

طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی آندولاتور تخت

علی رضائی مقدم^۱، جواد رحیقی^۲، محمد لامعی^۱، پیام خدادوست^۲ و یاسر رادخرمی^۲

۱. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۲. چشمه نور ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی تهران، تهران

پست الکترونیکی: ali-ramezani@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۸/۱۳)

چکیده

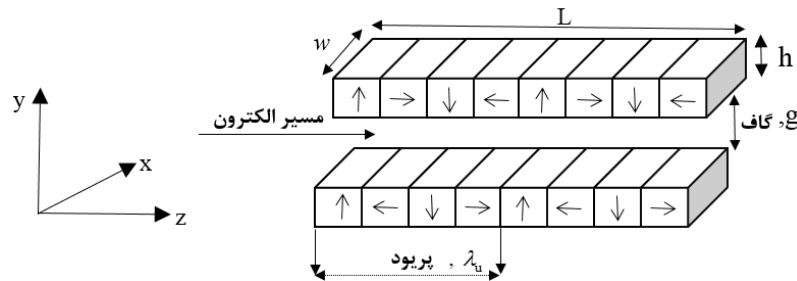
هدف از انجام این پژوهش دستیابی به فناوری ساخت ابزارهای الحاقی است. نمونه آزمایشگاهی آندولاتوری با دوره ۴۸ mm و بیشینه میدان مغناطیسی ۰٫۷۵ T با استفاده از آهنرباهای دائمی NdFeB-SH۳۵ با همکاری پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و چشمه نور ایران طراحی و ساخته شد. طول آندولاتور ۴۸۳ mm و تعداد دوره آن ۸ عدد است. کمیت‌های مغناطیسی آندولاتور به منظور دستیابی به هماهنگ‌های اول و سوم تعیین می‌شوند. انرژی فوتون تولیدی باید محدوده ۲۶۰ eV تا ۲۰۰۰ eV را پوشش دهد. به منظور کنترل نیروی جاذبه قوی مغناطیسی بین فک‌های بالا و پائینی آندولاتور، سازوکار مکانیکی خاصی طراحی و ساخته شد. منابع خطا در میدان مغناطیسی مورد بحث قرار گرفته است. سهم خطاها در میدان مغناطیسی آندولاتور اندازه‌گیری و اثر آنها بر شدت هماهنگ‌ها مطالعه شده است. خطای میانگین مجذور مربعی شدت میدان نهایی ۰٫۴ درصد به دست آمد و شدت هماهنگ‌های اول و سوم در حضور میدان مغناطیسی واقعی بیش از هشتاد درصد مقدار ایده‌ال به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آندولاتور تخت، آهنرباهای دائمی، تابش سنکروترونی، خطای میدان، حسگر اثر هال

۱. مقدمه

تابش سنکروترونی در ناحیه فرسرخ تا ایکس سخت استفاده می‌کنند [۱-۳]. روش‌های مختلفی برای تولید میدان مغناطیسی در آندولاتورها وجود دارد. میدان مغناطیسی را می‌توان توسط پیچ‌های معمولی یا ابرسانا، آهنرباهای دائمی و یا ترکیبی از آهنرباهای دائمی و مواد فرومغناطیس تولید کرد. به آندولاتورهایی که در آنها فقط از آهنرباهای دائمی استفاده شده ساختار آهنربای خالص دائمی یا PPM و به آندولاتورهایی که از ترکیب آهنربا و مواد فرومغناطیسی نرم استفاده شده است

سنکروترون‌های نسل سوم برای تولید تابش سنکروترونی با درخشندگی بالا از ابزارهای الحاقی استفاده می‌کنند. از طرفی ابزارهای الحاقی قلب لیزرهای الکترون آزاد به عنوان چشمه های نور نسل چهارم هستند [۱]. اولین آندولاتوری که با استفاده از آهنرباهای دائمی ساخته شد در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط هالباخ در حلقه انبارش نصب شد [۲]. امروزه تمامی سنکروترون‌ها در سرتاسر جهان از انواع آندولاتورها برای تولید



شکل ۱. نمایی از یک آندولاتور با ساختار آهنرباهای خالص دائمی با PPM.

قوی بین فکها است. این نیرو به مرور باعث خم شدن ساختار مکانیکی و ایجاد خطا در اندازه گاف آندولاتور می شود [۳]. چالش مکانیکی دیگر، کنارهم قرار دادن آهنرباهای دائمی قوی با دقت لازم و محکم کردن آنها در کنار یکدیگر است. میدان مغناطیسی واقعی که به کمک یک حسگر اثر هال با دقت مناسب قرائت می شود به منظور محاسبه هماهنگی های آندولاتور در حالت واقعی مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله ابتدا به معرفی کمیت های اساسی آندولاتور که در طراحی فیزیکی اهمیت دارند و در ادامه به طراحی مکانیکی آن پرداخته می شود. سپس مراحل ساخت و اندازه گیری آندولاتور و در نهایت نتایج نهایی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. طراحی فیزیکی و مکانیکی

۲.۱. طراحی فیزیکی

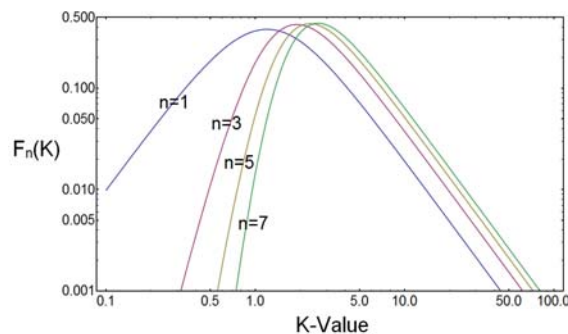
منظور از طراحی فیزیکی آندولاتور، تعیین کمیت های اساسی آن برای رسیدن به طیف الکترومغناطیسی مشخص است. از جمله این کمیت ها، دوره آندولاتور، اندازه گاف آن، شدت پسماند مغناطیسی آهنرباها، تعیین مقدار لازم برای نیروی وادارندگی در آهنرباها و ابعاد آهنرباها هستند. در شکل ۱ نمایی از یک آندولاتور با ساختار PPM را مشاهده می کنیم. الکترون از میان آندولاتور عبور کرده و در اثر نیروی لورنتسی، مسیری سینوسی را طی کرده و از خود تابش سنکروترونی با ویژگی های خاص را تابش می کند.

میدان مغناطیسی روی محور آندولاتور در مسیر حرکت

الکترون یک میدان سینوسی به شکل $B_y(z) = B_0 \sin(2\pi z / \lambda_u)$

آندولاتورهای هیبریدی گفته می شود [۱۲]. استفاده از آهنرباهای دائمی برای تولید میدان مغناطیسی به دلایلی از جمله عدم نیاز به منبع تغذیه که در آهنرباهای برقی مورد نیاز است و همچنین امکان دستیابی به دوره های کوچک تر میسر است که این مسئله در مورد آهنرباهای برقی با محدودیت همراه است و نهایتاً هزینه تمام شده ساخت آندولاتورها با آهنرباهای دائمی کمتر است و اجرای آن نیز ساده تر خواهد بود. چشمه نور ایران یک سنکروترون نسل سوم است که در حال حاضر فاز طراحی مفهومی آن به پایان رسیده است و برخی اجزای سنکروترون در آزمایشگاه تحقیق و توسعه آن در حال طراحی و ساخت است [۱۳]. در این مقاله مراحل طراحی فیزیکی و مکانیکی و ساخت آندولاتوری با ساختار PPM بر اساس کمیت های حلقه انبارش چشمه نور ایران ارائه شده است. تاکنون در کشور تجربه ساخت آندولاتور وجود نداشته است و این کار می تواند نقطه شروعی برای استفاده از آندولاتورها در پژوهش هایی همچون چشمه نور ایران یا در ساخت لیزرهای الکترون آزاد باشد. به منظور مدل سازی مغناطیسی آندولاتور از کد استاندارد RADIA استفاده شده است که توسط محققین چشمه نور فرانسه، ESRF نوشته شده است [۱۴]. به منظور مطالعه هماهنگی های تولیدی آندولاتور در حضور میدان مغناطیسی ایده آل و میدان مغناطیسی واقعی از کد BYE استفاده شده است. این کد بر مبنای محاسبه میدان الکتریکی تابشی از الکترون در تقریب دور در حوزه زمان و سپس محاسبه هماهنگی ها با استفاده از تبدیل عکس فوریه عمل می کند [۱۵].

