مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۵، شمارهٔ ۲، ویژه‌نامه، تابستان ۱۳۹۴
مقاله نامهٔ اولین کنفرانس ملی شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آن‌ها، آذر ۱۳۹۲

طراحی و ساخت اولین نمونهٔ چهارقطبی الکترومغناطیسی حلقهٔ انبارش طرح چشمهٔ 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 چشمهٔ نور ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، خیابان ارتش، تهران
۲. گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه اراک، اراک
۳. پژوهشکدهٔ ذرات و شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، خیابان ارتش، تهران

پست الکترونیکی: farhad.saeidi@ipm.ir

چکیده

چشمهٔ نور ایران مجموعه‌ای از شتابگر خطی، حلقهٔ افزاینده و یک حلقهٔ 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 رشته‌ای در ایران، طرح چشمهٔ نور ایران امکان دستیابی به تکنولوژی طراحی و ساخت قطعات و تجهیزات شتابگر را فراهم می‌آورد. حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران دارای ۱۰۰ الکترومغناطیس دوقطبی، ۳۲۰ چهار قطبی و ۳۲۰ شش قطبی بوده که هر یک به منظوری خاص در حلقهٔ انبارش چیده می‌شوند. در این مقاله مراحل طراحی و ساخت یک نمونه از الکترومغناطیس‌های چهارقطبی به عنوان اولین نمونه ساخته شده در ایران به تفصیل آورده شده است. مونتاژ الکترومغناطیس چهارقطبی به اتمام رسیده و اندازه‌گیری‌های مغناطیسی آن در حال انجام است. طرح چشمهٔ نور ایران در حال طراحی و ساخت تمامی الکترومغناطیس‌های مورد نیاز طرح است.

واژه‌های کلیدی: چهارقطبی الکترومغناطیسی، کیفیت میدان مغناطیسی، هسته، سیم پیچ

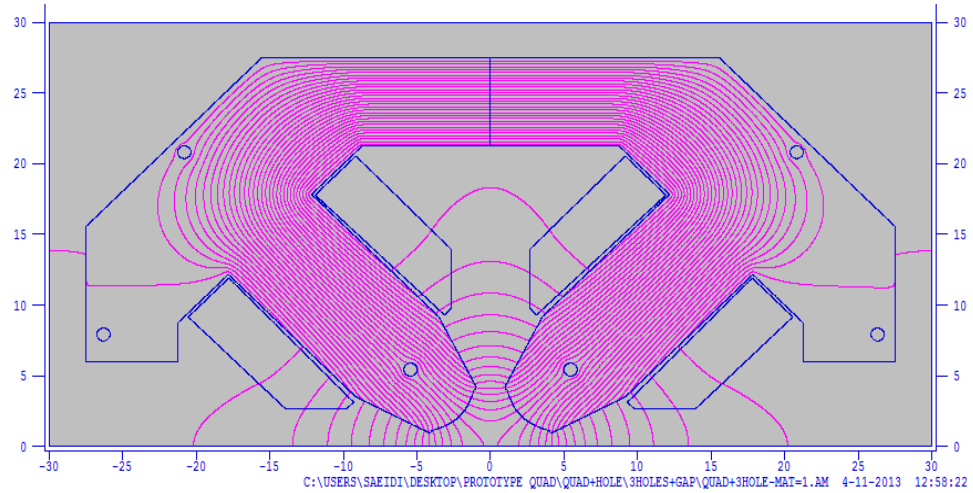
۱. مقدمه

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

جدول ۱. مشخصات چهار قطبی نمونهٔ حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران.

مشخصه	واحد	مقدار
گرادیان میدان	T/m	۱۸
شعاع شکاف	mm	۳۰
محدودهٔ پایداری میدان[۱]	mm	±۱۸
$\Delta B/B$	–	$<۲\times۱۰^{-۴}$
طول مکانیکی هسته	mm	۲۳۳



شکل ۱. طراحی دوبعدی الکترومغناطیس چهارقطبی نمونهٔ طرح چشمهٔ نور ایران با کُد POISSON.

