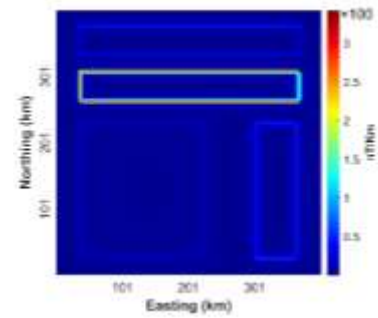
آغشته به نوفه استفاده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، نقشه فیلتر لجستیک بهبود یافته کیفیت و دقت مناسبی برای تعیین مرز مدل‌ها دارد. یکی از ویژگی‌های مهم فیلتر لجستیک بهبود یافته، مستقل بودن آن از عمق منبع آنومالی است. به طوری که با افزایش عمق توده، تشخیص مرزهای آنومالی به



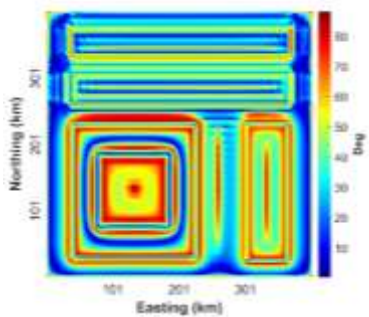
(الف)



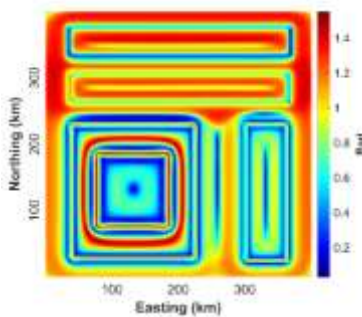
(ب)



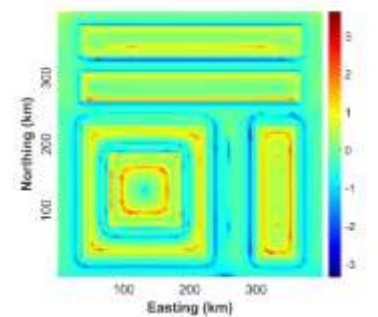
(ج)



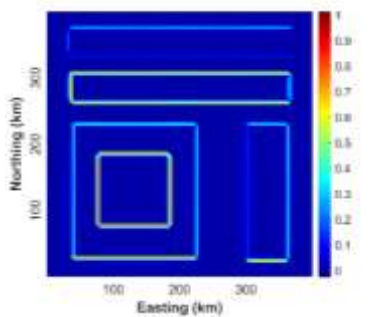
(د)



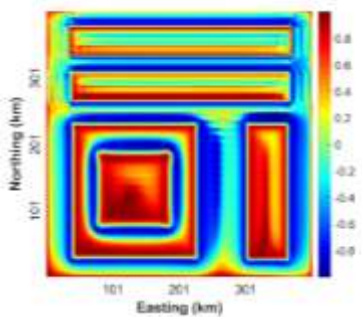
(ه)



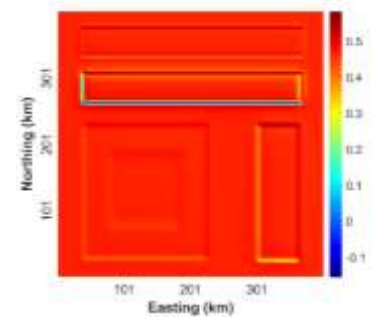
(و)



(ز)

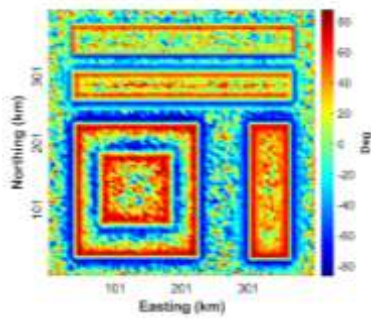


(ح)

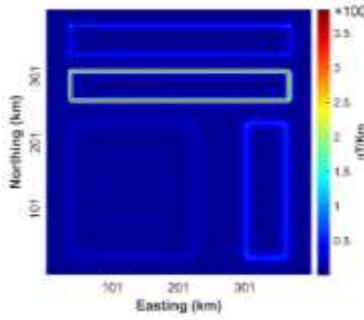


(ط)

