بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

اندازه‌گیری بردار میدان مغناطیسی زمین با حساسیت نانوتسلا بر پایه مگنتومتر اتمی

امین زمانی[۱]، ملیحه رنجبران[۱]، محمد مهدی طهرانچی[۱و۲]، سید محمد حسین خلخالی[۳] و سیده مهری حمیدی[۱]

[۱] پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران
[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران، ایران
[۳] دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
Ami.zamani@sbu.ac.ir, m_ranjbaran@sbu.ac.ir, Teranchi@sbu.ac.ir, m_khalkhali@khu.ac.ir, m_hamidi@sbu.ac.ir

چکیده – مگنتومترهای اتمی با توجه به برخورداری از حساسیت بسیار بالا، کاربردهای بسیاری در اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی زمین یافته‌اند. در این اندازه‌گیری‌ها، از روش‌های مختلفی برای خنثی کردن میدان مغناطیسی زمین استفاده می‌گردد. در این مقاله روشی بر مبنای یافتن حداقل میدان مغناطیسی از طریق تولید میدان مخالف توسط سه جفت پیچه هلمهولتز و یافتن کمینه بسامد تشدید مگنتومتر اتمی ارائه شده است. با استفاده از این روش، مقدار دقیق اندازه بردار میدان مغناطیسی زمین برای محیط آزمایشگاه ۳۵/۱۳۲ μT با حساسیت ۲ nT بدست آمده است.

کلید واژه- اثر زیمان، مگنتومتر اتمی، میدان مغناطیسی زمین، پیچه‌های هلمهولتز

Earth Magnetic Field Vector Measurement with Nano-Tesla Sensitivity Based on Atomic Magnetometers

Amin Zamani[1], Maliheh Ranjbaran[1], Mohammad Mehdi Tehranchi[1,2], Seyed Mohammad Hosein Khalkhali[3], Seyedeh Mehri Hamidi[1]

[1] Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Physics Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[3] Physics Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

Abstract- Atomic magnetometers have found widespread applications in precise measurement of Earth's magnetic field due to their high sensitivity. In theses measurements, various methods have been utilized to compensate the Earth's magnetic field. In this paper, a method based on finding the minimum magnetic field by producing the opposite field through three pairs of Helmholtz coils and minimizing resonance frequency of the atomic magnetometer, has been proposed. Using this method, the exact value of Earth magnetic field vector is obtained as 35.132 *μT* with a sensitivity of 2 nT.

Keywords: Zeeman Effect, Atomic magnetometers, Earth magnetic field, Helmholtz coils

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

مقدمه

میدان مغناطیسی زمین یکی از مهم‌ترین عوامل اساسی وجود حیات بر روی کره‌ی زمین است. اندازه‌گیری این میدان و تغییرات آن با دقت بالا در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود معطوف ساخته است. اهمیت این موضوع در دریانوردی، هوانوردی، اکتشاف و مطالعه ذخایر مواد معدنی و حتی نظارت بر انرژی گرمایی زمین ظاهر می‌شود [۱]. تاکنون برای اندازه‌گیری دقیق میدان مغناطیسی زمین از مگنتومترهای دریچه شار، مگنتومترهای حرکت تقدیمی پروتون [۲] و در سال‌های اخیر از مگنتومترهای دمش اپتیکی [۳ و ۴] استفاده شده است. مگنتومترهای دمش اپتیکی بر اساس اندازه‌گیری بسامد حرکت تقدیمی لارمور قطبش اسپینی بخار یک فلز قلیایی در میدان مغناطیسی و انرژی مربوط به شکافتگی اثر زیمان کار می‌کنند. جهت تولید قطبش اسپینی، از پدیده دمش اپتیکی استفاده می‌شود که توسط آن، اتم‌های قلیایی در بالاترین زیرتراز تراز پایه جمع می‌شوند. با اعمال یک میدان مغناطیسی نوسانی ثانویه (RF) و جاروب کردن بسامد آن، در انرژی معادل با انرژی شکافتگی زیمان ناشی از میدان زمینه، جذب ناگهانی و یا تشدید رخ می‌دهد. بسامد مربوط به نقطه عطف مؤلفه هم‌فاز (X) و یا بیشینه مؤلفه ناهم‌فاز (Y) منحنی تشدید، بیانگر بسامد حرکت تقدیمی لارمور و به عبارتی اندازه میدان مغناطیسی اعمالی است [۵].

