

طراحی و ساخت اولین نمونه چهار قطبی الکترومغناطیسی حلقه انبارش طرح چشمه نور ایران

فرهاد سعیدی^{۱،۲}، جعفر دهقانی^۱، وحید مرادی^۱، ابوالفضل شهوه^۱، محمد رزازیان^۱، سمیرا فاتحی^۱

حسین قاسم^{۱،۳}، جواد رحیقی^۱ و رضا پور ایمانی^۲

۱. طرح چشمه نور ایران، پژوهشگاه دانش های بنیادی، خیابان ارتش، تهران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک

۳. پژوهشکده ذرات و شتابگرها، پژوهشگاه دانش های بنیادی، خیابان ارتش، تهران

پست الکترونیکی: farhad.saeidi@ipm.ir

چکیده

چشمه نور ایران مجموعه ای از شتابگر خطی، حلقه افزایش دهنده و یک حلقه انبارش الکترون با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت و جریان الکتریکی ۴۰۰ میلی آمپر است. علاوه بر ایجاد اولین آزمایشگاه مقیاس بزرگ برای تحقیقات و مطالعات بین رشته ای در ایران، طرح چشمه نور ایران امکان دستیابی به تکنولوژی طراحی و ساخت قطعات و تجهیزات شتابگر را فراهم می آورد. حلقه انبارش چشمه نور ایران دارای ۱۰۰ الکترومغناطیس دوقطبی، ۳۲۰ چهار قطبی و ۳۲۰ شش قطبی بوده که هر یک به منظوری خاص در حلقه انبارش چیده می شوند. در این مقاله مراحل طراحی و ساخت یک نمونه از الکترومغناطیس های چهار قطبی به عنوان اولین نمونه ساخته شده در ایران به تفصیل آورده شده است. مونتاژ الکترومغناطیس چهار قطبی به اتمام رسیده و اندازه گیری های مغناطیسی آن در حال انجام است. طرح چشمه نور ایران در حال طراحی و ساخت تمامی الکترومغناطیس های مورد نیاز طرح است.

واژه های کلیدی: چهار قطبی الکترومغناطیسی، کیفیت میدان مغناطیسی، هسته، سیم پیچ

۱. مقدمه

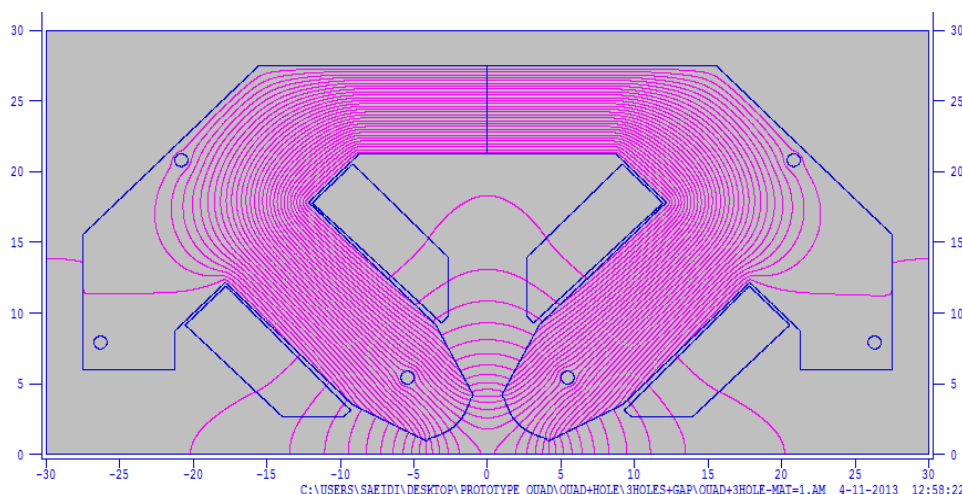
باریکه و فوتونی بسیار مطلوب که در هنگام تأسیس با بسیاری از تسهیلات روز جهان از نظر امکانات تجربی و تحقیقاتی برابری خواهد کرد.

