



Imam Khomeini International University
Vol. 9, No. 1, Spring 2024



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

The Fast and Low-Cost Magnetometry with Micro Electro Mechanical Systems Sensor

Shahsavani H.^{1*}

1- Associate Professor, Dept. of Mining, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Received: 07 Feb. 2023

Accepted: 04 Oct. 2023

Abstract: With the extraction of surface minerals and the depletion of their reserves, the exploration of deeper deposits has become a pressing consideration. Among the geophysical techniques available for such exploration, magnetometry stands out. Proton magnetometers, the prevailing instruments in terrestrial magnetometry, are characterized by their high cost, high weight, and large size. Moreover, their low sampling rate necessitates prolonged and consequently costly field operations. However, the advancement of Micro Electro Mechanical System (MEMS) sensors, which are both lightweight and cost-effective and possess high sampling rates and satisfactory sensitivity, has garnered significant interest. In this research, one such MEMS sensor was deployed and employed in the examination of a small iron deposit located in Western Iran. Then, the findings from these measurements were compared to those obtained using a proton magnetometer. The comparison reveals a substantial difference in efficiency. Magnetometry with MEMS sensors over the selected deposit took approximately 8.5 hours, whereas the survey with the proton magnetometer on the same profiles spanned around 44 hours. In addition to the time savings, the application of MEMS sensors led to a remarkable reduction in operating costs, by up to fivefold. On the other hand, due to the small size of this magnetometer, by placing it in a handbag or backpack of the operator, it is possible to carry out the magnetometer survey without any problem of dealing with the opponents and to prevent the postponement of the field magnetometer operation.

Keywords: Sensor, Magnetometry, MEMS, Proton.

How to cite this article

Shahsavani, H. (2024). "The fast and low-cost magnetometry with Micro Electro Mechanical Systems sensor". Journal of Mineral Resources Engineering, 9(1): 25-40.

DOI: [10.30479/JMRE.2023.18390.1626](https://doi.org/10.30479/JMRE.2023.18390.1626)

*Corresponding Author Email: h.shahsavani@uok.ac.ir

COPYRIGHTS



©2024 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

In recent times, the exploration of subsurface mineral deposits has become imperative due to the depletion of surface reserves. Magnetometry, a branch of geophysics, has a rich history dating back to ancient Chinese use of Earth's magnetic properties for metal deposit exploration [1,2]. Proton magnetometers, introduced in 1965, revolutionized magnetometry and continue to be widely used [3]. Various magnetometer types have emerged, including cesium vapour, rubidium, potassium, and fluxgate magnetometers, each with unique attributes [4-7]. Additionally, the development of Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) sensors has gained attention in geophysics [8-10]. These sensors, which have evolved for navigation, offer smaller size, lower cost, and increased precision, making them viable alternatives [11]. MEMS magnetometer sensors can be categorized into micro-fluxgate, Hall-effect, and resistive types [9]. Despite some limitations, they hold promise in various applications [12-15]. While MEMS sensors have lower sensitivity compared to proton magnetometers, their ability to detect economic reserves, which generates more than 200 nT change on the Earth's magnetic field [16], justifies their use. Moreover, MEMS sensors can significantly reduce the cost and the time of magnetometry surveys. Their compact size allows for discreet transportation, ensuring sensitivity in field operations. This study involved setting up a precise Hall-effect-based MEMS magnetometer. Measurements were conducted on an iron reserve simultaneously with a proton magnetometer to evaluate the MEMS sensor's performance.

METHODS

Magnetic field measurements were conducted within the specified limits using a micro-electro-mechanical (MEMS) sensor. The sensor, as illustrated in Figure 1, is identified as the MLX 90393 model manufactured by SparkX. It can communicate with a microcontroller through both I2C and SPI communication protocols. In this study, the relevant sensor has been enclosed within a customized housing. For the sake of lightweight design, the housing material is selected as balsa wood. The entire assembly, including the housing and its contents, weighs only 150 grams.

The variations in the Earth's magnetic field strength over a metallic ore deposit range from 200 to several thousand nanoteslas. Therefore, a sensitivity of 160 nanoteslas is entirely acceptable for the detection of an economic metallic ore deposit, and an accuracy of ± 0.1 nanoteslas in magnetic field measurements, especially for the exploration of magnetite, is sufficient.

The study area encompasses a rectangular shape, approximately 1800 meters in length and 800 meters in width, oriented in the northwest-southeast direction. Figure 2 on Google Earth illustrates the designated study area. Within this study area, 27 profiles, ranging from 138 meters to 1000 meters in length, have been proposed. These profiles have been designed in a north-south direction. As depicted in Figure 2, the profile lines cover the study area in a diagonal manner. These profiles have been planned using open-source software called "Mission Planner," which guides drones. The total length of the proposed profiles is approximately 30 kilometres. A spacing of 50 meters has been selected between the acquisition profiles, which appears suitable for the initial exploration phase.

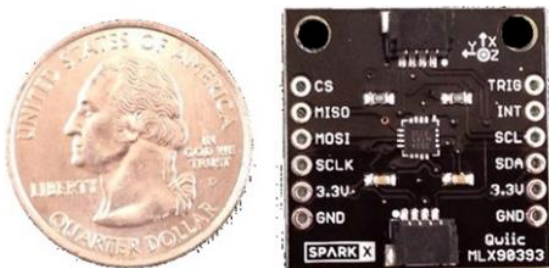


Figure 1. A micro-electro-mechanical sensor

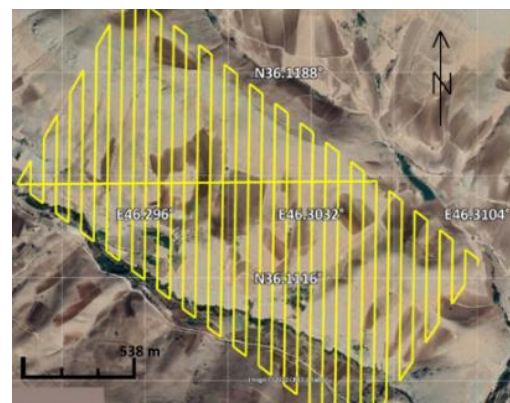


Figure 2. Proposed Profile Paths for the Survey Using Magnetometers [17]

The length of each of the surveyed profiles, along with the acquisition time for each profile, has been summarized in Table 1.

As mentioned in Table 1, the survey duration for 27 profiles is approximately eight and a half hours. The total length of the profiles is 23211 meters, and the number of collected samples is 1134450. The spacing between samples along the profiles ranges from 1.5 to 3.6 centimetres. It's worth noting that this small spacing between samples is made possible due to the high sampling rate of the sensor, allowing for measurements along the profiles to be nearly continuous compared to proton magnetometers.

Table 1. Information about data survey along each profile

Profile number	Start time (GMT)	End time (GMT)	Survey duration	Number of samples	Sample spacing (cm)	Profile length (m)
1	06:29:40	06:34:09	00:04:29	10001	1.5	141
2	06:35:56	06:39:59	00:04:03	9001	2	247
...
26	11:56:27	12:09:25	00:11:38	28901	2	600
27	12:12:07	12:22:05	00:9:58	23001	2.6	600
Total	08:26:27	1134450	-	23211	-	-

FINDINGS AND ARGUMENT

The first step in data processing after inputting the data into the Oasis Montaj software is the removal of spikes or anomalies from the data. Following this stage, the data is prepared for grid generation. In this phase, the total magnetic intensity (TMI) is computed using the Oasis Montaj software. Figure 3 illustrates the map of TMI within the study area.

The results obtained from the previous measurements with the proton magnetometer in this area are shown in Figure 4.

