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

بررسی روش‌های ساخت کاواک‌های شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون و پیاده‌سازی روش مناسب برای پروژهٔ شتاب‌دهندهٔ خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

فرشاد قاسمی[۱]، فریدون عباسی دوانی[۱]، محمد لامعی رشتی[۲] و ساسان احمدیان نمینی[۱]

۱. گروه کاربرد پرتوها، دانشکدهٔ مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی
۲. پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

پست الکترونیکی: FAbbasi@sbu.ac.ir

چکیده

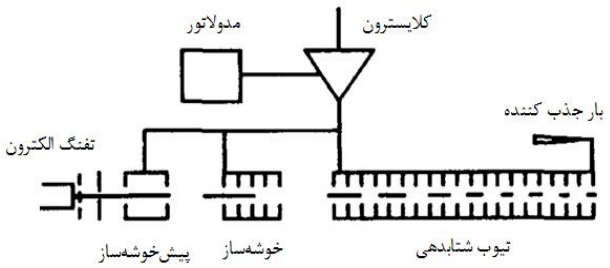
هدف پروژهٔ شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طراحی شتاب‌دهنده‌ای است که تا حد ممکن اجزای مختلف آن در ایران ساخته شود.این شتاب‌دهنده از نوع موج رونده است. بررسی انجام گرفته نشان می‌دهد که انواع روش‌های شکل‌دهی و اتصال در ساخت کاواک‌های تیوب شتاب‌دهی وجود دارند. انتخاب روش انقباض در ساخت تیوب شتاب‌دهی پروژهٔ موردنظر با الگو برداری از شتاب‌دهنده مارک ۳ در دانشگاه استنفورد بوده است. با موفقیت در ساخت آزمایشی تیوب با تعداد ۸ کاواک و یافتن مشکلات این روش، ساخت تیوب شتاب‌دهی نهایی با تعداد ۲۴ کاواک انجام شد. نتیجهٔ ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد که بسامد ۲۹۹۶/۵ مگاهرتز و ضریب کیفیت ۱۱۲۰۰ از تیوب ساخته شده به دست آمده که مقادیر مطلوب در طراحی را تامین می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون، بسامد تشدید، ضریب کیفیت، روش انقباضی

۱. مقدمه

محدودیت‌های شتابگرهای الکتروستاتیکی و بزرگ‌شدن بیش از حد مولدهای ولتاژ بالا باعث شد که توجه پژوهشگران به روش دیگری برای شتاب‌دادن به ذرات جلب شود. استفاده از امواج الکترومغناطیسی و هدایت آن به درون کاواک‌های فلزی و ایجاد میدان الکتریکی قوی که ذرات باردار بتوانند انرژی لازم را از آن کسب نمایند، مشکل را برطرف کرد. شتابگرهای زیادی در نقاط مختلف جهان بر این اساس ساخته شده‌اند. در واقع با شفاف‌سازی مبحث میدان‌های الکترومغناطیسی به‌وسیله ماکسول، بسیاری از فیزیک‌دانان به این فکر افتادند که ذرات می‌توانند به‌وسیله میدان‌های ناشی از امواج الکترومغناطیسی شتاب گیرند. اما پیاده‌سازی عملی این ایده مدتی بعد از ارائهٔ نظری آن صورت گرفت. طراحی و ساخت اولین شتاب‌دهندهٔ خطی مربوط به سال ۱۹۲۴ است[۱] .امروزه شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون کاربرد فراوانی در مقاصد صنعتی، پزشکی و تحقیقاتی دارند [۲].

با توجه به کاربرد گستردهٔ شتاب‌دهنده‌ها در سال‌های اخیر در ایران تلاش‌هایی برای طراحی و ساخت انواع مختلف شتاب‌دهنده‌ها آغاز شده است. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی با



شکل ۱. شمایی از شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون.

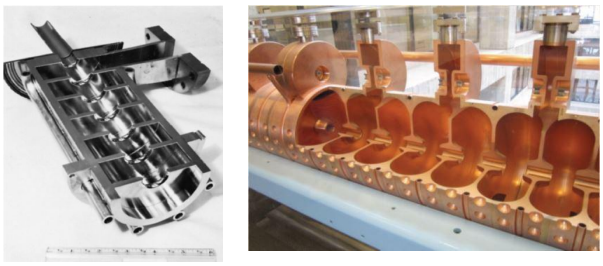
انجام دو پروژهٔ طراحی و ساخت شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون و شتاب‌دهنده تابش سینکروترونی در این زمینه پیشرو است. در این پژوهشگاه هدف پروژهٔ شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون، با توجه به نیاز ایران به گسترش این شتاب‌دهنده در کاربردهای پرتودرمانی، تصویربرداری محموله‌ها و تحقیقاتی، طراحی شتاب‌دهنده‌ای است که تا حد ممکن اجزای مختلف آن در ایران ساخته شود. طراحی و ساخت این شتاب‌دهنده با انرژی ۱۵ مگا الکترون ولت بر اساس کلایسترونی است که در ایران ساخته می‌شود و توان بیشینه نامی آن ۲/۵ مگا وات است.