اجزای مغناطیسی از مهمترین قسمت های یک

طرح شتابگر ملی ایران، اولین تسهیلات آزمایشگاهی مقیاس بزرگ برای تحقیقات و مطالعات بین رشته ای در کشور است که شامل شتابگر سنکروترون الکترون با انرژی ۳ GeV با کیفیت

جدول ۱. مشخصات چهار قطبی نمونه حلقه انبارش چشمه نور ایران.

مشخصه	واحد	مقدار
گرادیان میدان	T/m	۱۸
شعاع شکاف	mm	۳۰
محدوده پایداری میدان ^۱	mm	±۱۸
$\Delta B/B$	-	$< 2 \times 10^{-4}$
طول مکانیکی هسته	mm	۲۳۳



شکل ۱. طراحی دوبعدی الکترومغناطیس چهار قطبی نمونه طرح چشمه نور ایران با کد POISSON.

ایجاد تجربه در خصوص محدودیت‌های ساخت با توجه به طراحی بوده است. الکترومغناطیس‌های چهار قطبی یکی از اصلی ترین انواع الکترومغناطیس در یک سنکروترون هستند که از چهار هسته آهنی و چهار سیم پیچ تشکیل شده‌اند. ویژگی‌های مورد نظر نمونه این الکترومغناطیس در جدول ۱ آورده شده است.

۳. طراحی فیزیکی

پس از تعیین مشخصات الکترومغناطیسی چهار قطبی توسط گروه دینامیک باریکه، با استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی POISSON [۱]، FEMM [۲] و RADIA [۳] طراحی فیزیکی هندسه قطب‌ها و محاسبه خنک کاری آن انجام گرفت (شکل ۱).

سیستم تأمین جریان الکتریکی و خنک کاری الکترومغناطیس‌ها

سنکروترون هستند که وظیفه هدایت، کانونی کردن و اصلاح باریکه و مسیر آن را بر عهده دارند. مغناطیس‌های مورد استفاده در سنکروترون شامل دوقطبی، چهار قطبی و شش قطبی هستند. دو قطبی‌ها با ایجاد میدان مغناطیسی ثابت، وظیفه انحراف باریکه را بر عهده دارند، چهار قطبی‌ها در کانونی کردن باریکه و شش قطبی‌ها در تصحیح ابراهمی باریکه به کار می‌روند. در این مقاله روش طراحی فیزیکی، مکانیکی و فرآیند ساخت چهار قطبی نمونه حلقه انبارش چشمه نور ایران ارائه شده است. لازم به ذکر است که نتایج اولیه اندازه‌گیری مغناطیسی نیز انجام و با نتایج طراحی مقایسه شده است.

۲. چهار قطبی الکترومغناطیسی نمونه

یکی از اهداف طراحی و ساخت این نمونه بررسی میزان انطباق طراحی و عملکرد فیزیکی الکترومغناطیس‌های ساخته شده و

۱. Good field region

چشمه نور ایران در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تغییرات نسبی میدان در ناحیه پایداری کمتر از 2×10^{-4} است [۶].

۵. آزمون اشباع مغناطیسی

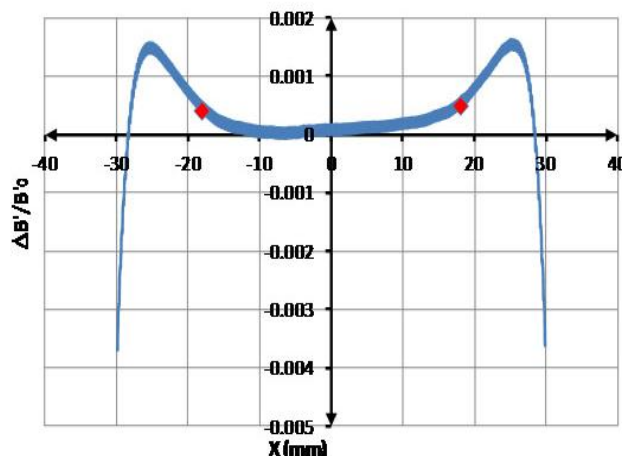
یکی از موارد مهم طراحی هر نوع الکترومغناطیس، محاسبه صحیح ابعاد و شکل هسته و سیم پیچ است که اشباع مغناطیسی می‌تواند معیار مناسبی برای سنجش طراحی قسمت‌های مختلف الکترومغناطیس باشد. بدین منظور طراحی چهارقطبی نمونه به گونه‌ای بوده تا نسبت مولفه اصلی چند قطبی به جریان کارکرد الکترومغناطیس با افزایش جریان ثابت ماند یعنی هسته آهنی به اشباع نرسید و نقطه جریان در ناحیه خطی قرار گرفت. آزمون اشباع مغناطیسی با رسم میدان مغناطیسی و مقدار بهنجار شده آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

