

اندازه‌گیری مغناطیسی (کنترل کیفیت) الکترومغناطیس چهار قطبی

نمونه حلقه انبارش چشمه نور ایران

یاسر رادخرمی، ابوالفضل شهوه و فرهاد سعیدی

طرح چشمه نور ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران

پست الکترونیکی: yradkhorami@ipm.ir

چکیده

آزمایشگاه اندازه‌گیری مغناطیسی از مهم‌ترین قسمت‌های آزمایشگاه تحقیق و توسعه چشمه نور ایران است. این آزمایشگاه وظیفه اندازه‌گیری و بررسی صلاحیت مغناطیس‌های شتابگر اعم از مغناطیس‌های دائمی و الکترومغناطیس‌ها را بر عهده دارد و برای اولین بار در ایران در حال بهره برداری است. این آزمایشگاه شامل دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق و متناسب با نیاز سنکروترون است، از جمله این دستگاه‌ها می‌توان به میز اندازه‌گیری کاوشگر اثر هال، پیچۀ چرخان، و پیچۀ هلمهولتز اشاره نمود. در حال حاضر آزمایشگاه به میز اندازه‌گیری کاوشگر اثر هال و پیچۀ چرخان در آرایش غیر جبرانی مجهز شده و اندازه‌گیری‌های مربوط به نمونه‌های مغناطیس‌های ساخته شده در طرح میسر است. در این مقاله به بررسی نتایج اندازه‌گیری‌های مغناطیسی چهار قطبی نمونه ساخته شده در طرح با استفاده از کاوشگر اثر هال و پیچۀ چرخان پرداخته و در موارد اندازه‌گیری خطای میدان‌های چند قطبی و منحنی تحریک چهار قطبی، نتایج با هم مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری مغناطیسی، کاوشگر اثر هال، پیچۀ چرخان

۱. مقدمه

آن را را بر عهده دارند. مغناطیس‌های اصلی مورد استفاده در سنکروترون شامل دو قطبی، چهار قطبی و شش قطبی هستند که دو قطبی‌ها با ایجاد میدان مغناطیسی ثابت، وظیفه انحراف باریکه را بر عهده دارند، چهار قطبی‌ها به منظور کانونی کردن باریکه و شش قطبی‌ها در تصحیح ابیراهی باریکه کار برد دارند. از آنجایی که کیفیت ساخت این الکترومغناطیس‌ها کارایی شتابگر را تضمین می‌کند، لازم است که هریک از آنها قبل از استفاده، مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گیرند. این اندازه‌گیری‌ها بسته به نوع هر الکترومغناطیس متفاوت خواهد

طرح چشمه نور ایران، اولین تسهیلات آزمایشگاهی مقیاس بزرگ برای تحقیقات و مطالعات بین رشته‌ای در کشور است. این طرح که از نظر کاربرد بسیار متنوع است، شامل شتابگر سنکروترون الکترون با انرژی ۳ GeV و کیفیت باریکه فوتونی بسیار مطلوب است که در هنگام تاسیس با بسیاری از تسهیلات روز جهان از نظر امکانات تجربی و تحقیقاتی برابری خواهد کرد. المان‌های مغناطیسی مهم‌ترین قسمت یک سنکروترون هستند که وظیفه هدایت، کانونی کردن و اصلاح باریکه و مسیر



شکل ۱. میز اندازه‌گیری مغناطیسی در داخل اتاقک کنترل دما.

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

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

بود. اندازه‌گیری شدت میدان، کیفیت میدان، تحلیل محتوای چند قطبی آنها از موارد مهمی است که باید با دقت زیاد (از مرتبه 10^{-4}) اندازه‌گیری شود. لازم به ذکر است که قبل از اندازه‌گیری مغناطیسی، باید اندازه‌گیری مکانیکی و آزمایش ابعادی انجام شود. این یک شرط لازم برای ورود به قسمت اندازه‌گیری مغناطیسی خواهد بود. الکترومغناطیس‌های چهار قطبی یکی از اصلی‌ترین نوع الکترومغناطیس در حلقه انبارش چشمه نور ایران است که از چهار هسته آهنی و چهار سیم پیچ تشکیل شده‌اند. ویژگی‌های این الکترومغناطیس در جدول ۱ آورده شده است [۱].

