

## اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی با استفاده از حسگرهای ممز

سنور عبداللهی<sup>۱</sup>، هاشم شاهسونی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندس اکتشاف معدن، دانشگاه کردستان، [abdolahi1995@gmail.com](mailto:abdolahi1995@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشیار گروه معدن، دانشگاه کردستان، [h.shahsavani@uok.ac.ir](mailto:h.shahsavani@uok.ac.ir)

### چکیده

یکی از شیوه‌های برداشت مغناطیس‌سنجی، برداشت به شیوه گرادیومتری است. در این روش می‌توان تانسور شدت میدان مغناطیسی را در جهت مورد نظر ثبت نمود و همچنین اثر تغییرات زمانی میدان مغناطیسی زمین را حذف کرد. به این ترتیب می‌توان قدرت تفکیک‌پذیری را افزایش داد. در این پژوهش چهار سنسور ممز با شکل هندسی متقاطع تنظیم شده و سپس برداشت‌هایی بر روی یک ذخیره سنگ آهن در نزدیکی شهرستان دیواندره انجام شد. هم‌زمان با این برداشت‌ها، برداشت‌های مغناطیس‌سنجی با مغناطیس‌سنج پروتون بر روی پروفیل‌های مربوطه به منظور اعتبار سنجی نتایج به دست آمده نیز انجام شد. در پایان، ماتریس تانسور کامل برای تمام داده‌ها در امتداد پروفیل برداشت به دست آورده شد. نتایج بدست آمده نشان دادند حسگرهای ممز را می‌توان به منظور به دست آوردن تانسور کامل میدان مغناطیسی زمین مورد استفاده قرار داد و از مزایای این نوع از حسگرها در مقایسه با مغناطیس‌سنج پروتون، نظیر سبکی، کوچکی، مصرف انرژی کم و نرخ نمونه برداری بالای آن‌ها بهره برد.

واژه‌های کلیدی: مگنتومتر پروتون، حسگر ممز، تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی

### Full magnetic tensor measurement using MEMS sensors

Abdolahi Snor<sup>1</sup>, Shahsavani Hashem<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan

#### Abstract

One of the magnetometric survey methods is gradiometry. In this method, the tensor can record the intensity of the magnetic field in the desired direction and also eliminate the effect of temporal changes in the Earth's magnetic field. In this way, the resolution can be increased. In this study, four MEMS sensors with the cross shape geometry are set up. Then the survey has been performed on an iron ore deposit near the village of Divandareh city. Simultaneously with these measurements, a magnetic survey was conducted on the same profiles for validation of the outcome. Finally, the full tensor matrix was obtained for all data along with the survey profile. The results showed that the gradiometric survey using MEMS sensors has a great capability of measuring the full tensor of the Earth's magnetic field and benefits from their advantages compared to the proton magnetometer like low weight, small size, high sampling rate, and low power consumption.

**Keywords:** Proton magnetometer, MEMS sensor, magnetic field gradient full tensor

## ۱ مقدمه

مغناطیس‌سنجی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی است که کاربردهای متعدد در زمینه‌های گوناگون دارد (کری و همکاران، ۲۰۰۲). قابلیت 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 (لیو و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از شیوه‌های برداشت مغناطیس‌سنجی، برداشت به شیوه گرادایومتر است. در این روش دو حسگر بافاصله کم از هم به صورت هم‌زمان میدان مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. از این طریق می‌توان اثر تغییرات زمانی میدان مغناطیسی زمین را حذف کرد. به این ترتیب می‌توان قدرت تفکیک‌پذیری را افزایش داد (دنتیس و ماج، ۲۰۱۴). در سال ۱۹۷۵ یک گرادایان سنج تانسور را طراحی کردند که از مگنتومتر اسکوئید استفاده می‌کرد و مگنتومتر را به صورت آرایه‌ای درمی‌آورد که تمام اجزای لازم میدان و گرادایان را تولید می‌کرد (وین و همکاران، ۱۹۷۵). از این تانسور کامل گرادایومتر اسکوئید برای اکتشافات هوابرد استفاده کردند (لو و همکاران، ۲۰۱۵). اما به طور کلی گرادایومتر ابر رسانا هزینه بر و سنگین است و استفاده از آن در دمای معمولی علی‌رغم حساسیت زیاد بسیار دشوار است بنابراین از مگنتومترهای فلاکس گیت برای اندازه‌گیری فول تانسور استفاده کردند. تانسور گرادایومتر مغناطیسی فلاکس گیت چهار ضلعی ساخته شده توسط سازمان زمین شناسی ایالت متحده برای کشف مهمات منفجر نشده ساخته شد (براکن و برون، ۲۰۰۵). سیستم اندازه‌گیری فول تانسور میدان مغناطیسی با مغناطیس‌سنج فلاکس گیت بر روی یک میکروولیت انجام شد (سوی و همکاران، ۲۰۱۵). گرادایومتر زمینی با استفاده از فلاکس‌گیت‌ها از مزایای دامنه دمای گسترده، هزینه کم و وضوح بالا برخوردار است، اما دقت نسبتاً کمی دارد (سوی و همکاران، ۲۰۱۶).