۶. طراحی سه بعدی

شبیه سازی سه بعدی الکترومغناطیس چهارقطبی نمونه نیز جهت ارزیابی انتگرال هارمونیک‌های چند قطبی در راستای مسیر باریکه توسط نرم افزار RADIA [۳] انجام شده است. این مدل سه بعدی همچنین برای پیش بینی شکل پخ (چمفر) ۳۵ درجه با عمق ۹ میلی‌متر، در دو سر هر قطب الکترومغناطیس برای رسیدن به طول موثر ۲۶۰ میلی‌متری مورد نظر و کاهش حداکثری اثرات میدانهای لبه‌ای دو سر قطب الکترومغناطیس مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ چند قطبی‌های مراتب بالاتر برای چهار قطبی نمونه و اثر پخ در کوچک کردن این چندقطبی‌ها نمایش داده شده است.

۷. طراحی مکانیکی

پس از طراحی فیزیکی اجزای اصلی الکترومغناطیس چهار قطبی (هسته و سیم پیچ)، طراحی مکانیکی الکترومغناطیس و تمامی اجزای مورد استفاده در آن از قبیل نگهدارنده‌های نگهدارنده سیم پیچ‌ها و هسته‌ها، پنل خنک کاری، پنل الکتریکی، پایه‌های



شکل ۲. کیفیت میدان مغناطیسی چهارقطبی نمونه.

توسط هادی‌های حفره‌دار^۱ انجام می‌شود. در محاسبه الکتریکی و خنک کاری، پارامترهای چگالی جریان، افت ولتاژ و افت فشار در طراحی بسیار مهم است. با انتخاب ابعاد هادی حفره‌دار 4.05×8.66 میلی‌متر مربع و کانال خنک‌کننده آب 1.81×6.42 میلی‌متر مربع، چگالی جریان طراحی شده، 4.1 A/mm^2 شد که مقدار قابل قبولی برای سیم پیچ‌ها با خنک‌کننده آب است. افت ولتاژ و افت فشار به ترتیب 24.5 ولت و 8.9×10^5 پاسکال محاسبه شد و در نهایت توان مصرفی کل 2.36 کیلووات است.

در طراحی فیزیکی مشخصه‌هایی مانند کیفیت میدان^۲، منحنی جریان^۳ و مولفه‌های چندقطبی^۴ مراتب بالاتر مورد بررسی قرار گرفت تا از محدوده مجاز فراتر نروند [۴]. در ادامه این مشخصه‌ها به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرند.

۴. کیفیت میدان

کیفیت میدان یک چهارقطبی به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta B'}{B'} = \frac{B' - B_0}{B_0} \quad (1)$$