در این مقاله، روشی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین با استفاده از مگنتومترهای اتمی در فضای بدون محافظ مغناطیسی ارائه شده است. با توجه به این‌که در بسامدهای بالا، عملکرد مگنتومترهای اتمی در اثر افزایش واهلش و گرادیان میدان محدود می‌شود، اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین (چند ده میکرو تسلا) که معادل با بسامد تشدیدی در حدود چند صد کیلوهرتز است، در فضای باز کار آسانی نیست. به همین دلیل در ابتدا میدان مغناطیسی بر روی سلول فلز قلیایی به حداقل مقدار ممکن رسانده می‌شود. بدین منظور سه جفت پیچه‌ی هلمهولتز مربعی طراحی و ساخته شد. سپس با استفاده از حسگر اثر هال، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین تخمین زده شد. در نهایت، با اعمال میدان مخالف از طریق پیچه‌های هلمهولتز و استفاده از الگوریتم یافتن میدان صفر توسط مگنتومتر اتمی، به حداقل میدان در مرکز مجموعه دست یافتیم. در این حالت میدانی که هر جفت پیچه هلمهولتز تولید می‌کنند، معادل با مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین می‌باشد.

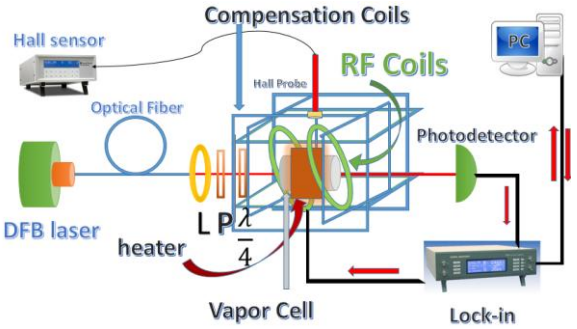
چیدمان اندازه‌گیری

چیدمان اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین در شکل ۱ نشان داده شده است. قلب مگنتومتر اتمی یک سلول شیشه‌ای حاوی فلز قلیایی روبیدیوم است که دارای ۵۰ میلیمتر طول و ۲۵ میلیمتر قطر می‌باشد. به منظور ایجاد بخار روبیدیوم، این سلول به وسیله‌ی گرماساز الکتریکی گرم می‌شود. سلول شامل هر دو ایزوتوپ روبیدیوم با فراوانی‌های طبیعی است. برای دمش اتم‌های روبیدیوم، از لیزر موج پیوسته که بر روی گذار خط جذبی D_1 اتم روبیدیوم (با طول موج مرکزی ۷۹۴/۸ nm) تنظیم شده است، استفاده می‌کنیم.

نور لیزر پس از عبور از فیبر نوری و یک عدسی موازی می‌شود. پس از آن با عبور از قطبش‌گر و تیغه‌ی ربع‌موج دارای قطبش دایروی شده و در نهایت پس از عبور از سلول بخار قلیایی، از طریق فیبر وارد آشکارساز نوری می‌شود. این آشکارساز تغییرات شدت نور را به ازای اعمال میدان مغناطیسی ثبت می‌کند. پیچه اعمال میدان نوسانی به منظور برانگیختن حرکت تقدیمی اسپین‌ها حول میدان ثابت، در اطراف سلول قرار داده شده است. از سه جفت پیچه هلمهولتز مربعی عمود بر هم، برای تولید میدان مغناطیسی در طول محور پیچه‌ها استفاده شده است.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

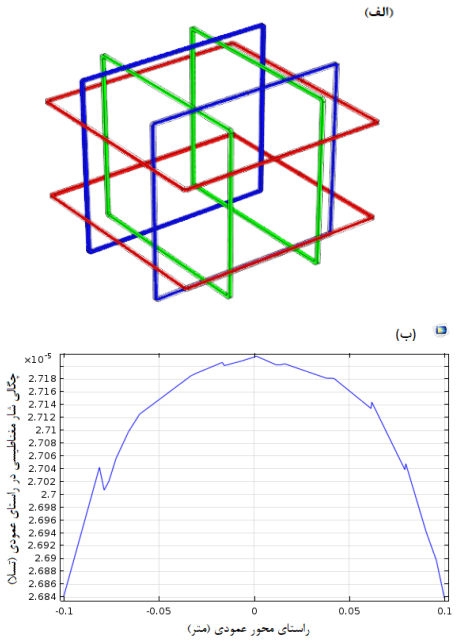


شکل۱- چیدمان اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین

برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تقریبی در هر سه راستای محور مختصات از حسگر اثر هال با دقت μT ۲ استفاده شده است. پیچه‌های هلمهولتز میدان را در مرکز به طور تقریبی خنثی می‌کنند. در ادامه‌ی کار، بسامد میدان نوسانی اعمال شده، حول بسامد لارمور میدان زمینه جاروب می‌شود. با خواندن مؤلفه‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز خروجی آشکارساز نوری از روی تقویت‌کننده‌ی قفل مدی، بسامد حرکت تقدیمی مربوط به میدان مغناطیسی بدست می‌آید.

