

اندازه‌گیری میدان الکتریکی تیوب آزمایشی ساخته شده برای یک شتاب‌دهنده خطی الکترون موج رونده

فرشاد قاسمی^۱، فریدون عباسی دوانی^۲، محمد لامعی رشتی^۳، ساسان احمدیان^۱ و حامد شاکر^۳

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

۲. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

۳. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، پژوهشکده ذرات و شتابگرها

پست الکترونیکی: Fsghasemi@aeoi.org.ir

چکیده

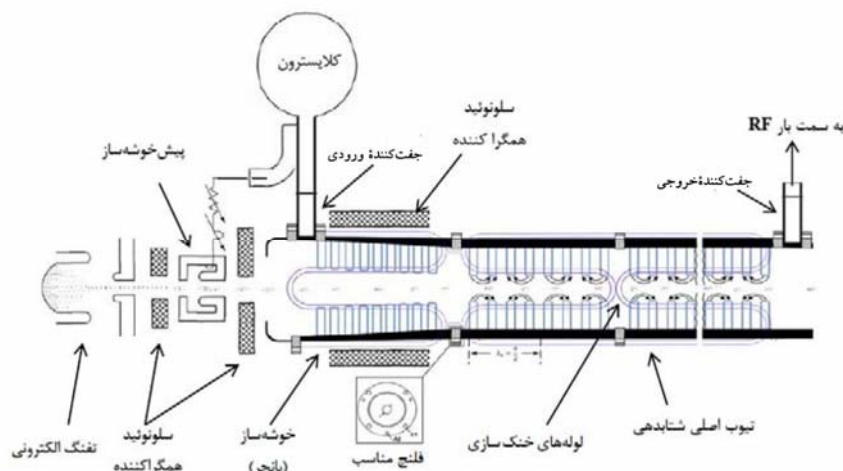
هدف پروژه ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌ای در باند S است که تا حد ممکن اجزاء مختلف آن در ایران ساخته شود. در این پروژه برای بررسی و اطمینان بیشتر در ساخت تیوب‌های نهایی، ساخت یک تیوب شتاب‌دهی با جنس مس با مشخصات کاملاً یکسان با تیوب‌های نهایی انجام گرفته است. پس از طراحی و ساخت تیوب آزمایشی این شتاب‌دهنده، اندازه‌گیری آن با استفاده از روش اختلالی اسلاتر در حالت تشدید و روش استیل در حالت غیر تشدید انجام شده است. انطباق میدان در مدهای مختلف برای تیوب شتاب‌دهی بعد از تنظیم با مقادیر شبیه‌سازی، صحت ساخت و اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده خطی الکترون، موج رونده، روش اختلالی اسلاتر

۱. مقدمه

الکترون، طراحی شتاب‌دهنده‌ای است که تا حد ممکن اجزای مختلف آن در ایران ساخته شود. پژوهش انجام گرفته در این مقاله در راستای این پروژه است. شکل ۱ طرح‌واره شتاب‌دهنده مورد نظر را نشان می‌دهد. بخش شتاب‌دهی از مهم‌ترین اجزای یک شتاب‌دهنده خطی الکترون است که پس از ساخت، کمیت‌های مختلف آن باید اندازه‌گیری شود. از جمله کمیت‌های مهم، می‌توان به ضریب کیفیت، بسامد تشدید کاواک‌ها، ضریب جفت شدگی و تشدید مناسب جفت‌کننده تزریق توان و پیشروی فاز از سلولی به سلول بعدی در طول تیوب شتاب‌دهی اشاره کرد. اندازه‌گیری

با توجه به کاربرد گسترده شتاب‌دهنده‌ها، در سال‌های اخیر در ایران پروژه‌هایی برای طراحی و ساخت انواع مختلف شتاب‌دهنده‌ها آغاز شده است. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی با انجام دو پروژه طراحی و ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون و شتاب‌دهنده تابش سینکروترونی در ایران در این زمینه پیشرو است. در این پژوهشگاه هدف پروژه شتاب‌دهنده خطی الکترون، با توجه به نیاز ایران به گسترش این شتاب‌دهنده در کاربردهای پرتودرمانی، پرتودهی صنعتی، تصویربرداری محموله‌ها، تحقیقات فیزیک و پیش تزریق گر سینکروترون



شکل ۱. طرح‌واره شتاب‌دهنده خطی الکترون پژوهشگاه دانش‌های بنیادی.

شتاب‌دهنده‌ها است. خطاهای ممکن معمولاً از عوامل زیر ناشی می‌شوند:

۱. دقت ناکافی در تحلیل و روش‌های عددی به کار رفته در طراحی کاواک‌ها.
۲. خطاهای به وجود آمده در حین فرایند ماشینکاری و یا عدم دقت کافی در ماشینکاری کاواک‌ها.
۳. تغییر در ابعاد کاواک زمانی که تنش‌های درونی مواد شروع شود. (مانند آنچه که بعد از فرایند انبساط صفحه‌ها در روش انقباضی ساخت تیوب به وجود می‌آید).
۴. تغییر ابعاد کاواک و کیفیت سطح بسته به فلز به کار رفته در ساخت.