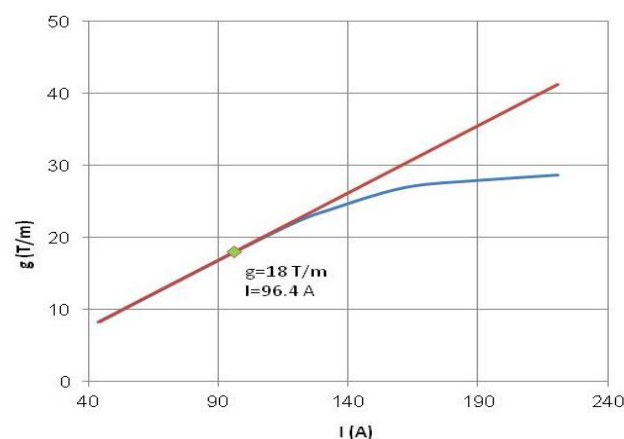
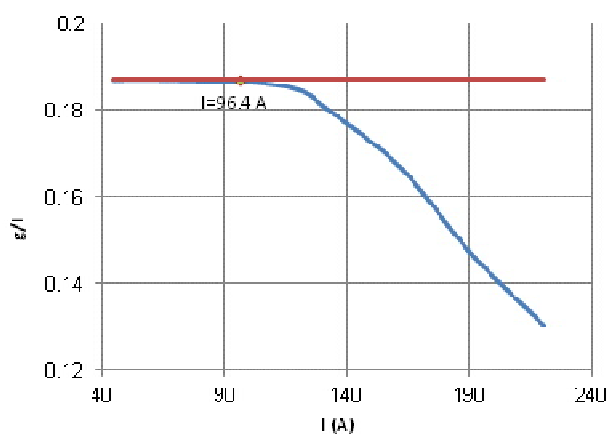
که در آن B_0' گرادیان میدان در مرکز هندسی چهار قطبی است. نتایج محاسبات کیفیت میدان برای چهارقطبی نمونه طرح

۱. Hollow conductor

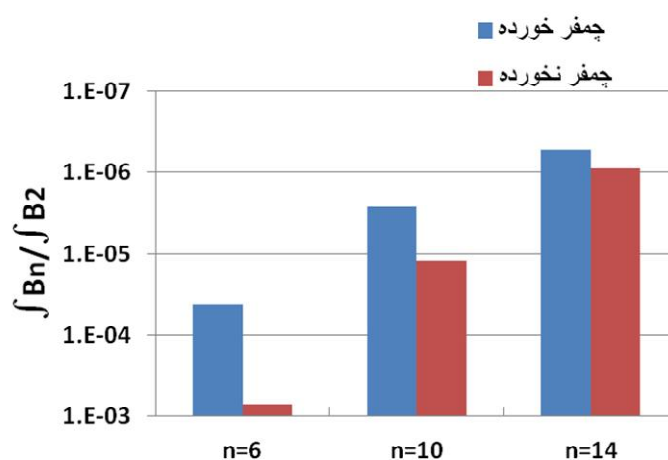
۲. Field quality

۳. Excitation curve

۴. Multipole component



شکل ۳. گرادیان میدان بهنجار شده (راست) و تغییرات شدت گرادیان (چپ) نسبت به جریان چهارقطبی.



شکل ۴. چند قطبی‌های مراتب بالاتر برای چهار قطبی نمونه قبل و بعد از چمفر زدن.

قبیل شدت میدان، تراوایی مغناطیسی، ایستا بودن میدان مغناطیسی و یا میدان متغیر با زمان^۱، ماده مناسب را انتخاب می‌کند. به دلیل اجتناب از جریان‌های گردابی^۲؛ هسته لزوماً به صورت لایه لایه خواهد بود و در صورت سروکار داشتن با میدان مغناطیسی ایستا^۳، می‌تواند به صورت یک تکه انتخاب شود که این امر منجر به افزایش مدت زمان رسیدن به میدان اسمی (مدت زمان مهیا شدن)^۴ و عدم یکنواختی میدان‌های الکترومغناطیس‌ها نسبت به یکدیگر می‌شود.

در حلقه انبارش با میدان‌های ایستا سر و کار داریم،

نگهدارنده الکترومغناطیس، سطوح مورد استفاده در هم راستایی و غیره انجام شده است. در شکل ۵ نمای شماتیک طراحی مکانیکی و ابعاد هسته و سیم پیچ طراحی شده نشان داده شده است.

۸. مراحل ساخت

ساخت انواع الکترومغناطیس‌ها در حالت کلی تقریباً مشابه یکدیگر است و در جزئیات با یکدیگر متفاوت هستند که به اختصار در قسمت‌های بعدی آورده شده است.

