

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ اهداف مغناطیسی در روش مغناطیس سنجی با استفاده از مدلسازی پیشروی دوبعدی و سه بعدی

رضا احمدی^{۱*}، معصومه شریعتی زارچ^۲

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۳/۰۷

دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۱۱

چکیده

در پژوهش حاضر مدلسازی مصنوعی دوبعدی و سه بعدی اهداف هندسی گوناگون معرف ساختارهای زمین شناسی متداول با استفاده از نرم افزار Encom ModelVision انجام شد. در این راستا تأثیر عوامل مختلف همانند جنس، اندازه و ابعاد، عمق دفن و شکل هندسی توده و نیز فواصل برداشت پروفیلی بر روی پاسخ توده‌های مغناطیسی به شکل کروی، بیضوی و خطی که معرف تمام انواع اشکال و ساختارهای زمین شناسی و معدنی هستند، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدلسازی مصنوعی داده‌ها نشان داد که مطابق انتظار، شدت میدان مغناطیسی با اندازه و ابعاد توده‌های مدفون، رابطه مستقیم و با عمق دفن توده، رابطه عکس دارد. همچنین برای توده‌های به شکل چندضلعی دلخواه منتظم و غیرمنتظم، بیضوی و استوانه قائم، پاسخ مغناطیسی توده تا حدود زیادی از شکل هندسی آن تبعیت می‌کند. براساس بررسی تأثیر فواصل برداشت پروفیلی بر روی توده‌های با اشکال کروی، بیضوی و خطی، بین فواصل برداشت پروفیلی و نسبت ارتفاع به نصف عرض بی‌هنجاری مغناطیسی، یک سری روابط ریاضی خطی ساده با ضریب همبستگی بالا به دست آمد که این روابط می‌توانند در عمل برای اکتشاف کانسارهای با اشکال هندسی مختلف بویژه در مراحل پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی مورد استفاده قرار گیرند. بررسی تأثیر اندازه و ابعاد شبکه‌های برداشت بر روی پاسخ بی‌هنجاری‌های مغناطیسی از طریق برداشت‌های مغناطیسی بر روی لوله‌های فلزی مدفون در محوطه دانشگاه صنعتی اراک نیز صورت گرفت. نتایج پژوهش حاضر از طریق برداشت‌های میدانی نشان داد که علیرغم انتخاب فواصل ایستگاهی ثابت و کوچک (یک متر) و اعمال تبدیل‌ها و فیلترهای مناسب بر روی داده‌ها توسط نرم افزار Geosoft Oasis montaj، بطورکلی با کاهش تعداد پروفیل‌ها (افزایش فواصل بین پروفیلی)، پاسخ لوله‌های فلزی مدفون، پهن‌تر و ضعیف‌تر می‌شود، بگونه‌ای که در برخی موارد روند بی‌هنجاری‌ها به‌طورکلی تغییر کرده و حتی تشخیص نوع هدف غیرممکن است.

کلید واژه‌ها: مدلسازی پیشروی دوبعدی و سه‌بعدی، Encom ModelVision، پروفیل برداشت مغناطیسی، محوطه دانشگاه صنعتی اراک، Geosoft Oasis montaj

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک Rezahmadi@gmail.com

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

روش مغناطیس سنجی مناسب ترین روش اکتشاف اهداف، ساختارها و مواد معدنی مغناطیسی است و برای دست‌یابی به نتایج مطلوب با این روش انجام مدل‌سازی پیشروی دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D)، پردازش و مدل‌سازی وارون داده‌های آن گریزناپذیر است. مدل‌سازی مصنوعی پیشرو و وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی از جمله مهم‌ترین مراحل مورد نیاز جهت تفسیر داده‌های مغناطیسی است که به منظور دست‌یابی به نتایج کمی و با قابلیت اعتماد بیشتر جهت تعیین مناسب‌ترین محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مرتبط با توده‌های مغناطیسی زیرسطحی انجام می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی به منظور تعیین شکل تقریبی، نحوه گسترش فضایی و تخمین عمق توده‌های مغناطیسی زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند که معمولاً با مشاهدات و اندازه‌گیری‌های صحرائی، تطابق خوبی دارند.

مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی از نظر ابعادی به انواع یک بعدی (1D)، دوبعدی و سه بعدی تقسیم می‌شوند. در برخی موارد بویژه مناطق دارای پیچیدگی‌های ذاتی، انجام مدل‌سازی‌های یک‌بعدی و یا حتی دوبعدی برای نیل به مقاصد اکتشافی کافی نبوده و نیاز به انجام مدل‌سازی سه‌بعدی به‌خوبی احساس می‌شود. از جمله مزایای مدل‌سازی دوبعدی نسبت به سه‌بعدی، امکان انجام فرایند مدل‌سازی بلافاصله بعد از برداشت دوبعدی داده‌های مربوط به هر یک از پروفیل‌هاست (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). از مزایای مدل‌سازی سه‌بعدی نسبت به دوبعدی نیز واقع‌گرایانه‌تر بودن پاسخ‌ها و دقت بالاتر نتایج می‌باشد. با استفاده از مدل‌سازی پیشرو می‌توان توده‌های مغناطیسی زیرسطحی با جنس، اندازه و ابعاد و عمق دفن‌های مختلف را مدل‌سازی نمود؛ رفتار توده‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی را شبیه‌سازی کرد و اطلاعات کافی درباره اثرات ویژگی‌های فیزیکی محیط بدست آورد.

در پژوهش حاضر تاثیر مهم‌ترین پارامترهای مدل همانند جنس، اندازه و ابعاد، عمق دفن و شکل هندسی توده بر روی

پاسخ مدل، از طریق مدل‌سازی پیشروی مصنوعی دوبعدی و سه‌بعدی و نیز تاثیر پارامتر اندازه و ابعاد شبکه برداشت، از طریق مدل‌سازی پیشروی داده‌های مصنوعی و وارون‌سازی داده‌های واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

در ارتباط با مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های مغناطیسی و پردازش و تفسیر برداشت‌های مغناطیسی طی سال‌های طولانی، تحقیقات چندی صورت گرفته که در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. آگوکز (Agocs, 1955) با استفاده از روابط احتمالات هندسی و مسئله سوزن بافن (Buffon) به بررسی اثر تغییر فاصله خطوط پرواز در برداشت‌های مغناطیسی هوابرد پرداخت. داده‌های مغناطیسی مربوط به برداشت هوابرد در معدن سنگ آهن مارمورا (Marmora) در کشور کانادا با فاصله خطوط پرواز از ۱ مایل تا ۰/۲۵ مایل است. نوروزی (۱۳۷۶) پارامترهای مؤثر در طراحی بهینه یک شبکه برداشت ژئوفیزیکی را بررسی نمود. بدین منظور سه ساختار آهنی به شکل‌های ورقه‌ای، گسلی و استوانه‌ای در محوطه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران در محل‌های از پیش تعیین شده را در عمق‌های ۰/۵ تا ۱ متر دفن شد. براساس تئوری‌های احتمالات هندسی برداشت‌های مغناطیسی روی ساختارهای مذکور توسط سه شبکه مربعی با ابعاد ۳×۳ متر، ۶×۶ متر و ۹×۹ متر صورت گرفت. با محاسبه احتمال کشف و هزینه برداشت‌ها، پارامترهای قابل اهمیتی که در طراحی بهینه یک شبکه برداشت ژئوفیزیکی مطرح هستند، معرفی شد.

نمکی و همکاران (۱۳۸۹) با اعمال تغییراتی بر روی الگوریتم سه‌بعدی، یک روش مدل‌سازی دوبعدی برای ساختارهای خطی مانند گسل‌ها و دایک‌ها با طراحی برداشت عمود بر این ساختارها معرفی کردند. در این روش داده‌های مربوط به نیم‌رخ‌های منطقه مورد مطالعه، به تعداد زیادی منشورهای افقی با طول بی‌نهایت و با خودپذیری مغناطیسی ثابت تقسیم شد به‌گونه‌ای که تعداد این منشورها به مراتب بیشتر از تعداد داده‌ها می‌باشد. بنابراین به یک مسئله فرومعیّن (Under determined) تبدیل شد. تابع هدف به صورت تابعی از

مشتقات افقی و روش اویلر برای تشخیص لبه‌های بی‌هنجاری بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی در فلات گالالا ال بهاریا (Galala El Bahariya Plateau) استفاده نمود.

ورفی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸) به منظور آشکارسازی سازه‌های زیرسطحی، الگوریتم وارون‌سازی کمینه طول وزن‌دار را منظم‌سازی کرده و از دو قید فشردگی و وزندهی عمقی استفاده کردند. آنها برای بررسی کارایی الگوریتم از داده‌های مصنوعی حاصل از مدل دایک قائم و دو دایک شیب‌دار استفاده کردند. عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های لوله انتقال گاز در منطقه قلعه شوکت شهرستان شاهرود و داده‌های آثار باستانی ناحیه‌ای از شهر سوخته پمپئی (Pompeii) آزمایش شد.

۲. روش شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر مدلسازی مصنوعی دوبعدی و سه بعدی اهداف مغناطیسی معرف ساختارهای زمین‌شناسی متداول، با استفاده از نرم‌افزار Encom ModelVision انجام شد. در این راستا تأثیر عوامل مهمی همانند جنس، اندازه و ابعاد، عمق دفن و شکل هندسی توده، مورد بررسی قرار گرفته تا از نتایج آنها در تفسیر برداشت‌های واقعی استفاده شود. گفتنی است که تعداد بسیار زیادی پارامتر وجود دارند که بر روی داده‌های مغناطیسی تأثیرگذارند. اگرچه پارامترهای دیگری همانند جهت‌گیری یا راستای قرارگیری هدف نسبت به راستای شمال مغناطیسی (Orientation)، عرض جغرافیایی محدوده برداشت، ارتفاع و توپوگرافی ایستگاه اندازه‌گیری و زمان برداشت داده‌ها نیز از پارامترهای تأثیرگذار بر روی داده‌های مغناطیسی هستند (Fairhead, 2015)، اما همان‌گونه که در بخش‌های بعدی نیز آورده شده است، در پژوهش حاضر بر روی پارامترهایی تمرکز شده که به منظور کاربرد در اکتشافات مغناطیسی، با قدری ساده‌سازی بتوان آنها را فرمول‌بندی نمود. از آنجایی که تأثیر پارامتری همانند جهت‌گیری هدف، بصورت توصیفی در اغلب مراجع معتبر همانند (Fairhead, 2015; Valenta, 2015; Hinze et al., 2013; Reynolds, 2011;

خطای داده‌ها، اندازه پارامترهای مدل و مشتقات آنها تعریف شد و با کمینه کردن این تابع، توزیع خودپذیری مغناطیسی بهینه در داخل زمین به دست آمد. کشوردوست و عابدی (۱۳۹۰) پاسخ یک مدل مصنوعی لوله‌ای شکل حاوی ریزدانه‌های مگنتیتی در راستای شمالی و جنوبی را با استفاده از نرم‌افزار Encom ModelVision مدلسازی کردند. آنها برای برداشت بی‌هنجاری مغناطیسی، یک شبکه برداشت 8×10 متر با فاصله نمونه برداری $0/5$ متر در نظر گرفتند. با استفاده از مدلسازی سه بعدی، طول مدل مصنوعی، عمق دو سر لوله و شیب کم آن را با اندکی خطا تخمین زدند.

