

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعالم

سال نهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، (پیاپی ۳۳): صص ۴۶-۳۷

شناسایی اهداف کوچک مقیاس مدفون در نزدیک سطح زمین با استفاده از روش مغناطیسی

سبحان محبوبی^۱، صفا خزائی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

روش مغناطیسی با استفاده از اندازه‌گیری خاصیت مغناطیسی مواد برای شناسایی اهداف و سازه‌های مدفون کاربردهای گسترده‌ای دارد. هدف این تحقیق بررسی شناسایی اهداف مدفون کوچک مقیاس نظیر مین‌های واقع در نزدیک سطح زمین از طریق شبیه‌سازی و مدل‌سازی ساختارهای مغناطیسی است. به این منظور، با کمک نرم‌افزار ژئوسافت، روش سیگنال تحلیلی و بلیکلی بر روی ۲۰ هدف شبیه‌سازی شده از طریق نرم‌افزار مدل ویژن اعمال گردیده است. همچنین با استفاده از فیلتر مشتق افقی امکان شناسایی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی اهداف بررسی و تحلیل شده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که بر اساس استفاده از روش‌ها و فیلترهای مناسب، روش مغناطیسی در شناسایی اهداف کوچک مقیاس مدفون در عمق‌های نزدیک به سطح زمین دارای توانایی نسبتاً خوبی است.

کلیدواژه‌ها: اهداف کوچک مقیاس، مدل‌سازی، روش مغناطیسی، سیگنال تحلیلی، مشتق افقی

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه تهران

۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، Email: skhazai@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

تعیین محل یا مرز ساختارهای زمین‌شناسی یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مسائلی است که همواره در ژئوفیزیک مطرح بوده است. تفسیر و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی عبارت است از تعیین منبع بی‌هنجاری‌های دیده شده و ویژگی‌های آن‌ها با توجه به تغییراتی که در داده‌ها دیده می‌شود [۱]. روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی برای یافتن بی‌هنجاری ساختارهای کوچک واقع در نزدیک سطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی زمین [۷-۲]، استفاده از سنسورهای چندگانه و فلزیاب‌ها [۹-۸] و موج میلی‌متری غیرفعال [۹] و همچنین از روش دمانگاری فرورسوخ [۱۰] اشاره نمود. پایک^۱ و همکاران نیز شیوه‌های مختلف کشف مین به‌ویژه روش ژئوفیزیکی توموگرافی امیدانس الکتریکی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳-۱۱].

تحقیقات متعددی در خصوص استفاده از روش‌های مغناطیسی نیز در زمینه مین‌یابی انجام شده است. آیگل^۲ و همکارانش با کمک ویسکوزیته مغناطیسی به پیش‌بینی و طبقه‌بندی و شناسایی مین‌های زمینی پرداختند [۱۴]. در یک تحقیق دیگر در آنگولا پیش‌بینی عملکرد فلزیاب برای پاک‌سازی خاک‌های از مین‌های زمینی با استناد به نقشه مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. همچنین با یک مطالعه موردی در کشور بوسنی و هرزگوین با کمک نقشه خواص مغناطیسی خاک به شناسایی مین‌های زمینی پرداخته شده است [۱۶]. در یک تحقیق دیگر با بررسی تغییرات کوچک مقیاس خواص مغناطیسی خاک شناسایی مین‌های زمینی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۷]. همان‌طور که مشخص است در اکثر تحقیقات انجام شده در حوزه مغناطیسی، بر بررسی خواص مغناطیسی خاک و مطالعه نقشه‌های مغناطیسی منطقه مورد نظر تأکید شده است [۱۹-۱۸].

در این تحقیق، کارایی روش ژئوفیزیکی مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. روش ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی یک روش میدان پتانسیل است که کاربرد وسیعی در اکتشاف کانسارهای فلزی دارد. همچنین، معمولاً در اکتشاف منابع هیدروکربونی مناطق نفت‌خیز از روش مغناطیسی برای شناسایی مقدماتی استفاده می‌شود [۲۰]. از آنجایی که شدت میدان مغناطیسی کل در هر نقطه متأثر از مواد و ساختارهای مغناطیسی موجود در آن نقطه است، برپایه تفسیر نقشه‌های خروجی و اعمال فیلترهای مختلف می‌توان به وجود

ناهنجاری‌های ساختاری زیرسطحی پی برد [۲۱].

برخلاف روش گرانی‌سنجی، داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده تولید بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی می‌کنند که این به خاطر ماهیت دوقطبی میدان مغناطیسی توده مولد بی‌هنجاری است. در نتیجه چنین خاصیتی، تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دشوارتر از تفسیر بی‌هنجاری‌های گرانی است. به جزء در مواردی که بردار مغناطیس‌شدگی توده قائم است بی‌هنجاری مغناطیسی ثبت‌شده نسبت به توده، جابه‌جایی دارد و در نتیجه از روش‌های خاصی استفاده می‌شود تا محل واقعی بی‌هنجاری از روی نقشه هم‌مقدار مغناطیسی توده تشخیص داده شود [۲۲]. یکی از این روش‌ها، انتقال به قطب است که داده‌های برداشت‌شده را به قطب منتقل می‌کند، چنان‌که گویی برداشت‌ها در قطب صورت گرفته است و لذا بی‌هنجاری مغناطیسی توده با فرض بردار مغناطیس‌شدگی قائم تولید می‌شود [۲۳]. علاوه بر این، می‌توان با روش‌هایی مرز توده (لبه‌های) را از روی نقشه هم‌مقدار مغناطیسی توده تشخیص داد.

به دلیل کوچک بودن اهداف مورد جستجو، در برداشت‌های هوابرد دامنه سیگنال‌های دریافت‌شده پایین است، برخی از ساختارهای مدفون در محیط قابل شناسایی نمی‌باشند. برای رفع چنین مشکلی نیازمند به‌کارگیری روشی مناسب جهت تقویت سیگنال‌های دریافتی در برداشت هوابرد مغناطیسی هستیم تا با اعمال آن، دامنه سیگنال بی‌هنجاری‌های احتمالی افزایش یابد و متعاقباً تعداد بیشتری از ساختارهای هدف در محیط شناسایی شود.

در ادامه این مقاله، ابتدا مبانی نظری پژوهش ارائه می‌شود. سپس به مدل‌سازی اهداف کوچک مقیاس پرداخته می‌شود. در مرحله بعد با اعمال فیلترها و روش‌های مناسب بر روی مدل‌های شبیه‌سازی‌شده از اهداف کوچک مقیاس، امکان شناسایی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی اهداف بررسی و تحلیل می‌شود.