چالش اساسی در ساخت آندولاتور کنترل نیروی جاذبه



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات شدت هماهنگ‌های آندولاتور بر حسب عامل انحراف آندولاتور.

است. بیشینه میدان مغناطیسی B_0 برابر است با [۳]

$$B_0 = \frac{1}{\gamma} B_r \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma \pi h}{\lambda_u}\right) \right) \exp\left(-\frac{\pi g}{\lambda_u}\right), \quad (1)$$

که g اندازه گاف، h ارتفاع آهنرباها، λ_u طول دوره آندولاتور و B_r پسماند مغناطیسی آهنرباها است. طول موج n امین هماهنگ آندولاتور با دوره λ_n و کمیت انحراف K روی محور آندولاتور برابر است با

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{\gamma n} \left(1 + \frac{1}{\gamma} K^2 \right), \quad (2)$$

عامل نسبی لورنتز است. عامل انحراف آندولاتور برابر است با

$$K = 0.934 \lambda_u B_0 \quad (3)$$

عامل انحراف آندولاتور در طراحی آندولاتور حائز اهمیت است. این عامل در حقیقت نسبت بین حداکثر زاویه خمش الکترون در مسیر سینوسی به زاویه ذاتی تابش سنکروترونی ($1/\gamma =$) است. هر چه این نسبت کمتر باشد احتمال تداخل سازنده بین امواج ساطع شده بیشتر است و طیف به صورت گسسته در می‌آید (آندولاتور) و هر چه مقدار آن بیشتر باشد طیف تابش سنکروترونی پیوسته می‌شود (ویگلر) [۱۲]. به طور کلی عامل انحراف آندولاتور هم انرژی هماهنگ‌ها و هم شدت و تعداد آنها را تعیین می‌کند. چگالی شار زاویه‌ای فوتونی از آندولاتور برابر است با [۳]

$$\frac{dN_{ph}(w)}{d\Omega} \Big|_{\theta=0} = 1.744 \times 10^{14} N_p^\gamma E^\gamma (\text{GeV}) I (\text{Amp}) \quad (4)$$

$$F_n(K), \quad n=1,3,5,\dots$$

واحد شار زاویه‌ای فوتونی عبارت است از:

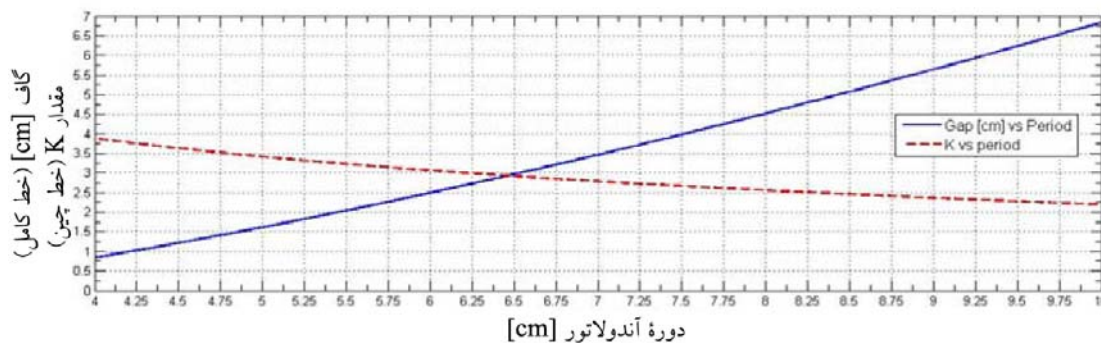
دوره‌های آندولاتور، E انرژی الکترون، I جریان باریکه الکترون و $F_n(K)$ تعیین کننده شدت هماهنگ n ام است. تغییرات شدت هماهنگ‌های مختلف بر حسب ضریب انحراف را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد.

طراحی و ساخت ابزار الحاقی باید به گونه‌ای باشد که طیف مورد نیاز آزمایشگر را تولید کند به طوری که تأثیرات منفی و مخرب آن بر باریکه الکترونی حداقل باشد. زاویه و مکان حرکت الکترون قبل از ورود و بعد از خروج از قطعات الحاقی نباید تغییر کند. این دو شرط مهم در طراحی و ساخت قطعات الحاقی را به ترتیب به صورت زیر می‌نویسیم [۱۲]

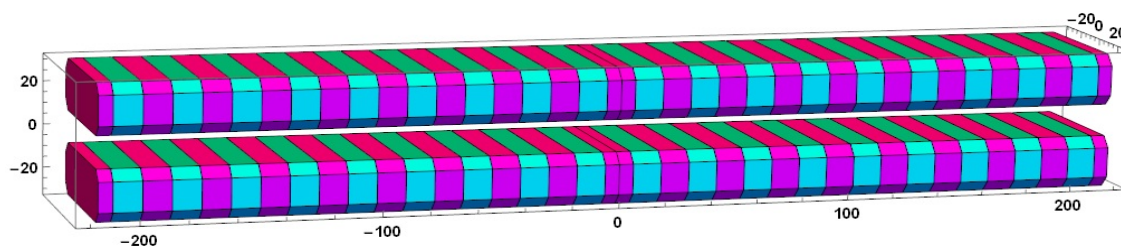
$$I_{x,y} = \int_{-\infty}^{\infty} B_{x,y}(z) dz = 0, \quad (5)$$

در رابطه (۵)، I انتگرال اول میدان مغناطیسی است که زاویه انحراف الکترون از مسیر طولی و II انتگرال دوم میدان است که موقعیت الکترون را می‌دهد. در حالت ایده‌آل مقدار این دو انتگرال باید صفر باشد و این کار را می‌توان با قرار دادن آهنرباهایی با ضخامت نصف آهنرباهای اصلی در دو سر هر دو آرایه بالایی و پائینی آندولاتور برآورده نمود. این روش ساده ترین و پرکاربردترین روش است [۱ و ۳].

انرژی مورد نیازی که آندولاتور باید در اختیار خط باریکه قرار دهد باید محدوده 260 eV تا 2000 eV را پوشش دهد. این محدوده انرژی مربوط به هماهنگ‌های اول و سوم آندولاتور خواهند بود. درخشندگی بالای تابش تولیدی از



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقادیر مجاز برای اندازه دوره و مقادیر معادل گاف و K برای رسیدن به انرژی ۲۶۰ eV در هماهنگ اول.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) آندولاتور PPM با تعداد ۸ دوره و اندازه دوره ۴۸ mm و گاف ۱۵ mm.

مغناطیسی آندولاتور می توان تابش سینکروترونی از آندولاتور را محاسبه کرد و هماهنگ های تابش را به دست آورد. برای ارزیابی عملکرد آندولاتور، تابش سنکروترونی را روی محور آندولاتور و به فاصله نسبتاً دور از آندولاتور محاسبه می کنیم. اگر فاصله نقطه مشاهده از آندولاتور نسبت به ابعاد آن بزرگ باشد برای تابش سنکروترونی از تقریب میدان دور^۱ یا رژیم تابشی می توان با تقریب مناسبی استفاده کرد [۳]. به منظور محاسبه هماهنگ ها از کد B2E استفاده می کنیم.

شکل ۸ و شکل ۹ هماهنگ های تابشی را برای گاف کمینه ۱۵ mm و گاف بیشینه ۲۵ mm نشان می دهند. همان طور که می توان دید انرژی هماهنگ اول و سوم در گاف ۱۵ mm به ترتیب برابر با ۲۶۳ eV و ۷۸۳ eV و برای گاف ۲۵ mm به ترتیب برابر با ۶۹۳ eV و ۲۰۸۰ eV است.