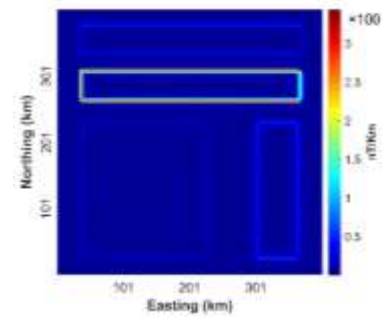
شکل ۵- تعیین گوشه آنومالی مغناطیسی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف: الف) گرادیان افقی کل، ب) نقشه سیگنال تحلیلی، ج) زاویه تیلت، د) مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، و) نقشه تتا، ه) سایه روشن، ن) عملگر مشتق تعمیم یافته، ی) فیلتر لجستیک بهبود یافته ($P=2$ فرض شده است)



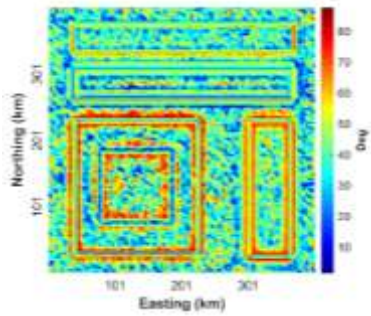
(ج)



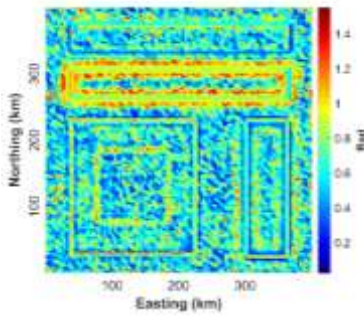
(ب)



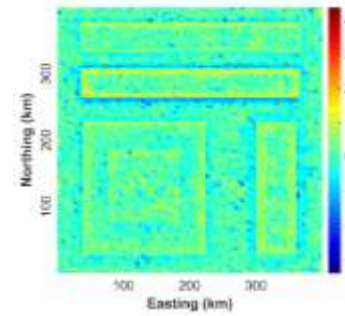
(الف)



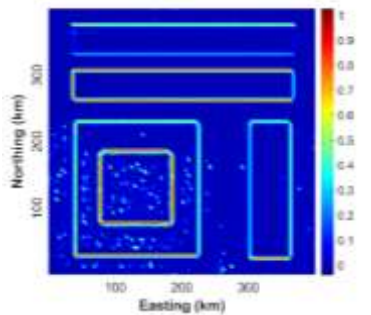
(و)



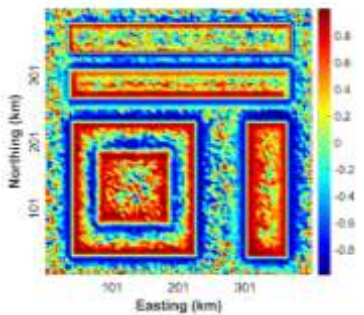
(د)



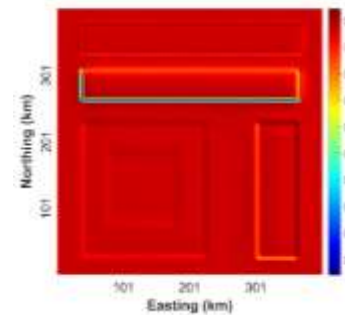
(ج)



(ی)



(ن)



(ه)

شکل ۶- تعیین گوشه آنومالی مغناطیسی مصنوعی آلوده به نوفه گاوسی پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو (دو کیلومتر) با فیلترهای مختلف: (الف) گرادبان افقی کل، (ب) نقشه سیگنال تحلیلی، (ج) زاویه تیلت، (چ) هایپربولیک زاویه تیلت، (د) مشتق کل افقی نرمال سازی شده، (و) نقشه تتا، (ه) سایه روشن، (ن) عملگر مشتق تعمیم یافته، (ی) فیلتر لجستیک بهبود یافته ($P=2$ فرض شده است)

