



طراحی و ساخت الکترومگنت دوقطبی چشمه پنینگ یون هیدرون منفی

معصومه یارمحمدی سطری^۱، حمیدرضا لطفی^۲، مسعود مهجور شفیعی^{۲*}

۱. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران-ایران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۵۴۷-۱۴۳۹۵، تهران-ایران

*Email: mmshafiei@ut.ac.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۹

چکیده

به منظور ساخت، راه‌اندازی و عیب‌یابی مقدماتی چشمه پنینگ داخلی سیکلوترون IRANCYC10، یک مگنت الکتریکی دوقطبی با میدان مغناطیسی در حد امکان مشابه میدان در مرکز سیکلوترون مذکور طراحی و ساخته شد. این الکترومگنت که در دانشکده فیزیک دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد، قادر است میدان مغناطیسی به بزرگی ۷۰۰۰ گوس را در محل استقرار چشمه (منطقه‌ای به شعاع ۱۵ میلی‌متر در مرکز مگنت) به آسانی و بدون نیاز به خنک‌سازی تأمین کند. دست‌یابی به میدان ۱/۱ تسلا نیز با استفاده از این مگنت برای مدت چند دقیقه امکان‌پذیر است. قرار است چشمه‌ی پنینگ در داخل سیکلوترون IRANCYC10، شدت میدان مغناطیسی به بزرگی ۱/۱ تسلا را تجربه کند. شدت میدان مغناطیسی در ناحیه استقرار چشمه با انحراف حداکثر ۱/۱ درصد نسبت به شدت میدان در مرکز مگنت، عملاً یکنواخت می‌باشد. این مگنت از نوع مگنت H شکل است که قطر قطب‌های آن ۱۰۰ میلی‌متر و فاصله آن‌ها از یکدیگر ۶۰ میلی‌متر می‌باشد. به منظور طراحی و ساخت مگنت، کدهای Ansys Maxwell، Comsol، SolidWorks استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: چشمه یونی پنینگ، سیکلوترون، مگنت، کامسول، سالیدورک، انسیس ماکسول

Design and construction of an electric dipole magnet for an H⁻ Penning ion source

M. Yarmohammadi Satri¹, H. Lotfi², M. Mahjour-Shafiei^{2*}

1. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

2. Department of Physics, University of Tehran, P.O.Box:14395-547, Tehran-Iran

Technical Paper

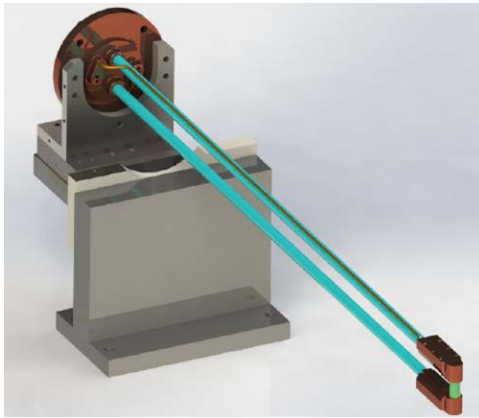
Received 23.11.2021 Accepted 20.12.2021

Abstract

An electric dipole magnet quite similar to that of the IRANCYC10 cyclotron was designed and constructed to conduct the initial tests on the internal Penning ion source to be installed in the cyclotron. This magnet which was designed and constructed in the department of physics, University of Tehran, is capable of producing a magnetic field of 7000 G in the location of the source, a region in the center of the magnet with the radial extent of 15 mm, with no need for cooling. Magnetic fields as high as 1.1 T are also accessible for a few minutes. The ion source in IRANCYC10 is expected to be exposed by a magnetic field of 1100 G. The measurements show that the magnetic field in the location of the source is homogeneous with the maximum deviation value of 1.1% with respect to the magnetic field strength at the center. The magnet is H type with 100 mm pole diameter and 60 mm gap size. Comsol, Ansys Maxwell and SolidWorks codes were employed in the design and construction of the electric dipole magnet.

Keywords: Penning ion source, Cyclotron, Magnet, Comsol, SolidWorks, Ansys Maxwell





شکل ۲. نمایی از چشمه پنینگ IRANCYC10 با پایه‌ی نگه‌دارنده آن [۳].