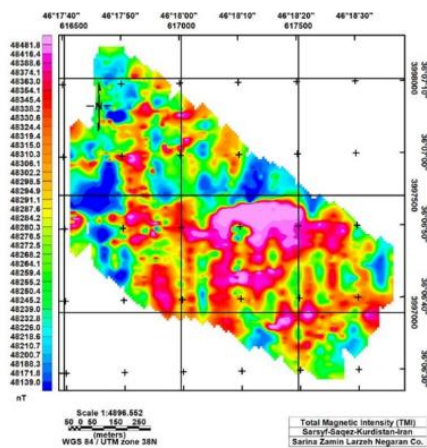


Figure 3. Map of the total magnetic intensity (TMI) derived from the survey in the SarSef-Saqeqz region, obtained using the sensor

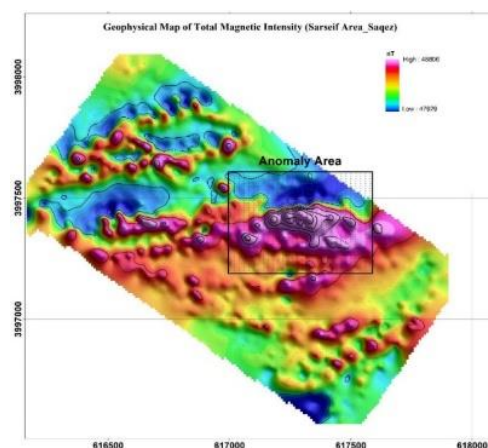


Figure 4. Map of the total magnetic intensity (TMI) of the Earth in the SarSef-Saqeqz region using the proton magnetometer

This map has also been generated using the Oasis Montaj software. As expected, the TMI map obtained from the magnetometer sensor data closely aligns with the obtained TMI map from the proton magnetometer. Especially, the main dipole resulting from the main anomaly, with its centre located at coordinates 617250 E and 3997499 N, is well detected by the sensor measurements. Smaller dipoles in the southern part of the main anomaly are also well captured by the sensor. In the western part of the map of TMI obtained from the magnetometer sensor, smaller anomalies resulting from minor anomalies are not clearly visible. It is

likely that by addressing the leveling errors, these minor anomalies in the western section will become more apparent. However, it appears highly probable that these anomalies in this region are not associated with an economic deposit. The data collected using the proton magnetometer in Table 2 have been compared with the measurements made using the sensor.

Table 2. Comparison of data acquisition with MEMS sensor and proton magnetometer

Magnetometer type	Number of samples	Distance between samples (meters)	Duration of survey (hours)	Survey cost (unitless)
Proton magnetometer (scalar)	2085	10	45	1000
MEMS sensor (vector)	113445	3.0	5.8	200

The numbers in Table 2 actually represent the advantages of using a MEMS sensor in magnetic data acquisition. The spacing between samples in data acquisition with the MEMS sensor is such that this type of acquisition can be considered continuous. More importantly, the time required for field operations is significantly reduced in the case of data acquisition with the MEMS sensor, roughly one-fourth of the time needed for proton magnetometer-based acquisition. Additionally, the cost of data acquisition using the MEMS sensor is approximately one-fifth of the cost of proton magnetometer-based acquisition. Furthermore, since the MEMS sensor is of vector type, it allows for extracting additional information such as the direction of the Earth's magnetic field.

CONCLUSIONS

The deployment of micro-electromechanical system (MEMS) sensors in magnetometry is in its early stages, and their sensitivity is not as high as traditional magnetometers. However, considering the need for low-cost and rapid geophysical methods in mineral exploration, the potential use of MEMS sensors is being explored. In this study, one of the most precise and low-error micro-electromechanical sensors has been chosen. Data were then collected over a metallic deposit using this sensor. These acquisitions were compared to a magnetic survey using a proton magnetometer. This comparison demonstrates that the MEMS sensor effectively detects the two poles resulting from the main anomaly present in the study area. Moreover, by addressing leveling errors, it is likely that smaller anomalies in the study area will become visible. Additionally, this research shows that using MEMS sensors can reduce the time and the cost of magnetic field survey operations by approximately one-fourth and one-fifth, respectively, compared to conventional methods. This is while the data collected with the MEMS sensor is nearly continuous. Furthermore, the small size of the MEMS sensor allows it to be deployed inconspicuously in the desired area without drawing the attention of potential opponents of magnetic survey operations.

REFERENCES

- [1] Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. (2002). *"An introduction to geophysical exploration, third edition"*. Wiley-Blackwell, pp. 288. ISBN: 978-0-632-04929-5.
- [2] Lowrie, W. (2007). *"Fundamentals of geophysics"*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511807107.
- [3] Ripka, P. (2001). *"Magnetic sensors and magnetometers"*. In Book: IOP Publishing Ltd, Measurement Science and Technology, 13(4): 645. DOI: 10.1088/0957-0233/13/4/707.
- [4] Hardwick, C. D. (1984). *"Non-oriented cesium sensors for airborne magnetometry and gradiometry"*. *Geophysics*, 49(11): 2024-2031. DOI: 10.1190/1.1441613.
- [5] Breiner, S. (1965). *"The Rubidium Magnetometer in archeological exploration"*. *Science*, 150(3693): 185-193. DOI: 10.1126/science.150.3693.185.
- [6] Dang, H. B., Maloof, A. C., and Romalis, M. V. (2010). *"Ultra-high sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer"*. *Applied Physics Letters*, 97(15): 151110. DOI: 10.1063/1.3491215.

- [7] Khosravi, K., Alizadeh, M. S., and Pourmahdian, H. (2020). "Comparison of a designed scalar proton precession magnetometer with a scalar calibrated 3-axis fluxgate magnetometer". In: 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), IEEE, 1-4. DOI: 10.1109/ICEE50131.2020.9261049.
- [8] Lai, W.-H., Li, B., Fu, S.-H., and Lin, Y.-S. (2023). "Tunable MEMS-based terahertz metamaterial for pressure sensing application". *Micromachines* (Basel), 14(1): 169. DOI: 10.3390/mi14010169.
- [9] 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. DOI: 10.1016/j.petsci.2022.06.005.
- [10] Xu, Q., Yan, S., Liu, H., Liu, J., Wu, W., and Tu, L. (2023). "A nano- g electromagnetic accelerometer with 152 dB wide dynamic range". *IEEE Sensors Journal*, 23(4): 3647-3654. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3234195.
- [11] Tanaka, M. (2007). "An industrial and applied review of new MEMS devices features". *Microelectronic Engineering*, 84(5-8): 1341-1344. DOI: 10.1016/j.mee.2007.01.232.
- [12] Ji, Y., Shang, J., Li, G., Zhang, J., and Zhang, J. (2020). "Microfabricated Shaped Rubidium Vapor Cell for Miniaturized Atomic Magnetometers". *IEEE Sensors Letters*, 4(2): 1-4. DOI: 10.1109/LSENS.2020.2965737.
- [13] Lei, C., Sun, X.-C., and Zhou, Y. (2018). "Noise analysis and improvement of a micro-electro-mechanical-systems fluxgate sensor". *Measurement*, 122: 1-5. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.03.007.
- [14] Min, Y.-J., Kwon, C.-K., Kim, H.-K., Kim, C., and Kim, S.-W. (2012). "A CMOS magnetic hall sensor using a switched biasing amplifier". *IEEE Sensors Letters*, 12(5): 1195-1196. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2169055.
- [15] Yang, S., and Zhang, J. (2021). "Current Progress of Magnetoresistance Sensors". *Chemosensors*, 9(8): 211. DOI: 10.3390/chemosensors9080211.
- [16] Gunn, P. J., and Dentith, M. C. (1997). "Magnetic responses associated with mineral deposits". *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 145-158.
- [17] Google earth. Accessed: Aug. 19, 2018. [Online]. Available: <http://www.google.com/earth/index.html>.