شکل ۱ شمایی از شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون را نشان می‌دهد. قسمت های اصلی این شتاب‌دهنده عبارتند از [۳]:

۱- سیستم منبع تغذیهٔ RF: سیستم RF یکی از زیر مجموعه های اصلی شتاب‌دهنده است که از قسمت های مختلفی تشکیل شده است. از آنجا که تولید مطلوب امواج الکترومغناطیسی نیازمند توان RF بسیار بالا (در حد چندین مگا وات) است، این توان به صورت پالس‌های با پهنای کم، در حد چند میکرو ثانیه تولید و به وسیله تقویت کننده‌های لامپی ریزموج با توان بالا (مانند کلایسترون) تقویت می‌شوند. لامپ ریزموج به پالس‌های با ولتاژ و جریان بالا نیاز دارد که به‌وسیله مدولاتور پالسِ توان بالا تولید می‌شود. از رایج ترین مولدهای توان RF می‌توان به کلایسترون، مگنترون و توایسترون اشاره کرد.

۲- تفنگ الکترون و پیش‌خوشه‌ساز[۱]: این قسمت‌ها وظایف زیر را برعهده دارند: الف) تولید و شتاب اولیهٔ باریکهٔ الکترون و ب) دسته دسته کردن اولیهٔ الکترون‌ها توسط کاواک‌های پیش‌خوشه‌ساز.

۱. Pre-buncher

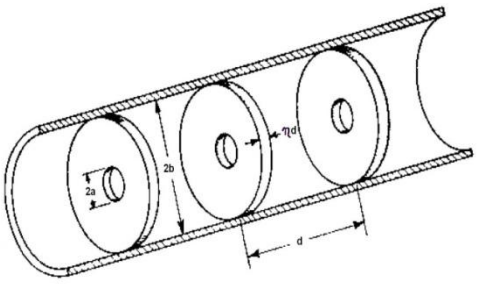


شکل ۲. تیوب شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون: (سمت راست) موج ایستا کوپل جانبی و (سمت چپ) موج روندهٔ امپدانس ثابت [۴].

۳- خوشه‌ساز و تیوب شتاب‌دهی: این قسمت‌ها که اصلی‌ترین بخش شتاب‌دهی‌اند، یک خط انتقال موج RF می باشند و از مجموعه‌ای از کاواک‌ها تشکیل شده‌اند.توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی در این خطوط انتقال (کاواک‌های شتاب‌دهی،) از قوانین ماکسول تبعیت می‌کند. شتاب دادن و دسته دسته کردن الکترون‌ها در خوشه‌ساز و شتاب دادن به الکترون‌ها در تیوب شتاب‌دهی وظیفهٔ این قسمت است.

بر اساس انواع ساختار تیوب شتاب‌دهی، دو نوع شتاب‌دهنده خطی الکترون وجود دارد که عبارتند از: شتاب‌دهندهٔ موج رونده و شتاب‌دهندهٔ موج ایستا. هرکدام از این دو نوع دارای مزایا و معایبی هستند. در شتاب‌دهنده موج رونده، موج الکترومغناطیسی تنها در یک جهت حرکت می‌کند. در حالی که در نوع موج ایستا، میدان الکتریکی حاصل موج الکترومغناطیسی رفت و برگشت است[۳].

در هر دو نوع شتاب‌دهنده، تیوب شتاب‌دهی از مجموعه‌ای از کاواک‌های به هم پیوسته تشکیل شده است. انرژی الکترومغناطیسی در هر کاواک منفرد به طور سینوسی در فرکانسی برابر فرکانس تشدید شتاب‌دهنده نوسان می‌کند. بازدهی انتقال توان RF ورودی به انرژی الکترون عبوری از شکاف‌ها در شتاب‌دهنده‌های نوع موج ایستا دو برابر شتاب‌دهنده‌های نوع موج رونده است [۳]. شکل ۲ تیوب شتاب‌دهی این دو ساختار را نشان می‌دهد. ساختار کوپل محوری و کوپل جانبی انواع شتاب‌دهنده‌های موج ایستا و ساختارهای امپدانس ثابت و گرادیان ثابت انواع شتاب‌دهنده‌های موج رونده‌اند. از انواع شتاب‌دهندهٔ خطی، شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون از نوع موج



شکل ۳. ابعاد کاواک [۶].

روندهٔ امپدانس ثابت، نوع مورد نظر پروژهٔ پژوهشگاه دانش‌های بنیادی است. در بخش‌های بعدی مقاله، پس از توضیح روش به دست آوردن ابعاد کاواک‌های تیوب اصلی نوع موج‌رونده موردنظر، روند بکار رفته در انتخاب و استفاده از روش انقباضی[1] در ساخت تیوب اصلی این شتاب‌دهنده و نتایج به دست آمده از آن‌ها آورده شده است.

۲. روش تحقیق

درابتدای ساخت تیوب اصلی شتاب‌دهنده خطی الکترون لازم است تا محاسبات و شبیه‌سازی لازم برای به دست آورن ابعاد، انجام پذیرد. پس از یافتن ابعاد مناسب، باید با دقیق‌ترین روش‌ها به ساخت آن و در نهایت آزمون تیوب نهایی پرداخت.

۱.۲. به دست آوردن ابعاد تیوب اصلی شتاب‌دهندهٔ موج رونده

اصول عملکرد شتاب‌دهنده‌های خطی بر اساس موج‌برهای بارگذاری شده با صفحه می‌باشد. به طور کلی بحث موج برها و تشدید کننده‌های حفره‌ای برای بسامدهای UHF(۳۰۰ MHz تا ۳ GHz) و بالاتر مطرح می‌شود. از این رو شتاب‌دهنده‌های خطی گوناگونی با ابعاد کوچک و بزرگ در سرتاسر دنیا وجود دارند. ابعاد کاواک‌ها متناسب با طول موج فرکانس کاری سیستم است. در این میان باند s فرکانس بین (۲۵۰۰–۳۵۰۰MHz) دارای طول موجی بین (۱۲ cm–۸/۵) است که ساخت کاواک‌ها با این ابعاد به راحتی امکان پذیر است. با توجه به رابطهٔ طول موج و فرکانس که عبارت است از

جدول ۱. ابعاد به دست آمده برای بسامد مورد نظر [۸].

a(cm)	b(cm)	d(cm)	ηd(cm)
۱	۳/۹۲۵	۲/۵	۰/۵

$\lambda = \frac{c}{f}$، که در آن c سرعت نور و برابر با ۲/۹۹۸ ×۱۰^۸ m/s می‌باشد، استانداردی جهانی برای ساخت لامپ‌های ریزموج (کلایسترون‌ها) در گستره فرکانسی فوق و در بسامد ۲۹۹۷/۹ MHz وجود دارد زیرا طول موج این فرکانس دقیقاً برابر ۱۰ cmمی باشد [۵].