۲. اندازه‌گیری مغناطیسی

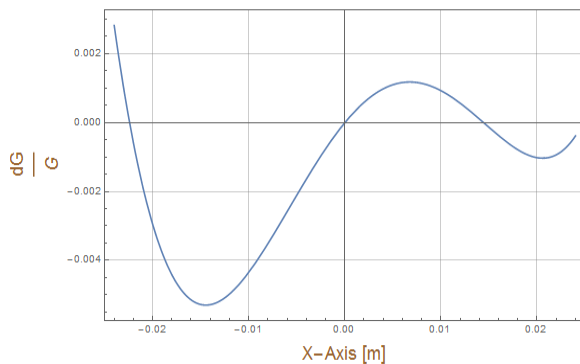
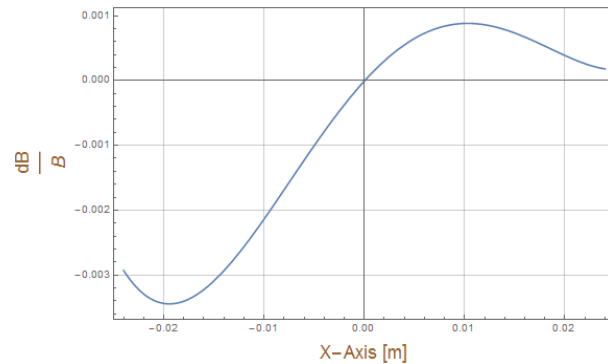
اندازه‌گیری مغناطیسی بر روی چهار قطبی نمونه حلقه انبارش طرح چشمه نور ایران جهت تضمین کیفیت چهار قطبی نمونه طراحی و ساخته شده انجام گرفته است. این اندازه‌گیری با استفاده از دو ابزار کاوشگر اثر هال و پیچۀ چرخان انجام شده است. با توجه به تأثیرات دما بر روی نتایج به دست آمده، تمامی ابزار آزمایش از قبیل چهار قطبی نمونه، وسایل اندازه‌گیری، منابع تغذیه و بوردهای کنترل الکترونیکی درون اتاقکی با دمای قابل کنترل قرار داده شده‌اند و در طول مدت آزمایش، دمای اتاقک در دمای ثابت 23°C نگه داشته شده است (به اشتناای مواردی که هدف از انجام آزمایش، بررسی اثر دما بر روی نتایج اندازه‌گیری بوده است) (شکل ۱). الکترومغناطیس چهار قطبی نمونه متصل به یک منبع تغذیه با جریان حداکثر

جدول ۲. شرایط انجام آزمایش اندازه‌گیری مغناطیسی.

مشخصه	واحد	مقدار
جریان منبع تغذیه	Amp	۱۲۰ ~ ۰
دمای آزمایشگاه	$^{\circ}\text{C}$	۲۳
فشار آب ورودی	bar	۸/۵
فشار آب خروجی	bar	۱
دمای آب ورودی	$^{\circ}\text{C}$	۲۲
دمای آب خروجی	$^{\circ}\text{C}$	۲۸
دبی جریان آب	Lit/min	۳/۵

۱۲۰ Amp (با دقت 100ppm) بوده که توسط کاربر کنترل می‌شود. الکترومغناطیس مورد آزمایش مطابق طراحی فیزیکی، توسط آب تحت فشار ۸/۵ اتمسفر و دبی ۳/۵ لیتر در دقیقه خنک کاری می‌شود که مشخصات و شرایط آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. بنابراین در طول انجام آزمایش، دمای آب ورودی به الکترومغناطیس ۲۲ درجه و دمای خروجی از آن ۲۸ درجه سانتی‌گراد بوده است [۲].

در آزمایش اندازه‌گیری مغناطیسی با استفاده از کاوشگر اثر هال از دو کاوشگر با سطح فعال $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ با حساسیت 5V/T استفاده شده است که دارای وضوح $1\mu\text{T}$ (100ppm) می‌باشد. همچنین میز اندازه‌گیری شامل یک ربات دکارتی سه محور که قادر به حرکت با دقت مطلق $1\mu\text{m}$ و تکرارپذیری $10\mu\text{m}$ است. انتخاب محورهای مختصات بر اساس استاندارد فیزیک شتابگر بوده است که راستای Z نشان دهنده راستای حرکت باریکه و X نشان دهنده راستای افق و Y راستای عمود است.