البته چنانچه هیچ خطایی نیز در فرایند طراحی و ساخت وجود نداشته باشد، باز هم به اندازه‌گیری نیاز خواهد بود. انجام اندازه‌گیری‌ها برای سنجش مشخصات مدهای مختلف تشدیدی که می‌توانند در کنار مد طراحی در داخل ساختار برانگیخته شوند، حائز اهمیت است. از طرف دیگر، این نوع اندازه‌گیری‌ها قبل و بعد از ورود RF توان بالا به تیوب، اطلاعات مهمی را در اختیار ما قرار می‌دهند. برای مثال، در اندازه‌گیری کشش گوی با دقت فاز کمتر از یک درجه احتیاج داریم تا با توجه به تخریب احتمالی ساختار در تست توان بالا، تغییرات فاز قابل اندازه‌گیری باشد [۱]. همچنین با اندازه‌گیری میدان RF می‌توان

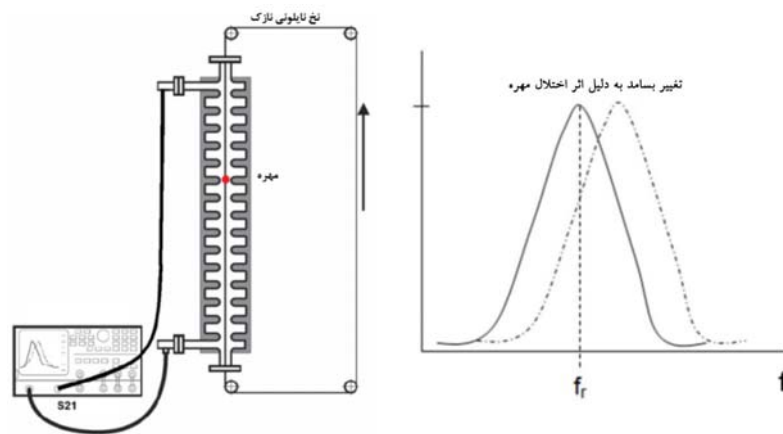
پروفایل میدان الکتریکی روی محور تیوب شتاب‌دهی برای مدهای مختلف نیز مهم است و اطلاعات ارزشمندی راجع به عملکرد تیوب شتاب‌دهی می‌دهد.

اهمیت موضوع اندازه‌گیری و تنظیم کردن ساختار شتاب‌دهنده‌های خطی تا حدی است که بدون انجام دقیق آن عملاً باریکه‌ای در خروجی شتاب‌دهنده به دست نیامده و یا دارای مشخصات متفاوت از طراحی می‌باشد.

به عبارت دیگر فرایند شتاب‌دهی به الکترون‌ها در داخل تیوب شتاب‌دهنده‌های خطی با پارامترهای طراحی و شبیه‌سازی ساختار شتاب‌دهی، ارتباط مستقیم دارد. بنابراین اندازه‌گیری دقیق پارامترهای تیوب شتاب‌دهی و پس از آن، تنظیم ساختار ضروری است.

در ادامه این مقاله بنا بر ضرورت، به توضیح مختصر علت اندازه‌گیری پارامترهای تیوب شتاب‌دهی می‌پردازیم. پس از اشاره به روش‌های اندازه‌گیری میدان و بررسی اثر دما و رطوبت، نتایج اندازه‌گیری میدان الکتریکی در مدهای مختلف آمده است.

به علت عدم دقت کافی در ساخت، برخی پارامترهای قطعات ساخته شده، با مقدار طراحی شده آنها متفاوت خواهند بود. در نتیجه اندازه‌گیری و تنظیم قطعات ساخته شده در توان‌های پایین، یکی از موضوعات مهم در ساخت



شکل ۲. طرح‌واره یک دستگاه اندازه‌گیری با روش اسلاتر.

برابر هستند. با وارد کردن یک جسم مختل کننده کوچک و تغییر در شرایط مرزی یک مد مشخص در کاواک، تعادل انرژی میانگین ذخیره شده در میدان الکتریکی و مغناطیسی تشدید کننده بسته به مکان جسم مختل کننده به هم می‌خورد.

در این حالت بسامد کاواک تشدید کننده برای به تعادل رساندن ذخیره انرژی میان دو میدان تغییر می‌یابد. با فرض کوچک بودن سرعت اختلال و استفاده از یک جسم مختل کننده مناسب که هم بتواند به میزان کافی اختلال ایجاد کند و هم اینکه توزیع میدان در کاواک تشدید کننده را به هم نزند، درصد تغییر بسامد تشدید متناسب با میدان الکتریکی و مغناطیسی خواهد بود. تغییر بسامد و میدان اندازه‌گیری شده تابعی از مکان قرار گیری جسم مختل کننده هستند. در مراجع [۳ و ۴] روابط استخراج شده به تفصیل آمده است. در اینجا از تکرار آنها صرف نظر شده است.