سنکروترون هستند که وظیفهٔ هدایت، کانونی کردن و اصلاح باریکه و مسیر آن را را بر عهده دارند. مغناطیس‌های مورد استفاده در سنکروترون شامل دوقطبی، چهار قطبی و شش قطبی هستند. دو قطبی‌ها با ایجاد میدان مغناطیسی ثابت، وظیفهٔ انحراف باریکه را برعهده دارند، چهار قطبی‌ها در کانونی کردن باریکه و شش قطبی‌ها در تصحیح ابیراهی باریکه به کار می‌روند. در این مقاله روش طراحی فیزیکی، مکانیکی و فرآیند ساخت چهارقطبی نمونه حلقه انبارش چشمهٔ 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

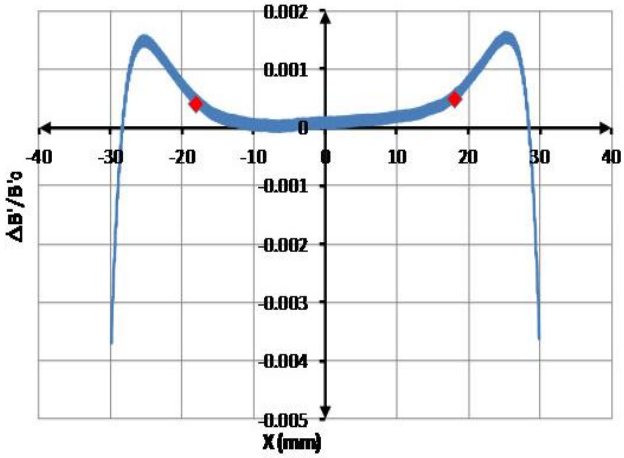
یکی از اهداف طراحی و ساخت این نمونه بررسی میزان انطباق طراحی و عملکرد فیزیکی الکترومغناطیس‌های ساخته شده و ایجاد تجربه در خصوص محدودیت‌های ساخت با توجه به طراحی بوده است. الکترومغناطیس‌های چهار قطبی یکی از اصلی ترین انواع الکترومغناطیس در یک سنکروترون هستند که از چهار هسته آهنی و چهار سیم پیچ تشکیل شده‌اند.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

۳. طراحی فیزیکی

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

سیستم تأمین جریان الکتریکی و خنک کاری الکترومغناطیس‌ها

۱. Good field region



شکل ۲. کیفیت میدان مغناطیسی چهارقطبی نمونه.

توسط هادی‌های حفره‌دار[۱] انجام می‌شود. در محاسبهٔ الکتریکی و خنک کاری، پارامترهای چگالی جریان، افت ولتاژ و افت فشار در طراحی بسیار مهم است. با انتخاب ابعاد هادی‌حفره‌دار ۸٫۶۶ ×۴٫۰۵ میلی‌مترمربع و کانال خنک‌کنندهٔ آب ۶٫۴۲×۱٫۸۱ میلی‌مترمربع، چگالی جریان طراحی شده، ۴٫۱ A/mm^2 شد که مقدار قابل قبولی برای سیم پیچ‌ها با خنک‌کنندهٔ آب است. افت ولتاژ و افت فشار به ترتیب ۲۴٫۵ ولت و $۸٫۹\times۱۰^{۵}$ پاسکال محاسبه شد و در نهایت توان مصرفی کل ۲٫۳۶ 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]

$$\frac{\Delta B}{B}=\frac{\Delta B'}{B'}=\frac{B'-B'_{\circ}}{B'_{\circ}}, \qquad (۱)$$

که در آن $B'_{\circ}$ گرادیان میدان در مرکز هندسی چهار قطبی است. نتایج محاسبات کیفیت میدان برای چهارقطبی نمونهٔ طرح چشمهٔ نور ایران در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تغییرات نسبی میدان در ناحیه پایداری کمتر از ۲×۱۰^{-۴} است [۶].