مغناطیس‌سنجی سریع و ارزان با حسگرهای میکرو الکترو مکانیکی در ذخیره سرسیف سقز

هاشم شاهسونی^{*}

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

چکیده

یکی از روش‌های ژئوفیزیکی که می‌توان برای اکتشاف ذخایری عمقی استفاده کرد روش مغناطیس‌سنجی است. مرسوم‌ترین ابزار اندازه‌گیری در روش مغناطیس‌سنجی زمینی، مغناطیس‌سنج‌های پروتون است. مغناطیس‌سنج‌های پروتون در مقایسه با حسگرهای میکروالکترومکانیکی گران قیمت و سنگین هستند و اندازه بزرگی دارند. همچنین نرخ نمونه‌برداری این مغناطیس‌سنج‌ها پایین است. این امر باعث می‌شود عملیات صحرایی زمان‌بر و هزینه‌بر باشد. با پیشرفت تکنولوژی، حسگرهای میکروالکترومکانیکی بسیار سبک و ارزان قیمت با نرخ نمونه‌برداری بالا و حساسیتی قابل قبول، معرفی شده‌اند. در این مطالعه یکی از این حسگرها راه‌اندازی شده و سپس برداشت‌هایی بر روی یک ذخیره کوچک آهن که در مجاورت روستای سرسیف در شهرستان سقز استان کردستان واقع است، انجام شده است. نتایج این برداشت‌ها با نتایج برداشت‌های انجام شده با استفاده از مغناطیس‌سنج پروتون مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد در برداشت‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از حسگرهای میکروالکترومکانیکی در محدوده مورد نظر، زمان برداشت حدود ۸/۵ ساعت و زمان برداشت بر روی همان پروفیل‌ها با استفاده از مغناطیس‌سنج پروتون حدود ۳۰ ساعت است. همچنین هزینه برداشت با استفاده از حسگر به یک پنجم برداشت با مغناطیس‌سنج پروتون کاهش یافته است. به این ترتیب کاهش هزینه و زمان برداشت در یک عملیات مغناطیس‌سنجی که از اهداف این تحقیق است، برآورده شده است.

کلمات کلیدی

میکروالکترومکانیکی، حسگر، مغناطیس‌سنجی، پروتون.

استناد به این مقاله

شاهسونی، ه.؛ ۱۴۰۳؛ "مغناطیس‌سنجی سریع و ارزان با حسگرهای میکرو الکترو مکانیکی در ذخیره سرسیف سقز". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره نهم، شماره ۱، ص ۴۰-۲۵.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.18390.1626



۱- مقدمه

امروزه بسیاری از ذخایر سطحی کشف شده‌اند و برای اکتشاف ذخایر زیرسطحی استفاده از روش‌هایی مانند روش‌های ژئوفیزیکی اجتناب‌ناپذیر است. روش مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های مورد استفاده در اکتشاف ذخایر عمیق و یا پنهان است. این روش که شاخه‌ای از علم ژئوفیزیک است، شاید طولانی‌ترین پیشینه را در تاریخ زندگی بشر داشته است [۱]. چینی‌ها اولین کسانی بودند که به خاصیت مغناطیسی زمین پی بردند و از آن برای اکتشاف ذخایر فلزی استفاده کردند [۲]. در سال ۱۹۶۵ تئوری مغناطیس‌سنج‌های پرتون معرفی شد و در سال‌های بعد، این مغناطیس‌سنج به صورت صنعتی تولید و در اختیار عموم قرار گرفت [۳]. این مغناطیس‌سنج قادر است بزرگای میدان مغناطیسی را با حساسیت حدود دهم نانو تسلا اندازه‌گیری کند [۴]. امروزه مغناطیس‌سنج‌های دیگر از جنس بخار گازهای الکالی مانند مغناطیس‌سنج‌های بخار سزیم [۵، ۶]، رویدیم [۷، ۸] و پتاسیم [۸، ۹] و همچنین مغناطیس‌سنج‌های از جنس فلاکس گیت [۱۰، ۱۱] در مغناطیسی‌سنجی استفاده می‌شوند که هر کدام معایب و مزایای خاص خود را دارند [۱۲]. با پیشرفت صنعت، تکنولوژی ساخت حسگرهایی میکروالکترومکانیکی نیز توسعه یافته است. از این رو متخصصان حوزه ژئوفیزیک نیز علاقه‌مند به استفاده از این حسگرها شده‌اند [۱۵-۱۳]. اخیراً برخی از انواع حسگرهای میکروالکترومکانیکی که برای ناوبری توسعه داده شده‌اند، معرفی شده‌اند. این حسگرهای مغناطیسی که بزرگای میدان مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری می‌کنند روز به روز کوچکتر، سبکتر و دقیق‌تر شده‌اند. همچنین مصرف انرژی آنها کمتر و نرخ نمونه‌برداری آنها بیشتر شده است [۱۶]. در حالت کلی می‌توان حسگرهای مغناطیس‌سنج از نوع ممز را به سه دسته مغناطیس‌سنج‌های میکروفلاکس گیت^۱، مغناطیس‌سنج‌های اثر هال^۲، مغناطیس‌سنج‌های مقاومتی^۳ تقسیم کرد [۱۳].

جی یو و همکاران یک مغناطیس‌سنج میکروفلاکس گیت را روی ماهواره بسیار کوچک اپتوس پیکوست^۴ نصب کردند. نتایج برداشت‌های آنها نشان داد این مغناطیس‌سنج‌ها معایبی مانند غیرخطی بودن خروجی، پایدار نبودن در دماهای مختلف و داشتن نوفه زیاد دارند [۱۷]. لی و همکاران حسگرهای میکروفلاکس گیتی را که از دو هسته آمورف^۵ تشکیل شده بود، مورد آزمایش قرار دادند. اگرچه نوفه زمینه این نوع از حسگرها از حسگرهای فلاکس گیت معمولی بیشتر بود، اما

کوچک بودن و هزینه اندک آنها از مزیت‌های حسگر معرفی شده به وسیله آنها بود. آنها امیدوارند این نوع از حسگرها به دلیل کوچکی و قیمت کم، کاربرد گسترده‌ای پیدا کند [۱۸]. حسگرهای اثر هال^۶ به دلیل استفاده از تکنولوژی مکمل اکسید فلز نیمه رسانا^۷ کاربردهای بسیار گسترده‌ای یافته‌اند [۱۹]. خروجی این نوع از حسگرها کمتر تحت تاثیر دما قرار می‌گیرد. از این رو می‌توان از آن در چاه‌های اکتشافی نفت و گاز استفاده کرد. حسگرهای ناهمسانگرد مغناطیس مقاومتی^۸ بر این اساس که میزان مقاومت در یک لایه نازک از ماده رسانا با تغییر میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند بنا شده است [۲۰]. این نوع از حسگرها بازه دینامیکی اندازه‌گیری کمی دارند و به سرعت اشباع می‌شوند و میدان‌های مغناطیسی بیشتر از یک تسلا ممکن است این حسگرها را از بین ببرد [۲۱]. حسگرهای مغناطیس‌سنجی هنوز راه زیادی دارند تا در کاربردهای ژئوفیزیکی استفاده شوند [۱۳]. شاید از همین رو باشد که گزارشی از استفاده از این نوع از حسگرها در صحرا و مقایسه خروجی آنها با حسگرهای استاندارد و سنتی در مغناطیس‌سنجی مانند مغناطیس‌سنج پرتون وجود ندارد.

هرچند حساسیت حسگرهای ممز در اندازه‌گیری بزرگای میدان مغناطیسی در مقایسه با مغناطیس‌سنج پرتون کم است، اما از آنجایی که یک ذخیره اقتصادی از ۲۰۰ تا چند هزار نانوتسلا تغییر را روی میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌کند [۲۲]، در نتیجه حساسیت آنها قابل قبول است. با توجه به این موضوع و با توجه به مزایای یاد شده در مورد حسگرهای ممز، می‌توان هزینه و زمان انجام یک برداشت مغناطیس‌سنجی را به مقدار زیاد کاهش داد. از طرفی این حسگرها اندازه کوچکی دارند. چنین مزیتی این امکان را به اپراتور می‌دهد تا این حسگر را در داخل یک کیف یا حتی در داخل جیب خود قرار داده و به این ترتیب حساسیت معارضین حین عملیات مغناطیس‌سنجی بر انگیزته نمی‌شود.

در این مطالعه ابتدا یک نمونه از دقیق‌ترین حسگرهای ممز که بر اساس اثر هال عمل می‌کند و موجود در بازار کشورمان است، راه‌اندازی شده سپس یک ذخیره آهن انتخاب شده و برداشت با حسگر و مغناطیس‌سنج پرتون به صورت همزمان بر روی این ذخیره انجام شده است تا امکان ارزیابی عملکرد حسگر ممز فراهم شود.