امروزه تئوری اختلالی اسلاتر مبنای اندازه‌گیری کاواک شتاب‌دهنده‌های خطی است. هدف استفاده از روش اختلالی اسلاتر در این مقاله عبارت است از: بررسی پروفایل میدان الکتریکی محوری که وظیفه آن شتاب دادن به الکترون‌ها است. همچنین جسم مختل کننده بر حسب نیاز برای اندازه‌گیری مدهای دیگر می‌تواند در شکل‌های مختلفی مانند گوی، سوزنی، قرص و بیضوی انتخاب شود. هر یک از این هندسه‌ها تأثیر متفاوتی در توزیع انرژی الکتریکی و مغناطیسی در داخل کاواک

شرایط تنظیم کاواک‌ها برای داشتن میدان یکنواخت را به دست آورد. این اندازه‌گیری‌ها در توان پایین انجام می‌گیرد و به اصطلاح به آنها تست سرد تیوب نیز اطلاق می‌شود.

۲. اندازه‌گیری میدان الکتریکی

۱.۲. استفاده از روش اختلالی اسلاتر

در سال ۱۹۵۲ مایر و اسلاتر [۲] روش اختلال بسامدی را برای اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی طولی در کاواک شتاب‌دهنده‌های خطی توسعه دادند. با استفاده از این روش، ایجاد اختلال در بسامد تشدید یک تشدید کننده الکترومغناطیسی به وسیله یک جسم دی‌الکتریک یا رسانا برای یافتن میدان الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری توزیع میدان الکتریکی محوری با استفاده از روش اختلالی اسلاتر، یک جسم مختل کننده را توسط یک نخ به کمک سیستمی مناسب با گام‌هایی مشخص روی محور کاواک یا تیوب شتاب‌دهی جابه‌جا می‌کنند. در هر مرحله تغییر بسامد تشدید را برای یک مد مشخصی که با نت‌ورک^۱ آنالایزر تحریک می‌شود نسبت به حالت بدون اختلال اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند. شکل ۲ طرح‌واره یک دستگاه اندازه‌گیری با روش اسلاتر را نشان می‌دهد. برای یک کاواک در حالت تشدید، انرژی ذخیره شده در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با هم

۱. Network

اندازه‌گیری شده و با استفاده از روابط استخراج شده، بازگشت موج به صورت محلی بین هر کاواک محاسبه می‌شود و از روی آن، بسامد هر کاواک، پیشروی فاز و شکل میدان الکتریکی به دست می‌آید.

در مراجع [۷ و ۸] روابط استخراج شده به تفصیل آمده است. مزیت این روش نسبت به سایر روش‌ها عدم ورود هر گونه پلاننگر به داخل ساختار و در نتیجه احتمال کمتر آسیب دیدن آنهاست. البته با این روش مشخصات دو کاواک ابتدایی و انتهایی ساختار به طور دقیق حاصل نمی‌شود. انجام تنظیم در چند مرحله و مشاهده نتیجه هر مرحله از مزیت‌های این روش است. در تنظیم بسامدی تک تک کاواک‌ها نمی‌توان اثر متقابل بین آنها را دخیل کرد، اما در این روش پس از هر مرحله تمامی پارامترها مجدد اندازه‌گیری شده و اثر هر مرحله تنظیم مشاهده می‌شود.

مرجع [۹] از این روش برای اندازه‌گیری و تنظیم تیوب شتاب‌دهی خود در مد $2\pi/3$ استفاده کرده است. در این مقاله این روش برای مد $\pi/2$ استفاده شده است. نویسندگان مقاله تاکنون گزارشی در این مد از این روش را پیدا نکرده‌اند.

۳. بررسی اثر دما و رطوبت بر اندازه‌گیری‌ها

دما و رطوبت، دو عامل تأثیرگذار بر اندازه‌گیری‌های بسامدهای رادیویی هستند. اساساً در طراحی تیوب شتاب‌دهی، به واسطه شرایط کاری شتاب‌دهنده، داخل تیوب خلاً در نظر گرفته می‌شود. برای دما نیز یک دمای متعارف برای شتاب‌دهنده‌های دمای اتاق (که شتاب‌دهنده مورد نظر این مقاله نیز از آن نوع است) در نظر گرفته می‌شود. با طراحی سیستم خنک‌سازی سعی می‌شود که دما در حد مقدار لحاظ شده ثابت بماند.

