مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای
۷۸، ۱۳۹۵، ۱-۱۱

J. of Nucl Sci. and Tech.
78, 2017, 1-11

# طراحی و ساخت پیچه‌ی هلمهولتز به منظور اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی

**علی رمضانی مقدم*[۱]، محمد لامعی[۱]، جواد رحیقی[۲]**

**۱. پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱٤۱۵۵، تهران ـ ایران**

**۲. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، چشمه‌ی نور ایران، صندوق پستی: ۵۷٤٦-۱۹۳۹۵، تهران ـ ایران**

**چکیده:** شدت و جهت بردار مغناطش آهنرباهای دائمی بعد از ساخت، به دلایل گوناگونی، از شدت و جهت مطلوبی که حین ساخت مورد نظر بوده است اختلاف خواهند داشت. در این مقاله، مراحل طراحی فیزیکی و مکانیکی و سپس ساخت پیچه‌ی هلمهولتز برای اندازه‌گیری شدت و جهت بردار مغناطش در آهنرباهای دائمی به منظور استفاده در ساخت یک آندولاتور تخت برای اولین بار در کشور ارائه شده است. کالیبراسیون پیچه‌ی هلمهولتز با منبع جریان و پروب هال با دقت لازم بحث شده است. دقت اندازه‌گیری شدت بردار مغناطش در راستای محور آسایش آن در حدود ۰٫۰۳٪، و صحت اندازه‌گیری ۰٫۰۱۵٪ به دست آمده است. به کمک پیچه‌ی هلمهولتز، تعداد حدود ۱۶۰ آهنربای دائمی اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های مختلف این آهنرباها ارائه، و از نتایج به دست آمده در ساخت اولین آندولاتور طرح چشمه‌ی نور ایران استفاده شده است.

***کلیدواژه‌ها:*** ***پیچه‌ی هلمهولتز، آهنرباهای دائمی، بردار مغناطش، آندولاتور تخت***

# Design and Fabrication of the Helmholtz Coil for the Permanent Magnet Measurement

**A. Ramezani Moghaddam*[1], M. Lamehi[1], J. Rahighi[2]**

**1. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran**

**2. Iranian Light Source Faeility, P.O. Box: 19395-5746, Tehran – Iran**

**Abstract:** The direction and magnitude of the magnetization of a permanent magnet has some deviation from the desired value after the manufacturing. This paper describes the physical and mechanical designs and finally the manufacturing process of a the Helmholtz coil for the first time in Iran in order to measure the permanent magnets magnetization for using in a planar undulator. The Helmholtz coil calibration has been discussed by using a current source and Hall probe with the necessary precision. The final precision for an easy-axis magnetization measurement is 0.03%, and accuracy is 0.015%. 160 permanent magnet blocks have been measured by the Helmholtz coil. The measurement results of the magnetization components are presented and results are used in fabrication of the first undulator at the ILSF.

***Keywords:*** ***Helmholtz Coil, Permanent Magnets, Magnetization Vector, Planar Undulator***

*email: ramezani23@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۶/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۳/۱۰

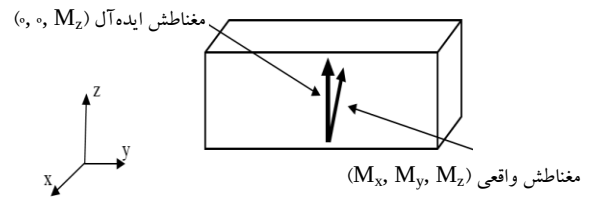
## ۱. مقدمه

امروزه، آهنرباهای دائمی کاربردهای فراوانی در حوزه‌های مختلف از دانش پیدا کرده‌اند. تکنولوژی ساخت آهنرباهای دائمی، پیشرفت مهمی داشته است، به طوری که امروزه، آهنرباهای با ابعاد کوچک و پسماند مغناطیسی[۱] تا ۱٫۳ T و دمای کوری[۲] بالا تا ۲۵۰°C به راحتی قابل تهیه است [۱]. از جمله کاربردهای آهنرباهای دائمی، ساخت قطعات الحاقی[۳] در چشمه‌های نور است. اولین نمونه‌ی آزمایشگاهی آندولاتور[۴] تخت با استفاده از آهنرباهای دائمی NdFeB در چشمه‌ی نور ایران در حال ساخت است [۲، ۳]. به منظور اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی، بهترین ابزار پیچه‌ی هلمهولتز است. آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری مغناطیسی در بسیاری از چشمه‌های نور در سراسر جهان، بسته به نیاز خود، به طراحی و ساخت پیچه‌ی هلمهولتز اقدام می‌کنند [۴-۸].

در این مقاله، ابتدا به طور خلاصه تئوری اندازه‌گیری پسماند مغناطیسی آهنربا با یک پیچه‌ی هلمهولتز ارائه می‌شود. در ادامه، در مورد طراحی فیزیکی پیچه بحث خواهد شد. بعد از طراحی فیزیکی، نوبت به طراحی مکانیکی و فرایند ساخت و کالیبراسیون پیچه‌ی هلمهولتز می‌رسد و نهایتاً نتایج اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی با پیچه، ارائه و بحث خواهد شد. هم‌چنین، علاوه بر استفاده از تجربه‌ی سایر آزمایشگاه‌ها، ساخت پیچه‌ی هلمهولتز و کالیبراسیون آن، براساس مواد اولیه و طراحی جدیدی با تکیه بر امکانات داخلی انجام شده است.

## ۲. تئوری

هدف از اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی، ارزیابی کیفیت آنها است. بردار مغناطش در آهنرباهای دائمی به علت ناهمگونی‌های موجود در ساختار مولکولی مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن و هم‌چنین فرایندهای حین ساخت، نسبت به حالت ایده‌الی که مورد نظر است انحراف خواهد داشت. خطاهای موجود در آهنرباها سبب تولید میدان‌های چندقطبی در آندولاتور می‌شوند و علاوه بر تأثیر برکیفیت هارمونیک‌های تابشی، بر پارامترهای دینامیکی باریکه و پایداری آن، اثر مستقیم می‌گذارند [۴]. در شکل ۱، می‌توان انحراف در شدت و جهت بردار مغناطش نسبت به حالت ایده‌آل را مشاهده کرد.




**شکل ۱.** شدت و جهت میانگین بردار مغناطش آهنربای دائمی در حالت واقعی نسبت به حالت ایده‌آل انحراف دارد.

به بیان دیگر، اگر z محوری است که علاقه‌مندیم بردار مغناطش در آن جهت باشد، بردار مغناطش در حالت واقعی، مؤلفه‌های $M_x$ و $M_y$ هم دارد. هدف از اندازه‌گیری آهنربای دائمی به وسیله‌ی پیچه‌ی هلمهولتز، به دست آوردن همین سه مؤلفه است. بزرگی مؤلفه‌های $M_x$ و $M_y$ نسبت به $M_z$ کوچک‌تر، و بسته به کیفیت آهنربا تا حدود یک هزارم تا یک صدم $M_z$ خواهند بود [۹]. اهمیت اندازه‌گیری این مؤلفه‌ها در ساخت آندولاتور از این نظر است که مؤلفه‌های ناخواسته‌ی آهنرباهای دائمی، سبب تولید میدان‌های مغناطیسی چندقطبی می‌شوند و این میدان‌ها اثر مستقیم روی دینامیک باریکه‌ی الکترونی که از آندولاتور عبور می‌کند، خواهند داشت [۹، ۱۰]. با دانستن مقادیر مؤلفه‌های بردار مغناطش تک‌تک آهنرباها، می‌توان نحوه‌ی چیدمان آهنرباها را طوری تعیین کرد که میدان‌های چندقطبی به حداقل برسند. این فرایند، مرتب‌سازی یا فرایند چیدمان نامیده می‌شود [۱۰]. به منظور اندازه‌گیری دقیق چندقطبی‌ها در میدان نهایی، اندازه‌گیری پیچه‌ی هلمهولتز باید به همان اندازه دقیق باشد. در مورد آندولاتور چشمه‌ی نور ایران که هدف بهینه‌سازی آن برای هارمونیک تابشی اول آن است، رسیدن به این دقت از اندازه‌گیری، قابل دست‌یابی است.

