

تعیین شیب و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی از روی داده‌های مغناطیس هوایی

ابوالقاسم کامکار روحانی^{۱*}، داریوش شکری^۲ و علی مرادزاده^۳

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

^۲ عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، مرکز داریون، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(دریافت: ۸۸/۱/۳۰، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۱)

چکیده

به‌طور کلی با اعمال فیلتر ادامه فراسو، پاسخ مغناطیسی مشاهده شده از توده‌های عمیق‌تر ناشی می‌شود. در نتیجه با اعمال فیلتر ادامه فراسو در مرز بین دو لایه شیب‌دار با خواص مغناطیسی متفاوت، به سادگی می‌توان دید که مکان قرارگیری بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو لایه روی نیمرخ‌های مغناطیسی با افزایش ارتفاع به طور جانبی جابه‌جا می‌شوند که این جابه‌جایی در جهت شیب بین دو لایه صورت می‌گیرد. با ترکیب نتایج پردازش حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو به‌صورت یک تصویر ترکیبی سه‌تایی (RGB) می‌توان جهت شیب لایه‌ها را از روی داده‌های مغناطیسی به‌دست آورد. در این تحقیق، داده‌های مغناطیس هوایی از منطقه کلاته-رشم دامغان مورد استفاده قرار گرفته و تفکیک لایه‌ها و تعیین شیب لایه‌ها از روی داده‌های مغناطیسی برای این منطقه صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده به‌خوبی با نتایج موجود روی نقشه زمین‌شناسی مطابقت دارد و اهمیت روش مورد استفاده را با توجه به وسعت زیاد منطقه برداشت داده‌های مغناطیس هوایی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: داده‌های مغناطیس هوایی، ادامه فراسو، بی‌هنجاری، شیب

Determination of the dips, and segregation, of geological units from airborne magnetic data

Kamkar Rouhani, A.¹, Shokri, D.² and Moradzadeh, A.³

¹Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²Lecturer, Islamic Azad University, Darion, Shiraz, Iran

³Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: 19 Apr 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

Abstract

Various geological units in an area often exhibit different magnetic properties. Due to this distinction in magnetic properties of the geological units, a correlation between the type of a geological unit and its magnetic response can be established. To determine the lateral and vertical extents of geological units from the magnetic data in a survey area, a number of filters for processing magnetic data can be used.

Magnetic responses of deep anomalies are generally obtained by applying upward continuation filter on the magnetic data. If the upward continuation filter in contact between two layers having different magnetic properties is applied, the magnetic profiles with increasing height are displaced laterally. This displacement is carried out in the direction of the dip between two layers. By combining the upward continuation processing results in the form of a three-component combination image (RGB), we can obtain the dips of geological layers from the magnetic data or map. In this regard,

airborne magnetic data acquired from Kalateh-Reshm area, Damghan, have been used and a map indicating the dips of geological layers for the area has been derived. To determine the interface between two adjacent geological units, ZS-Edgezone filter, developed by Zhiqun Shi, have been applied. By analysis of the results of applying the ZS-Edgezone filter on the upward continuation processed magnetic data, we can quite well determine the directions of the dips of geological units, and also distinguish the geological units having low dips from those having high dips. This is due to the fact that a geological unit having a low dip indicate a relatively high horizontal displacement as we increase the height in the upward continuation process. However, a relatively low horizontal displacement can be seen for a geological unit having a relatively higher dip as the height in the upward continuation process is increased to the same amount as in the previous case of the low dip geological unit.

The above-mentioned method has been used in this paper to determine the dips of geological units from airborne magnetic data in Kalateh-Reshm area, located at 120 kilometers south of Damghan city. The aeromagnetic data have been acquired by Geological Survey of Iran (GSI) in 2004. In general, the survey area geologically consists of metamorphosed carbonated units and volcanic rocks. To determine the dips of geological units from the airborne magnetic data in the survey area, first we have applied reduction to the pole (RTP) processing filter on the magnetic data. Then, upward continuation filter on the RTP processed magnetic data, and finally, ZS-Edgezone filter on the obtained RTP and upward continuation processed magnetic data have been applied. All these processed magnetic data and maps have been obtained using "Profile Analyst" software, developed by Encom geophysical company. The magnetic field variations in the area are mainly attributed to the changes in the primary and/or secondary magnetite contents of the rocks. As a result of some kinds of alterations in the rocks, the secondary magnetite is occurred while the primary magnetite is originally occurred in the rocks when they are just formed. The obtained map of the dips of units has been shown by three main colours, i.e. red, green and blue (RGB). Where these three colours in the map are well separated, the dip is considered to be low. However, for the case of high dip, the separation of these three colours in the map is less made. In other words, in the case of high dip, these three colours in the map have more overlapping than in the case of low dip. Based on this procedure and the results of applying the above processing methods on the magnetic data from the area, presented in the form of RGB colour map, we conclude that the dips of the geological units in central parts of the survey area are comparatively higher. Also, in northeastern parts of the area, the dips are intended towards northeast while in southwestern parts of the area, the dips are seen towards south. Also, two anticlines and a syncline are observed in the central and northern parts of the area. Also, an anticline structure can be seen in the center towards south of the area.

The obtained results are in good agreement with the geological map information of the area, and indicate the significance of the method in determination of the dips, and segregation, of the geological units of the extensive study area covered by airborne magnetic surveys.

Key words: Aeromagnetic data, Upward continuation, Anomaly, Dip

۱ مقدمه

در آوردن ساختارهای زمین‌شناسی و برآورد ضخامت،
عمق و گسترش حوضه‌های رسوبی به کار می‌رود

روش مغناطیس‌هوایی همچون ابزار ارزان و قدرتمند
ژئوفیزیکی برای اکتشاف کانی‌های مغناطیسی، به نقشه

بر منابع گوناگون مغناطیسی کم‌عمق و عمیق) با تباین مغناطیسی حتی ضعیف استفاده کرد (انکام، ۲۰۰۷). این فیلترها همگی خطی و بر مبنای مشتق هستند که ترکیبی از روش‌های مشتق و تراکم دامنه (Amplitude compression) را به کار می‌برند. به‌طور کلی فیلترهای ZS به دو دسته فیلترهای لبه‌ای (Edge filters group) و فیلترهای بلوکی (Block filters group) تقسیم می‌شوند. دسته اول یعنی فیلترهای لبه‌ای که در این مقاله بیشتر از نوع ZS-Edgezone آن استفاده شده است، برای بهبود آشکارسازی یا تعیین مرز بی‌هنجاری‌های مربوط به هر دو منابع مغناطیسی کم‌عمق و عمیق (حتی با مغناطیس شدگی ضعیف) به کار برده می‌شوند. مزیت این دسته از فیلترها نسبت به سایر فیلترهای لبه‌ای (از جمله سیگنال تحلیلی)، آن است که به مقدار زیادی باعث افزایش دقت تشخیص بی‌هنجاری‌ها بر بالای مرزها می‌شوند؛ حتی اگر منابع ایجادکننده این بی‌هنجاری‌های مغناطیسی عمیق و یا دارای مغناطیس شدگی ضعیف باشند. سایر فیلترهای لبه‌ای (مانند سیگنال تحلیلی)، در صورتی که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی از نوع عمیق و یا دارای مغناطیس شدگی ضعیف باشند، در تشخیص و تفسیر آسان مرزهای این بی‌هنجاری‌ها، کارایی لازم را ندارند و اغلب مرزهای این بی‌هنجاری‌ها را مبهم، نامشخص و یا غیر دقیق نشان می‌دهند. علاوه بر این، در سایر فیلترهای لبه‌ای بعد از اعمال فیلتر، محدوده دامنه بی‌هنجاری‌ها در داده‌های خروجی از فیلتر ممکن است سبب آشکارسازی نشدن دقیق مرزها یا لبه‌های بی‌هنجاری‌ها شوند اما از این نظر، فیلتر ZS-Edgezone محدوده دامنه بی‌هنجاری‌ها را متراکم می‌کند، به طوری که اختلاف‌ها در دامنه‌های شدت میدان مغناطیسی کل اولیه نمی‌تواند بر تفسیر یا تشخیص لبه‌ای این فیلتر غلبه کنند. فیلتر لبه‌ای ZS-Edgezone، از نظر ریاضی مانند اکثر فیلترهای لبه‌ای دیگر بر پایه مشتقات میدان مغناطیسی استوار شده‌اند ولی از نوع خطی

(نیوسویپا و همکاران، ۲۰۰۵). امروزه برآورد سریع، خودکار، ارزان و نسبتاً دقیق عمق سنگ بستر مغناطیسی (و سایر اهداف مغناطیسی مدفون در زیر سطح زمین) از روی داده‌های مغناطیس هوایی با کیفیت مطلوب که در ارتفاع پرواز نسبتاً پایین و با فواصل اندازه‌گیری نسبتاً کم یا مناسب برداشت شده‌اند، با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای مبتنی بر روش‌های جدید برآورد عمق اهداف مغناطیسی، به سادگی میسر شده است (شی و بوید، ۱۹۹۳؛ انکام، ۲۰۰۷؛ دیویس و لی، ۲۰۰۹).