۸.۱. انتخاب ورق

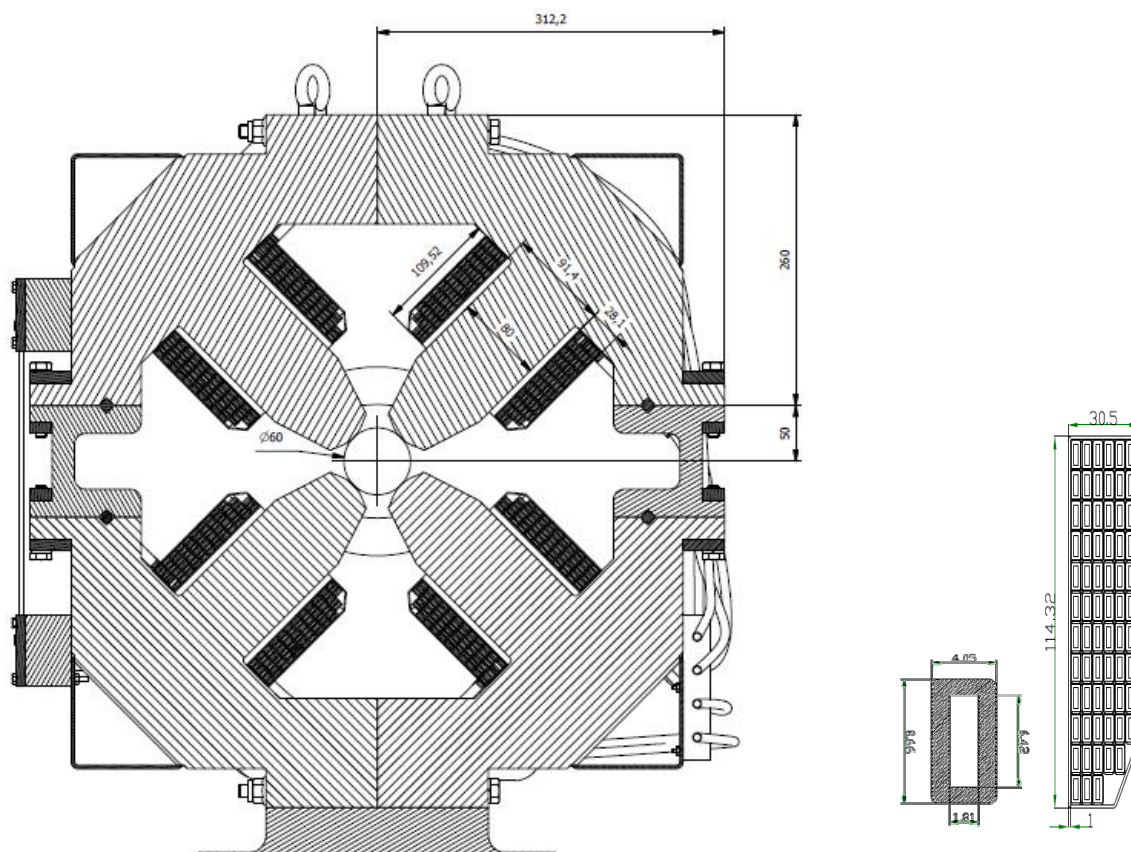
فرآیند انتخاب ورق برای یک الکترومغناطیس شامل مراحل مختلف است. طراح با توجه به مشخصات میدان مغناطیسی از

۱. Ramping field

۲. Eddy current

۳. Static field

۴. Warm-up time



شکل ۵. طراحی مکانیکی الکترومغناطیس چهار قطبی و سیم پیچ و ابعاد آن بر حسب میلی‌متر.

۳ میلی‌متر جهت انجام عملیات ماشین‌کاری، اضافه برش در نظر گرفته شد.