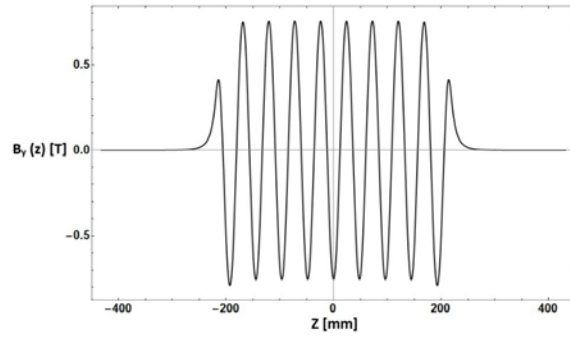
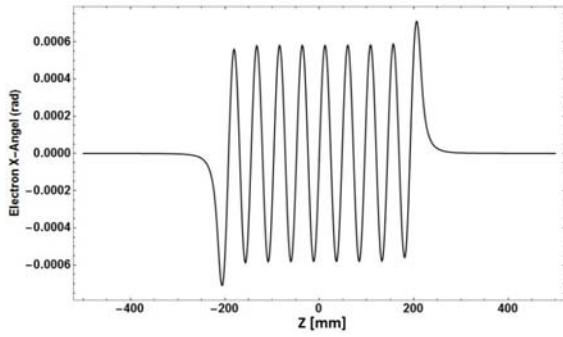
به منظور تعیین نوع آهنربای مناسب دو کمیت اساسی مد نظر هستند. یکی پسماند مغناطیسی آهنربا، B_r که طبق رابطه (۱) شدت میدان مغناطیسی روی محور آندولاتور را تعیین می کند و

آندولاتور از مشخصات منحصر به فرد آندولاتور نسبت به دیگر است که در برخی آزمایشات اهمیت دارد. در اکثر آزمایشات رسیدن به شار 10^{12} p/s و چگالی زاویه ای شار بالای 10^{15} p/s/mrad² مطلوب است. به کمک روابط (۲) و (۳) می توانیم وابستگی عامل K و اندازه گاف آندولاتور به اندازه دوره را برای رسیدن به این انرژی $E_1 = 260$ eV ارزیابی کنیم. شکل ۳ این وابستگی ها را نمایش می دهد.

آنچه از شکل ۳ می توان برداشت کرد این است که برای رسیدن به انرژی ۲۶۰ eV در هماهنگ اول اگر دوره آندولاتور ۴۸ میلی متر باشد اندازه گاف ۱۵ میلی متر و مقدار عامل K در حدود ۳/۴ خواهد بود. شکل ۴ نمای کلی آندولاتور را که به کمک مدل سازی در کد RADIA به دست آمده است نشان می دهد. شکل های ۵ تا ۷ به ترتیب میدان مغناطیسی آندولاتور، زاویه حرکت الکترون و مسیر عرضی حرکت الکترون را حین گذر از میدان آندولاتور نشان می دهند.

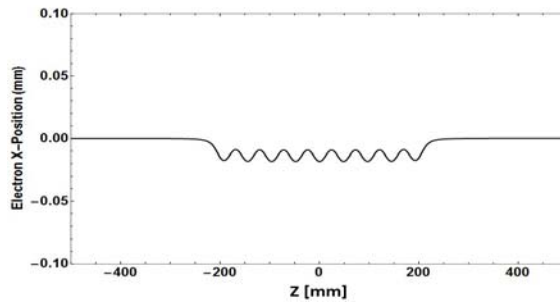
آندولاتور فوق را با عبارت U48 نمایش می دهیم که عدد ۴۸ نشان دهنده دوره آندولاتور است. در نهایت، با داشتن میدان

۱. Far Field Approximation.

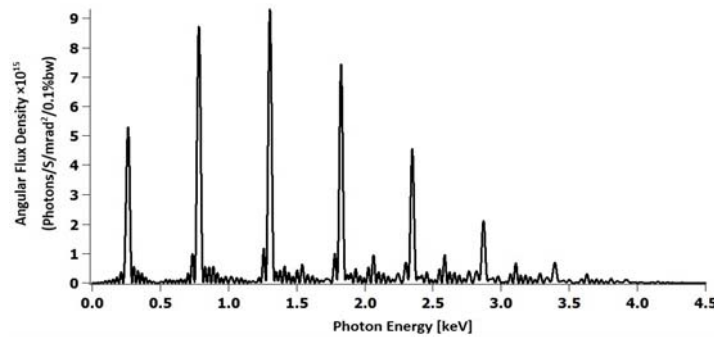


شکل ۵. میدان مغناطیسی روی محور آندولاتور.

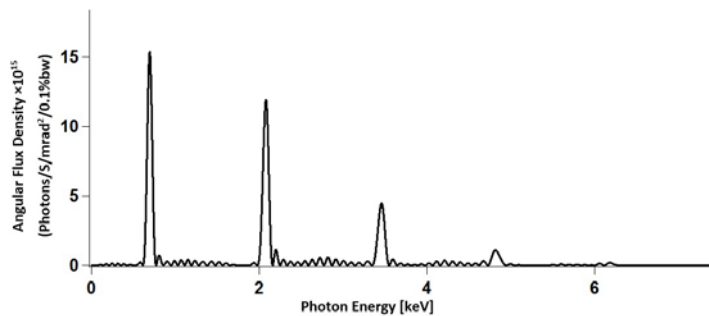
شکل ۶. زاویه حرکت الکترون بر حسب رادیان در گذر از آندولاتور U۴۸.



شکل ۷. حرکت نوسانی عرضی الکترون در گذر از آندولاتور U۴۸.



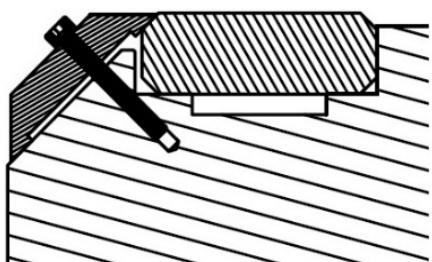
شکل ۸. طیف آندولاتور U۴۸ روی محور آندولاتور برای میدان مغناطیسی ایده‌آل و گاف ۱۵ mm. هماهنگ‌های فرد از هماهنگ اول تا سیزدهم در طیف ایده‌آل مشخص هستند.



شکل ۹. طیف آندولاتور U۴۸ روی محور آندولاتور برای میدان مغناطیسی ایده‌آل و گاف ۲۵ mm. هماهنگ‌های فرد از هماهنگ اول تا هفتم در طیف ایده‌آل مشخص هستند.

جدول ۱. کمیت‌های نهایی آندولاتور U48.

مقدار	واحد	نشانه	کمیت
۴۸	mm	λ_{H_i}	طول دوره
۸		N	تعداد دوره
۲×۱۷			تعداد منگت‌های اصلی با قطبش عمودی
۲×۱۸			تعداد منگت‌های اصلی با قطبش افقی
۲×۲			تعداد منگت‌های با ضخامت نصف و قطبش عمودی
۴۳۲	mm	L	طول ناحیه مغناطیسی
۳,۳۹		K	عامل انحراف
۰,۷۵۷۴	T	B _۰	بیشینه شدت میدان مغناطیسی روی محور
NdFeB/sh ۳۵			ماده آهنربا
۱,۱۸	T	B _r	میانگین پسامد مغناطیسی آهنربا
≥ ۱۵۹۲	KA/m	H _{ci}	وادارندگی آهنربا
< ۱,۵%			تولرانس در پسامد
درجه < ۱			تولرانس در جهت بردار مغناطش
۱۵,۲۵	mm	g	گاف کمینه / گاف بیشینه
≈ ۳۴۴۵	N	F	نیروی جاذبه آهنرباها
۱۲×۲۴×۷۰	mm ³		ابعاد آهنرباها
۳	GeV	E	انرژی الکترون
۴۰۰	mA	I	جریان باریکه



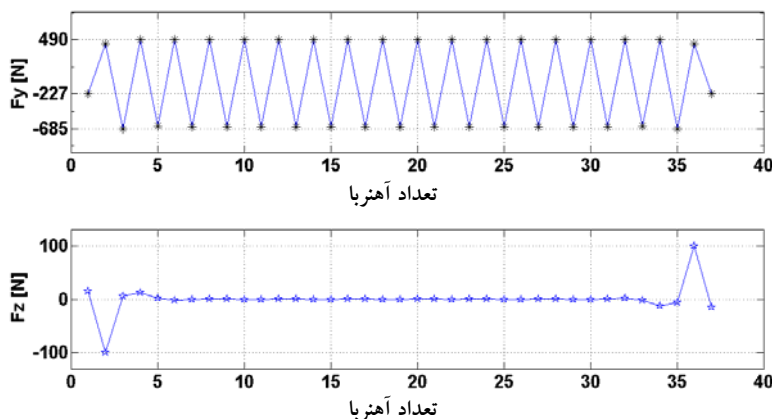
شکل ۱۰. سازوکار طراحی شده برای پیچ کردن آهن‌ریاهای دائمی در فک‌ها.