پهنای باند لامپ کلایسترون ساخته شده در ایران که مدل ۳۷K می‌باشد نیز این بسامد را در بر می‌گیرد. لذا این فرکانس برای کاواک‌ها انتخاب شده و لازم است که ابعاد لازم برای تنظیم مد کاری ۹۰ درجه در این بسامد را به دست آوریم. ابعاد اصلی کاواک در شکل ۳ مشخص شده است. با در نظر گرفتن تمامی ملاحظات و استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل میدان HFSS و SUPERFISH ابعاد نهایی کاواک‌ها مطابق جدول۱ به دست آمده است. اطلاعات بیشتر در زمینهٔ طراحی ابعاد به دست آمده در مراجع ٦ و ۷ وجود دارد.

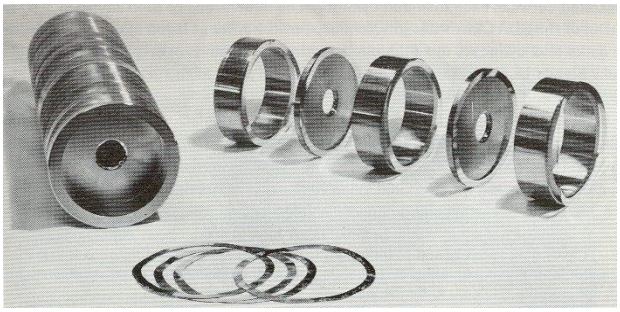
دو پارامتر ضریب کیفیت و بسامد تشدید مواردی هستند که در طراحی تیوب شتابگر باید مدنظر قرار گیرند. همان‌گونه که اشاره شد، بسامد تشدید مورد نظر حدود ۲۹۹۸ مگاهرتز می‌باشد که طراحی ابعاد برای حصول آن صورت گرفته است.

ضریب کیفیت برای یک کاواک تشدید نسبت انرژی ذخیره شده در کاواک به انرژی تلف شده در دیواره‌ها می‌باشد [۳]. بزرگتر بودن این کمیت مدنظر است. مقدار مطلوب این کمیت در شتاب‌دهندهٔ مورد نظر، که به دقت ساخت، جنس مناسب و روش ساخت بستگی دارد، رسیدن به ۱۰۰۰۰ است.

۳. انتخاب مواد و روش‌های ساخت

مواد، تکنیک‌های اتصال، روش‌های ساخت و روش‌های مختلف سرد کردن که در ساخت کاواک‌های RF برای شتاب‌دهنده‌های ذره با انرژی بالا استفاده می‌شود، در مراجع [۹] و [۱۰] آمده است. در این مرجع، فرآیندها با استفاده از

۱. Shrinking Method



شکل ۳. استفاده از روش لحیم کاری (بریزینگ) در ساخت تیوب شتاب‌دهی در [۱SLAC].

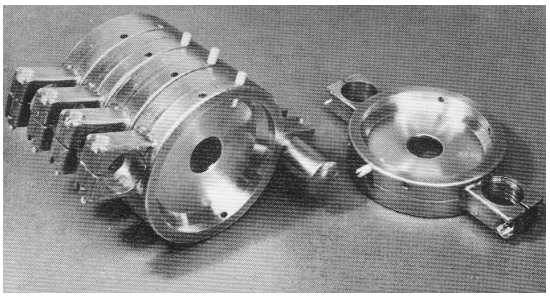
مثال‌هایی که از شتاب‌دهنده‌های امروزی اخذ شده است توضیح داده شده‌اند. خواص مهم مواد که انتخاب آن‌ها در ساخت کاواک‌ها، موثرند عبارتند از: هدایت الکتریکی، هدایت گرمایی، سختی مکانیکی، نرخ خروج گاز در خلاء، ضریب گسیل ثانوی سطح، قابلیت شکل‌گیری یا ماشین‌کاری، قابلیت جوشکاری یا لحیم‌کاری، قیمت، مقاومت مکانیکی در مقابل خزش و خستگی مکانیکی.

با توجه به ویژگی های مورد نظر در ساخت کاواک‌ها و عملکرد RF و بررسی‌های انجام شده، فلز پیشنهادی برای ساخت کاواک، مس(OFHC[۱]) است. در صورت عدم دسترسی به آن و محدودیت های دیگر و سهولت در مراحل ساخت نمونه، می‌توان از آلیاژ مس – سلنیوم، با ۹۹/۴٪ مس و ۰/۶٪ سلنیوم نیز استفاده نمود[۷].