۲- مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم و مبانی نظری مورد استفاده در این پژوهش به طور مختصر ارائه می‌شوند.

۲-۱- مغناطیس‌سنجی

مغناطیس‌سنج‌ها به خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی مواد پاسخ می‌دهند. خاصیت فیزیکی مرتبط با نفوذپذیری، خودپذیری مغناطیسی است که وسیله‌ای برای اندازه‌گیری میزان مغناطیسی‌شدگی مواد است. خودپذیری مغناطیسی مواد هم به‌صورت آزمایشگاهی و هم صحرایی قابل محاسبه است.

در مغناطیس‌سنجی برای نواحی وسیع معمولاً برداشت‌های زمینی دارای سرعت پایین و هزینه زیاد هستند و لذا ترجیحاً از

1- Paik

2- Igel

3- Ore Deposits

آورنده آن‌ها نامتقارن خواهند بود. ولی در صورتی که میدان القایی قائم باشد، بی‌هنجاری مغناطیسی به وجود آمده از القای مغناطیسی بر روی چشمه خودشان قرار می‌گیرند. اعمال این فیلتر در این تحقیق با استفاده از زاویه میل ۵۰ و زاویه انحراف مغناطیسی ۴ درجه (مربوط به غرب ایران) صورت گرفته است [۲۴]. این فیلتر یکی از ملزومات در پردازش و تفسیر ابتدایی نقشه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی است.

۲-۳- فیلتر ادامه فراسو مدل

یکی از تبدیلات مهم در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی، تبدیل ادامه فراسو است [۲۵]. در واقع در تفسیر اکثر طرح‌های مغناطیسی، از این تبدیل در حکم ابزاری برای کاهش نوفه (نویز) و تعیین گسترش عمقی توده استفاده می‌شود ولی این کار منجر به برآورد دقیقی از عمق قرارگیری توده نمی‌شود. هدف ما در این تحقیق تعیین عمق نیست و مهم، یافتن موقعیت و تعیین لبه است.

۲-۴- تعیین لبه و موقعیت ساختار

یکی از معضلات پردازش داده‌های مغناطیسی، بالا بودن سطح نوفه در محیط است. نوفه زمین‌شناسی در برخی از موارد به کلی بی‌هنجاری ساختار هدف را می‌پوشاند که در این صورت شناسایی چنین ساختارهایی با مشکل مواجه می‌شود. بنابراین نیازمند به‌کارگیری روش‌های مناسب جهت حذف چنین نوفه‌هایی هستیم تا بتوان محل‌های احتمالی وجود ساختارهای مورد نظر را بهتر شناسایی کرد. در ادامه، چندین روش مختلف برای نشان دادن بهتر نتیجه زمین‌شناسی پیشنهاد شده است.

۲-۴-۲- فیلترهای مشتقات قائم و افقی:

فیلترهای مشتق قائم و مشتق افقی به طور گسترده در نقش ابزاری برای تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقدار مشتق افقی داده‌ها درست در بالای لبه‌های توده مولد بی‌هنجاری بیشینه است و لذا لبه‌ها را برجسته می‌کند. استفاده از فیلتر مشتق قائم یکی از روش‌های برآورد مرز است. فیلتر مشتق قائم عرض بی‌هنجاری را باریک‌تر و موقعیت بی‌هنجاری را با دقت بیشتری مشخص می‌کند [۲۴ و ۲۶]. با افزایش مرتبه مشتق قائم، بی‌هنجاری‌ها برجسته‌تر می‌شوند اما چون این فیلتر از نوع فیلتر بالا گذر است به‌طور ناخواسته هم‌زمان با سیگنال‌های موجود در تصویر، نوفه‌ها نیز برجسته می‌شوند. این پدیده به‌ویژه در مشتقات قائم مرتبه بالاتر ظاهر خواهد شد. کاربرد این فیلتر عموماً به مرتبه‌های اول و دوم محدود می‌شود. بدین صورت که ابتدا نقشه مشتق قائم مرتبه دوم داده‌ها رسم می‌شود، در صورتی که

روش‌های برداشت هوابرد استفاده می‌شود. ارتفاع پرواز بین یک تا دو متر متغیر است و با سرعت مناسب منطقه وسیعی تحت پوشش اکتشافی قرار می‌گیرد. برداشت‌های هوابرد با هواپیما و امروزه با پهپاد رایج شده است. برداشت با پهپاد می‌تواند توسط دستگاه مگنتومتر پروتون انجام شود که وزن تقریبی حسگر این دستگاه یک کیلوگرم است و به راحتی توسط پهپاد قابل حمل است.

بی‌هنجاری میدان کلی با کم کردن بزرگی میدان منطقه‌ای که معمولاً با استفاده از مدل $IGRF^1$ تعیین می‌گردد به دست می‌آید. اگر T میدان کل اندازه‌گیری شده توسط دستگاه باشد و F میدان منطقه‌ای در یک نقطه باشند که از مدل $IGRF$ تعیین می‌گردد، آنگاه بی‌هنجاری میدان کل در آن نقطه از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\Delta T = |T| - |F| \quad (1)$$

پس از برداشت داده‌ها و اعمال تصحیحات مورد نیاز در مرحله پردازش، داده‌ها آماده تفسیر کیفی و کمی می‌شوند. با کمک تفسیر کمی می‌توان شکل، عمق و خودپذیری مغناطیسی منشأ‌های مغناطیسی را تعیین نمود. یک روش در تفسیر کمی، استفاده از میدان مغناطیسی ناشی از اشکال هندسی ساده است. روش‌هایی چون روش سیگنال تحلیلی و بلیکلی^۲ برای تخمین مرز و موقعیت ساختار ابداع شده‌اند. به منظور برآورد موقعیت توده‌های بی‌هنجار مغناطیسی، داده‌های مغناطیس برداشت شده مورد پردازش و تفسیر قرار می‌گیرند.