آهنربای دائمی در اثر حرکت یا چرخشی در داخل یک مدار الکترونیکی بسته، سبب تغییر شار مغناطیسی در مدار می‌شود و در نتیجه ولتاژی را در مدار القا می‌کند که طبق قانون فارادی، می‌توان آن را به صورت رابطه‌ی (۱) نشان داد:

$$\int_c E.dl = -\frac{d}{dt}\int_s B.dA \quad \Rightarrow \quad V = -\frac{d\phi}{dt} \qquad (۱)$$

که □ شار مغناطیسی گذرنده از مدار برحسب $wb$، $t$ زمان برحسب $s$، و $V$ ولتاژ القائی در مدار برحسب ولت است. برای

یافتن رابطه‌ی بین شار با بردار ممان مغناطیسی آهنربا، **m**، از تقریب دوقطبی مغناطیسی استفاده می‌شود. فرض می‌شود، طبق شکل ۲، در مختصات استوانه‌ای، $(\rho,\varphi,z)$ یک دوقطبی مغناطیسی جای‌گزیده‌ی نقطه‌ای با ممان **m** در فاصله‌ی $z$ از یک پیچه با شعاع a و تعداد $N$ دور سیم قرار دارد. شار عبوری کل از پیچه، ناشی از حضور **m** را می‌توان از انتگرال‌گیری از میدان مغناطیسی روی سطح حلقه به دست آورد که برابر است با [۱۰]:

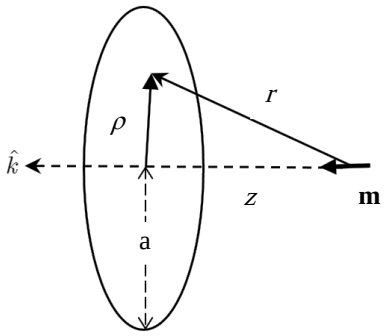
$$\phi(t) = N\int_{\rho=0}^{\rho=a} B_z\, 2\pi\rho\, d\rho = \frac{N\mu_0 m_z(t)}{aG} \qquad (۲)$$

که $G$=۱٫۳۹۷۵۴۲... مقداری ثابت است.

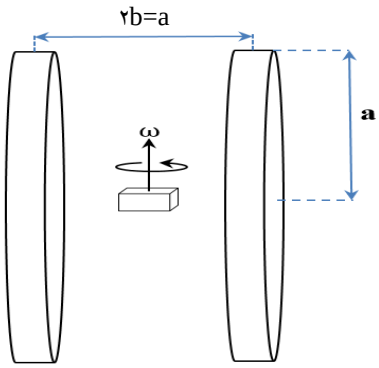
برای محاسبه‌ی ممان مغناطیسی یک آهنربا، نمی‌توان از یک تک‌پیچه استفاده کرد، زیرا آهنربا به دلیل ابعادی که دارد، مانند یک دوقطبی مغناطیسی نقطه‌ای عمل نمی‌کند و حساسیت پیچه نسبت به نقاط مختلف آهنربا متفاوت است. مگر این که شعاع پیچه آن‌قدر بزرگ باشد که آهنربا را بتوان در مقایسه با ابعاد پیچه‌ی نقطه‌ای در نظر گرفت. از آن‌جا که در عمل این حالت امکان‌پذیر نیست، بهترین روش، استفاده از دو پیچه یکسان است به طوری‌که حساسیت کل ناشی از دو پیچه برای نقاط مختلف آهنربا تا حد زیادی یکسان باشد و این همان پیچه‌ی هلمهولتز است. مشتق اول و دوم و سوم میدان مغناطیسی در مرکز پیچه‌ی هلمهولتز نسبت به محور پیچه صفر است و میدان مغناطیسی را با فرض عبور جریان الکتریکی از پیچه می‌توان یکنواخت فرض کرد. روش اندازه‌گیری آهنربا را به طور طرح‌وار در شکل ۳ می‌توان دید. برای چرخش آهنربا به اندازه‌ی زاویه‌ی دلخواهی مثل $\theta=\omega.t$، انتگرال زمانی ولتاژ را می‌توان به صورت زیر نوشت [۶]:

$$\phi(t) = \int V(t)dt = \frac{1}{k}\left[m_v \sin(\theta) + m_h \cos(\theta)\right] \qquad (۳)$$

که $k = \frac{aG}{\mu_0 N}$، ثابت پیچه یا ضریب کالیبراسیون پیچه‌ی هلمهولتز است. کمیت $G$ فاکتور هندسی پیچه است که به ابعاد آن بستگی دارد و طبق شکل ۳ برابر است با $G = \left(1+\left(\frac{2b}{2a}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}$. ثابت G در حالت ایده‌آل که $2b$=a۲ است برابر است با $G$=۱٫۳۹۷۵۴۲... $V(t)$ ولتاژ القائی در لحظه‌ی t، θ زاویه چرخش، و $m_v$ و $m_h$ به ترتیب مؤلفه‌های عمود بر و موازی با محور پیچه‌ی در لحظه‌ی $t=0$ هستند.




**شکل ۲.** موقعیت یک ممان دوقطبی مغناطیسی، $m$، در فاصله‌ی $z$ از مرکز پیچه‌ای با شعاع a و تعداد $N$ دور سیم.




**شکل ۳.** نمای کلی از پیچه‌ی هلمهولتز و پارامترهای اساس آن، ω فرکانس زاویه‌ای چرخش آهنربا در مرکز پیچه است.

میزان حساسیت پیچه یا به بیان دیگر میزان یکنواختی میدان مغناطیسی در مرکز پیچه با فرض عبور جریان از آن، به شعاع آن بستگی دارد. هر چه شعاع بیش‌تر باشد، یکنواختی میدان بیش‌تر خواهد بود. ولی از طرف دیگر، هم سیگنال القائی ضعیف‌تر می‌شود و هم ساخت پیچه‌ی خیلی بزرگ محدودیت دارد و باید شعاع بهینه‌ای انتخاب کرد. معمولاً شعاع پیچه را در حدود ۵ برابر بزرگ‌ترین بُعد آهنربا در نظر می‌گیرند تا از یکنواخت بودن ناحیه‌ی میدان در تمام حجم آهنربا اطمینان حاصل شود. می‌توان نشان داد خطای در اندازه‌گیری شار ناشی از ابعاد آهنربا برابر است با:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = -1.152\left(\frac{\Delta z}{R_m}\right)^4 \qquad (۴)$$