روش‌های مختلفی برای ساخت چنین قطعاتی وجود دارند. اما در هر یک از آن‌ها باید به دقت بالا در ساخت و توانایی پرداخت سطح و صیقلی کردن[۲] آن توجه شود. روش‌های ساخت را می توان به دو روش شکل دادن و اتصال، تقسیم کرد [۹]. روش های شکل دادن عبارتند از: ماشین کاری، غلطک کاری، پتک‌کاری، شکل دادن چرخشی، پرسکاری و کشیدن عمقی، شکل دادن هیدرولیک، آبکاری الکتریکی، شکل دادن الکتریکی یا قالب‌گیری برقی، اتم پاشی فلزی و شکل دادن انفجاری. و روش های اتصال عبارتند از: لحیم کاری، اتصال از طریق دیفیوژن، اتصال از طریق آبکاری الکتریکی، جوشکاری با

۱. Oxygen free high conductivity

۲. Polish



شکل ۴. ساخت کاواک‌ها به صورت حلقه و صفحهٔ مجزا [۱].

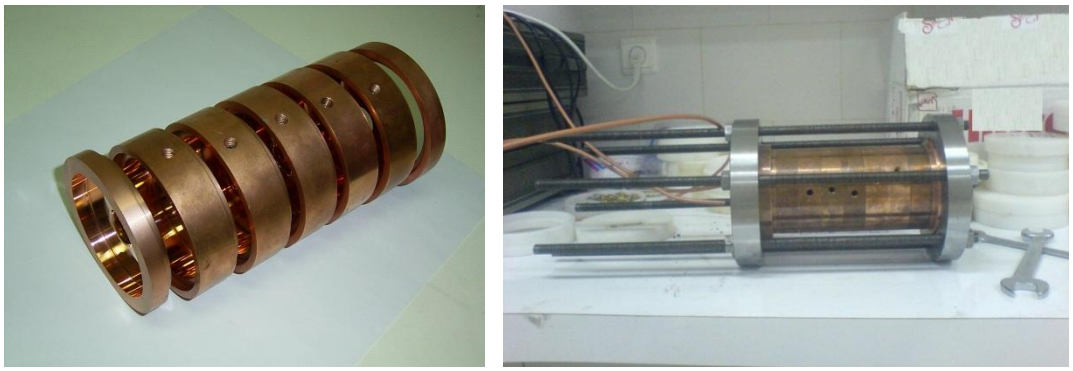
باریکهٔ الکترون (EB)، جوش کاری قوسی گاز بی اثر و روش انقباضی. از میان این روش‌ها، رایج‌ترین روش که امروزه در بیشتر شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون در باندهای X، C و S از آن استفاده می‌شود، روش لحیم‌کاری (بریزینگ[۳]) است. در این روش کاواک‌ها به صورت رینگ و صفحه و یا یک کاواک کامل ماشین‌کاری و صیقلی شده سپس با استفاده از فیلرهای از جنس آلیاژ نقره در کوره‌های دما بالا، به هم جوش می‌خورند (شکل ۳).

روش لحیم‌کاری مستلزم در اختیار داشتن کوره‌های بزرگ تحت خلاء و یا تحت گاز هیدروژن است. لذا با توجه به امکانات موجود، در روند ساخت تیوب شتاب‌دهی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی از میان انواع روش‌ها، دو روش ماشین‌کاری (ساخت کاواک‌ها به صورت حلقه و صفحه مجزا) و روش انقباض (ساخت کاواک‌ها به صورت یکپارچه) مورد توجه قرار گرفته‌اند.

۱.۳. استفاده از روش ماشین‌کاری و ساخت کاواک‌ها به صورت مجزا

یک روش ساده برای تحقق عملی و ساخت کاواک طراحی شده، استفاده ساختار متشکل از حلقه و صفحه مجزاست. در این روش، مجموعه کاواک‌ها از کنار هم قرار گرفتن صفحه‌ها و حلقه‌ها (که به طور جداگانه ماشین‌کاری شده‌اند،) تشکیل می‌شوند. این در حالی است که سطح صفحه‌ها و سطح داخلی حلقه‌ها از صافی سطح مناسب و صیقلی برخوردارند. شکل ۴ کاواک‌های ساخته شده برای شتاب‌دهندهٔ خطی CSF با این

۳. Brazing



شکل ۵. قطعات ساخته شدهٔ کاواک‌های موردنظر و نحوهٔ قرار دادن قطعات در کنار هم.

روش را نشان می‌دهد [۱].

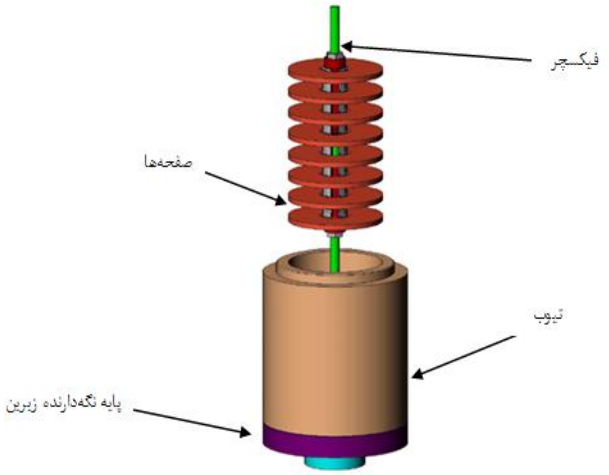
در این روش پس از کنار هم قرار گرفتن قطعات، لازم است تا با ابزاری مناسب (همچون استفاده از صفحات نگه دارنده و پیچ و مهره،) تا حد ممکن، قطعات را به هم نزدیک کرد تا کمترین فاصله در محل اتصال قطعات به دست آید. شکل ۵ قطعات ساخته شده کاواک‌های شتاب‌دهندهٔ مورد نظر این مقاله و نحوه قرار دادن قطعات در کنار هم و ابزار طراحی و ساخته شده برای اعمال فشار و کم کردن فواصل بین قطعات در این روش را نشان می دهد. برای کسب اطلاعات بیشتر از جزئیات ساخت کاواک‌ها با این روش می توان به مرجع [۱۱] رجوع کرد. اضافه می‌شود که، دقت دستگاه‌های مورد استفاده در ساخت قطعات به حدی باید باشد که میزان خطا در کلیه ابعاد کمتر از mm ۰/۰۲± شود.

