

اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی با استفاده از حسگرهای ممز (MEMS)، مطالعه موردی: معدن سنگ آهن جعفرخان

هاشم شاهسونی^{۱*} و سنور عبداللهی^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

^۲ دانش‌آموخته، کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف مواد معدنی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳)

چکیده

یکی از شیوه‌های برداشت در مغناطیس‌سنجی، برداشت به شیوه تانسور کامل گرادیان مغناطیسی است. جهت به‌دست‌آوردن تانسور کامل گرادیان مغناطیسی زمین دست‌کم به چهار حسگر نیاز است. تاکنون، به شیوه معمول، از چهار مغناطیس‌سنج اسکوییدی برای این منظور استفاده شده است، اما این حسگرها هزینه زیاد و دامنه عملکرد دمایی کمی دارند. به‌تازگی حسگرهایی با فناوری سامانه‌های میکروالکترونیکی مکانیکی (Micro Elector Mechanical System) یا ممز (MEMS) توسعه داده شده‌اند که بسیار کوچک، کم‌وزن و کم‌مصرف هستند. در این تحقیق از این نوع حسگرها به جای حسگرهای اسکوییدی استفاده شده است. قدرت تفکیک این حسگرها به اندازه مغناطیس‌سنج‌های اسکوییدی نیست و نمی‌توان از آنها برای شناسایی بی‌هنجاری‌های کوچکی استفاده کرد که تغییراتی کمتر از ۱۶۰ نانوتسلا در میدان مغناطیسی زمین ایجاد کرده‌اند، اما این حسگرها قادرند بزرگای میدان مغناطیسی را در سه جهت عمود بر هم اندازه‌گیری کنند و حساسیتی پذیرفتنی دارند. در این مطالعه چهار حسگر از این نوع با آرایشی متقاطع راه‌اندازی شده است. سپس برداشت‌هایی از یک ذخیره سنگ‌آهن در نزدیکی روستای جعفرخان شهرستان سقز در استان کردستان انجام شده است. برای اعتبارسنجی، درایه‌های ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی با مشتقات سویی حاصل از یک حسگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد نسبت سیگنال به نوفه برای درایه‌های G_{xx} ، G_{yx} ، G_{zx} ، G_{zy} و G_{zz} در روش تانسور کامل گرادیان در مقایسه با مشتق‌های سویی متناظرشان به ترتیب به اندازه صفر، $۴/۷۹$ ، $۱۰/۸۰$ ، $۸۳/۸۳$ و $۸/۴۶$ افزایش داشته است. این موضوع نشان‌دهنده توانایی حسگرهای ممز در برداشت به شیوه تانسور کامل گرادیان مغناطیسی است.

واژه‌های کلیدی: حسگر، سامانه‌های میکروساختار مکانیکی (ممز)، جعفرخان، تانسور کامل گرادیان مغناطیسی، مشتق سویی

۱ مقدمه

مغناطیس‌سنجی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی است که در زمینه‌های گوناگون کاربرد دارد (کیاری و همکاران، ۲۰۰۲). توانایی برداشت هوایی و دریایی علاوه بر برداشت‌های زمینی و ارزان‌تر بودن نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر ژئوفیزیکی، این روش را به یکی از پرکاربردترین و ارزان‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی مبدل ساخته است (گان و دنتیث، ۱۹۹۷). اگر میدان مغناطیسی با استفاده از چهار حسگر برداری که با آرایش متقاطع نسبت به هم قرار گرفته‌اند، به صورت هم‌زمان اندازه‌گیری شود، آنگاه می‌توان ماتریس تانسور کامل میدان مغناطیسی را به دست آورد. این ماتریس که شامل مشتقات سویی است، ماتریسی 3×3 است که فقط پنج درایه آن مستقل هستند (دنتیث و مادگ، ۲۰۱۳). تانسور کامل گرادیان مغناطیسی در سال ۱۹۷۵ معرفی شد. در این روش، آرایه‌ای از چهار مغناطیس‌سنج به صورتی طراحی شده بود که تمام اجزای لازم میدان و گرادیان‌های مرتبط با آنها را تولید می‌کرد. به این ترتیب برای هر مؤلفه سه مشتق فضایی در جهت‌های متعامد به دست می‌آمد. با استفاده از این مشتقات فضایی امکان محاسبه درایه‌های ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی فراهم شد (وین و همکاران، ۱۹۷۵). در سال‌های بعد، استفاده از شیوه گرادیومتری گرادیان کامل به دلیل مزایای آن نظیر حساسیت بیشتر به ساختارهای زیر سطح، حذف اثر تغییر ناحیه‌ای میدان مغناطیسی زمین، آشکارسازی بهتری هنجاری‌ها و اطلاعات مربوط به جهت بردار میدان مغناطیسی زمین (پدرسن و راسموسن، ۱۹۹۰ و اشمیت و کلارک، ۲۰۰۰، ۲۰۰۶) بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. به نظر می‌رسد بیشتر تحقیقات انجام‌شده جهت به دست آوردن تانسور کامل میدان مغناطیسی زمین، با استفاده از مغناطیس‌سنج‌های اسکوییدی بوده است. در جدول ۱ به برخی از پژوهش‌ها در زمینه اندازه‌گیری تانسور کامل میدان مغناطیسی زمین با استفاده

از مغناطیس‌سنج‌های اسکوییدی و هدف از پژوهش مورد نظر اشاره شده است.

گرادیومترهای ساخته‌شده از حسگرهای اسکوییدی با وجود مزیت حساسیت بسیار زیاد، هزینه‌بر و سنگین هستند و به کارگیری آنها در دمای معمولی بسیار دشوار است؛ بنابراین استفاده از این گرادیومترها به برداشت‌های زمینی و هوایی سنتی محدود است. نصب گرادیومترهای اسکوییدی روی ماهواره‌ها یا پهپادها با چالش‌های بسیاری روبه‌رو است. برای ساختن گرادیومترهای کامل تانسور مغناطیسی، تحقیقاتی در زمینه استفاده از حسگرهای فلاکس‌گیت انجام شده است (سویی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین سامانه اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان مغناطیسی با مغناطیس‌سنج فلاکس‌گیت روی یک میکروولیت ارزیابی شده است (سویی و همکاران، ۲۰۱۵). سویی و همکاران (۲۰۱۶) ثابت کردند دامنه دمای گسترده، هزینه کم و وضوح زیاد از مزایای گرادیومتری زمینی با استفاده از فلاکس‌گیت‌ها است، اما این روش دقت به نسبت کمی دارد؛ بنابراین روشی را برای تصحیح گرادیومتر تانسور مغناطیسی هوابرد در ارتفاع زیاد معرفی کردند که در آن از ویژگی تقریباً صفر بودن تانسور گرادیان میدان مغناطیسی زمین در ارتفاع زیاد استفاده می‌شود. ایشان برای تصحیح از چهار فلاکس‌گیت چیده‌شده در یک ساختار متقاطع استفاده کردند. اخیراً حسگرهای بسیار سبک، به نسبت ارزان و کوچک به بازار عرضه شده است که توانایی اندازه‌گیری میدان مغناطیسی را با دقتی پذیرفتنی دارند. این حسگرها که برای ناوبری توسعه داده شده‌اند، به سامانه‌های میکروالکترومکانیکی یا ممز (Micro Elector Mechanical System, MEMS) معروف هستند. برخی مطالعات نشان می‌دهد اگر بی‌هنجاری‌های فلزی زیرسطحی به اندازه کافی بزرگ باشند، می‌توان آنها را با استفاده از این حسگرها آشکار کرد (ملکی و شاهسونی، ۱۳۹۶). در صورتی که از این حسگرها برای به دست آوردن تانسور

جدول ۱. برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه اندازه‌گیری تانسور کامل میدان مغناطیسی زمین.