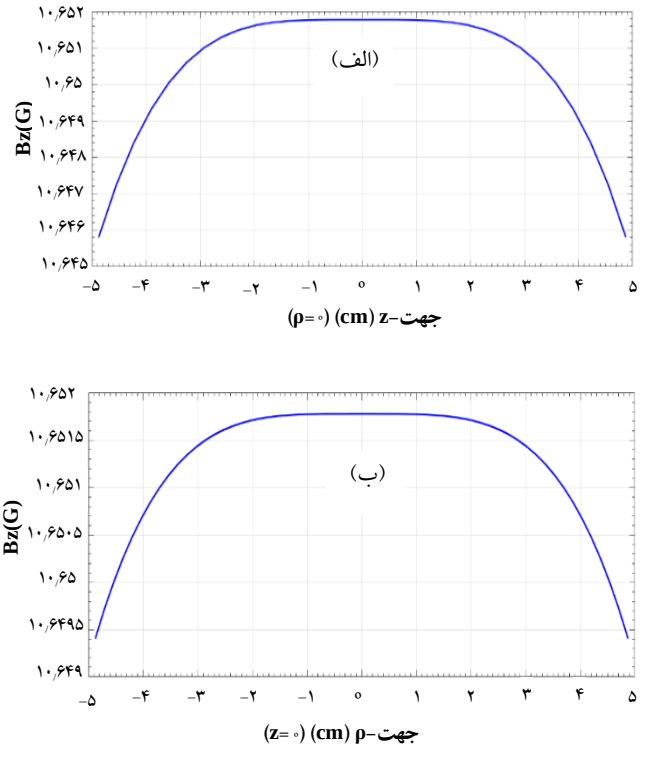
که $R_m$ شعاع میانگین پیچه، و $\Delta z$ خطای در موقعیت نسبت به مرکز پیچه است. رابطه‌ی (۴) نشان می‌دهد که میزان خطایی که در اندازه‌گیری شار عبوری از پیچه‌ی هلمهولتز به دلیل ابعاد

آهنربا به وجود می‌آید با عکس توان چهارم شعاع میانگین پیچه ارتباط دارد. برای آهنربایی با بزرگترین بُعد برابر با ۷cm، شار اندازه‌گیری شده با ۰٫۰۱۵٪ خطا مواجه است. این خطا تعیین‌کننده‌ی صحت اندازه‌گیری پیچه است.

## ۳. طراحی و ساخت

### ۱.۳ شبیه‌سازی

محاسبه‌ی میدان مغناطیسی در نقاط مختلف فضای بین پیچه‌ها به روش تحلیلی ساده نیست. به منظور ارزیابی میزان یکنواختی میدان در نقاط مختلف بین دو پیچه، میدان مغناطیسی را باید به روش عددی و با محاسبه‌ی پتانسیل برداری به دست آورد. برای این منظور، یک برنامه‌ی کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته، و با استفاده از انتگرال‌های بیضوی نوع اول و دوم پتانسیل برداری در نقاط مختلف بین پیچه محاسبه شد. سرانجام، با استفاده از رابطه‌ی $\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A}$ میدان مغناطیسی به دست آمد. شکل ۴، نمودار تغییرات شدت میدان مغناطیسی، $B_z$ در فضای بین پیچه‌ی هلمهولتز را برحسب تغییرات فواصل محوری z و شعاعی ρ نشان می‌دهد.




**شکل ٤.** نمودار تغییرات $B_z$ برحسب الف) تغییرات محوری و ب) تغییرات شعاعی در مرکز پیچه‌ی هلمهولتز.

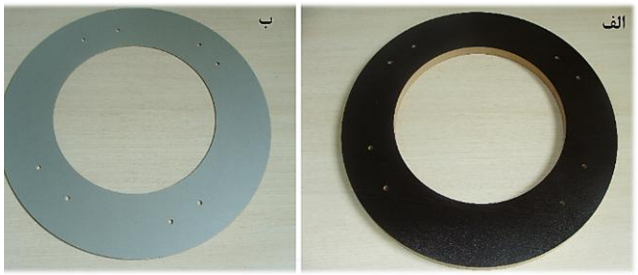
### ۲.۳ طراحی مکانیکی و ساخت پیچه‌ی هلمهولتز

طراحی و ساخت پیچه‌ی هلمهولتز به منظور اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی شامل سه قسمت است؛ طراحی و ساخت خود پیچه، طراحی و ساخت سازوکار دوار که آهنربا را در میان پیچه با فرکانس مشخصی بچرخاند، و سیستم الکترونیکی مناسب برای خوانش سیگنال القائی از پیچه‌ی هلمهولتز. جدول ۱، مشخصات فنی پیچه‌ی هلمهولتز را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

برای ساخت حلقه‌های پیچه که سیم مسی روی آنها پیچیده خواهد شد، از ورق MDF[۵] با ضخامت ۲۵mm استفاده شده است. MDF علاوه بر غیرمغناطیسی و غیررسانا بودن، از استحکام بالایی برای ماشین‌کاری برخوردار است. هزینه‌ی تمام شده‌ی استفاده از آن نیز نسبت به سایر مواد عایق غیرمغناطیسی بسیار کم‌تر است. بعد از برش، ورقه‌های MDF به شکل مربع به وسیله‌ی دستگاه CNC[۶] ویژه‌ی چوب، حلقه‌ها را از ورق MDF در آورده، و بعد از تأیید کیفیت برش و ابعاد آن که با کولیس دیجیتال انجام گرفت، استفاده شدند. شکل ۵، تصویری از حلقه‌ها را بعد از برش دستگاه CNC نشان می‌دهد.

**جدول ۱.** مشخصات فنی پیچه‌ی هلمهولتز

| پارامتر / مشخصه | مقدار / نوع |
|---|---|
| شعاع میانگین | ۳۲٫۵ cm |
| تعداد دور در هر پیچه | ۷۶۸ |
| کلاس سیم مسی | AWG-28 |
| جنس نگه‌دارنده‌ی حلقه‌ها | MDF |
| جنس سیستم چرخاننده | آلومینیم |

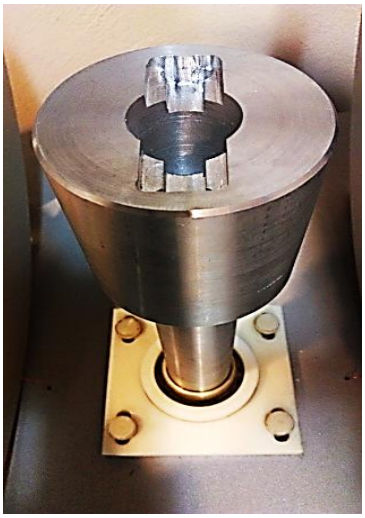



**شکل ۵.** (الف) حلقه‌ی پیچه‌ی هلمهولتز بعد از برش CNC، (ب) فیبر با ضخامت ۳mm. با چسباندن دو عدد از فیبرها به حلقه‌ی اصلی، رینگ مناسب برای سیم‌پیچی به دست می‌آید.

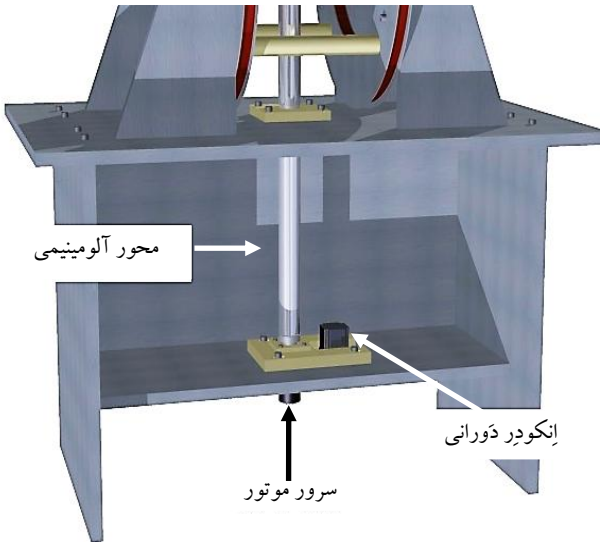
به منظور تبدیل حلقه‌ی شکل ۵ به رینگی که برای سیم‌پیچی مناسب باشد، دو عدد فیبر به ضخامت ۳mm که با ماشین CNC برش داده شده را به دو طرف حلقه چسبانده، و با فشار محکم شد. عملیات سیم‌پیچی به دور حلقه به کمک دستگاه تراش انجام، و تعداد دورها به کمک یک شمارنده‌ی مکانیکی چرخان ثبت شد. سیم مورد استفاده از نوع AWG-26 انتخاب شد. قطر این کلاس از سیم‌ها ۰٫۴۰۵mm و مقاومت آن ۰٫۱۳۳۹ Ω/m است. تعداد دور سیم‌ها در هر پیچه ۷۶۸ است. برای ثابت نگه داشتن نگه‌دارنده‌ها با استفاده از میله‌ی پلی‌آمیدی، پیچ و مهره به تعداد لازم ساخته شد. نکته‌ی مهم، استحکام بسیار بالای پیچ‌های پلی‌آمیدی در بافت MDF بود که بعد از انجام کار به صورت عملی مشاهده شد.