فیلتر کردن و پردازش تصویر، رکن مهمی در تعبیر و تفسیر داده‌های مغناطیسی و گرانی محسوب می‌شود. این قابلیت در حضور منابع کم عمق و همچنین منابع با تباین مغناطیسی با محیط اطراف، از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای برجسته‌سازی و یافتن موقعیت دقیق و درست بی‌هنجاری هدف باید از فیلترها و روش‌های مختلف در گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی استفاده کرد. فیلترهای که در این بخش استفاده خواهد شد در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

۲-۲- فیلتر برگردان به قطب (RTP)^۳

با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است به قطب مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم است، منتقل می‌شود؛ زیرا اگر میدان زمین مایل باشد شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی که به صورت القایی به وجود آمده‌اند نسبت به چشمه‌هایی به وجود

1- International Geomagnetic Reference Field

2- Blakely

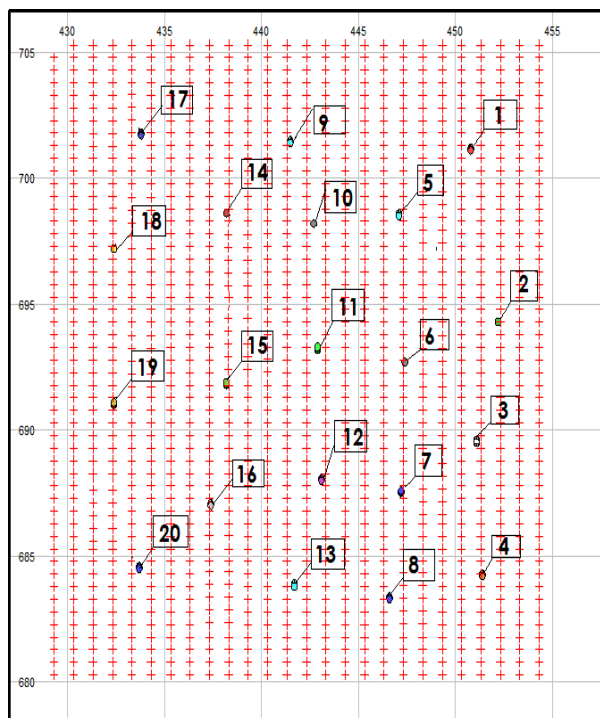
3- Reduction to the Pole

و عرضی کانسار را روی سطح زمین با دقت بیشتری نسبت به نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی نشان می‌دهد. در این پژوهش از نرم‌افزار Geosoft برای اعمال فیلترهای مورد نیاز روی داده‌های اولیه استفاده شده است.

بعد از محاسبه سیگنال تحلیلی، الگوریتم بلیکلی برای شناسایی خودکار محل ساختارهای مورد نظر بکار برده می‌شود. الگوریتم بلیکلی در صورتی که دامنه سیگنال تحلیلی در مرکز شبکه نسبت به ۸ عدد اطراف آن در تمامی جهات بیشتر باشد، این نقطه را به‌عنوان محل احتمالی ساختارهای مورد نظر شناسایی می‌کند. در ادامه، این روش بر روی داده‌های ساختگی پتانسیل گرانی و مغناطیس به کار گرفته می‌شود.

۳- مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی

در این بخش، به طور مختصر به مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود موقعیت ساختارهای کوچک‌مقیاس شبیه‌سازی شده از طریق نرم‌افزار مدل ویژن^۱ به صورت دو بعدی نمایش داده شده است. در این مدل‌سازی از ۲۰ هدف یکسان در یک محوطه ۲۵ × ۲۵ متری با زاویه قرارگیری متفاوت نسبت به زاویه میل مغناطیسی (۰، ۴۵ و ۹۰) و عمق‌های متفاوت استفاده شده است.



شکل (۱): مدل دوبعدی ساختارهای کوچک‌مقیاس

این نقشه دارای نوفه زیادی بوده و در تفسیرها، نقشی نداشت از نقشه مشتق قائم مرتبه اول استفاده می‌شود. در این‌جا نیز از مشتق مرتبه اول استفاده شده است.

اگر $\Phi(x, y)$ میدان پتانسیل باشد، آن‌گاه با استفاده از خواص تابع لاپلاس می‌توان مشتق قائم داده‌های میدان پتانسیل را محاسبه کرد. براساس این نظریه، اگر $\Phi(x, y)$ میدان پتانسیل باشد آن‌گاه $\nabla^2(\Phi) = 0$ (لاپلاس Φ برابر صفر خواهد بود) بنابراین می‌توان نوشت [۲۷]:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}\right) \quad (2)$$

روش مشتق افقی یکی از روش‌های تعیین تقریبی مرزها یا محل برخورد لبه‌های چشمه‌های میدان پتانسیل است. مهم‌ترین مزیت این روش حساسیت کم آن نسبت به نوفه موجود در داده‌ها است. زیرا این روش تنها به دو مشتق افقی مرتبه اول میدان بستگی دارد [۲۶]. اگر T میدان مغناطیسی کل باشد، اندازه مشتق افقی آن با رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$HGM(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

این تابع یک قله ناهنجاری روی محل برخورد توده مغناطیسی ارائه می‌دهد.

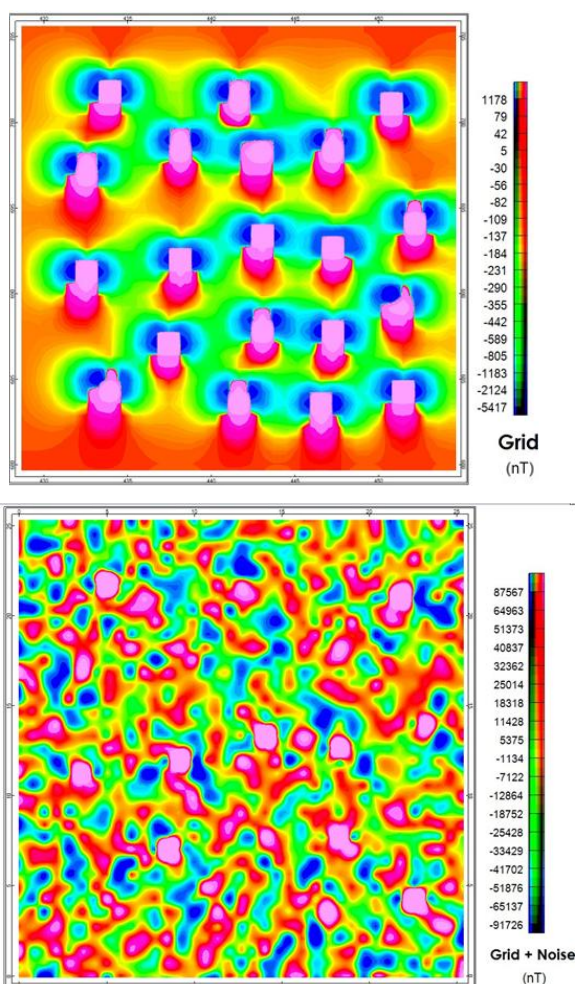
۲-۴-۲- سیگنال تحلیلی و الگوریتم بلیکلی:

عملگر سیگنال تحلیلی بر پایه میدان مغناطیسی کل و تبدیل هیلبرت آن و یا برپایه مشتق‌های افقی و عمودی میدان کل تعریف می‌شود [۲۸]. دامنه سیگنال تحلیلی مختلط برپایه مشتق‌های افقی و عمودی میدان کل به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$AAS(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

دامنه سیگنال تحلیلی سه‌بعدی در موقعیت (x, y) را می‌توان از گرادیان‌های عمود بر هم میدان مغناطیسی کل یا بی‌هنجاری میدان کل به دست آورد. در این رابطه، $|AAS(x, y)|$ دامنه سیگنال تحلیلی در نقطه‌ای با موقعیت (x, y) است. برای محاسبه سیگنال تحلیلی ابتدا گرادیان افقی تعیین و سپس از تبدیل هیلبرت برای تعیین گرادیان قائم استفاده می‌شود. تبدیل هیلبرت بدون تغییر در مقدار تابع، روی طیف فاز تغییری ۹۰ درجه ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، گرادیان افقی به قائم تبدیل می‌شود و لبه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی را با محدوده محیطی کانسار تطابق می‌دهد و بدین ترتیب گسترش طولی

از این فیلتر مکان‌یابی عمقی، اهداف به‌درستی به دست نخواهد آمد (که البته هدف این تحقیق نبوده است). با اعمال این فیلتر از میزان نوفه‌های سطحی تا حد زیادی کاسته شده است. برای یافتن اهداف سطحی و با توجه به کوچک بودن آن‌ها و همچنین برای کمتر کردن تاثیر نوفه و یافتن مرز اهداف از روش مشتق افقی استفاده شده است شکل (۳) با اعمال این فیلتر پنج مورد از اهداف با وضوح کامل شناسایی شده‌اند که چهار تای آن‌ها در زاویه صفر درجه است و یکی از آن‌ها در زاویه ۹۰ درجه نسبت به میل مغناطیسی قرار گرفته است. همچنین شش مورد دیگر از اهداف با میزان وضوح کمتری قابل شناسایی است. در ادامه برای تعیین دقیق‌تر و بهتر اهداف از روش سیگنال تحلیلی و همچنین تعیین پیک بلیکلی تواماً بر روی نقشه حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو استفاده شده است که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل مغناطیسی شبیه‌سازی شده از ۲۰ هدف کوچک مقیاس واقع در عمق ۱۰ سانتی‌متری (بالا). مدل شبیه‌سازی شده به همراه ۵٪ نوفه تصادفی تلفیق شده به مدل اولیه به دست آمده است (پائین).

با تغییر شیب و آزیموت^۱ (سمت) ساختارها سعی شده است تا شبیه‌سازی به رخداد واقعی نزدیک باشد. هدف مورد استفاده در این به شکل استوانه است. قطر استوانه ۳۰ و طول ۱۰ سانتی‌متر است. ساختار اهداف مورد نظر عموماً دارای هسته فلزی و دارای روکش پلاستیکی می‌باشند. برای ساختار مورد نظر، خودپذیری مغناطیسی ۲۵۰ در واحد SI در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه میل و انحراف ۵۰ و ۴ درجه فرض شده است. زمین‌شناسی منطقه دارای خودپذیری مغناطیسی ۰/۰۰۱ در واحد SI فرض شده است.

با توجه به شکل سمت چپ باید گفت که اهداف مورد نظر در زوایای مختلفی قرار گرفته‌اند تا بتوان تأثیر زاویه بر شناسایی اهداف را مورد بررسی قرار داد. زاویه‌های قرارگیری اهداف در جدول (۱) با توجه به شماره‌های آن‌ها مشخص شده است.

جدول (۱): زاویه قرارگیری اهداف مورد استفاده در مدل‌سازی

اهداف قرار گرفته در این زاویه	زاویه قرارگیری اهداف نسبت به میل مغناطیسی
۱،۴،۵،۸،۹،۱۲،۱۳،۱۶،۱۷،۲۰	۰
۲،۶،۱۰،۱۴،۱۸	۴۵
۳،۷،۱۱،۱۵،۱۹	۹۰

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود تعداد قرارگیری اهداف در زاویه صفر درجه، دو برابر بقیه زوایا است. دلیل این امر به این جهت است که این زاویه تقریباً موازی با زاویه میل مغناطیسی مورد استفاده در مدل‌سازی است تا بتوان تأثیر زاویه میل مغناطیسی بر روی اهدافی که موازی با زاویه میل قرار دارند بیشتر مشخص شوند.

مدل به‌دست‌آمده در شکل (۲) با نوفه گوسی به اندازه ۵٪ دامنه سیگنال تلفیق شده است تا شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک باشد شکل (۲). فاصله برداشت‌ها ۰/۵ m و فاصله پروفیل‌ها ۱ m شبکه‌بندی شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نقشه اصلی حاصل مدل‌سازی که خروجی نرم‌افزار مدل ویژن است نمایش داده شده است.

۴- تحلیل نتایج

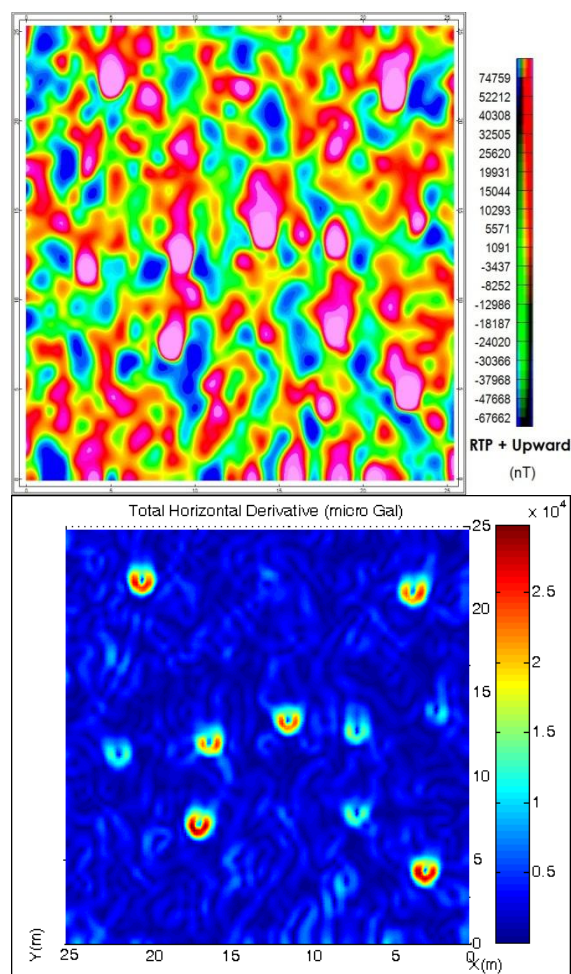
اولین فیلتر اعمالی بر روی داده‌های که در عمق ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک قرار گرفته‌اند، RTP است. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود بعد از فیلتر RTP برای کاهش نوفه‌های سطحی از فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۱۰ cm استفاده شده است. البته با استفاده