منبع	هدف پژوهش
استولز و همکاران (۱۹۹۹)	معرفی آرایشی جدید برای مغناطیس‌سنج‌های اسکونیدی
نلسون و همکاران (۲۰۰۳)	شرح برنامه کشور آلمان در استفاده از گرادیمترهای تانسور کامل مغناطیسی و برنامه‌های آینده این کشور
گامی و همکاران (۲۰۰۴)	اکتشاف مواد مدفون زیرسطحی به صورت هوایی
اشمیت و همکاران (۲۰۰۴)	اکتشاف ذخایر معدنی و نفت و امکان‌سنجی برداشت هوایی گرادیمتری تانسور کامل مغناطیسی
استولز و همکاران (۲۰۰۶)	استفاده از مغناطیس‌سنج‌های اسکونید در مغناطیس‌سنجی هوایی به منظور به‌دست آوردن تانسور کامل گرادیان مغناطیسی با آویزان کردن این مغناطیس‌سنج‌ها از بالگرد
فیتزجرالد و همکاران (۲۰۱۰)	بررسی آشکارسازی دایک‌ها با استفاده از تانسور کامل گرادیان مغناطیسی
زدانوف و همکاران (۲۰۱۱)	توسعه روشی برای وارون‌سازی داده‌های حاصل از برداشت گرادیمتری تانسور کامل مغناطیسی
چولا و همکاران (۲۰۱۲)	معرفی شیوه پردازشی برای خروجی حسگرهای مغناطیس‌سنج اسکونیدی
زدانوف و همکاران (۲۰۱۲)	معرفی روشی برای وارون‌سازی داده‌های تانسور کامل گرادیان مغناطیسی برداشت‌شده با مغناطیس‌سنج‌های اسکونیدی
اشنایدر و همکاران (۲۰۱۳)	بررسی وارون‌سازی داده‌های تانسور کامل گرادیان مغناطیسی برداشت‌شده با حسگر اسکونیدی
کتسیارس و همکاران (۲۰۱۴)	ارزیابی برداشت‌های تانسور کامل گرادیان مغناطیسی با استفاده از ماهواره
لوو و همکاران (۲۰۱۵)	معرفی روشی برای بهبود داده‌های به‌دست‌آمده از تانسور کامل گرادیان مغناطیسی برداشت‌شده با مغناطیس‌سنج‌های اسکونیدی
کیتچ و همکاران (۲۰۱۹)	بررسی مزایای برداشت به شیوه گرادیمتری تانسور کامل مغناطیسی نسبت به برداشت‌های شدت کل میدان مغناطیسی
کیتچ و همکاران (۲۰۱۹)	استفاده از شیوه تانسور کامل گرادیان مغناطیسی برای اکتشاف دلوریت‌های نفوذی به شیوه هوابرد
یو و همکاران (۲۰۲۲)	معرفی روشی برای کالیبره کردن مغناطیس‌سنج‌های اسکونیدی استفاده‌شده در برداشت‌های تانسور کامل میدان مغناطیسی
رود و همکاران (۲۰۲۲)	استفاده تجاری از شیوه تانسور کامل گرادیان مغناطیسی

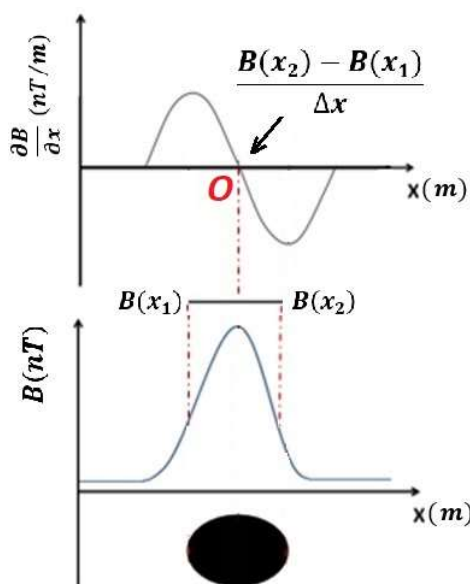
برداشت‌هایی روی یک ذخیره کوچک آهن انجام و در نهایت، برای اعتبارسنجی و بررسی میزان درستی نتایج، با مشتقات سوئی حاصل از یک حسگر مقایسه شده است.

۲ تفاوت مشتق‌گیری ریاضی با روش گرادیان برای اندازه‌گیری نرخ تغییرات میدان مغناطیسی جهت مقایسه نحوه یافتن نرخ تغییرات میدان مغناطیسی با

کامل گرادیان مغناطیسی استفاده شود، واضح است که می‌توان از مزیت‌های این شیوه برداشت بهره برد. در منابع مختلف مانند کیتچ و همکاران (۲۰۱۹) و سوئی و همکاران (۲۰۱۴) به این مزایا اشاره شده است.

در این تحقیق از چهار حسگر ممز به‌منظور به‌دست آوردن ماتریس تانسور کامل استفاده شده است. این حسگرها با آرایش متقاطع راه‌اندازی شده‌اند. سپس

که از یک حسگر استفاده شده باشد، دو نمونه در شرایط یکسانی برداشت نشده‌اند و ممکن است تغییرات زمانی میدان روی یکی از آنها تأثیر بگذارد و نرخ تغییرات در نقطه O تغییر کند. در روش مشتق‌گیری، نرخ تغییرات بعد از شبکه کردن داده‌ها اجرا می‌شود، درحالی‌که در روش گرادیان ابتدا نرخ تغییرات تعیین و سپس فرایند شبکه کردن انجام می‌شود. برداشت به شیوه گرادیمتری مزایای بسیاری دارد. این داده‌ها از تغییرات زمانی میدان مغناطیسی متأثر نمی‌شوند؛ زیرا تغییرات زمانی میدان بر هر دو حسگر اثر یکسان می‌گذارد و در نتیجه، بر اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده تأثیری ندارد. داده‌های برداشت شده به شیوه گرادیمتری نسبت به حاشیه‌های بی‌هنجاری‌ها بسیار حساس هستند. این داده‌ها قدرت تفکیک بیشتری نسبت به داده‌های برداشت شده به شیوه سنتی یعنی استفاده از یک حسگر و مشتق‌گیری ریاضی دارند (دنتیث و مادگ، ۲۰۱۳).



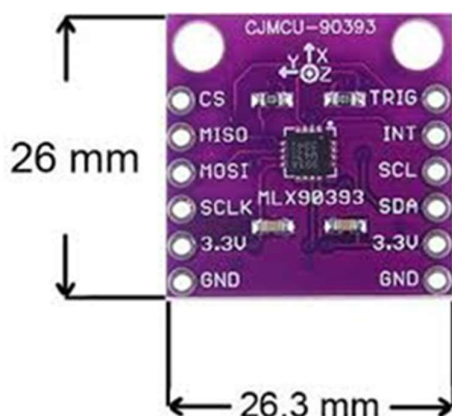
شکل ۱. نحوه اندازه‌گیری نرخ تغییرات میدان مغناطیسی در نقطه O روی یک بی‌هنجاری فلزی واقع در قطب.

استفاده از تانسور گرادیان و مشتق‌گیری ریاضی، نمودار تغییرات بزرگای میدان روی یک بی‌هنجاری مغناطیسی واقع در عرض‌های جغرافیایی نزدیک به قطب مغناطیسی زمین در شکل ۱ نشان داده شده است. مقدار نرخ تغییرات میدان مغناطیسی در جهت محور X از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f'(x_0) = \frac{B(x_2) - B(x_1)}{\Delta x} \quad (1)$$

که $f'(x_0)$ نرخ تغییرات میدان مغناطیسی در نقطه O و $B(x_1)$ و $B(x_2)$ به ترتیب بزرگای میدان مغناطیسی در محل x_1 و x_2 است. Δx فاصله بین x_1 و x_2 است.

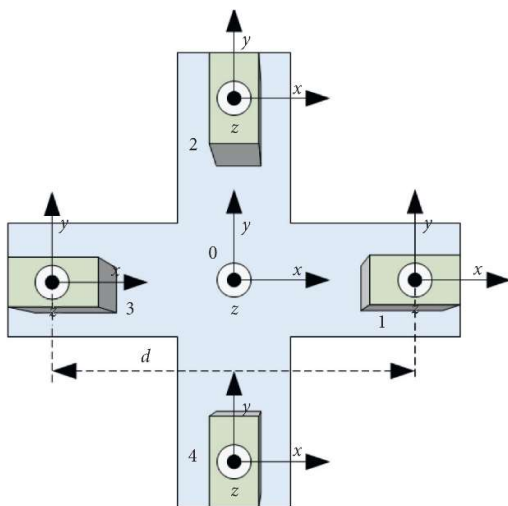
متغیرهای رابطه (۱) و به عبارتی نرخ تغییرات میدان در نقطه O را می‌توان به دو شیوه محاسبه کرد. در روش اول که در اینجا مشتق نامیده می‌شود، ابتدا با استفاده از یک مغناطیس سنج بزرگای میدان مغناطیسی در نقطه x_1 و سپس در نقطه x_2 اندازه‌گیری می‌شود. پس از آن طبق رابطه (۱) دو مقدار $B(x_1)$ و $B(x_2)$ از هم کم و بر فاصله بین آنها تقسیم می‌شود. در مثال نشان داده شده در شکل ۱ چون $B(x_1)$ و $B(x_2)$ با هم برابرند، مقدار مشتق نیز برابر صفر است. در روش دوم که روش گرادیان نامیده می‌شود، از دو حسگر با فاصله ثابت، مثلاً یک متر استفاده می‌شود که در جهت X به صورت هم‌زمان برداشت انجام می‌دهند. منظور از برداشت در جهت X در این حالت یعنی در جهت X، یک حسگر جلوتر و دیگری عقب‌تر است. در صورت برداشت با چنین آرایشی روی بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل ۱، نرخ تغییرات میدان در نقطه O برابر است با بزرگای میدان $B(x_2)$ که با حسگر جلویی اندازه‌گیری شده است منهای $B(x_1)$ تقسیم بر فاصله بین دو حسگر. در این حالت نیز مقدار نرخ تغییرات میدان برابر صفر است؛ زیرا مقدار اندازه‌گیری شده با دو حسگر با هم برابر است. در روش گرادیمتری، مقدار مشتق در نقطه O هم‌زمان با برداشت‌ها و در شرایط یکسان زمانی در دو نقطه $B(x_1)$ و $B(x_2)$ به دست می‌آید. این در حالی است که در حالتی



شکل ۲. نمایی از حسگر مغناطیس سنج از نوع ممز به شماره MLX90393.