۴- مدل واقعی گرانی

زمین گرمایی منطقه را با روش‌های ژئوفیزیکی مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. گورر^۲ و همکاران (۲۰۰۲) عوارض سطحی آناتولی مرکزی را با استفاده از روش‌های زمین‌شناسی بررسی کردند [۱۴]. آتش^۳ و همکاران، (۲۰۰۵) و بویوکساراچ^۴ و همکاران، (۲۰۰۵) ساختار عمیق منطقه را با پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی و گرانی هوا برد بررسی کردند [۲] و [۷] این محدوده به وسیله حوزه ترساکان، به حوزه هایمانا وصل شده و دارای یک

در این بخش توانایی فیلترهای تعیین گوشه آنومالی‌های گرانی بر روی مدل میدانی برداشت شده از منطقه توزگولو ترکیه مورد بررسی قرار گرفته است. حوزه توزگولو بزرگترین حوزه در آناتولی مرکزی است که مطالعات مختلف زمین‌ساختی و ژئوفیزیکی برای اکتشاف هیدروکربن و سایر ذخایر معدنی انجام گرفته است. ایلکیشیک^۱ و همکاران (۱۹۹۷) منابع انرژی

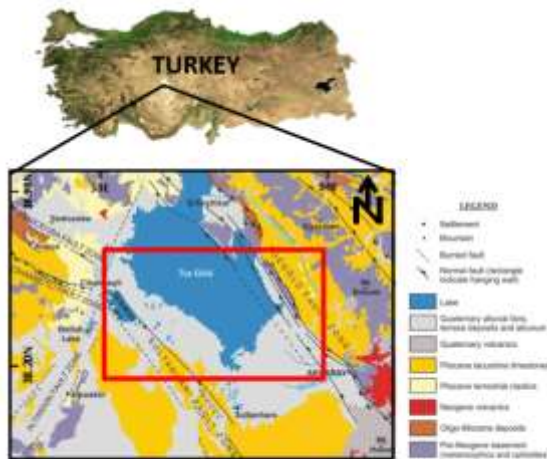
^۱Ateş

^۲Büyüksaraç

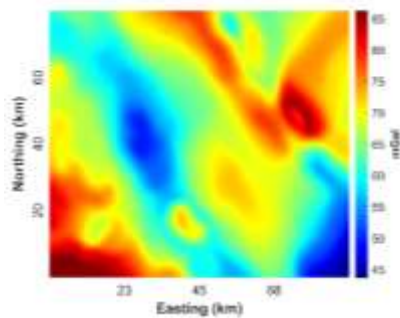
^۱Ilkişik

^۲Gürer

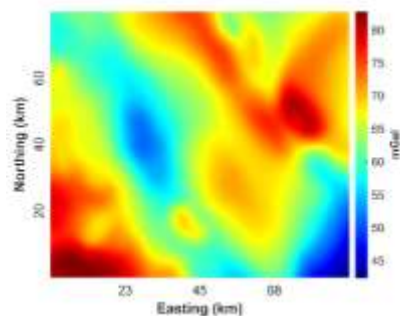
است [۲۵].



شکل ۷- الف: موقعیت محدوده مورد مطالعه در نقشه جغرافیایی کشور ترکیه (تصویر بالا) نقشه زمین‌شناسی حوزه توزگولو و محدوده برداشت داده گرانی که با مستطیل قرمز نمایش داده شده است (تصویر پایین) [۱۲]، [۱۶] و [۱۹]



(الف)



(ب)

شکل ۸- الف: نقشه آنومالی گرانی منطقه توزگولو بر حسب میلی‌گال و ب: نقشه ادامه فراسو (یک کیلومتر) بر حسب میلی‌گال برای کاهش نوفه از نقشه ادامه فراسو (یک کیلومتر) استفاده

توپوگرافی نرم است. بیشتر سطح حوزه توزگولو با رسوبات جوان (مربوط به دوره ترشیاری) پوشیده شده است [۱۶] و [۴]. همه واحدهای رسوبی حوزه با دو توده دگرگونی مهم قرشهر و کوتاهی-بولغارداغ به ترتیب از شرق و غرب احاطه شده و سنگ‌های مافیک-الترامافیک به صورت پراکنده در محدوده رسوبی نیز دیده می‌شود. همچنین جنوب محدوده مورد مطالعه با کمپلکس آتشفشانی کاپادوسیه احاطه شده است [۱۶]. حوضه‌های موجود در منطقه دارای زمین‌شناسی پیچیده با زمین‌ساخت فشرده است. نقشه زمین‌شناسی و محدوده مورد مطالعه در شکل ۷ نمایش داده شده است.