¹ Azimuth

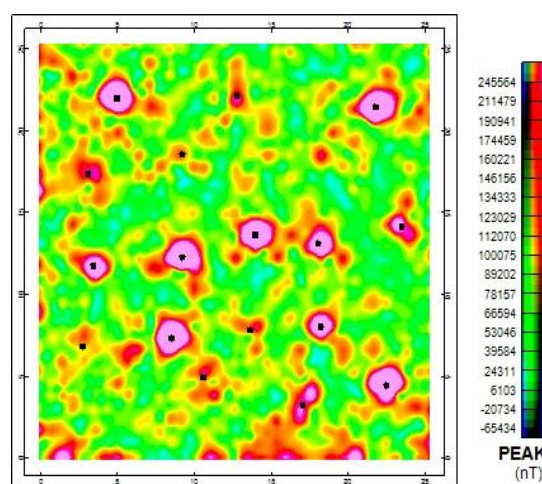
بر روی بی‌هنجاری‌های پتانسیل اعمال شده است. خروجی به‌دست‌آمده در شکل (۴) برای داده‌های مغناطیس نشان داده شده است. روش سیگنال تحلیلی بر روی نقشه RTP و ادامه فراسو اعمال شده است. آخرین مرحله مکان‌یابی دقیق اهداف مورد نظر ما با استفاده از الگوریتم بلیکلی صورت گرفته است و نقاطی که دارای بی‌هنجاری قابل توجهی است مشخص و تعیین موقعیت شده است که با مقایسه موقعیت‌های مدل‌سازی انجام‌شده دارای اندکی خطای است. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است با افزایش عامل همواری^۱ نقاط شناسایی‌شده توسط الگوریتم بلیکلی بیشتر و درست‌تر به دست آمده است. یک بی‌هنجاری دیگر را نیز به دلیل وجود نوفه به‌عنوان یک بی‌هنجاری تشخیص داده است که خطای موجود در تعیین موقعیت الگوریتم بلیکلی است. نتایج نشان می‌دهد که از ۲۰ هدف مورد نظر ۱۵ تا به‌درستی شناسایی شده است و سه تا از آن‌ها شناسایی نشده است. همچنین دوتا از نقاط شناسایی‌شده یا در انتخاب موقعیت خطا داشته و یا وجود نوفه نزدیک به هدف باعث شناسایی غلط هدف شده است. لذا می‌توان گفت که در این عمق حدود ۷۰٪ از اهداف مورد نظر پیدا شده‌اند.

برای بررسی بیشتر اهداف مورد نظر در عمق بیشتری نسبت به قبل، ۲۰ سانتی‌متری نسبت به سطح خاک، قرار داده شدند. در شکل (۵)، خروجی اعمال فیلترهای اولیه بازگشت به قطب و ادامه فراسو بر روی داده‌های مدل‌شده نشان داده شده است. در شکل (۵) نیز نقشه اعمال مشتق افقی مشاهده می‌شود. همانند بخش قبلی برای تعیین دقیق‌تر و بهتر اهداف از روش سیگنال تحلیلی و همچنین تعیین پیک بلیکلی توأم بر روی نقشه حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو استفاده می‌شود که در شکل (۶) نشان داده شده است. در کل از ۲۰ هدف مدل‌شده، ۱۸ هدف پیدا شده است و تنها دو مورد شناسایی نشده است. همچنین دو هشدار غلط نیز دیده می‌شود. لذا در مجموع می‌توان گفت که در این عمق حدود ۸۰٪ از اهداف مورد نظر پیدا شده‌اند.

در ادامه، اهداف مورد نظر در عمق ۳۰ سانتی‌متری نیز مورد بررسی قرار داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌های (۷) تا (۹) مشاهده می‌شود، از میزان نوفه‌های سطحی کاسته شده است و بی‌هنجاری‌های مورد نظر به‌صورت بسیار واضح‌تری مشخص شده است. در مجموع، تمامی ۲۰ هدف به‌درستی شناسایی شده است و همچنین یک هشدار غلط یافت شده است.

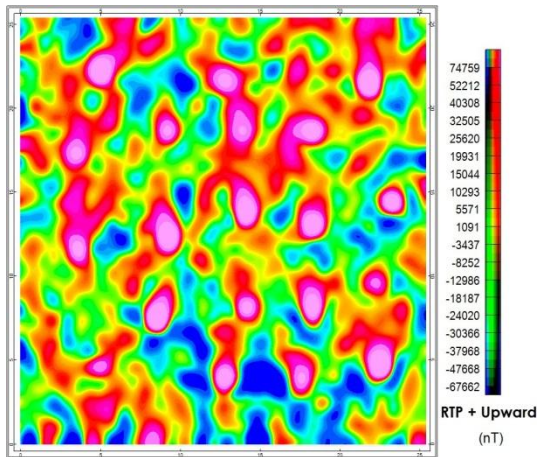


شکل (۳): اعمال فیلتر بازگشت به قطب و سپس فیلتر ادامه فراسو بر روی مدل نوفه‌دار در عمق ۱۰ سانتی‌متری (بالا). اعمال فیلتر مشتق افقی بر روی مدل به‌دست‌آمده (پائین).