محمدی (۱۳۹۳) برای انجام مدلسازی پیشروی یک توده مغناطیسی در محیط MATLAB آن را به تعداد دلخواه از سلول‌های منشوری قائم در کنار هم تقسیم نمود و سپس پروفیل‌هایی عمود بر و یا با زاویه دلخواه از روی این منشورها عبور داد که در ادامه، بی‌هنجاری پروفیل‌های عمود بر راستای توده، مناسب‌ترین تشخیص داده شد. او پارامترهای هندسی عمق رویه و کف سلول‌های مکعبی را برای هر یک از این منشورها از طریق وارون‌سازی به دست آورد و توزیع هندسی توده مورد مطالعه در امتداد پروفیل برداشت شده را تخمین زد. سرخیل و عظیمی (۱۳۹۳) بر روی بخشی از محدوده کهک استان قم، داده‌های مغناطیسی را برداشت کرده و با استفاده از روش روند سطحی ارتونرمال و تعیین سطوح مختلف روند، با تعیین بهترین معادله و نقشه روند، کانی‌سازی را مدلسازی نمودند.

سیف و همکاران (۱۳۹۷) با حل مسئله مستقیم و وارون داده‌های مغناطیسی، امکان آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در شرایط آرام زمین شناسی با فاصله خطوط برداشت کمتر از ۶۳ متر می‌توان اهداف و سازه‌های با خودپذیری بالاتر از $3/35$ در واحد SI را تا عمق ۳۳۳ متری شناسایی کرد. همچنین با افزایش خودپذیری مغناطیسی سازه به بیش از $3/7$ ، احتمال کشف تا اعماق ۳۳۰ متر نیز وجود خواهد داشت. سعدا (Saada, 2016) از پردازش‌های مختلف مانند مشتق زاویه شیب،

ابعاد توده‌های طراحی شده، ابعاد مدل‌های مصنوعی نیز ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر و ابعاد شبکه‌های برداشت ۵۰ در ۱۰ متر (فاصله بین ایستگاهی در خطوط پیمایش، ۱۰ متر است) در نظر گرفته شد.

۳. بررسی تأثیر جنس توده بر روی پاسخ مغناطیسی

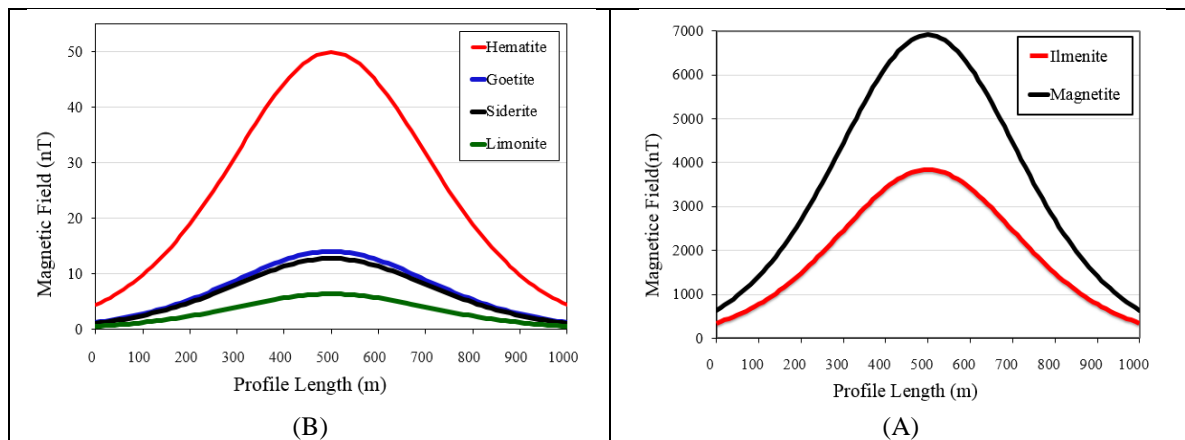
یکی از کمیت‌های مهم برای انجام مدل سازی پیشرو، برآورد صحیح خودپذیری مغناطیسی توده مولد بی هنجاری است. برای مدل سازی از یک بازه خودپذیری مغناطیسی وسیع (در سیستم SI) استفاده شد تا بتواند توده را از نظر محتویات و خصوصیات مغناطیسی آن‌ها دربر گیرد. در این راستا پاسخ توده‌های کروی به شعاع ۲۰۰ متر واقع در عمق دفن ۵۰۰ متر (فاصله از سطح زمین تا مرکز کره) با جنس‌های مختلف از نوع مگنتیت، ایلمنیت، هماتیت، گوتیت، سیدریت و لیمونیت مدلسازی شدند.

به منظور مقایسه شدت میدان مغناطیسی حاصل از توده‌های کروی مغناطیسی با جنس‌های مختلف، بی هنجاری مغناطیسی پروفیل میانی شمالی- جنوبی (عبوری از مرکز) توده در شکل ۱ نشان داده شده است. به دلیل اختلاف چشم-گیر خاصیت مغناطیسی (و در نتیجه میزان شدت میدان مغناطیسی) توده‌های مگنتیت و ایلمنیت با توده‌های هماتیت، گوتیت، سیدریت و لیمونیت، برای جداسازی پاسخ‌ها از یکدیگر و نمایش بهتر، در شکل (الف) بی هنجاری مغناطیسی جنس‌های مگنتیت و ایلمنیت، و در شکل (ب) برای هماتیت، گوتیت، سیدریت و لیمونیت ترسیم شده است. مطابق این شکل مقدار شدت مغناطیسی از بیشترین به کمترین به ترتیب شامل مگنتیت، ایلمنیت، هماتیت، گوتیت، سیدریت و لیمونیت بوده که بیشینه شدت مغناطیسی برابر با ۶۹۱۱ نانوتسلا از آن مگنتیت و کمینه آن برابر با ۶/۴ نانوتسلا برای لیمونیت است.

(Lanza and Meloni, 2006) آورده شده و از سوی دیگر فرمول‌بندی تأثیر آن به دلیل تنوع بسیار زیاد حالات ممکنه، میسر نیست، بنابراین از آوردن آن خودداری شده است. افزودنی است که اثر بسیاری از این پارامترها نظیر عرض جغرافیایی محدوده برداشت، ارتفاع و توپوگرافی ایستگاه اندازه‌گیری و زمان برداشت، با اعمال تصحیحات و فیلترهایی همانند تصحیح عرض جغرافیایی (تصحیح IGRF به منظور دستیابی به مغناطیس باقیمانده)، تصحیح ارتفاع، تصحیح توپوگرافی (همانند فیلتر ادامه فراسو یا گسترش به سمت بالا) و تصحیحات زمانی مولفه‌های میدان مغناطیسی بر روی داده‌های برداشت شده، قابل تصحیح می‌باشند. ذکر این نکته نیز لازم است که تأثیر برخی از این پارامترها همانند ارتفاع بر روی داده‌های مغناطیسی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است، به همین دلیل از مدلسازی این پارامترها نیز خودداری شده است.

همچنین به منظور جامعیت پژوهش، تأثیر فواصل برداشت پروفیلی بر روی پاسخ توده‌های مغناطیسی به شکل کروی، بیضوی و خطی که معرف تمام انواع اهداف، ساختارها و توده‌های معدنی می‌باشند، نیز بررسی شده تا نتایج آنها در طراحی شبکه‌های برداشت بهینه مغناطیسی در عمل مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا برداشت داده‌های واقعی مغناطیسی به منظور شناسایی لوله‌های فلزی مدفون در محوطه دانشگاه صنعتی اراک با هدف بررسی تأثیر فواصل برداشت پروفیلی نیز انجام شد.

در تولید مدل‌های مصنوعی، محیط میزبان تمام مدل‌ها یک نوع سنگ رسوبی از جنس سنگ‌آهک با خاصیت مغناطیسی بسیار اندک (خودپذیری SI ۰/۰۰۰۵) انتخاب شده است. همچنین به منظور جامعیت نتایج پژوهش، جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد، تولید پاسخ‌های متقارن و امکان‌پذیری مقایسه نتایج مدلسازی، مقدار زاویه میل مغناطیسی (Inclination) برابر با ۹۰ درجه و زاویه انحراف مغناطیسی (Declination) صفر درجه منظور شد. با توجه به اندازه و

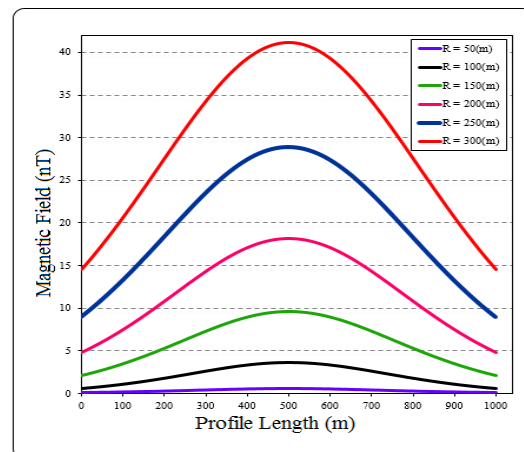


شکل ۱. مقایسه بی‌هنجاری مغناطیسی پروفیلی حاصل از توده کروی با شعاع ۲۰۰ متر و عمق دفن ۵۰۰ متر با جنس‌های (A) مگنتیت و ایلمنیت؛ (B) هماتیت، گوتیت، سیدریت و لیمونیت.

می‌یابد. همچنین با کاهش شعاع توده، شکل منحنی پاسخ، پهن تر و هموارتر شده و میزان شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تغییر اندازه و ابعاد توده، رابطه مستقیمی با شدت میدان مغناطیسی دارد و منحنی شدت میدان مغناطیسی با افزایش شعاع، بی‌هنجاری بهتری را نشان می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر اندازه و ابعاد توده بر روی پاسخ مدل بطور کمی، داده‌های (شدت مغناطیسی) خروجی نرم افزار Encom ModelVision برای هر مدل دوبعدی با اندازه ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر با ابعاد شبکه برداشت ۵۰ در ۱۰ متر، برای توده کروی از جنس هماتیت با شعاع‌های ۵۰، ۶۲/۵، ۷۵، ۸۷/۵، ۱۰۰، ۱۱۲/۵، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵، ۲۵۰، ۲۷۵ و ۳۰۰ متر در عمق دفن ۵۰۰ متر تولید شد. سپس برای هر یک از مدل‌ها نسبت تعداد داده‌های با شدت رنگی بیش از حد آستانه ۰/۵ به تعداد کل داده‌ها، ضریب متوسط شدت میدان مغناطیسی داده‌های بالاتر از حد آستانه، محاسبه گردید. عدد ۰/۵ به عنوان حد آستانه شدت مغناطیسی، براساس راهنمای رنگی پاسخ مدل‌های مصنوعی تولید شده انتخاب شد. بعد براساس نمودار شکل ۳ یک رابطه ریاضی بین شعاع توده کروی و شدت میدان مغناطیسی آن به دست آمد. مطابق این نمودار که روند صعودی دارد، بین شعاع توده کروی و شدت میدان مغناطیسی پاسخ آن مطابق رابطه (۱) یک رابطه ریاضی نسبتاً ساده از نوع درجه دو با ضریب همبستگی عالی برابر با

۴. بررسی تأثیر اندازه و ابعاد توده بر روی پاسخ

برای این منظور پاسخ توده‌های کروی با شعاع‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ متر همگی از جنس هماتیت واقع در عمق دفن یکسان ۵۰۰ متر (فاصله از سطح زمین تا سطح فوقانی کره) مدل‌سازی شدند. در شکل ۲ نمودار تغییرات شدت میدان مغناطیسی پروفیل پیمایش شده از مرکز توده‌های کروی مذکور نشان داده شده است.