سازوکار مکانیکی برای چرخاندن آهنربا باید با دقت بالا ماشین‌کاری و نصب شود. زیرا اگر به دلیل خطای مکانیکی در عدم تقارن ماشین‌کاری، قطعات آهنربا به طور غیرمتقارن و با شیب غیرصفر نسبت به محور پیچه چرخانده شوند، در اندازه‌گیری مؤلفه‌ها خطا وجود خواهد داشت. برای این منظور، قطعات آلومینیمی که برای ثابت کردن آهنربا و چرخاندن آن استفاده می‌شود، ابتدا به کمک ماشین CNC ماشین‌کاری، و در مرحله‌ی نصب، تعامد آنها با استفاده از گونیای استاندارد و ابزارهای ترازسنجی نسبت به سطح میز پیچه کنترل شد. نگه‌دارنده‌ی اصلی آهنربا طوری طراحی شده است که بتوان آهنربا را روی دو سطح مختلف داخل آن ثابت کرد و چرخاند. شکل ۶، نمایی از ساختار نگه‌دارنده‌ی آهنربا را نشان می‌دهد.

نگه‌دارنده‌ی آلومینیمی شکل ۶ به یک میله‌ی آلومینیمی متصل می‌شود و از طریق آن به یک عدد سروو موتور[۷] که در زیر میز تعبیه شده است متصل می‌شود. اِنکودِر دورانی مطلق[۸] در زیر میز به کمک یک تسمه‌ی زمان‌بندی[۹] به شفت متصل می‌شود و با چرخش شفت، موقعت دورانی را گزارش می‌کند. وضعیت اِنکودِر و موتور نسبت به محور دوار را در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد.

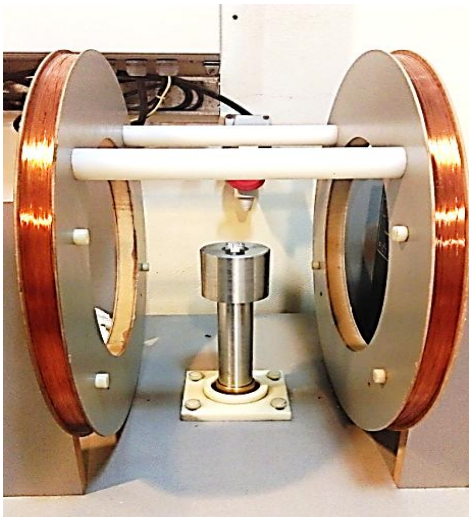


**شکل ٦.** قطعه‌ی آلومینیمی برای ثابت نگه داشتن آهنربا در دو سطح مختلف.




**شکل ۷.** نمایی کلی از موقعیت سیستم دورانی و اِنکودِر در پیچه‌ی هلمهولتز. اِنکودِر از طریق تسمه‌ی زمان‌بندی از زیر میز با محور موتور درگیر می‌شود و وظیفه‌ی آن تعیین موقعیت زاویه‌ای آهنربا است.

سیم‌پیچ پیچه‌ها به شکل سری با هم قرار می‌گیرند و خروجی به یک مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال[۱۰] متصل می‌شود. از اِنکودِر دورانی با دقت ۱۰۲۴ پالس در دور استفاده می‌شود. خروجی اِنکودِر وارد مدار الکترونیکی می‌شود و سیگنال القائی آهنربا و موقعیت آهنربا در آن لحظه به کمک این مدار اندازه‌گیری، و وارد کامپیوتر می‌شود. با انتگرال‌گیری از ولتاژ القائی و استفاده از بسط فوریه‌ی سیگنال، می‌توان مؤلفه‌های بردار ممان مغناطیسی آهنربا را اندازه‌گیری کرد. نمای کلی پیچه‌ها بعد از سیم‌پیچی و نصب روی میز و برقراری توازی را در شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد.



**شکل ۸.** نمایی کلی از پیچه‌ی هلمهولتز و محور دَوران که دقیقاً مرکز هندسی آهنربا را در مرکز پیچه قرار می‌دهد.

### ۳.۳ کالیبراسیون

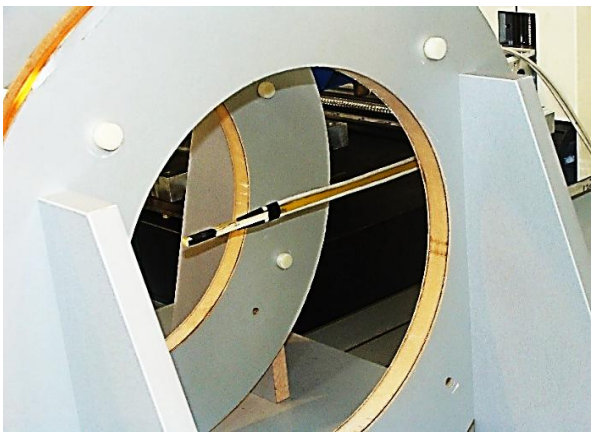
همان‌طورکه در رابطه‌ی (۳) مشاهده شد، ثابت پیچه‌ی هلمهولتز برابر است با $k = \frac{aG}{\mu_{\circ} N}$، که به شعاع پیچه، فاصله‌ی بین پیچه‌ها و تعداد دور سیم در هر پیچه بستگی دارد. برای اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌های بردار مغناطش آهنربا، باید ابتدا در عمل مقدار ثابت پیچه را اندازه‌گیری کرد، زیرا صرفاً با جای‌گذاری کمیت‌های هندسی در رابطه‌ی ثابت پیچه، مقدار واقعی آن به دست نمی‌آید، بلکه مقدار ایده‌آل آن را می‌توان محاسبه کرد. با اندازه‌گیری ثابت پیچه‌ی هلمهولتز، در حقیقت کالیبراسیون انجام می‌شود. برای این منظور، از رابطه‌ی بین جریان عبوری از پیچه و میدان مغناطیسی آن در مرکز استفاده می‌شود. میدان مغناطیسی پیچه‌ی هلمهولتز با شعاع $a$ و تعداد $N$ دور سیم در هر پیچه وقتی جریان $I$ از آن عبور می‌کند برابر است با،