۴ آرایش اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی

تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی را می‌توان با استفاده از حسگرهای برداری میدان مغناطیسی با آرایش‌های متفاوت به دست آورد. یکی از بهترین این آرایش‌ها، آرایش متقاطع (Cross Measurement System) است که در شکل ۳ نشان داده شده است (شو و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۳. موقعیت قرارگیری حسگر نسبت به محورهای مختصات و جهت مؤلفه‌های حسگرهای مغناطیسی نسبت به محورهای مختصات در آرایش متقاطع.

۳ حسگر استفاده‌شده در این مطالعه

سابقه استفاده از حسگرهای ممز به سال ۱۹۷۰ بازمی‌گردد که یک حسگر فشار در اندازه میکرومتر به منظور اندازه‌گیری فشارخون ابداع و معرفی شد (پترسن، ۱۹۸۲). حسگر میکروالکترومکانیکی یا ممز، حاصل تلفیق اجزای مکانیکی، حس‌کننده‌ها، محرک‌ها و قطعات الکترونیکی روی یک لایه سیلیکون به کمک فناوری ساخت تراشه‌های میکرونی است (چن و وایس، ۱۹۹۷). ارزان بودن این حسگرها یکی از مهم‌ترین پارامترها در ساخت و تهیه دستگاه‌های صنعتی است. به سبب استفاده از حسگرهای گران‌قیمت در مغناطیس‌سنج‌های کنونی که برای اکتشاف بی‌هنجاری‌ها استفاده می‌شوند، هزینه تولید و تهیه آنها زیاد است. به دلیل اهمیت فراوان مغناطیس‌سنجی در زمینه اکتشاف بی‌هنجاری‌های فلزی، استفاده از حسگرهای ممز در این دستگاه‌ها بهترین شیوه برای کاهش چشمگیر هزینه‌ها است. مطالعات نشان می‌دهد می‌توان از این فناوری که در حوزه ژئوفیزیک جدید کاربرد دارد، برای آشکارسازی بی‌هنجاری‌های فلزی زیرسطحی نیز استفاده کرد (لیو و همکاران، ۲۰۲۲).

حسگر استفاده‌شده در این تحقیق یک مغناطیس‌سنج ممز به شماره MLX90393 با حساسیت ۱۶۰ نانوتسلا است. پر واضح است که یک ذخیره اقتصادی از ۲۰۰ نانوتسلا تا چند هزار نانوتسلا تغییر در میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌کند (گان و دنتیث، ۱۹۹۷)؛ بنابراین این میزان از حساسیت را برای اکتشاف ذخایر اقتصادی می‌توان پذیرفت. در شکل ۲ نمونه‌ای از این حسگر نمایش داده شده است.

به دو دلیل از این شماره از حسگر ممز در این مطالعه استفاده شده است: (۱) داشتن بیشترین میزان حساسیت در بین مغناطیس‌سنج‌های ممز؛ (۲) موجود بودن در بازار کشورمان ایران.

با توجه به روابط (۳) و (۴) ماتریس گرادیان کامل میدان مغناطیسی برابر است با (شو و همکاران، ۲۰۲۱):

$$G = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{xz} & B_{yz} & -B_{xx} - B_{yy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

به این ترتیب برای آرایش نشان داده شده در شکل ۳ می توان مقدار گرادیان را با رابطه زیر بیان کرد (شو و همکاران، ۲۰۲۱):

$$G = \frac{1}{d} [A \quad B \quad C] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & B_{1x} - B_{3x} \quad B_{1y} - B_{3y} \\ A = & B_{1y} - B_{3y}, B = B_{2y} - B_{4y} \\ & B_{1z} - B_{3z} \quad B_{2z} - B_{4z} \\ C = & B_{1z} - B_{3z} \\ & B_{2z} - B_{4z} \\ & B_{3x} + B_{4y} - B_{1x} - B_{2y} \end{aligned}$$

پتانسیل مغناطیسی یک تابع هموار است؛ با وجود این، با در نظر گرفتن اینکه برداشت گرادیان در نقاط مجزا انجام می گیرد و نوفه نیز در این برداشت ها وجود دارد، وجود نقشه های تمام مؤلفه ها می تواند حاوی اطلاعات بیشتری باشد؛ بنابراین در مطالعات عملی از نقشه تمام این مؤلفه ها استفاده می شود (چوالا و همکاران، ۲۰۱۲).

۵ راه های دسترسی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، روستای جعفرخان در منتهی الیه جنوب غربی نقشه زمین شناسی چاپان با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ قرار گرفته است. این محدوده در مجاورت روستای جعفرخان واقع در دهستان تیلکوه بین شهرستان سقز و دیواندره استان کردستان قرار دارد. مسیر دسترسی به محدوده مورد نظر از روستای باشماق است که در شمال آن قرار گرفته است. جاده دسترسی تا روستای باشماق آسفالت است. فاصله روستای باشماق تا سقز حدود ۶۵ کیلومتر است و جاده دسترسی به روستای جعفرخان از روستای باشماق به طول حدود ۱۲ کیلومتر، جاده کوهستانی خاکی است. در

در این آرایش از چهار حسگر برداری ممز استفاده شده است. مرکز این آرایش که با O نشان داده شده است، مبدأ مختصات است. حسگرهای ممز به ترتیب از یک تا چهار شماره گذاری شده اند. همان طور که مشاهده می شود، حسگر یک و حسگر سه در امتداد محور X و حسگر دو و حسگر چهار در امتداد محور Y قرار گرفته اند. میدان مغناطیسی در سه جهت عمود بر هم با چهار حسگر ممز اندازه گیری می شود. این مقادیر را می توان به صورت زیر نوشت (شو و همکاران، ۲۰۲۱):

$$B_1 = \begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \\ B_{1z} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} B_{2x} \\ B_{2y} \\ B_{2z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} B_{3x} \\ B_{3y} \\ B_{3z} \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} B_{4x} \\ B_{4y} \\ B_{4z} \end{bmatrix}$$

در رابطه (۲) درایه های ماتریس ها به صورت کلی در رابطه B_{ij} ($i=1,2,3,4; j=x,y,z$) اندیس i مربوط به شماره حسگر و اندیس j مربوط به جهت برداری حسگر i است. به این ترتیب می توان ماتریس گرادیان کامل را برای نقطه O از رابطه زیر محاسبه کرد (شو و همکاران، ۲۰۲۱):

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

بر اساس معادلات ماکسول می توان نشان داد (شو و همکاران، ۲۰۲۱):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial B_x}{\partial y} &= \frac{\partial B_y}{\partial x} \\ \frac{\partial B_x}{\partial z} &= \frac{\partial B_z}{\partial x} \\ \frac{\partial B_y}{\partial z} &= \frac{\partial B_z}{\partial y} \end{aligned} \right. \quad (4)$$



شکل ۴. راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه.

زاویه‌دار، نهشته‌های کهن‌تر از خود را می‌پوشانند و به همان صورت نیز در زیر رسوب‌های تشریری واقع شده‌اند. کانی‌شناسی ماده معدنی ساده و مگنتیت کانه اصلی این کانسار است. کانسنگ در بعضی نقاط به دلیل سختی و مقاومت در مقابل فرسایش در سطح رخنمون دارد. در قسمت‌های سطحی که کانسنگ بیرون‌زدگی دارد، هوازده شده و به لیمونیت زردرنگ تبدیل شده است. از کانی‌هایی که در این کانسار با مگنتیت یافت می‌شوند می‌توان به کالکوپیریت، آزوریت، مالاکیت، کلسیت و گوتیت اشاره کرد (قربانی، ۲۰۱۳).

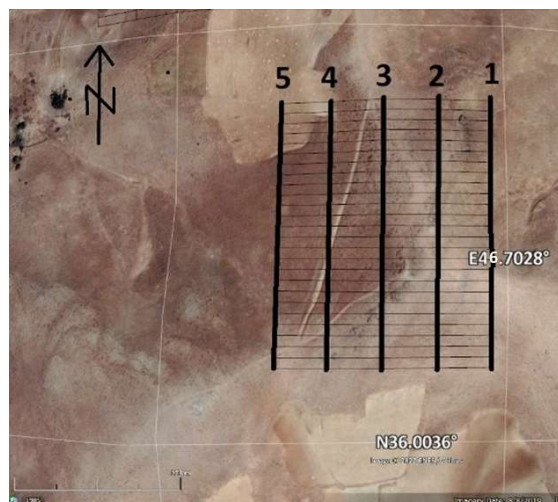
۶ طراحی مقطع‌های برداشت

در محدوده مورد مطالعه تعداد پنج مقطع برداشت با طول ۲۵۰ متر با جهت شمالی - جنوبی طراحی شده است. در این مطالعه مقطع‌ها از شرق به غرب شماره‌گذاری شده‌اند (شکل ۵). طول کل مقطع‌های پیشنهادی ۱۲۵۰ متر است. آزیموت مقطع‌های برداشت حدود صفر درجه (در جهت شمال) است. فاصله بین این مقطع‌ها ۵۰ متر پیشنهاد شده است. این فاصله در مرحله اولیه اکتشاف مناسب به نظر می‌رسد. پر واضح است با تعیین نقاط امیدبخش، در