مسئله این است که آرایه‌های بالایی و پائینی آندولاتور باید با دقت بالایی موازی باشند. مسئله دوم، طراحی سازوکاری برای کنار هم بردن و ثابت کردن آهنرباها است. از آنجا که آهنرباها به شدت ترد و شکننده هستند در صورت عدم کنترل آنها و برخورد سریع آنها احتمال خرد شدن و شکستن آنها وجود دارد. سومین مسئله‌ای که در طراحی مکانیکی آندولاتور باید حل کنیم طراحی سازوکاری مناسب برای کنترل اندازه گاف آندولاتور است. میدان مغناطیسی روی محور آندولاتور را می‌توان با کم و زیاد کردن اندازه گاف کنترل کرد. به کمک کد RADIA نیروی جاذبه مغناطیسی وارد شده بر هر یک از فک‌ها

دیگری مقدار نیروی وادارندگی ذاتی آهنربا، H_{ci} که مقاومت آن را در برابر عوامل مغناطش‌زدا که در اینجا میدان‌های سایر آهنرباها است را تعیین می‌کند. به کمک کد RADIA حداکثر نیروی وادارندگی را در محل آهنرباها حساب می‌کنیم و در تعیین نوع آهنربا این کمیت را مد نظر قرار می‌دهیم. در مورد نیروی وادارنده ذاتی بر اساس نتایج به دست آمده مناسب‌ترین نوع آهنربا N۳۵SH خواهد بود [۱۶]. زیرا حداکثر نیروی وادارنده‌ای که می‌توان به آن اعمال کرد و آهنربا خاصیت مغناطیسی خود را حفظ کند در حدود ۲ T است. حداکثر نیروی وادارنده‌ای که به آهنربا در اثر میدان ناشی از آهنرباهای کناری وارد می‌شود برابر با ۱,۶ T است که با انتخاب این نوع از آهنرباها می‌توان در برابر این میدان مقاومت کرد. بنابراین با مشخص شدن نوع آهنربا و بر اساس سایر نتایج طراحی فیزیکی کمیت‌های نهایی آندولاتور U48 را به صورت آنچه در جدول ۱ آمده است تعیین می‌کنیم.

۲.۲. طراحی مکانیکی

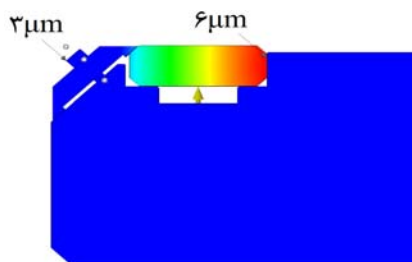
در طراحی مکانیکی آندولاتور چند مسئله باید حل شود. اولین



شکل ۱۱. نیروی مغناطیسی عمودی، F_y و طولی F_z وارد بر آهنرباهای فک بالایی ناشی از کل میدان مغناطیسی آندولاتور در گاف ۱۵ mm.

شدن میله آهنی می‌شود دو عدد هدایتگر آلومینیومی نیز که ابعادی دقیقاً برابر با آهنرباها دارند طراحی شد. فقط برای افزایش استحکام این هدایتگرها ضخامت بیشتری نسبت به آهنرباها برای آنها در نظر گرفته شد. نمایی کلی از دستگاه نصب آهنرباها را در شکل ۱۳ می‌توان مشاهده کرد.

گاف آندولاتور برای تنظیم انرژی هماهنگ‌های تولیدی باید تغییر کند. کمترین اندازه گاف معادل بیشترین مقدار میدان مغناطیسی و کمترین انرژی فوتون‌ها است و بر عکس با زیاد شدن اندازه گاف میدان مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند و انرژی هماهنگ‌ها بیشتر می‌شود. در آندولاتور U48 حداقل اندازه گاف ۱۵ mm است. بیشترین اندازه گاف برای رسیدن به انرژی دلخواه ۲۵ mm است ولی در عمل باید بتوان گاف را به اندازه دلخواه به منظور قرار دادن لوله خلأ در بین آندولاتور و دسترسی راحت، تا اندازه قابل قبولی باز کرد. میزان نیروی جاذبه و میزان دقت لازم در اندازه گاف و توازی فک‌ها در طراحی اهمیت دارند. برای کنترل اندازه گاف از یک سازوکار ساده و در عین حال قابل اعتماد بهره می‌بریم. برای انجام این کار از پیچ استفاده می‌کنیم. یکی از پیچ‌ها به گیربکس در بالای بدنه آندولاتور متصل شده و با چرخش محور گیربکس به صورت راستگرد می‌چرخد و در اثر این چرخش پیچی دوم که در وسط آندولاتور به کمک یک اتصال از جنس فولاد (جفت کننده) با پیچی اول متصل شده است به صورت چپگرد چرخیده و فک‌ها به هم نزدیک یا از هم دور می‌شوند. شکل



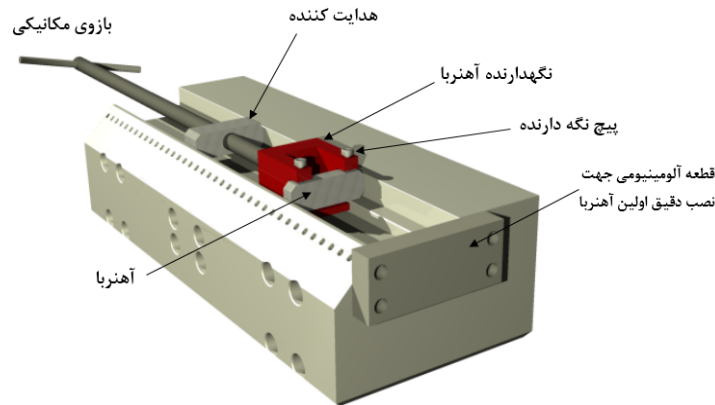
شکل ۱۲. حداکثر جابه‌جایی عمودی (راستای y) ناشی از تنش مکانیکی در حضور حداکثر نیروی وارد بر گیره آلومینیومی.

برابر است با ۳۴۴۵ نیوتون. شکل ۱۰ سازوکار نصب آهنرباها در فک‌ها را نشان می‌دهد. برای بستن گیره‌ها از پیچ‌های استیل نگیر با کیفیت بالا استفاده شده است.

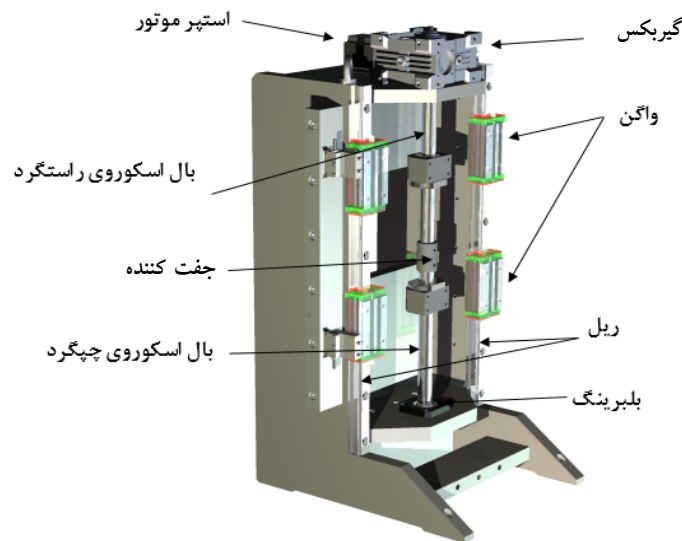
شکل ۱۱ نمودار تغییرات نیروی وارد بر آهنرباهای دائمی در فک بالایی آندولاتور را در میدان مغناطیسی کل آندولاتور که ناشی از میدان خود فک و فک مخالف است را نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ تنش مکانیکی وارد بر گیره آلومینیومی را در حضور نیروی مغناطیسی وارد بر آهنربا نشان می‌دهد که نشان دهنده حداکثر ۶ میکرون انحراف در قسمت انتهایی آهنربا است.

برای نصب آهنرباها در فک‌ها ابتدا گیره نگهدارنده‌ای از آلومینیوم طراحی کردیم که آهنربا به کمک دو عدد پیچ داخل آن محکم شود. به کمک یک بازوی مکانیکی که یک سر آن به گیره فوق متصل است و سر دیگر آن قابلیت چرخش دارد گیره و آهنربا داخل شیار که محل نصب آهنرباها است حرکت می‌کنند. برای کنترل نیروی دافعه بین مگنت‌ها که سبب بلند



شکل ۱۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایش سازوکار نصب آهنرباهای دائمی در کنار یکدیگر.