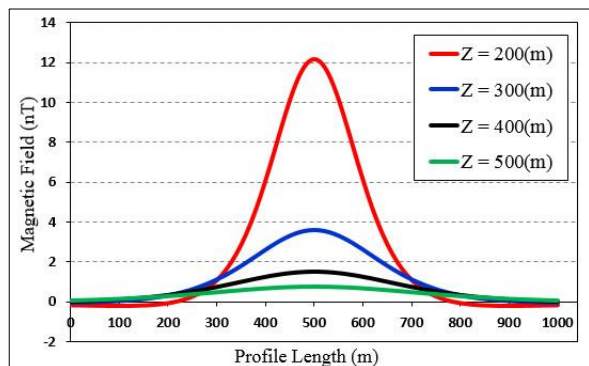
شکل ۲. بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل از کره هماتیته با شعاع‌های مختلف واقع در عمق دفن ثابت ۵۰۰ متر.

با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع توده، شکل (عرض) منحنی پاسخ، باریک‌تر (تیزتر) و برجسته‌تر شده و میزان شدت میدان مغناطیسی (دامنه منحنی)، افزایش

یک، به دست آمد.

$$y=0.0003x^2-0.0239x+0.464 \quad (1)$$

که در این رابطه متغیر x شعاع توده کروی و متغیر y نسبت تعداد داده های با شدت مغناطیسی بیش از حد آستانه ۰/۵ به تعداد کل داده ها ضربدر متوسط شدت میدان مغناطیسی داده های بالاتر از حد آستانه است.

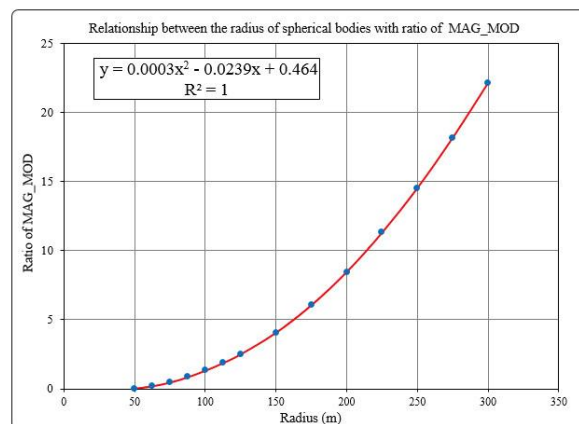


شکل ۴. بی هنجاری شدت مغناطیسی حاصل از توده های کروی هماتی با شعاع ۵۰ متر واقع در اعماق مختلف.

به منظور بررسی تاثیر عمق دفن توده بر روی پاسخ مدل بطور کمی، داده های (شدت مغناطیسی) خروجی نرم افزار Encom ModelVision برای مدل های دوبعدی با اندازه ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر با ابعاد شبکه برداشت ۵۰ در ۱۰ متر برای توده کروی از جنس هماتیت با عمق دفن های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۲۵، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ متر با شعاع ثابت ۵۰ متر تولید شد. سپس برای هر یک از مدل ها، نسبت تعداد داده های با شدت رنگی بیش از حد آستانه ۰/۷ به تعداد کل داده ها، ضربدر متوسط شدت مغناطیسی داده های بالاتر از حد آستانه، محاسبه گردید. عدد ۰/۷ به عنوان حد آستانه شدت مغناطیسی براساس راهنمای رنگی پاسخ مدل های مصنوعی تولید شده انتخاب گردید. سپس با استفاده از نمودار شکل ۵ یک رابطه ریاضی بین عمق دفن توده کروی و شدت مغناطیسی آن به دست آمد. مطابق این نمودار که روند نزولی دارد، بین عمق دفن توده کروی و شدت مغناطیسی پاسخ آن مطابق رابطه (۲) یک رابطه ریاضی چندجمله ای از نوع درجه سه با ضریب همبستگی عالی برابر با ۰/۹۹۷۳ به دست آمد.

$$y=3E-08x^3+3E-05x^2+0.128X+2.0896 \quad (2)$$

که در این رابطه متغیر x عمق دفن توده کروی و متغیر y نسبت تعداد داده های با شدت مغناطیسی بیش از حد آستانه



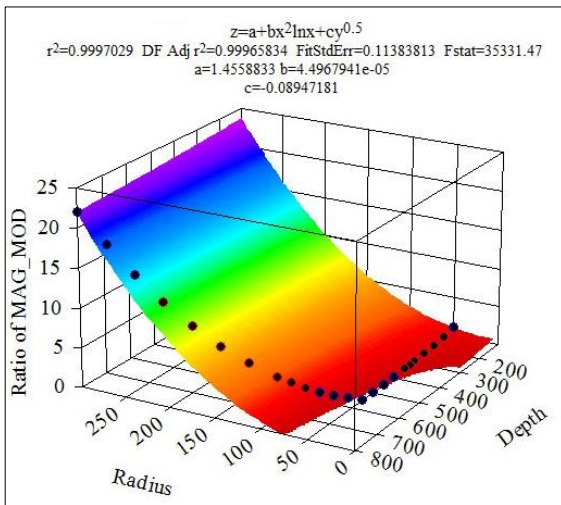
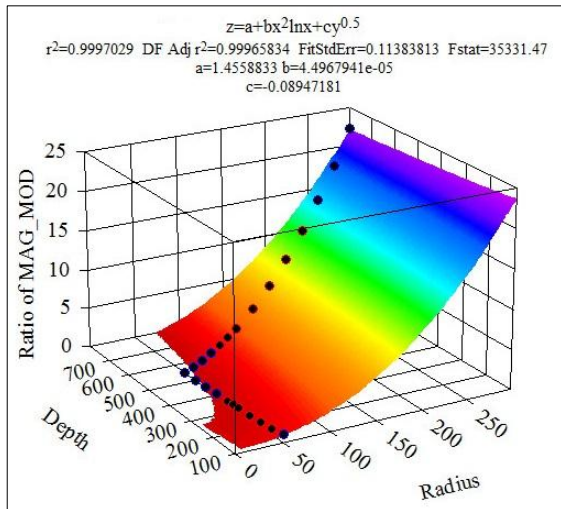
شکل ۳. نمودار نسبت تعداد داده های با شدت مغناطیسی بیش از حد آستانه ۰/۵ به تعداد کل داده ها ضربدر متوسط شدت مغناطیسی داده های بالاتر از ۰/۵ برحسب شعاع کره های هماتی واقع در عمق دفن ثابت ۵۰۰ متر.

۵. بررسی تاثیر عمق دفن توده بر روی پاسخ

برای این منظور پاسخ بی هنجاری شدت مغناطیسی توده های کروی همگی از جنس هماتیت با شعاع ۵۰ متر و عمق دفن های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ متر (فاصله از سطح زمین تا مرکز کره) مدلسازی شد. در طراحی مدل ها به این نکته توجه شده که بطور کلی عمق تجسس در روش مغناطیس سنجی، حداکثر چهار تا پنج برابر کوچک ترین بعد توده زیرسطحی است (Parasnis, 1973). به منظور مقایسه تاثیر عمق دفن توده بر روی پاسخ مدل مغناطیسی، در شکل ۴ بی هنجاری مغناطیسی پروفیل پیمایش شده در راستای شمالی - جنوبی درست بر روی مرکز توده های کروی با شعاع ۵۰ متر و عمق دفن های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ متر ترسیم شده است. مطابق این شکل بی هنجاری ناشی از توده واقع در عمق دفن ۲۰۰ متر نسبت به سایر عمق ها برجسته تر است و در عمق های خیلی بیشتر،

$$z = a + bx^2 \ln x + cy^{0.5} \quad (3)$$

که در این رابطه متغیر x شعاع توده کروی، متغیر y عمق دفن توده کروی و متغیر z نسبت تعداد داده‌های با شدت مغناطیسی بیش از حدود آستانه $0/5$ و $0/7$ به تعداد کل داده‌ها ضربدر متوسط شدت مغناطیسی داده‌های بالاتر از حدود آستانه $0/5$ و $0/7$ است.

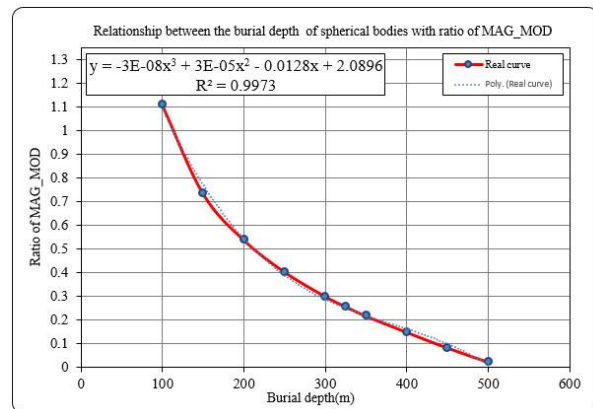


شکل ۶. نمودار سه بعدی بهترین منحنی برازش یافته بر داده‌های شعاع و عمق دفن توده‌های کروی هماتی و شدت مغناطیسی پاسخ مدل‌های مصنوعی مختلف، در نرم افزار TableCurve از دو نمای مختلف.

۶. بررسی اثر شکل هندسی توده بر روی پاسخ

برای این منظور پاسخ مدل‌های مصنوعی مغناطیسی با اشکال هندسی متناظر با اهداف و توده‌های مغناطیسی واقعی متداول،

$0/7$ به تعداد کل داده‌ها ضربدر متوسط شدت میدان مغناطیسی داده‌های بالاتر از حد آستانه است.



شکل ۵. نمودار نسبت تعداد داده‌های با شدت مغناطیسی بیش از حد آستانه $0/7$ به تعداد کل داده‌ها ضربدر متوسط شدت مغناطیسی داده‌های بالاتر از $0/7$ بر حسب عمق دفن توده‌های کروی هماتی با شعاع ثابت ۵۰ متر.

همچنین به منظور بررسی تأثیر همزمان اندازه و ابعاد و عمق دفن توده بر روی پاسخ مدل بطور کمی، پاسخ مدل‌های دوبعدی با اندازه 1000 در 1000 متر با ابعاد شبکه برداشت 50 در 10 متر شامل توده‌های کروی از جنس هماتیت با شعاع و عمق دفن‌های مختلف، آزمایش شد. سپس نسبت تعداد داده‌های با شدت رنگی بیش از حد آستانه $0/5$ و $0/7$ به تعداد کل داده‌ها، ضربدر متوسط شدت میدان مغناطیسی داده‌های بالاتر از حد آستانه به ترتیب برای مدل‌های با شعاع متغیر واقع در عمق دفن ثابت و مدل‌های با شعاع ثابت در عمق دفن متغیر محاسبه شد. اعداد $0/5$ و $0/7$ هم به عنوان حد آستانه شدت میدان مغناطیسی، براساس راهنمای رنگی پاسخ مدل‌های مصنوعی تولید شده انتخاب شد. در شکل ۶ نمودار بهترین منحنی برازش یافته بر داده‌ها با استفاده از نرم افزار TableCurve از دو نمای مختلف نمایش داده شده است. با استفاده از این نمودار یک رابطه ریاضی نسبتاً ساده مطابق رابطه (۳) با ضریب همبستگی عالی برابر با $0/9997$ بین شعاع و عمق دفن توده‌های کروی با شدت میدان مغناطیسی پاسخ آنها به دست آمد.