شکل ۳. تغییرات $\Delta G/G$ نسبت به مکان X.شکل ۴. تغییرات $\Delta B/B$ نسبت به مکان X.

۲.۲. توزیع چهار قطبی

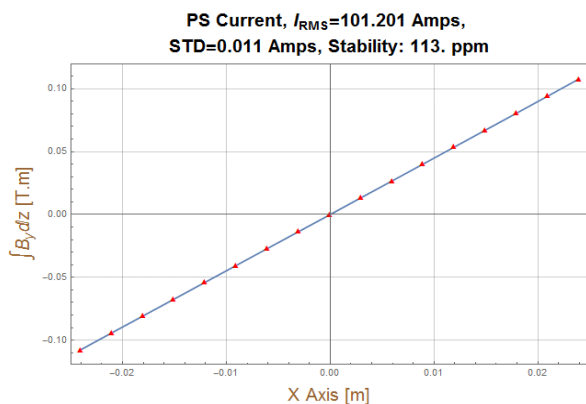
توزیع چهار قطبی الکترومغناطیس در طول محور Z هم دارای اهمیت است. به منظور اندازه‌گیری به ازای هر موقعیت روی محور Z، کاوشگر در طول محور X از $-x_{gfr}$ تا $+x_{gfr}$ ($x_{gfr}=18 \text{ mm}$)، محدوده پایداری میدان) حرکت کرده و مولفه B_y توسط کاوشگر اندازه‌گیری می‌شود. بدین ترتیب شیب میدان مولفه Y مغناطیسی روی محور X برای هر Z مشخص به دست می‌آید. با تکرار آزمایش در طول محور Z، توزیع میدان چهار قطبی در طول محور Z به دست می‌آید. در شکل ۴ هر زوج (G_z ، Z)، نمایش دهنده گرادینان در صفحه ($Z=Z_0, Y=0$) از $-x_{gfr}$ تا $+x_{gfr}$ نسبت به X می‌باشد. جریان منبع تغذیه برابر با 101.201 آمپر تنظیم شده است که با توجه به نوسانات جریان در طول مدت زمان آزمایش، منبع تغذیه دارای خطای 113 ppm و انحراف از معیار استاندارد 0.11 آمپر بوده است. شکل ۴ نشان دهنده توزیع میدان مغناطیسی در راستای محور Z است. هر ذره‌ای که از داخل الکترومغناطیس عبور کند، تحت تأثیر این میدان قرار خواهد گرفت. انتگرال این میدان در راستای Z دارای اهمیت است و در مطالعات دینامیک باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در X های مختلف، به ازای هر X یک نمودار مشابه شکل ۴ به دست می‌آید. با انتگرال-گیری از میدان مغناطیسی در راستای Z و به ازای هر X (انتگرال‌گیری عددی)، نمودار تغییرات انتگرال میدان نسبت به X به دست می‌آید که در شکل ۵ نمایش داده شده است.

کیفیت انتگرال میدان و انتگرال گرادینان میدان در شکل ۶ نشان داده شده است که در محدوده 10^{-3} است.

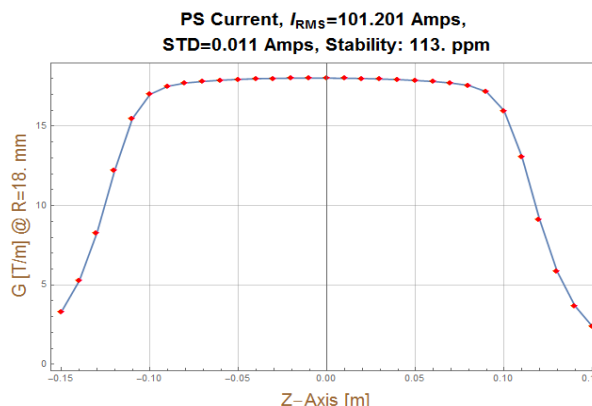
پیچۀ چرخان مورد استفاده در این آزمایش از نوع غیر جبرانی و متشکل از ۱۱۱ دور سیم با ضخامت 0.1 میلی‌متر است که بر روی یک بستر به شکل مستطیل با طول 360 میلی‌متر و عرض 25 میلی‌متر به نحوی پیچیده شده است که هنگام دوران در داخل چهار قطبی، یکی از طول‌های مستطیل منطبق بر محور مکانیکی چهار قطبی باشد [۳].