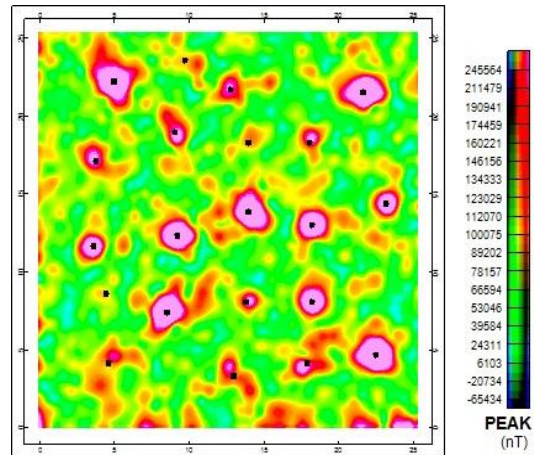


شکل (۴): اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی نقشه حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو

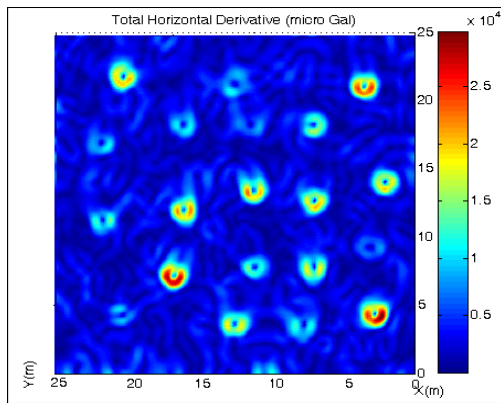
برای برجسته‌سازی محل ساختارهای مورد نظر، سیگنال تحلیلی



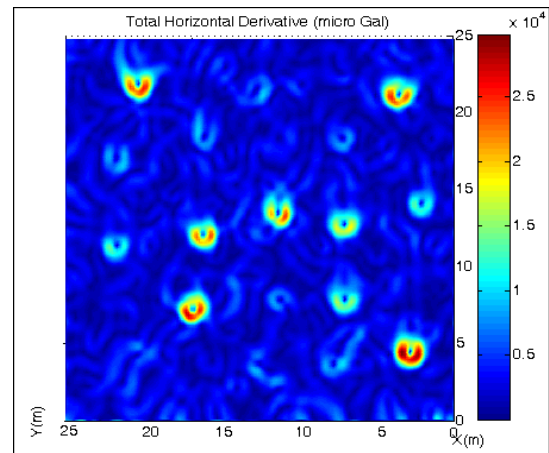
شکل (۷): اعمال فیلتر بازگشت به قطب و سپس فیلتر ادامه فراسو بر روی مدل نوفه‌دار ۲۰ اهداف در عمق ۳۰ سانتیمتری.



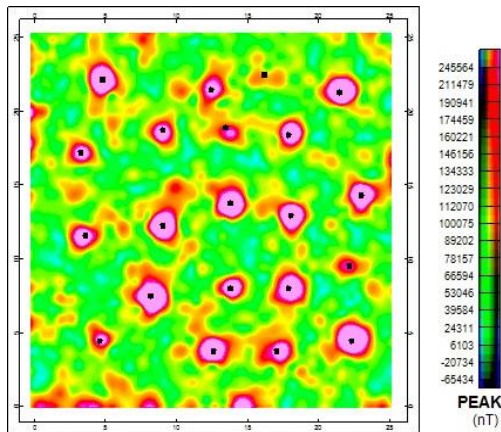
شکل (۸): اعمال فیلتر بازگشت به قطب و سپس فیلتر ادامه فراسو بر روی مدل نوفه‌دار واقع در عمق ۲۰ سانتیمتری (بالا). اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی مدل به‌دست آمده (پائین).



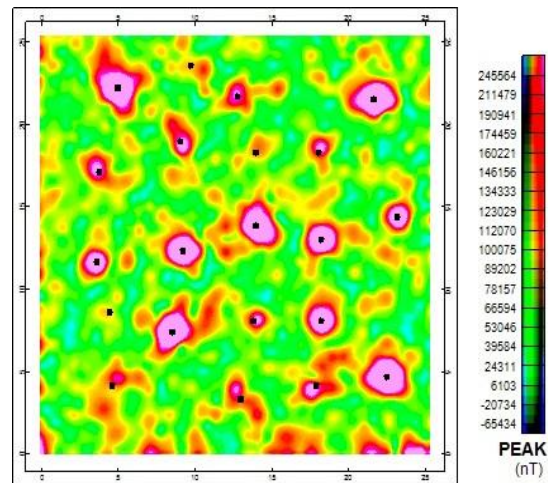
شکل (۹): اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی مدل به‌دست آمده.



شکل (۱۰): اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی مدل به‌دست آمده (پائین).



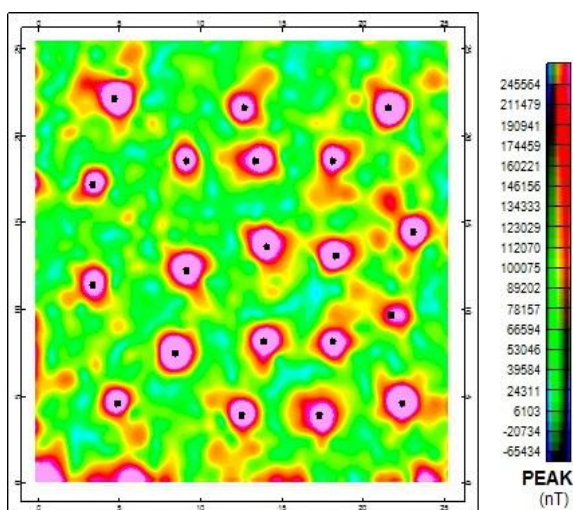
شکل (۱۱): اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی نقشه حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو.



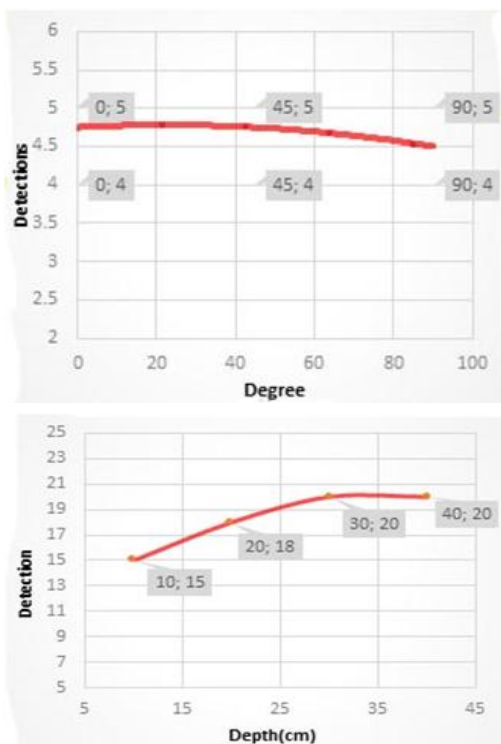
شکل (۱۲): اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی نقشه حاصل از اعمال فیلتر فراسو.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نتایج شناسایی اهداف استقرار یافته در عمق ۴۰ سانتیمتری از سطح خاک نشان داده شده‌اند. در مجموع، تمامی ۲۰ هدف مورد نظر به‌درستی شناسایی شده است.