۷. بررسی تأثیر فواصل خطوط پیمایش (شبکه برداشت) بر

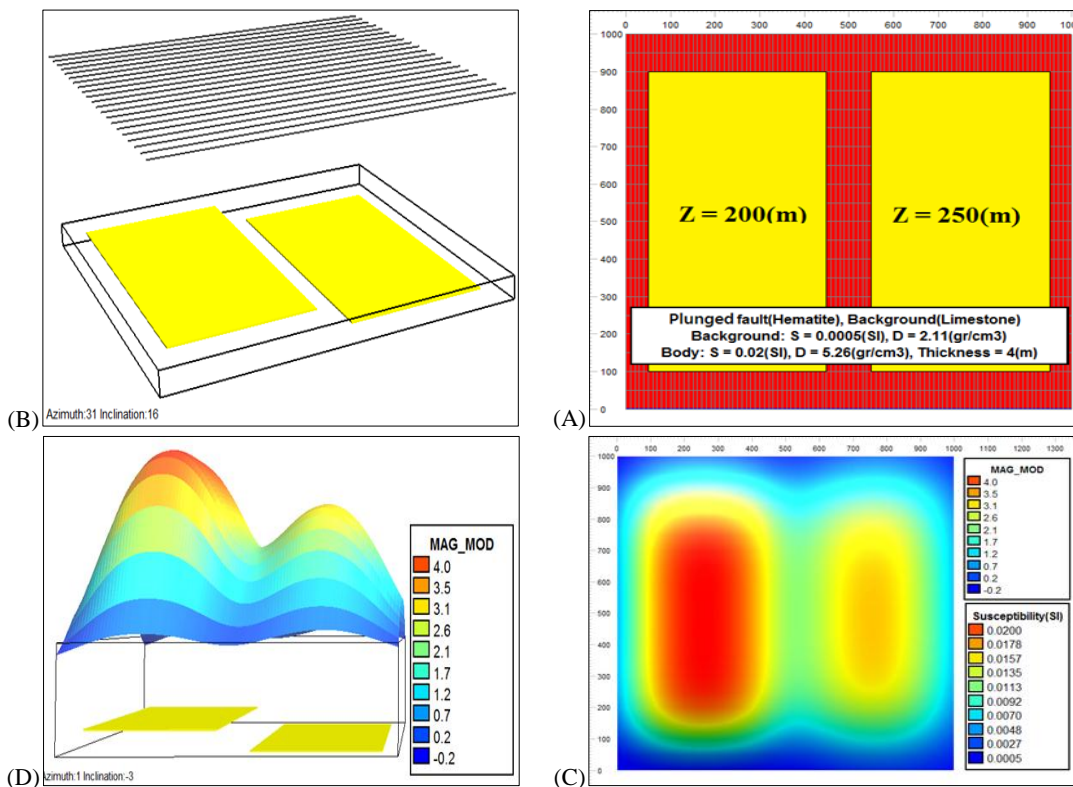
روی پاسخ

بطورکلی مطابق اصل چهارم از اصول چهارگانه طراحی اکتشافات (برداشت‌های ژئوفیزیکی، فاصله بهینه بین خطوط پروفیلی، تابعی از طول پدیده‌های زیرسطحی یا طول تخمینی بی‌هنجاری آنها در سطح زمین است (Parasnis, 1973). بنابراین به واسطه این ارتباط در ادامه، تأثیر فواصل برداشت پروفیلی بر روی پاسخ توده‌های مغناطیسی به شکل‌های کروی، بیضوی و خطی که معرف تمام انواع ساختارهای زمین‌شناسی و کانسارهای معدنی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته تا از نتایج آنها به منظور طراحی شبکه برداشت بهینه در عمل استفاده شود. برای دست‌یابی به این هدف و به‌منظور پردازش داده‌های مصنوعی، داده‌های خروجی نرم افزار ModelVision شامل مختصات نقاط و میزان شدت میدان مغناطیسی ذخیره شد. برای مدل‌سازی، توده کروی از جنس هماتیت با شعاع ۲۵ متر، عمق دفن ۱۰۰ متر (فاصله از سطح زمین تا مرکز کره)، ابعاد مدل ۵۰۰×۵۰۰ متر و ابعاد شبکه‌های برداشت ۵×۵، ۱۰×۵، ۱۵×۵، ۲۰×۵ و ۲۵×۵ متر انتخاب و طراحی شد.

به منظور مدل‌سازی توده بیضوی شکل از جنس هماتیت، شعاع بزرگ ۵۰ متر، شعاع متوسط ۱۰ متر، شعاع کوچک ۱۰ متر، عمق دفن ۱۰۰ متر (فاصله از سطح زمین تا مرکز بیضوی)، ابعاد مدل ۵۰۰×۵۰۰ متر و ابعاد شبکه‌های برداشت ۵×۵، ۱۰×۵، ۱۵×۵، ۲۰×۵ و ۲۵×۵ متر انتخاب و طراحی شد. برای مدل‌سازی توده خطی منشوری شکل از جنس هماتیت نیز، طول ۱۰۰ متر، عرض ۱۰ متر، ضخامت ۱۰ متر، عمق دفن ۲۰ متر (فاصله از سطح زمین تا سطح فوقانی توده خطی)، ابعاد مدل ۵۰۰×۵۰۰ متر و ابعاد شبکه‌های برداشت ۵×۵، ۱۰×۵، ۱۵×۵، ۲۰×۵، ۲۵×۵، ۳۰×۵ و ۳۵×۵ متر انتخاب و طراحی شد.

شبیه‌سازی گردید. به عنوان نمونه در شکل ۷(الف) مدل هندسی - فیزیکی دوبعدی با اندازه ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر با ابعاد شبکه برداشت ۵۰ در ۱۰ متر برای صفحه گسلی شیب‌دار با زاویه شیب ۲۶/۵ درجه از جنس هماتیت با ضخامت ۴ متر واقع در اعماق دفن ۲۰۰ و ۲۵۰ متری نمایش داده شده است. به عبارت دیگر میزان افت قائم گسل (Throw) برابر با ۵۰ متر می‌باشد. شکل ۷(ب) نیز مدل هندسی سه بعدی گسل شیب‌دار با خطوط پیمایش با فواصل ۱۰ متر با آزیموت ۳۱ درجه و زاویه انحراف ۱۶ درجه را نشان می‌دهد. در شکل ۷(ج) هم پاسخ نظیر شکل ۷(الف) نشان داده شده که در این پاسخ، اثر شکل گسل شیب‌دار قابل مشاهده است. مطابق راهنمای رنگی پاسخ مدل، رنگ قرمز بیش‌ترین میزان خودپذیری و شدت میدان مغناطیسی، و رنگ آبی کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده است که بیشترین شدت میدان مغناطیسی در نیمه سمت چپ مدل یعنی محل حضور صفحه گسلی واقع در عمق ۲۰۰ متر قرار دارد. بیشینه و کمینه شدت مغناطیسی برای گسل شیب‌دار با خودپذیری ۰/۰۲، به ترتیب برابر با ۴ و (-۰/۲) نانوتسلا است. شکل ۷(د) هم پاسخ سه بعدی توده به شکل گسل شیب‌دار نظیر شکل ۷(ب) است.

بررسی اثر شکل هندسی توده بر روی پاسخ مدل‌های مصنوعی مغناطیسی برای اشکال هندسی متداول همانند چندضلعی دلخواه منتظم و غیرمنتظم، منشور (مکعب مستطیل) قائم، استوانه قائم، بیضوی و کره نشان می‌دهد که بطورکلی در بسیاری از موارد از جمله برای توده‌های به شکل چندضلعی دلخواه منتظم و غیرمنتظم، بیضوی و استوانه قائم، پاسخ مغناطیسی توده تا حدود زیادی از شکل هندسی توده مدفون، تبعیت می‌کند. به هرجهت مطابق انتظار پاسخ مغناطیسی یک توده کروی مدفون نیز همانند استوانه قائم، به صورت دایره است و برخلاف انتظار پاسخ مغناطیسی یک منشور (مکعب مستطیل) قائم هم به صورت دایره است. بنابراین تشخیص شکل هندسی توده مدفون از میان کره، استوانه قائم و منشور (مکعب مستطیل) قائم، از روی نقشه پاسخ مغناطیسی به تنهایی، امکان پذیر نیست.



شکل ۷. مدل هندسی - فیزیکی (A) دوبعدی و (B) سه بعدی صفحه گسلی شیب‌دار از جنس هماتیت با ضخامت ۴ متر واقع در اعماق دفن ۲۰۰ و ۲۵۰ متری؛ (C) و (D) به ترتیب پاسخ شدت میدان مغناطیسی دوبعدی و سه بعدی مدل.

بعد از اضافه کردن نوفه، با استفاده از الگوریتم کریجینگ، شبکه بندی (Gridding) داده‌ها صورت گرفت. سپس علاوه بر تولید نقشه نهایی، فایل داده‌های شبکه‌بندی شده نیز ذخیره شد و بی‌هنجاری مغناطیسی پروفیل میانی افقی (در راستای شرقی- غربی) داده‌ها ترسیم شد. بعد به کمک نرم افزار TableCurve بهترین منحنی یعنی نمودار با بیشترین میزان همبستگی، بر این داده‌ها برازش داده شد. با استفاده از منحنی برازش یافته، پارامترهای هندسی بی‌هنجاری شامل مقادیر d ، عرض بی‌هنجاری بر حسب متر، H ، ارتفاع پیک بی‌هنجاری (فاصله قائم از نقطه پیک بی‌هنجاری تا خط افقی معرف زمینه یعنی مقدار شدت میدان مغناطیسی برابر با صفر) بر حسب متر، W ، نصف عرض بی‌هنجاری مطابق تعریف متداول آن (کلاگری، ۱۳۸۹؛ Paransis, 1996; Telford et al., 1990) بر حسب متر و نیز نسبت H/W اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری فاصله افقی بین دو نقطه از منحنی برازش یافته

به منظور یافتن فاصله بهینه بین خطوط پروفیلی در برداشت‌های مغناطیس سنجی و دستیابی به نتایج واقع‌گرایانه، ابتدا در محیط نرم افزار Matlab مقداری نوفه (Noise) از نوع تصادفی به داده‌های مدل‌های مصنوعی تولید شده اضافه شد تا با داده‌های واقعی در عمل (که همواره به مقداری نوفه نیز آلوده می‌باشند) تطابق بیشتری داشته باشند. برای اضافه کردن نوفه تصادفی با توزیع گوسی (نرمال) به داده‌های در دسترس (متغیر x) از روابط (۴) و (۵) استفاده شد و داده‌های جدید (متغیر y) تولید گردید.

$$y = x + \text{randn}(\text{size}(x)) * \text{Sqrt}(\text{Var}(x)) \quad (4)$$

$$y = x + \text{randn}(\text{size}(x)) * \text{SD}(x) \quad (5)$$

که در این روابط randn تابع تولید اعداد تصادفی با توزیع نرمال با مقدار میانگین صفر و واریانس یک، Var مین پرش (واریانس) و SD معرف انحراف معیار داده‌های مورد استفاده می‌باشد.

(S) بر حسب متر در مقابل نسبت H/W برای پروفیل های میانی افقی پاسخ مغناطیسی توده کروی شکل با شبکه های برداشت با ابعاد مختلف ترسیم شده است. مطابق این نمودار که روند نزولی دارد، بین فواصل برداشت پروفیلی (S) و نیز نسبت H/W توسط نرم افزار TableCurve مطابق رابطه (۶) یک رابطه ریاضی خطی با ضریب همبستگی عالی برابر با ۰/۹۳۴۴ به دست آمد.

$$y=124.84606x-950.79075 \quad (6)$$

که در این رابطه متغیر y فواصل برداشت پروفیلی و متغیر x نسبت H/W است.

در شکل ۱۰ نمودار پراکندگی مقادیر فواصل برداشت پروفیلی (S) بر حسب متر در مقابل نسبت H/W برای پروفیل های میانی افقی پاسخ مغناطیسی توده بیضوی شکل با شبکه های برداشت با ابعاد مختلف، ترسیم شده است. مطابق این نمودار که روند نزولی دارد، بین فواصل برداشت پروفیلی (S) و نسبت H/W توسط نرم افزار TableCurve مطابق رابطه (۷) یک رابطه ریاضی خطی با ضریب همبستگی خوب برابر با ۰/۸۹۹۴ به دست آمد.