۱.۲. اندازه‌گیری میدان مرکزی نسبت به X

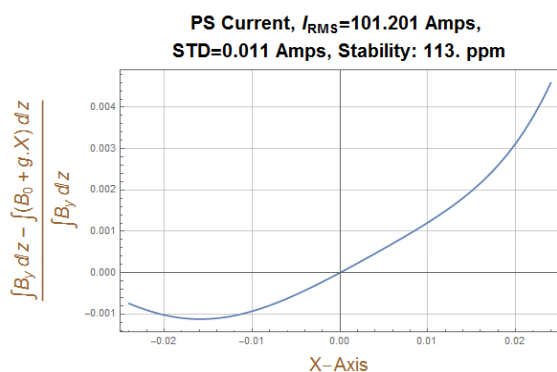
مقادیر میدان عمودی (B_y) در صفحه مرکزی ($Y=Z=0$) روی محور X با استفاده از کاوشگر اثر هال با هدف ارزیابی تقریبی طراحی دو بعدی الکترومغناطیس اندازه‌گیری شد. محدوده تغییرات X در این آزمایش باید شامل محدوده پایداری میدان باشد. لذا برد تغییرات X برابر با 36 میلی‌متر ($\pm 18 \text{ mm}$) در نظر گرفته شده است. کیفیت میدان و کیفیت گرادینان میدان (نسبت به مقادیر در نقطه $X=0$) بر حسب فاصله افقی در شکل‌های ۲ و ۳ ترسیم شده است. با توجه به نمودار تغییرات میدان شکل ۲، خطای مشاهده شده تغییرات میدان در حدود 3.8×10^{-3} که در حدود ده برابر خطای مجاز در طراحی می‌باشد. این خطا ناشی از خطای سیستماتیک کاوشگر اثر هال (0.0002)، نوسانات منبع تغذیه (0.0001) و خطاهای ماشینکاری و مونتاژ است. این خطاها در قالب خطای مولفه‌های چند قطبی نمایش داده می‌شوند که در بخش مولفه‌های چند قطبی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.



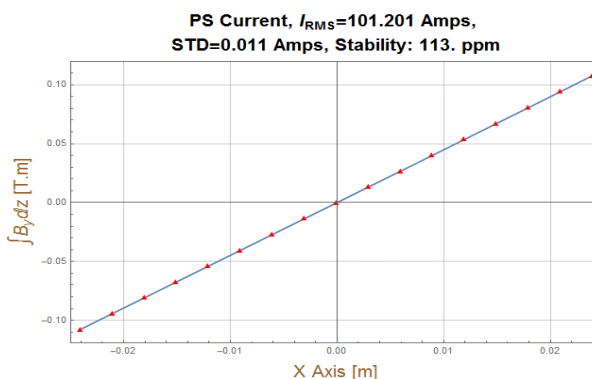
شکل ۵. انتگرال میدان مغناطیسی نسبت به X.



شکل ۴. نمودار توزیع چهار قطبی در طول الکترومغناطیس برای شعاع ۱۸ میلی متر.



شکل ۶. تغییرات نسبی انتگرال میدان (راست) و انتگرال گرادیان میدان (چپ).



۳.۲. منحنی تحریک چهار قطبی (گرادیان- جریان)

جهت مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط کاوشگر اثر هال با نتایج حاصل از آزمایش پیچۀ چرخان، چهار قطبی مغناطیسی تحت جریان‌های مختلف منبع تغذیه قرار گرفته و گرادیان میدان محاسبه شده در هر آزمایش با نتایج مورد انتظار از طراحی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در طی آزمایش پیچۀ چرخان، این پیچۀ با سرعت زاویه‌ای معادل 0.2 Hz در داخل چهار قطبی به دوران درآمده و پتانسیل القایی در دو سر پیچۀ از طریق یک انتگرال‌گیر (طراحی و ساخته شده در طرح چشمه نور ایران) ثبت می‌شود. به صورت همزمان موقعیت زاویه پیچۀ چرخان توسط رمزنگار محوری^۱ ثبت شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در تمام محاسبات پیچۀ چرخان، مقدار طول مؤثر میدان مغناطیسی که از طریق اندازه‌گیری توسط کاوشگر اثر هال