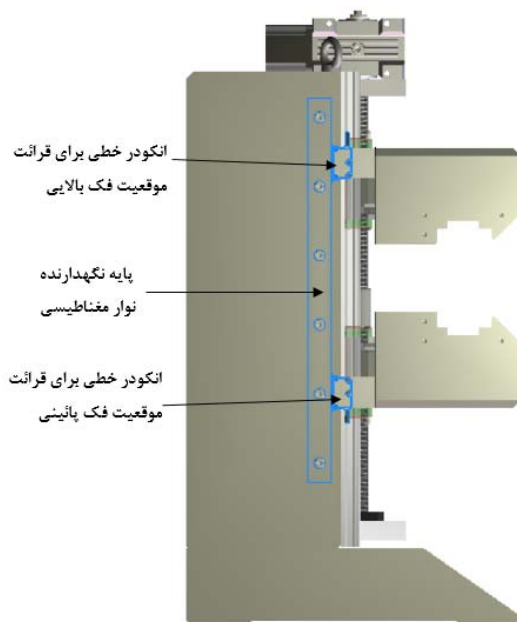


شکل ۱۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طراحی دستگاه حرکتی برای حرکت فکها و تنظیم اندازه گاف آندولاتور.

توسط این قطعه پر شود اندازه گاف دقیقاً برابر است با 0.1 ± 0.04 mm. انکودر مورد استفاده در این پروژه از شرکت لیکای ایتالیا تهیه شده است. موقعیت قرار گرفتن دو عدد قرائتگر دیجیتالی و نگهدارنده آلومینیومی که نوار مغناطیسی روی آن نصب می شود را در شکل ۱۵ می توان مشاهده کرد. میدان مغناطیسی آندولاتور یک میدان سینوسی است. یک تابع سینوسی با دوره و شدت آن تعیین می شود. در هنگام ساخت و در حالت واقعی شدت و دوره با آن چه در حالت واقعی است اختلاف ناچیزی دارد. در مورد آندولاتورهایی که با آهنرباهای دائمی ساخته می شوند از آنجا که ابعاد آهنرباها تعیین کننده اندازه دوره هستند خطای در اندازه دوره بسیار ناچیز

۱۴ نمایی از اجزای به کار رفته به عنوان سازوکار حرکتی فکها را نشان می دهد.

به منظور اندازه گیری دقیق موقعیت عمودی فکها از انکودر خطی مغناطیسی استفاده می شود. نحوه عملکرد انکودر مغناطیسی به این صورت است که نوار مغناطیسی با ارتفاع مشخصی روی نگهدارنده ای ثابت می شود و قرائتگر دیجیتالی روی نوار حرکت می کند و موقعیت خطی را با تفکیک 0.5 میکرون با ارسال پالس مربعی گزارش می کند. برای مشخص کردن نقطه صفر قطعه آلومینیومی با دقت بالا و با سنگ زنی ساخته می شود و به یکی از فکها پیچ می شود. هنگامی که فکها به اندازه ای به هم نزدیک شوند که فاصله بین آنها



شکل ۱۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قرائتگر دیجیتال مغناطیسی برای قرائت دقیق مکان فکها با تفکیک ۰.۵ میکرون. بر روی هر کدام از فکها یک عدد از این قرائتگرها نصب می شود.

درصد کمتر باشد [۲۳]. به بیان دیگر، $\sigma_B / B = 1/5 \times 10^{-2}$ و همچنین با در نظر گرفتن مقدار ۱ درصد خطا در شدت پسماند مغناطیسی آهنرباها حول مقدار میانگینشان که از نتایج اندازه گیری با پیچه هلمهولتز به دست آمده اند [۲۴] و بر اساس رابطه (۱) بر اساس نظریه توزیع خطا [۲۵] داریم

$$\frac{\sigma_B}{B} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{B_r}}{B_r}\right)^2 + \left(\frac{-\pi}{\lambda_u} \sigma_g\right)^2} \Rightarrow 1/5 \times 10^{-2}, \quad (6)$$

$$= \sqrt{(10^{-2})^2 + \left(-\pi \frac{\sigma_g}{48(\text{mm})}\right)^2} \Rightarrow \sigma_g \approx 171 \mu\text{m}$$

بنابراین حداکثر خطای مجاز در اندازه گاف در طراحی کنونی ۱۷۱ میکرون است که در ماشین کاری فکها و همچنین نصب آهنرباها باید رعایت شود. نیروی جاذبه مغناطیسی بین فکها که در حدود ۳۴۴۵ نیوتون است و نیروی وزن فکها عامل اصلی ایجاد تنش مکانیکی و خم شدن ساختار مکانیکی هستند. به کمک روش المان محدود می توان میزان این خمش را محاسبه کرد. نتایج تحلیل مکانیکی به کمک کد Autodesk Inventor به روش المان

است و عملاً در نظر گرفته نمی شود [۱۷]. اما خطای در شدت میدان اهمیت دارد. خطای در میدان مغناطیسی دو اثر دارد. یکی بر دینامیک باریکه و دیگری بر شدت هماهنگی های تولیدی. اولین اثر بخاطر صفر نشدن انتگرال های اول و دوم میدان است که سبب بسته نشدن مسیر الکترون در گذر از حلقه انبارش خواهد شد. دومین اثر فقط در آندولاتورها اهمیت دارد زیرا در ویگلر طیف پیوسته است و هماهنگیها به طور جداگانه مورد استفاده قرار نمی گیرند [۳].

۳.۲. ارزیابی خطای مجاز

به منظور مطالعه تأثیر خطای دوره و خطای شدت میدان بر عملکرد آندولاتور و تابش خروجی از آن باید در ابتدا خطای شبه تصادفی تولید کنیم و بر میدان مغناطیسی سینوسی ایده آل اضافه کنیم. این میدان مغناطیسی را به عنوان یک میدان شبه واقعی برای محاسبه هماهنگیها به کمک کد B۲E مورد استفاده قرار می دهیم [۱۷-۲۲]. با انجام محاسبات فوق در می یابیم که برای دستیابی به حداقل ۸۰ درصد از شدت هماهنگی ایده آل مقدار میانگین مجذور مربعی خطای در شدت میدان باید از ۱/۵

آهنرباهای دائمی با ابعاد و شدت واقعی را نشان می‌دهد. تمام اجزای مکانیکی آندولاتور را قبل از نصب آهنرباها برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه حرکتی مونتاژ کرده و برای مونتاژ نهایی با حضور آهنرباهای دائمی آماده می‌کنیم. شکل ۱۷ نمایی از آندولاتور بعد از مونتاژ نهایی را نشان می‌دهند.

۴. نتایج اندازه‌گیری میدان

نهایتاً، آنچه اهمیت دارد کیفیت میدان مغناطیسی آندولاتور است. همان طور که پیشتر دیدیم مهم‌ترین منشأ خطاها یکی یکنواخت نبودن بردار مغناطش آهنرباها و دیگری خطاهای مکانیکی است. خطاهای مکانیکی شامل خطای در اندازه آهنرباها و نصب آنها، خطای در ماشین‌کاری قطعات مکانیکی نگهدارنده آهنرباها، خطای ناشی از ماشین‌کاری بدنه اصلی آندولاتور و خطای ناشی از نصب فک‌ها و دستگاه حرکتی آندولاتور خواهد بود. خطاهای موجود در میدان مغناطیسی آندولاتور باعث انحراف میدان مغناطیسی از حالت ایده‌آل خواهند شد. معمول‌ترین ابزار اندازه‌گیری میدان مغناطیسی حسگر اثر هال است. برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی آندولاتور U48 از دو عدد حسگر اثر هال یکسان مدل I1A ساخته شرکت زنیس استفاده شده است. یکی از برای اندازه‌گیری مؤلفه عمودی میدان، $B_y(z)$ و دیگری برای اندازه‌گیری مؤلفه افقی، $B_x(z)$ استفاده خواهند شد. برای اطمینان از تعامد این دو حسگر، به کمک ماشین‌کاری CNC یک نگهدارنده آلومینیومی برای نصب حسگرها ساخته شده است که در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

مشخصات فنی حسگر در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. میز مخصوص نصب حسگر اثر هال که توسط گروه مکانیک چشمه نور ایران طراحی و ساخته شده است یک میز سه محور است که به کمک سه عدد موتور پله‌ای کنترل می‌شود. تفکیک مکانی حرکت هر کدام از محورها ۱ میکرون است.