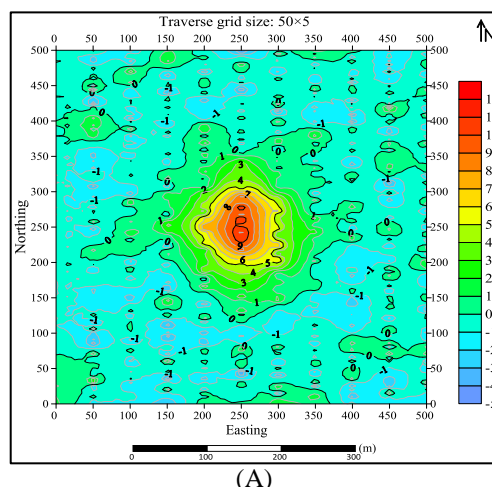
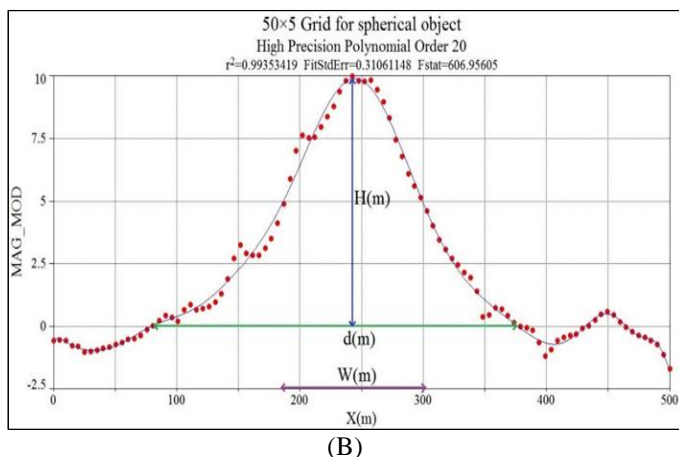
$$y=200.44179x-12730.739 \quad (7)$$

که در این رابطه متغیر y فواصل برداشت پروفیلی و متغیر x نسبت H/W است.

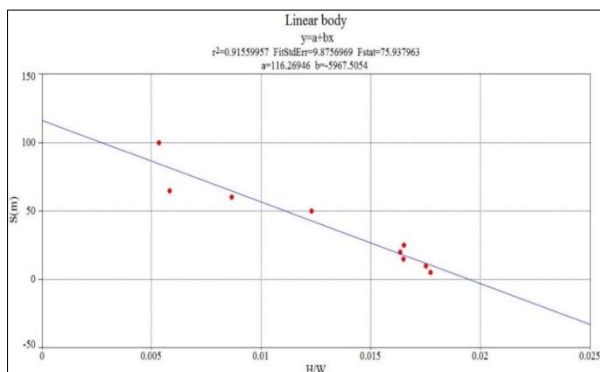
بر داده ها با مقدار عرض مختصاتی صفر، میزان عرض بی هنجاری (d) بر حسب متر بدست می آید. برای بدست آوردن نصف عرض بی هنجاری (W)، ارتفاع پیک بی هنجاری (H) را نصف کرده و از این نقطه خطی افقی موازی محور طول ها رسم کرده تا منحنی برازش یافته بر داده ها را در دو نقطه قطع کند. فاصله افقی بین نقاط تصویر یافته از این نقاط تقاطع بر روی محور طول ها، نصف عرض بی هنجاری را تعریف می کند. به عنوان نمونه در شکل ۸ نقشه منحنی های میزان (خطوط پربندی) شدت میدان مغناطیسی داده های نوفه دار و پروفیل بی هنجاری مغناطیسی در راستای میانی شرقی- غربی همراه با بهترین منحنی برازش یافته بر داده ها برای مدل دوبعدی با اندازه ۵۰۰ در ۵۰۰ متر شامل یک توده کروی هماتی با شعاع ۲۵ متر واقع در عمق دفن ۱۰۰ متر، متناظر با شبکه برداشت ۵۰×۵۰ متر نمایش داده شده است. در این شکل تمام پارامترهای هندسی بی هنجاری تعریف شده پروفیل نیز نمایش داده شده اند.

در قسمت بالای نمودار شکل ۸ (ب) اطلاعاتی نظیر ابعاد شبکه برداشت، شکل هندسی توده مغناطیسی مدفون، معادله ریاضی بهترین منحنی برازش یافته بر داده ها، میزان ضریب تعیین (r^2)، میزان خطای استاندارد برازش و مقدار آماره F نیز ارائه شده است.

در شکل ۹ نمودار پراکندگی مقادیر فواصل برداشت پروفیلی



شکل ۸. (A) نقشه شدت مغناطیسی داده های نوفه دار مدل شامل توده کروی هماتی؛ (B) پروفیل میانی داده های مغناطیسی در راستای شرقی- غربی به همراه بهترین منحنی برازش یافته بر داده ها متناظر با شبکه برداشت ۵۰×۵۰ متر.

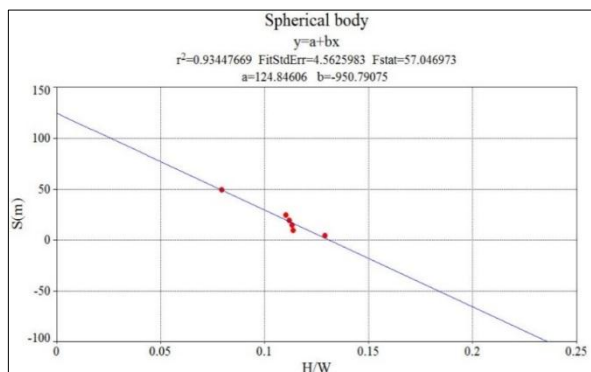


شکل ۱۱. نمودار ارتباط بین فواصل برداشت پروفیلی (S) با نسبت H/W برای پروفیل‌های میانی افقی شرقی-غربی نظیر پاسخ مغناطیسی توده خطی با شبکه‌های برداشت گوناگون.

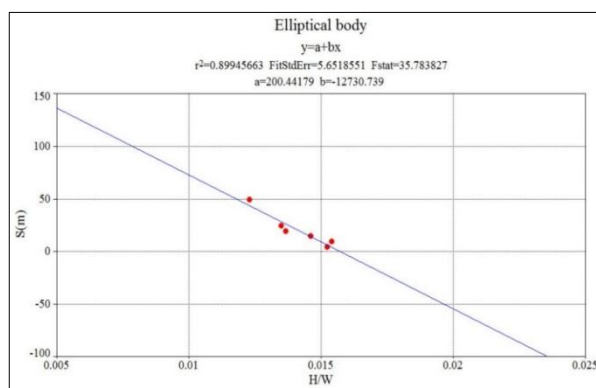
که در این رابطه متغیر y فواصل برداشت پروفیلی و متغیر x نسبت H/W است. در تمام موارد سعی شده تا حد ممکن روابط ریاضی ساده ترجیحاً از نوع خطی با بالاترین مقدار ضریب تعیین بر داده‌ها برازش یابد. در قسمت بالای این نمودارها شکل هندسی توده، معادله ریاضی تابع برازش یافته بر داده‌ها، میزان ضریب تعیین، میزان خطای استاندارد برازش و مقدار آماره F نیز آورده شده است. همچنین روابط ریاضی بین فواصل پروفیلی (S) و مقادیر d ، H و W برای توده‌های با اشکال هندسی کروی، بیضوی و خطی بدست آمد که نتایج آنها نسبت به روابط بین S و نسبت H/W اندکی ضعیف‌تر بود، در نتیجه از آوردن آنها صرف نظر شد.

در جدول ۱ تعداد تقاطع خطوط پیمایش با توده‌های کروی، بیضوی و خطی با شبکه‌های برداشت 5×5 ، 10×5 ، 15×5 ، 20×5 ، 25×5 و 50×5 متر برای مدل با ابعاد 500×500 متر آورده شده است. یادآوری می‌شود که مطابق تعریف در صورت تقاطع بیش از دو بار توده توسط خطوط پیمایش، احتمال کشف از نوع قطعی یا تایید شده (Confirmed) است.

بررسی نتایج شبکه‌های برداشت مشترک 5×5 ، 10×5 ، 15×5 ، 20×5 ، 25×5 و 50×5 بر روی مدل با ابعاد یکسان شامل توده‌های با اشکال کروی، بیضوی و خطی نشان می‌دهد که احتمال کشف (تقاطع) در وهله اول تابع اندازه و ابعاد و عمق



شکل ۹. نمودار ارتباط بین فواصل برداشت پروفیلی (S) با نسبت H/W برای پروفیل‌های میانی افقی شرقی-غربی نظیر پاسخ مغناطیسی توده کروی شکل با شبکه‌های برداشت گوناگون.



شکل ۱۰. نمودار ارتباط بین فواصل برداشت پروفیلی (S) با نسبت H/W برای پروفیل‌های میانی افقی شرقی-غربی نظیر پاسخ مغناطیسی توده بیضوی شکل با شبکه‌های برداشت گوناگون.

در شکل ۱۱ نیز نمودار پراکندگی مقادیر فواصل برداشت پروفیلی (S) بر حسب متر در مقابل نسبت H/W برای پروفیل‌های میانی افقی پاسخ مغناطیسی توده خطی توسط شبکه‌های برداشت با ابعاد مختلف، ترسیم شده است. مطابق این نمودار که روند نزولی دارد، بین فواصل برداشت پروفیلی (S) بر حسب متر و نیز نسبت H/W توسط نرم افزار TableCurve مطابق رابطه (۸) یک رابطه ریاضی خطی با ضریب همبستگی عالی برابر با 0.91559957 به دست آمد.

$$y=116.26946x-5967.5054 \quad (8)$$

ساختمان شهید زین‌الدین، باشگاه بدنسازی و زمین چمن فوتبال دانشگاه قرار دارد. تمام پروفیل‌های برداشت مغناطیسی در راستای عمود بر امتداد اهداف مورد مطالعه، توجیه شدند و به صورت رفت و برگشت به طور موازی توسط دستگاه مگتومتر GSM 19T برداشت گردیدند.

این محدوده دارای ۵ خط لوله فلزی در راستای شمال شرقی- جنوب غربی است که به قطرهای ۴ و ۵ سانتی‌متر در عمق دفن ۱/۱۵ متری درون یک کانال زیرزمینی قرار دارند. در شکل ۱۳ تصویر لوله‌های فلزی مدفون در زیر سطح زمین در مجاورت یکدیگر نشان داده شده است. جنس محیط میزبان این کانال، خاک رس معمولی غیرهمگن بوده که در سطح زمین با یک لایه آسفالت رویی به ضخامت حدوداً ۱۰ سانتی-متر پوشیده شده است. به‌منظور آشکارسازی اهداف مدفون در این محدوده، تعداد ۱۱ پروفیل با طول‌های ۱۰ تا ۲۰ متر عمود بر امتداد طولی اهداف با فواصل بین پروفیلی یک متر و فواصل ایستگاهی یک متر پیمایش شده است. در طول هر پروفیل نیز تعداد ۱۱ تا ۲۱ ایستگاه، برداشت شد که تعداد کل ایستگاه‌های اندازه‌گیری ۱۹۰ عدد می‌باشد.