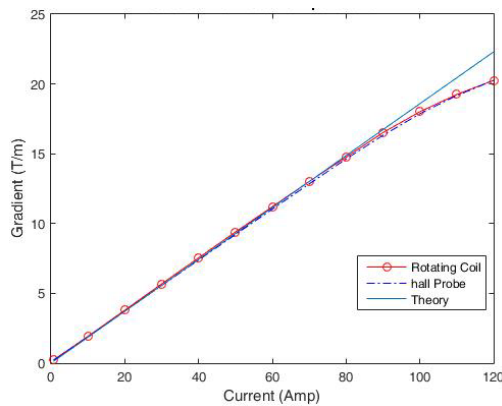
به دست آمده است، جایگذاری می‌شود.

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط کاوشگر اثر هال شکل ۷ و انتگرال‌گیری نسبت به z طول مؤثر میدان مغناطیسی برابر با 255.82 میلی متر خواهد بود. نتایج حاصل از مقایسه اندازه‌گیری گرادیان میدان توسط کاوشگر اثر هال و پیچۀ چرخان در شکل ۸ نمایش داده شده است که نشان دهنده قرابت بیشتر نتایج پیچۀ چرخان به نتایج تئوری است.

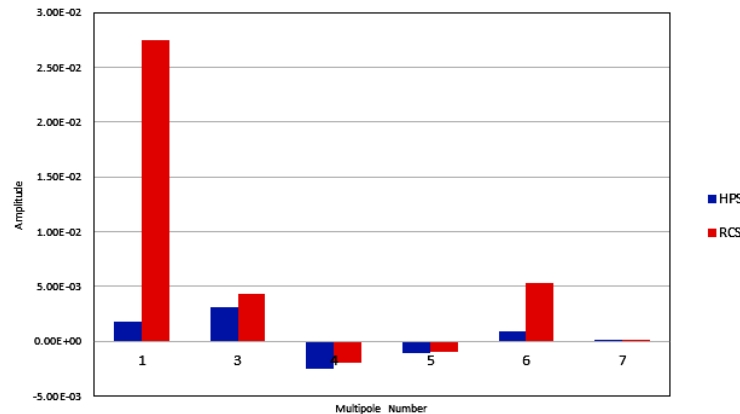
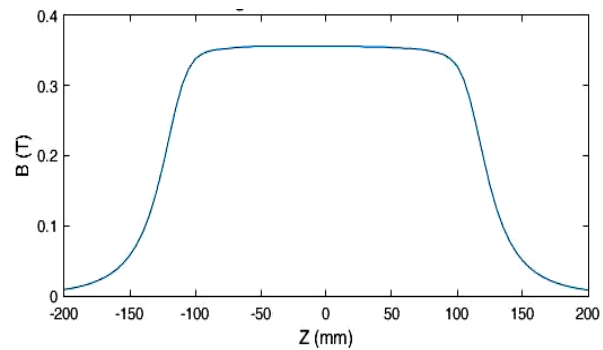
۴.۲. مولفه‌های چند قطبی مغناطیسی

با تحلیل داده‌های حاصل از پیچۀ چرخان در جریان 100 Amp، انتگرال مولفه‌های چند قطبی میدان مغناطیسی به دست می‌آید. جهت محاسبه انتگرال مولفه‌های چند قطبی، ابتدا با استفاده از آزمایش کاوشگر اثر هال طول مؤثر میدان مغناطیسی به دست

۱. Shaft encoder



شکل ۷. تغییرات میدان مغناطیسی در راستای Z توسط کاوشگر اثر هال. شکل ۸. نمودار منحنی تحریک.



شکل ۹. خطای مولفه‌های چند قطبی در آزمایش‌های مختلف.

راستای X و Y برای چهار قطبی نمونه به دست می‌آید. نتایج اندازه‌گیری پیچه چرخان در جدول ۳ آمده است.