چشمه در مرکز سیکلوترون در ناحیه ای به قطر تقریبی ۳۰ میلی‌متر استقرار دارد. میدان مغناطیسی یکنواختی به شدت ۱٫۱ تسلا در این ناحیه اعمال می‌شود. در محل حضور چشمه، با حرکت در راستای شعاع به سمت خارج از مرکز، تغییرات نسبی شدت میدان مغناطیسی کم‌تر از ۱٫۱ درصد است.

ساخت چشمه‌ی مورد نظر در دانشگاه تهران، نیازمند نمونه‌ی آزمایشگاهی معادل میدان مغناطیسی ناشی از سیکلوترون IRANCYC10 در محل جانمایی چشمه پنینگ در سیکلوترون است.

در این مقاله، گزارشی از طراحی و ساخت یک مگنت^۳ برای چشمه پنینگ یون منفی که قرار است به عنوان چشمه داخلی سیکلوترون IRANCYC10 به کار برده شود، ارائه می‌شود.

با ملاحظه‌ی بودجه‌ی ۱۰ هزار دلار (با توجه به نوسانات قیمت ارز واحد پول بر اساس دلار آمریکا بیان شده است)، الکترومگنتی از نوع H طراحی و ساخته شد که میدان آن بیش‌ترین شباهت را با میدان مغناطیسی سیکلوترون IRANCYC10 در محل استقرار چشمه داشته باشد. حال آن‌که به دلیل محدودیت در خنک‌سازی سیم‌پیچ‌ها، شدت میدان ۱٫۱ تسلا بیش از پنج دقیقه در دسترس نمی‌باشد. از این‌رو، مگنت طراحی و ساخته شده، شدت میدان‌های کم‌تر یا معادل ۷۰۰۰ گوس که به منظور ساخت و تست چشمه پنینگ مناسب است را بدون نگرانی از گرمایش سیم‌پیچ‌ها، برای چندین ساعت ایجاد می‌کند.

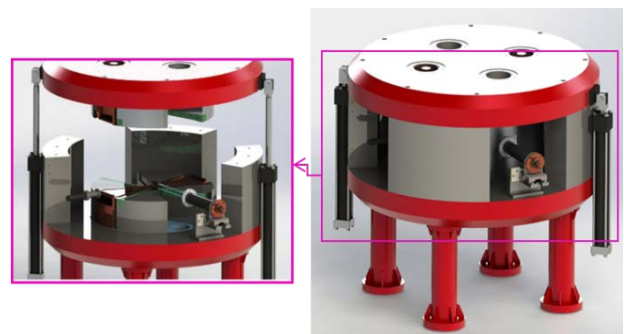
۱. مقدمه

چشمه‌ی مولد ذرات (الکترون، پروتون و یون) اولین قدم در داشتن هر نوع شتاب‌دهنده‌ای می‌باشد. ذرات تولید شده در چشمه با انرژی اولیه‌ای که در چشمه کسب نموده‌اند، به شتاب‌دهنده‌های پیش‌روی باریکه تزریق می‌شوند. مجموعه شتاب‌دهنده‌هایی که پس از چشمه نصب می‌شوند، باریکه‌ی خروجی از آن را به انرژی و شکل ایده‌آل ارتقاء می‌دهند. بنابراین، چشمه به عنوان اولین بخش در زنجیره‌ی شتاب‌دهی ذرات قرار دارد و قلب تپنده‌ی هر سیستم شتاب‌دهی است که تأثیر بسزایی در شدت و شکل باریکه‌ی نهایی خروجی از آن دارد.

سیکلوترون شتاب‌دهنده‌ای است که با شتاب دادن به باریکه‌ی یونی برای تولید رادیوداروهای تشخیصی و درمانی کاربری مؤثری دارد [۱، ۲]. به منظور کاربری مناسب سیکلوترون برای تولید رادیویوتوپ‌های دستگاه تصویربرداری PET^۱ و بهره‌مندی کشور از دانش فنی ساخت و تولید بومی این دستگاه، پروژه کلان ملی IRANCYC10 تعریف شد، شکل ۱. IRANCYC10 با هدف طراحی و ساخت سیکلوترون کوچک با انرژی باریکه پروتون خروجی ۱۰ مگاالکترون‌ولت تحت نظر شورای عالی عتف با محوریت دانشگاه امیرکبیر و با همکاری دانشگاه شهید بهشتی، دانشگاه تهران و دانشگاه SKKU^۲ انجام می‌گیرد.