اساس طبقه‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران زمین توسط نبوی [۲۴] بخشی از زون ساختاری سنندج- سیرجان به شمار می‌رود که با روند عمومی تقریباً شمال غربی- جنوب شرقی قرار گرفته و از دیدگاه تکتونیکی، این منطقه یکی از فعال‌ترین مناطق شناخته شده ایران است [۲۵].

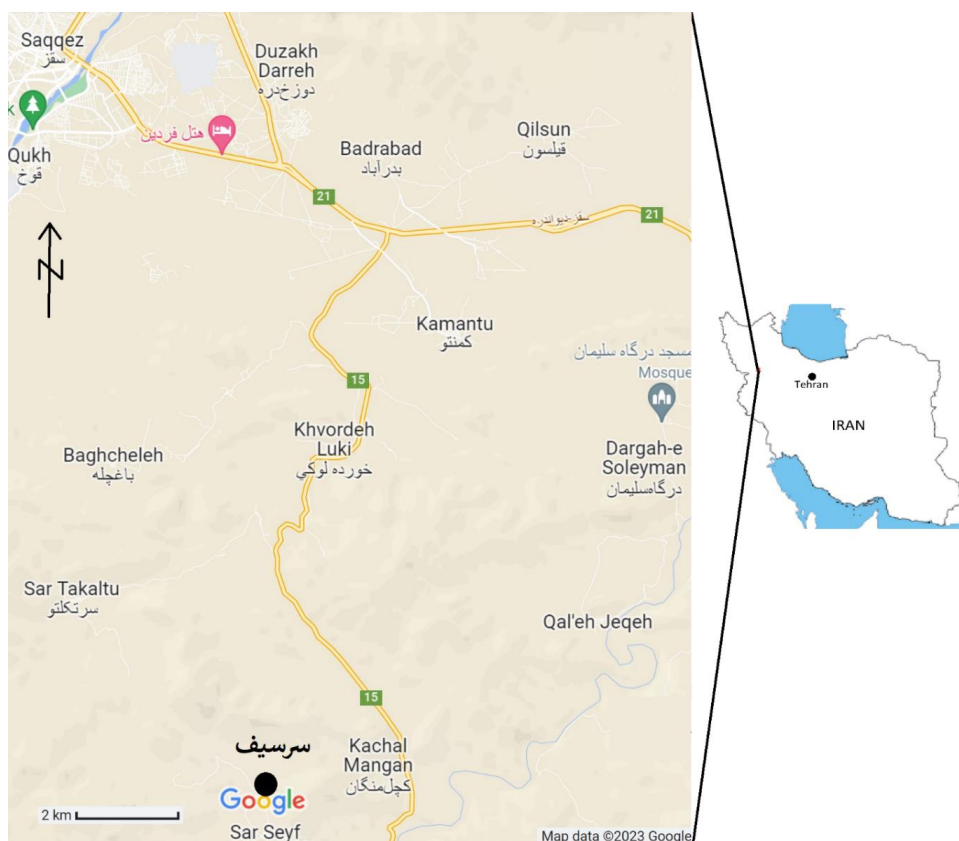
۳- نحوه برداشت داده

برداشت‌های مغناطیس‌سنجی در محدود مورد مطالعه با استفاده از یک حسگر میکروالکترومکانیکی انجام شده است. این حسگر در شکل ۲ نشان داده شده است. این حسگر به شماره MLX 90393 ساخت شرکت اسپارک ایکس بوده و با استفاده از پروتکل‌های ارتباطی I2C^۹ و همچنین SPI^{۱۰} می‌تواند با یک میکروکنترلر ارتباط برقرار کند. در این تحقیق حسگر مربوطه در داخل یک جعبه تعبیه شده است. برای سبک‌سازی، جنس بدنه این جعبه از چوب بالسا انتخاب شده است. جعبه و متعلقات داخل آن فقط ۱۵۰ گرم وزن دارند. شکل ۳ این جعبه چوبی را نشان می‌دهد.

۲- راه‌های دسترسی و زمین‌شناسی ذخیره آهن انتخابی

محدوده مورد مطالعه در ۱۵ کیلومتری جنوب شرق سقز جاده سقز- مریوان در استان کردستان قرار دارد. برای رسیدن به محدوده مورد نظر می‌توان از مسیر سقز به مریوان استفاده کرد. این محدوده حدود چهار کیلومتر پس از روستای خرده لوکی واقع شده است. این محدوده در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سقز و بخش‌های ابتدایی شمال غرب کمر بند ارومیه- دختر قرار داشته که کانسارها و نشانه‌های معدنی زیادی دارد. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد نظر و راه‌های دسترسی به آن را نشان می‌دهد.

از نظر زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه بخشی از نوار دگرگونه فلززایی سنندج- سیرجان در شمال غرب ایران بوده و در حقیقت در محل تلاقی این زون با زون‌های ساختاری خوی مه‌باد و البرز آذربایجان واقع شده است و از دیدگاه کانی‌سازی‌های آهن، طلا و مس اهمیت بالایی دارد که این کانی‌سازی‌ها اغلب هم زمان با رخداد ماگماتیسم در محدوده زمانی ائوسن- الیگوسن شکل گرفته است. این محدوده بر



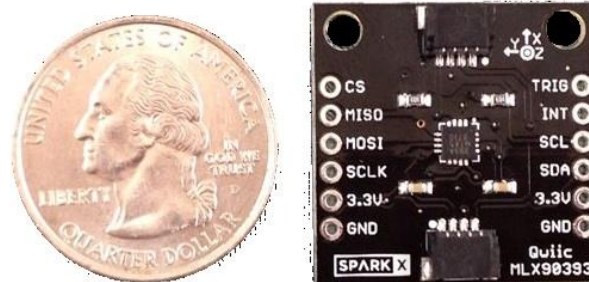
شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه نسبت به شهر سقز [۲۳]

نمونه با استفاده از مغناطیس‌سنج پروتون در برداشت‌های با حجم زیاد، عملیات صحرایی را بسیار طولانی و گاه غیرممکن می‌سازد. این در حالی است که با استفاده از حسگر ممز، اپراتور می‌تواند در امتداد پروفیل‌ها با سرعت پیاده‌روی کند. با این وجود (پیاده‌روی با سرعت بالا در امتداد پروفیل‌ها) و با توجه به نرخ بالای نمونه‌برداری، فاصله بین نمونه‌ها بسیار کم است (جدول ۱).

اندازه کوچک، مصرف انرژی کم، نرخ نمونه‌برداری بالا و حساسیت قابل قبول این حسگر این امکان را فراهم آورده است تا عملیات برداشت مغناطیس‌سنجی در صحرا نسبت به روش‌های سنتی (استفاده از مغناطیس‌سنج پروتون) بسیار راحت‌تر و سریع‌تر شود.

حسگر، داده‌های مربوط به شدت میدان مغناطیسی را در سه جهت عمود بر هم قرائت می‌کند و با داده‌های مربوط به مختصات مکانی که از قرائت ماژول GPS به دست می‌آید روی یک کارت حافظه با فرمت متنی ذخیره می‌کند. این داده‌ها که آماده وارد شدن به نرم‌افزارهای پردازشی مانند نرم‌افزار اوسیسی مونتاز هستند، داده‌های خام نامیده می‌شوند. داده‌های خام که روی کارت حافظه ذخیره شده‌اند به ترتیب حاوی این اطلاعات هستند: ۱- شدت میدان مغناطیسی در جهت X ۲- شدت میدان مغناطیسی در جهت Y ۳- شدت میدان مغناطیسی در جهت Z ۴- دما ۵- عرض جغرافیایی ۶- طول جغرافیایی ۷- تعداد ماهواره‌های دریافت شده به وسیله GPS ۸- زمان برداشت داده (ساعت، دقیقه، ثانیه به وقت گرینویچ) ۹- تاریخ برداشت داده (سال، ماه، روز به میلادی) ۱۰- ارتفاع نقطه برداشت از سطح دریا

نحوه برداشت داده به این صورت است که یک اپراتور در ابتدای پروفیل حسگر را روشن می‌کند و منتظر می‌شود تا GPS با حداقل چهار ماهواره ارتباط برقرار کند. این زمان انتظار در ساعت‌های مختلف از روز و در ماژول‌های مختلف GPS متفاوت بوده و بین سی ثانیه تا ده دقیقه متغیر است. بعد از ارتباط ماژول GPS با ماهواره یا به اصطلاح قفل شدن ماژول GPS اپراتور در امتداد پروفیل‌های از پیش طراحی شده



شکل ۲: شمایی از حسگر میکروالکترومکانیکی



شکل ۳: نمایی از حسگر (که در داخل جعبه‌ای از جنس چوب بالسا تعبیه شده است).