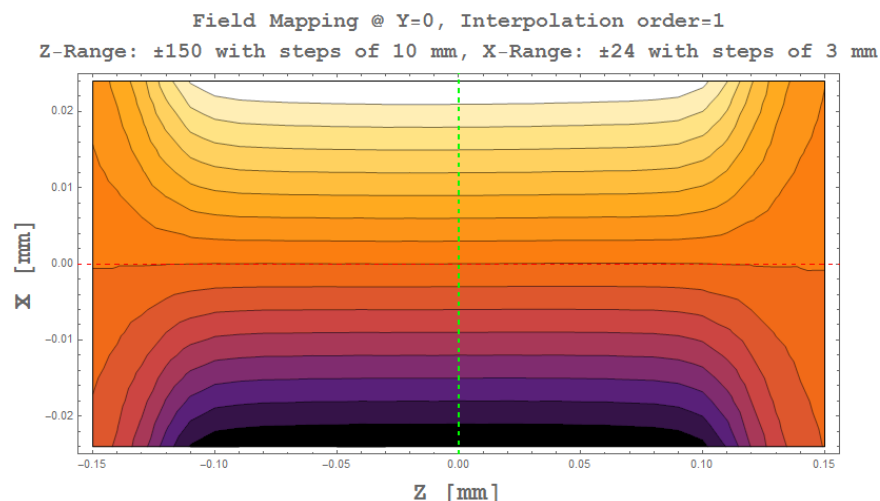
بنابراین طیف انتگرال مولفه‌های چند قطبی مغناطیسی و کاوشگر اثر هال در مقایسه با هم در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.

در شکل ۹، مولفه دو قطبی ($n=1$) ناشی از عدم همترزی مرکز مکانیکی و مرکز مغناطیسی الکترومغناطیس چهار قطبی می‌باشد. بنابراین اولین خطای سیستماتیک در ($n=3$) مشاهده می‌شود که نشان دهنده وجود مولفه شش قطبی و با دامنه کمتر از 5×10^{-3} است که تقریباً ده برابر خطای مجاز در طراحی است. با توجه به استفاده از پیچه چرخان در آرایش غیر جبرانی، سهم عمده‌ای از این خطای مشاهده شده ناشی از نوفه‌های خارجی و عدم توانایی تفکیک سیگنال‌های سایر مولفه‌ها ($n \neq 2$) با دامنه بسیار کوچک در مقابل سیگنال دامنه

جدول ۳. نتایج اندازه‌گیری پیچه چرخان در آرایش غیر جبرانی.

$L_{eff} =$	۰٫۲۵۵۸۱۷۹	m
گرادیان	۱۸٫۰۱۱۵۱	T/m
$dx =$	$۲٫۶۶ \times 10^{-5}$	m
$dy =$	۰٫۰۰۰۶۸۷	m

می‌آید. با استفاده از پیچه چرخان در آرایش غیر جبرانی، دامنه خطای مولفه‌های چند قطبی و فاز نسبی هر مولفه نسبت به میدان اصلی به دست می‌آید. با توجه به مقدار بالای میدان اصلی در برابر سایر مولفه‌ها، جهت نمایش بهتر خطای مولفه‌های چند قطبی، تمام مولفه‌ها به میدان اصلی به‌هم‌نجان شده و در غیاب مولفه اصلی بررسی می‌شوند. همچنین با توجه به دامنه و فاز نسبی مولفه دو قطبی مغناطیسی، مقدار جابه‌جایی مرکز مغناطیسی نسبت به مرکز مکانیکی الکترومغناطیس در



شکل ۱۰. نگاشت دوبعدی میدان مغناطیسی.

باشد $(S(1)=0, S(2)=0)$.

میدان اصلی $(N=2)$ می باشد [۴].

در شکل ۹، مولفه شش قطبی که اولین خطای غیر مجاز می باشد، نشان دهنده عدم تقارن در فواصل هوایی بین قطب های متوالی است. مولفه هشت قطبی نیز غیر مجاز بوده و ناشی از یکسان نبودن قسمت های صاف انتهایی هر قطب است. مولفه ده قطبی نیز غیر مجاز است و ناشی از کجی یک قطب یا بیشتر است. دوازده قطبی اولین مولفه مجاز است و ناشی از هذلولی ایده ال نبودن شکل قطب است. در صورتی که مولفه دو قطبی حذف شود، محدوده خطای مجاز نسبی به $3-10 \times 5$ تقطیل می یابد. این به دلیل این است که خطاهای شش و هشت قطبی عکس یکدیگر هستند. بنابراین خطای این اندازه گیری از مرتبه مجاز است و کمی از آن انحراف دارد.