همکاری دانشکده فیزیک دانشگاه تهران و پروژه کلان ملی IRANCYC10 در قالب ساخت چشمه‌ی پنینگ مولد یون هیدروژن منفی صورت پذیرفت.

به دلیل بازدهی مناسب این نوع چشمه یونی در تولید یون منفی هیدروژن و سازگاری آن با ساختار سیکلوترون، چشمه‌ی پنینگ به منظور قرارگیری در مرکز سیکلوترون انتخاب می‌شود [۴-۵]. نمایی از چشمه پنینگ با پایه‌ی نگه‌دارنده، در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

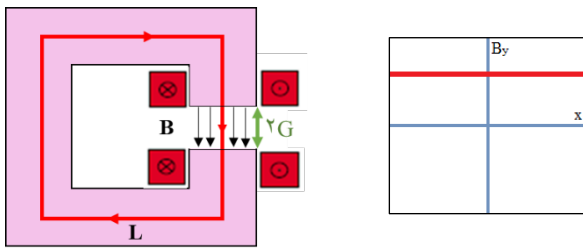


شکل ۱. نمایی از IRANCYC10 [۳].

1. Positron Emission Tomography
2. Sungkyunkwan University

3. Magnet





شکل ۳. طرح‌واره‌ای از سطح مقطع الکترومگنت دوقطبی C شکل [۶].

۳. انواع مگنت‌های دوقطبی

با توجه به نوع کاربری مگنت دوقطبی، طرح‌واره و طراحی آن تغییر می‌کند. سه خانواده‌ی استاندارد مگنت‌های دوقطبی که کاربرد فراگیری در فیزیک شتابگر و خطوط انتقال باریکه دارند، عبارتند از: مگنت دوقطبی C شکل، مگنت دوقطبی H شکل و مگنت دوقطبی O شکل یا پنجره‌ای. هر یک از این انواع دارای مزایا و معایبی هستند و با در نظر گرفتن اولویت‌ها و الزامات مورد توجه در کاربری مورد نظر هم‌چون کیفیت میدان، فضای قابل دسترس و دشواری ساخت، انتخاب می‌شوند [۹-۱۲].

در پروژه ساخت چشمه پنینگ IRANCYC10، به منظور افزایش ناحیه‌ی یکنواخت مغناطیسی در دسترس چشمه و امکان‌پذیری ساخت آن با توجه به امکانات کارگاهی و بودجه‌ی مالی در دسترس، الکترومگنت دوقطبی H شکل برای طراحی و ساخت برگزیده شد.

۴. طراحی و ساخت

۱.۴ طراحی فیزیک و مکانیک بدنه و پیچیده‌ی مگنت

آهنربای طراحی و ساخته شده در این پروژه از نوع جریان ثابت^۵ است. از این‌رو، به دلیل عدم وجود جریان‌های گردابی^۶ قابلیت ساخت بدنه‌ی مگنت به صورت یکپارچه یا لایه لایه وجود دارد. حال آن که، زمان رسیدن به میدان اسمی^۷ در بدنه‌ی یکپارچه‌ی افزایش می‌یابد. هم‌چنین، حفظ یکپارچگی مشخصات بدنه‌ی مگنت به دشواری حاصل می‌گردد.

ریخته‌گری مواد بدنه‌ی مگنت، نیازمند افزودن ناخالصی با مقیاس دقیق می‌باشد. به دلیل محدودیت مالی و در دسترس نبودن کارخانجاتی با دقت بالا، تهیه‌ی بدنه‌ی مگنت یکپارچه اقدامی دشوار و خارج از امکانات پروژه‌ی تحت بررسی در مقاله بود. از منظر دیگر، استفاده از فولاد با ضخامت زیاد، برش و ماشین‌کاری دشوار و پرهزینه‌ای را طلب می‌نمود. حال آن که،

۲. مبانی نظری

مگنت‌های دوقطبی از متداول‌ترین اجزاء شتابگرها به منظور تغییر مسیر حرکت ذرات در مسیر دایره‌ای هستند. در الکترومگنت دوقطبی، میدان مغناطیسی یکنواخت بین دو قطب آن توسط چرخش جریان در پیچ‌های الکتریکی ایجاد می‌شود.