۲.۳. استفاده از روش انقباض و ساخت کاواک‌ها به صورت یکپارچه

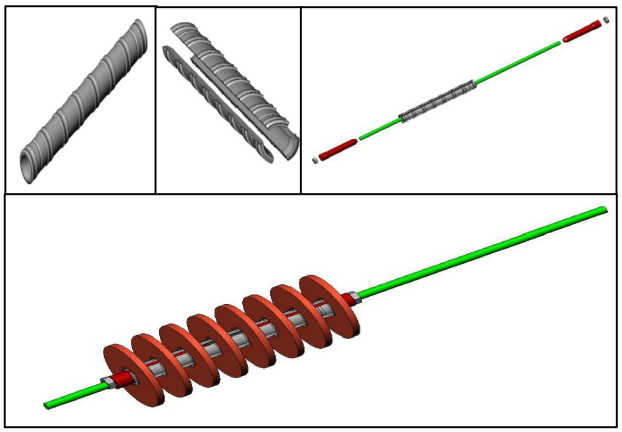
در این روش به جای وصل کردن رینگ و صفحه‌های مجزا، از سرد کردن صفحه‌ها در دمای ازت مایع استفاده می‌شود. در این روش صفحه‌ها درون قطعه تیوب استوانه‌ای شکل که داخل آن با ماشین CNC تراش خورده و با اعمال دقت لازم در تراشکاری به اندازهٔ مورد نظر تهیه شده و سپس صیقلی شده است، قرار می‌گیرند. برای پیاده‌سازی این روش که در واقع الگو گرفته از ساخت کاواک‌های شتاب‌دهندهٔ مارک۳ در آزمایشگاه دانشگاه استفورد است، ساخت کاواک‌ها از تعداد کم شروع و پس از تمرین روش ساخت، نمونه‌های نهایی به دست آمده‌اند. در دانشگاه استنفورد برای ساخت حدود ۱۰۰ تیوب شتاب‌دهی که هر یک متشکل از ۱۸ کاواک بوده‌اند از این روش استفاده شده است[۱۲]. به این منظور صفحه‌های کاواک‌ها را که دارای قطر بزرگتری از قطر داخلی لوله استوانه‌ای هستند، در دمای ازت مایع (تقریباً ۱۹۵- سانتی‌گراد) سرد می‌کنیم. سرد شدن صفحه‌ها در دمای ازت مایع باعث انقباض آن‌ها و کوچکتر شدن آن‌ها می‌شود. پس از صرف زمان مناسب، مجموعه تقریباً هم دما شده و صفحه‌ها که در داخل لوله قرار گرفته‌اند به دیواره فشار آورده و در جای خود ثابت می‌مانند. مزیت اصلی روش جدید بکار برده شده، برخلاف روش مجزا، نداشتن شکاف میان صفحه‌ها و حلقه‌های میان آن‌هاست. علاوه بر آن ایجاد خلاء در تیوب شتاب‌دهنده نیز ساده‌تر می گردد و دیگر نیازی به محفظهٔ مجزا برای ایجاد خلاء نیست. تجربه به دست آمده در ساخت تیوب‌های با تعداد کاواک‌های ۳ و ۸ عدد نشان داد که در دمای معمول باید قطر دیسک‌ها۰/۰۳ میلی‌متر بزرگتر از قطر تیوب باشد. این مقدار در لحظه سردشدن ۰/۱میلی‌متر کوچکتر می‌گردد.

همان‌طورکه در شکل ۶ نشان داده شده است، مجموعهٔ آزمایش ساخت کاواک‌ها به این روش از چند قسمت تشکیل شده است. تیوب از یک لوله مسی تشکیل شده که برای نمونه‌های ابتدایی دو پله و در نمونه نهایی دو فلنج در ابتدا و انتهای آن قرار دارد. دیسک‌ها در واقع از صفحه‌ای با ابعاد جدول۱ مطابق با طراحی ساخته شده‌اند که وسط آن‌ها روزنه‌ای[۱] با قطر ۲۰ میلی‌متر وجود دارد. لبهٔ داخلی این روزنه

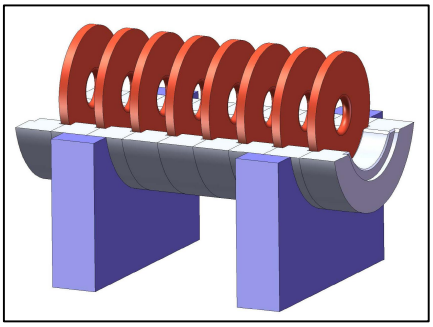
۱. Iris

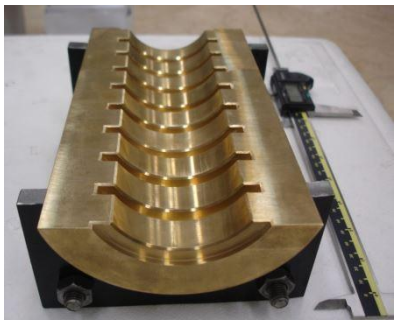


شکل ۶. چفت و بست حاوی صفحه‌ها به همراه تیوب.



شکل ۷. نحوهٔ طراحی و عملکرد چفت و بست در نگه‌داری دیسک‌ها.