حسگرهای اثر هال مورد استفاده در این کار دو خطای رایج در حسگرهای اثر هال را به کمک یک ابزار الکتریکی جبران

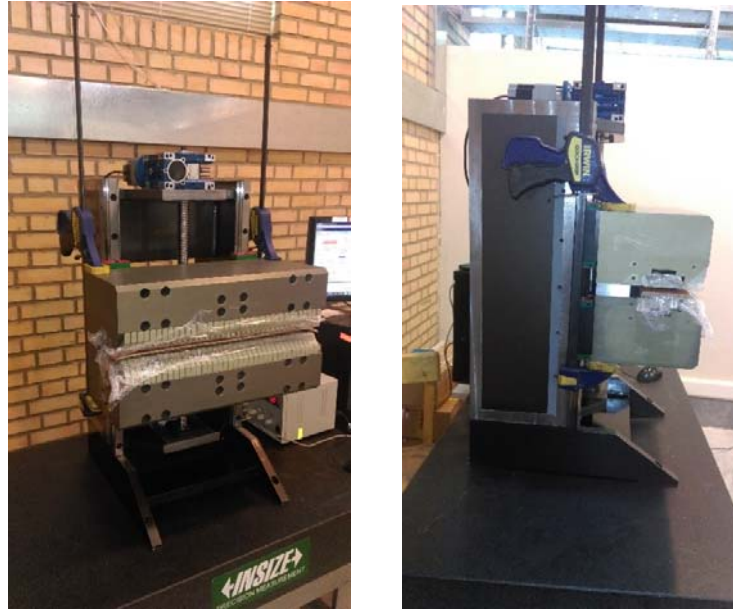


شکل ۱۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بستن دو آهنربای دائمی در یک نمونه اولیه فک برای ارزیابی نحوه عملکرد سازوکار بستن آهنرباها.

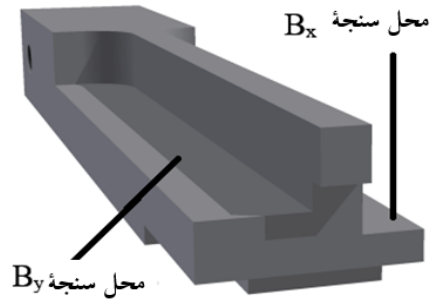
محدود به دست آمده‌اند. در اینجا همانند قبل محور y محور عمودی است و محور z محور طولی و x محور افقی است. حداکثر میزان خمش در ساختار آندولاتور در راستای y که تعیین کننده خطا در گاف است برابر با ۴۷ میکرون و در راستای x و z به ترتیب برابر با ۱۷ و ۰٫۷ میکرون خواهد بود. حداکثر میزان خطای مجاز در گاف آندولاتور ۱۷۱ میکرون است و نتایج محاسبات تحلیل مکانیکی نشان دهنده مناسب بودن طراحی فوق برای کنترل نیروی جاذبه مغناطیسی و نیروی وزن فک‌ها و آهنرباها است.

۳. ساخت آندولاتور

مراحل ساخت آندولاتور را می‌توان به طور خلاصه و به ترتیب این طور نام برد: خرید مواد، ماشین‌کاری فک‌های آلومینیومی، برش پلاسمای ورق‌های بدنه، ماشین‌کاری اولیه ورق‌ها، جوشکاری، عملیات حرارتی، زنگ زدایی (سند بلاست)، ماشین‌کاری CNC بدنه، سنگ‌زنی نقاط حساس، ماشین‌کاری مجدد بر اساس مبنای حاصل از سنگ‌زنی، مونتاژ اولیه بدون آهنرباها، رنگ‌کاری، مونتاژ نهایی و اندازه‌گیری. در ابتدا برای ارزیابی عملی نحوه بستن آهنرباها، به وسیله گیره‌های آلومینیومی و پیچ‌های فولاد نگیر ابتدا یک فک کوچک که دو عدد آهنربا را بتوان در آن بست ساخته شد و دو عدد آهنربای دائمی با قطبش عمودی و افقی را در کنار هم قرار داده و محکم می‌کنیم. شکل ۱۶ نمایی از این نمونه اولیه فک و



شکل ۱۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مونتاژ نهایی آندولاتور.



شکل ۱۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نگه دارنده برای نصب حسگرهای x و y با دقت بالا در تعامد آنها.

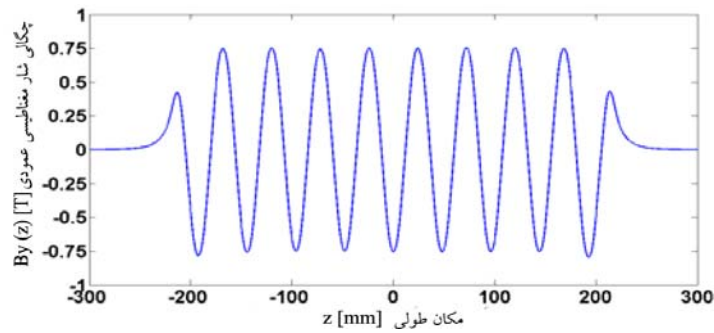
جدول ۲. کمیت‌های حسگر اثر هال.

مقدار	مشخصه
$150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$	مساحت ناحیه حساس
$1 \mu\text{T}$	تفکیک
5 V/T	حساسیت
100 ppm	دقت

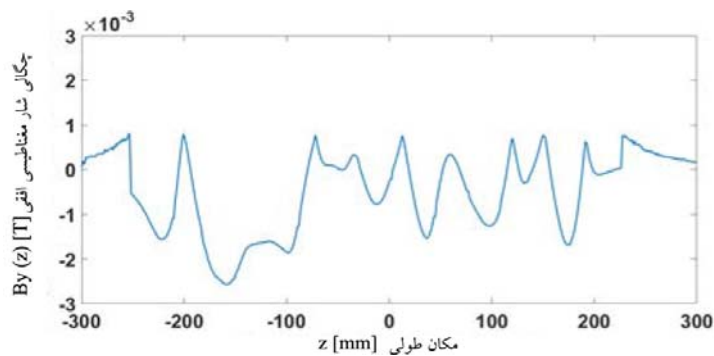
مؤلفه‌های عمودی و افقی میدان مغناطیسی به ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده‌اند. برای مقایسه بهتر بین حالت ایده‌ال و حالت واقعی میدان مغناطیسی طراحی شده را با مقدار واقعی آن در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ می‌توان مشاهده کرد. به منظور محاسبه مقدار میانگین

می‌کنند. یکی رفتار حرارتی پروب هال و دیگری خطای ناشی از پدیده هال عرضی^۱ یک ترموستات دقیق در نزدیکی سنجه هال مسئول ثبت دمای سنجه و ارسال آن به مازول الکترونیک است که اثرافت و خیز دمایی بر خروجی سنجه هال را جبران کند.

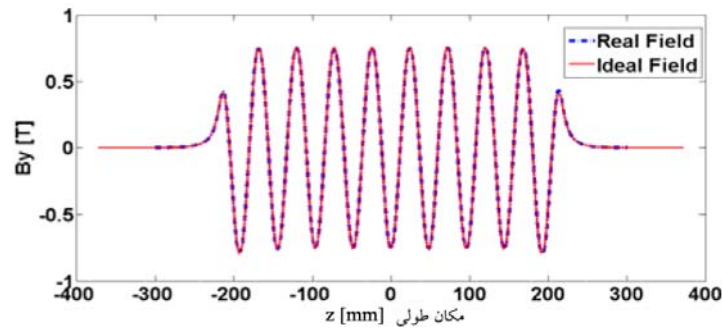
۱. Planar Hall effect



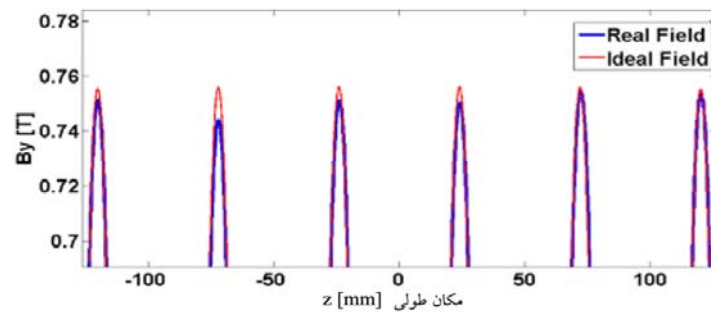
شکل ۱۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی $B_y(z)$ اندازه‌گیری شده توسط حسگر اثر هال.