اما در اندازه‌گیری‌های تست سرد، داخل تیوب هوا قرار دارد. میزان دما و رطوبت هوا بر ضریب دی‌الکتریک آن تأثیر گذاشته و بر هر اندازه‌گیری مؤثر خواهد بود. چنانچه دما و رطوبت ثابت باشند به راحتی می‌توان خطای سیستماتیک حاصل از آنها را در اندازه‌گیری‌ها کسر کرد. میزان تأثیر این

شتاب‌دهنده دارند و برای تصحیح این موضوع از پارامتری به نام عامل شکل استفاده می‌شود که قطبیت میدان‌ها را مشخص می‌کند. معادلات مربوط به قطبیت مورد استفاده در رابطه اختلالی اسلاتر مورد استفاده در این مقاله از فرمول‌های منتشر شده در مراجع [۳، ۵ و ۶] استخراج شده است. مراحل اندازه‌گیری اسلاتر با استفاده از سیستم کشش گوی به صورت زیر است:

۱. سیستم مهره و نخ را در حالی که برای حرکت آن از یک سیستم دقیق استفاده می‌شود، آماده می‌کنیم.
۲. مهره را در ابتدای ساختار (خارج از تیوب) قرار داده و نت‌ورک آنالایزر برای بسامد مورد نظر تنظیم می‌شود. در این حالت مقدار S_{11} را به عنوان حالت بدون اختلال ذخیره می‌کنیم.
۳. برنامه واسط کترلی موتور را اجرا می‌کنیم.
۴. با توجه به محاسبات انجام شده در برنامه، موتور مهره را به سمت جلو و در محل مورد نظر قرار می‌دهد.
۵. در هر موقعیت مهره، مقدار S_{11} اندازه‌گیری و به عنوان مقدار دارای اختلال در آن محل ذخیره می‌شود.
۶. به صورت خودکار نت‌ورک آنالایزر برای بسامد مورد نظر درجه بندی می‌شود.
۷. مراحل فوق به تعداد نقاط زیاد (با فاصله 0.2 میلی‌متری) تکرار شده و اطلاعات ذخیره می‌شود.
۸. از داده‌های ذخیره شده و با استفاده از روابط، میدان الکتریکی برای هر موقعیت مهره به دست می‌آید.
۹. در نهایت نمودار میدان الکتریکی بر حسب موقعیت مهره با استفاده از یک کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب به دست می‌آید.

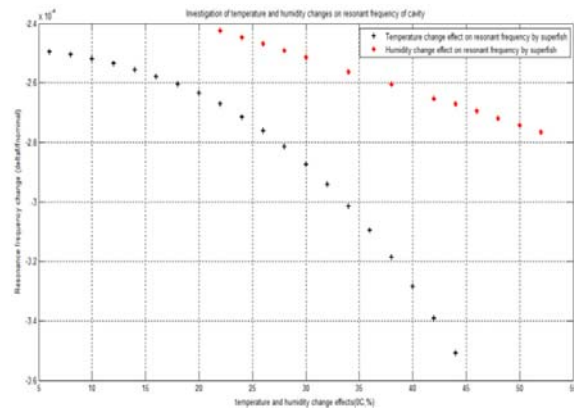
۲.۲. استفاده از روش اندازه‌گیری استیل در حالت غیر

تشدید

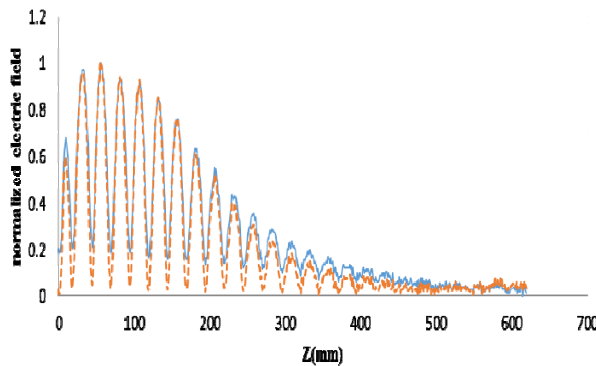
جایروشی در مرجع [۷] در سال ۲۰۱۲ این روش را برای اندازه‌گیری‌های پارامترهای مختلف با استفاده از سیستم اندازه‌گیری کشش گوی ارائه کرده است. در این روش، میزان بازگشت موج ناشی از جسم مختل کننده در هر نقطه



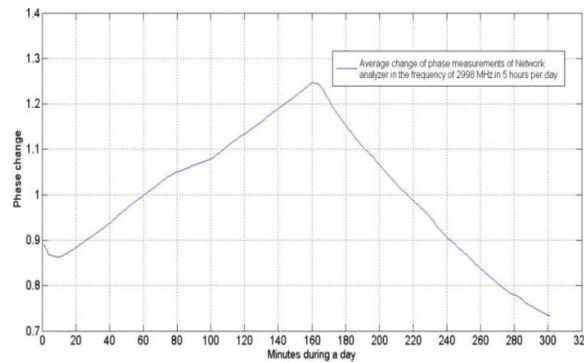
شکل ۴. چیدمان آزمایش اندازه‌گیری اختلالی اسلاتر تیوب.