مشخصات فنی حسگر ممز با مغناطیس‌سنج پروتون که یک مغناطیس‌سنج استاندارد و پرکاربرد در برداشت‌های مغناطیس‌سنجی است، در جدول ۱ مقایسه شده است. دو نکته مهم در رابطه با این مقایسه باید ذکر شود. اول اینکه تغییرات بزرگای میدان مغناطیسی زمین در بالای یک ذخیره اقتصادی فلزی از ۲۰۰ تا چند هزار نانوتسلا است، بنابراین حساسیت ۱۶۰ نانوتسلا برای اکتشاف یک ذخیره فلزی اقتصادی کاملاً قابل قبول و دقت ± 0.01 نانوتسلا در برداشت‌های مغناطیس‌سنجی به خصوص اکتشاف مگنتیت غیرضروری است. دوم اینکه نرخ نمونه‌برداری مغناطیس‌سنج مرسوم پروتون بسیار پایین است. به گونه‌ای که زمان مورد نیاز برای برداشت داده در هر ایستگاه حدوداً بین دو تا پنج ثانیه گسسته انجام می‌شود. زمان زیاد مورد نیاز برای برداشت هر

جدول ۱: مقایسه مشخصات فنی حسگر مورد استفاده در این مطالعه و مغناطیس‌سنج پروتون

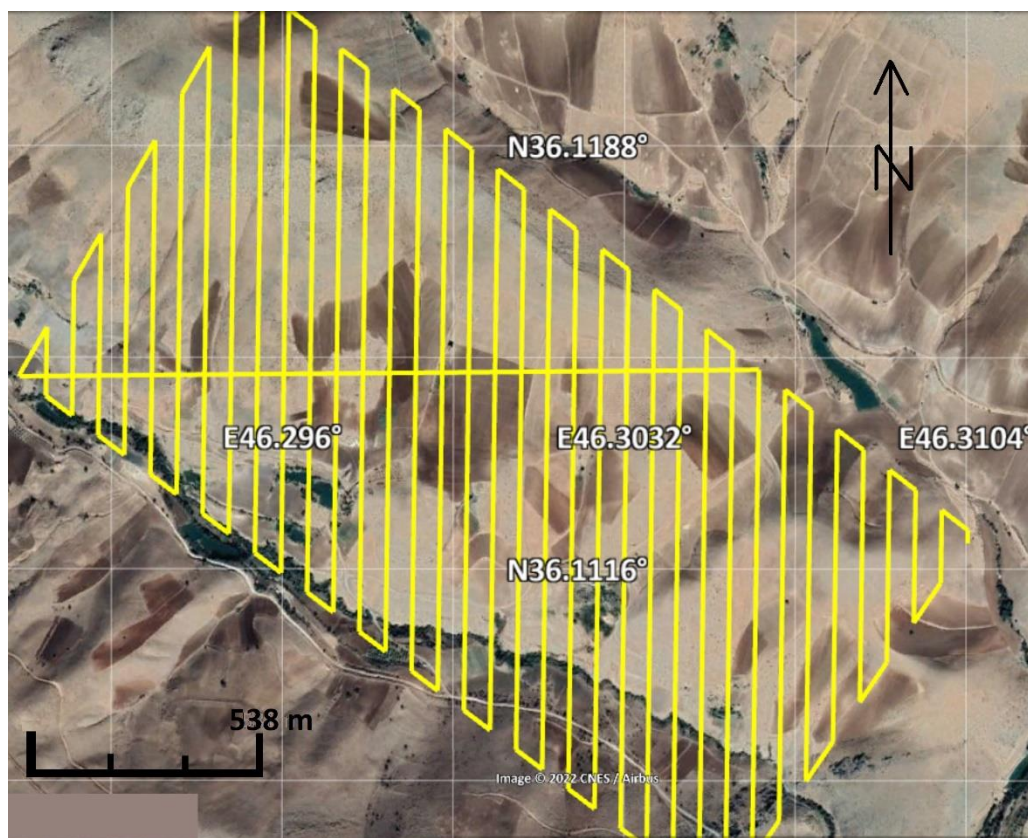
وزن (g)	اندازه (mm)	مصرف نیرو (W)	حساسیت	بازه اندازه گیری (nT)	حسگر ممز
<4	26×26.3	<0.5	± 160 nT	± 110000	حسگر ممز
2200	223×69×240	31	± 10 pT	20000 to 120000	پروتون

مورد مطالعه را می‌پوشانند. این پروفیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار میشن پلنر^{۱۱} که یک نرم‌افزار منبع باز برای هدایت پهبادهای است، طراحی شده‌اند. طول کل پروفیل‌های پیشنهادی حدود ۳۰ کیلومتر است. فاصله بین پروفیل‌های برداشت ۵۰ متر انتخاب شده است. این فاصله در مرحله اولیه اکتشاف مناسب به نظر می‌رسد. با تعیین نقاط امیدبخش، در مرحله بعدی اکتشاف برای مدل‌سازی ذخیره معدنی و به دست آوردن ذخیره ژئوفیزیکی با خطای قابل قبول، باید فاصله بین پروفیل‌ها را کمتر در نظر گرفت. محدوده برداشت در برخی نقاط توپوگرافی شدیدی دارد و تغییرات ارتفاعی از ابتدا تا انتهای پروفیل گاه زیاد است.

حین برداشت با توجه به سهولت برداشت با استفاده از حسگرهای ممز سعی بر آن شد تا فاصله‌ای بیشتر از ابتدا و انتهای پروفیل‌های طراحی شده پیشنهادی، برداشت شود تا اطمینان حاصل گردد مقدار شدت میدان مغناطیسی به مقدار زمینه رسیده است. هر چند باتری و حافظه دستگاه طراحی شده به گونه است که می‌توان تمامی پروفیل‌ها را به یک باره و

که بر روی GPS‌های دستی از قبل ذخیره شده است، شروع به حرکت می‌کند. در صورت طولانی بودن یک پروفیل و برای استراحت، اپراتور می‌تواند در انتهای پروفیل برداشت برای مصرف کمتر باتری، حسگر و GPS را خاموش کند، سپس با رسیدن به ابتدای پروفیل بعدی آنها را بدون اینکه لازم باشد داده‌های ثبت شده روی کارت حافظه را تخلیه کند، روشن کند، زیرا داده‌های برداشت شده جدید در انتهای داده‌های برداشت شده قبلی ثبت می‌شوند.

محدوده مورد مطالعه یک چهارضلعی مستطیل شکل است. طول این مستطیل که در جهت شمال غربی- جنوب شرقی قرار گرفته است حدود ۱۸۰۰ متر و عرض این مستطیل حدود ۸۰۰ متر است. شکل ۴ محدوده مورد نظر را روی نقشه گوگل ارث نشان می‌دهد. در محدوده مورد مطالعه تعداد ۲۷ پروفیل برداشت با طول ۱۳۸ متر تا ۱۰۰۰ متر پیشنهاد شده است. در این مطالعه پروفیل‌ها در جهت شمال- جنوب طراحی شده‌اند. به این ترتیب همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است خطوط پروفیل به صورت مورب مستطیل محدوده



شکل ۴: مسیرهای پیشنهادی پروفیل‌ها برای برداشت با استفاده از حسگرهای ممز [۲۶]

۱۱۳۴۴۵۰ عدد است. به همین ترتیب فاصله بین نمونه‌ها در امتداد پروفیل‌ها بین ۱٫۵ تا ۳٫۶ سانتی‌متر است. لازم به ذکر است که این فاصله اندک نمونه‌برداری به لطف نرخ بالای نمونه‌برداری حسگر مقدور گردیده است، به گونه‌ای که در امتداد پروفیل اندازه‌گیری‌های انجام شده در مقایسه با مغناطیس‌سنج پروتون به نوعی پیوسته است.