شکل ۴ موقعیت جغرافیایی روستای جعفرخان نسبت به شهر دیواندره و سقز نشان داده شده است. از نظر ساختاری، محدوده اکتشافی بخشی از منطقه سنندج - سیرجان است. کانی‌سازی آهن در مناطق دیواندره، قروه و همدان بیشتر از نوع آتشفشانی - رسوبی یا اسکارنی است. ماده معدنی اصلی در این نوع از کانسارها، مگنتیت و هماتیت است. کانسار آهن محدوده اکتشافی، به همراه کانی‌های مگنتیت و مقادیر کمتری هماتیت و گوتیت به صورت پراکنده و عدسی‌شکل در سنگ میزبان (میکاشیست و مرمر) این منطقه رخنمون دارد. رخنمون‌های کنگلومرا با افق‌های ماسه‌ای و کمی مارن سیلتی با جورشدگی بد، گردشگری نه‌چندان خوب و تراکم ضعیف همراه با سیلتستون و مارن برونزد دارند و به صورت ناپیوستگی زاویه‌دار روی نهشته‌های کهن‌تر از خود جای گرفته‌اند. در این منطقه سنگ‌های دگرگونی تفکیک‌نشده از گونه شیست، فیلیت، میکاشیست، کوارتزیت، آمفیبولیت، گنیس، سنگ‌های آتشفشانی اسیدی، دولومیت و سنگ‌آهک‌های کریستالیزه و غیره برونزد دارند. سن این نهشته‌ها پرکامبرین - مزوزوئیک است. سنگ‌آهک اوریتولین‌دار و سنگ‌آهک‌های دولومیتی لایه‌ای تا توده‌ای با ناپیوستگی



شکل ۶. اپراتور برداشت به شیوه تانسور کامل گرادبان مغناطیسی با استفاده از چهار حسگر با آرایش متقاطع.



شکل ۵. مسیرهای پیشنهادی مقطع‌های ۱ تا ۵ برای برداشت.

مقطع‌های برداشت در انتها به ابتدای مقطع کناری متصل شده‌اند. البته این امکان نیز فراهم است که اگر اپراتور تمایل داشته باشد، حسگرها را خاموش و دوباره از ابتدای مقطع بعدی شروع کند. طول هر یک از مقطع‌های برداشت شده با حسگر و زمان برداشت هر مقطع در جدول ۲ خلاصه شده است. زمان برداشت هر مقطع با توجه به داده‌های GPS تعیین شده است. با توجه به طول برداشت شده هر مقطع و تعداد نمونه‌های برداشت شده در امتداد مقطع مربوطه می‌توان فاصله بین نمونه‌ها را نیز تعیین کرد.

همان‌طور که در جدول ۲ ذکر شده است، طول زمان برداشت داده‌ها برای پنج مقطع حدود ۳۵ دقیقه، طول مقطع‌ها ۱۳۸۵ متر و تعداد نمونه‌های برداشت شده ۷۷۵۶۱ عدد است. فاصله بین نمونه‌ها در امتداد مقطع‌ها بین ۱/۵ تا ۲ سانتیمتر است. گفتنی است این فاصله اندک نمونه‌برداری به لطف نرخ بالای نمونه‌برداری حسگر مقدور شده است به گونه‌ای که در امتداد مقطع، اندازه‌گیری‌ها به نوعی پیوسته هستند.

مرحله بعدی اکتشاف به منظور مدل‌سازی ذخیره معدنی و به‌دست آوردن ذخیره ژئوفیزیکی با خطای پذیرفتنی، باید فاصله بین مقطع‌ها را کمتر در نظر گرفت. محدوده برداشت توپوگرافی شدیدی ندارد و تغییرات ارتفاعی از ابتدا تا انتهای مقطع اندک است.

شکل ۶ اپراتوری را حین برداشت به روش گرایان کامل تانسور مغناطیسی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، آرایش حسگرها متقاطع است. در این آرایش فاصله بین حسگرهای چپ و راست یا بالا و پایین از یکدیگر حدود یک متر انتخاب شده است.

در طول برداشت، حسگر شماره یک به سمت شمال، حسگر شماره دو در سمت جنوب، حسگر شماره چهار بالاتر از بقیه و حسگر شماره سه پایین‌تر از بقیه نگه داشته شدند. از آنجایی که نرخ نمونه‌برداری حسگر زیاد است (حدود ۱۰ نمونه در هر ثانیه) اپراتور به راحتی می‌تواند در امتداد مقطع حرکت کند بدون اینکه برای نمونه‌برداری توقف کند. پر واضح است که حین جابه‌جا شدن بین مقطع‌ها به خاموش کردن حسگرها نیاز نیست؛ به همین دلیل

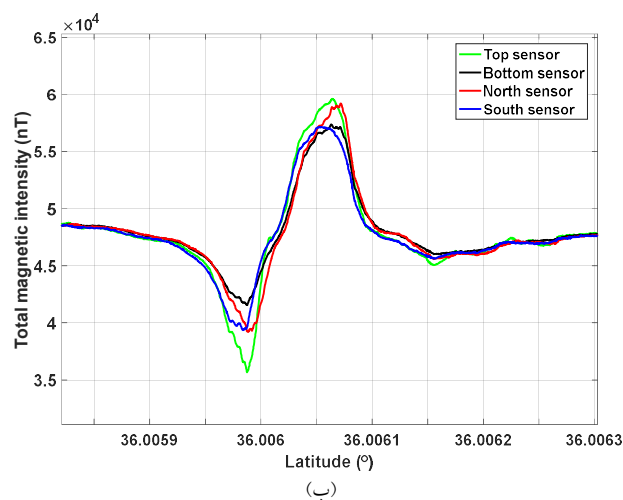
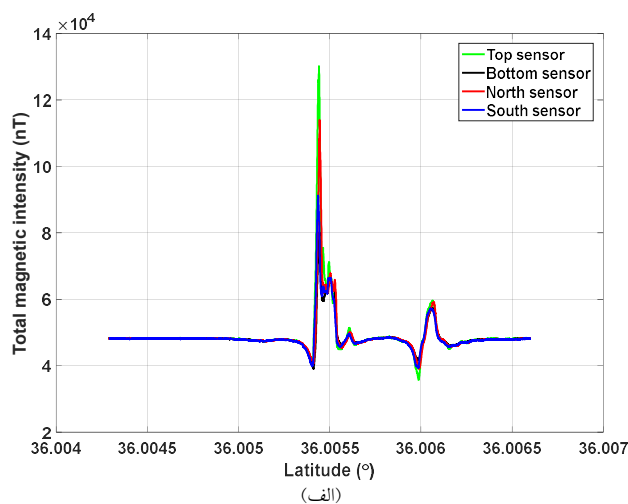
جدول ۲. اطلاعات مربوط به برداشت داده‌ها در امتداد مقطع‌ها.

شماره مقطع	زمان ثبت شده در ابتدای مقطع برداشت (به وقت گرینویچ)	زمان ثبت شده در انتهای مقطع برداشت (به وقت گرینویچ)	طول زمان برداشت داده در امتداد مقطع‌ها	تعداد نمونه‌های برداشت شده (عدد)	فاصله نمونه‌های برداشت شده از هم (سانتیمتر)	طول مقطع برداشت (متر)	مختصات ابتدای مقطع	مختصات انتهای مقطع
۱	۰۷:۰۵:۰۵	۰۷:۱۲:۲۲	۰۰:۰۷:۱۷	۱۶۳۰۱	۱/۵	۲۴۰	۳۶/۰۰۶۳۸N	۳۶/۰۰۴۲۶N
							۴۶/۷۰۲۶۰E	۴۶/۷۰۲۶۰E
۲	۰۷:۱۴:۰۶	۰۷:۱۹:۳۲	۰۰:۰۵:۲۶	۱۲۱۴۷	۲	۲۵۷	۳۶/۰۰۶۵۷N	۳۶/۰۰۴۲۹N
							۴۶/۷۰۲۰۵E	۴۶/۷۰۲۰۵E
۳	۰۷:۳۵:۰۶	۰۷:۴۴:۵۶	۰۰:۰۹:۳۰	۲۲۰۰۰	۱/۳	۳۰۲	۳۶/۰۰۴۰۱N	۳۶/۰۰۶۷۲N
							۴۶/۷۰۱۴۷E	۴۶/۷۰۱۵۴E
۴	۰۷:۴۵:۴۹	۰۷:۵۱:۳۸	۰۰:۰۶:۱۱	۱۳۰۰۱	۲/۲	۲۹۴	۳۶/۰۰۶۶۷N	۳۶/۰۰۴۰۴N
							۴۶/۷۰۰۸۹E	۴۶/۷۰۰۹۲E
۵	۰۷:۵۲:۳۵	۰۷:۵۸:۵۴	۰۰:۰۶:۱۹	۱۴۱۱۲	۲	۲۹۲	۳۶/۰۰۴۱۹N	۳۶/۰۰۶۷۸N
							۴۶/۷۰۰۳۸E	۴۶/۷۰۰۲۷E
جمع	-	-	۰۰:۳۴:۴۳	۷۷۵۶۱	-	۱۳۸۵	-	-