منطقه گسلی شمال غربی، برجسته‌ترین بخش ساختاری و زمین‌ساختی در امتداد حاشیه شرقی حوضه توزگولو است که توسط آرپات^۱ و شاروغلو^۲ (۱۹۷۵) منطقه گسل توزگولو نامگذاری شده است [۲]. همچنین این منطقه، به گسل کوچیسار-آکسارای نیز معروف است [۱۳]. در بخش غربی حوضه، دو زون گسلی موازی از شمال غربی ینیجه‌اوبا و جهانبیلی گسترش یافته که بخش شمالی، زون گسلی ینیجه‌اوبا و محدوده جنوبی، زون گسلی جهانبیلی نام دارد. ناحیه گسلی ینیجه‌اوبا با یک گسل امتداد لغز شمال شرقی جابه‌جا شده است و احتمالاً به ناحیه گسل سلطان‌هانی متصل می‌شود [۵]. محدوده مورد بررسی در این پژوهش، از شرق به زون گسل توزگولو، از غرب به زون گسلی ینیجه‌اوبا و جهانبیلی و از جنوب به زون گسلی سلطان‌هانی محدود می‌شود. همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی منطقه دیده می‌شود (شکل ۷)، گسل توزگولو مهم‌ترین ساختار در شرق حوضه توزگولو با روند شمال غربی-جنوب شرقی است [۱۲].

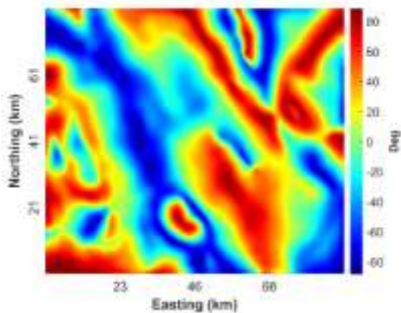
مطالعات گرانی‌سنجی در منطقه توزگولو، توسط اداره کل تحقیقات و اکتشاف مواد معدنی ترکیه (MTA) در مختصات 33E-34E و 38.10N-38.52N انجام گرفته است. کلیه تصحیحات لازم مانند تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه (با فرض چگالی ۲٫۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، تصحیح توپوگرافی و تصحیح کشند بر روی داده‌های برداشت شده اعمال و داده‌ها با فاصله ۲٫۵ کیلومتر شبکه‌بندی شده است [۲۵]. نقشه آنومالی گرانی منطقه بر حسب میلی‌گال در شکل ۸- الف نمایش داده شده که ساختارهای امتداد یافته در شمال غربی-جنوب شرقی در نقشه آنومالی بوگه تا حدودی قابل مشاهده است. تفسیر داده‌های لرزه‌ای، مغناطیس‌هوایی و گرانی، وجود زون‌های گسلی در محدوده مورد مطالعه را اثبات کرده

^۱Saroglu

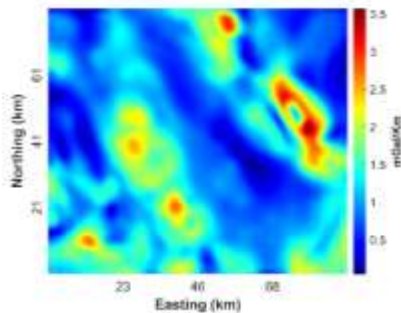
^۲Arpat

عمیق و کم عمق را به صورت همزمان ندارند. و وجود ساختارهای زمین‌شناسی محدوده توزگولو به صورت ناواضح و تار فقط در شرق نقشه گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که عمق گسل‌های موجود در زون توزگولو کمتر از عمق گسل‌های موجود در زون سلطان‌هانی است. در شکل ۹-ج، از فیلتر زاویه تیلت برای تشخیص مرز ساختارهای زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه به ویژه گسل اصلی توزگولو و گسل سلطان‌هانی استفاده شده است. مقدار زاویه تیلت به عنوان یک فیلتر بالاگذر در بالای آنومالی مثبت و بر روی لبه‌ها مقدار صفر دارد. این فیلتر در متعادل کردن دامنه‌ها موثر بوده و گسل‌های موجود در محدوده تشخیص داده شده است. البته به دلیل وجود کانتورهای جعلی در اطراف کانتور صفر، نقشه TA کیفیت مناسبی ندارد و تفسیر آن کمی دشوار است. مقدار ماکزیمم دامنه در نقشه هایپربولیک زاویه تیلت (شکل ۹-چ)، مرز ساختارهای محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که در این پژوهش پاسخ بهتری نسبت به زاویه تیلت ارائه داده و مرز ساختارها به صورت تیزتر و با کیفیت بهتر نمایش داده شده است. البته عیب بزرگ این فیلتر ترسیم خطوط منفی و مثبت کاذب در اطراف ساختارها است. همچنین در بخش غربی نقشه، گسل‌های زون گسلی سلطان‌هانی با دامنه مینیمم نمایش داده شده است که البته این موضوع نشان می‌دهد که ساختارهای بخش غربی عمق بیشتری دارند.