شکل ۳. اثر دما (نقاط آبی) و رطوبت (نقاط قرمز) بر بسامد.



شکل ۵. استفاده از روش کاهش اثرات تغییرات خطی.



شکل ۴. اندازه‌گیری فاز برای مدت ۵ ساعت در اتاق اندازه‌گیری.

راه اول مستلزم استفاده از یک سیستم گردش گاز مناسب است. راه دوم نیز دو سیستم اندازه‌گیری همزمان را می‌طلبد. مرجع [۱۰] این اثر را به صورت غیرفعال حل کرده است. با این مفهوم که با محاسبه میزان تغییرات فاز در بسامد مورد نظر شتاب‌دهنده در طول روز میزان اثر تغییرات دما و رطوبت را رصد کرده و با روش معکوس اثر آنها را از اندازه‌گیری‌ها حذف کرده است. بنابراین چنانچه اندازه‌گیری تیوب را در طول حداکثر چند ده دقیقه انجام دهیم، می‌توان به صورت خطی اثر آن را وارد کرد. در این مقاله نیز از این روش استفاده شده است. شکل ۴ چیدمان آزمایش تیوب بر روی سیستم اندازه‌گیری اختلالی اسلاتر در حالت موج ایستا را نشان می‌دهد. شکل ۵ نمونه‌ای از اندازه‌گیری فاز در بسامد مورد نظر برای مدت ۵ ساعت را نشان می‌دهد. در این اندازه‌گیری تنها اثر تغییرات شرایط محیط اندازه‌گیری مؤثر بوده است. مشاهده

تغییرات هم به طور تحلیلی قابل محاسبه است و هم با استفاده از کد سوپر فیش به طور دقیق محاسبه می‌شود. شکل ۳ میزان اثر تغییرات دما و رطوبت را که از نرم‌افزار به دست آمده است نشان می‌دهد.

مشکل وقتی پیچیده‌تر است که این دو عامل در طول اندازه‌گیری تغییر کنند. در این صورت، چند راه برای جبران این خطا وجود دارد. راه اول استفاده از گاز نیتروژن در حین اندازه‌گیری است. در این حالت با گذر این گاز از داخل تیوب شتاب‌دهی دما و رطوبت را در حین کار ثابت می‌کنند. راه دیگر استفاده از یک سیستم جانبی در حین اندازه‌گیری تیوب اصلی است. در این حالت برای اندازه‌گیری می‌توان یک کاواک استاندارد را که برای تشدید در مد $\pi/2$ طراحی و ساخته شده است به صورت همزمان با اندازه‌گیری کاواک شتاب‌دهنده مورد سنجش قرار داد. با این کار تغییرات بسامدی مربوط به محیط اطراف حذف می‌شود.

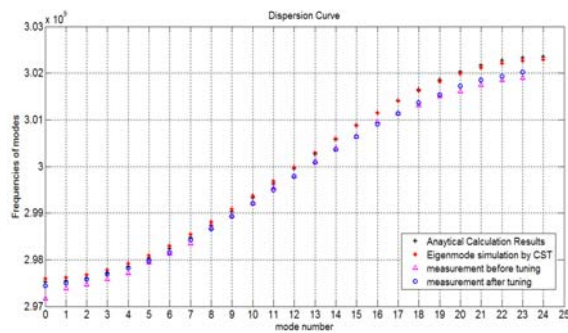
جدول ۱. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری و مقایسه با شبیه‌سازی.

پارامترها	سرعت گروه	ضریب جفت شدگی	ضریب کیفیت	بسامد تشدید
شبیه سازی CST	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۵۵	۱۰۳۵۰	۲۹۹۹
شبیه‌سازی سوپرفیش	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۴۷	۱۰۹۰۰	۲۹۹۷٫۹۲
محاسبات تحلیلی	۰٫۰۰۹۴	۰٫۰۱۶۰	۱۰۰۰۰	۲۹۹۸
اندازه‌گیری عملی قبل از تنظیم	۰٫۰۰۸۳	۰٫۰۱۵۷	۹۴۰۰	۲۹۹۷٫۵
اندازه‌گیری عملی بعد از تنظیم	۰٫۰۰۹۸	۰٫۰۱۵۲	۱۰۱۰۰	۲۹۹۸

مناسب و کافی است. در نتیجه باید مجموع حجم همه برآمدگی‌ها تا 190 mm^3 یا به طور تقریبی مقدار 200 mm^3 قابلیت افزایش داشته باشد. این به این معناست که اگر ما ۴ سوراخ با قطر ۱۲ میلی‌متر روی سطح خارجی کاواک‌ها ایجاد کنیم و اگر فرض کنیم که در همه حفره‌ها در اثر فشار، یک برآمدگی استوانه‌ای ایجاد می‌شود، کافی است طول هر برآمدگی 0.44 میلی‌متر باشد تا تغییر بسامد ۳ مگاهرتز را ایجاد کند و اگر تقریب استوانه‌ای را کنار بگذاریم و فرض کنیم برآمدگی به شکل یک قسمت از یک کره است آن وقت برآمدگی حداکثر حدود 0.9 میلی‌متر کافی است.