۷ پردازش داده‌ها

به‌طور کلی یک پروژه ژئوفیزیکی شامل سه مرحله برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های برداشت شده است. پردازش که مرحله دوم اجرای یک پروژه ژئوفیزیکی است، یکی از مراحل بسیار مهم است و باید با دقت بسیار زیاد انجام شود؛ زیرا هرگونه اشتباه در این مرحله می‌تواند مفسر را به اشتباه بیندازد و خسارات جبران‌ناپذیری را به‌وجود آورد. بعد از برداشت داده‌ها یک سری پردازش‌های اولیه برای داده‌های خام انجام می‌شود. سپس داده‌ها آماده وارد کردن به نرم‌افزار اوسیس مونتاژ می‌شوند. در شکل ۷- الف شدت کل میدان مغناطیسی به‌دست آمده با استفاده از چهار حسگر در امتداد مقطع شماره ۲ نشان داده شده است. در این مقطع یک لایه مگنتیت با عیار زیاد که رخنمون داشته است در سمت چپ و یک لایه کوچک‌تر در سمت راست مشاهده می‌شود. برای مقایسه بهتر خروجی حسگرها تغییرات شدت میدان روی بی‌هنجاری کوچک‌تر در شکل ۷- ب نشان داده شده است. پر واضح است

هرچقدر حسگر به بی‌هنجاری زیرسطحی نزدیک‌تر باشد، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد و برعکس؛ از این‌رو، همان‌طور که انتظار می‌رفت، حسگر پایین مقادیر بیشتر، حسگر بالا مقادیر کمتر و حسگرهای شمالی و جنوبی مقادیری مابین را نشان می‌دهند. این قاعده درباره حسگر بالا و پایین در تمام طول مقطع برقرار است، اما باید توجه داشت برای حسگرهای جنوبی و شمالی به دلیل شیب‌دار بودن سطح زمین و ناتوانی اپراتور در نگاه داشتن این دو حسگر در یک تراز، قانون فوق برای تمام طول مقطع برقرار نیست. این موضوع مشکلی در پاسخ‌های نهایی به وجود نخواهد آورد؛ چون برداشت‌های تانسور کامل گرادیان مغناطیسی مستقل از چرخش حسگرها هستند (اشمیت و کلارک، ۲۰۰۶). گفتنی است در صورتی که چشمه نوفه به اندازه کافی از حسگرها فاصله نداشته باشد، تأثیر آن را بر چهار حسگر نمی‌توان یکسان فرض کرد؛ بنابراین چرخش حسگرها سبب می‌شود تانسور کامل گرادیان از جهت چرخش حسگرها متأثر شود.



شکل ۷. مقایسه مقادیر شدت کل میدان مغناطیسی اندازه‌گیری‌شده با حسگرهای ممز (الف) روی کل مقطع شماره ۲ (ب) قسمتی از سمت راست مقطع شماره

۲.

مغناطیسی را با توجه به رابطه (۶) محاسبه کرد:

(۷)

$$\begin{bmatrix} B_{1x1} & B_{1y1} & B_{1z1} & \dots & B_{4x1} & B_{4y1} & B_{4z1} \\ B_{1x2} & B_{1y2} & B_{1z2} & \dots & B_{4x2} & B_{4y2} & B_{4z2} \\ B_{1x3} & B_{1y3} & B_{1z3} & \dots & B_{4x3} & B_{4y3} & B_{4z3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{1xn} & B_{1yn} & B_{1zn} & \dots & B_{4xn} & B_{4yn} & B_{4zn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{1xm} & B_{1ym} & B_{1zm} & \dots & B_{4xm} & B_{4ym} & B_{4zm} \end{bmatrix}$$

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، هریک از درایه‌های مستقل ماتریس کامل گرادیان مغناطیسی با مشتقات سویی یکی از حسگرها مقایسه شده است. در اینجا مشتقات سویی

مؤلفه X حسگرهای ممز در جهت قائم به سمت پایین، مؤلفه Y حسگر در جهت شمال (سمت راست) و مؤلفه Z حسگر در جهت شرق (عمود بر صفحه به سمت بیرون) قرار گرفته است. مقادیر اندازه‌گیری‌شده در امتداد مؤلفه‌های X، Y و Z با چهار حسگر در یک ماتریس ذخیره می‌شوند. این ماتریس در رابطه (۷) نشان داده شده است. اندیس هر درایه از این ماتریس به ترتیب نشان‌دهنده شماره حسگر، جهت بردار اندازه‌گیری و شماره نمونه برداشت‌شده است. برای نمونه n ام اندازه‌گیری‌شده با حسگرها، سطر n ام از ماتریس رابطه (۷)، می‌توان ماتریس تانسور کامل گرادیان

حسگر شماره سه انتخاب شده است.

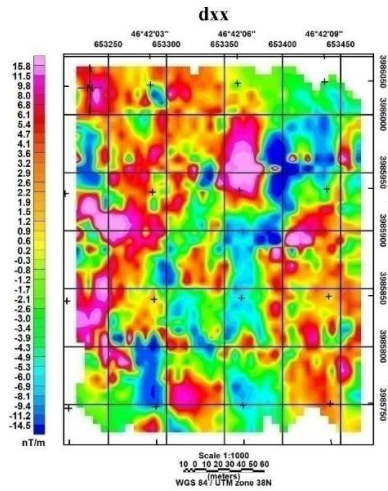
در شکل ۸ درایه‌های مستقل از ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی (حرف G) با مشتقات سوئی حسگر شماره سه (حرف d) مقایسه شده‌اند. مشتق اول سوئی در سه جهت عمود بر هم X، Y و Z را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

مشتق دوم سوئی در یک جهت از رابطه زیر به دست می‌آید:

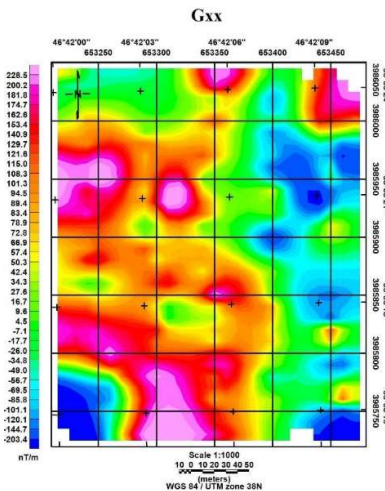
$$\begin{cases} d_{xx} = \frac{B_{x_{-1}} - 2 * B_{x_0} + B_{x_1}}{(\Delta x)^2} \\ d_{yy} = \frac{B_{y_{-1}} - 2 * B_{y_0} + B_{y_1}}{(\Delta y)^2} \\ d_{zz} = \frac{B_{z_{-1}} - 2 * B_{z_0} + B_{z_1}}{(\Delta z)^2} \end{cases} \quad (۹)$$

$$\begin{cases} d_x = \frac{B_{x_1} - B_{x_{-1}}}{\Delta x} \\ d_y = \frac{B_{y_1} - B_{y_{-1}}}{\Delta y} \\ d_z = \frac{B_{z_1} - B_{z_{-1}}}{\Delta z} \end{cases} \quad (۸)$$

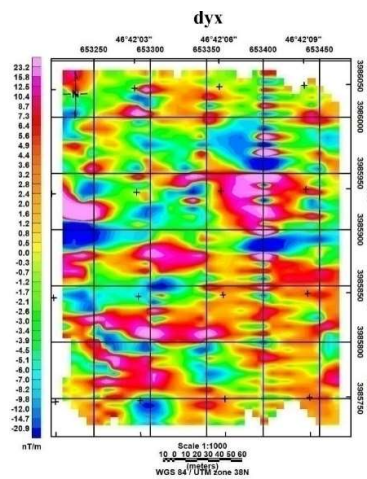
روشن است برای به دست آوردن مشتق توان دوم در دو جهت متفاوت مثلاً d_{xy} ابتدا با استفاده از رابطه (۸) در جهت X مشتق گرفته می‌شود سپس دوباره با استفاده از رابطه (۸) از نتایج در جهت Y مشتق گرفته می‌شود.



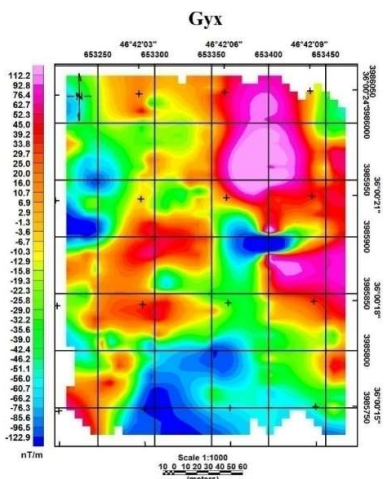
(ب)



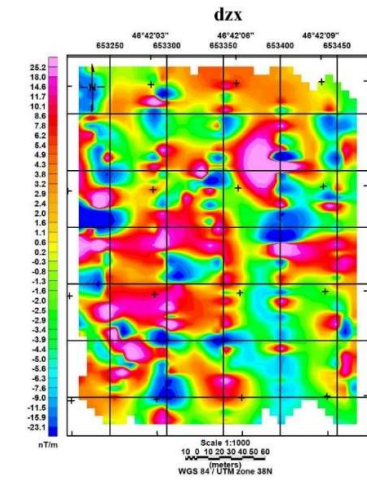
(ف)



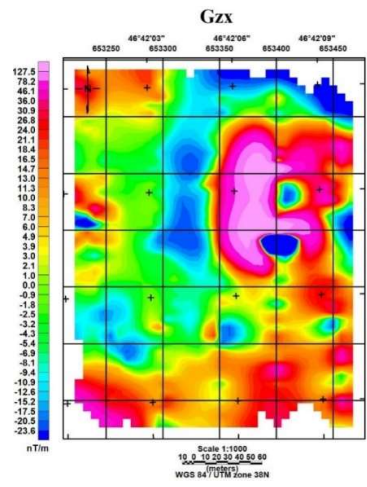
(د)