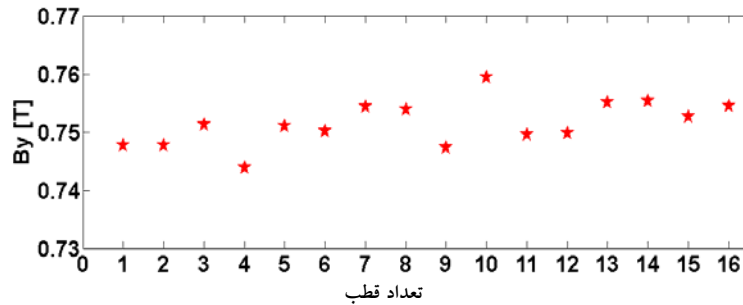
شکل ۲۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مؤلفه افقی میدان مغناطیسی $B_x(z)$ اندازه‌گیری شده توسط حسگر اثر هال.



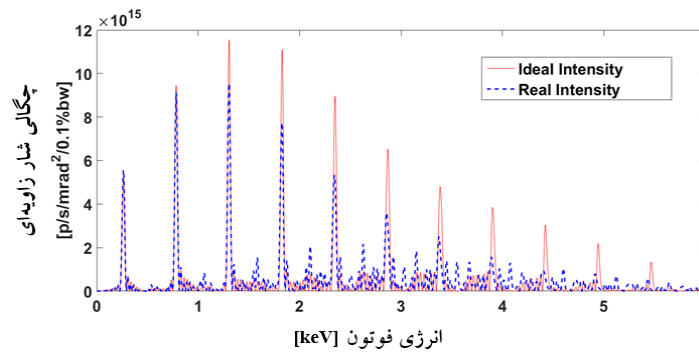
شکل ۲۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه میدان مغناطیسی ایده‌آل و واقعی.



شکل ۲۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه میدان مغناطیسی ایده‌آل و واقعی در قطب مرکزی آندولاتور از نمای نزدیک‌تر به منظور مشاهده افت و خیز میدان در محل قطب‌ها.



شکل ۲۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شدت میدان مغناطیسی در قطب‌های مختلف آندولاتور U48.



شکل ۲۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شدت هماهنگ‌های تابشی در حالت واقعی و ایده‌آل.

جدول ۳. انتگرال‌های عمودی و افقی میدان مغناطیسی.

$\int B_y(z)dz$	-0.00034 T.m
$\int dz \int B_y(z')dz'$	$1.5 \times 10^{-5} \text{ T.m}^2$
$\int B_x(z)dz$	-0.00028 T.m
$\int dz \int B_x(z')dz'$	$-1.14 \times 10^{-4} \text{ T.m}^2$

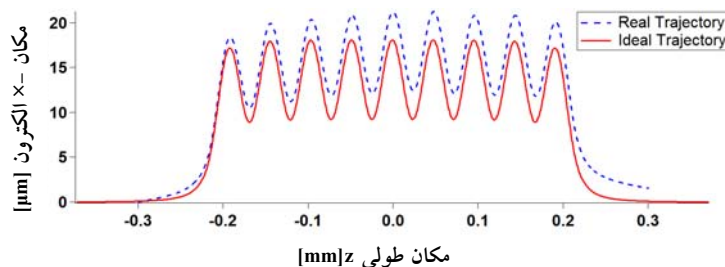
حال با داشتن میدان مغناطیسی واقعی هماهنگ‌های تابشی از آندولاتور U48 را در حالت واقعی به کمک کد B2E حساب می‌کنیم و با حالت واقعی مقایسه می‌کنیم. این مقایسه در شکل ۲۴ قابل مشاهده است.

مقدار عددی انتگرال اول و دوم مؤلفه‌های عمودی و افقی میدان در جدول ۳ آورده شده‌اند. انتگرال اول میدان مغناطیسی 0.00034 T.m - که معادل زاویه $34 \mu\text{rad}$ - و مقدار عددی انتگرال دوم مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی برابر با $1.5 \times 10^{-5} \text{ T.m}^2$ که معادل تغییر موقعیتی برابر با $1.5 \mu\text{m}$ است. مقدار این انتگرال‌ها باید به اندازه‌ای باشد که باریکه الکترونی از بین نرود. مقدار مجاز این انتگرال‌ها بر اساس محاسبات گروه

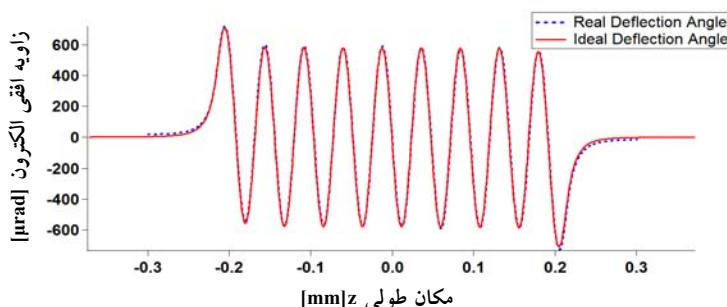
مجذور مربعی شدت میدان مغناطیسی مقدار اندازه‌گیری شده میدان در هر قطب را در نظر می‌گیریم و مقدار RMS شدت میدان مغناطیسی را به کمک رابطه زیر به دست می‌آوریم.

$$\text{RMS}_B = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2}, \quad (7)$$

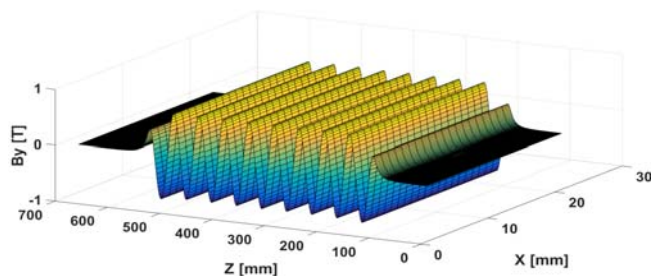
که N تعداد قطب‌های آندولاتور است که در این کار برابر است با ۱۶ و \bar{B} میانگین میدان مغناطیسی در قطب‌ها است. شکل ۲۳ توزیع شدت میدان مغناطیسی در قطب‌های مختلف آندولاتور U48 را نشان می‌دهد. میانگین میدان مغناطیسی در قطب‌ها برابر است با 0.7515 T و میانگین مجذور مربعی آن برابر است با 0.038 یا تقریباً 0.4% درصد.



شکل ۲۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مسیر حرکت عرضی الکترون در صفحه $x-z$ در حالت واقعی و ایده‌ال.



شکل ۲۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) زاویه انحراف عرضی الکترون در طول آندولاتور در حالت واقعی و ایده‌ال.

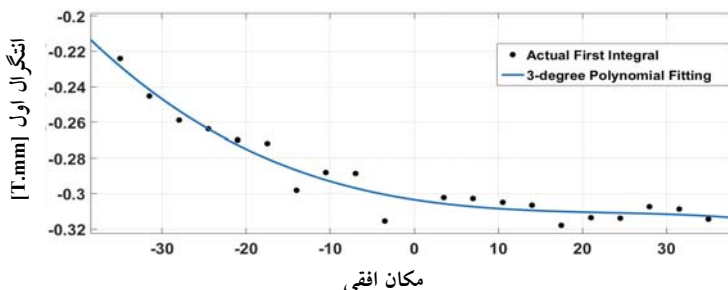


شکل ۲۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نقشه سه‌بعدی میدان مغناطیسی در صفحه $x-z$.