۵. آزمون اشباع مغناطیسی

یکی از موارد مهم طراحی هر نوع الکترومغناطیس، محاسبهٔ صحیح ابعاد و شکل هسته و سیم‌پیچ است که اشباع مغناطیسی می‌تواند معیار مناسبی برای سنجش طراحی قسمت‌های مختلف الکترومغناطیس باشد. بدین منظور طراحی چهارقطبی نمونه به گونه‌ای بوده تا نسبت مولفهٔ اصلی چند قطبی به جریان کارکرد الکترومغناطیس با افزایش جریان ثابت ماند یعنی هستهٔ آهنی به اشباع نرسید و نقطهٔ جریان در ناحیهٔ خطی قرار گرفت. آزمون اشباع مغناطیسی با رسم میدان مغناطیسی و مقدار بهنجار شدهٔ آن در شکل۳ نشان داده شده است.

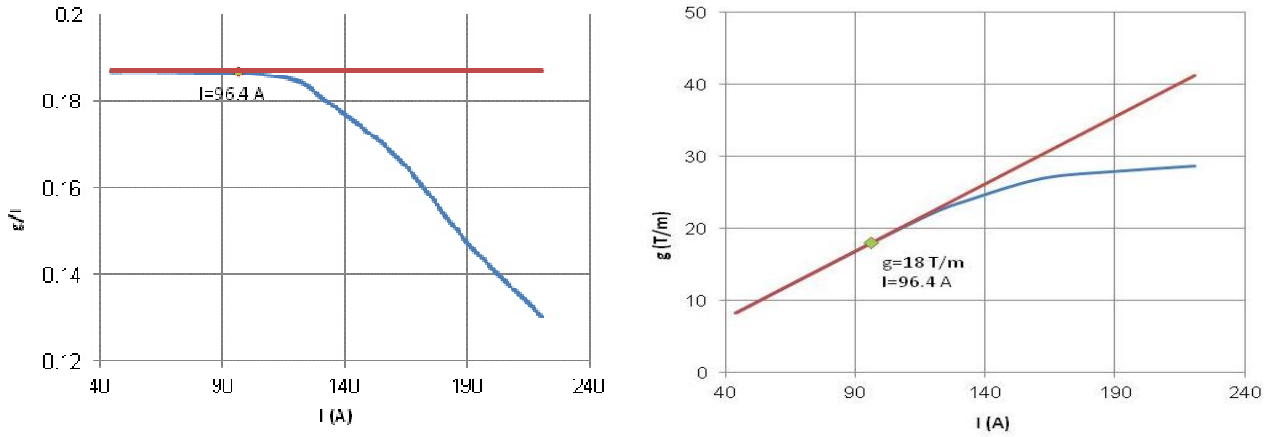
۶. طراحی سه بعدی

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[۵]) 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.

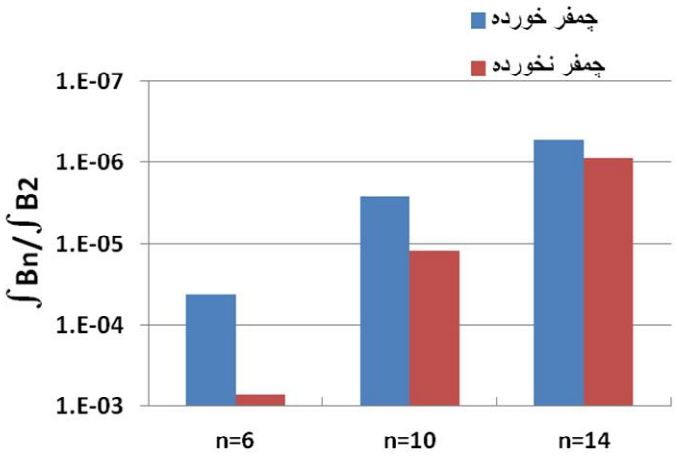
۷. طراحی مکانیکی

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

۱. Hollow conductor
۲. Field quality
۳. Excitation curve
۴. Multipole component
۵. Chamfer



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.

نگهدارنده الکترومغناطیس، سطوح مورد استفاده در هم راستایی و غیره انجام شده است. در شکل۵ نمای شماتیک طراحی مکانیکی و ابعاد هسته و سیم پیچ طراحی شده نشان داده شده است.