حسگرهای میکرو الکترومکانیکی یا ممز، حاصل تلفیق اجزای مکانیکی، حس کننده‌ها، محرک‌ها و قطعات الکترونیکی بر روی یک لایه سیلیکون به کمک فناوری ساخت تراشه‌های میکرونی است. مطالعات نشان می‌دهد که می‌توان از این فناوری جدید نیز به منظور آشکارسازی ناهنجاری‌های فلزی زیرسطحی استفاده کرد (چن و ویز، ۱۹۹۷). در صورتی که از این حسگرها به صورت گرادایومتر برداشت انجام شود، قدرت تفکیک‌پذیری داده‌های بدست‌آمده افزایش می‌یابد و می‌توان حاشیه‌های ناهنجاری را بهتر مشخص کرد (شاهسونی و ملکی، ۱۳۹۳). اما تاکنون از این حسگرهای ممز برای به دست آوردن تانسور کامل گرادایان میدان مغناطیسی گزارش نشده است.

دقت اندازه‌گیری مگنتومتر پروتون  $\pm 0.1\%$  نانو تسلا است. این در حالی است که ذخایر بزرگ فلزی ناهنجاری در حدود ۲۰۰ نانو تسلا تا چندین هزار نانو تسلا بر روی میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌کنند (گن و دنتیس، ۱۹۹۷). بنابراین در اکتشاف چنین ذخایری نیاز به دقت بالایی که مگنتومترهای پروتون دارند، ضروری به نظر نمی‌رسد. دقت حسگرهای ممز در حدود ۸ نانو تسلا در فرکانس یک هرتز می‌باشد. از این رو می‌توان این ناهنجاری‌های زیر سطحی فلزی را به راحتی با استفاده از حسگرهای ممز اکتشاف نمود. این در حالی است که حسگرهای ممز بسیار سبک، کوچک و ارزان هستند (شاهسونی و ملکی، ۱۳۹۳).

## ۲ روش تحقیق

تحقیقات نشان داده‌اند که هرچند با مشتق‌گیری از روی داده‌های برداشت‌شده با یک حسگر نیز می‌توان تانسور میدان مغناطیسی را در جهتی که مشتق گرفته می‌شود افزایش داد، اما تانسور به‌دست‌آمده از داده‌های گرادایومتر دقیق‌تر می‌باشند (کلارک، ۲۰۱۲).

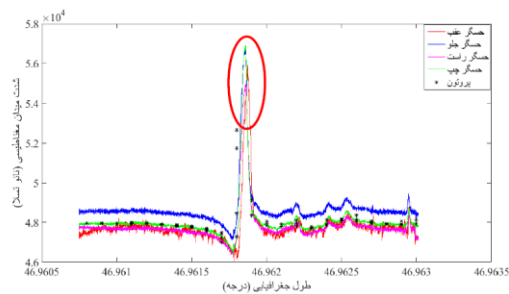
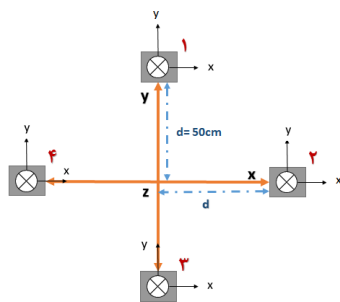
به‌طور کلی، ساختار آرایه تأثیر زیادی در طراحی کلی سیستم دارد. در این مطالعه، همان‌گونه که گفته شد چهار حسگر ممز مرتب‌شده بر روی یک ساختار متقاطع مسطح بافاصله ۱ متر اجرا شد. چهار حسگر با محور مرکزی صفحه آرایه هم‌تراز شده‌اند تا به دلیل وجود اجسام فرومغناطیسی، هرگونه ناهنجاری مغناطیسی در عرض صفحه را انتخاب کنند. در مقابل، اگر ناهنجاری وجود نداشته باشد، داده‌های تانسور کامل گرادایان مغناطیسی جمع‌آوری شده توسط آرایه سنسور بدون تغییر است. برای ساختار آرایه حسگرها، تانسور کامل گرادایان مغناطیسی  $G$  می‌تواند به صورت رابطه ۱ استخراج شود:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{B_{2x} - B_{4x}}{2d} & \frac{B_{2y} - B_{4y}}{2d} & \frac{B_{2z} - B_{4z}}{2d} \\ \frac{B_{1x} - B_{3x}}{2d} & \frac{B_{1y} - B_{3y}}{2d} & \frac{B_{1z} - B_{3z}}{2d} \\ \frac{B_{2z} - B_{4z}}{2d} & \frac{B_{1z} - B_{3z}}{2d} & \frac{-(B_{2x} - B_{4x}) - (B_{1y} - B_{3y})}{2d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که  $m$  در  $B_{mn}$  به معنای تعداد هر حسگر است و  $n$  مخفف شدت مغناطیسی در امتداد  $x, y$  و  $z$  است. به این ترتیب به ازای هر یک نقطه از برداشت یک ماتریس  $3 \times 3$  به دست می آید.