در این پژوهش پس از اندازه‌گیری و تنظیم کردن جفت‌کننده تزیق توان [۱۳]، اندازه‌گیری و تنظیم تیوب شتاب‌دهی آزمایشی ساخته شده انجام شد. برای این تیوب شتاب‌دهی منحنی پاشندگی قبل و بعد از تنظیم کاواک‌ها در شکل ۶ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشخص است بعد از تنظیم کاواک‌ها منحنی پاشندگی متقارن شده است. مقادیر سرعت گروه، سرعت فاز و ضریب جفت شدگی با نتایج شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است. پیش از ورود به اندازه‌گیری میدان با سیستم اندازه‌گیری کشش گوی لازم است تا گوی‌های مختلف بررسی و بهترین آنها از نظر ابعاد در سایر اندازه‌گیری‌ها به کار رود. پس از انتخاب اختلالگر مناسب اندازه‌گیری پروفایل میدان انجام گرفت. شکل‌های ۷ تا ۱۱ نتایج تغییرات میدان الکتریکی در محور تیوب در مدهای مختلف را نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ میدان الکتریکی به دست آمده از روش استیل را در مد $\frac{\pi}{2}$ نشان می‌دهد. شکل ۱۳ فاز موج RF ورودی در پیش



شکل ۶. مقایسه و بررسی منحنی پاشندگی برای شبیه‌سازی CST، محاسبات تحلیلی، اندازه‌گیری قبل و بعد از تنظیم کردن.

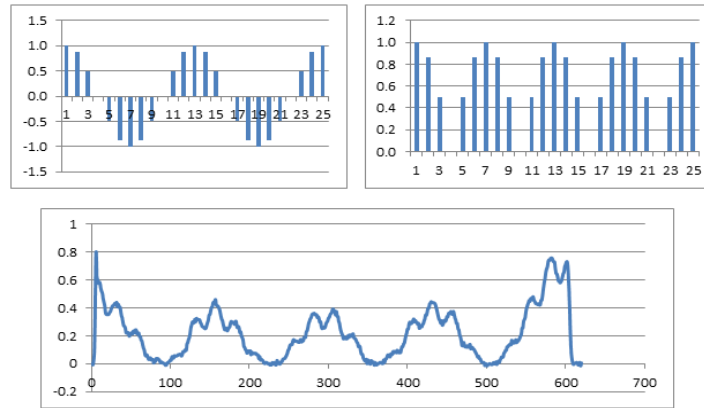
می‌شود که در اتاق اندازه‌گیری، تغییرات خطی است. شکل ۶ استفاده از روش تغییرات خطی اثر شرایط را بر روی پروفایل میدان در مد π در تیوب ساخته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. البته این روش تنها وقتی می‌تواند استفاده شود که مدت زمان یک اندازه‌گیری کوتاه (حداکثر چند ده دقیقه) باشد.

۴. تنظیم بسامدی و نتایج اندازه‌گیری میدان

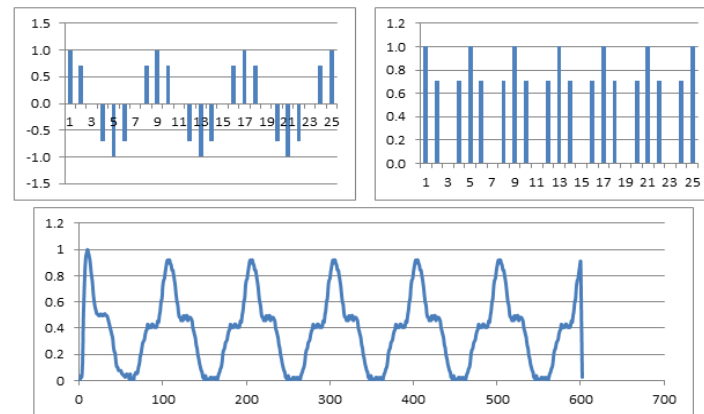
مهم‌ترین تأثیر خطا در مراحل ساخت اجزای تیوب شتاب‌دهنده خطی الکترون، تغییر بسامد تشدید و ضریب جفت شدگی است.

برای تغییر بسامد تشدید، روشی که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از سازوکاری مناسب جهت ایجاد یک یا چند برآمدگی بر روی دیواره کاواک است، به نحوی که بدون ایجاد سوراخ بتوان حجم کاواک را تغییر داد و بسامد را تنظیم کرد.