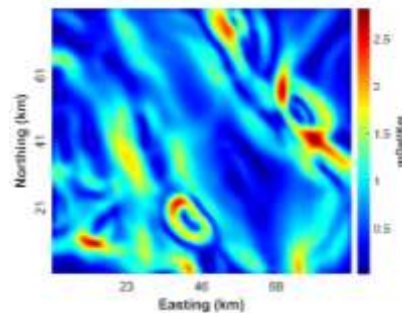
شده است زیرا فیلتر فراسو باعث می‌شود تا طول موج‌های کوچک حذف و نقشه گرانی یکنواخت‌تری در اختیار قرار گیرد (شکل ۸-ب). در شکل ۹، فیلترهای تعیین گوشه بر روی نقشه ادامه فراسو برای تعیین ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌های اولیه و ثانویه رقمی شده است. نتایج اعمال فیلترهای مختلف تعیین گوشه، شامل فیلتر فیلترهای مشتق (مشتق افقی کل)، سیگنال تحلیلی، فاز محلی (زاویه تیلت، زاویه تتا، تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت و مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده)، فیلتر پردازش تصویر (سایه روشن (با ارتفاع صفر درجه و آزیموت ۹۰ درجه))، ترکیب فیلتر پردازش تصویر و فاز محلی (عملگر مشتق تعمیم یافته (با ارتفاع ۹۰ درجه و آزیموت صفر درجه))، و فیلتر جدید لجستیک بهبود یافته (که $P=2$ فرض شده است) در شکل ۹ نمایش داده شده است. چون آنومالی‌های موجود محدوده توزگولو دارای عمق زیاد با فرکانس کم و طول موج بلندند، بنابراین فیلترهای تعیین مرز می‌تواند برای شناسایی مرز ساختارهای منطقه مفید باشد، بنابراین علاوه بر ساختارهای اصلی (گسل‌های اولیه)، ساختارهای ثانویه دیگری نیز به استناد اطلاعات لرزه‌ای [۲۵] و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (شکل ۷) باید قابل شناسایی باشند. در شکل ۹-الف از فیلتر گرادیان افقی کل و در شکل ۹-ب از فیلتر سیگنال تحلیلی استفاده شده است. در هر دو فیلتر، چند محدوده دارای مقادیر بیشینه‌اند که نشان‌دهنده ساختارهای با فرکانس بیشتر و طول موج کوتاه است اما این فیلترها دقت مناسبی ندارند و توانایی نمایش مرز ساختارها و توده‌های



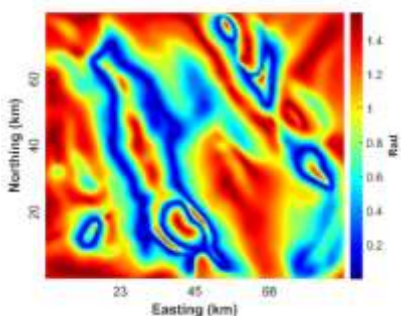
(ج)



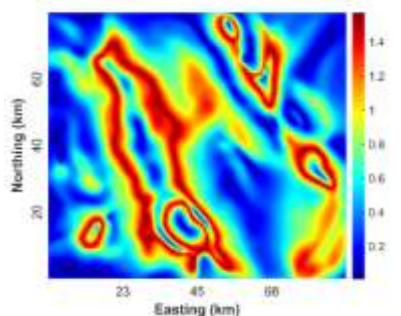
(ب)