$$B_z(b) = \frac{\mu_{\circ} NI}{aG} \qquad (۵)$$

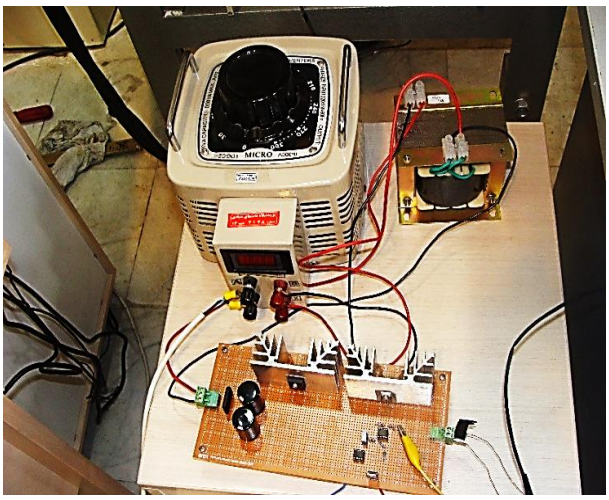
بنابراین ثابت پیچه‌ی هلمهولتز را می‌توان به صورت عملیاتی زیر نوشت،

$$k = \frac{aG}{\mu_{\circ} N} = \frac{I}{B} \qquad (۶)$$

برای این منظور با عبور جریانی مشخص و محاسبه‌ی میدان مغناطیسی در مرکز پیچه، می‌توان مقدار واقعی ثابت پیچه را از تقسیم جریان عبوری بر میدان تولیدی در مرکز پیچه به دست آورد. به منظور داشتن جریانی با مقدار ثابت، یک منبع جریان با دقت ۰٫۰۱٪ ساخته، و برای تغذیه‌ی پیچه از آن استفاده شد. ثابت کالیبراسیون پیچه، $k = \frac{aG}{\mu_{\circ} N}$، برابر است با نسبت جریان عبوری از پیچه به میدان مغناطیسی در مرکز پیچه. شکل ۹، نمایی از اندازه‌گیری میدان در مرکز پیچه و شکل ۱۰، منبع جریان ساخته شده برای این منظور را نشان می‌دهند. در حقیقت با عبور جریان از پیچه‌ی هلمهولتز در اثر اتلاف توان الکتریکی و گرم شدن سیم‌ها، مقاومت الکتریکی سیم‌ها تغییر می‌کند و در نتیجه اگر ولتاژ ثابت باشد، جریان شروع به تغییر می‌کند. برای ثابت نگه داشتن جریان، می‌توان از یک مقاومت الکتریکی متغیر با دقت ۰٫۰۱٪ استفاده کرد. برای به دست آوردن ضریب کالیبراسیون، ابتدا موقعیت کاوشگر اثر هال را در مرکز پیچه ثابت می‌کنیم. از نظر مکانیکی، کاوشگر اثر هال با قدرت تفکیک مکانی ۱μm قابلیت حرکت دارد که در عمل کاربردی ندارد. چرا که سطح حساس تراشه نیمه‌هادی آن $150\times150\mu m^2$ است. بعد از این کار، جریان الکتریکی و میدان خوانش شده با کاوشگر اثر هال در یک بازه‌ی زمانی ۲۰min و به فاصله‌ی هر ۲s ثبت می‌شوند و با میانگین‌گیری از آنها ضریب کالیبراسیون به دست می‌آید.



**شکل ۹.** اندازه‌گیری میدان در مرکز پیچه‌ی هلمهولتز برای کالیبراسیون.



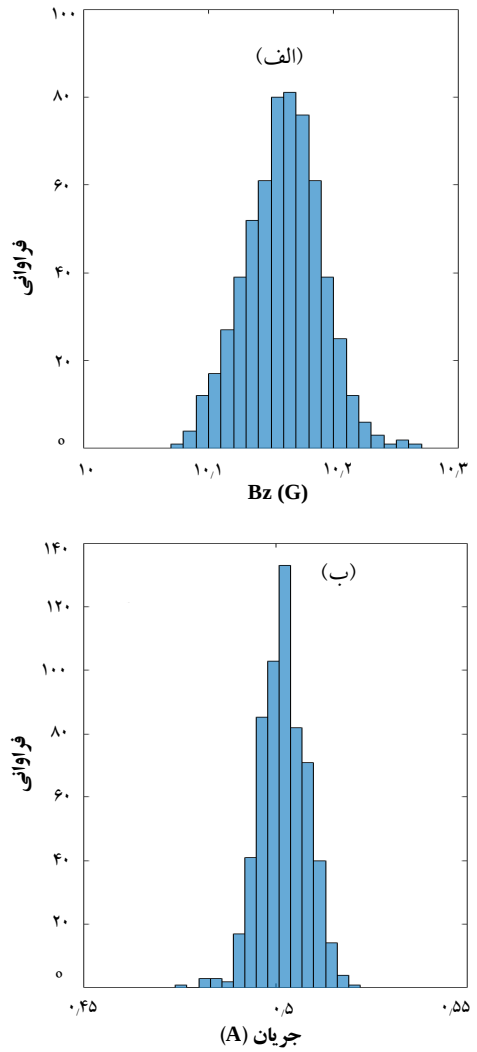
**شکل ۱۰.** منبع جریان برای تغذیه پیچه برای کالیبراسیون با دقت ۰٫۰۱ درصد.

شکل ۱۱، هیستوگرام جریان و میدان مغناطیسی پیچه را برای ۶۰۰ نمونه در مدت ۲۰s نشان می‌دهد. با محاسبه‌ی میانگین جریان عبوری از پیچه در مدت ۲۰min و میانگین میدان مغناطیسی در مرکز پیچه و تقسیم آنها بر هم، ضریب کالیبراسیون به دست می‌آید. ضریب کالیبراسیون تحلیلی که از رابطه‌ی (۶) قابل محاسبه است برابر با ۴۶۸ A/T، و مقدار تجربی آن برابر با ۴۹۴ A/T است که اختلافی در حدود ۵٪ دارند.

میانگین میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده برابر با ۱۰٫۱۶ G با انحراف از معیار ۰٫۰۳ G، و میانگین جریان الکتریکی اندازه‌گیری شده برابر با ۰٫۵۰۲۰ A با انحراف معیار ۰٫۰۰۶۲ A است. در نتیجه، ضریب کالیبراسیون برابر است با $k = \bar{I}/\bar{B}$ =۴۹۴ A/T.

## ٤. نتایج اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی

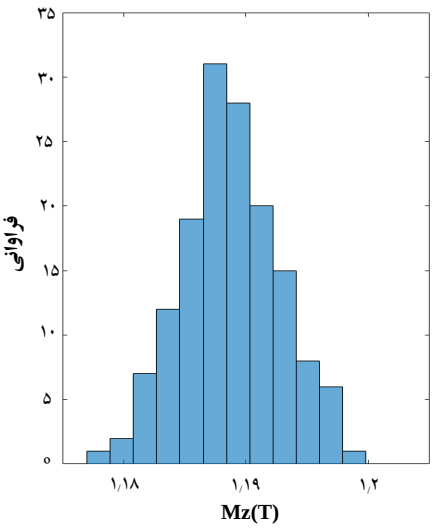
ولتاژ القائی در اثر چرخش آهنربا در پیچه، وارد یک مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌شود. هم‌زمان، داده‌های مربوط به اِنکودِر که مسئولیت گزارش موقعیت زاویه‌ای آهنربا در وسط پیچه را بر عهده دارد، به صورت دیجیتال با اِنکودِر در اختیار یک مدار الکترونیکی قرار می‌گیرد و این مدار، ولتاژ القائی و عدد اِنکودِر در آن لحظه را گزارش می‌کند. با انتگرال‌گیری عددی از ولتاژ القائی و دانستن موقعیت اولیه‌ی آهنربا، می‌توان با استفاده از بسط فوریه‌ی سیگنال ولتاژ القائی به کمک رابطه‌ی (۳)، بردار ممان دوقطبی مغناطیسی آهنربا را محاسبه کرد.