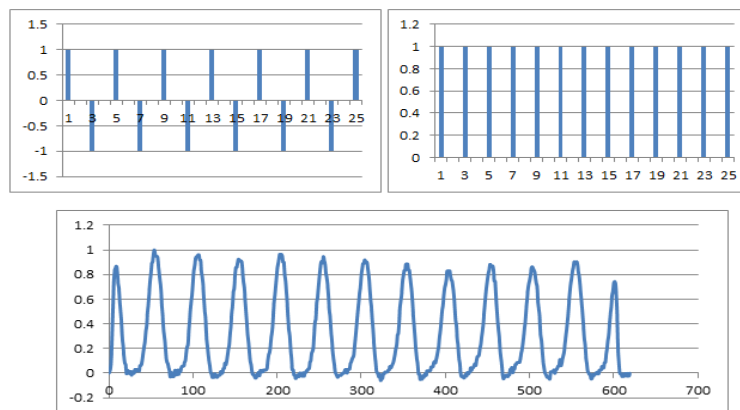
تجربیات به دست آمده از مراجع [۱۱ و ۱۲] نشان می‌دهد که برای تنظیم کردن کاواک، قابلیت تغییر بسامد تا ۳ مگاهرتز



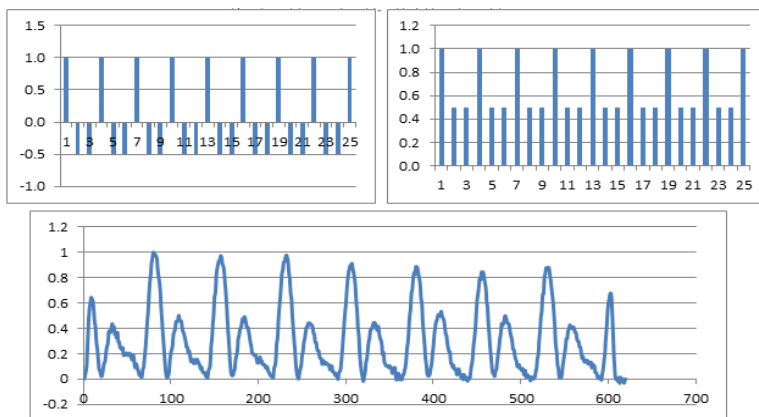
شکل ۷. میدان الکتریکی در مد $\frac{\pi}{6}$ ، بالا چپ- الگوی ایده‌ال میدان، بالا راست- ایده‌ال اندازه میدان و پایین- اندازه‌گیری پروفایل اندازه میدان الکتریکی.



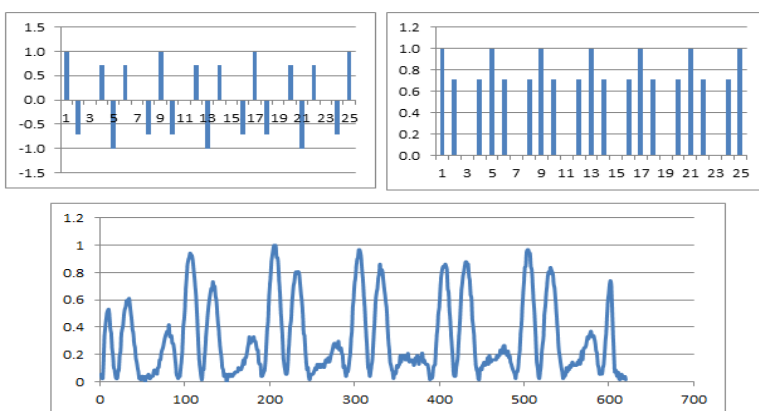
شکل ۸. میدان الکتریکی در مد $\frac{\pi}{4}$ ، بالا چپ- الگوی ایده‌ال میدان، بالا راست- ایده‌ال اندازه میدان و پایین- اندازه‌گیری پروفایل اندازه میدان الکتریکی.



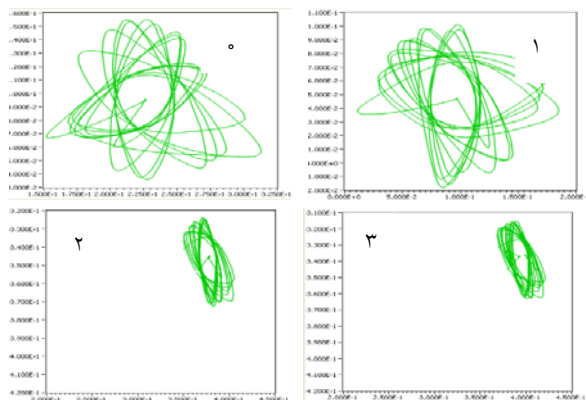
شکل ۹. میدان الکتریکی در مد $\frac{\pi}{3}$ ، بالا چپ- الگوی ایده‌ال میدان، بالا راست- ایده‌ال اندازه میدان و پایین- اندازه‌گیری پروفایل اندازه میدان الکتریکی.