۸. مراحل ساخت

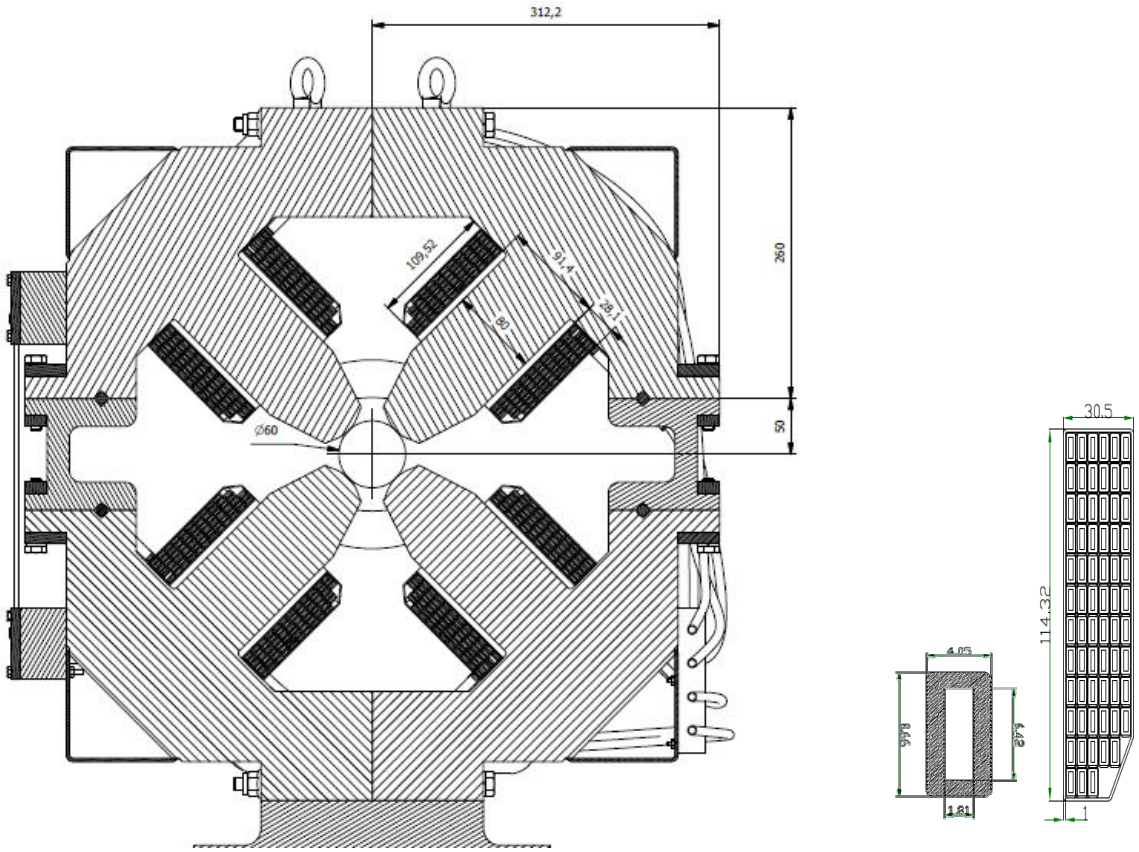
ساخت انواع الکترومغناطیس‌ها در حالت کلی تقریبا مشابه یکدیگر است و در جزئیات با یکدیگر متفاوت هستند که به اختصار در قسمت‌های بعدی آورده شده است.

۸. ۱. انتخاب ورق

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

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.

عوامل تعیین کننده برای انتخاب مادهٔ هستهٔ اول سطح اشباع مغناطیسی[۱] و دوم مقدار تراوایی مغناطیسی نسبی[۲] آن در گسترهٔ 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 سریع ترین نحوهٔ 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 منطقهٔ سر هر قطب، میدان مغناطیسی در حدود ۲ تا 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 ورق ها 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 ٦). سپس ورق‌ها همراه با نگهدارنده داخل کوره گذاشته و دو مرحله عملیات پخت رزین انجام شد. ابتدا به مدت ٦ ساعت و در درجهٔ حرارت ۸۰ درجهٔ سانتیگراد و سپس