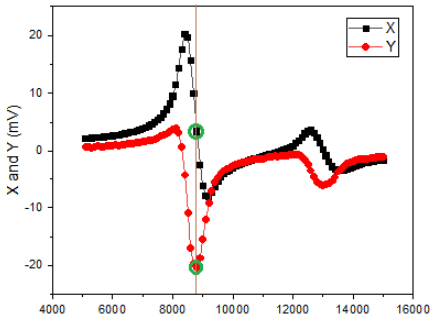
نتایج تجربی

سه جفت پیچه‌ی هلمهولتز مربعی طراحی شده توسط نرم‌افزار کامسول در شکل ۲-الف نشان داده شده است. به منظور تولید میدان مغناطیسی یکنواخت از مرتبه میدان مغناطیسی زمین و کاهش گرادیان میدان در ابعاد سلول بخار قلیایی، برای پیچه‌ها ابعاد ۵۶، ۵۸ و۶۰ سانتی‌متر و برای هر یک ۲۰ دور بدست آمده است. در شکل ۲-ب، توزیع یکنواختی میدان مغناطیسی برای یکی از سه جفت پیچه‌ی هلمهولتز مربعی در مرکز پیچه‌ها نشان داده شده است. ابعاد پیچه‌ها به نحوی انتخاب شده است که به اندازه ابعاد سل در مرکز پیچه‌ها میدان مغناطیسی کاملاً یکنواخت باشد. با استفاده از رابطه‌ی $H[\%]=\frac{B_i-B_0}{B_0}*100$ [۶]، یکنواختی (H) یا تغییرات میدان در ابعاد سلول در مرکز مجموعه ۰/۰۹۸ درصد بدست می‌آید.



شکل۲- شبیه سازی سه جفت پیچه هلمهولتز برای تولید میدان مغناطیسی در مرکز مجموعه (الف) و توزیع میدان مغناطیسی در مرکز پیچه‌ها برای یکی از سه جفت پیچه‌های هلمهولتز (ب).

شکل ۳ نمودار تشدید بدست آمده از مگنتومتر اتمی را، در حالتی که میدان مغناطیسی با استفاده از حسگر اثر هال به طور تقریبی خنثی شده است، نشان می‌دهد. در این شکل X و Y به ترتیب نشان‌دهنده مؤلفه‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز منحنی تشدید می‌باشند. نقطه‌ی سبز رنگ بیانگر بسامد تشدید kHz ۸/۸۰±۰/۰۹ است که توسط رابطه‌ی $\omega=\gamma B$ با میدان مغناطیسی μT ۱/۹۱۳ متناسب است. ω بسامد تشدید، B میدان مغناطیسی و γ ضریب ژیرومغناطیسی است که Hz/T ۰/۴۶×۱۰^{۱۰} می‌باشد.



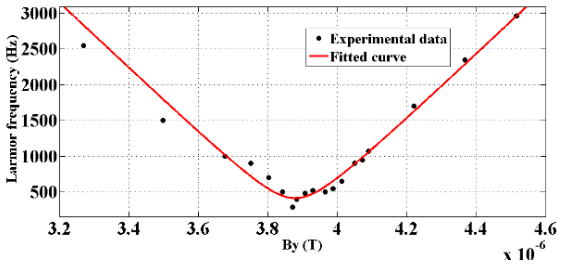
شکل۳- نمودار تشدید مگنتومتر در فضای باز در بسامد بالا

حال به وسیله الگوریتم یافتن میدان صفر، میدان مغناطیسی را در مرکز به حداقل می‌رسانیم. در این الگوریتم، پس از اعمال میدان‌های خنثی سازی اولیه،

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

بسامد میدان نوسانی را جاروب کرده و بسامد تشدید را بدست می‌آوریم. سپس میدان مغناطیسی کوچک dB را به یکی از سه جفت پیچه‌ی هلمهولتز اعمال می‌کنیم. دوباره بسامد را جاروب کرده و بسامدهای تشدید را در این حالت و حالت قبلی با هم مقایسه می‌کنیم. در صورتی که بسامد تشدید کاهش یافته بود، dB را دو برابر کرده و مراحل را تکرار می‌کنیم و اگر افزایش یافته بود، dB را نصف کرده و مخالف جهت اولیه اعمال می‌کنیم. در نهایت بسامد تشدید بدست آمده بسامدی است که تا حد امکان کاهش یافته است.