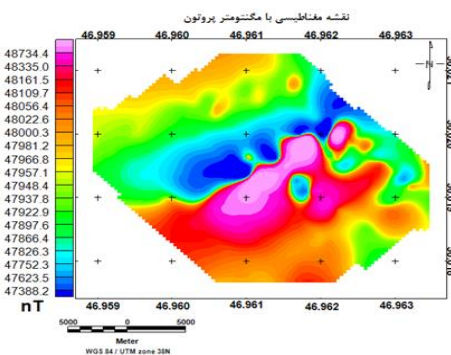
در این مطالعه ابتدا نتایج حاصل از مگنتومتر پروتون با نتایج حاصل از حسگرهای ممز مقایسه شدند. سپس، با استفاده از چهار حسگر ممز ماتریس تانسور کامل گرادین میدان مغناطیسی زمین اندازه گیری شد. در شکل ۲ دیده می شود که شدت میدان مغناطیسی به دست آمده از حسگرهای ممز با شدت میدان مغناطیسی به دست آمده از مگنتومتر پروتون تا حدود زیادی منطبق بر همدیگر است و حسگرهای ممز قادر به اندازه گیری مقادیر بسیار بالای شدت میدان مغناطیسی است. در حالی که مگنتومتر پروتون در گرادین های شدید قادر به اندازه گیری میدان مغناطیسی زمین نیست.

از آنجایی که نقشه شدت کل حاصل از حسگرهای ممز با نقشه شدت پروتون همپوشانی خوبی دارد و بسیار شبیه به هم هستند بنابراین نقشه های  $\gamma$  مؤلفه تانسور کامل گرادین مغناطیسی حاصل از چهار حسگر نیز قابل قبول هستند.

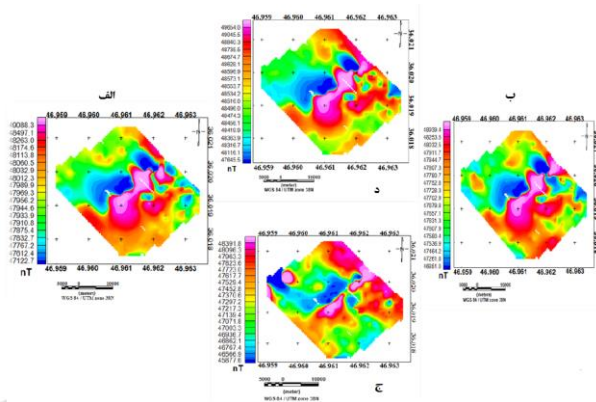


شکل ۲. مقایسه مقادیر اندازه گیری مگنتومتر پروتون و حسگرهای

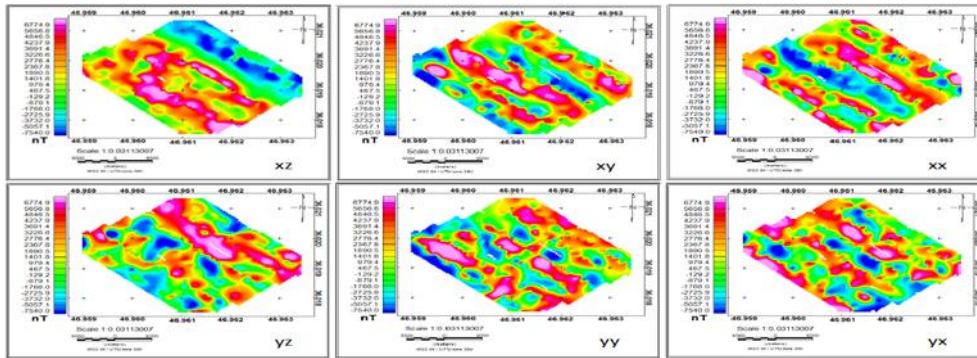
شکل ۱. آرایه حسگرهای ممز برای تشکیل سیستم تانسور کامل گرادین مغناطیسی.