در شکل ۱۴ (الف) نقشه تغییرات شدت مغناطیسی داده‌های خام برای ۱۱ پروفیل برداشت شده در محدوده ترسیم شده است. کمترین و بیشترین مقدار شدت میدان مغناطیسی در این محدوده به ترتیب برابر با ۶۷/۲۱/۶۰ و ۲۲/۴۵/۶۹ گاما

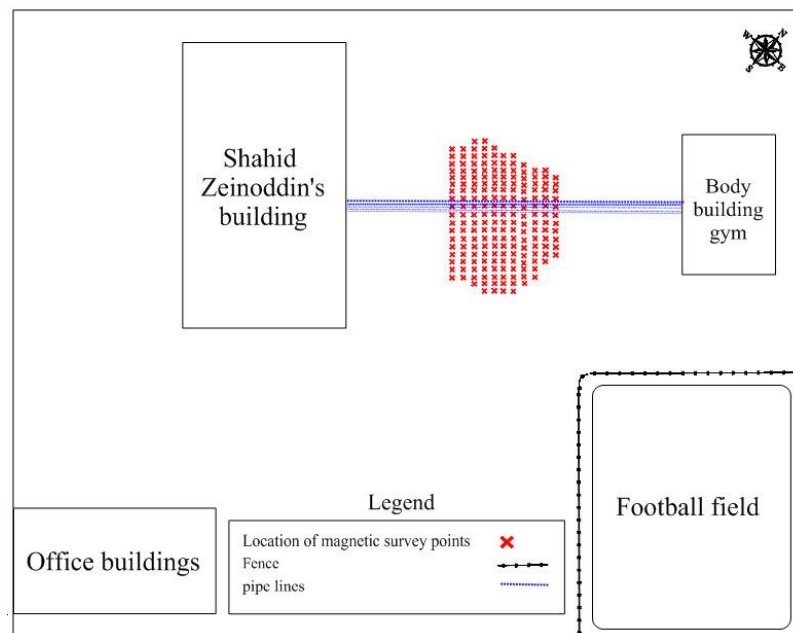
دفن توده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای شبکه‌های اکتشافی از نوع خطوط موازی با ابعاد مختلف، تعداد تقاطع خطوط پیمایش با توده کرووی شکل، تقریباً نصف توده‌های بیضوی و خطی است که البته این امر در نتیجه کوچک-تر بودن ابعاد توده کرووی در مقایسه با توده‌های بیضوی و خطی است. در عمل نیز اغلب کانسارها به فرم بیضوی و خطی شکل می‌گیرند که نسبت به فرم کرووی دارای گسترش طولی زیادترند. در هر صورت برای تمام انواع توده‌ها می‌توان بین فواصل برداشت پروفیلی (S) و نیز نسبت H/W یک رابطه ریاضی خطی ساده با ضریب همبستگی بالا به دست آورد که این روابط می‌توانند در عمل برای اکتشاف کانسارهای با اشکال هندسی مختلف بویژه در مراحل پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی، مورد استفاده قرار گیرند.

۸. مطالعه موردی: برداشت داده‌های مغناطیسی در محوطه دانشگاه صنعتی اراک

به منظور بررسی تاثیر اندازه و ابعاد شبکه‌های برداشت بر روی پاسخ بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از اجسام فلزی مغناطیسی مدفون، برداشت داده‌های واقعی مغناطیسی در محوطه دانشگاه صنعتی اراک بر روی لوله‌های فلزی از پیش شناخته شده انجام شد. محدوده برداشت مطابق کروکی شکل ۱۲ در قسمت پشت ساختمان شهید زین‌الدین در حدفاصل

جدول ۱. تعداد تقاطع خطوط پیمایش با توده‌ها توسط شبکه‌های برداشت با ابعاد ۵×۵، ۱۰×۵، ۱۵×۵، ۲۰×۵، ۲۵×۵، ۵۰×۵، ۶۰×۵ و ۶۵×۵ و ۱۰۰×۵ متر.

Grid size (meter)	The intersection number of spherical body with radius of 25 meter by traverse lines	The intersection number of elliptical body with large, medium and small radii of 50, 10 and 10 meter, respectively by traverse lines	The intersection number of linear body with length, width and height of 100, 10 and 10 meter, respectively by traverse lines
5*5	11	21	21
10*5	5	11	11
15*5	4	7	7
20*5	2	6	5
25*5	3	5	5
50*5	1	3	3
60*5	-	-	2
65*5	-	-	1
100*5	-	-	2



شکل ۱۲. کروکی موقعیت خطوط لوله تأسیساتی مدفون و ایستگاه‌های برداشت مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه.

غربی از طرفین با محدوده‌های با شدت مغناطیسی بالا محصور شده است که چنین پاسخی در ارتباط با کانال شامل لوله‌های فلزی مدفون در زیر سطح زمین است. هم چنین به دلیل فاصله کم خطوط لوله از یکدیگر، پاسخ بی‌هنجاری‌های ناشی از لوله‌ها قابل تفکیک نیستند. با ورود مقادیر زوایای میل و انحراف مغناطیسی محدوده برداشت به ترتیب برابر با $۵۲/۵۳۲۸$ و $۴/۵۶۷۲$ درجه در مدل IGRF، میزان شدت میدان مغناطیسی ناحیه‌ای نیز $۴۷۴۸۶/۲$ گاما بدست آمد.

عملیات پردازش و اعمال تبدیل‌ها و فیلترهای مختلف بر روی داده‌های برداشت شده به منظور تهیه نقشه‌های نهایی نیز توسط نرم افزار Geosoft Oasis montaj انجام شد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. گفتنی است که نقشه مغناطیس باقیمانده با کم کردن مقدار IGRF از داده‌های برداشت شده، ترسیم شد ولی با توجه به وسعت اندک محدوده مورد مطالعه، نوع و اندازه و ابعاد اهداف زیرسطحی، فرم کلی نقشه مغناطیس باقیمانده به نقشه تغییرات مغناطیسی داده‌های اولیه، شباهت زیادی داشته و فرآیندهای بعدی نیز بر روی داده‌های اولیه صورت گرفت.

از آنجایی که معمولاً محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی روی



شکل ۱۳. نمایی از لوله‌های فلزی مدفون در زیر سطح زمین در مجاورت یکدیگر درون یک کانال در محدوده برداشت.

اندازه‌گیری شده و در نتیجه دامنه تغییرات، $۹۲۳/۴۵$ گاما می-باشد. از آنجایی که در این محدوده مدت زمان برداشت، بسیار کوتاه، مقدار تغییرات مغناطیسی روزانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه مبنای بسیار کم و در نتیجه میزان تبدیل، بسیار ناچیز بود، از اعمال آن صرف‌نظر شد. در این نقشه یک محدوده با شدت مغناطیسی نسبتاً پایین در راستای شمال شرقی - جنوب

روش اثر بی هنجاری با فرکانس بالا تضعیف می‌شود و بی-هنجاری های با فرکانس پایین به خوبی مشخص می‌گردند؛ به همین علت باعث محو شدن نوفه‌های سطح زمین با فرکانس بالا می‌شود و بررسی بی‌هنجاری های زیرسطحی را آسان تر می‌کند (Zeng et al., 2007; Claerbout, 1988). در محدوده برداشت، عمق دفن اهداف کم بوده و نیاز چندانی به اعمال تبدیل گسترش به سمت بالا نیست ولی با این وجود به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج برداشت از طریق تعیین حدودی عمق دفن اهداف در پاسخ، این تبدیل نیز صورت گرفت.

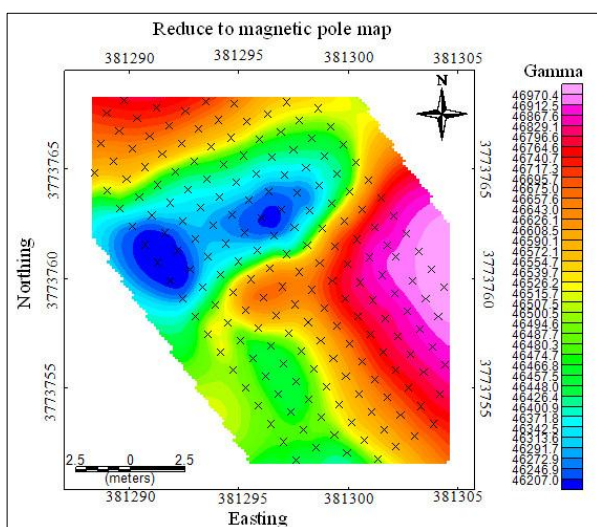
شکل ۱۵ نقشه‌های گسترش به سمت بالای داده های مغناطیسی محدوده برداشت را تا ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۱۵، ۱/۲ و ۱/۳ متر بصورت انتخابی نشان می‌دهد. ارتفاع ادامه فراسو براساس آگاهی از میزان عمق دفن واقعی اهداف، از مقدار کم ۰/۱ متر شروع شده و تا ۱/۳ متر افزایش یافته است. معمولاً انتخاب ارتفاع فیلترهای گسترش به سمت بالا کیفی است و با مقایسه نتایج در ارتفاعات مختلف می‌توان به ارتفاع بهینه تقریبی دست یافت (شاهوردی و همکاران، ۱۳۹۶).

بررسی نقشه‌های بی هنجاری بعد از اعمال تبدیل گسترش به

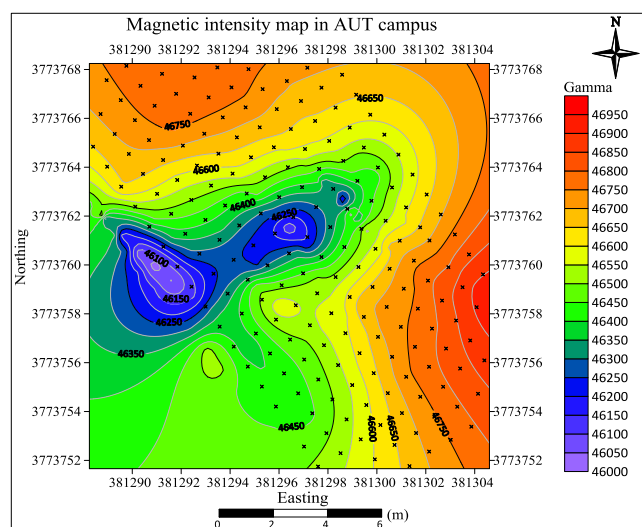
نقشه دقیقاً بر روی اهداف یا ساختارهای مربوطه قرار ندارد، بنابراین به منظور دست یابی به محل واقعی بی هنجاری ها، از تبدیل برگردان به قطب استفاده می‌شود. با استفاده از این تبدیل می‌توان میدان مغناطیسی را از یک عرض مغناطیسی، جایی که میدان زمین مایل است، به میدانی در قطب مغناطیسی انتقال داد. با این تبدیل بی هنجاری ها به طور قائم در بالای منبع ایجادکننده خود قرار می‌گیرند و بدین ترتیب بی‌هنجاری مغناطیسی به بی‌هنجاری اندازه گیری شده در قطب مغناطیسی تبدیل می‌شود (Ganiyu et al., 2013; Cooper and Cowan, 2004).

شکل ۱۴ (ب) نقشه برگردان به قطب مغناطیسی داده های محدوده برداشت را نشان می‌دهد. در این شکل بخش بی هنجاری آبی رنگ در قسمت غربی محدوده، وسعت بیشتری پیدا کرده است که این بخش درست در مجاورت یک ساختمان بلند قرار دارد. در واقع لوله ها از زیر این ساختمان خارج می‌شوند و به احتمال زیاد اثر این ساختمان، عامل ایجاد این نوع بی‌هنجاری می‌باشد.