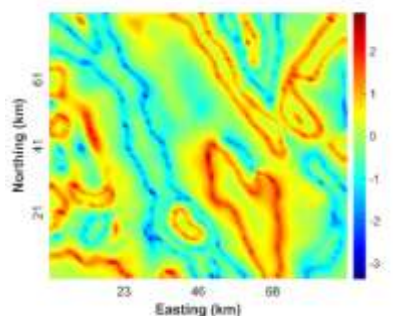
(الف)



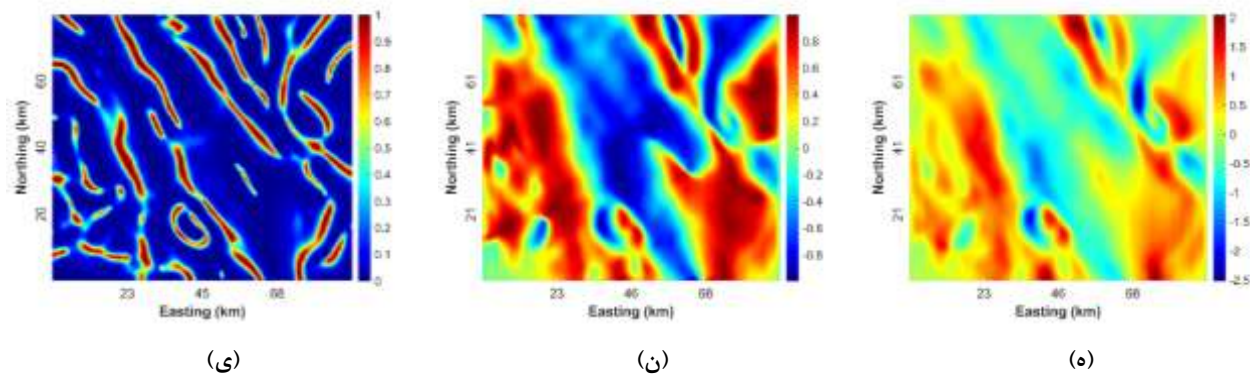
(و)



(د)



(چ)



شکل ۹- تعیین لبه و مرزهای افقی محدوده مورد مطالعه با فیلترهای: الف) گرادیان افقی کل، ب) نقشه سیگنال تحلیلی، ج) زاویه تیلت، چ) هایپربولیک زاویه تیلت، د) مشتق کل افقی نرمال سازی شده، و) نقشه تنا، ه) سایه روشن، ن) عملگر مشتق تعمیم یافته، ی) فیلتر لجستیک بهبود یافته ($P=2$ فرض شده است)

از نقشه IL و انطباق و مقایسه نتایج حاصل، گویای دقت و کیفیت این روش برای تعیین مرز و شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی است. به نحوی که شناسایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و نظایر آن در صورت وجود داده‌های باکیفیت امکان‌پذیر است، بنابراین با انطباق مقادیر بیشینه دامنه فیلتر IL بر روی نقشه زمین‌شناسی، می‌توان مرز آنومالی‌های محدوده مورد مطالعه را تشخیص داد که در نقشه گرانی قابل تشخیص نیست.

۵- نتیجه‌گیری

فیلترهای تعیین مرز، به عنوان روش‌های کمکی و سریع، در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله، فیلتر تابع لجستیک بهبود یافته، به عنوان یک فیلتر جدید، بر روی داده‌های مصنوعی مختلط گرانی و مغناطیسی بدون نوفه و همراه با نوفه و داده‌های میدانی مورد بررسی و استفاده قرار گرفت. این فیلتر دقت بالاتری در تعیین مرزهای افقی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی تصحیح یافته به قطب نسبت به سایر فیلترهای تعیین مرز دارد. فیلتر لجستیک بهبود یافته علاوه بر این، حساسیت بسیار کمتری نسبت به نوفه دارد و با افزایش عمق مانند سایر فیلترها از دقت آن در تعیین گوشه ساختارهای زمین‌شناسی کاسته نمی‌شود. همچنین این فیلتر از ایجاد مرزهای جعلی و غیرواقعی اجتناب می‌کند. بنابراین در بررسی ناهمگنی جانبی توده‌های زمین‌شناسی، به طور عمده مرز گسل‌ها، شکستگی‌ها و واحدهای زمین‌شناسی و یا واحدهای سنگی به شرط داشتن داده‌های پتانسیلی با کیفیت می‌توان از این فیلتر استفاده کرد. در مورد محدوده‌هایی که وجود چند آنومالی در جوار هم مانع از مدل‌سازی (وارون یا پیشرو) صحیح می‌شود؛ پیشنهاد می‌شود، ابتدا از فیلتر IL برای کسب اطلاعات اولیه و قابل اطمینان استفاده و سپس مدل نهایی زیرسطحی