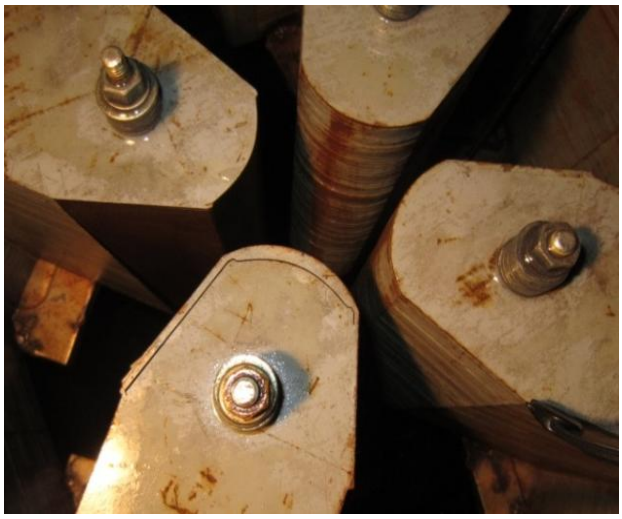
۱. Magnetic saturation

۲. Relative magnetic permeability

۳. Eddy current

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

شکل ۷. هستهٔ یکپارچه بعد از پخت.



شکل ۸. نمونهٔ برشکاری شده توسط دستگاه سیم برش.

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

۴.۸. ماشینکاری و جوشکاری

به دلیل حساسیت میدان منطقهٔ 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 دقیقا بر طبق آن اطلاعات مسیر برش را طی می‌کند و به وسیله سیم برنجی به قطر تقریبی ۰٫۲ میلی‌متر که 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 لایه ها از یکدیگر می‌شود، این کار معمولا قبل از ماشینکاری انجام می‌گیرد.