شکل۴- منحنی تغییرات بسامد تشدید حول میدان صفرکننده راستای y

شکل ۴، تغییرات بسامد تشدید به ازای اعمال جریان به پیچه‌های هلمهولتز برای یافتن کمینه بسامد تشدید توسط الگوریتم را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن مقادیر محور افقی در این شکل، با کمک رابطه‌ی $B_z(0)=\frac{4\mu_0 NI}{1.2965\pi\sqrt{2.2965a}}$، جریان اعمالی به پیچه‌ها به میدان مغناطیسی تبدیل شده است [۶].

به منظور یافتن میدان صفر کننده در هر راستا (اندازه میدان مغناطیسی زمین در آن راستا)، تابعی به صورت $\gamma\sqrt{a^2+(B_y-b)^2}$ بر روی داده‌های شکل ۴ برازش شده است که $a^2=B_x^2+B_z^2$. مقدار پارامتر b که ۳/۸۹۰ μT بدست می‌آید، نشانگر اندازه میدان زمین در راستای محور y می‌باشد. به همین ترتیب مؤلفه‌های x و z بردار میدان مغناطیسی با اندازه‌های ۱۵/۴۳۳ μT و ۳۱/۳۲۰ بدست می‌آید. با توجه به اینکه بسامد تشدید با دقت ۱۰ Hz بدست آمده است، میدان مغناطیسی زمین با دقت ۲ nT محاسبه می‌شود.

نتیجه‌گیری

به‌کارگیری مگنتومترهای اتمی با حساسیت بالا، در اندازه‌گیری دقیق بردار میدان مغناطیسی زمین و تغییرات آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله روشی برای اندازه‌گیری دقیق بردار میدان مغناطیسی زمین در فضای باز، از طریق یافتن میدان صفر، ارائه شده است. در این روش که بر پایه کاهش بسامد تشدید در مگنتومتر اتمی بنا نهاده شده، با اعمال جریان به پیچه‌های هلمهولتز مربعی، میدان زمین خنثی شده و بدین طریق اندازه آن در هر راستا بدست می‌آید. در این تحقیق، اندازه‌ی بردار میدان مغناطیسی زمین در آزمایشگاه ۳۵/۱۳۲ μT با دقت ۲ nT بدست آمده است.

مرجع‌ها

[1] R. Čop, D. Fefer, "Nature of Earth's magnetic field and its application for commercial flight navigation", *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, Springer, Dordrecht, 2006, pp. 115-126.

[2] K. Korth, K. Strohbehn, F. Tejada, A. G. Andreou, J. Kitching, S. Knappe, S. J. Lehtonen, S. M. London, and M. Kafel, "Miniature atomic scalar magnetometer for space based on the rubidium isotope 87Rb", J. Geophys. Res: Space Physics, 121 (2016) 7870-7880.

[3] J. M. Leger, F. Bertrand, T. Jager, M. L. Prado, I. Fratter, and J. C. Lalaurie. "Swarm absolute scalar and vector magnetometer based on helium 4 optical pumping." Procedia Chem. 1 (2009) 634-637.

[4] S. J.Seltzer and M. V. Romalis," Unshielded three-axis vector operation of a spin-exchange-relaxation-free atomic magnetometer", Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 4804-4806

[5] M. Ranjbaran, M.M. Tehranchi, S.M. Hamidi, S.M.H. Khalkhali, Harmonic detection of magnetic resonance for sensitivity improvement of optical atomic magnetometers, J. Magn. Magn. Mater. 424 (2017) 284–290.

[6] A. Restrepo, F. Andres, F. M. Edinson, and R. P. J. Carlos "Study and analysis of magnetic field homogeneity of square and circular Helmholtz coil pairs: A Taylor series approximation." VI Andean Region International Conference Andescon, Cuenca, Ecuador. 2012.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]