شکل ۳. نقشه مغناطیسی محدوده برداشت توسط مگنتومتر پروتون.



شکل ۴. نقشه های مغناطیسی محدوده برداشت توسط حسگرهای ممز (الف) حسگر چپ، (ب) حسگر راست، (ج) حسگر عقب، (د) حسگر جلو



شکل ۵. نقشه مؤلفه‌های تانسور کامل گرادیان مغناطیسی

### ۳ نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای اندازه‌گیری تانسور کامل گرادیان میدان مغناطیسی ابتدا نتایج حاصل از اندازه‌گیری شدت کل ناهنجاری توسط حسگرهای ممز با نتایج حاصل از مگنتومتر پروتون صحت‌سنجی شد تا جواب نتایج تانسور نیز قابل قبول باشد. نتایج نشان داد که شدت میدان مغناطیسی به‌دست‌آمده از حسگرهای ممز با شدت میدان مغناطیسی به‌دست‌آمده از مگنتومتر پروتون تا حدود زیادی منطبق بر همدیگر است. همچنین در این مطالعه مشخص شد که حسگرهای ممز قادر به شناسایی شکل ناهنجاری و گسترش آن شده‌اند و حتی به‌خوبی حاشیه‌های ناهنجاری را به تصویر کشیده‌اند. در انتها با توجه به نتایج نقشه‌های حاصل از هر چهار حسگر ممز می‌توان گفت که نتایج به‌دست‌آمده اتفاقی نیست و نشان دهنده جایگزین خوبی برای مگنتومتر پروتون است که در مقایسه با حسگرهای ممز هزینه، اندازه و وزن بسیار زیادی دارند. به این ترتیب می‌توان سرعت عملیات صحرایی مغناطیس‌سنجی را به صورت چشمگیری افزایش داد و هزینه این چنین عملیات‌هایی را به مقدار زیاد کاهش داد.

### منابع

- شاهسونی، ه. و ملکی، پ.، ۱۳۹۳، مقایسه داده‌های مگنتومتر پروتون و مگنتومتر ممز: اولین همایش بین‌المللی پژوهش و پیشرفت در علوم زمین (ICG ۲۰۱۷).
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I., 2002, An introduction to geophysical exploration: Vol. 4.
- Liu, H., Wang, X., Wang, H., Bin, J., Dong, H., Ge, J., ... & Luan, X., 2020, Magneto-inductive magnetic gradient tensor system for detection of ferromagnetic objects. IEEE Magnetics Letters, 11, 1-5.
- Dentith, M., & Mudge, S. T., 2014, Geophysics for the mineral exploration geoscientist: Cambridge University Press.
- Wynn, W., Frahm, C., Carroll, P., Clark, R., Wellhoner, J., & Wynn, M., 1975, Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique. IEEE Transactions on Magnetics, 11(2), 701-707.
- Luo, Y., Wu, M. P., Wang, P., Duan, S. L., Liu, H. J., Wang, J. L., & An, Z. F., 2015, Full magnetic gradient tensor from triaxial aeromagnetic gradient measurements: Calculation and application. Applied Geophysics, 12(3), 283-291.
- Bracken, R. E., & Brown, P. J., 2005, Reducing tensor magnetic gradiometer data for unexploded ordnance detection. first break, 23(8).
- Sui, Y., Miao, H., Zhou, Z., Luan, H., Yu, S., & Lin, J., 2015, April, A case of fluxgate magnetic gradient tensor measurement system on microlight. In International Workshop and Gravity, Electrical & Magnetic Methods and their Applications, Chenghu, China, 19-22. pp. 25-28.
- Sui, Y., Miao, H., Wang, Y., Luan, H., & Lin, J., 2016, Correction of a towed airborne fluxgate magnetic tensor gradiometer. IEEE Geoscience and remote sensing letters, 13(12), 1837-1841.
- Chen, J., & Wise, K. D., 1997, A high-resolution silicon monolithic nozzle array for inkjet printing. IEEE Transactions on Electron Devices, 44(9), 1401-1409.
- Gunn, P. J., & Dentith, M. C., 1997, Magnetic responses associated with mineral deposits. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 17, 145-158.
- Clark, D. A., 2012, New methods for interpretation of magnetic gradient tensor data. ASEG Extended Abstracts, 1-11.