**شکل ۱۱.** (الف) هیستوگرام میدان مغناطیسی، و ب) جریان اندازه‌گیری شده. برای ارزیابی دقت اندازه‌گیری، انحراف معیار داده‌ها حول مقدار میانگین به دست می‌آیند. هر چه تعداد نمونه‌ها بیش‌تر باشند، هیستوگرام به توزیع نرمال نزدیک می‌شود.

### ۱.٤ ارزیابی دقت پیچه‌ی هلمهولتز

در مورد دقت نهایی اندازه‌گیری پیچه‌ی هلمهولتز، یکی از آهنرباها به عنوان آهنربای مرجع انتخاب می‌شود. در شرایط یکسان آزمایش از نظر دمایی در زمان‌های مختلف، به اندازه‌ی ۱۵۰ بار تکرار آزمایش در روزهای مختلف اندازه‌گیری می‌شوند و منحنی توزیع مقادیر اندازه‌گیری مؤلفه‌های بردار مغناطش آهنربا حول مقدار میانگین رسم می‌شود. انحراف معیار این منحنی به صورت معیاری برای دقت نهایی اندازه‌گیری پیچه‌ی هلمهولتز معرفی می‌شود. هیستوگرام مربوط به نتایج اندازه‌گیری مؤلفه بردار مغناطش در راستای محور آسایش آهنربای مرجع، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.




**شکل ۱۲.** هیستوگرام نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌ی Mz در شرایط یکسان برای آهنربای مرجع.

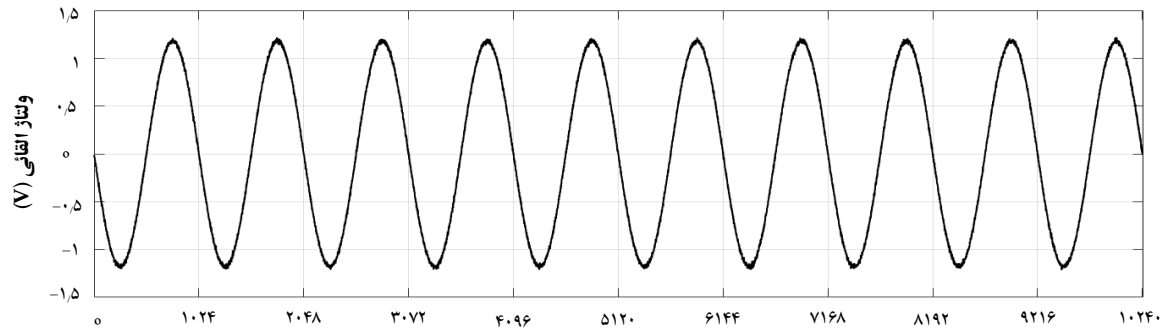
**شکل ۱۳.** اتاقک مخصوص اندازه‌گیری که مجهز به سیستم تهویه و کنترل دما است. دما به کمک یک دماسنج جیوه‌ای و یک دماسنج دیجیتال کنترل، و در هر اندازه‌گیری برای هر آهنربا ثبت شد.

میانگین مؤلفه‌ی z بردار مغناطش آهنربای مرجع، برابر با ۱٫۱۸۸۸ T با انحراف از معیار ۴۰G برای تعداد ۱۵۰ بار تکرار آزمایش به دست آمد. بنابراین دقت اندازه‌گیری مؤلفه‌ی Mz، برابر با $\frac{S.D}{\sqrt{n}}$ و در حدود ۳G است.

### ۲.٤ اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی

اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی باید در محیطی با پایداری مناسب حرارتی انجام گیرد. پسماند مغناطیسی آهنرباهای دائمی NdFeB با افزایش دما با آهنگ ۰٫۱۲/°C-٪ کاهش می‌یابد. به این منظور، پیچه‌ی هلمهولتز به همراه آهنرباهای دائمی از ۴۸h قبل از اندازه‌گیری داخل محیطی بسته که به کمک چادر پلاستیکی ضخیم و یک سیستم تهویه‌ی مناسب دیجیتال که دمای داخل را در دمای ۱°C±۲۳ نگه می‌دارد قرار داده، و بعد از هم دما شدن آهنرباها با محیط، نسبت به اندازه‌گیری آنها اقدام شد. شکل ۱۳، اتاق ویژه‌ای که برای اندازه‌گیری‌های مغناطیسی در دمای ثابت ساخته شده است و پیچه‌ی هلمهولتز قرار داده شده در آن را نشان می‌دهد.

اِنکودِر در هر دور ۱۰۲۴ پالس تولید می‌کند که هر پالسی مربوط به یک موقعیت خاص زاویه‌ای آهنربا است. لازم است پالس نقطه‌ی صفر اِنکودِر را قبل از اندازه‌گیری به دست آورد. به بیان دیگر، باید ابعاد هندسی آهنربا را بعد از قرار دادن در مرکز پیچه با محور پیچه‌ی هلمهولتز منطبق کنیم. برای این کار از دو عدد گونیای دقیق استفاده می‌شود. محور دواری که آهنربا روی آن ثابت می‌شود آن‌قدر آهسته چرخانده می‌شود تا یکی از ابعاد هندسی آهنربا دقیقاً در راستای محور پیچه قرار گیرد. در این حالت، عدد اِنکودِر نشان‌دهنده‌ی موقعیت صفر آهنربا است. به بیان دیگر، هر گاه اِنکودِر این عدد را نشان دهد به معنی آن است که یکی از ابعاد آهنربا دقیقاً در راستای محور پیچه است. در اندازه‌گیری انجام شده، عدد اِنکودِر برای موقعیت صفر آهنربا ۴۳۷ به دست آمد. زمان در نظر گرفته شده برای هر آهنربا ۳s است و با توجه به فرکانس چرخش محور که برابر با ۵Hz است در هر اندازه‌گیری سیگنال القائی ۱۵ پریود کامل خواهد داشت. ۱۰ پریود مرکزی سیگنال برای اندازه‌گیری استفاده شد. با این کار، قسمت ابتدا و انتهای سیگنال که تحت تأثیر حرکت شتاب‌دار اولیه و انتهایی محور است حذف می‌شود. اندازه‌گیری برای هر پریود به طور جداگانه انجام، و میانگین ۱۰ نتیجه به صورت نتیجه‌ی پایانی آزمایش گزارش شده است. پس از انجام اندازه‌گیری‌ها، داده‌های تجربی به کمک کامپیوتر تحلیل شد. در ابتدا، نوفه‌های شدیدی که ممکن است در خروجی اِنکودِر یا ولت‌متر تولید شوند حذف، و سپس نسبت به برازش و تحلیل فوریه‌ی آنها اقدام شد. شکل ۱۴، سیگنال تولیدی برای یکی از آهنرباها را برای ۱۰ چرخش کامل آهنربا نشان می‌دهد.