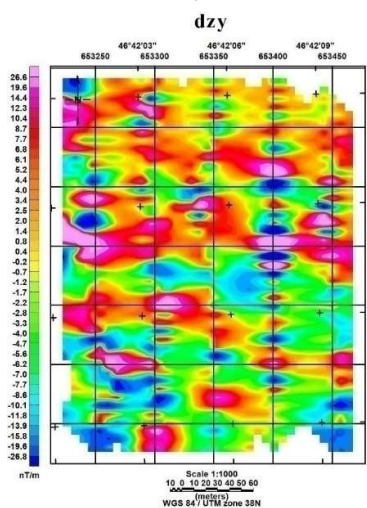
(ج)



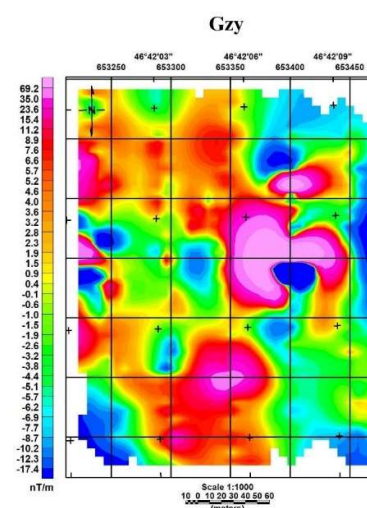
(و)



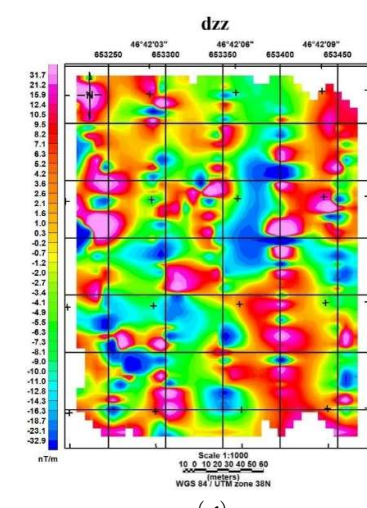
(د)



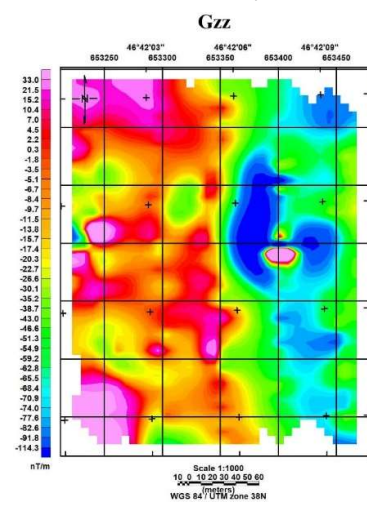
(ز)



(ج)



(ی)

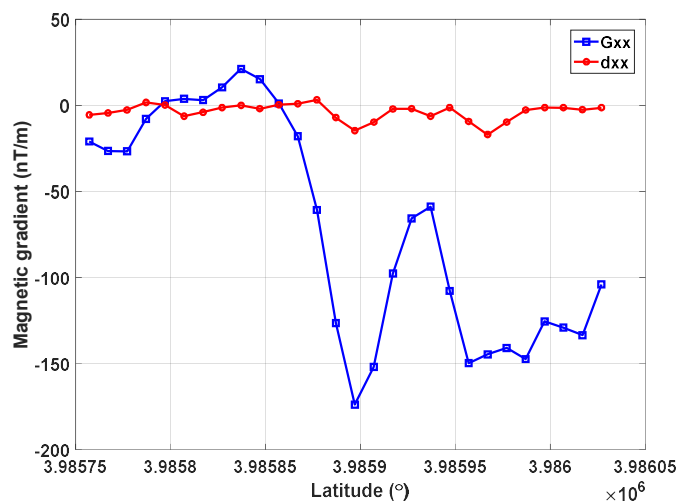


(ط)

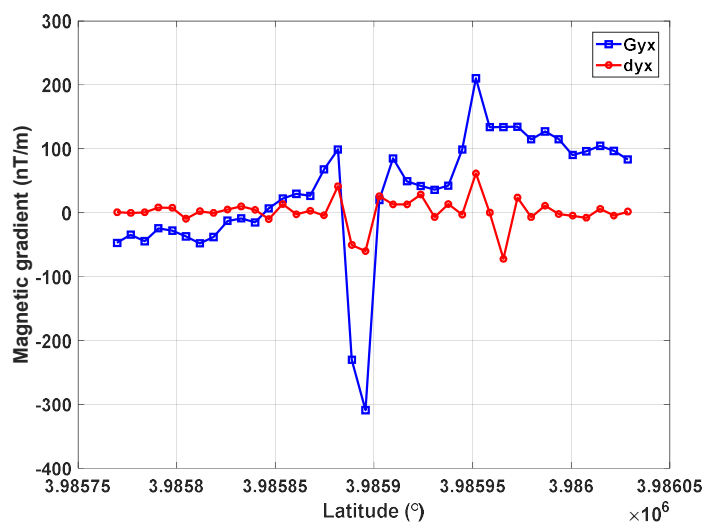
شکل ۸ مقایسه درایه‌های مستقل ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی (الف) تفاوت مؤلفه‌های x در جهت X تقسیم بر فاصله حسگرها (G_{xx}) (ب) مشتق در جهت x برای داده‌های مؤلفه x حسگر شماره ۳ (ج) تفاوت مؤلفه‌های y در جهت X تقسیم بر فاصله حسگرها (G_{yx}) (د) مشتق در جهت Y برای داده‌های مؤلفه x حسگر شماره ۳ (ه) تفاوت مؤلفه‌های z در جهت X تقسیم بر فاصله حسگرها (G_{zx}) (و) مشتق در جهت Z برای داده‌های مؤلفه x حسگر شماره ۳ (ز) تفاوت مؤلفه‌های z در جهت Y تقسیم بر فاصله حسگرها (G_{zy}) (ح) مشتق در جهت Z برای داده‌های مؤلفه y حسگر شماره ۳ (ط) تفاوت مؤلفه‌های z در جهت Z تقسیم بر فاصله حسگرها (G_{zz}) (ی) مشتق در جهت Z برای داده‌های مؤلفه z حسگر شماره ۳.

برای مقایسه دقیق‌تر داده‌های به‌دست‌آمده در نقشه‌های و نمایش داده شده در شکل ۸، مقطع‌هایی در جهت شمال و جنوب در طول جغرافیایی ۶۵۳۴۰۰ انتخاب

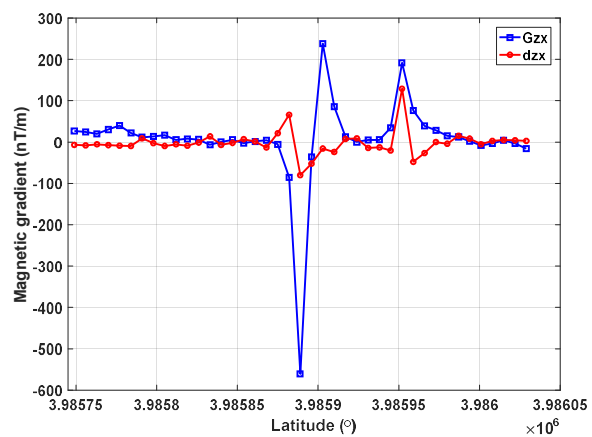
و مقادیر گرادیان در امتداد آنها با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۹).



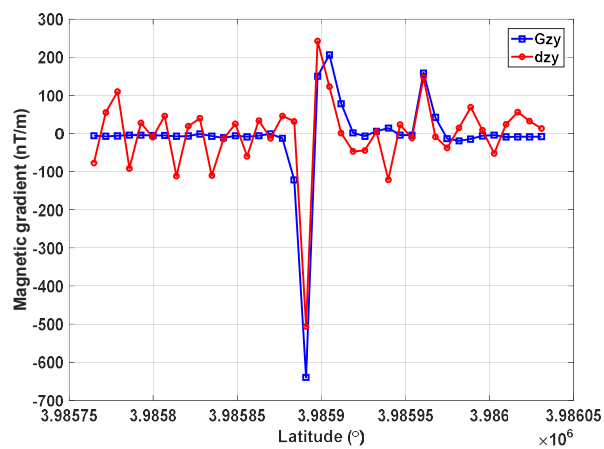
(الف)



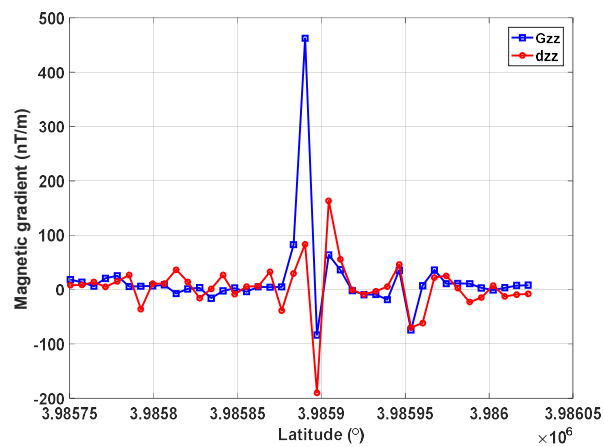
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۹. داده‌های گرادیان حاصل از تانسور کامل و مشتق‌گیری سویی در امتداد مقطع شمالی-جنوبی واقع در طول جغرافیایی ۶۵۳۴۰۰ شرقی (الف) مقایسه دو سری داده G_{xx} و d_{xx} (ب) مقایسه دو سری داده G_{yx} و dyx (ج) مقایسه دو سری داده G_{zx} و dzx (د) مقایسه دو سری داده G_{zy} و dzy (ه) مقایسه دو سری داده G_{zz} و dzz .