شکل ۳، نمایی از یک الکترومگنت دوقطبی را نشان می‌دهد. میدان مغناطیسی B با استفاده از جریان I که در پیچ‌های احاطه‌کننده‌ی قطب در جریان است، ایجاد می‌شود. هندسه‌ی بدنه‌ی^۱ فرومغناطیس به نحوی است که مسیر برگشتی کارایی را برای شار مغناطیسی مهیا نماید. با استفاده از قانون آمپر، میدان مغناطیسی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \times \frac{B}{\mu_r} = J \quad (1)$$

که μ_r تراوایی نسبی^۲ بدنه‌ی فرومغناطیس و J چگالی جریان پیچ است.

با انتگرال‌گیری بر روی یک مسیر بسته به و کارگیری نظریه اشتوک^۳ داریم:

$$\oint H \cdot dr = I \quad (2)$$

$$B = \mu H, \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\oint \frac{B}{\mu} \cdot dl = \int \frac{B}{\mu_{\text{هوای}}}. dl + \int \frac{B}{\mu_{\text{آهن}}}. dl$$

$$\frac{\gamma GB_{\perp}}{\mu_{\text{هوای}}} + \int \frac{B}{\mu_{\text{آهن}}}. dl = I_{\text{کل}} \quad (3)$$

B_{\perp} میدان مغناطیسی در گاف هوای بین دو قطب، γG ، و عمود بر آن است. با توجه به تراوایی بسیار بزرگ و نزدیک به بی‌نهایت فرومغناطیس آهن در مقایسه با تراوایی هوا ($\mu_{\text{هوای}} = \mu_0 = 1$ و $\mu_{\text{آهن}} > 1000$) و کوتاهی طول گاف، γG ، در مقایسه با طول مسیر شار مغناطیسی در آهن، L ، از جزء دوم انتگرال‌گیری چشم‌پوشی می‌شود [۷].

$I_{\text{کل}}$ بیانگر کل جریان عبوری از سطح مقطع هر دو پیچ به N دور جریان است (پیچ‌ها $2I_{\text{کل}} = I$) و طبق رابطه‌ی (۱) داریم:

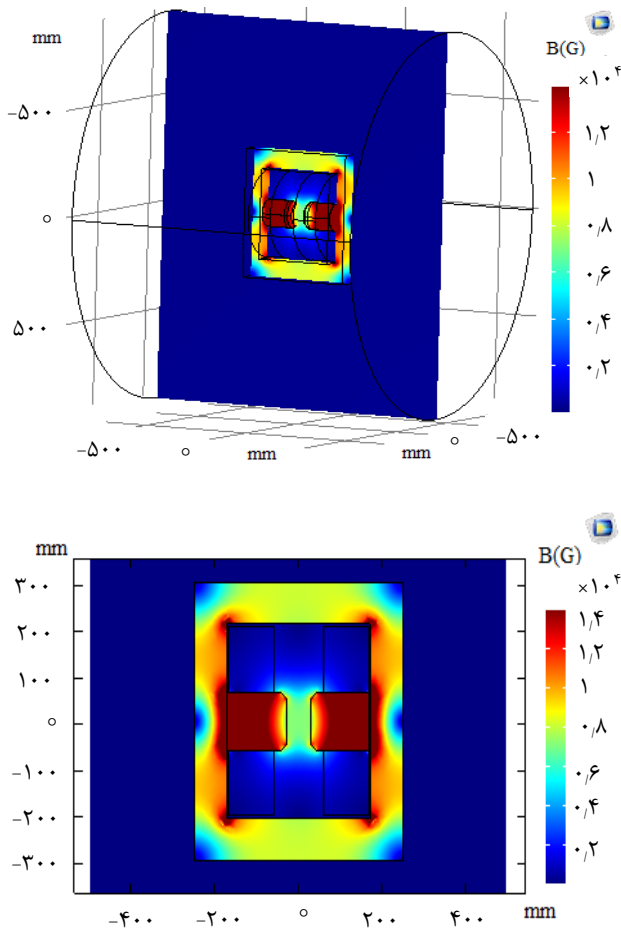
$$NI = \frac{\gamma GB_{\perp}}{\mu_{\text{هوای}}} \quad (4)$$

لازم به ذکر است، رابطه‌ی (۴) با چشم‌پوشی از اشباع مغناطیسی و میدان لبه‌ای^۴ حاصل شده است [۷، ۸].