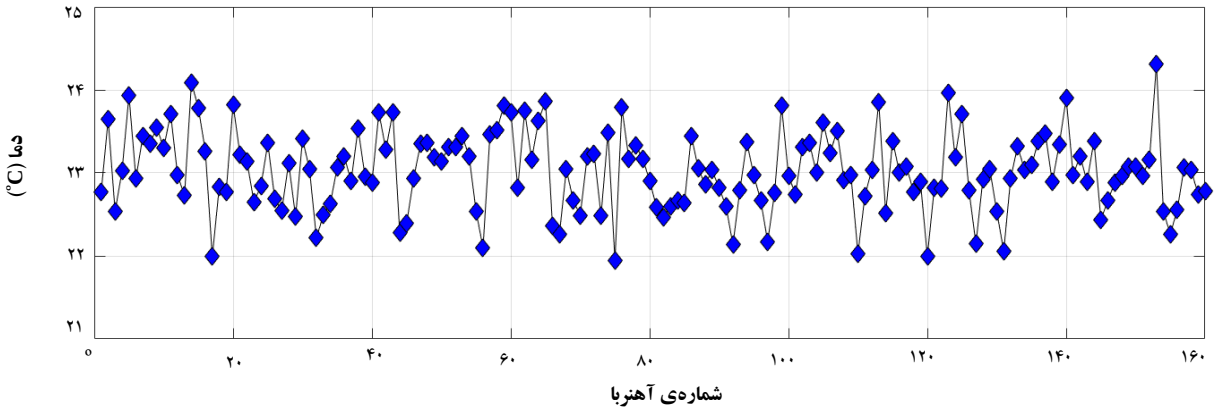



**شکل ١٤.** ولتاژ القائی در پیچه‌ی هلمهولتز برای ۱۰ چرخش آهنربا.

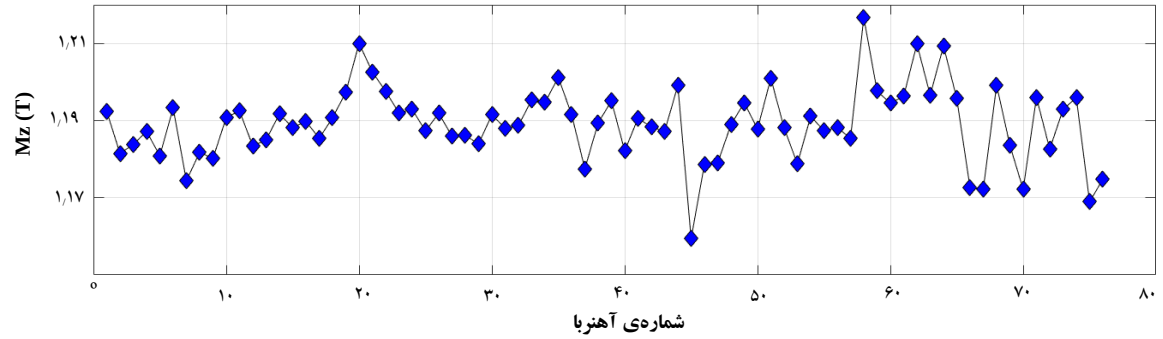
شکل ۱۵، اُفت‌وخیز دما را طی زمان آزمایش برای اندازه‌گیری ۱۶۰ عدد آهنربا نشان می‌دهد. دمای آزمایش را باید در محدوده‌ی $23\pm1^{\circ}C$ نگه داشت.

نتایج پایانی اندازه‌گیری بزرگیِ سه مؤلفه‌ی بردار مغناطش در آهنرباهای دائمی را در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ می‌توان مشاهده کرد. بردار مغناطش در راستای محور آسایش آهنربا که بزرگ‌ترین و اصلی‌ترین مؤلفه است، با Mz نشان داده شده است. نتایج اندازه‌گیری برای آهنرباهای با قطبش افقی یعنی در راستای بُعد ۱۲mm، و آهنرباهای با قطبش عمودی یعنی در راستای بُعد ۲۴mm به طور جداگانه رسم شده‌اند. میانگین مؤلفه‌ی Mz بردار مغناطش برای آهنرباهای با قطبش افقی ۱٫۱۸۹۴ T، و برای آهنرباهای با قطبش عمودی ۱٫۱۹۷۳ T است. این اختلاف را قبل از اندازه‌گیری نیز می‌توان انتظار داشت. دلیل این اختلاف این است که بردار مغناطش آهنربا بعد از فرایند ساخت، تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی داخلی که در جهت عکس بردار مغناطش قرار دارد و در صدد تضعیف آن است قرار می‌گیرد. مقدار این میدان، به شکل و ابعاد هندسی آهنربا بستگی دارد. از نتایج به دست آمده این‌طور می‌توان برداشت کرد که بردار مغناطش در راستای بُعد ۲۴ mm مقاومت بیش‌تری نسبت به بُعد ۱۲mm دارد و مقدار آن کمی بیش‌تر است.

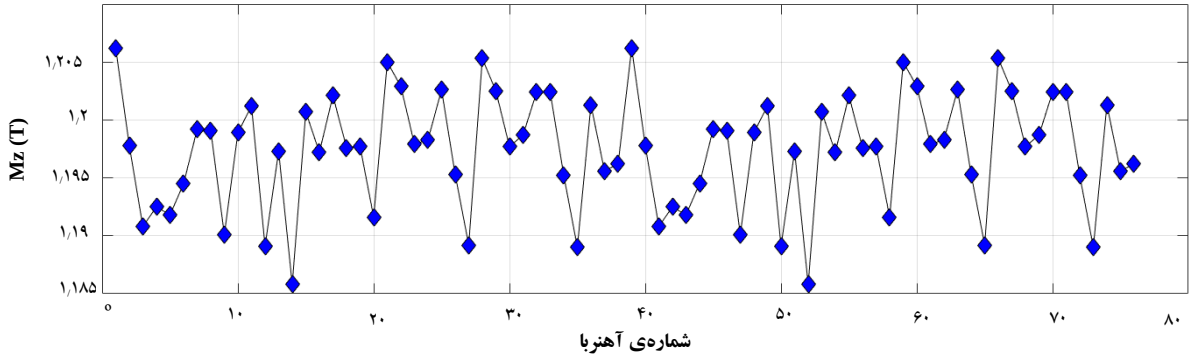
سرانجام، از نتایج اندازه‌گیری برای چیدن آهنرباهای دائمی در کنار یک‌دیگر به منظور رسیدن به میدان مغناطیسی با کم‌ترین خطا در آندولاتور استفاده می‌شود. نتایج اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی نشان‌دهنده‌ی کیفیت قابل‌قبول آهنربا است. محدوده‌ی روا دارای (تُلرانس)های تضمین شده که فروشنده اعلام کرده است، در مورد شدت بردار مغناطش در راستای محور آسایش از ۱٫۱۷ تا حداکثر ۱٫۲۲ T است و در مورد زاویه‌ی انحراف آن $1^{\circ}$ و در مورد تُلرانس‌های ابعادی، ۰٫۰۵ mm است. نتایج نشان‌دهنده‌ی حداکثر زاویه‌ی خمش $0.7^{\circ}$ نسبت به محور هندسی، و شدت بردار مغناطش Mz در بیش‌تر آهنرباها در همان محدوده‌ی ادعا شده‌ی تولیدکنندگان است.