به‌طور کلی الگوهای مغناطیسی از تمایز خواص مغناطیسی بین واحدهای زمین‌شناسی ناشی می‌شوند و در نتیجه اغلب می‌توان یک انطباق یا ارتباط مستقیم بین واحدهای زمین‌شناسی و بی‌هنجاری‌ها یا الگوهای مغناطیسی برقرار ساخت. با وجود این، در بعضی موارد به علت ابعاد کوچک واحدهای زمین‌شناسی و یا نبود تمایز مغناطیسی بین این واحدها، تطبیق ذکر شده کمتر مشاهده می‌شود (پارسونز و همکاران، ۲۰۰۶).

برای تعیین مرز بین واحدهای زمین‌شناسی منطبق بر منابع بی‌هنجار مغناطیسی، از مجموعه‌ای از فیلترهای لبه‌ای استفاده می‌شود که از مهم‌ترین آنها می‌توان به فیلترهای مشتق افقی شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب (Horizontal derivative of the total magnetic intensity reduced to the pole)، سیگنال تحلیلی و فیلترهای ZS اشاره کرد (شی و بات، ۲۰۰۴؛ کوپر و کووان، ۲۰۰۸). در این بین، فیلترهای ZS که نام آنها کوتاه‌نوشت نام خانم ژیکان شی (Zhiqun Shi) است، مجموعه‌ای از فیلترهای ترکیبی جدید هستند که در نتیجه تحقیق و توسعه شرکت انکام (Encom) برای بهبود آشکارسازی بی‌هنجاری‌های ضعیف مغناطیسی واقع در عمق کم و تفکیک آنها از منابع بی‌هنجار عمیق یا ناحیه‌ای عرضه شده‌اند. بنابراین از فیلترهای ZS می‌توان برای آشکارسازی یا تعیین مرز واحدهای زمین‌شناسی (منطبق

هستند. نوع دیگری از فیلترهای لبه‌ای ZS، فیلتر ZS-Edge است که تفاوت آن با فیلتر ZS-Edgezone در آن است که دامنه بزرگ شدت میدان مغناطیسی روی منابع بی‌هنجاری در این نوع فیلتر حفظ می‌شود و در نتیجه تشخیص بی‌هنجاری‌ها گرچه بهبود می‌یابد ولی از تیزی (Sharpness) لبه‌ها یا مرزهای بی‌هنجاری‌ها کاسته می‌شود. فیلترهای بلوکی ZS نیز مشابه با سامانه‌های تقسیم‌بندی تصاویر، داده‌های مغناطیسی را به مناطق بی‌هنجار گوناگون منطبق با واحدهای زمین‌شناسی متفاوت تفکیک می‌کنند. در هر صورت، هر دو دسته فیلترهای ZS بافت نقشه داده‌های مغناطیسی خام یا اولیه را تغییر می‌دهند و سبب تفسیر زمین‌شناسی آسان‌تر داده‌های مغناطیسی برداشت شده می‌شوند (شی و بات، ۲۰۰۴). در این مقاله نیز با اعمال فیلتر ادامه فراسو و فیلتر ZS-Edgezone روی داده‌های مغناطیس هوایی منطقه کلاته-رشم دامغان، تفکیک واحدهای زمین‌شناسی با خواص مغناطیسی متفاوت صورت گرفته و مرز نسبتاً دقیق بین آن‌ها، مشخص شده و علاوه بر این، شیب واحدهای زمین‌شناسی منطقه مزبور از روی داده‌های مغناطیسی پردازش شده تعیین شده است. لازم به ذکر است که روش مغناطیسی هوابرد معمولاً به‌نحو مؤثری در پی‌جویی و اکتشاف اولیه نواحی یا مناطق امیدبخش یا مستعد معدنی و هیدروکربوری از نظر وجود بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، کارساز یا قابل کاربرد است و تعیین عواملی مانند شیب، امتداد و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی با دقت زیادتری از روی داده‌های مغناطیسی حاصل از برداشت‌های زمینی نسبت به داده‌های مغناطیس هوایی قابل اجرا است علت آن، دقت و قابلیت تفکیک بیشتر داده‌های مغناطیسی زمینی نسبت به داده‌های مغناطیس هوایی است. علاوه بر این، منابع خطای متعدد و متنوع‌تری در برداشت‌های مغناطیسی هوایی وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به خطای ناشی از تغییر ارتفاع و

امتداد خطوط (الگوی) پرواز، خطای تعیین موقعیت داده‌های مغناطیسی هوایی و تصحیحات بیشتر مورد نیاز روی داده‌های مغناطیسی هوایی نسبت به داده‌های مغناطیسی زمینی اشاره کرد. با این حال، مزایای برداشت‌های مغناطیس هوایی، به‌ویژه در مناطق بزرگ و وسیع که عمدتاً در هزینه و زمان کمتر (سرعت بیشتر) برداشت‌ها خلاصه می‌شود و همچنین، قابلیت عملی ساختن این برداشت‌ها در مناطق مرتفع، کوهستانی، صعب‌العبور و حتی غیر قابل دسترسی، سبب می‌شود تا برداشت‌های هوایی محبوبیت خاصی داشته باشند.

۲ روش تعیین شیب واحدهای زمین‌شناسی از روی داده‌های مغناطیسی

در چند دهه اخیر روش‌های محدود و متفاوتی برای تعیین جهت و مقدار تقریبی یا کیفی شیب واحدهای زمین‌شناسی از روی داده‌های مغناطیسی مطرح شده است که از مهم‌ترین و جدیدترین آنها می‌توان به روش‌های سیگنال تحلیلی و تصویربرداری پارامتر چشمه (SPTTM) (Source parameter imaging) اشاره کرد (تارستون و اسمیت، ۱۹۹۷؛ پدرسن و باستانی، ۱۹۹۷). روش SPTTM براساس رابطه ریاضی تابع سیگنال تحلیلی مختلط (شامل مؤلفه‌های حقیقی و موهومی) بنا نهاده شده است. در این روش، پارامترهای چشمه شامل عمق، شیب و موقعیت لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و همچنین تباین خودپذیری مغناطیسی (Magnetic susceptibility contrast) بین بی‌هنجاری و زمین در برگیرنده آن، از روی داده‌های مغناطیسی برداشت شده به صورت شبکه‌ای (Gridded) محاسبه می‌شوند (تارستون و اسمیت، ۱۹۹۷). در این مقاله نیز به صورت عملی، روشی خاص برای تعیین شیب واحدهای زمین‌شناسی با اعمال فیلتر ادامه فراسو و فیلتر ZS-Edgezone روی داده‌های مغناطیسی، مورد استفاده قرار گرفته که خلاصه‌وار در زیر تشریح

شده است:

بی‌هنجاری روی نیم‌رخ به بخش‌های عمیق‌تر از تماس بین دو لایه پاسخ می‌دهد. همچنین به همین علت دیده می‌شود که در حالت الف، که شیب کم است، جداسدگی افقی بیشتری بین محل‌های پیک بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو لایه زمین‌شناسی روی نیم‌رخ‌های متفاوت مغناطیسی سرخ، سبز و آبی وجود دارد. درحالی‌که برای شیب زیاد (حالت ب)، جداسدگی افقی کمتری بین محل‌های پیک بی‌هنجاری مغناطیسی مزبور روی نیم‌رخ‌های مغناطیسی سرخ، سبز و آبی وجود دارد. بنابراین از روی فاصله افقی بین محل‌های پیک بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو لایه زمین‌شناسی مجاور یا پهلوی یکدیگر روی نیم‌رخ‌های ادامه فراسو، می‌توان مقدار شیب مرز بین دو لایه را نیز به‌طور نسبی تعیین کرد؛ به این صورت که هرچه جداسدگی افقی بین محل‌های پیک بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو لایه زمین‌شناسی روی نیم‌رخ‌های مغناطیسی که فیلتر ادامه فراسو رویشان اعمال شده است، از هم بیشتر باشد، مرز بین دو لایه دارای شیب کمتری خواهد بود و هرچه محل‌های پیک بی‌هنجاری مغناطیسی مزبور پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو روی نیم‌رخ‌های مغناطیسی، از نظر جانبی به هم نزدیک‌تر و یا دارای انطباق بیشتری باشند، مرز بین دو لایه دارای شیب بیشتری خواهد بود. بدیهی است که اگر شیب یا مرز بین دو لایه زمین‌شناسی مجاور یکدیگر کاملاً قائم باشد، جداسدگی افقی بین محل‌های پیک بی‌هنجاری مغناطیسی پیش‌گفته، روی نیم‌رخ‌های مغناطیسی که فیلتر ادامه فراسو رویشان اعمال شده، دیده نخواهد شد. به عبارت دیگر، محل‌های پیک بی‌هنجاری مغناطیسی مربوط به نیم‌رخ‌های مغناطیسی، با ارتفاع‌های متفاوت، روی یکدیگر کاملاً منطبق خواهند بود. همان‌طور که در بالا اشاره شد، جهت شیب مرز بین دو لایه زمین‌شناسی پهلوی یکدیگر، در راستای مهاجرت جانبی محل پیک بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین

با توجه به این واقعیت که در نتیجه اعمال فیلتر ادامه فراسو روی یک توده مغناطیسی، بخش‌های عمیق‌تر توده مسبب ایجاد علامت (سیگنال) یا بی‌هنجاری هستند، می‌توان شیب لایه‌های زمین‌شناسی موجود در یک منطقه را از روی نتایج داده‌های مغناطیسی برداشت شده از آن منطقه تعیین کرد. در این رابطه، شکل ۱ تماس بین دو واحد زمین‌شناسی با شیب متفاوت را نشان می‌دهد که بی‌هنجاری مغناطیسی متفاوتی را آشکار می‌سازند. نیم‌رخ‌های مغناطیسی بالای مرز این دو واحد در ابتدا برای سه ارتفاع ۱۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ متری توسط فیلتر ادامه فراسو محاسبه شده است. سپس برای اینکه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به‌نحوی دقیق مرز بین دو واحد را نشان دهند، از فیلتر لبه‌ای ZS-Edgezone که یکی از بهترین فیلترهای لبه‌ای برای تعریف مرز بین واحدها است، استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، نیم‌رخ‌های مغناطیسی (یا مکان قرارگیری بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو واحد زمین‌شناسی روی نیم‌رخ‌های مغناطیسی) با افزایش ارتفاع به‌طور جانبی به سمت جهت شیب مهاجرت می‌کنند. برای مثال در ارتفاع ۱۰۰ متر (نیم‌رخ سرخ‌رنگ)، مکان بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو لایه زمین‌شناسی روی نیم‌رخ مزبور مستقیماً روی بخش بالایی محل تماس دو لایه قرار گرفته است ولی با افزایش ارتفاع، یعنی در ارتفاع‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ متر (که با نیم‌رخ‌های به رنگ سبز و آبی نشان داده شده‌اند)، مکان بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو لایه زمین‌شناسی روی این نیم‌رخ‌ها در جهت شیب بین دو لایه به سمت چپ جابه‌جا می‌شود. این نتیجه ناشی از این واقعیت است که مکان پیک بی‌هنجاری روی نیم‌رخ به‌دست آمده از فیلتر ZS-Edgezone در ارتفاع کم یا پایین به بخش (یا بخش‌های) بالایی محل تماس بین دو لایه پاسخ می‌دهد اما با افزایش ارتفاع نیم‌رخ، مکان پیک

دو لایه روی نیم‌رخ‌های ادامه فراسو با افزایش ارتفاع آنها است.

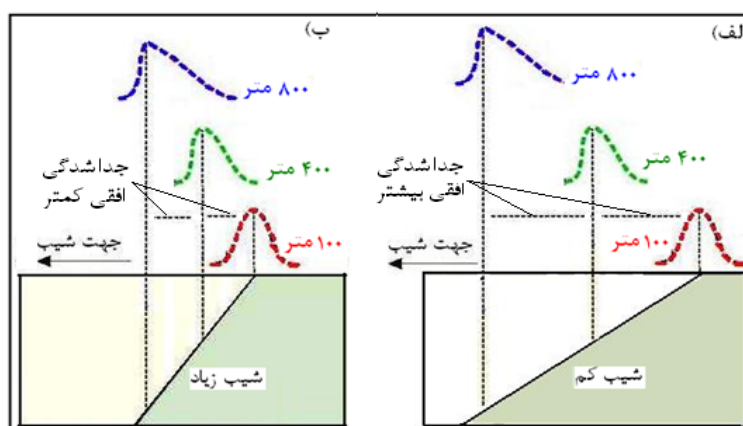
۳ تفکیک واحدهای زمین‌شناسی و تعیین شیب آنها

از روی داده‌های مغناطیسی در مدل‌های مصنوعی

مدل‌های مصنوعی در نظر گرفته شده در اینجا شامل هر دو دسته منابع مغناطیسی کم‌عمق و عمیق با مغناطیس شدگی متفاوت‌اند و در مورد هر مدل، نتایج به‌کارگیری روش یا فیلترهای جدید مورد استفاده در این مقاله با نتایج به‌کارگیری فیلترهای معمول یا رایج مقایسه شده است. برای رعایت اختصار در این بخش از مقاله، نتایج به‌کارگیری فیلترهای مورد بحث فقط روی یک مدل مصنوعی متشکل از منابع مغناطیسی با خصوصیات یا پارامترهای هندسی و مغناطیسی متفاوت، نشان داده می‌شود و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی شرایط واقعی، نوفه گاوسی در پاسخ مغناطیسی مدل تأثیر داده و یا به آن اضافه می‌شود و بدین ترتیب تأثیر مقدار نوفه‌های گوناگون روی نتایج تفکیک و تعیین شیب واحدهای زمین‌شناسی مدل، مورد بررسی قرار گرفته است.

در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ModelVision Pro Version 5.0 (انکام، ۲۰۰۳)، مدل‌سازی پیشرو (Forward modelling) سه‌بعدی جواب‌های شدت میدان کل مغناطیسی یک زمین متشکل از منابع بی‌هنجار مغناطیسی متفاوت با خصوصیات یا پارامترهای هندسی و مغناطیسی متفاوت صورت گرفت. به عبارت دقیق‌تر، مدل‌سازی پیش‌گفته روی یک مدل زمینی حاوی ۱۶ بی‌هنجاری مغناطیسی مجزا با پارامترهای متفاوت عمق، عرض، گسترش عمقی، گسترش طولی، شیب، امتداد و خودپذیری مغناطیسی در نظر گرفته شد. این ۱۶ منبع مغناطیسی متفاوت و مجزا به‌صورت دو‌بعدی و طرح‌وار (شماتیک)، در یک پلان یا تصویر افقی از بالا در شکل ۲