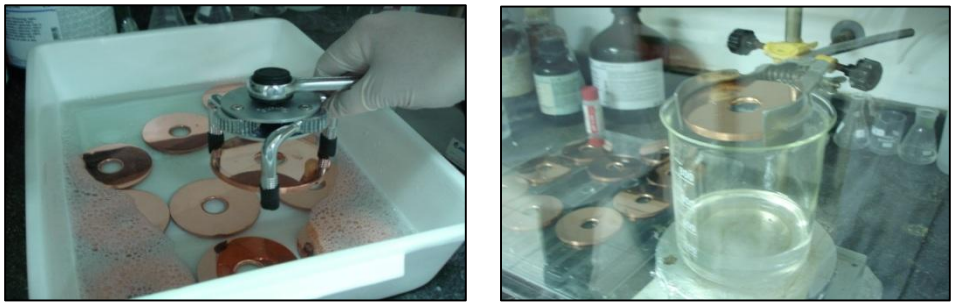
شکل ۸. نحوهٔ عملکرد پایهٔ نگه‌دارنده و نمونهٔ ساخته شده آن در عمل برای ۸ کاواک.

تخت نبوده و دارای انحنا می‌باشد. قسمت بعدی چفت و بست[۱] است که وظیفهٔ نگه‌داری صفحه‌ها در فاصله‌های مناسب و برابر از هم (۲/۵ cm) را بر عهده دارد. تا طی عملیات سرد کردن صفحه‌ها، آن‌ها را در فاصله‌های منظم در ازت مایع نگه دارد و پس از جایگذاری در لولهٔ اصلی و قرار گرفتن صفحه‌ها در جای خود باز شده و از سیستم جدا گردد. به منظور نگه‌داری صفحه‌ها در فواصل مناسب روی شیارهای نگه‌دارنده از یک پایه‌ی برنجی استفاده شده است. این پایه دارای ۸ شکاف است که هر کدام از شکاف‌ها در فاصله‌های مساوی از یکدیگر (برابر فاصله‌هایی که دیسک‌ها باید از یکدیگر قرار بگیرند،) قرار گرفته‌اند. قسمت‌های نگه دارنده زیرین وظیفه نگه‌داری و هدایت مجموعه را بر عهده دارند. برای این منظور از یک قطعه برنجی که دارای یک سوراخ است و در داخل قطعه استیل طراحی شده برای نگه‌داری آن قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. وظیفه این مجموعه این است که زیر تیوب اصلی قرار بگیرد تا مجموعه صفحه‌ها و نگه‌دارنده‌ها که در دمای ازت مایع سرد شده‌اند به راحتی و با دقت بالا به داخل تیوب هدایت شوند و نیز فاصلهٔ صفحه اول از انتهای لوله را تنظیم نماید.

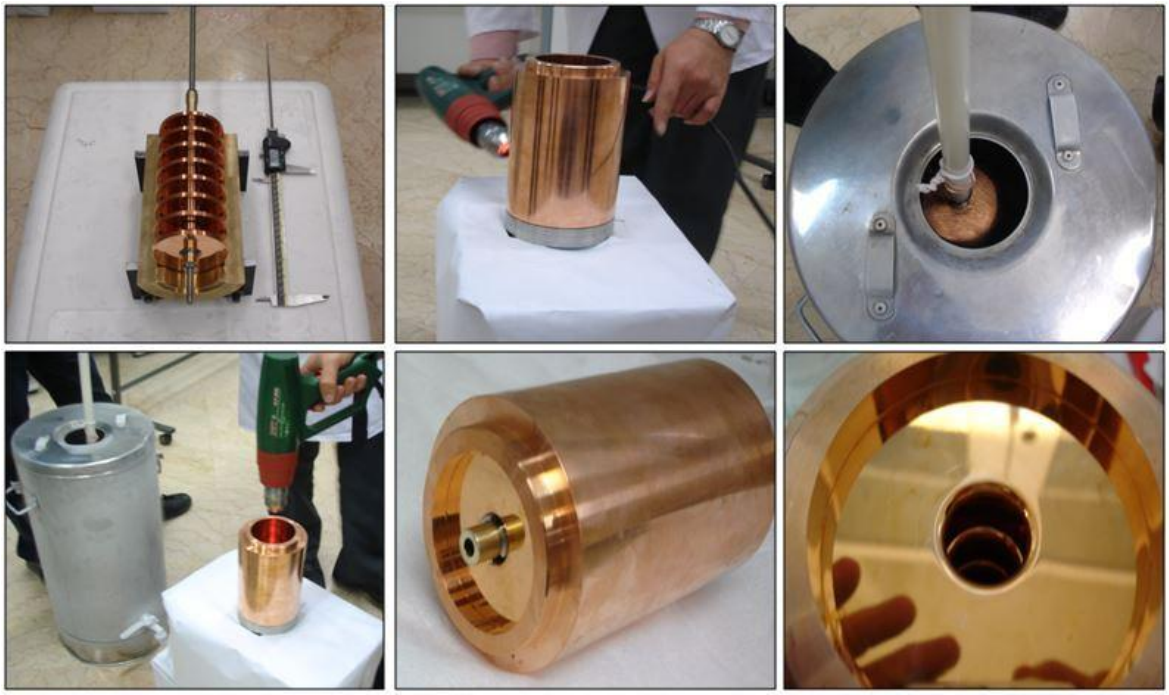
نحوهٔ طراحی و عملکرد نگه‌دارنده در نگه‌داری دیسک‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۸ نیز نحوه عملکرد پایهٔ نگه‌دارنده و نمونهٔ ساخته شده آن در عمل برای ۸ کاواک را نشان می‌دهد.