۳.۸. فشرده سازی و پخت

قبل از انجام عملیات فشرده سازی لازم بود که ورق‌ها با رزین مناسب پوشش داده شوند تا علاوه بر چسبندگی از ایجاد جریان‌های گردابی^۳ جلوگیری شود. این مرحله توسط یک دستگاه که دارای دو غلطک است انجام شد و رزین به طور یکنواخت روی ورق را پوشاند. پس از انجام این مرحله ورق‌ها داخل نگهدارنده مربوط به فشرده سازی آنها قرار داده شده و به وسیله پیچ‌های تعبیه شده در نگهدارنده ورق‌ها به هم فشرده شدند (شکل ۶). سپس ورق‌ها همراه با نگهدارنده داخل کوره گذاشته و دو مرحله عملیات پخت رزین انجام شد. ابتدا به مدت ۶ ساعت و در درجه حرارت ۸۰ درجه سانتیگراد و سپس

عوامل تعیین کننده برای انتخاب ماده هسته اول سطح اشباع مغناطیسی^۱ و دوم مقدار تراوایی مغناطیسی نسبی^۲ آن در گستره کاری الکترومغناطیس است. با توجه به این موارد، ورق M۸۰۰-۱۰۰A با ضخامت ۱ میلی‌متر برای هسته این الکترومغناطیس انتخاب شد.

۲.۸. برش لیزری

بهترین و سریع‌ترین نحوه برش ورق برای ساخت الکترومغناطیس استفاده از قالب برش در دستگاه پرس بوده که به دلیل مقرون به صرفه نبودن برای ساخت یک الکترومغناطیس از روش‌های دیگری نظیر برش با استفاده از دستگاه لیزر استفاده شد. برش ورق با این روش اثر نامطلوب در محدوده برش ایجاد کرد. از این رو در قسمت‌های حساس مخصوصاً منطقه سر هر قطب، میدان مغناطیسی در حدود ۲ تا

۱. Magnetic saturation

۲. Relative magnetic permeability

۳. Eddy current



شکل ۷. هسته یکپارچه بعد از پخت.



شکل ۶. چیدن ورق‌های آغشته به رزین در درون نگهدارنده فشرده سازی.

هادی جریان الکتریکی است قسمت‌های اضافی برش را از هسته جدا می‌کند (شکل ۸).

قسمت بیرونی هسته که تاثیری بر میدان مغناطیسی ندارد در جهت طولی جوش داده شد تا حتی در بهترین شرایط فشرده سازی، ورق‌ها بعد از مدت طولانی و بر اثر جریان داشتن میدان مغناطیسی در هسته از هم جدا نگردند. در زمان ماشینکاری توسط دستگاه‌های براده بردار مانند فرز CNC، به دلیل وجود نیروی براده برداری که باعث جدا شدن لایه‌ها از یکدیگر می‌شود، این کار معمولاً قبل از ماشینکاری انجام می‌گیرد.



شکل ۸. نمونه برشکاری شده توسط دستگاه سیم برش.

۵.۸. سیم پیچ

نحوه پیچیدن سیم پیچ ابتدا توسط نرم افزار، طراحی و بر همین اساس نگهدارنده مربوط به این کار ساخته شد. برای پیچیدن کوئل‌ها، نگهدارنده را روی دستگاه تراش بسته و سیم را حول نگهدارنده چرخانده تا به شکل و اندازه مورد نظر رسید (شکل ۹). سپس کوئل پیچیده شده را از نگهدارنده خارج کرده و عملیات VPI روی آن انجام گرفت. عملیات VPI با استفاده از دستگاه تولید کننده خلاء و تزریق رزین مناسب به درون منفذهای کوئل و در نهایت پخت کوئل آغشته به رزین انجام گردید.