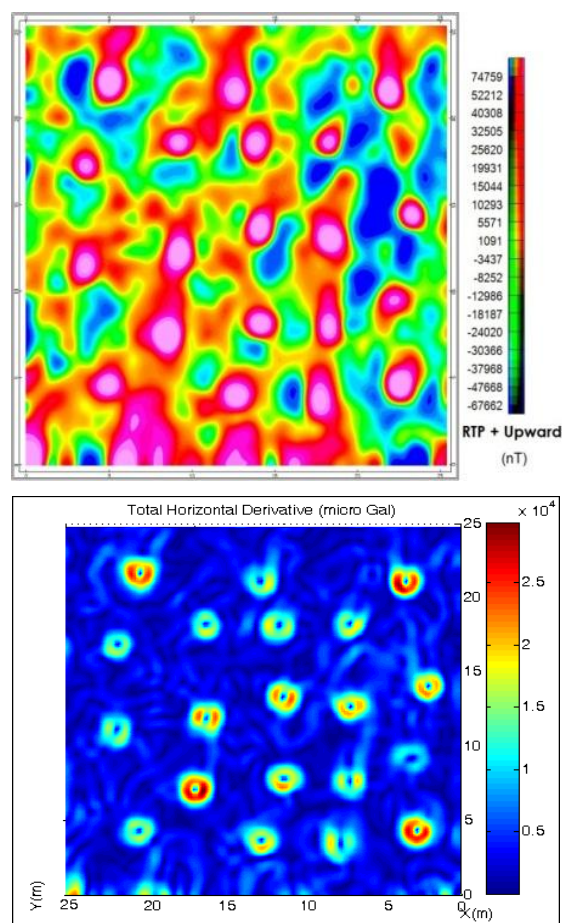
آن چنان محسوس نیست که آن هم به دلیل ابعاد کوچک اهداف مورد نظر است. ولی با همین ابعاد هم مشخص است که وقتی زاویه قرارگیری تقریباً صفر درجه باشد یعنی تقریباً موازی با زاویه میل مغناطیسی منطقه مورد مطالعه باشد، شناسایی هدف با ضریب اطمینان بیشتری نسبت حالتی است که عمود بر جهت زاویه میل (۹۰ درجه) قرار گرفته است.



شکل (۱۱): اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی نقشه حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو.



شکل (۱۲): نتایج حاصل از شناسایی ۲۰ هدف مدل شده کوچک مقیاس بر اساس زوایا قرار گرفته شده (بالا) و نمودار به دست آمده با توجه به عمق قرارگیری (پائین)



شکل (۱۰): اعمال فیلتر بازگشت به قطب و سپس فیلتر ادامه فراسو بر روی مدل نوفه دار اهداف در عمق ۴۰ سانتیمتری (بالا). اعمال روش سیگنال تحلیلی و در ادامه تعیین پیک بلیکلی بر روی مدل به دست آمده (پائین).

در شکل (۱۲) نمودارهای حاصل از مجموع چهار عمق قرار گرفته شده و سه زاویه مختلف داده شده، به دست آمده است. همان طور که در شکل (۱۲) سمت پایین مشاهده می شود با افزایش عمق، آشکارسازی سیر صعودی داشته و نشان دهنده این است که با افزایش عمق میزان دقت شناسایی اهداف کوچک مقیاس سطحی افزوده می شود و ضریب اطمینان بیشتری برای شناسایی وجود خواهد داشت. دلیل این امر وجود نوفه های سطحی است که با افزایش عمق قرارگیری اهداف می توان نوفه های سطحی را با اعمال فیلترهای مناسب به کار برده شده از بین برد ولی در صورت قرارگیری بر روی سطح برای از بین بردن نوفه سطحی مقداری از دامنه ناهنجاری (آنومالی) مورد نظر را هم کاهش می دهد و در شناسایی دچار مشکل می شویم. در شکل (۱۲) که براساس زاویه قرارگیری است، با افزایش زاویه میزان شناسایی اندکی کاهش می یابد ولی

۵- نتیجه گیری

اصولاً با استفاده از روش مغناطیسی، ساختار و اهداف مورد نظر که دارای خاصیت مغناطیسی و ساختار فلزی هستند و یا دارای تباين مغناطیسی خاصی با محیط اطراف خود هستند، قابل شناسایی است. در این تحقیق بر روی پردازش و تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی اهداف کوچک مقیاس تمرکز گردید. هدف این تحقیق بررسی شناسایی اهداف مدفون کوچک مقیاس نظیر مین‌های واقع در نزدیک سطح زمین از طریق شبیه‌سازی و مدل‌سازی ساختارهای مغناطیسی بود. به این منظور، مدل‌های مغناطیسی ۲۰ مین با استفاده از نرم‌افزار مدل ویژن به وجود آمد. سپس با استفاده از فیلترهای ادامه فراسو و بازگشت به قطب نوفه‌های سطحی کاهش داده شد. همچنین با استفاده از روش‌های سیگنال‌تحلیلی و اعمال فیلتر مشتق افقی موقعیت دقیق ساختارها تعیین گردید و برای به دست آوردن موقعیت دقیق اهداف از الگوریتم بلیکلی استفاده شد. در مجموع، نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان‌دهنده مطلوب بودن روش‌ها و فیلترهای اعمال شده بر روی داده‌های مدل شده است. همچنین، نتایج به دست آمده نشان داد در مواردی که اهداف خیلی نزدیک به سطح هستند روش مغناطیسی برای شناسایی با مشکل روبرو است به طوری که هرچه عمق اهداف کوچک مقیاس بیشتر می‌شود میزان شناسایی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که به دلیل کوچک بودن ابعاد اهداف، میزان تاثیرگذاری زاویه قرار گیری در شناسایی بسیار اندک است. از آن جا که به دلیل کوچک مقیاس بودن ساختارها، دامنه بی‌هنجاری مغناطیسی اهداف کم است؛ لذا توصیه می‌شود که برداشت‌ها در ارتفاع پرواز کم بین یک تا دو متر انجام شود و نیز با اعمال فیلتر ادامه فراسو برای گسترش داده‌های هوابرد به سطح زمین، سیگنال‌های مغناطیسی تقویت گردد. همچنین به دلیل وجود نوفه در داده‌های برداشت شده، از فیلتر مشتق افقی برای تعیین مرز و از الگوریتم بلیکلی برای تعیین موقعیت استفاده شود.