قبل از مونتاژ نهایی مجموعه لازم است تا تیوب و صفحه‌ها شستشو و چربی زدایی شوند. این کار طی فرایند خاص و با استفاده از آب مقطر و بخار تتراکلرید کربن انجام می‌شود. شکل ۹ این فرایند را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نیز نحوه سرد کردن دیسک‌ها و مونتاژ قطعات را برای تیوب با ۸ کاواک نشان می‌دهد.

۱. Fixture



شکل ۹. شستشوی قطعات و قرار دادن آن‌ها در معرض بخار تترا کلرید کربن جهت چربی زدایی.



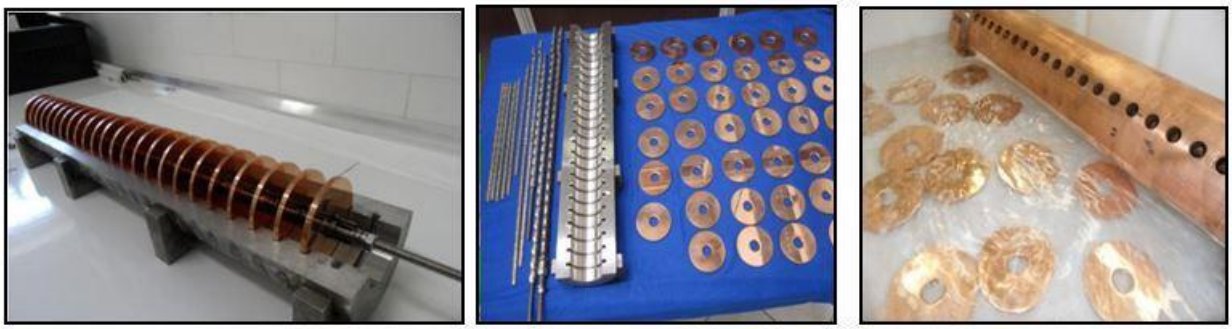
شکل ۱۰. نحوهٔ سرد کردن دیسک‌ها و مونتاژ قطعات برای تیوب با ۸ کاواک.

۴. مقایسهٔ نتایج دو روش و پیاده‌سازی ساخت تیوب نهایی

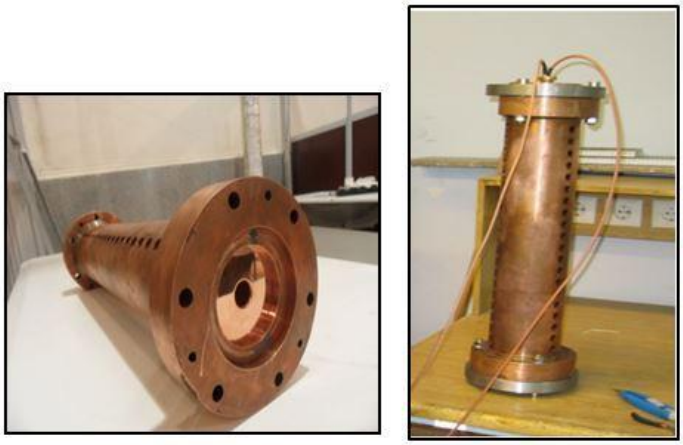
بسامدهای تشدید و اندازه ضریب کیفیت دو پارامتر مهم در ساخت تیوب شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون هستند. نزدیک‌تر بودن بسامد تشدید اندازه‌گیری شده از تیوب ساخته شده، با بسامدی که طراحی بر اساس آن صورت گرفته است، و بالاتر بودن ضریب کیفیت تیوب ساخته شده دو پارامتری هستند که در مقایسهٔ روش‌های ساخت مد نظر قرار می‌گیرند.

همان طور که اشاره شد دو روش ساخت ماشین‌کاری (رینگ و صفحه مجزا) و انقباض (کاواک یکپارچه) برای ساخت تیوب اولیه شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون مورد نظر با ۸ کاواک به‌کار برده شدند. نتایج ضریب کیفیت حاصل از دو ساختار برای نزدیک‌ترین بسامد به بسامد مد موردنظر برای روش ساخت مجزا مقدار ۸۰۹۲ و برای روش ساخت انقباضی ۹۴۱۵ را نتیجه داده است. در نتیجه، کاواک‌های ساخته شده با روش انقباض با وجود مشکل بودن ساخت و هزینهٔ بالاتر آن، ضمن مزیت سادگی در تأمین خلاء، از میزان ضریب کیفیت به‌مراتب بهتری نسبت به ساختار مجزا برخوردار است.

با تجربهٔ به دست آمده از ساخت کاواک‌های یکپارچه تیوب



شکل ۱۱. اجزای تیوب شتاب‌دهی با تعداد ۲۴ کاواک.



شکل ۱۲. تیوب ساخته شده پس از مرحله مونتاژ.

با تعداد ۸ کاواک و نیز با توجه به دقت ساخت مناسب در کشور، استفاده از این روش ساخت برای ساخت نهایی دو تیوب شتاب‌دهندهٔ با طول ۶۰cm با تعداد ۲۴ کاواک و نیز خوشه‌ساز این شتاب‌دهندهٔ با طول ۳۰ سانتیمتر با تعداد ۱۵ کاواک مورد توجه قرار گرفت.