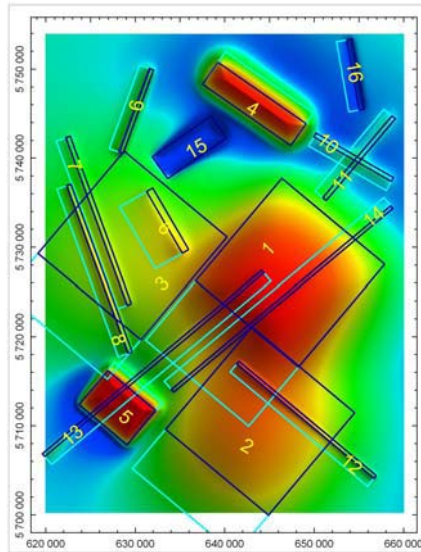
نشان داده شده‌اند. همچنین خصوصیات یا پارامترهای هندسی و مغناطیسی این ۱۶ منبع مغناطیسی (شامل عمق، عرض، گسترش عمقی، شیب، گسترش طولی، امتداد یا کشیدگی طولی و خودپذیری مغناطیسی) در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، دو منبع بی‌هنجار مغناطیسی شماره ۱۵ و ۱۶ با خودپذیری مغناطیسی منفی (یعنی از نوع دیامغناطیس) در نظر گرفته شده‌اند. جواب‌های شدت میدان کل مغناطیسی مدل زمینی توصیف شده در بالا با استفاده از مدل‌سازی پیشرو سه‌بعدی برای زاویه میل (Inclination) مغناطیسی ۶۰ درجه و خطوط نیم‌رخ شرقی - غربی با فواصل مساوی ۲۰۰ متر از یکدیگر و شبکه‌های سلولی یا مش‌بندی شده (Discretized grid cells) مورد استفاده در مدل‌سازی Finite-difference) به روش تفاضل محدود (method) با ابعاد یکسان و به شکل مربعی با طول ضلع ۴۰ متر محاسبه شده‌اند. سپس فیلتر برگردان به قطب (RTP) (Reduction to the pole) روی جواب‌های شدت میدان کل مغناطیسی محاسبه شده اعمال شده است. نقشه دو‌بعدی شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی مورد بحث در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل و شکل‌های بعدی این مقاله، جهت شمال همان جهت کاملاً قائم به سمت بالای شکل در نظر گرفته شده است. همچنین در این شکل و شکل‌های بعدی این مقاله، شدت میدان مغناطیسی کم و زیاد، به ترتیب با رنگ‌های آبی و سرخ نشان داده شده است و دامنه یا طیف تغییر رنگ از آبی به سرخ که به ترتیب شامل رنگ‌های سبز و سپس زرد می‌شود، بیانگر طیف شدت میدان مغناطیسی کم تا زیاد است. در نتیجه، شدت میدان مغناطیسی متوسط با رنگ‌های سبز و زرد نشان داده شده است (رنگ زرد، شدت میدان مغناطیسی متوسط به بالا و رنگ سبز، شدت میدان مغناطیسی متوسط به پایین را نشان می‌دهد).



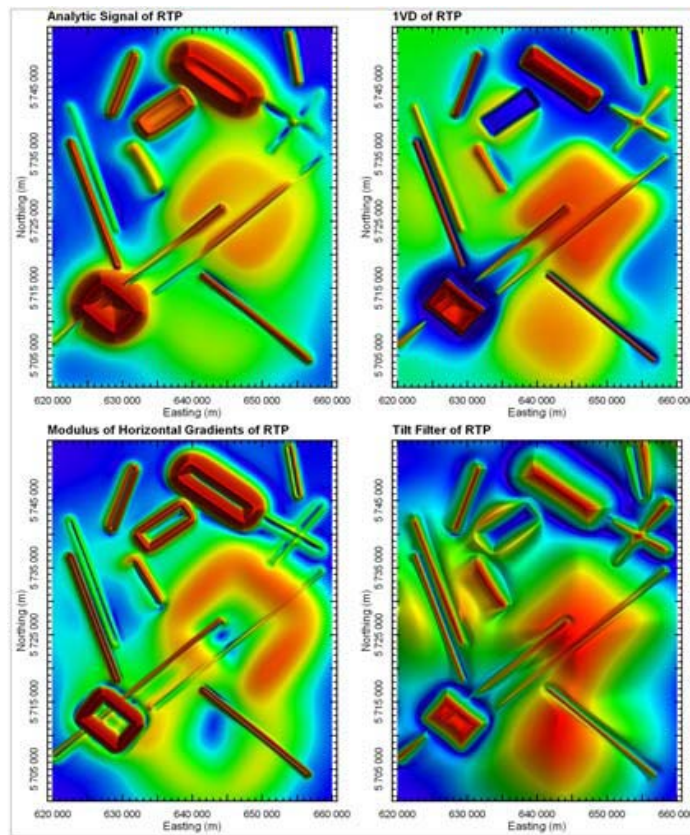
شکل ۱. تغییرات نتایج فیلتر ZS_Edgezone با افزایش ارتفاع فیلتر ادامه فراسو برای شیب کم (الف) و شیب زیاد (ب) (برگرفته شده از پارسونز و همکاران، ۲۰۰۶، با اعمال تغییرات و اصلاحات لازم از سوی نگارندگان).

این فیلترها که به‌وضوح در شکل ۳ دیده می‌شود، آن است که فیلترهای مورد استفاده سبب افزایش یا بهبود پاسخ منابع و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی کم‌عمق می‌شوند و برعکس کاهش سیگنال مغناطیسی (و در نتیجه کاهش قابلیت آشکارسازی) منابع و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی عمیق (مانند منابع مغناطیسی شماره ۱، ۲ و ۳) را به‌دنبال دارند. اشکال مهم دیگری که استفاده از این فیلترهای معمول یا رایج دارد، آن است که طیف تغییرات نسبتاً زیاد دامنه شدت میدان مغناطیسی در داده‌های خروجی از فیلترهای مزبور، ممکن است سبب شوند تا نتوان اطلاعات لازم از مرزها یا لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را به‌دست آورد. همچنین ممکن است سبب شوند تا تعیین لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به‌صورت ضعیف عملی شود و با بی‌دقتی همراه باشد. به‌علاوه، برخی از این فیلترهای معمول یا رایج سبب افزایش نوفه و به تبع آن کاهش قابلیت کشف یا تفسیر مرزهای بی‌هنجاری‌ها می‌شوند. با به‌کارگیری روش یا فیلترهای جدید لبه‌ای ZS مورد استفاده در ادامه این مقاله، معایب پیش‌گفته که در استفاده با فیلترهای معمول و رایج وجود دارد، تا حد زیادی رفع می‌شود و تفسیر بی‌هنجاری‌ها و مرزهایشان بهبود می‌یابد.

نتایج اعمال فیلترهای معمول و رایج شامل فیلترهای تیلت (Tilt filter)، سیگنال تحلیلی، مشتق افقی و مشتق قائم اول روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی نشان داده شده در شکل ۲، شامل منابع متعدد مغناطیسی با پارامترهای هندسی و مغناطیسی آمده در جدول ۱، در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که فیلتر تیلت را، میلر و سینگ (۱۹۹۴) به منظور تحلیل و به نقشه در آوردن ساختارهای زمین‌شناسی از روی داده‌های میدان پتانسیل (گرانی و مغناطیس) و بهبود پاسخ بی‌هنجاری‌های مربوط (به‌ویژه بهبود پاسخ بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ضعیف) ابداع کردند و توسعه دادند (میلر و سینگ، ۱۹۹۴؛ وردوزکو و همکاران، ۲۰۰۴). همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، فیلترهای معمول یا رایج به کار رفته، مرز منابع یا بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را به‌نسبت یا تا حدی مبهم و ضعیف نشان می‌دهند، به‌طوری‌که شکل هاله‌ای یا پخش (Diffusion) رنگ‌های نشان دهنده شدت‌های متفاوت میدان مغناطیسی در محل مرزها یا لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تا حدی اتفاق می‌افتد و در نتیجه، مرز کاملاً دقیق منابع یا بی‌هنجاری‌های مزبور مشخص نمی‌شود. این امر یکی از معایب مهم این فیلترها است. عیب مهم دیگر



شکل ۲. نقشه دویعدی شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی زمین مشکل از ۱۶ منبع مغناطیسی متفاوت با خصوصیات هندسی و مغناطیسی ذکر شده در جدول ۱.



شکل ۳. نتایج اعمال فیلترهای سیگنال تحلیلی (بالا سمت چپ)، مشتق قائم اول (بالا سمت راست)، مشتق افقی (پایین سمت چپ) و تیلت (پایین سمت راست) روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی نشان داده شده در شکل ۲، که شامل متعدد مغناطیسی با پارامترهای هندسی و مغناطیسی آمده در جدول ۱ است.

جدول ۱. خصوصیات یا پارامترهای هندسی و مغناطیسی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی پیشرو سه‌بعدی برای ۱۶ منبع مغناطیسی نشان داده شده در شکل ۲.