4. Fringe Field
5. DC (Direct Current)
6. Eddy Current
7. Warm-Up Time

1. Yoke
2. Relative Permeability
3. Stoke Theorem





شکل ۴. طراحی فیزیک مگنت در کامسول برای دسترسی به میدان یکنواخت به شدت ۷۰۰۰ گوس در محل استقرار چشمه پنینگ IRANCYC1۰

۲.۴ ساخت بدنه مگنت

با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی و نکات بیان شده در مورد بازار آهن در ایران، محدودیت‌های ساخت و ظرفیت مالی که در بخش ۱.۴ توضیح داده شده، ساخت بدنه و پیچه صورت پذیرفت.

بدنه‌ی H شکل مگنت با استفاده از ۱۶ صفحه‌ی فولاد ST۳۷ به ضخامت ۱۰ mm به عنوان چارچوب آن طراحی و ماشین‌کاری شد. چارچوب بدنه‌ی مگنت، صفحات مستطیلی به ابعاد $500 \times 600 \text{ mm}^2$ است که مستطیلی به شکل $420 \times 342 \text{ mm}^2$ از داخل آن خالی شده است. قطب‌ها به شکل استوانه و شعاع شیب‌خورده‌ی ۵ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد، شکل ۵ و ۶. سوراخ‌های اتصال‌دهنده‌ی ورقه‌ها، در ناحیه‌ای انتخاب شده‌اند که کم‌ترین مقدار عبور شار را دارا است و از لحاظ مکانیکی بیش‌ترین فشار را بر صفحه وارد می‌کند. بنابراین، صفحات بدون فاصله در کنار هم قرار می‌گیرند.

استفاده از ورق فولاد با ضخامت کم‌تر، مشکلات یکپارچه بودن را برطرف می‌نماید. با این رویکرد، سرپا کردن^۱ ورق‌ها با دقت بالا الزامی است و نیازمند انتخاب روش مناسبی در طراحی و ساخت قطعات است.

در انتخاب نوع ماده فرومغناطیس بدنه‌ی مگنت، لازم است سطح اشباع مغناطیسی (B_s) معادل با شدت میدان مغناطیسی مورد نیاز و مقدار تراوایی نسبی (μ_r) در گستره کاری مگنت قرار گیرد. بر این اساس، بررسی‌ها نشان داد فولاد ۱۰۱۰ بهترین گزینه است.

با در نظر گرفتن موجودی بازار فلزات در ایران و عدم دسترسی به فولاد ۱۰۱۰، به عنوان جایگزین مناسب، فولاد ST۳۷ به عنوان شبیه‌ترین ماده از نظر موارد تشکیل‌دهنده، آنالیز و دسترس‌پذیری برای ساخت مگنت انتخاب شد، جدول ۱.

به منظور طراحی فیزیک، مکانیک بدنه، پیچه‌ی مگنت و دستیابی به میدان مغناطیسی مورد نظر در محل چشمه پنینگ، از کدهای کامسول^۲ و انسیس‌ماکسول^۳ برای طراحی فیزیک و سالیدورک^۴ برای طراحی مکانیک به کار گرفته شده‌اند. شایان ذکر است، به دلیل عدم دسترسی به بانک اطلاعات فولاد ST۳۷ در کدهای کامسول و انسیس‌ماکسول از داده‌های فولاد ۱۰۱۰ استفاده شده است.

شبیه‌سازی و طراحی انجام شده به منظور دستیابی به میدان یکنواخت ۷۰۰۰ گوس در طول ۱۵ میلی‌متر شعاعی از مرکز بین قطب‌ها (۶۰ میلی‌متر) که محل قرارگیری چشمه است در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. به منظور ساخت بدنه و پیچه‌ی مگنت، بر اساس طراحی انجام شده در کامسول، از نرم‌افزار سالیدورک برای طراحی مکانیکی استفاده شد.