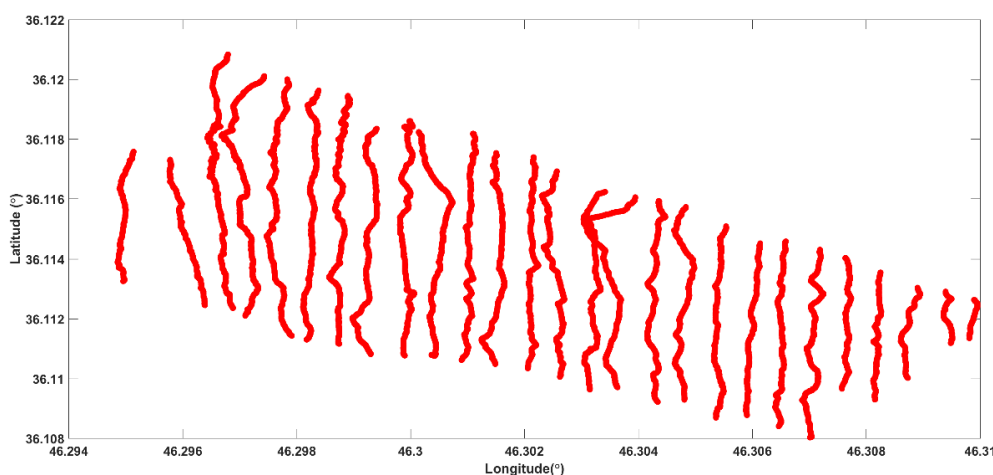
۴- پردازش داده‌های برداشت شده

اولین مرحله از پردازش داده‌ها بعد از وارد کردن داده‌ها به نرم‌افزار اوسیسی مونتاژ حذف پرش‌ها از روی داده‌ها است. بعد از این مرحله داده‌ها آماده تولید شبکه^{۱۲} هستند. در این مرحله شدت کل میدان مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار اوسیسی مونتاژ تولید می‌شود. شکل ۶ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دوقطبی یک بی‌هنجاری با جهت شرقی- غربی بر روی این نقشه ظاهر شده است. البته بی‌هنجاری‌های کوچک دیگری نیز به صورت پراکنده بر روی این نقشه ظاهر شده‌اند که اهمیت کمتری دارند. لازم به ذکر است که داده‌های برداشت شده اندکی دچار خطای هم‌ترازی^{۱۳} شده‌اند. هرچند می‌توان خطای هم‌ترازی نشان داده شده در نقشه شکل ۶ را تا حد زیاد با استفاده از روش‌های معرفی شده مرتفع کرد، اما در اینجا ترجیح داده شده است این نوع تصحیح بر روی داده‌ها پیاده‌سازی نشود. نتایج حاصل از برداشت‌های قبلی با مغناطیس‌سنج پروتون در این محدوده در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. این نقشه نیز با استفاده از

به صورت پیوسته برداشت کرد، اما برای چک کردن داده‌های برداشت شده و نیز استراحت اپراتور، برداشت‌ها از قسمت جنوبی پروفیل‌های طراحی شده شروع شده و یک پروفیل به سمت شمال و پروفیل مجاور به سمت جنوب برداشت شده است، سپس داده‌های این دو پروفیل بر روی یک رایانه ذخیره می‌شدند. در مرحله بعد دو پروفیل بعدی برداشت می‌شدند. واضح است که حین جابه‌جا شدن بین پروفیل‌ها، یعنی در قسمت شمالی پروفیل‌ها، به خاموش کردن حسگر نیاز نیست. به همین دلیل پروفیل‌های برداشت در انتها به ابتدای پروفیل کناری متصل شده‌اند. برای پردازش داده‌های مغناطیسی بهتر است داده‌های برداشت شده حین جابه‌جایی بین دو پروفیل حذف شوند. در شکل ۵ مسیرهای طی شده به وسیله اپراتور را در امتداد پروفیل‌ها نشان می‌دهد. تغییرات عرضی مشاهده شده روی پروفیل‌ها به دلیل جابه‌جایی اپراتور برای یافتن مسیر پروفیل بر روی GPS دستی خود و یا عبور از موانع طبیعی هستند.

طول هر یک از پروفیل‌های برداشت شده به وسیله حسگر و زمان برداشت هر پروفیل در جدول ۲ خلاصه شده است. زمان برداشت هر پروفیل با توجه به داده‌های GPS تعیین شده است. با توجه به طول برداشت شده هر پروفیل و تعداد نمونه‌های برداشت شده در امتداد پروفیل مربوطه می‌توان فاصله بین نمونه‌ها را نیز تعیین کرد.

همان‌طور که در جدول ۲ ذکر شده است، طول زمان برداشت داده‌ها برای ۲۷ پروفیل حدود هشت ساعت و نیم، طول پروفیل‌ها ۲۳۲۱۱ متر و تعداد نمونه‌های برداشت شده



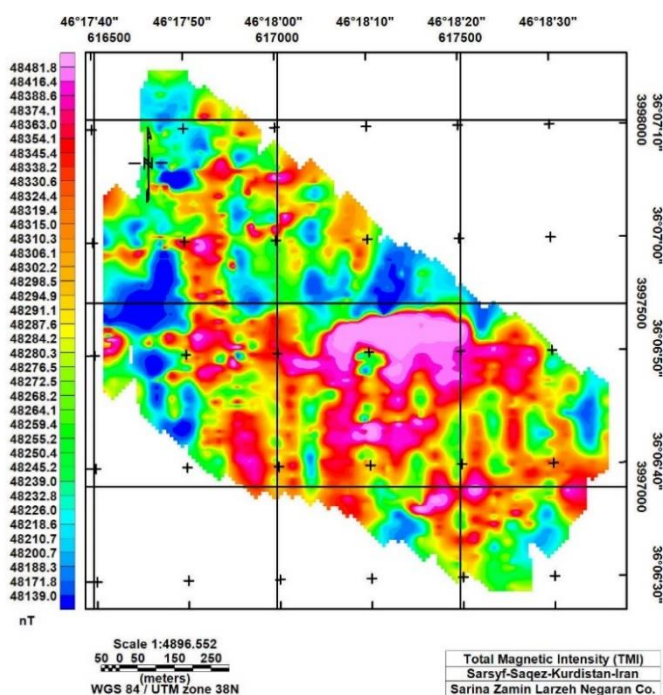
شکل ۵: مسیر پروفیل‌های برداشت شده با حسگر به وسیله اپراتور