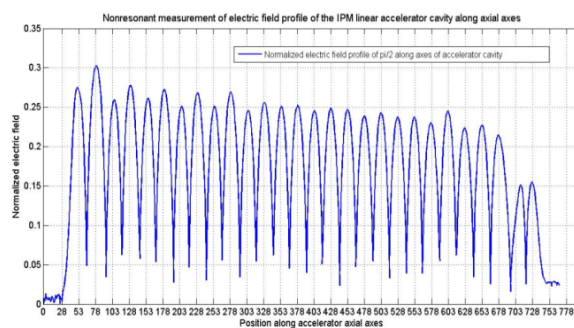
شکل ۱۰. میدان الکتریکی در مد $\frac{2\pi}{3}$ ، بالا چپ- الگوی ایده‌ال میدان، بالا راست- ایده‌ال اندازه میدان و پایین- اندازه‌گیری پروفایل اندازه میدان الکتریکی.



شکل ۱۱. میدان الکتریکی در مد $\frac{3\pi}{4}$ ، بالا چپ- الگوی ایده‌ال میدان، بالا راست- ایده‌ال اندازه میدان و پایین- اندازه‌گیری پروفایل اندازه میدان الکتریکی.



شکل ۱۳. شکل فاز موج RF ورودی در پیش و حین مراحل تنظیم.



شکل ۱۲. پروفایل میدان الکتریکی به دست آمده از روش استیل در پیش و حین مراحل تنظیم.

خوبی مشاهده می‌شود که پیشروی فاز میان کاواک‌ها در پیش از تنظیم نامناسب است. پس از هر مرحله تنظیم این پیشروی به

از تنظیم و در حین مراحل تنظیم بر حسب جمله موهومی و حقیقی بازتاب موج در بسامد مورد نظر را نشان می‌دهد. به

بر اساس نتیجه این مقاله و قطعات ساخته شده در عمل، ساخت و اندازه‌گیری هر تیوب شتاب‌دهی موج رونده با استفاده از روش انقباضی به راحتی قابل انجام است. نتایج این پژوهش در اندازه‌گیری قسمت خوشه‌ساز و دو تیوب اصلی شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی به کار گرفته خواهد شد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از مساعدت مدیر و همکاران محترم پژوهشکده ذرات و شتابگرها پژوهشگاه دانش‌های بنیادی و نیز از آقایان مهندس بهرامی و مهندس یداللهی نهایت تشکر را دارند.

صورت بیضی‌وار یعنی همان پیشروی نهایی ۹۰ درجه نزدیک می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

نتیجه به دست آمده برای انحراف معیار بسامد کاواک‌ها در مد $\pi/2$ و نیز ضریب کیفیت تیوب به ترتیب $1/8$ مگاهرتز و 11200 به دست آمده است، که دستیابی به مقادیر مطلوب طراحی برای این دو کمیت را نشان می‌دهد.

میزان اختلاف بسامد به دست آمده برای هر کاواک نیز ناشی از فشار قرص‌ها به دیواره تیوب شتاب‌دهی و خطاهای محتمل در ساخت آنهاست. این مقدار اختلاف طبیعی بوده و با تعبیه سوراخ‌های تنظیم مناسب برای هر کاواک قابل جبران است.

مراجع

- MOP022, (2010).
9. D Alesini *et al.*, *journal of JINST*, **8**(3), (2013) P10010
10. M R Khalvati and S Ramberger, *PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS*, **19**, (2016) 042001.
۱۱. س ناظمی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۶).
۱۲. ف قاسمی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۸).
13. F Ghasemi, F Abbasi Davani, M Lamehi Rachti, and H Shaker, S Ahmadiannamin, *Journal NIM-A*, **772**, (2014) 52.
1. S Biedron *et al.*, *Proceedings of IPAC2012*, ISBN 978-3-95450-115-1 2164, WEIC06, (2012).
2. L C Maier Jr and J C Slater, *Journal of Applied Physics*, **23** (1), (1952), 78.
3. L C Maier Jr, J C Slater, *Journal of Applied Physics*, **23** (1), (1952), 68.
4. L F Chen, C K Ong, C P Neo, and V V Varadan, John Wiley & Sons publisher, *Microwave electronics: measurement and materials characterization* (2004).
5. A Labanc, *TESLA Report DESY*, 2008, 01 (2008).
6. R G Carter, *IEEE Transactions on*, **49**(5), (2001) 918.
7. J Shi, A Grudiev, and W Wuensch, *Journal NIM-A*, **704**, (2013) 14.
8. A Grudiev, A Olyunin, J Shi, and W Wuensch, *Proceedings of Linear Accelerator Conference*,