با توجه به پیچیده‌تر شدن فرایند مونتاژ برای ۲۴ کاواک، ابتدا مونتاژ بر روی نمونه پلی‌اتیلنی در دستور کار قرار گرفت. پس از موفقیت آمیز بودن آزمایش، ساخت تیوب اصلی شتاب‌دهنده با این روش انجام شد. اجزای یک تیوب شتاب‌دهی مورد نظر قبل از مرحلهٔ مونتاژ در شکل ۱۱ و تیوب ساخته شده پس از مرحلهٔ مونتاژ در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

تیوب شتاب‌دهی از بخش‌های اصلی شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون است. بر اساس انواع ساختارهای تیوب شتاب‌دهی، انواع موج ایستا و موج رونده از این شتاب‌دهنده پرکاربرد وجود دارند. ساختار پروژهٔ شتاب‌دهندهٔ خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی از نوع موج رونده است.در طراحی صورت گرفته برای این شتاب‌دهنده، استفاده از مد $\pi/2$ در بسامد ۲۹۹۸ و رسیدن به ضریب کیفیت بالای ۱۰۰۰۰ لحاظ شده است.

با توجه به ویژگی‌های مورد نظر در ساخت کاواک‌ها و بررسی‌های انجام شده، مس OFHC بهترین گزینه در ساخت کاواک‌های شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون است. در این پروژه از آلیاژ مس با خلوص مناسب و موجود در بازار ایران استفاده شده است.

از میان انواع روش‌های شکل‌دهی و اتصال، روش بریزینگ قطعات مناسب‌ترین و رایج‌ترین روش در ساخت کاواک‌های شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون است. به‌واسطهٔ محدودیت‌های موجود، در پروژهٔ ساخت شتاب‌دهندهٔ مورد نظر، با الگوبرداری از ساخت تیوب‌های شتاب‌دهندهٔ مارک ۳ در دانشگاه استنفورد،

ساخت تیوب‌های شتاب‌دهی به روش انقباضی مورد توجه قرار گرفت. در شتاب‌دهندهٔ مارک ۳ تعداد ۱۰۸ تیوب شتاب‌دهی که هر یک از ۱۸ کاواک تشکیل شده‌اند، از این روش ساخته شده‌اند. برای تیوب‌های پروژه پژوهشگاه دانش‌های بنیادی تعداد ۲۴ کاواک در نظر گرفته شده است. پیچیدگی روش و تعداد بیشتر کاواک‌ها نسبت به تجربه مارک ۳، تیم پروژه را در مرحله اول ناگزیر به ساخت تیوب‌های با تعداد کمتر و بررسی دقیقتر روش ساخت به این واسطه کرد.

پس از موفقیت آمیز بودن روش انتخابی در ساخت تیوب‌های با ۳ و ۸ کاواک و نیز ساخت آزمایشی تیوب ۲۴ کاواک با پلی‌اتیلن، ساخت تیوب شتاب‌دهی مسی نیز با موفقیت انجام شد. نتیجه به دست آمده برای بسامد مد مورد نظر و ضریب کیفیت تیوب با تعداد ۲۴ کاواک به ترتیب ۲۹۹۶/۵ مگاهرتز و ۱۱۲۰۰ است که دستیابی به مقادیر مطلوب طراحی برای این دو کمیت را نشان می‌دهد. بر اساس طراحی، دستیابی به ضریب کیفیت بالای ۱۰۰۰۰ و بسامد ۲۹۹۸ مورد نظر بوده است. میزان اختلاف بسامد به دست آمده نیز ناشی از فشار دیسک‌ها به دیواره تیوب شتاب‌دهی و کاهش بسامد تشدید است. این مقدار اختلاف طبیعی بوده و به‌وسیله سوراخ‌های تیون درنظر گرفته شده برای هر کاواک قابل جبران است. اندازه‌گیری دقیق پروفایل میدان با روش‌های اختلال و تیون نهایی تیوب‌های شتاب‌دهی قدم بعدی ساخت آن‌هاست.

مراجع

1. Pierre M Lapostolle and Albert L Septier "*Linear Accelerators*" North-Holland Publishing Company Amsterdam (1970).
2. Waldemar Scharf, "*Particle Accelerators And Their Uses*" Harwood Academic Publishing, London (1986).
3. C J Karzmark, "*Medical Linear Accelerator*", Department of Radiation Oncology, Stanford University School of Medicine, Medical Electron Accelerators, McGRAW hill- New York (1993).

۴. ساسان احمدیان، *"طراحی وشبیه‌سازی شتاب‌دهندهٔ موج ایستا برای کاربرد پزشکی"*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ مهندسی هسته‌ای (۱۳۹۱).

5. G Waldschmidt, J J Song, A Nassiri, R L Kustom, and Y W Kang, "*The Design and Fabrication of a Millimeter Wave Linear Accelerator*" Argonne National Laboratory, Advanced Photon Source (1997).

۶. سیامک ناظمی و همکاران، *مجلهٔ علوم و فنون هسته‌ای*، **۴**، ۵۰ (۱۳۸۸).

۷. فرشاد قاسمی، *"طراحی و شبیه‌سازی خوشه‌ساز شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون"* پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ مهندسی هسته‌ای (۱۳۸۹).

8. S H Shaker, F Ghasemi "*Design of a Pi/2 Mode S-Band Low Energy TW Electron Linear Accelerator/MOPC009*" Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain (2011).
9. I Wilson, "*Cavity Construction Techniques*" Technical Report, CERN, Geneva, (2005).
10. E Jensen, Fabrication and testing of RF structures (LEC5),Technical Report, CERN, (2003)

۱۱. سیامک ناظمی، *"طراحی و ساخت کاواک شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای (۱۳۸۷).

12. M Chodorow, E L Ginzton, W Hansen, L Kyhl, B Neal, and W K H Panofsk Stanford High-Energy Linear Electron Accelerator (Mark III), "*The review of Scientific Instrument*" **26**, 2 (1955).