۶.۸. مونتاژ

پس از آماده شدن قسمت‌های اصلی از قبیل هسته، سیم پیچ و

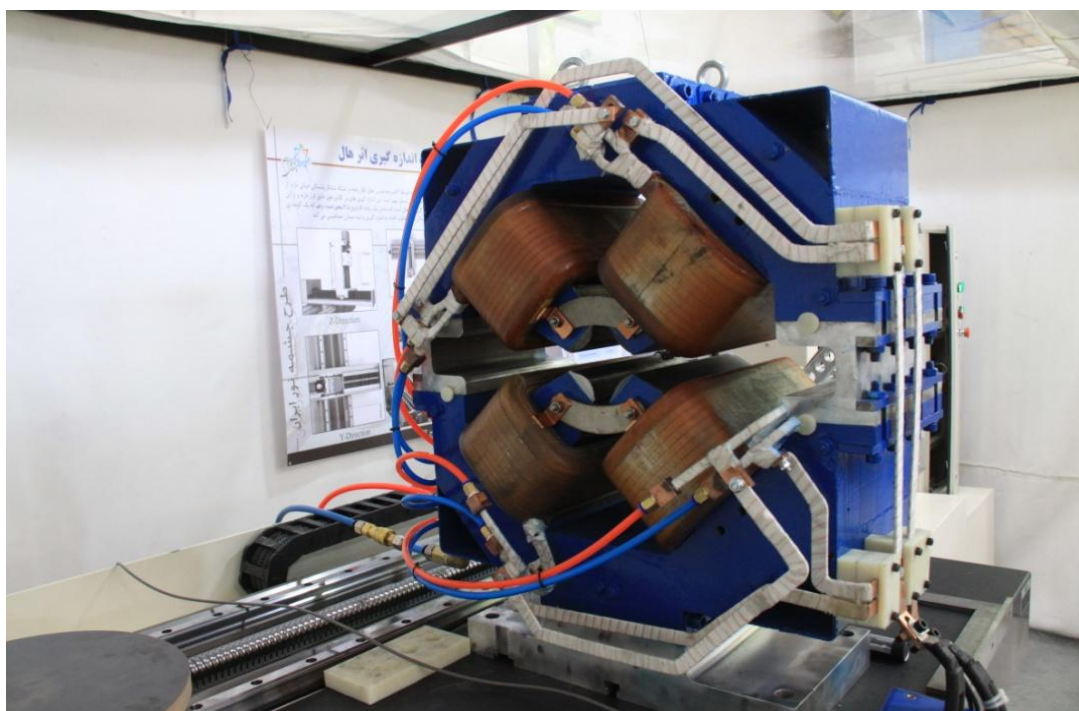
به مدت ۴ ساعت و در درجه حرارت ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد پخت صورت گرفت و هسته برای انجام مراحل ماشین‌کاری آماده شد. یکی از هسته‌های چهار قطبی ساخته شده بعد از مرحله پخت در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴.۸. ماشینکاری و جوشکاری

به دلیل حساسیت میدان منطقه سر قطب الکترومغناطیسی از لحاظ صافی سطح و دقت ساخت، ماشین‌کاری هسته به وسیله دستگاه سیم برش انجام شد. این دستگاه مختصات سر قطب و سطوح مورد نظر را به صورت فایل CAD دریافت کرده و دقیقاً بر طبق آن اطلاعات مسیر برش را طی می‌کند و به وسیله سیم برنجی به قطر تقریبی ۰/۲ میلی‌متر که



شکل ۹. پیچیدن کویل روی نگهدارنده توسط دستگاه تراش (چپ) سیم پیچ آماده شده بعد از عملیات VPI (راست).



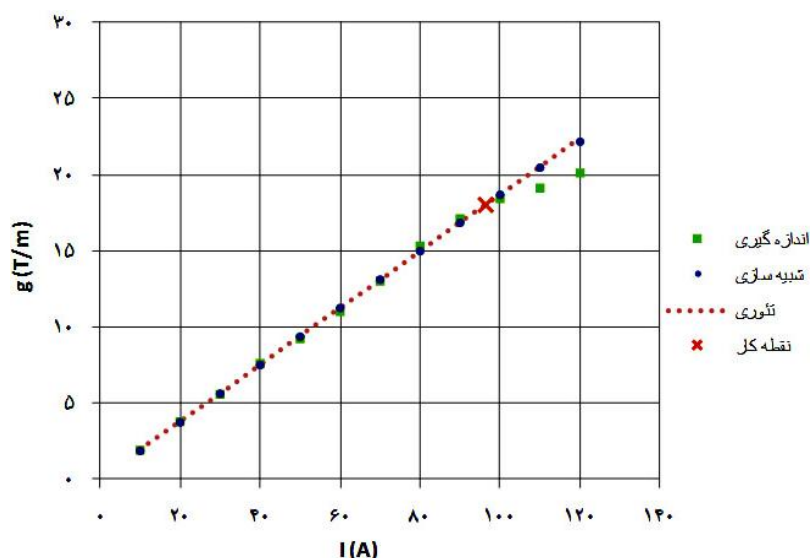
شکل ۱۰. الکترومغناطیس چهارقطبی نمونه ساخته شده در طرح چشمه نور ایران.