۵.۲. نگاشت کلی میدان

نگاشت کلی میدان از طریق کاوشگر اثر هال انجام می شود و یک تصویر کلی از رفتار میدان مغناطیسی در صفحه $X-Z$ ($Y=0$) ارائه می کند که با این تصویر می توان به صورت کیفی به صحت نتایج فوق پی برد (شکل ۱۰).

۳. نتیجه گیری

در اندازه گیری مغناطیسی چهار قطبی نمونه ساخته شده در طرح چشمه نور ایران از کاوشگر اثر هال و پیچیه چرخان استفاده شده است. همواره برای اطمینان از صحت نتایج اندازه گیری مغناطیسی لازم است از روش های دیگر درستی نتایج تحقیق شود. در این مورد پیچیه چرخان در آرایش جبرانی و سیم مرتعش می تواند کمک به سزایی نماید. بنابراین تا انجام اندازه گیری های فوق، مقایسه نتایج اندازه گیری های کاوشگر اثر هال و پیچیه چرخان در آرایش غیر جبرانی تنها راه بررسی کیفیت الکترومغناطیس های طراحی و ساخته شده در طرح چشمه نور ایران می باشد.

نتایج اندازه گیری فوق نشان می دهد که الکترومغناطیس نمونه خطاهایی دارد که نیازمند بهبود است. لازم به ذکر است

لازم به ذکر است که علت اصلی تفاوت بین نتایج اندازه گیری پیچیه چرخان و کاوشگر اثر هال، در این است که آزمایش پیچیه چرخان در طول مدت چند ثانیه انجام می شود، در حالی که برای انجام آزمایش کاوشگر اثر هال، صرف ساعت ها زمان نیاز است که بدیهی است در طول این مدت، عوامل محیطی بر نتایج اندازه گیری تأثیر گذاشته و باعث بروز خطا می شوند. لذا جهت حصول دقت در اندازه گیری مولفه های چند قطبی در الکترومغناطیس چهار قطبی باید از پیچیه چرخانی استفاده کرد که حساسیت آن نسبت به میدان اصلی برابر با صفر

خطای کاوشگر اندازه‌گیری نیاز به یک میدان ایستای ثابت و دستگاه NMR دقیق است، برای تعیین خطای مکان یابی کاوشگر اندازه‌گیری میدان نیاز به درجه بندی کردن دوره‌ای میز اندازه‌گیری است، برای تعیین خطای واقعی جریان منبع تغذیه نیاز به مدرج کردن DCCT در مجاورت یک منبع جریان استاندارد است. همچنین اندازه‌گیری ابعادی الکترومغناطیس توسط دستگاه CMM و تست عایق بین لایه‌ای پیچ‌ها نیز می‌تواند در جداسازی سهم خطاهای موجود کمک بسیاری کند.

که این خطاها منشاهای مختلفی نظیر خطای کاوشگر اندازه‌گیری میدان، خطای مکان‌یابی کاوشگر اندازه‌گیری، خطای نوسانات جریان منبع تغذیه، خطاهای ماشینکاری و مونتاژ، خطای ناشی از نوفه‌انتگرال‌گیر و خطاهای مکانیکی پیچ‌چرخان را شامل می‌شود. این خطاها در هم آمیخته هستند و به طور دقیق نمی‌توان سهم هر یک از آنها را از هم جدا کرد، چرا که برای جداسازی هر یک از این خطاها نیاز به مدرج کردن هر یک از قسمت‌های فوق می‌باشد. به عنوان مثال، برای تعیین

مراجع

1. F Saeidi *et al.*, Design and Fabrication of the first Quadrupole Magnet for the ILSF storage ring, *IJPR*. 15, 2 (2015), 189.
۱. ف سعیدی و همکاران، طراحی و ساخت اولین نمونه چهارقطبی الکترومغناطیسی حلقه‌انبارش طرح چشمه نور ایران، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۱۸۹.
2. A Shahve *et al.*, "Magnetic Measurement Laboratory
- at the Iranian Light Source Facility", 1st National Conference on Particle Accelerators & their Applications, Nov. (2013), Tehran, Iran.
3. Animesh K Jain, "Harmonic Coils", *CERN-98-05*, pp. 175.
4. Jack Tanabe, "Iron Dominated Electromagnets, Design, Fabrication, Assembly and Measurements", Stanford.