شماره منبع مغناطیسی	عمق (متر)	عرض (متر)	گسترش عمقی (متر)	شیب (درجه)	خودپذیری مغناطیسی (SI)	گسترش طولی (متر)	امتداد (درجه)
۱	۴۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۱۰	۱۵۰۰۰	-۵۰
۲	۶۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۱۰	۱۵۰۰۰	-۵۰
۳	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۱۰	۱۵۰۰۰	-۵۰
۴	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۷۰	۰.۰۱۰	۱۲۰۰۰	-۵۵
۵	۵۰۰	۵۰۰۰	۲۰۰۰	۶۰	۰.۰۱۰	۷۰۰۰	-۵۰
۶	۱۰۰۰	۸۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰	۰.۰۰۵	۸۰۰۰	-۳۰
۷	۶۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۰۱	۲۰۰۰۰	-۲۰
۸	۲۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۰۱	۲۰۰۰۰	-۲۰
۹	۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۰۳	۱۰۰۰۰	۲۰
۱۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۰۳	۱۰۰۰۰	-۶۰
۱۱	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۰۳	۱۲۰۰۰	۴۰
۱۲	۲۰۰	۴۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰	۰.۰۰۱	۲۰۰۰۰	-۵۰
۱۳	۵۰۰	۴۰۰	۱۰۰۰	۴۰	۰.۰۰۲	۳۲۰۰۰	۵۰
۱۴	۵۰۰	۴۰۰	۱۰۰۰	۱۴۰	۰.۰۰۱	۳۲۰۰۰	۵۰
۱۵	۶۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۹۰	-۰.۰۰۲	۸۰۰۰	۵۵
۱۶	۴۰۰	۶۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰	-۰.۰۱۰	۸۰۰۰	-۱۰

منابع یا بی‌هنجاری‌های مزبور را بهبود می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ نیز دیده می‌شود، با اعمال فیلتر ZS-Edgezone لبه‌های منابع مغناطیسی (نشان داده شده در شکل ۲)، به صورت تیز و ناگهانی ظاهر می‌شود و بدین ترتیب آشکارسازی لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با اعمال این فیلتر به خوبی بهبود یا افزایش می‌یابد. همچنین فیلتر مزبور، این قابلیت را دارد که بتوان

در سمت راست شکل ۴، نتیجه اعمال فیلتر جدید و خطی ZS-Edgezone روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی نشان داده شده در شکل ۲، نمایش داده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، فیلتر خطی ZS-Edgezone یک فیلتر بر پایه مشتق است که محدوده دامنه بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل را متراکم می‌سازد و قابلیت آشکارسازی لبه‌های

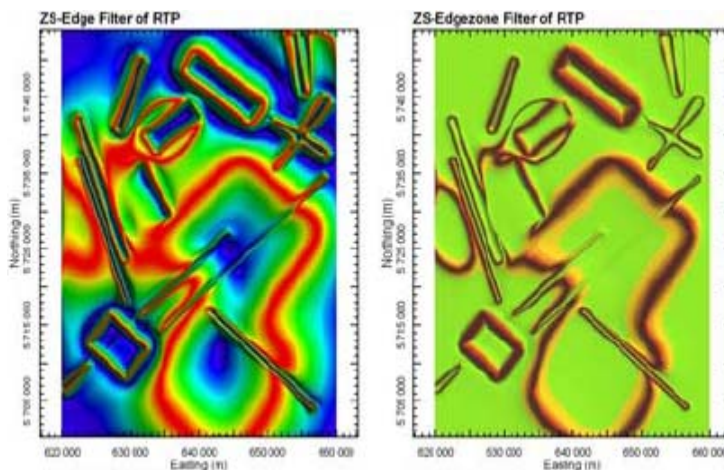
از آن برای تبدیل خودکار لبه‌ها به بردارها (Vectors) در سامانه اطلاعات جغرافیایی (Geographic information system) استفاده کرد. اگرچه این فیلتر به‌نحو قابل ملاحظه‌ای، دقت تعیین لبه‌های بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل را افزایش می‌دهد، در مواردی که عرض بی‌هنجاری نسبت به عمق آن کم است دارای محدودیت است و اغلب در این موارد، قدرت تفکیک (Resolution) کمتری در آشکارسازی لبه‌های بی‌هنجاری‌های مزبور دارد. علاوه‌براین در مواردی که یک منبع بی‌هنجاری کم‌عمق با گسترش عمقی محدود روی یک منبع بی‌هنجاری عمیق‌تر قرار گرفته باشد، این فیلتر محل لبه‌های بی‌هنجاری‌ها را به‌صورت هاله‌ای و نسبتاً مبهم تعیین می‌کند. در سمت چپ شکل ۴ نیز نتیجه اعمال فیلتر ZS-Edge روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی نشان داده شده در شکل ۲، نمایش داده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، تفاوت این فیلتر با فیلتر ZS-Edgezone در آن است که دامنه بزرگ شدت میدان مغناطیسی روی منابع بی‌هنجاری در این نوع فیلتر حفظ می‌شود و در نتیجه تشخیص بی‌هنجاری‌ها با آن گرچه بهبود می‌یابد ولی از تیزی لبه‌ها یا مرزهای بی‌هنجاری‌ها کاسته می‌شود. هر دو نوع فیلترهای لبه‌ای یادشده، لبه‌هایی را تولید می‌کنند که در جهت شیب منبع بی‌هنجاری به سمت عمیق‌ترین لبه منبع مهاجرت می‌کنند. این امر یک مزیت آشکار این فیلترهای لبه‌ای را نشان می‌دهد و آن این است که این فیلترها نامتقارن بودن منبع بی‌هنجاری را حتی در صورتی که متقارن ولی شیب‌دار باشد، نشان می‌دهند که این امر، در تفسیر و تعیین جهت شیب و مقدار کیفی یا تقریبی شیب منبع بی‌هنجاری، کمک شایانی می‌کند. البته این مزیت در مورد فیلتر لبه‌ای ZS-Edge نسبت به فیلتر لبه‌ای ZS-Edgezone به‌صورت بهتر و نمایان‌تری دیده می‌شود. شکل ۴ نتایج این فیلترهای لبه‌ای روی داده‌های

شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی مورد بحث را نشان می‌دهد. با توجه به شیب منابع بی‌هنجاری مدل مصنوعی مزبور (ذکر شده در جدول ۱) و عمیق‌ترین لبه‌های منابع بی‌هنجاری در جهت شیب این منابع (که در شکل ۲ با خطوط فسفری‌رنگ نشان داده شده و حتی در چند مورد از حاشیه شکل یا نقشه دو بُعدی در این شکل خارج شده است)، می‌توان از روی شکل ۴ عملکرد یا کارایی بسیار خوب فیلترهای لبه‌ای را مورد بحث قرار داد. تعیین لبه‌های منابع بی‌هنجاری در کمترین و بیشترین عمق و نیز اعماق متوسط و تشخیص جهت شیب و مقدار کیفی یا تقریبی شیب منابع بی‌هنجاری مورد نظر از نتایج مطلوب به دست آمده است.

اثر نوفه بر عملکرد یا کارایی این فیلترهای لبه‌ای به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی با اضافه کردن مقدار قابل توجهی نوفه به داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی نشان داده شده در شکل ۲ مورد بررسی قرار گرفت. نوفه تأثیر داده شده دارای توزیع گاوسی با انحراف معیار برابر با ۱۰ درصد انحراف معیار شدت میدان کل مغناطیسی بوده است. همان‌طور که در ادامه نشان داده خواهد شد، تأثیر میزان نوفه به‌نسبت زیاد پیش‌گفته در پاسخ شدت میدان کل مغناطیسی مدل مصنوعی مورد نظر، روی عملکرد یا کارایی فیلترهای مورد بررسی در این مقاله نیز به‌نحو قابل ملاحظه‌ای تأثیرگذار بوده است. برای کاهش اثر نوفه روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی، مدل مصنوعی مورد نظر از یک روش یا الگوریتم غیرخطی هموارساز به منظور رفع پرش (Despiking) از نوفه مزبور استفاده شد و سپس برگردان به قطب روی داده‌های به‌دست آمده صورت گرفت. در مرحله بعد فیلترهای لبه‌ای مورد نظر (از نوع معمول و رایج و یا از نوع جدید ZS روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل