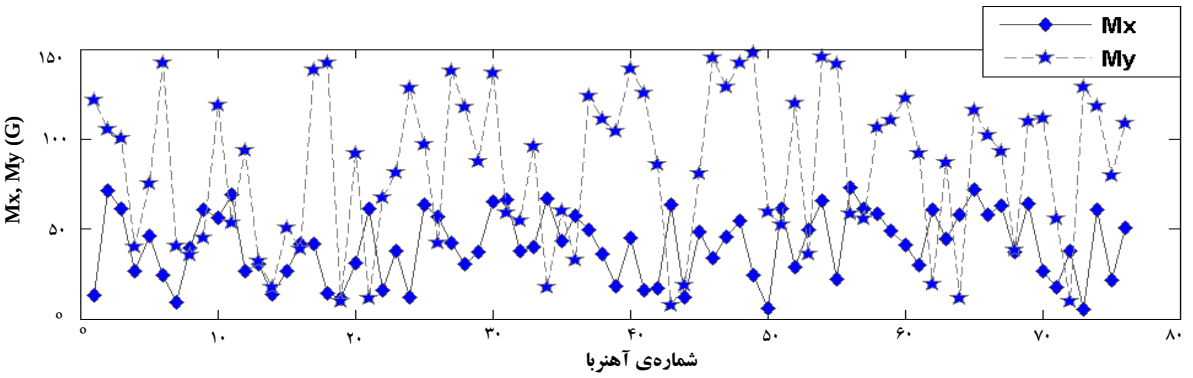

**شکل ۱۵.** اُفت‌وخیزهای دمای محیط اندازه‌گیری که در محدوده‌ی $23\pm1^{\circ}C$ کنترل شده است.



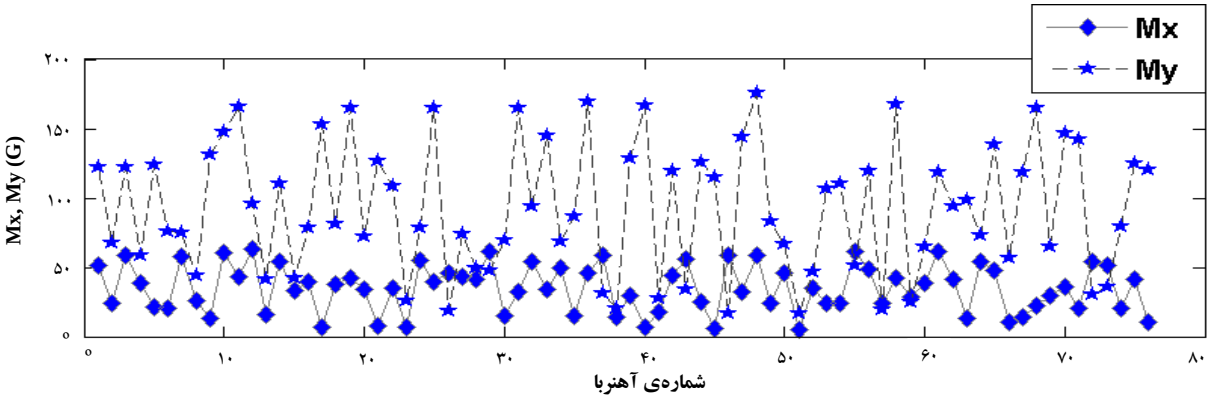

**شکل ۱۶.** مؤلفه‌ی Mz آهنرباهای با قطبش افقی (قطبش در راستای بُعد ۱۲mm). میانگین Mz برابر است با ۱٫۱۸۹۴ T.




**شکل ۱۷.** مؤلفه‌ی Mz آهنرباهای با قطبش عمودی (قطبش در راستای بُعد ۲۴mm). میانگین Mz برابر است با ۱٫۱۹۷۳ T.




**شکل ۱۸.** مؤلفه‌های Mx و My آهنرباهای با قطبش افقی (قطبش در راستای بُعد ۱۲mm). پراکندگی Mx برابر با ۶۷G، و پراکندگی My برابر با ۱۴۱G است.




**شکل ۱۹.** مؤلفه‌های Mx و My آهنرباهای با قطبش عمودی (قطبش در راستای بُعد ۲۴mm). پراکندگی Mx برابر با ۵۷G، و پراکندگی My برابر با ۱۵۹G است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این کار، به منظور اندازه‌گیری آهنرباهای دائمی که قرار است در ساخت یک نمونه‌ی آزمایشگاهی آندولاتور تخت استفاده شود، طراحی و ساخت پیچه‌ی هلمهولتزی با شعاع میانگین ۳۲٫۵cm انجام، و بعد از کالیبراسیون و اندازه‌گیری ثابت پیچه، برای اندازه‌گیری ۱۶۰ عدد آهنربای دائمی استفاده شد. صحت اندازه‌گیری پیچه‌ی هلمهولتز که ناشی از خطاهای سیستماتیک از جمله محدود بودن شعاع پیچه و ابعاد آهنربا است، در حدود ۰٫۰۱۵٪ است. دقت اندازه‌گیری که به نوعی بیان‌کننده‌ی تکرارپذیری اندازه‌گیری نیز هست، با تکرار اندازه‌گیری برای یک آهنربای مرجع به تعداد ۱۵۰ بار ارزیابی شد. انحراف معیار نتایج اندازه‌گیری حاکی از دقت در حدود ۰٫۰۳٪ برای اندازه‌گیری بردار مغناطش در راستای محور آسایش آهنربا است. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی حداکثر انحراف بردار مغناطش به اندازه °۰٫۷ از حالت ایده‌آل است که ادعای سازندگان نیز کم‌تر از یک درجه بوده است. شدت بردار مغناطش نیز در محدودی مورد ادعای تولیدکنندگان یعنی از ۱٫۱۷ تا ۱٫۲۲ T قرار دارند.

از تجربه‌ی به دست آمده در این کار می‌توان در کارهای آینده برای بهبود عملکرد پیچه‌ی هلمهولتز به ویژه در این کاربرد، و افزایش سرعت اندازه‌گیری استفاده کرد. بدیهی است با امکانات حداقلی و بدون استفاده از سیستم‌های خودکار مکانیکی برای چرخاندن آهنربا با درجه‌ی آزادی‌های بیش‌تر، سرعت اندازه‌گیری محدود است. برای اندازه‌گیری تعداد زیاد آهنربا در آینده می‌توان سیستم چرخان را با درجه‌ی آزادی بیش‌تر طراحی و بهره‌برداری کرد.

## پی‌نوشت‌ها

1. Remanence
2. Curie Temperature
3. Insetion Devices
4. Undulator
5. Medium-Desity Fibreboard (MDF)
6. Computer Numerical Control (CNC)
7. Servo Motor
8. Rotary Absolute Encoder
9. Timing Belt
10. Analog to Digital Converter (ADC)

## مراجع


[1] B.D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Edition 2, Wiley, (2009).

[2] Iranian Light Source Facility (ILSF), Conceptual design report, October, (2012).

[3] A. Ramezani Moghaddam, M. Lamehi, J. Rahighi, H. Ghasem, Magnetic Design of the First Prototype Pure Permanent Magnet Undulator for the Ilsf, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany.

[4] C.S. Hwang, S. Yeh, PK. Teng, TM. Uen, A highly automatic measurement system for three orthogonal magnetic moments of a permanent magnet block, *Rev. Sci. Instrum.* **67** (5) (1996).

[5] B.D.W. Carnegie, J. Timpf, Characterizing permanent magnet blocks with Helmholtz coils, *Nucl. Instrum. Meth. A.* **319 (1-3)** (1992) 97–99.

[6] Joseph Z. Xu, Isaac Vasserman, A New Helmholtz Coil Permanent Magnet Measurement System, Proceedings of ICALEPCS, Grenoble, France, (2011).

[7] Toshiya TANABE., Rotating Coil / Helmholtz Coil Magnetic Measurement System Using Lock-in Amplifier Method, SPring-8 Project Team, Kamigori, Ako-gun, Kyogo 678-12, JAPAN.

[8] L. Burkel, R. Dejus, J. Maines, J. O'Brien, J. Pflueger, I. Vasserman, The Insertion Device Magnetic Measurement Facility: Prototype and Operational Procedures, ANL/APS/TB-12, (1993).

[9] James A. Clarke, The Science and Technology of Undulators and Wigglers, Oxford University Press, (2004).

[10] Hideo Onuki, Pascal Elleaume, Undulators, Wigglers and their Applications, Taylor & Francis, (2003).