جدول ۲: اطلاعات مربوط به برداشت داده‌ها در امتداد پروفیل‌ها

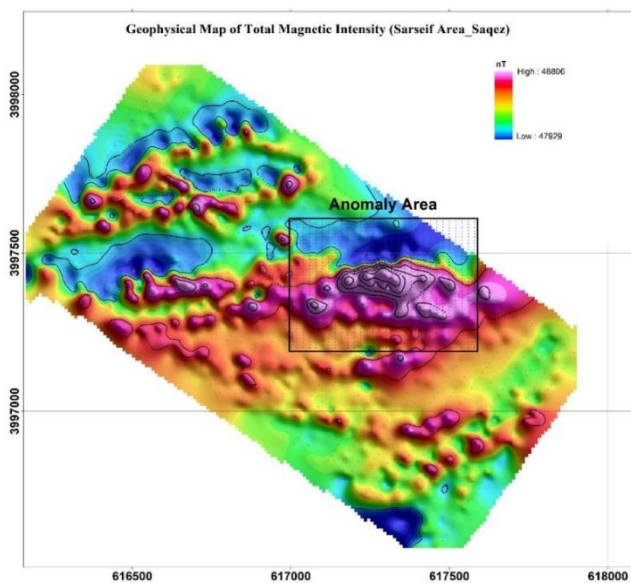
شماره پروفیل	زمان ثبت شده در ابتدای پروفیل برداشت (به وقت گرینویچ)	زمان ثبت شده در انتهای پروفیل برداشت (به وقت گرینویچ)	طول زمان برداشت داده در امتداد پروفیل‌ها	تعداد نمونه‌های برداشت شده (عدد)	فاصله نمونه‌های برداشت شده از هم (سانتیمتر)	طول پروفیل برداشت (متر)
۱	۰۶:۲۹:۴۰	۰۶:۳۴:۰۹	۰۰:۰۴:۲۹	۱۰۰۰۱	۱٫۵	۱۴۱
۲	۰۶:۳۵:۵۶	۰۶:۳۹:۵۹	۰۰:۰۴:۰۳	۹۰۰۱	۲	۲۴۷
۳	۰۶:۴۱:۰۶	۰۶:۴۹:۵۱	۰۰:۰۸:۴۵	۱۹۵۰۱	۱٫۳	۳۶۲
۴	۰۷:۰۰:۵۹	۰۷:۱۵:۲۱	۰۰:۱۵:۳۸	۳۲۰۰۱	۲٫۲	۴۷۸
۵	۰۷:۱۸:۰۳	۰۷:۳۱:۳۰	۰۰:۱۳:۲۷	۳۰۰۰۱	۲	۶۰۵
۶	۰۷:۴۸:۴۶	۰۸:۱۰:۰۳	۰۰:۲۲:۷۰	۴۷۳۴۰	۱٫۵	۷۰۰
۷	۰۸:۱۳:۳۹	۰۸:۲۷:۰۶	۰۰:۱۳:۲۷	۳۰۰۰۱	۲٫۵	۸۱۶
۸	۱۰:۳۸:۵۱	۱۰:۵۷:۱۴	۰۰:۱۹:۳۷	۴۱۰۰۱	۲٫۳	۹۶۵
۹	۱۱:۰۱:۴۴	۱۱:۱۵:۴۵	۰۰:۱۴:۰۱	۳۱۲۲۸	۳٫۳	۱۰۴۱
۱۰	۱۱:۳۰:۲۳	۱۱:۵۶:۵۰	۰۰:۲۶:۲۷	۵۹۰۰۱	۱٫۷	۱۰۴۱
۱۱	۱۱:۵۹:۵۸	۱۲:۱۵:۲۷	۰۰:۱۶:۲۹	۳۴۵۰۱	۳	۱۰۴۱
۱۲	۱۲:۳۹:۳۰	۱۳:۰۳:۱۶	۰۰:۳۲:۴۶	۵۳۰۰۱	۲	۱۰۴۱
۱۳	۱۳:۰۷:۴۵	۱۳:۲۱:۲۴	۰۰:۱۳:۴۹	۳۰۳۳۴	۳٫۴	۱۰۴۱
۱۴	۰۴:۳۹:۲۳	۰۵:۰۱:۵۱	۰۰:۲۲:۲۸	۵۰۰۰۱	۲	۱۰۴۱
۱۵	۰۵:۰۴:۳۲	۰۵:۱۷:۱۱	۰۰:۱۲:۳۹	۲۸۲۶۲	۳٫۶	۱۰۴۱
۱۶	۰۵:۳۱:۰۲	۰۵:۵۵:۱۶	۰۰:۲۴:۱۴	۵۴۰۰۱	۲	۱۰۴۱
۱۷	۰۵:۵۷:۵۸	۰۶:۱۴:۱۴	۰۰:۱۶:۱۶	۳۶۲۴۸	۲٫۸	۱۰۴۱
۱۸	۰۶:۲۱:۱۹	۰۶:۴۶:۰۵	۰۰:۲۴:۴۶	۶۲۰۰۰	۱٫۶	۱۰۴۱
۱۹	۰۶:۵۲:۴۰	۰۷:۰۸:۵۸	۰۰:۱۶:۱۸	۳۶۴۷۵	۲٫۸	۱۰۴۱
۲۰	۰۷:۳۵:۵۸	۰۸:۰۰:۳۶	۰۰:۲۵:۳۸	۵۵۰۰۱	۱٫۹	۱۰۴۱
۲۱	۰۸:۰۵:۰۴	۰۸:۲۷:۵۴	۰۰:۲۲:۵۰	۵۱۱۳۹	۲	۱۰۴۱
۲۲	۰۸:۴۶:۴۶	۰۹:۱۹:۰۰	۰۰:۳۲:۱۴	۷۲۰۰۱	۱٫۴	۱۰۴۱
۲۳	۰۹:۲۳:۰۳	۰۹:۴۳:۰۳	۰۰:۲۰:۰۰	۴۴۷۲۳	۲٫۳	۱۰۴۱
۲۴	۱۰:۲۶:۱۲	۱۱:۰۳:۲۶	۰۰:۳۷:۱۴	۸۳۰۰۱	۱٫۲	۱۰۴۱
۲۵	۱۱:۰۷:۵۵	۱۱:۴۵:۰۱	۰۰:۳۴:۰۶	۸۲۷۸۴	۱٫۲	۱۰۴۱
۲۶	۱۱:۵۶:۲۷	۱۲:۰۹:۲۵	۰۰:۱۱:۳۸	۲۸۹۰۱	۲	۶۰۰
۲۷	۱۲:۱۲:۰۷	۱۲:۲۲:۰۵	۰۰:۰۹:۵۸	۲۳۰۰۱	۲٫۶	۶۰۰
۲۳۲۱۱	جمع		۰۸:۲۶:۲۷	۱۱۳۴۴۵۰	-	۲۳۲۱۱

نرم‌افزار اوسیسی مونتاژ به دست آورده شده است. همان طور که انتظار می‌رفت نقشه شدت کل میدان مغناطیسی حاصل از برداشت با حسگر ممز تا اندازه زیادی با نقشه شدت کل میدان مغناطیسی حاصل از برداشت با مغناطیس‌سنج پروتون انطباق دارد. به ویژه دوقطبی حاصل از بی‌هنجاری اصلی که

مرکز دوقطبی حاصل از آن در مختصات ۶۱۷۲۵۰ شرقی و ۳۹۹۷۴۹۹ شمالی قرار دارد، به خوبی به وسیله حسگر آشکار شده است. دوقطبی‌های کوچک‌تر در جنوب بی‌هنجاری اصلی نیز به خوبی به وسیله داده‌های حسگر ممز ظاهر شده است. در قسمت غربی نقشه شدت کل میدان مغناطیسی به دست



شکل ۶: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی مربوط به داده‌های برداشت شده محدوده سرسیف سقز (که با استفاده از حسگر ممز به دست آورده شده‌اند).



شکل ۷: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی زمین در محدوده سرسیف سقز

بی‌هنجاری‌های این قسمت در ارتباط با یک ذخیره اقتصادی نیستند. داده‌های برداشت شده با استفاده از مغناطیس‌سنجی پروتون در جدول ۳ با برداشت‌های انجام شده با استفاده از حسگر ممز در محدوده مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

آمده از حسگر ممز، دوقطبی‌های حاصل از بی‌هنجاری‌های کوچک به خوبی آشکار نشده‌اند. احتمالاً با برطرف کردن خطای هم‌ترازی، بی‌هنجاری‌های کوچک قسمت غرب هم آشکار می‌شوند. هر چند به نظر می‌رسد به احتمال قوی

جدول ۳: مقایسه برداشت با حسگر ممز و مغناطیس‌سنج پروتون در محدوده مورد مطالعه (که با استفاده از مغناطیس‌سنج پروتون به دست آورده شده‌اند).

نوع مغناطیس‌سنج	هزینه برداشت (بدون واحد)	مدت زمان برداشت (ساعت)	فاصله بین نمونه‌های برداشت شده (متر)	تعداد نمونه‌های برداشت شده (عدد)	
اسکالر	۱۰۰۰	۴۵	۱۰	۲۰۸۵	مغناطیس‌سنج پروتون
برداری	۲۰۰	۸٫۵	۰٫۰۳	۱۱۳۴۴۵	حسگر ممز

پروتون مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد حسگر ممز به خوبی دو قطبی حاصل از بی‌هنجاری اصلی موجود در محدوده مورد مطالعه را آشکار کرده است. همچنین در صورت برطرف کردن خطای هم‌ترازی بی‌هنجاری‌های کوچک موجود در محدوده مورد مطالعه را به احتمال زیاد آشکار خواهد کرد. علاوه بر این در این تحقیق نشان داده شد که با استفاده از حسگرهای ممز می‌توان زمان و هزینه عملیات صحرایی مغناطیس‌سنجی را به ترتیب حدود یک چهارم و یک پنجم روش‌های مرسوم کاهش داد. این در حالی است که داده‌های برداشت شده با حسگر ممز تقریباً پیوسته برداشت شده‌اند. همچنین اندازه کوچک حسگر ممز این اجازه را می‌دهد تا بدون جلب توجه معارضین عملیات مغناطیس‌سنجی در محدوده دلخواه انجام شود.