مصنوعی موردنظر اعمال شد. شکل ۵ اثر نوفه روی عملکرد فیلتر مشتق قائم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش بالایی و سمت راست شکل ۵ دیده می‌شود، اثر نوفه روی داده‌های فیلتر مشتق قائم برگردان شده به قطب قابل توجه است، به‌نحوی که از مقایسه این داده‌های حاوی نوفه با داده‌های مشابه بدون نوفه (که در بخش بالایی و سمت چپ شکل ۵ نشان داده شده‌اند)، مشخص می‌شود که منابع بی‌هنجاری مغناطیسی ضعیف و عمیق در مدل مصنوعی موردنظر از روی داده‌های حاوی نوفه (نشان داده شده در بخش بالایی و سمت راست شکل ۵) قابل شناسایی نیست و در واقع با نوفه پوشیده شده است. همان‌طور که در شکل‌های بخش پایینی (سمت راست و چپ) شکل ۵ دیده می‌شود، اثر نوفه با رفع پرش از داده‌های مزبور و یا با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر، برای مثال با استفاده از یک فیلتر فراسو (با ارتفاع ۱۰۰ متر) شدیداً کاهش یافته به‌طوری که قابلیت آشکارسازی منابع بی‌هنجاری مغناطیسی متفاوت، حتی منابع بی‌هنجاری مغناطیسی ضعیف و عمیق در این شکل‌ها (که اثر نوفه در آنها با به‌کارگیری یکی از دو شیوه پیش‌گفته کاهش یافته است) نسبت به شکل بخش بالایی و سمت راست شکل ۵ (که در آن داده‌ها نوفه‌ای‌اند ولی

تمهیدی به منظور کاهش اثر نوفه در آن صورت نگرفته است) به‌نحو قابل توجهی بهبود یا افزایش پیدا کرده است. عملکرد یا کارایی فیلترهای لبه‌ای و جدید ZS نیز تحت تأثیر قابل‌ملاحظه نوفه روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی مدل مصنوعی موردنظر، به‌نحو قابل توجهی تأثیر می‌پذیرد. بنابراین قبل از کاربرد فیلترهای لبه‌ای و جدید ZS روی داده‌های مزبور لازم است به‌منظور کاهش نوفه در داده‌ها از یک روش هموارسازی استاندارد مانند رفع پرش از داده‌ها و یا اعمال فیلتر پایین‌گذر روی داده‌ها استفاده شود تا در نتیجه بتوان به کاربرد موفق این فیلترهای لبه‌ای (و دیگر فیلترهای لبه‌ای) دست یافت. شکل ۶، نتایج ترکیب داده‌های (حاوی نوفه کاهش یافته) حاصل از اعمال سه فیلتر لبه‌ای متفاوت از جمله فیلتر ZS-Edge در فضای رنگ‌های اصلی سرخ، سبز و آبی (RGB) را نشان می‌دهد. نتایج ترکیب داده‌های حاصل از اعمال فیلتر تیلت (به رنگ سرخ)، فیلتر ZS-Edge (به رنگ سبز) و فیلتر مشتق افقی (به رنگ آبی) در بخش بالایی شکل ۶ و نتایج ترکیب داده‌های حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی (به رنگ سرخ)، فیلتر ZS-Edge (به رنگ سبز) و فیلتر مشتق افقی (به رنگ آبی) در بخش پایینی شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. نتایج اعمال فیلترهای ZS-Edge (سمت راست) و ZS-Edgezone (سمت چپ) روی داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی نشان داده شده در شکل ۲، شامل منابع متعدد مغناطیسی با پارامترهای هندسی و مغناطیسی آمده در جدول ۱.

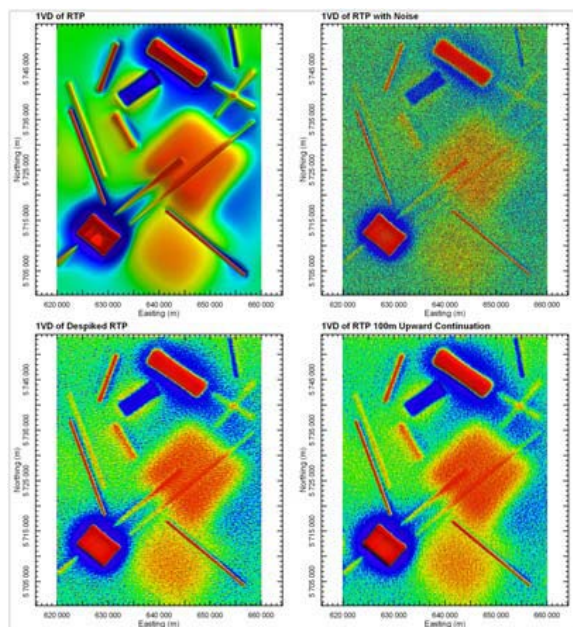
داده‌های مغناطیس‌هوایی در این منطقه که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۸۳ برداشت کرده، استفاده شده است. به‌طور کلی زمین‌شناسی منطقه برداشت شامل واحدهای کربناته دگرگون شده قبل از کرتاسه و واحدهای آتشفشانی-نفوذی ترشیاری است که در نقشه زمین‌شناسی منطقه (نشان داده شده در شکل ۷) مشاهده می‌شوند. پیکان‌های رنگی موجود روی شکل ۷ جهت شیب واحدهای زمین‌شناسی را براساس برداشت‌های صحرایی زمین‌شناسی نشان می‌دهند.

شکل ۸ نقشه شدت میدان مغناطیسی بعد از عملی ساختن تصحیح IGRF و اعمال فیلتر برگردان به قطب (RTP) روی داده‌های مغناطیس‌هوایی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نقشه دیده می‌شود، شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده موردنظر در یک محدوده کمتر از 600 nT - (رنگ آبی) تا بالای 400 nT (رنگ سرخ) تغییر می‌کند.

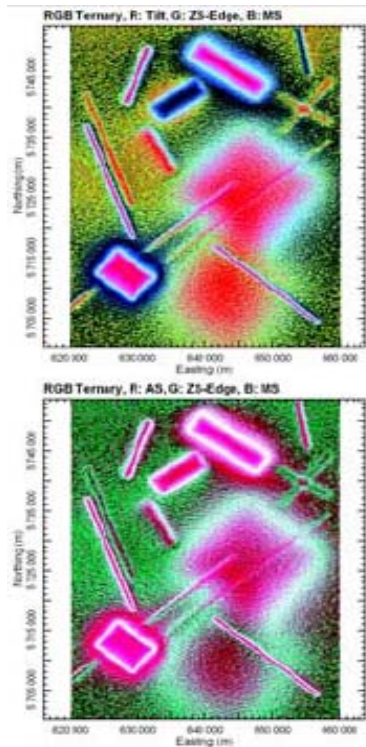
در واقع اطلاعات یا داده‌های ترکیبی در این شکل حاصل ترکیب اطلاعات مربوط به دامنه شدت میدان مغناطیسی منابع بی‌هنجاری و اطلاعات لبه‌های این منابع بی‌هنجاری است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ترکیب داده‌های حاصل از اعمال فیلترهای لبه‌ای متفاوت در یک تصویر رنگی RGB، حتی با وجود نوفه در داده‌ها، توانسته لبه‌های منابع بی‌هنجاری و جهت شیب و مقدار کیفی یا تقریبی منابع بی‌هنجاری موردنظر را به شیوه‌ای که قبلاً ذکر شد، مشخص سازد.

۴ بررسی موردی: تفکیک واحدهای زمین‌شناسی و تعیین شیب آنها از روی داده‌های مغناطیس‌هوایی منطقه کلاته-رشم دامغان

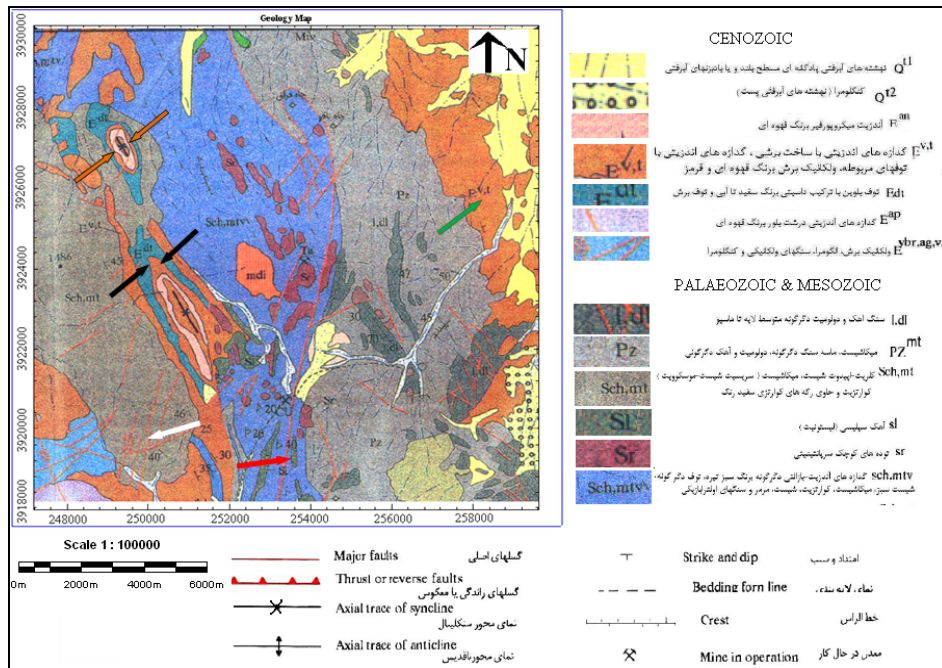
در این مقاله به منظور تفکیک و تعیین شیب واحدهای زمین‌شناسی منطقه کلاته-رشم در 120 کیلومتری جنوب شهر دامغان (واقع در استان سمنان) از