جدول ۱. آنالیز فولاد ۱۰۱۰ و فولاد ST۳۷

الیاز فلزات	۱۰۱۰ [۱۲]	ST۳۷ [۱۴]
Fe	۹۹,۱۸ - ۹۹,۶۲ %	۹۹,۴۳ - ۹۹,۷۵ %
Mn	۰,۳۰ - ۰,۶۰ %	۰,۲۵ - ۰,۴ %
S	$\leq ۰,۰۵$ %	۰,۰۸ %
P	$\leq ۰,۰۴$ %	۰,۰۸ %
C	۰,۰۸۰ - ۰,۱۳ %	۰,۰۸ %

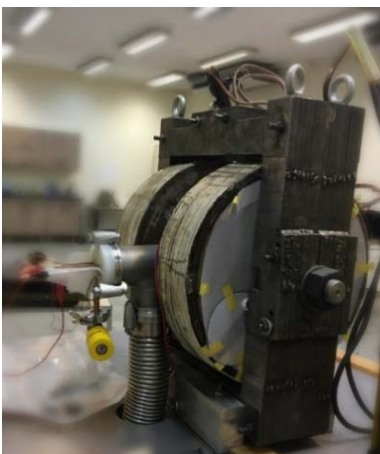
1. Assembly
2. Comsol
3. Ansys Maxwell
4. SolidWorks



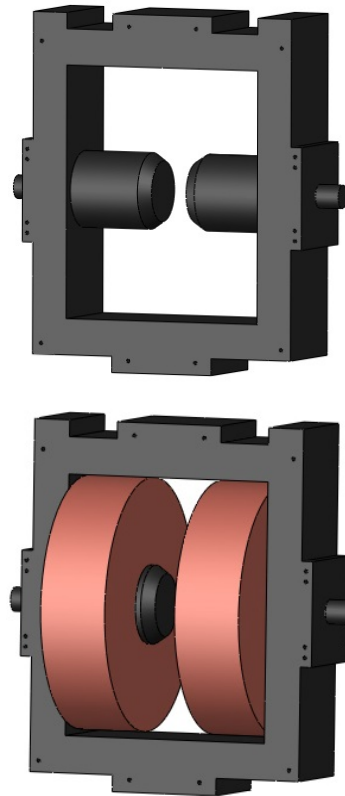
۳.۴ ساخت پیچه مگنت

با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامسول و انسیس‌ماکسول، به منظور تولید میدان مغناطیسی ۷۰۰۰ گوس در محدوده‌ی تعیین شده، لازم است که چگالی جریان حدود $J = 18333 \frac{A}{m^2}$ از سطح هر پیچه عبور کند.

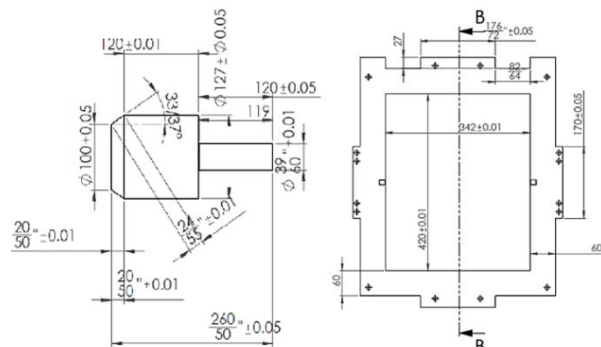
ساخت پیچه مگنت با استفاده از سیم‌پیچ مسی صورت گرفت. به دلیل جریان بالا و فضای کوچک برای قرارگیری پیچه‌های مسی، از سیم‌هایی با مقطع مستطیلی به ابعاد $10 \times 3 \text{ mm}^2$ استفاده شد. سیم‌های مسی به کار رفته، دارای دو روکش از جنس کپتون و فایبرگلاس هستند که تحمل حرارتی آن‌ها را افزایش می‌دهد. در نهایت، هر پیچه از ۳۵۰ دور سیم هواخنک تشکیل شد. شکل ۷، تصویر مگنت ساخته در آزمایشگاه دانشکده فیزیک دانشگاه تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مگنت ساخته شده در آزمایشگاه دانشکده فیزیک دانشگاه تهران.



شکل ۵. طراحی بدنه و پیچه‌های مگنت H.



شکل ۶. طرح چارچوب و قطب بدنه‌ی مگنت H، طراحی شده با نرم‌افزار سالیدورک.

در ساخت چارچوب بدنه، با ورقه‌های فولاد، برش‌های اولیه‌ی با واترجت^۱ اجرایی و سپس با استفاده از CNC^۲ با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر تراش داده شدند. انحنایی جزئی در سطح ورقه‌های فلزی سبب ایجاد فاصله در اتصال آن‌ها به یک‌دیگر و در نتیجه اتلاف و کاهش شار مغناطیسی عبوری از بدنه می‌شود. از این‌رو، برای اجتناب از تأثیر سوء وجود انحنا در هنگام اتصال ورقه‌ها، دو وجه هر یک از ۱۶ ورقه‌ی چارچوب با سنگ مغناطیسی صاف شد.