۶- مراجع

- [1] Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. (2002). "An introduction to geophysical exploration, 3rd Edition". Wiley-Blackwell.
- [2] Lowrie, W. (2007). "Fundamentals of Geophysics". Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807107>.
- [3] Ripka, P. (2001). "Magnetic sensors and magnetometers". In Book: IOP Publishing Ltd, Measurement Science and Technology, 13(4): 645. DOI: 10.1088/0957-0233/13/4/707.
- [4] GEM Systems, Inc. (2015). "GSM-19 v7.0 Instruction Manual Manual Release 7.4. 949, 0-12". www.gemsys.ca/pdf/GSM-19T v7.0-1.pdf.
- [5] Hardwick, C. D. (1984). "Non-oriented cesium sensors for airborne magnetometry and gradiometry". Geophysics, 49(11): 2024-2031. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1441613>.
- [6] Lebedev, V., Hartwig, S., and Middelmann, T. (2020). "Fast and robust optically pumped cesium

اعداد جدول ۳ در واقع بیان‌کننده مزایای حسگر ممز در یک برداشت مغناطیس‌سنجی است. فاصله نمونه‌ها در برداشت با حسگر ممز، از یکدیگر به گونه است که می‌توان این نوع برداشت را به صورت پیوسته در نظر گرفت. باتوجه به فاصله کم نمونه‌ها در برداشت با حسگر ممز واضح است که در این حالت تعداد نمونه‌های برداشت شده در امتداد یک پروفیل بسیار بیشتر از تعداد داده‌های برداشت شده با مغناطیس‌سنج پروتون است. از این مهم‌تر، زمان انجام عملیات صحرایی است. این زمان برای برداشت با حسگر ممز تقریباً یک چهارم برداشت با مغناطیس‌سنج پروتون است. علاوه بر کاهش زمان عملیات صحرایی، هزینه برداشت داده با استفاده از حسگر ممز حدود یک پنجم هزینه برداشت با مغناطیس‌سنج پروتون است. علاوه بر این‌ها با توجه به این که حسگر ممز از نوع برداری است، می‌توان اطلاعاتی مانند جهت بردار میدان مغناطیسی زمین را نیز از روی داده‌های برداشت شده استخراج کرد. استخراج چنین اطلاعاتی از داده‌های برداشت شده با مغناطیس‌سنج پروتون اصولاً امکان‌پذیر نیست، زیرا مغناطیس‌سنج پروتون یک مغناطیس‌سنج اسکالر است. همچنین اطلاعات اضافی مانند دما فقط برای داده‌های حسگر ممز فراهم شده است.

۵- نتیجه‌گیری

به کارگیری حسگرهای میکروالکترومکانیکی در مغناطیس‌سنجی در ابتدای راه خود قرار دارد و حساسیت آنها به اندازه مغناطیس‌سنج‌های مرسوم نیست، اما از آنجایی که در مرحله پی‌جویی مواد معدنی، هزینه اندک و سرعت روش ژئوفیزیکی باید از مشخصه‌های اصلی آن روش ژئوفیزیکی باشد، از این منظر بررسی امکان استفاده از حسگرهای ممز مورد توجه است. در این مطالعه یکی از دقیق‌ترین و کم‌خطاترین حسگر میکروالکترومکانیکی انتخاب شده است، سپس بر روی یک ذخیره فلزی داده‌هایی برداشت شده است. این برداشت‌ها با برداشت‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از مغناطیس‌سنج

- [17] Michelena, M. D. (2013). "Commercial off-the-shelf GMR based sensor on board optos picosatellite". In: Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Vol. 6. Springer, Berlin, Heidelberg, 181-210. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37172-1_8.
- [18] Lei, C., Sun, X.-C., and Zhou, Y. (2018). "Noise analysis and improvement of a micro-electro-mechanical-systems fluxgate sensor". *Measurement*, 122: 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.007>.
- [19] Min, Y.-J., Kwon, C.-K., Kim, H.-K., Kim, C., and Kim, S.-W. (2012). "A CMOS magnetic hall sensor using a switched biasing amplifier". *IEEE Sensors Journal*, 12(5): 1195-1196. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2169055>.
- [20] Yang, S., and Zhang, J. (2021). "Current progress of magnetoresistance sensors". *Chemosensors*, 9(8): 211. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors9080211>.
- [21] Ripka, P. (2008). "Improving the accuracy of magnetic sensors". In Book: *Sensors*, Springer Berlin Heidelberg, 45-60. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69033-7_3.
- [22] Gunn, P. J., and Dentith, M. C. (1997). "Magnetic responses associated with mineral deposits". *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 145-158.
- [23] Google Map. Accessed: Dec. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps>.
- [24] Nabavi, M. H. (1976). "History of Iran geology". Geological Survey and Mineral Exploration Country, pp. 109.
- [25] Aghanabati, A. (2004). "The geology of Iran". Geological Survey of Iran, Tehran, pp. 586.
- [26] Google Earth. Accessed: Aug. 19, 2018. [Online]. Available: <http://www.google.com/earth/index.html>.
- [7] Breiner, S. (1965). "The rubidium magnetometer in archeological exploration". *Science*, 150(3693): 185-193. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.150.3693.185>.
- [8] Ji, Y., Shang, J., Li, G., Zhang, J., and Zhang, J. (2020). "Microfabricated shaped rubidium vapor cell for miniaturized atomic magnetometers". *IEEE Sensors Letters*, 4(2): 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/LSENS.2020.2965737>.
- [9] Dang, H. B., Maloof, A. C., and Romalis, M. V. (2010). "Ultra-high sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer". *Applied Physics Letters*, 97(15): 151110. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3491215>.
- [10] Khosravi, K., Alizadeh, M. S., and Pourmahdian, H. (2020). "Comparison of a designed scalar proton precession magnetometer with a scalar calibrated 3-axis fluxgate magnetometer". 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9261049>.
- [11] Kubik, J., Pavel, L., Ripka, P., and Kaspar, P. (2015). "Low-power PCB fluxgate sensor". *Sensors*, 2005 IEEE, Irvine, CA, USA, 432-435. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2005.1597728>.
- [12] Bennett, J. S., Vyhnalek, B. E., Greenall, H., Bridge, E. M., Gotardo, F., Forstner, S., Harris, G. I., Miranda, F. A., and Bowen, W. P. (2021). "Precision magnetometers for aerospace applications: A review". *Sensors*, 21(16): 5568. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21165568>.
- [13] 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.06.005>.
- [14] Lai, W.-H., Li, B., Fu, S.-H., and Lin, Y.-S. (2023). "Tunable MEMS-based terahertz metamaterial for pressure sensing application". *Micromachines*, 14(1): 169. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14010169>.
- [15] Ma, Z., Qian, R., Wang, Y., Zhang, J., Liu, X., and Ling, J. (2022). "UAV source: A new economical and environmentally friendly source for seismic exploration in complex areas". *Journal of Applied Geophysics*, 204: 104719. DOI: [10.1016/J.JAPPGEO.2022.104719](https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2022.104719).
- [16] Tanaka, M. (2007). "An industrial and applied review of new MEMS devices features". *Microelectronic Engineering*, 84(5-8): 1341-1344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.232>.

¹ Micro fluxgate² Hale effect magnetometr³ Magneto-resistant⁴ Optos Picosat⁵ Amorphous⁶ Hall effect⁷ Complementary metal-oxide semiconductor (CMOS)⁸ Anisotropic Magnetoresistance (AMR)

⁹ Inter-Integrated Circuit (I2C)

¹⁰ Serial Peripheral Interface

¹¹ Mission Planner

¹² Gridding

¹³ Levelling