فاصله ۳/۵ میلی متری از $x = -35 \text{ mm}$ تا $x = 35 \text{ mm}$ اندازه می‌گیریم. شکل ۲۷ نقشه سه‌بعدی مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی در صفحه مرکزی آندولاتور را نشان می‌دهند. تغییرات سینوسی نقشه سه‌بعدی نشان دهنده میدان آندولاتور در راستای طولی یا محور Z و تغییرات عرضی آن که تقریباً یکنواخت است در راستای عرضی آهنرباها یا محور x اندازه‌گیری شده‌اند. فاصله مکانی نمونه‌برداری‌ها در راستای طولی 1 mm و در راستای عرضی 3.5 mm است. با انتگرال‌گیری از مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی در راستای محور z ، تغییرات انتگرال میدان بر حسب موقعیت افقی را به دست می‌آوریم. شکل ۲۸ نمودار تغییرات انتگرال اول مؤلفه

دینامیک باریکه تعیین می‌شود. مقدار به دست آمده در این کار برای انتگرال‌های اول و دوم در محدود مقادیر مجاز است به طوری که با قرار گرفتن آندولاتور در داخل شبکه پایداری باریکه تضمین شود. شکل‌های ۲۵ و ۲۶ مسیر و زاویه حرکت الکترون را در دو حالت ایده‌ال و واقعی مقایسه کرده‌اند.

بعد از ساخت و اندازه‌گیری آندولاتور باید سهم این چند قطبی را در انتگرال میدان مغناطیسی مشخص کرد. برای این کار انتگرال میدان مغناطیسی در طول آندولاتور را بر حسب x رسم می‌کنیم و با برازش دادن یک تابع چند جمله‌ای از مرتبه ۳ سهم چندقطبی‌ها در انتگرال میدان به دست می‌آوریم. به این منظور، به وسیله حسگر اثر هال صفحه میانی آندولاتور را با



شکل ۲۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات انتگرال اول میدان در راستای افقی.

جدول ۴. سهم چند قطبی‌ها در انتگرال میدان.

چند قطبی، n	ضریب چند قطبی
$n=0$ دو قطبی	-0.3035 T.mm
$n=1$ چهار قطبی	-0.007313 T
$n=2$ شش قطبی	$5.37e^{-5} \text{ T/mm}$
$n=3$ هشت قطبی	$-2.3088e^{-6} \text{ T/mm}^2$

عمودی میدان مغناطیسی بر حسب موقعیت افقی x را نشان می‌دهد. تابع برازش داده شده برابر است با

$$f = -0.3035 - 0.007313x + 2.685 \times 10^{-5}x^2 - 3.848 \times 10^{-7}x^3 \quad (8)$$

(R-square = 0.945, RMSE = 0.006791)

ضرایب تابع درجه سوم برازش داده شده به داده‌ها تعیین کننده سهم چند قطبی‌های مغناطیسی هستند. ضرایب چند قطبی‌های مغناطیسی در جدول ۴ آمده‌اند.

به طور کلی خطاهای چندقطبی ناشی از محدود بودن ابعاد آهنرباها در راستای عرضی، محور x و همچنین سایر خطاهای مغناطیسی و مکانیکی در ساخت آندولاتور هستند. هر گونه انحراف در جهت و مقدار بردار مغناطش آهنرباها و در جابه جایی فک‌ها نسبت به یکدیگر در مرحله ساخت منجر به تولید خطاهای چند قطبی می‌شوند. این خطاها و تأثیرات آنها بر شدت هماهنگ‌ها و دینامیک باریکه به صورت تحلیلی و عددی توسط برخی از نویسندگان این مقاله مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته‌اند [۲۶].

۵. نتیجه گیری

در این مقاله نتایج مربوط به ساخت و اندازه‌گیری آندولاتور

ایران، به خاطر حمایت مالی از این پروژه اعلام می‌دارند. همچنین از سرکار خانم جلالی مدیر محترم امور اداری شرکت انرژی نوین که راه را برای تسریع در اختصاص منابع هموار نمودند تشکر می‌نمائیم. در زمینه مشاوره علمی در این پژوهش لازم است از مشاور طرح چشمه نور ایران و مشاور این پژوهش آقای پروفسور هلموت ویدمن استاد بازنشسته دانشگاه استنفورد و نویسنده یکی از مهم‌ترین منابع علمی در زمینه تابش سنکروترونی مرجع (۱۲) اعلام بداریم. معرفی کدهای لازم و نحوه محاسبه خطاها و ارزیابی نهایی ایشان از نتایج اندازه‌گیری، عمیقاً باعث گشایش و دلگرمی تیم اجرایی این پژوهش بود.

گرفته‌اند. نتایج این کار به عنوان سنگ بنایی برای ورود به دانش و فناوری طراحی و ساخت آندولاتورها چه در سنکروترون و چه در لیزرهای الکترون آزاد قابل استفاده هستند. مشکلات و کاستی‌های سر راه ساخت آندولاتور در این کار در عمل مشخص شدند و در تجربه‌های آتی کمک شایانی در انتخاب مسیرهای بهتر، روبروی محققین علاقه‌مند به کار در این حوزه خواهد نمود.

قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی قلبی خود را از جناب آقای دکتر علی اکبر صالحی، رئیس محترم سازمان انرژی اتمی

مراجع

13. "Conceptual Design Report", Iranian Light Sources Facility, Institute for Research in Fundamental Sciences (2012).
14. O Chubar, P Elleaume, and J Chavanne, *J. Synchrotron Radiat* **5**, 3 (1998) 481.
15. P Elleaume and X Marechal, "B2E, A Software to Compute Synchrotron Radiation from Magnetic Field Data", Gronobl, Cedex (1991).
16. A Ramezani Moghaddam et al., "Magnetic Design Of The First Prototype Pure Permanent Magnet Undulator for The Ilse", Proceedings of IPAC 2014, Dresden, Germany (2014).
17. S Chunjarean, "High Field Insertion Devices for Low Energy Electron Storage Rings", PhD Thesis, Suranaree University of Technology (2009).
18. E Alp Esen and P J Viccaro, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **266** (1988) 116.
19. B M Kincaid, *J. Opt. Soc. Am. B* **2** (1985) 8.
20. Y M Nikitina and J Pflüger, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **359** (1995) 89.
21. B M Kincaid, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **291** (1990) 363.
22. R J Dejus et al., *Review of Scientific Instruments* **66** (1995) 1875.
۲۳. ع رضانی مقدم، م لامعی، ج رحیقی، و ا چخماچی دوم، مجله علمی پژوهشی علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی **۲** (۱۳۹۶) ۸۰.
۲۴. ع رضانی مقدم، م لامعی، و ج رحیقی، مجله علمی پژوهشی علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی **۴** (۱۳۹۵) ۱.
1. A James Clarke, "The Science and Technology of Undulators and Wigglers", Oxford University Press (2004).
2. K Halbach, J Chin, E Hoyer, H Winick, R Cronin, J Yang, and Y Zambre, *IEEE Transactions on Nuclear Science* **28**, 3 (1981) 3136.
3. H Onuki and P Elleaume, "Undulators, Wigglers and Their Applications", Taylor & Francis Press (2003).
4. S Yamamoto et al., *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 1 (1992) 400.
5. T Hara et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **7**, 5 (2004) 050702.
6. A B Temnykh, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **11**, 12 (2008) 120702.
7. "Conceptual Magnetic Design Report for a 21.3 mm Period In-Vacuum Pure Permanent Magnet Undulator", Document AAD-SR-ID-AR-0128, 631 ALBA Accelerator Division (2005).
8. "Preliminary Magnetic Design of a Planar PPM Undulator for the 633 MAX III ring at MAX-lab," Advanced Design Consulting USA, Lansing, NY, USA, Tech. Rep.
9. A Temnykh, T Kobela, A Lyndaker, J Savino, E Suttner, and Y Li, "Compact PPM Undulator for Cornell High Energy Synchrotron Source," in *Proc. CLASSE*, Ithaca, NY, USA (2011) 1.
10. B Diviacco, R Bracco, D Millo, D Zangrando, and R and P Walker, "Construction of Elliptical Undulators for ELETTRA," in *Proc. Eur. Particle Accel. Conf.*, Stockholm, Sweden (1998) 2216.
11. T Schmidt, M Calvi, and G Ingold, *Synchrotron Radiat. News* **28**, 3 (2015) 34.
12. H Wiedemann, "Synchrotron Radiation", Springer (2003).

26. A Ramezani Moghaddam, M Lamehi, and J Rahighi,
IEEE Transactions on Magnetics **52**, 4 (2016) 1.

25. P R Bevington and D K Robinson, “*Data Reduction
and Error Analysis*”, McGraw-Hill Press (2003).