1. Water Jet
2. Computer Numerical Control



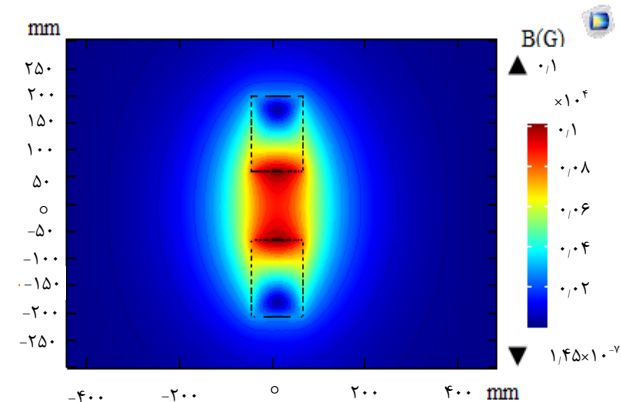
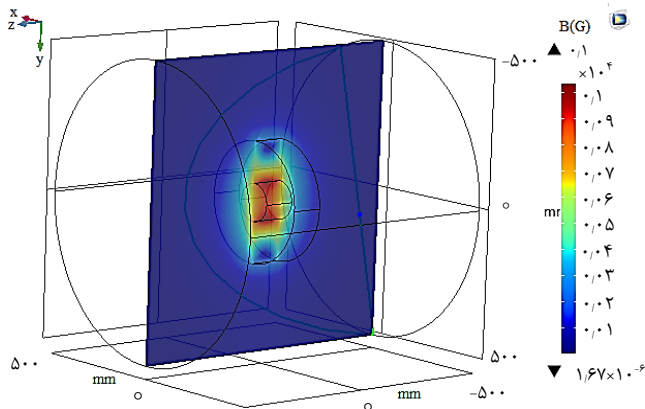
۵. نتیجه گیری

با استفاده از سنج‌های هال^۱ میدان مغناطیسی درون پیچه مسی ساخته شده با جریان عبوری ۵۵ A اندازه‌گیری شد و بزرگی آن ۱۰۳ mT به دست آمد. لازم به توضیح است این اندازه‌گیری از خطای سیستماتیک کمینه‌ی ۱۰ درصد ناشی از عدم جابجایی دقیق سنجه در مرکز پیچه متأثر شده است. شکل ۸، نمایی از شبیه‌سازی شدت میدان مغناطیسی پیچه‌ی طراحی شده به ازای جریان عبوری ۵۵ آمپر و اندازه‌گیری پیچه‌ی ساخته شده را نشان می‌دهد.

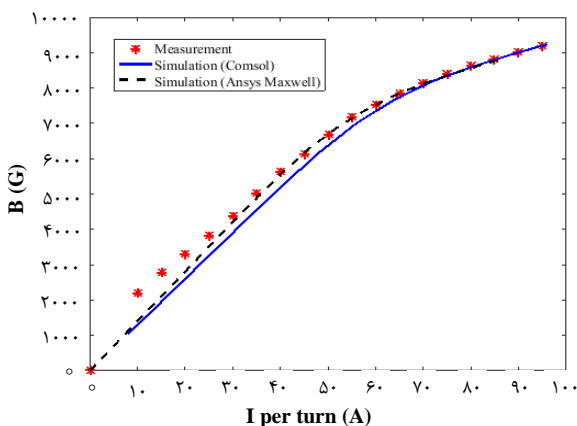
به منظور بررسی چگونگی تغییر میدان مغناطیسی نسبت به تغییرات جریان و پاسخ ماده‌ی فرومغناطیس، آزمون اشباع مغناطیسی مگنت اندازه‌گیری شد، شکل ۹. مقایسه بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میدان مغناطیسی، تطبیق قابل‌قبولی را نشان می‌دهد. بیشینه‌ی اختلاف داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ۲۰ درصد است که می‌تواند ناشی از در دسترس نبودن بانک اطلاعاتی فولاد ST۳۷ در شبیه‌سازها، ملاحظات ساخت و اتصال صفحات و یا خطای اندازه‌گیری باشد.