در تغییرپذیری‌های مغناطیسی فیلتر گسترش به سمت بالا (ادامه فراسو) به منظور حذف آثار نوفه ای سطح زمین و مطالعه بهتر ساختارهای زیرسطحی اعمال می‌شود. در این

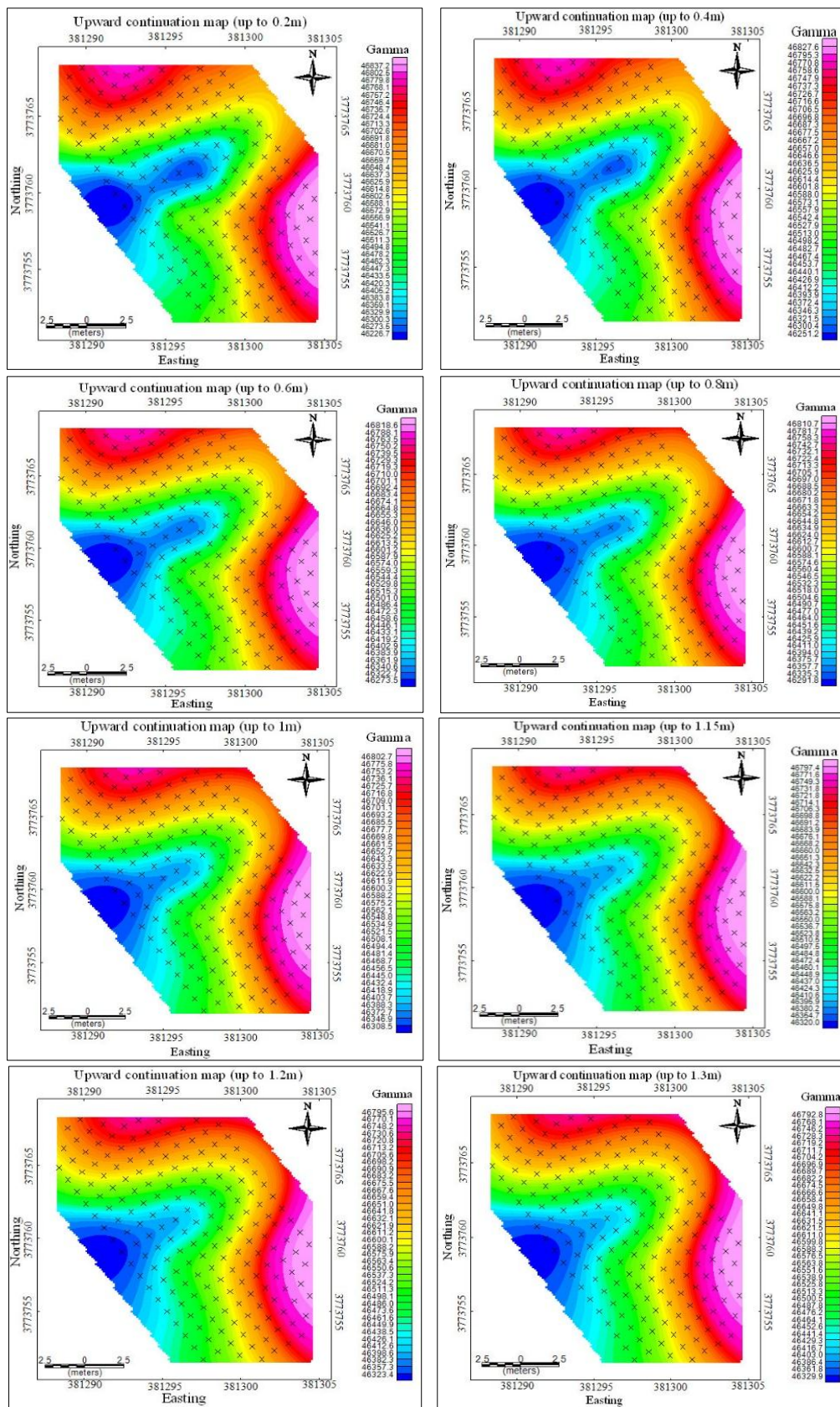


(B)



(A)

شکل ۱۴. (A) نقشه تغییرات مغناطیسی کل محدوده برداشت، (B) نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی. موقعیت نقاط برداشت با علامت × مشخص شده اند.



شکل ۱۵. نقشه گسترش به سمت بالای داده‌های مغناطیسی محدوده برداشت تا ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۱۰، ۱/۲ و ۱/۳ متر.

مشخص می‌کند. اعمال فیلتر مشتق قائم دوم بر روی داده‌ها موجب ظاهر شدن بی‌هنجاری‌های کم‌عمق با شدت بیشتری نسبت به فیلتر مشتق قائم اول می‌شود. اشکال استفاده از فیلتر مشتق قائم دوم، تأثیر شدید نوفه‌ها بر خروجی فیلتر است؛ همین امر موجب می‌شود که تفسیر نقشه حاصل از اعمال این فیلتر به‌تنهایی کم‌اهمیت باشد (خلیل‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۶).

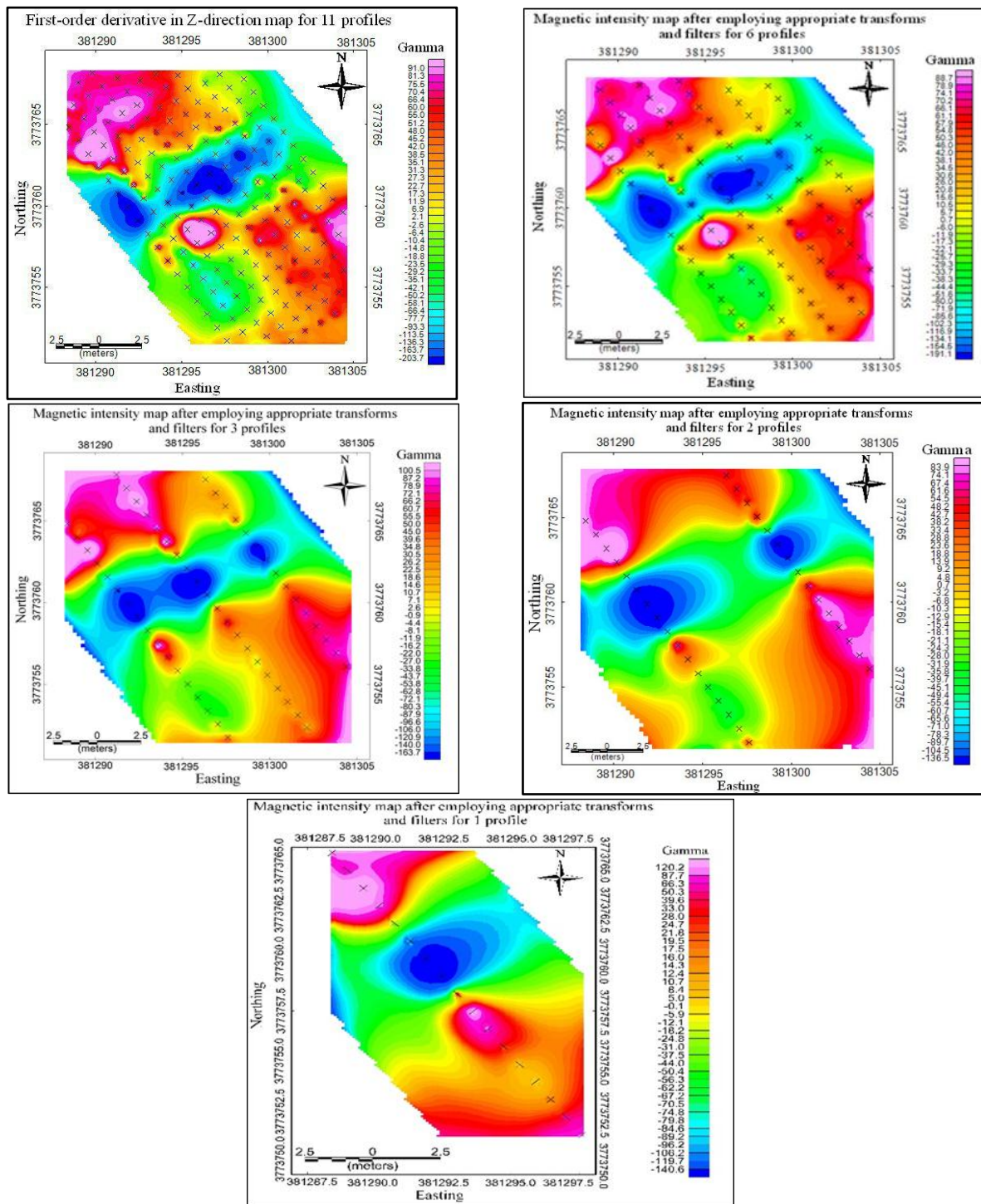
در شکل ۱۶ نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی محدوده با تعداد پروفیل‌های برداشت مختلف، بعد از اعمال تبدیل‌ها و فیلترهای مناسب نشان داده شده است که آخرین فیلتر اعمال شده، مشتق قائم اول است. فواصل بین پروفیلی در نقشه‌ها برای تعداد پروفیل‌های ۱۱، ۶، ۳ و ۲ به ترتیب ۱، ۲، ۴ و ۸ متر است.

در مورد داده‌های محدوده برداشت، اعمال فیلتر مشتق قائم اول نسبت به سایر فیلترهای مشتق، اثر بی‌هنجاری و مرزها را بهتر مشخص کرده و نتیجه بهتری عاید نمود. در شکل ۱۶ نیز همانند شکل‌های ۱۴ و ۱۵ بی‌هنجاری مربوط به اثر لوله‌های زیرسطحی بصورت یک بی‌هنجاری منفی در مرکز و دو بی‌هنجاری مثبت در طرفین آن ظاهر شده است. نوع پاسخ وارونه در این شکل‌ها به احتمال زیاد از یک سو به دلیل فضای خالی کانال زیرزمینی است که لوله‌ها از داخل آن عبور کرده‌اند (ابعاد لوله‌ها نسبت به ابعاد کانال، کوچک است) و از سوی دیگر اثر عوامل مغناطیسی مزاحم از جمله فنس‌های فلزی، ساختمان‌های بلند و باشگاه بدنسازی پر از تجهیزات و وسایل آهنی واقع در دورتادور محدوده کوچک مورد مطالعه می‌باشد.

همچنین با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که با کاهش تعداد پروفیل‌ها، پیوستگی بی‌هنجاری مغناطیسی منفی در راستای شمال شرقی - جنوب غربی کاهش یافته است. مطابق این شکل برای تعداد کامل پروفیل‌ها شکل بی‌هنجاری بصورت یک محدوده باریک و واضح منطبق بر امتداد لوله‌هاست که با کاهش تعداد پروفیل‌ها (افزایش فواصل بین

سمت بالا با ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد که تا عمق حدود ۱/۲ متر شکل بی‌هنجاری در نقشه‌ها یکسان است و در اعماق بیش از آن از شدت بی‌هنجاری کاسته شده و شکل بی‌هنجاری نیز قدری تغییر می‌کند. مطابق این نقشه‌ها بعد از اعمال فیلتر ادامه فراسو، هنوز بی‌هنجاری آبی رنگ در قسمت غربی محدوده، آثار خود را حفظ کرده است. نوع پاسخ در این مورد این شبهه را ایجاد کرد که احتمالاً حضور یک عامل بی‌هنجاری واقع در اعماق زیاد (حداقل بیش از ۱/۳ متر) دلیل چنین بی‌هنجاری باشد. بنابراین برای حصول اطمینان و رفع هرگونه شک و تردید، فیلتر گسترش به سمت بالا برای ارتفاع‌های بیش از ۱/۳ متر از جمله ارتفاع ۱۰ متر تا ۲۰ متر نیز صورت گرفت. نتایج نشان داد که در ارتفاعات بیش از ۱/۳ متر در میدان ادامه فراسو، اثر مغناطیسی ناشی از لوله‌ها کاهش یافته به‌گونه‌ای که در ارتفاع ۱۰ متر، اثر پاسخ لوله‌های مدفون به کلی از بین رفت. تکرار عملیات برای ارتفاع‌های بالاتر نیز نتیجه‌ای مشابه ارتفاع ۱۰ متر را نشان داد. با این تفاسیر، احتمال حضور اهداف یا توده‌های مغناطیسی در اعماق بیش از ۱/۳ متر بسیار ضعیف است و در نتیجه این اثر مربوط به بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر نمی‌باشد. به نظر می‌رسد عوامل نوفه‌ای جانبی از جمله وجود باشگاه بدنسازی پر از تجهیزات و وسایل آهنی در سمت شرق و ساختمان بزرگ مجاور در سمت غرب محدوده، عامل ایجاد چنین بی‌هنجاری باشد.