شد. در شکل ۱۰ الکترومغناطیس چهارقطبی نمونه ساخته شده در طرح چشمه نور ایران به همراه اتصالات الکتریکی و سرمایشی آن نشان داده شده است.

۹. اندازه‌گیری مغناطیسی

یکی از راه‌های اندازه‌گیری مغناطیسی استفاده از حسگر اثرهال است. آزمایشگاه اندازه‌گیری مغناطیسی چشمه نور ایران به یک میز اندازه‌گیری اثرهال مجهز شده است. دقت اندازه‌گیری به دو

همچنین سایر قسمت‌های مورد نیاز، الکترومغناطیس مونتاژ شد. برای این کار ابتدا کویل‌ها را در جای خود مقید و دو هسته بالایی و پایینی به صورت مجزا به وسیله پین و پیچ به یکدیگر متصل گردید. سپس پایه نگه دارنده به دو هسته پایینی به وسیله پین و پیچ متصل شد و دو هسته بالایی به وسیله پین طولی روی دو هسته پایینی در محل خود قرارگرفت. در مرحله نهایی قسمت‌های الکتریکی و سرمایشی الکترومغناطیس متصل و آماده برای اندازه‌گیری مغناطیسی



شکل ۱۱. گرادیان اندازه‌گیری شده الکترومغناطیس چهار قطبی نمونه و مقایسه آن با طراحی.

۱۰. نتیجه‌گیری

اولین نمونه چهار قطبی طرح چشمه نور ایران بعد از طراحی‌های فیزیکی و مکانیکی، ساخته و اندازه‌گیری شد. ساخت این الکترومغناطیس تجربیات بسیار ارزنده‌ای در هر یک از زمینه‌های طراحی، ساخت و اندازه‌گیری مغناطیسی الکترومغناطیس‌های حلقه انبارش سنکروترون در بر داشته است. دستیابی به دانش فنی ساخت این الکترومغناطیس‌ها، گامی بزرگ در توسعه این شاخه بسیار مهم از علم شتاب دهنده در ایران است.

بخش تقسیم می‌شود. الف) دقت مکان سنجی و ب) دقت مغناطیس سنجی. دقت مکان سنجی میز اندازه‌گیری مورد استفاده ۰/۰۱ میلی‌متر است که توسط خط‌کش‌های دیجیتالی با تفکیک دهی ۲ میکرومتر حاصل می‌شود. برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی از حسگرهای بسیار دقیق که در مجاورت یک میدان ثابت توسط ^1NMR کالیبره شده است، استفاده شد. ناحیه حساس مغناطیسی این حسگر 0.01×0.01 میلی‌متر مربع است. دقت کلی میز اندازه‌گیری مغناطیسی بین ۵۰ تا ۱۰۰ ppm است. نتایج گرادیان اندازه‌گیری شده مغناطیسی را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده و با نتایج طراحی مقایسه کرد.

مراجع

1. Poisson/Superfish Group of Codes, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-87-126 (1987).
2. Finite Element Method Magnetics code (FEMM), www.FEMM.info.
3. RADIA magnet design code, <http://ftp.esrf.eu/pub/InsertionDevices/>.
4. J Tanabe, "Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurements", World Scientific, Singapore (2005).
5. F Saeidi, et al., "Iranian Light Source Facility Storage Ring Low Field Magnets", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, June 15-20, (2014) 1241; <http://ilsf.ipm.ac.ir/>.
6. H Ghasem, F Saeidi, and I Ahmadi, *JINST* **8** (2013) P02023.