شکل ۵. مقایسه نتایج اعمال فیلتر مشتق قائم اول روی داده‌های بدون نوفه (بالا سمت چپ)، داده‌های حاوی نوفه (بالا سمت راست)، داده‌های حاوی نوفه کاهش داده شده از راه رفع پرش از داده‌های حاوی نوفه (پایین سمت چپ) و داده‌های حاوی نوفه کاهش داده شده با اعمال فیلتر فراسو با ارتفاع 100 متر (پایین سمت راست). منظور از داده‌ها در این شکل، داده‌های شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب مدل مصنوعی نشان داده شده در شکل ۲، است.



شکل ۶. نتایج ترکیب داده‌های (حاوی نوفه کاهش یافته) حاصل از اعمال سه فیلتر لبه‌ای متفاوت در فضای رنگ‌های اصلی سرخ، سبز و آبی (RGB). نتایج ترکیب داده‌های حاصل از اعمال فیلتر تیلت به رنگ سرخ، فیلتر ZS-Edge به رنگ سبز و فیلتر مشتق افقی به رنگ آبی در بخش بالایی و نتایج ترکیب داده‌های حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی به رنگ سرخ، فیلتر ZS-Edge به رنگ سبز و فیلتر مشتق افقی به رنگ آبی در بخش پایینی این شکل دیده می‌شود.



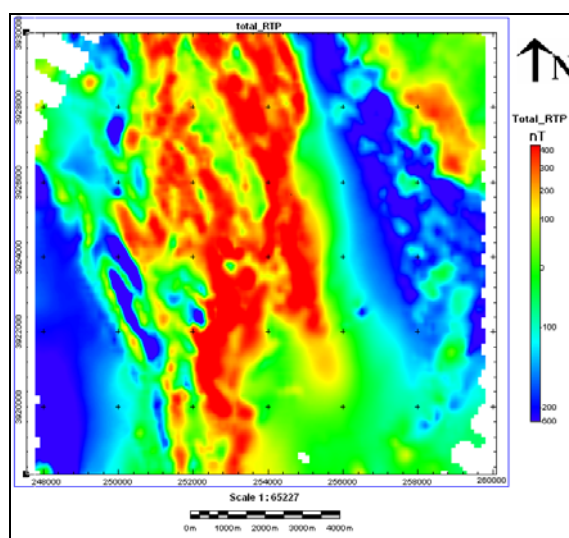
شکل ۷. نقشه زمین‌شناسی منطقه کلاته-رشم دامغان (تهیه شده در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۱).

مغناطیسی در نتیجه اعمال فیلتر ZS-Edgezone روی نتایج فیلتر ادامه فراسوی ۱۰۰ متر به دست آمده، در شکل ۹ آورده شده است. همه نقشه‌های مغناطیسی در این بخش از مقاله (عرضه شده در شکل‌های ۸ تا ۱۰) با استفاده از نرم‌افزار Profile Analyst به دست آمده است.

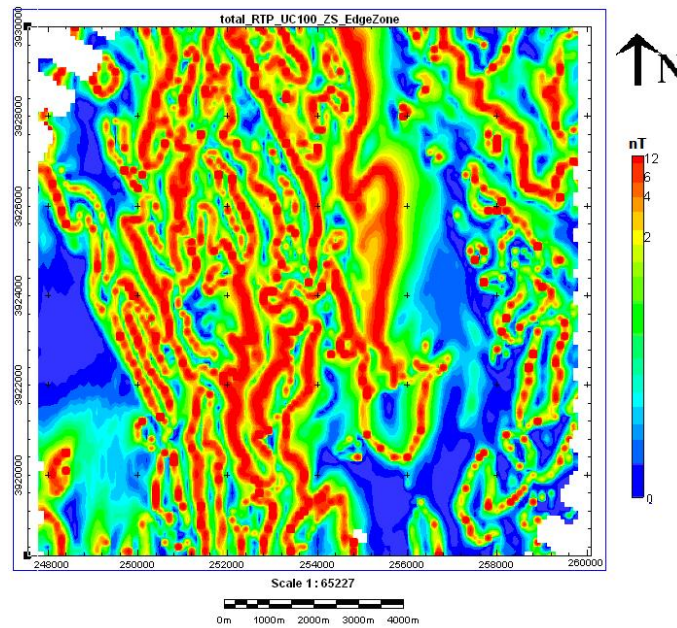
همان‌طور که از روی نقشه نشان داده شده در شکل ۹ دیده می‌شود، نتایج فیلتر ZS-Edgezone به مقدار زیادی باعث افزایش دقت بی‌هنجاری‌ها بر بالای مرزهای منابع آنها شده است که نتیجه آن، تعریف یا تفکیک بسیار خوب مرز واحدهای زمین‌شناسی در این نقشه نسبت به نقشه شدت میدان کل مغناطیسی برگردان به قطب شده (نشان داده شده در شکل ۸) است. حال برای این که نقشه شیب لایه‌ها را به دست آوریم نتایج فیلتر ZS-Edgezone را برای سه ارتفاع ۱۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ متر به صورت سه رنگ سرخ، سبز و آبی با یکدیگر ترکیب می‌کنیم. برای ترکیب این سه داده از فضای رنگ‌های اصلی سرخ، سبز و آبی (RGB) استفاده می‌شود که در اغلب نرم‌افزارهای ژئوفیزیکی مربوط مانند Profile Analyst و Oasis Montaj این قابلیت وجود دارد.

تغییرات مغناطیسی مورد بحث در این منطقه اصولاً به دلایل تغییرات محتوای کانی‌های مغناطیسی در سنگ‌های منطقه، به‌ویژه تغییرات در محتوای مگنتیت اولیه ناشی از ترکیب سنگ‌شناسی (آذرین یا رسوبی- دگرگونی) و تغییرات مگنتیت ثانویه ناشی از دگرسانی است. همچنین، همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، مرز بین واحدهای مغناطیسی در بسیاری از نواحی به دقت تعریف نشده است که می‌توان با اعمال فیلترهای خاص، تعیین دقیق این مرزها را به مقدار زیادی بهبود داد.

سپس فیلتر ادامه فراسوی مقادیر شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده، اعمال شد تا پاسخ مربوط به منابع مغناطیسی عمیق‌تر به دست آید. در این تحقیق، مقادیر ادامه فراسوی ۱۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسوی ۱۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ متر را به صورت شبکه‌های با قالب *.grd در نرم‌افزار ژئوفیزیکی Profile Analyst ساخت شرکت انکام ذخیره می‌کنیم. در مرحله بعد روی نتایج حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو، فیلتر ZS-Edgezone اعمال شده است تا مرز بین واحدهای دارای خاصیت مغناطیسی متفاوت به بهترین شکل تعریف شود. نقشه



شکل ۸. نقشه شدت میدان مغناطیسی بعد از عملی شدن تصحیح IGRF و اعمال فیلتر برگردان به قطب (RTP).

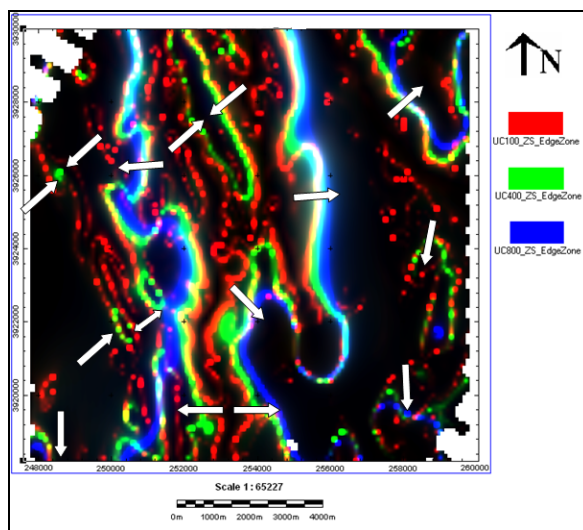


شکل ۹. نقشه فیلتر ZS_Edgezone به دست آمده با اعمال این فیلتر روی نتایج فیلتر ادامه فراسوی ۱۰۰ متر.