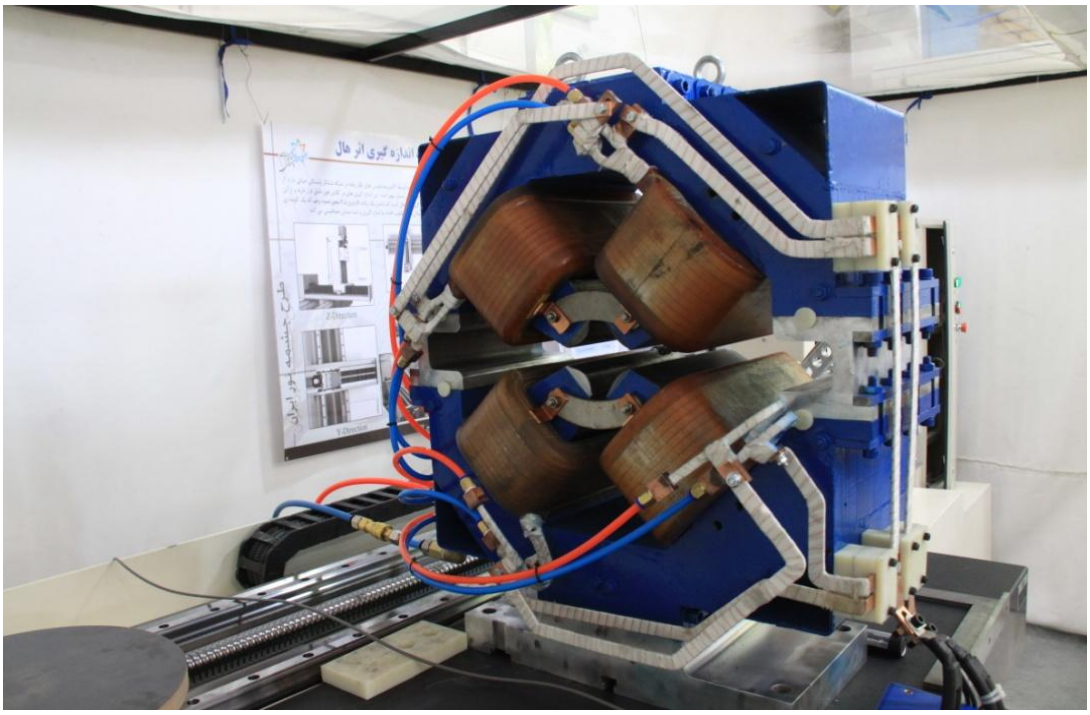
۵.۸. سیم پیچ

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

۶.۸. مونتاژ

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

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

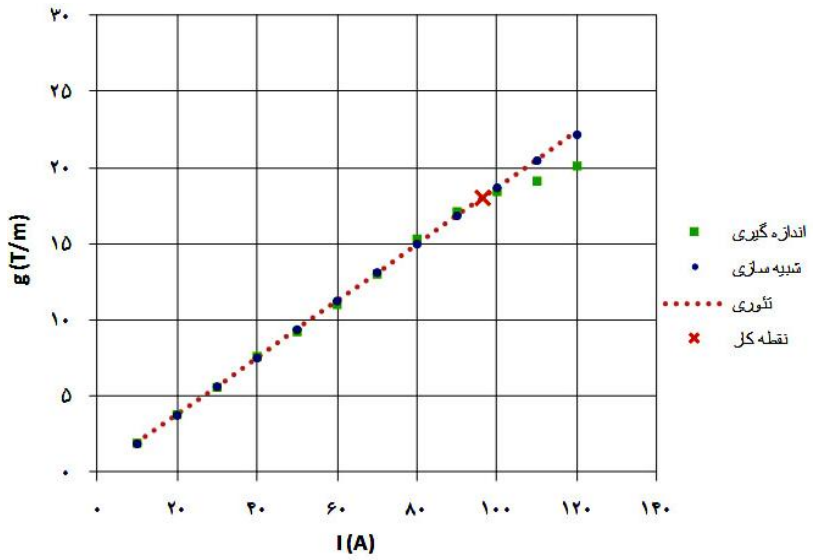


شکل ۱۰. الکترومغناطیس چهارقطبی نمونهٔ ساخته شده در طرح چشمهٔ نور ایران.

همچنین سایر قسمت‌های مورد نیاز، الکترومغناطیس مونتاژ شد. برای این کار ابتدا کویل‌ها را در جای خود مقید و دو هستهٔ بالایی و پایینی به صورت مجزا به وسیله پین و پیچ به یکدیگر متصل گردید. سپس پایهٔ نگه دارنده به دو هستهٔ پایینی به وسیله پین و پیچ متصل شد و دو هستهٔ بالایی به وسیله پین طولی روی دو هستهٔ پایینی در محل خود قرارگرفت. در مرحلهٔ نهایی قسمت‌های الکتریکی و سرمایشی الکترومغناطیس متصل و آماده برای اندازه گیری مغناطیسی شد. در شکل ۱۰ الکترومغناطیس چهارقطبی نمونه ساخته شده در طرح چشمهٔ 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 چشمهٔ نور ایران به یک میز اندازه‌گیری اثرهال مجهز شده است. دقت اندازه‌گیری به دو



شکل ۱۱. گرادیان اندازه‌گیری شدهٔ الکترومغناطیس چهارقطبی نمونه و مقایسهٔ آن با طراحی.

بخش تقسیم می‌شود. الف) دقت مکان سنجی و ب) دقت مغناطیس‌سنجی. دقت مکان‌سنجی میز اندازه‌گیری مورد استفاده ۰٫۰۱ میلی‌متر است که توسط خط‌کش‌های دیجیتال با تفکیک‌دهی ۲ میکرومتر حاصل می‌شود. برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی از حسگرهای بسیار دقیق که در مجاورت یک میدان ثابت توسط NMR[1] کالیبره شده است، استفاده شد. ناحیهٔ حساس مغناطیسی این حسگر ۰٫۰۱ × ۰٫۰۱ میلی‌مترمربع است. دقت کلی میز اندازه‌گیری مغناطیسی بین ۵۰ تا ۱۰۰ ppm است. نتایج گرادیان اندازه‌گیری شدهٔ مغناطیسی را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده و با نتایج طراحی مقایسه کرد.

۱۰. نتیجه‌گیری

اولین نمونهٔ چهار قطبی طرح چشمهٔ 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 حلقهٔ 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.

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, June15-20, (2014) 1241; http://ilsf.ipm.ac.ir/.
6. H Ghasem, F Saeidi, and I Ahmadi, *JINST* **8** (2013) P02023.

۱. Nuclear magnetic resonance