فیلتر مشتق کل افقی نرمال سازی شده در شکل ۹- د بر روی مرز افقی دارای مقادیر بیشینه و کسینوس زاویه تنا در شکل ۹- و بر روی مرز افقی ساختار دارای مقدار کمینه است. هر دو فیلتر تقریباً دارای نتایج مشابهی هستند. گسل‌های زون توزگولو با دقت کمتری در دو نقشه مشخص گردیده اما گسل‌های زون سلطان‌هانی به خوبی قابل تشخیص است. در شکل ۹- ه از فیلتر SS و در شکل ۹- ن از فیلتر GDO برای تعیین مرز ساختارها استفاده شده است. در هر دو نقشه مرز ساختارها به صورت پهن نمایش داده شده و به دلیل وجود کانتورهای جعلی در بین ساختارها، تفسیر هر دو نقشه کمی مشکل است. البته دامنه‌های ماکزیمم فیلترهای سایه روشن و عملگر مشتق تعمیم یافته دلیلی بر وجود گسل‌های اصلی و فرعی و حتی دیاپیرهای نمکی در بخش شرقی و غربی محدوده مورد مطالعه است. در شکل ۹- ی از فیلتر لجستیک بهبود یافته برای تعیین مرز ساختارهای زمین‌شناسی استفاده شده است. فیلتر IL به عنوان یک فیلتر قدرتمند بر روی داده‌های میدانی محدوده مورد مطالعه برای شناسایی گسل‌های زون توزگولو و سلطان‌هانی استفاده شده است. نقشه به دست آمده از روش فیلتر لجستیک بهبود یافته، به خوبی گسل‌های اولیه و ثانویه که در نقشه گرانی هیچ نمودی ندارند را تعیین کرده است، به نحوی که ساختارهای ثانویه (گسل‌های ثانویه) و ساختارهای گسلی موجود در منطقه را به صورت واضح‌تر و قابل درک‌تر نمایش داده است. این فیلتر تفکیک‌پذیری عمقی بهتری در مقایسه با سایر فیلترها دارد به طوری که گسل نرمال و گسل ثانویه در بخش شرقی در زون گسلی توزگولو و گسل نرمال و ثانویه در زون گسلی سلطان‌هانی و در بخش غربی محدوده مورد مطالعه به آسانی قابل شناسایی است. مقایسه نتایج روش‌های لرزه‌ای و مغناطیس‌هوائی در محدوده توزگولو و اطلاعات زمین‌شناسی با نتایج به دست آمده

generalized derivative operator for potential field data, European Association of Geoscientists & Engineers, 59, 188-194.

ارایه شود.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم به دلیل نظرات و پیشنهادات ارزنده صمیمانه تشکر می‌شود، همچنین از آقای پروفیسور داوود آیدوگان^۱ عضو هیات علمی گروه مهندسی ژئوفیزیک دانشگاه استانبول، ترکیه برای در اختیار قرار دادن داده‌های گرانی منطقه توزگولو سپاسگزاریم.