نقشه شیب لایه‌ها، مشاهده می‌شود که شیب‌های مشخص شده روی نقشه زمین‌شناسی (که در نتیجه برداشت‌های زمین‌شناسی صحرایی به دست آمده)، به خوبی با شیب‌های تعیین شده به روش مطرح شده در این مقاله مطابقت دارد. این موضوع، اهمیت روش ذکر شده را برای تعیین جهت شیب لایه‌ها نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۰، همچنین می‌توان لایه‌های دارای شیب زیاد را از لایه‌های با شیب کم جدا کرد؛ به این صورت که برای لایه‌های با شیب کم، رنگ‌های سرخ، سبز و آبی به خوبی از هم تفکیک شده‌اند و هرچه این تفکیک شدگی بیشتر باشد، همان‌طور که در شکل ۷ دیده شد، شیب لایه کمتر خواهد بود. برای لایه‌های با شیب زیاد و نزدیک به قائم، جداشدگی این سه رنگ کمتر است و به مقدار زیادی دارای هم‌پوشانی‌اند که این حالت بیشتر در قسمت مرکزی از منطقه دیده می‌شود و بنابراین می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که در قسمت مرکزی منطقه، لایه‌ها دارای شیب تقریباً زیاد هستند.

شکل ۱۰، نقشه شیب لایه‌ها که در نتیجه ترکیب نتایج فیلتر ZS-Edgezone با فیلترهای ادامه فراسوی ۱۰۰ متر (رنگ سرخ)، ادامه فراسوی ۴۰۰ متر (رنگ سبز) و ادامه فراسوی ۸۰۰ متر (رنگ آبی) به دست آمده، را نشان می‌دهد. با توجه به مطالب گفته شده در بخش ۲ (با عنوان روش تعیین شیب واحدهای زمین‌شناسی از روی داده‌های مغناطیس‌هوایی) و اینکه مرز بین واحدها در عمق‌های گوناگون در قالب رنگ‌های متفاوت از هم مجزا شده است، به سادگی می‌توان جهت شیب واحدهای زمین‌شناسی را تعیین کرد. در شکل ۱۰، جهت شیب لایه‌ها از رنگ سرخ (ادامه فراسوی ۱۰۰ متر که مرز بین لایه‌ها در عمق کمتر را نشان می‌دهد) به طرف رنگ سبز (مرز بین لایه‌ها در عمق متوسط به دست آمده از نتیجه فیلتر ادامه فراسوی ۴۰۰ متر) و در ادامه به سمت رنگ آبی (مرز بین لایه‌ها در عمق بیشتر به دست آمده از نتیجه فیلتر ادامه فراسوی ۸۰۰ متر) است که با پیکان سفید رنگ در نقاط گوناگون منطقه مورد بررسی مشخص شده است. با مراجعه به نقشه زمین‌شناسی (شکل ۷) و مقایسه آن با



شکل ۱۰. نقشه شیب لایه‌ها. روی این نقشه، نتایج ترکیب فیلتر ZS-Edgezone با فیلتر ادامه فراسوی ۱۰۰ متر (فیلتر ترکیبی UC100_ZS_Edgezone) به رنگ سرخ، نتایج ترکیب فیلتر ZS-Edgezone با فیلتر ادامه فراسوی ۴۰۰ متر (فیلتر ترکیبی UC400_ZS_Edgezone) به رنگ سبز و نتایج ترکیب فیلتر ZS-Edgezone با فیلتر ادامه فراسوی ۸۰۰ متر (فیلتر ترکیبی UC800_ZS_Edgezone) به رنگ آبی نشان داده شده و بنابر این جهت شیب از رنگ سرخ به طرف رنگ سبز و سپس به سمت رنگ آبی است.

می‌شود و در نتیجه از ترکیب نتایج فیلتر لایه‌های ZS-Edgezone با نتایج اعمال ادامه فراسو به صورت یک تصویر ترکیبی رنگ‌های اصلی روی داده‌های مغناطیسی هوایی منطقه کلاته-رشم دامغان، جهت شیب لایه‌ها در منطقه مورد بررسی به دست آمده است. در این روش برای لایه‌های دارای شیب کم، رنگ‌های سرخ، سبز و آبی (که به ترتیب نتیجه اعمال فیلتر ادامه فراسو با سه ارتفاع کم، متوسط و زیاد روی داده‌های مغناطیسی هستند) به خوبی از هم تفکیک می‌شوند و هرچه این تفکیک‌شدگی بیشتر باشد، شیب لایه‌ها کمتر است. برای لایه‌های دارای شیب زیاد و نزدیک به قائم، جداسازی این سه رنگ کمتر است و لایه‌ها تا حدی دارای هم‌پوشانی یا انطباق هستند. بدین ترتیب لایه‌های با شیب زیاد از لایه‌های با شیب کم متمایز می‌شوند. نتایج شیب به دست آمده از این روش، مطابقت خوبی با نتایج شیب حاصل از نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد نظر (که در نتیجه برداشت‌های زمین‌شناسی صحرائی به دست آمده‌اند)، نشان می‌دهند.

از روی شکل ۱۰، به طور کلی می‌توان تغییرات شیب کلی از منطقه را به این صورت عنوان کرد که در قسمت شمال شرقی منطقه شیب به سمت شمال شرقی و در جنوب غربی ناحیه شیب به سمت جنوب است. همچنین در قسمت‌های مرکزی و بخش‌های شمالی و مرکزی منطقه مورد بررسی، دو ساختار ناودیس مانند نسبتاً کوچک و یک ساختار تاقدیسی نسبتاً وسیع یا بزرگ (در مرکز) مشاهده می‌شود در حالی که به سمت جنوب از مرکز منطقه فقط یک ساختار تاقدیسی مانند قرار دارد.

۵ نتیجه‌گیری

اعمال فیلتر ادامه فراسو در مرز بین دو لایه با خواص مغناطیسی متفاوت، سبب جابه‌جایی نیم‌رخ‌های مغناطیسی (یا محل قرارگیری بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو واحد زمین‌شناسی روی نیم‌رخ‌های مغناطیسی) با افزایش ارتفاع به طور جانبی در جهت شیب بین دو لایه

MacKenzie, C., 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping, *The Leading Edge*, **23**(2), 116-119.

منابع

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۱،

گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلاته-رشم

دامغان.

Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2008, Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics, *Geophysics*, **73**(3), H1-H4.

Davis, K. and Li, Y., 2009, Enhancement of depth estimation techniques with amplitude analysis, 67th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists (SEG), Expanded Abstracts, 908-912.

Encom Technology Pty Ltd., 2003, ModelVision Pro (Version 5.0) User Guide.

Encom Technology Pty Ltd., 2007, Profile Analyst (Version 7.0) Reference Manual.

Miller, H. G. and Singh, V., 1994, Potential tilt—a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, **32**, 213-217.

Neawsuparpa, K., Charusirira, P. and Meyers, J., 2005, New Processing of Airborne Magnetic and Electromagnetic Data and Interpretation for Subsurface Structures in the Loei Area, Northeastern Thailand, *ScienceAsia*, **31**, 283-298.

Parsons, S., Nadeau, L., Keating, P. and Chung, C. J., 2006, Optimizing the use of aeromagnetic data for predictive geological interpretation: an example from the Grenville Province, Quebec, *Computers & Geosciences*, **32**, 565-576.

Pedersen, L. B. and Bastani, M., 1997, Dip angle processing of magnetic anomalies - An analytical signal technique, 60th Annual International Meeting, European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE), Extended Abstracts, F034.

Shi, Z. and Boyd, D., 1993, AUTOMAG? An automated method to estimate thickness of overburden from aeromagnetic profiles, *Exploration Geophysics*, **24**(4), 789-794.

Shi, Z., and Butt, G., 2004, New Enhancement Filters for geological mapping, Proceedings of 17th ASEG Annual Conference, Sydney, 73-79.

Thurston, J. B. and Smith, R. S., 1997, Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method, *Geophysics*, **62**(3), 807-813.

Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M. and