محاسبه شده حاصل از یکی از حسگرها مقایسه شد. این مقایسه نشان می‌دهد نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های حاصل از تانسور کامل گرادیان مغناطیسی نسبت به مشتقات سویی بیشتر است؛ برای مثال نسبت سیگنال به نوفه برای درایه‌های G_{xx} ، G_{yx} ، G_{zx} ، G_{zy} و G_{zz} از ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی به ترتیب برابر $۱۰/۰۲$ ، $۱۷/۳$ ، $۸۷/۲$ و $۱۳/۲۲$ نانوتسلا بر متر و برای مشتق‌های سویی dxx ، dyx ، dzx ، dzy و dzz به ترتیب برابر $۲/۶$ ، $۵/۲۳$ ، $۶/۲۵$ ، $۳/۷$ و $۴/۸۶$ است. بزرگ‌تر بودن نسبت سیگنال به نوفه برای درایه‌های ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی نسبت به مشتق سویی متناظر آنها بیانگر آن است که تانسور کامل موجب آشکارسازی بهتر بی‌هنجاری‌ها می‌شود. افزایش نسبت سیگنال به نوفه برای درایه G_{zy} نسبت به dzy از همه بیشتر و برابر $۸۳/۸۳$ است. این افزایش نسبت سیگنال به نوفه در شکل ۹-د کاملاً آشکار شده است. در نمونه‌ای دیگر از درایه‌های ماتریس تانسور کامل گردیان نیز افزایش نسبت سیگنال به نوفه اتفاق افتاده است. به این ترتیب مقدار سیگنال به نوفه درایه‌های G_{yx} ، G_{zx} و G_{zz} در مقایسه با نسبت سیگنال به نوفه dyx ، dzx و dzz به ترتیب $۴/۷۹$ ، $۱۰/۸۰$ و $۸/۴۶$ است. مقدار سیگنال به نوفه درایه G_{xx} با مقدار سیگنال به نوفه dxx برابر است. دلیل این برابری می‌تواند به حساسیت نسبی کم حسگرهای ممز یا کالیبراسیون نامناسب حسگرها مربوط باشد.

۹ نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان مغناطیسی، چهار حسگر از نوع میکروالکترومکانیکی معروف به ممز با آرایش متقاطع با فاصله یک متر از یکدیگر راه‌اندازی شد. سپس برداشت‌هایی در امتداد پنج مقطع در جهت شمال-جنوب روی یک ذخیره مگنتیت

در جدول ۳ بازه تغییرات بزرگای گرادیان به دست آمده از روش تانسور کامل و گرادیان حاصل از مشتق‌گیری روی زمینه و بی‌هنجاری با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس این جدول به جز dxx و G_{xx} که نسبت سیگنال به نوفه آنها با هم برابر است، در بقیه موارد نسبت سیگنال به نوفه برای روش تانسور کامل گرادیان مغناطیسی بیشتر از روش مشتق‌گیری ریاضی است. برابر بودن نسبت سیگنال به نوفه برای dxx و G_{xx} می‌تواند به زیاد حساس نبودن حسگر یا نبود کالیبراسیون دقیق حسگرها مربوط باشد.

۸ بحث

جهت به دست آوردن تانسور کامل گرادیان مغناطیسی می‌توان از مشتق‌گیری سویی استفاده کرد، اما روش دقیق‌تر آن است که از چهار حسگر به صورت هم‌زمان استفاده شود. به این ترتیب می‌توان ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی را به دست آورد. تاکنون حسگرهای اسکوتیدی بیشترین استفاده را در به دست آوردن تانسور کامل گرادیان مغناطیسی داشته‌اند، اما این حسگرها بسیار گران‌قیمت هستند و امکان به کارگیری آنها محدود به بازه دمایی خاصی است. در این مطالعه از نوعی از حسگرهای ممز استفاده شده است. این حسگرها نسبت به مغناطیس‌سنج‌های اسکوتید حساسیت کمی دارند، اما با توجه به در دسترس بودن، ارزان بودن و سبک بودن گزینه مناسبی برای برداشت‌هایی از نوع گرادیان تانسور کامل مغناطیسی هستند؛ از این رو در این مطالعه چهار حسگر ممز با آرایش متقاطع راه‌اندازی شد. برای برطرف کردن مشکل حساسیت کم این حسگرها نسبت به حسگرهای اسکوتید، فاصله بین حسگرها یک متر انتخاب شد تا مقدار گرادیان اندازه بزرگ‌تری داشته باشد. سپس روی یک ذخیره فلزی برداشت‌هایی انجام و ماتریس گرادیان تانسور کامل مغناطیسی تعیین شد. این مقادیر با مشتقات سویی

به ترتیب به اندازه صفر، ۴/۷۹، ۱۰/۸۰، ۸۳/۸۳ و ۸/۴۶ افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد محاسبه گرادیان میدان با استفاده از روش تانسور کامل نسبت به روش معمول مشتق‌گیری ریاضی مزایای ویژه‌ای دارد. البته باید توجه داشت در برخی نقاط، روش گرادیان موفقیت‌آمیز نبوده است. این موضوع می‌تواند به زیاد حساس نبودن یا کالیبراسیون با دقت کم حسگرهای ممز بازگردد.

کوچک در مجاورت روستای جعفرخان شهرستان سقز واقع در استان کردستان انجام و درایه‌های ماتریس تانسور کامل گرادیان مغناطیسی با مشتقات سویی حاصل از یکی از چهار حسگر مقایسه شد. این مقایسه‌ها نشان داد درایه‌های تانسور کامل گرادیان مغناطیسی نسبت سیگنال به نوفه بیشتری دارند. این نسبت در درایه‌های Gyx ، Gxx ، Gzy ، Gzx و Gzz نسبت به مشتق‌های سویی متناظرشان

جدول ۳. مقایسه بازه تغییرات و مقدار گرادیان محاسبه‌شده از دو روش مشتق‌گیری ریاضی و تانسور کامل در برخی مختصات بر اساس شکل ۹

اختلاف بزرگای سیگنال به نوفه در دو روش (روش تانسور کامل و روش مشتق‌گیری ریاضی)	نسبت سیگنال به نوفه	دامنه تغییرات گرادیان روی بی‌همجاری (پیشینه-کمینه)		بزرگی گرادیان روی بی‌همجاری		دامنه تغییرات گرادیان در طول زمین (پیشینه-کمینه)		بزرگی گرادیان در طول زمین	روشنی و جهت به‌دست‌آوردن گرادیان
		کمینه	پیشینه	کمینه	پیشینه	کمینه	پیشینه		
		از مختصات ۳۹۸۵۹۲۵- تا ۳۹۸۵۸۵۰		از مختصات ۳۹۸۵۷۵۰- تا ۳۹۸۵۸۵۰					
		۱۷/۹	۲/۲۶	۷/۹	۱/۷	۱۷/۹	۲/۲۶		
		۱۰/۸/۲	۲/۲۶	۴۷/۹	۲۱/۲	۱۰/۸/۲	۲/۲۶		
۴/۷۹		۱۰/۱/۴	۵/۲۳	۱۹/۴	-۹/۷	۱۰/۱/۴	۵/۲۳		
		۴۰/۷/۹	۱۰/۰/۲	۴۰/۷	۶/۷	۴۰/۷/۹	۱۰/۰/۲		
		۱۶۴/۳	۶/۲۵	۲۳/۴	۱۳/۸	۱۶۴/۳	۶/۲۵		
۱۰/۸۰		۷۹۸/۳	۱۷/۱۳	۴۶/۶	۴۰/۱	۷۹۸/۳	۱۷/۱۳		
		۷۴۸/۶	۳/۳۷	۲۲	۱۱۰/۳	۷۴۸/۶	۳/۳۷		
۸۳/۸۳		۸۴۵/۹	۸۷/۲	۹/۷	-۱/۳	۸۴۵/۹	۸۷/۲		
		۳۵۳/۱	۴/۸۶	۷۲/۶	۳۶/۵	۳۵۳/۱	۴/۸۶		
۸/۴۶		۵۴۶/۲	۱۳/۳۲	۴۱	۲۵/۴	۵۴۶/۲	۱۳/۳۲		