منابع

12. Dinçer, B. & Işık, V. (2020). Determination of structural characteristics of Tuzgölü Fault Zone using gravity and magnetic methods, Central Anatolia. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 162 (162), 145-174. DOI: 10.19111/bulletinofmre.661245
13. Görür, N., F. Y. Oktay, I. Seymen, and A. M. C. Şengör, Paleotectonic evolution of Tuzgölü basin complex, Central Turkey, in The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean, edited by Dixon, J. E. and A. H. F Robertson, Spec. Publ. Geol. Soc., 17, 81–96, 1984.
14. Gürer, O.F, and Aldanmaz, E. (2002), Origin of the Upper Cretaceous–Tertiary sedimentary basins within the Tauride–Anatolide platform in Turkey, Geol. Mag. 139 (2), 191–197.
15. İlkişik, O.M., Gürer, A., Tokgöz, T., and Kaya, C. (1997), Geoelectromagnetic and geothermic investigations in the Ihlara Valley geothermal field, J. Vol. Geothermal Res. 78, 297-308
16. Işık, V., Uysal, T., Çağlayan, A., Seyitoğlu, G. 2014. The evolution of intra-plate fault system in central Turkey: structural evidence and Ar-Ar and RbSr age constrains for the savcılı Fault Zone. Tectonics 33(10), 1875-1899.
17. Miller H. G. and Singh V., (1994). Potential field tilt A new concept for location of potential field sources, Journal of Applied Geophysics, 32, 213–217.
18. 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, 507–517. doi:10.1190/1.1440276
19. Özsayın E, Çiner TA, Rojay FB, Dirik RK, Melnick D, Fernandez-Blanco D, Bertotti G, Schildgen TF, Garcin Y, Strecker MR, Sudo M (2013) Plio-Quaternary extensional tectonics of the Central Anatolian Plateau: a case study from the Tuz Gölü Basin, Turkey. Turk J Earth Sci 22:691–714
20. Pham, L.T., Van Vu, T., Le Thi, S. and Thi Trinh, P (2020). Enhancement of Potential Field Source Boundaries Using an Improved Logistic Filter. Pure and Applied Geophysics. 5237–5249, <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02542-9>
21. Pilkington, M. & Keating, P. (2004), Contact mapping from gridded magnetic data- A comparison of techniques, Exploration Geophysics, 35(4), 306-311.
22. Pilkington M, & Tschirhart V, (2017), Practical considerations in the use of edge detectors for
1. Alvandi A, & Babaei M. (2017). Edge detection of gravity anomalies with directional hyperbolic tilt angles: application to synthetic and field data. Indian Geophysical Union journal, 21(1), 13-16.
2. Arpat, E. and F. Ş aroglu, (1975), Türkiye deki bazı önemli genç tektonik olaylar, Turkish Geol. Soc. Bull., 18, 91–101.
3. Ateş, A., Bilim, F., and Büyüksaraç, A. (2005), Curie Point Depth Investigation of Central Anatolia, Turkey, Pure Appl. Geophys. 162, 357–371
4. Aydemir, A. & Ateş, A. (2005). Preliminary evaluation of Central Anatolian basins in Turkey by using the gravity and magnetic data. Journal of the Balkan Geophysical Society 8, 7–19.
5. Aydoğan, D. (2011), Extraction of lineaments from gravity anomaly maps using the gradient calculation: Application to Central Anatolia Earth Planets Space, 63, 903–913, 2011
6. Blakely J. R., and Simpson W. R. (1986). Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, Geophysics, 51(7), 1494-1498.
7. Büyüksaraç, A, Jordanova, D, Ateş, A., and Karloukovski, V. (2005), Interpretation of the Gravity and Magnetic Anomalies of the Cappadocia Region, Central Turkey, Pure Appl. Geophys. 162, 2197–2213.
8. Cordell, L. and Grauch, V.J.S. (1985). Mapping Basement Magnetization Zones from Aeromagnetic Data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze, W.J., Ed., The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps, Society of Exploration Geophysicists, 181-197.
9. Cooper, G. R. J. (2003). Feature detection using sun shading. Computers & Geosciences, 29, 941–948.
10. Cooper, G.R.J. & Cowan, D.R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. Computers & Geosciences, 32, 1585–1591.
11. Cooper, G.R.J. & Cowan, D.R. (2011) A

^۱Davut Aydoğan

- analytic signal: *Geophysics*, 57, 116–125.
doi:10.1190/1.1443174.
25. Ugurtas, G. (1975), Geophysical interpretation of part of the Tuzgolu basin, *M.T.A. Bull.* 85, 38-45.
26. Wijns C., Perez C., and Kowalczyk P. (2005). Theta map: Edge detection in magnetic data, *Geophysics*, 70(4), 39-4
- geologic mapping using magnetic data. *Geophysics* 82(3),1–8
23. Pirttijärvi, M., 2014. FOURPOT - Potential field data processing and analysis of using 2-D Fourier transform. User's guide to version 1.3a. Department of Physics, University of Oulu, Finland
24. Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., (1992), Magnetic interpretation using the 3-D