۶- مراجع

- K. C. Ho, P. D. Gader, and J. N. Wilson, "Improving landmine detection using frequency domain features form ground penetrating radar," In Proc. Geosci. Remote Sens. Symp., vol. 3, pp. 1617-1620, 2004.
- M. A. Gonzalez-Huici, "Accurate ground penetrating radar numerical modeling for automatic detection and recognition of antipersonnel landmines," Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Univ. Bonn, 2013.
- M. A. Abbas and A. Lethy, "Implementation of wave-let correlation to locate landmine-like objects using GPR Data as experimented on a test site," Journal of Suez Canal University, pp. 83-97, 2005.
- O. Lopera and N. Milisavljevic, "Prediction of the effects of soil and target properties on the antipersonnel landmine detection performance of ground-penetrating radar: A Colombian case study," J. Appl. Geophys., vol. 63, pp. 13-23, 2007.
- C. Lee, "Mine detection techniques using multiple sensors," M. S. thesis, University of Tennessee, Knoxville, 2001.
- C. Bruschini and B. Gros, "A Survey of Current Sensor Technology Research for the Detection of Landmines," In Proc. of the International Workshop on Sustainable Humanitarian Demining, vol. 6, pp. 18-27, 1997.
- A. N. Kalagar, A. Mahzoon, M. R. Hedayati, and M. R. Rad, "Landmine Detection by Passive Infrared Thermography Using Image Processing Techniques," vol. 4, pp. 153-202, 2012.
- J. K. Paik, C. P. Lee, and A. Abidi, "Image processing based mine detection techniques using multiple sensors: A review," Subsurface Sensing Technologies and Applications, An International Journal, vol. 3, no. 3, pp. 153-202, 2002.
- P. Church, J. E. McFee, S. Gagnon, and P. Wort, "Electrical impedance tomographic imaging of buried landmines, IEEE T. Geosci. Remote," vol. 44, pp. 2407-2420, 2006.
- G. El-Qady and K. Ushijima, "Detection of UXO and landmines using 2-D modeling of geoelectrical resistivity data," In Proc. of SAGEEP Meeting, pp. 1176-1182, 2005.
- J. Igel, H. Preetz, and S. Altfelder, "Magnetic viscosity of tropical soils: classification and prediction as an aid for landmine detection," Geophys J. Int., vol. 190, no. 2, pp. 843-855, 2012.
- H. Preetz and V. Hennings, "Predicting metal detector performance for landmine clearance-soil magnetic map of Angola, Environ," Earth Sci., vol. 60, pp. 1499-1508, 2010.
- J. A. Hannam and J. A. Dearing, "Mapping soil magnetic properties in Bosnia and Herzegovina for landmine clearance operations," Earth planet Sci. Lett., vol. 274, no. 4, pp. 285-294, 2010.
- J. Igel and H. Preetz, "Small-scale variability of electromagnetic soil properties and their influence on landmine detection: how to measure, how to analyze and how to interpret?," In Proc. of Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Tar, 2009.
- F. Liming, K. Chong, Z. Xiaojun, Z. Quan, and W. Ming, "An efficient method for tracking a magnetic target using scalar magnetometer array," Springerplus, vol. 5, no. 202, 2016.
- M. P. Bray and C. A. Link, "Learning Machine Identification of Ferromagnetic UXO Using Magnetometry," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, no. 2, 2015.
- E. Robinson and C. Coruh, "Basic exploration Geophysics," John Wiley & Sons, 1988.
- K. K. Sharma, "Geological evolution and crustal growth of the Bundelkh and carton and its relict in the surrounding regions, North Indian Shield," The Indian Precambrian, Scientific Publishers, India, pp. 33-43, 1998.
- M. Metwaly, "Detection of metallic and plastic landmines using the GPR and 2-D resistivity techniques," Nat. Hazards Earth Syst. Sci., vol. 7, pp. 755-763, 2007.
- D. Potin, E. Duflos, and P. Vanheeghe, "A Survey of Current Sensor Technology Research for the Detection of Landmines, International Journal of Remote Sensing, vol. 30, no. 9, pp. 2399-2410, 2009.

21. V. J. S. Grauch and C. S. Johnston, "Gradient window method: A simple way to isolate regional from local horizontal gradients in potential-field gridded data," 72nd Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2002.
22. J. R. Blakely and R. W. Simpson, "Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies," *Geophysics*, vol. 51, pp. 1494-1498, 1986.
23. H. J. Arkani, "Differential reduction to the pole of regional magnetic anomalies," *Geophysics*, vol. 53, no. 12, pp. 1592-1600, 1988.
24. G., Cooper and D., Cowan, "The application of fractional calculus to potential field data," *Exploration Geophysics*, vol. 34, pp. 51-56, 2003.
25. R. J. Blakely, "Potential Theory in Gravity and Magnetic Application," Cambridge University Press, 2nd edition, 1996.
26. A. E. Beck, "Physical principles of Exploration Methods," Macmillan press, London, 1981.
27. R. J. Blakely, "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications," Cambridge University press, New York, 1995.
28. M. N. Nabighian, "The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation", *Geophysics*, vol. 37(3), pp. 507-517, 1972.

Detection of Small-Scale Targets Buried Near the Earth's Surface using Magnetometry Method

S. Mahboobi, S. Khazaei*

Abstract

Magnetometry method which measures magnetic content of materials has wide applications in particular to detect buried targets. The aim of this study is to investigate the possibility of detecting small-scale buried targets (like mine) located near the Earth's surface through simulation and modeling of the magnetic structures. For this purpose, with the help of Geosoft software, analytic signal and Blakely method have been applied on 20 small-scale targets simulated by ModelVision software. Also, the possibility of detecting magnetic anomalies has been analyzed using the horizontal derivative filter. Results obtained in this study show that based on using appropriate methods and filters, the magnetometry has a relatively good ability to detect small-scale buried targets located near the Earth's surface.

Key Words: *Small-Scale targets, Magnetometry, Analytic Signal, Horizontal Derivative.*

* Imam Hussein Comprehensive University (skhazai@ihu.ac.ir)- Writer-in-Charge