شکل ۱۰، نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در کامسول و انسیس ماکسول مربوط به تغییرات میدان مغناطیسی در راستای شعاع در صفحه‌ی تقارن بین دو قطب به ازای جریان ۵۵ آمپر نشان داده شده است. مقدار خطای سیستماتیک داده‌های اندازه‌گیری شده ۲۰ گوس برآورد شد که این برآورد از مقایسه‌ی میدان‌های اندازه‌گیری شده برای نقاط متقارن نسبت به مرکز به دست آمده است.

نتایج اندازه‌گیری ضمن تأیید داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها، بیانگر تغییرات نسبی شدت میدان مغناطیسی کم‌تر از ۱/۱ درصد در راستای شعاعی به طول ۳۲ میلی‌متر نسبت به شدت میدان در مرکز مگنت است.



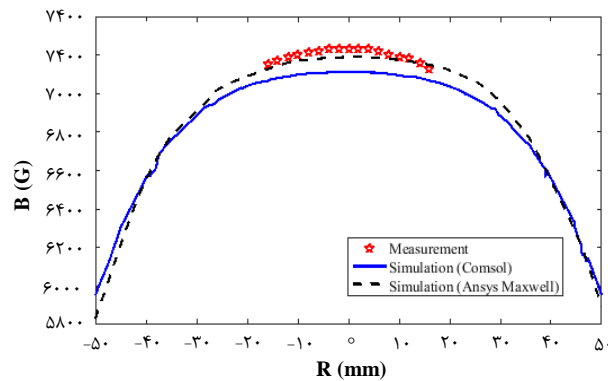
شکل ۸. نتایج شبیه‌سازی میدان مغناطیسی درون پیچه مسی با جریان ۵۵ آمپر (بالا). میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده، ۱۰۳ mT، در مرکز پیچه (پایین).



شکل ۹. داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی اشباع مغناطیسی مگنت با دو کد انسیس ماکسول و کامسول.

1. Hale Probe





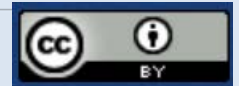
شکل ۱۰. شدت میدان مغناطیسی در فاصله بین قطبها بر حسب فاصله شعاعی به ازای جریان ۵۵ آمپر.

مراجع

- S. Russenschuck, *Design of accelerator magnets*, in *Introduction to Accelerator Physics*, Loutraki, Greece, (2000).
- H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics*, Berlin, Heidelberg: Springer, (2007).
- J.T. Tanabe, *Iron Dominated Electromagnets: Design, Fabrication, Assembly And Measurements*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., (2005).
- T. Zickler, *Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets*, in *Cern Accelerator School on Magnet, Belgium*, (2009).
- W. Hillert, *Transverse Linear Beam Dynamics*, arXiv:2107.02614v1, *Physics.acc-ph*, (2021).
- S. Sgobba, *Physics and measurements of magnetic materials*, in *Cern Accelerator School on Magnet, Belgium*, (2009).
- D. Einfeld, *Specifications, quality control, manufacturing, and testing of accelerator magnets*, in *Cern Accelerator School on Magnet, Belgium*, (2009).
- AZO Material, [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6539>.
- Metalitec, [Online]. Available: <https://metalitec.zriha.com/eng/raw-materials/st37>.
- Cyclotron Produced Radionuclides: Guidance on Facility Design and Production of [18F] Fluorodeoxyglucose (FDG)*, IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series, No. 3, Vienna, (2012).
- Cyclotron Produced Radionuclides: Emerging Positron Emitters for Medical Applications: 64Cu and 124I*, IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Reports, No. 1, Vienna, (2016).
- R. Solhju, et al, *Design of 10 MeV cyclotron accelerator*, *Iranian Journal of Physics Research*, **15**(2), 225-234 (2015).
- D.J. Clark, *Ion Sources for Cyclotrons*, in *9th International Conference on Cyclotrons and their Applications*, Caen, France, (1981).
- B. Qin, et al, *Central region design for a 10MeV internal ion source cyclotron*, *Chinese Physics, C*, **33**(8), 682 (2009).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

معصومه یارمحمدی سطری، حمیدرضا لطفی، مسعود مهجور شفیعی (۱۴۰۲)، طراحی و ساخت الکترومگنت دوقطبی چشمه پنینگ یون هیدرون منفی، ۱۰۴، ۱۶۳-۱۶۹

DOI: 10.24200/nst.2023.1320

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1320.html