فیلتر مشتق قائم به‌عنوان ابزاری مهم برای پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی و معمولاً برای تعیین مرز توده‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اعمال این فیلتر جزئیات موجود در نقشه برجسته‌تر و بی‌هنجاری‌ها متمایزتر می‌شوند. لیکن مشکل استفاده از این نوع فیلتر آن است که با کاربرد آن همراه با برجسته شدن بی‌هنجاری‌ها (سیگنال‌ها) نوفه‌های موجود در نقشه نیز برجسته می‌شوند (علمدار و همکاران، ۱۳۹۲). فیلتر مشتق قائم عرض بی‌هنجاری‌ها را باریک‌تر و در نتیجه موقعیت توده‌ها را با دقت بیشتری



شکل ۱۶. نقشه تغییرات شدت مغناطیسی محدوده با تعداد پروفیل‌های برداشت مختلف بعد از اعمال تبدیل‌ها و فیلترهای مناسب.

این امر ناشی از فقدان داده‌های اکتشافی کافی می‌باشد. بر روی داده‌های مغناطیسی محدوده برداشت، فیلترها و تبدیل‌های گوناگونی همانند فیلتر مشتق افقی، مشتق قائم مرتبه دوم، سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت نیز اعمال گردید که منجر به

پروفیلی) از نظر طولی کوتاه‌تر، از نظر پهنا پهن‌تر و از نظر شدت، ضعیف‌تر می‌شود. در مورد برداشت تنها یک پروفیل، نسبت دادن بی‌هنجاری‌های نقشه به لوله‌های فلزی مدفون با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی، دور از ذهن است که

توده، رابطه عکس دارد. همچنین در بسیاری از موارد از جمله برای توده‌های به شکل چندضلعی دلخواه منتظم و غیرمنتظم، بیضوی و استوانه قائم، پاسخ مغناطیسی توده تا حدود زیادی از شکل هندسی توده مدفون، تبعیت می‌کند. بررسی نتایج تاثیر فواصل برداشت پروفیلی بر روی توده‌های با اشکال کروی، بیضوی و خطی نشان داد که احتمال کشف (تقاطع) در وهله اول تابع اندازه و ابعاد و عمق دفن توده است. همچنین برای تمام انواع توده‌ها بین فواصل برداشت پروفیلی و نیز نسبت ارتفاع به نصف عرض بی‌هنجاری، یک سری روابط ریاضی خطی ساده با ضریب همبستگی بالا به دست آمد که این روابط می‌توانند در عمل برای اکتشاف کانسارهای با اشکال هندسی مختلف بویژه در مراحل پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی مورد استفاده قرار گیرند.

در برداشت داده‌های مغناطیسی انتخاب درست فواصل ایستگاهی و بین پروفیلی در میزان دقت کار و احتمال موفقیت اکتشافی بسیار موثر است. بنابراین بررسی تأثیر اندازه و ابعاد شبکه‌های برداشت بر روی پاسخ بی‌هنجاری‌های مغناطیسی از طریق برداشت‌های مغناطیسی بر روی اهداف فلزی مدفون در محوطه دانشگاه صنعتی اراک نیز صورت گرفت. برای این منظور نقشه‌های مغناطیسی به ازای فواصل بین پروفیلی متفاوت ترسیم شد. نتایج پژوهش حاضر از طریق برداشت‌های میدانی بر روی اهداف از پیش شناخته شده در محوطه دانشگاه صنعتی اراک نشان داد که علیرغم انتخاب فواصل ایستگاهی ثابت و اندک (یک متر) و اعمال تبدیل‌ها و فیلترهای مناسب بر روی داده‌ها، افزایش فواصل بین پروفیلی (کاهش تعداد پروفیل‌های برداشت) تاثیر بسزایی بر روی نتایج می‌گذارد. در واقع با کاهش تعداد پروفیل‌ها شکل بی‌هنجاری از نظر طولی کوتاه‌تر، از نظر پهنا پهن‌تر و از نظر شدت، ضعیف‌تر می‌شود. بطورکلی با کاهش تعداد پروفیل‌ها پاسخ اهداف طویل مدفون، پهن‌تر و ضعیف‌تر می‌شود، بگونه‌ای که در برخی موارد روند بی‌هنجاری‌ها به‌طورکلی تغییر کرده و حتی تشخیص نوع هدف غیرممکن است.

نتایج مطلوبی نشدند؛ بنابراین از آوردن نتایج آنها خودداری شده است.

بطورکلی با افزایش فاصله بین پروفیلی، پاسخ اهداف مدفون، پهن‌تر و ضعیف‌تر گردید و بعضاً روند بی‌هنجاری‌ها تغییر یافت، بگونه‌ای که در برخی موارد حتی تشخیص نوع هدف غیرممکن است. در جدول ۲ ارتباط بین تعداد پروفیل‌های برداشت با کمترین میزان شدت میدان مغناطیسی بی‌هنجاری‌ها در محدوده برداشت، نشان داده شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که شدت میدان مغناطیسی منفی با کاهش تعداد پروفیل‌ها از ۱۱ به ۱ افزایش یافته است (یعنی در واقع شدت بی‌هنجاری، کاهش یافته است). این نتایج، تاثیر فواصل بین پروفیلی بر روی برداشت داده‌های مغناطیسی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ارتباط بین تعداد پروفیل‌های برداشت با شدت

میدان مغناطیسی منفی.

Number of profiles	The minimum value of magnetic intensity (Gamma)
11	-203.7
6	-191.1
3	-163.7
2	-136.5
1	-140.6

۹. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مدل‌سازی مصنوعی دوبعدی و سه بعدی اهداف هندسی معرف ساختارهای زمین شناسی متداول، با استفاده از نرم‌افزار Encom ModelVision انجام شد و تأثیر عوامل مختلف همانند جنس، اندازه و ابعاد، عمق دفن و شکل هندسی توده و نیز فواصل برداشت پروفیلی بر روی پاسخ توده‌های مغناطیسی به شکل کروی، بیضوی و خطی مورد بررسی قرار گرفت تا از نتایج آنها در طراحی شبکه‌های برداشت بهینه مغناطیسی و تفسیر برداشت‌های واقعی در عمل استفاده شود. نتایج مدل‌سازی مصنوعی داده‌ها نشان داد که شدت میدان مغناطیسی با میزان خودپذیری توده و اندازه و ابعاد توده‌های مغناطیسی مدفون، رابطه مستقیم و با عمق دفن

منابع

- محمدی، س.، نمکی، ل.، حامد پور دارابی، م.، ۱۳۹۵، ارائه یک برنامه رایانه ای به زبان متلب جهت مدل‌سازی پیشرو داده‌های مغناطیس‌سنجی، کنفرانس ژئوفیزیک ایران، دوره ۱۷.
- خلیل آبادی، م.ر.، صفی‌خانی، م.، شاه‌میرزایی، ح.، ۱۳۹۶، پردازش داده‌های مغناطیسی دریا و استخراج نقشه ناهنجاری های مغناطیسی، دوفصلنامه علمی- پژوهشی هیدروفیزیک، دوره ۳، شماره ۱، ۱-۱۰.
- ورفی نژاد، ر.، پرنو، س.، کامکار روحانی، ا.، ۱۳۹۸، وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از قیدهای فشردگی و وزن‌دهی عمقی: دو مطالعه موردی روی داده‌های لوله انتقال گاز و داده‌های آثار باستانی، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۵، شماره ۳، صفحه ۵۰۷-۵۲۱.
- کلاگری، غ.ح.، ۱۳۸۹، اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، انتشارات مولف کتاب، ۵۱۲ ص.
- شاهوردی، م.، نمکی، ل.، منتهایی، م.، مصباحی، ف.، م.، بساوند، ۱۳۹۶، تفسیر داده‌های مغناطیسی براساس محاسبه زاویه تیلت و بهبود گرادیان افقی، مطالعه موردی فروافتادگی زنجان، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۳، شماره ۱، ۱۱۳-۱۰۱.
- علمدار، ک.، انصاری، ع.ح.، مجتهدزاده، س.ح.، ۱۳۹۲، روش‌های گرانی و مغناطیس در ژئوفیزیک کاربردی، چاپ اول، جلد ۲، ۵۲۲ ص.
- نوروزی، غ.ح.، ۱۳۷۶، طراحی بهینه شبکه برداشت در مطالعات مغناطیسی، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۰، شماره ۲، ۵۱-۴۱.
- نمکی، ل.، حفیظی، م.ک.، میرزایی، م.، ۱۳۸۹، معرفی روشی برای مدل‌سازی دوبعدی اتوماتیک داده‌های مغناطیس‌سنجی با بررسی موردی منطقه مکران در جنوب شرق ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۶، شماره ۱، ۱۲۷-۱۳۷.
- کشوردوست، ر.، عابدی، م.، ۱۳۹۰، مدل سازی لوله های زیرسطحی با استفاده از داده های مغناطیس‌سنجی، هشتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران.
- محمدی، س.، ۱۳۹۳، مدل سازی دوبعدی ساختارهای زمین‌شناسی به روش مغناطیس‌سنجی با استفاده از المان های منشوری قائم، پایان نامه کارشناسی ارشد، علوم پایه دانشگاه هرمزگان.
- سرخیل، ح.، عظیمی، ی.، ۱۳۹۳، مدل‌سازی سه بعدی آنومالی های مغناطیسی محدوده کهک قم با استفاده از تحلیلی ریاضی روند سطحی ارتونرمال، همایش تخصصی کاربرد ریاضیات در علوم زمین، شیراز، دوره ۱.
- سیف، م.ر.، محمدزاده مقدم، م.، میرزایی، س.، ۱۳۹۷، شناسایی و مکان‌یابی اهداف و تاسیسات زیرزمینی بر پایه داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از روش های سیگنال تحلیلی، اوپلر و وارون سازی سه‌بعدی، نشریه علوم و فناوری های پدافند غیرعامل، دوره ۹، شماره ۳، ۳۶۸-۳۵۹.
- Saada, A., 2016. Edge detection and depth estimation of Galala El Bahariya Plateau, Eastern Desert-Egypt, from aeromagnetic data, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2(1), 25–41.
- Fairhead, J.D., 2015. Advances in gravity and magnetic processing and interpretation, *EAGE*, 352 p.
- Lanza, R., Meloni, A., 2006. *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 287 p.
- Reynolds, J.M., 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd Edition, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 712 p.
- Hinze, W.J., von Frese, R.R.B., Saad, A.H., 2013. *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*, Cambridge University Press, 525 p.
- Valenta, J., 2015. *Introduction to Geophysics—Lecture Notes*, Czech Republic Development Cooperation, 72 p.
- Parasnis, D.S., 1973. *Mining geophysics*, 356 p.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics*, 792 p.
- Parasnis, D.S., 1996. *Principles of applied geophysics*, 5th edition, Springer, Dordrecht, Netherlands, 456 p.
- Cooper, G.R., Cowan, D.R., 2004. Filtering using variable order vertical derivatives. *Computers & Geosciences*, 30(5), 455–459.
- Ganiyu, S.A., Badmus, B.S., Awoyemi, M.O., Akinyemi, O.D., and Olurin, O.T., 2013. Upward continuation and reduction to pole process on aeromagnetic data of Ibadan area, South-Western Nigeria,

Earth Science Research, 2, 66-73.

Claerbout, J.F., 1988. Fundamentals of geophysical data processing with applications to petroleum prospecting, Blackwell Scientific Publications.

Zeng, H., Xu, D., Tan, T., 2007. A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China, Journal of Geophysics, 72, 145-150.

Agocs, W.B., 1955. Line spacing effect and determination of optimum spacing illustrated by Marmora, Ontario magnetic anomaly, Geophysics, 20(4), 871-855.