- <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.06.005>.
- Luo, Y., Wu, M. P., Wang, P., Duan, S. L., Liu, H. J., Wang, J. L., and An, Z. F., 2015, Full magnetic gradient tensor from triaxial aeromagnetic gradient measurements: Calculation and application: *Applied Geophysics*, **12**(3), 283–291, <https://doi.org/10.1007/s11770-015-0508-y>.
- Nelson, B., Stolz, R., Schulz, M., Chwala, A., Rothenbach, M., and Meyer, H. G., 2003, The German airborne SQUID tensor magnetic gradiometer: 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.168.arq_1104.
- Pedersen, L. B., and Rasmussen, T. M., 1990, The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps: *Geophysics*, **55**(12), 1558–1566, <https://doi.org/10.1190/1.1442807>.
- Petersen, K. E., 1982, Silicon as a mechanical material: *Proceedings of the IEEE*, **70**(5), 420–457, <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12331>.
- Queitsch, M., Schiffler, M., Stolz, R., Rolf, C., Meyer, M., and Kukowski, N., 2019, Investigation of 3D magnetisation of a dolerite intrusion using airborne full tensor magnetic gradiometry (FTMG) data: *Geophysical Journal International*, **217**(3), 1643–1655, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz104>.
- Rudd, J., Chubak, G., Larnier, H., et al., 2022, Commercial operation of a SQUID-based airborne magnetic gradiometer: *The Leading Edge*, **41**(7), 486–492, <https://doi.org/10.1190/tle41070486.1>.
- Schmidt, P. W., and Clark, D. A., 2000, Advantages of measuring the magnetic gradient tensor: *Preview*, **85**, 26–30.
- Schmidt, P. W., and Clark, D. A., 2006, The magnetic gradient tensor: Its properties and uses in source characterization: *The Leading Edge*, **25**(1), 75–78, <https://doi.org/10.1190/1.2164759>.
- Schmidt, P. W., Clark, D., Leslie, K., Bick, M., Tilbrook, D., and Foley, C., 2004, GETMAG – a SQUID magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration: *Exploration Geophysics*, **35**(4), 297–305, <https://doi.org/10.1071/EG04297>.
- Schneider, M., Stolz, R., Linzen, S., Schiffler, M., Chwala, A., Schulz, M., Dunkel, S., and Meyer, H. G., 2013, Inversion of geo-magnetic full-tensor gradiometer data: *Journal of Applied Geophysics*, **92**, 57–67, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.12.005>.
- ملکی، پ.، شاهسونی، ه.، ۱۳۹۶، معرفی سنسور میمز در مگنتومتري: اولین همایش بین‌المللی پژوهش و پیشرفت در علوم زمین.
- Chen, J., and Wise, K. D., 1997, A high-resolution silicon monolithic nozzle array for inkjet printing: *IEEE Transactions on Electron Devices*, **44**(9), 1401–1409, <https://doi.org/10.1109/16.622594>.
- Chwala, A., Stolz, R., Zakosarenko, V., et al., 2012, Full tensor SQUID gradiometer for airborne exploration: *ASEG Extended Abstracts*, **2012**(1), 1–4, <https://doi.org/10.1071/ASEG2012ab296>.
- Dentith, M., and Mudge, S., 2013, *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*: Cambridge University Press.
- FitzGerald, D., Argast, D., Paterson, R., and Holstein, H., 2010, Progress on interpreting dykes from full tensor magnetic gradiometry: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1162–1166, <https://doi.org/10.1190/1.3513050>.
- Gamey, T. J., Starr, T., Doll, W. E., and Beard, L. P., 2004, Initial design and testing of a full-tensor airborne SQUID magnetometer for detection of unexploded ordnance: 2004 SEG Annual Meeting, <https://onepetro.org/SEGAM/proceedings-abstract/SEG04/All-SEG04/SEG-2004-0798/92120>.
- Ghorbani, M., 2013, *The Economic Geology of Iran*: Springer Dordrecht.
- Gunn, P. J., and Dentith, M. C., 1997, Magnetic responses associated with mineral deposits: *Journal of Australian Geology and Geophysics*, **17**(2), 145–158, https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/81499/Jo u1997_v17_n2_p145.pdf.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I., 2002, *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd edition: Blackwell Science Ltd.
- Kotsiaros, S., and Olsen, N., 2014, End-to-end simulation study of a full magnetic gradiometry mission: *Geophysical Journal International*, **196**(1), 100–110, <https://doi.org/10.1093/gji/ggt339>.
- Liu, H. F., Luo, Z. C., Hu, Z. K., Yang, S. Q., Tu, L. C., Zhou, Z. B., and Kraft, M., 2022, A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications: *Petroleum Science*, **19**(6), 2631–2648, <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.06.005>.

- <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.007>.
Stolz, R., Fritzsche, L., and Meyer, H. G., 1999, LTS SQUID sensor with a new configuration: *Superconductor Science and Technology*, **12**(11), 806–808, <https://doi.org/10.1088/0953-2048/12/11/334>.
- Stolz, R., Zakosarenko, V., Schulz, M., Chwala, A., Fritzsche, L., Meyer, H. G., and Köstlin, E. O., 2006, Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications: *The Leading Edge*, **25**(2), 178–180, <https://doi.org/10.1190/1.2172308>.
- Sui, Y., Li, G., Wang, S., and Lin, J., 2014, Compact fluxgate magnetic full-tensor gradiometer with spherical feedback coil: *Review of Scientific Instruments*, **85**(1), 014701, <https://doi.org/10.1063/1.4856675>.
- Sui, Y., Miao, H., Wang, Y., Luan, H., and Lin, J., 2016, Correction of a towed airborne fluxgate magnetic tensor gradiometer: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **13**(12), 1837–1841, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2614538>.
- Sui, Y., Miao, H., Zhou, Z., Luan, H., Yu, S., and Lin, J., 2015, A case of fluxgate magnetic gradient tensor measurement system on microlight: *International workshop and gravity, electrical and magnetic methods and their applications*, Chenghu, China, 25–28, <https://doi.org/10.1190/GEM2015-007>.
- Wynn, W., Frahm, C., Carroll, P., Clark, R., Wellhoner, J., and Wynn, M., 1975, Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique: *IEEE Transactions on Magnetics*, **11**(2), 701–707, <https://doi.org/10.1109/TMAG.1975.1058672>.
- Xu, L., Zhang, N., Fang, L., Chen, H., Lin, P., and Lin, C., 2021, Simulation analysis of magnetic gradient full-tensor measurement system: *Mathematical Problems in Engineering*, 1–13, <https://doi.org/10.1155/2021/6688364>.
- Yue, L., Cheng, D., Qiao, Y., and Zhao, J., 2022, Error calibration for full tensor magnetic gradiometer probe based on coordinate transformation method: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **71**, 1–11, <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3193977>.
- Zhdanov, M. S., Cai, H., and Wilson, G. A., 2011, 3D inversion of full tensor magnetic gradiometry (FTMG) data: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 791–795, <https://doi.org/10.1190/1.3628195>.
- Zhdanov, M. S., Cuma, M., Wilson, G. A., and Polomé, L., 2012, 3D magnetization vector inversion for SQUID-based full tensor magnetic gradiometry: *SEG Annual Meeting*, SEG-2012-0740.

Full magnetic tensor gradient survey with MEMS sensor, a case study on the Jafarkhan iron ore deposit, Iran

Hashem Shahsavani ^{1*} and Sonoor Abdollahi ²

¹ Assistant Professor, Department of Mining, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

² M.Sc. Student, Mining Department, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, , Sanandaj, Iran

(Received: 13 January 2023, Accepted: 23 June 2023)

Summary

Magnetometry is one of the geophysical methods that has wide applications. In traditional magnetometry, one sensor so-called magnetometer is used for measurements. In order to obtain the gradient in a specific direction, mathematical derivation can be used. Alternatively, a more accurate method of obtaining the gradient is using two sensors which simultaneously measure the magnetic field. In this case, the gradient is obtained in the direction where the two sensors are placed relative to each other. To obtain the Full Magnetic Tensor Gradient (FMTG) of the Earth's magnetic field, although direction derivatives can be used, the more accurate method is to use four sensors that measure the Earth's magnetic field simultaneously. In this way, the FMTG matrix can be obtained. So far, Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) sensors have been used the most in obtaining the FMTG. But these sensors are very expensive and their accurate performance is in a small temperature range. By developing the Micro Electro Mechanical System (MEMS) sensors with their variety of applications, geophysicists are also becoming interested in using such sensors. In this study, one of the precise MEMS magnetometers has been selected. Although the MEMS sensors have low sensitivity compared to SQUID magnetometers, due to their availability, being cheap, and lightness, they are a suitable option for FMTG measurements. Although these sensors do not have the resolution of SQUID magnetometers and they cannot be used on small anomalies that have caused changes of less than 160 nT on the Earth's magnetic field, these kinds of sensors are able to measure the magnitude of the magnetic field in three perpendicular directions and have an acceptable sensitivity. In this study, four sensors of this type have been set up in a cross arrangement. In order to solve the problem of the low sensitivity of these sensors compared to SQUID sensors, the distance between the sensors was chosen to be one meter so that the gradient value would be larger enough. Then, a survey has been performed on an iron ore deposit near Jafar Khan village, Saqqz City, Kurdistan province of Iran. In order to validate elements of the FMGT matrix, they have been compared with the directional derivatives obtained from a sensor. This comparison shows that the signal-to-noise ratio of elements G_{xx} , G_{yx} , G_{zx} , G_{zy} , and G_{zz} have increased around zero, 4.79, 10.80, 83.83, and 8.46, respectively, compared to their corresponding directional derivatives. This issue shows the ability of MEMS sensors to capture the full tensor of the magnetic gradient.

Keywords: Sensor, Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), Jafar Khan, full magnetic tensor gradient, directional derivative

*Corresponding author:

h.shahsavani@uok.ac.ir