مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شمارهٔ ۲، ویژه‌نامه، ۱۳۹۶
مقاله نامهٔ دومین کنفرانس ملی شتاب دهنده‌ها و کاربرد آنها، آذر ۱۳۹۴

ساخت و اندازه‌گیری مشخصات یک تیوب شتاب دهندهٔ خطی باند X

حسین فرهنگ، محمد فرهمندزاد، محمد برده‌گر، جلیل گودرزی و احمدرضا محمد

شرکت گسترش کاربرد باریکهٔ الکترون

پست الکترونیکی: microwave@ebad-group.ir

چکیده

نظر به چالش‌های موجود در بحث ساخت و اندازه‌گیری مشخصات الکترومغناطیسی تیوب شتاب دهنده، در این مقاله ابتدا ملاحظات ساخت کاواک‌ها شامل چهار پارامتر اصلی جنس کاواک، انطباق ابعادی، صافی سطح و هم محوری کاواک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با در نظر گرفتن ملاحظات مشخصات الکترومغناطیسی، نتایج ساخت کاواک‌ها به همراه روش اندازه‌گیری بسامد تشدید و ضریب کیفیت آن ارائه شده است. در گام بعدی با طراحی ساختارهای نگهدارنده، تست‌های نظیر پیستون اتصال کوتاه جهت اطمینان از بسامد تشدید صورت گرفته است. در گام نهایی نیز بعد از لحیم‌کاری کاواک‌ها تست کشش گوی جهت اندازه‌گیری و تنظیم نهایی شکل میدان صورت گرفته است.

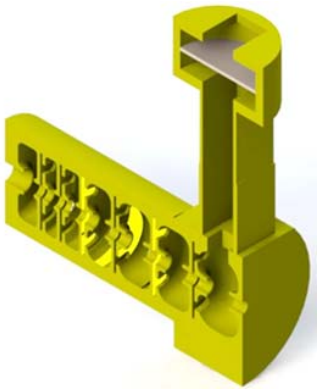
واژه‌های کلیدی: ساخت، کاواک باند X، کشش گوی، شتاب دهندهٔ خطی

۱. مقدمه

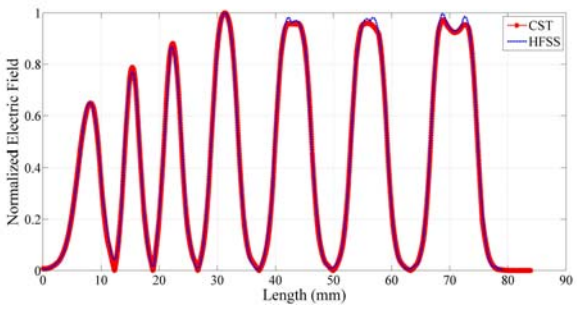
طراحی و ساخت شتاب دهنده از آن نظر که نیازمند تحقق مشخصات مکانیکی و الکترومغناطیسی به طور توأمان است از چالش‌های خاصی برخوردار است. به طوری که مشخصاتی نظیر دقت ابعادی در حد چند میکرومتر و یا صافی سطح المان‌ها می‌تواند مشخصات الکترومغناطیسی سیستم را به طور کل مخدوش کند و تحقق شرایط خلأ و مشخصات الکترومغناطیسی، فرایند لحیم‌کاری بسیار دقیقی را برای کاواک‌ها می‌طلبد. به همین جهت تعریف فرایند کامل ساخت و اندازه‌گیری مشخصات حائز اهمیت است. در این فرایند به طور خاص باید بعد از هر مرحله مشخصات الکترومغناطیسی ساختار بررسی شود تا فرایند مرحلهٔ قبل از نظر دقت و کیفیت در محدوده مجاز قرار گیرد. به همین جهت ابتدا خلاصه‌ای از فرایند طراحی مکانیکی کاواک‌ها نظر به ملزومات بحث لحیم‌کاری و مشخصات الکترومغناطیسی، ارائه شده و سپس نمونه‌هایی ساخته شده و مشخصات مکانیکی آنها گزارش می‌شود. در بخش دوم خلاصه‌ای از نتایج اندازه‌گیری بسامد تشدید و ضریب کیفیت کاواک‌ها به دو روش ارائه می‌شود. در گام نهایی نیز شکل میدان‌های داخل تیوب به روش کشش گوی اندازه‌گیری می‌شود و روند تنظیم کردن آن به صورت خلاصه بحث می‌شود.

۲. ساخت کاواک‌ها

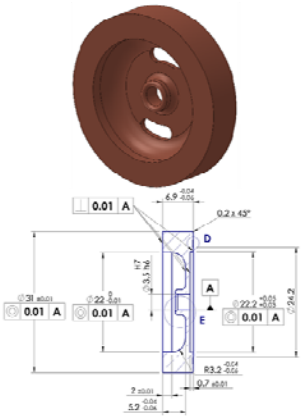
CAD/CAM فازها و مراحلی از طراحی تا ساخت و تولید



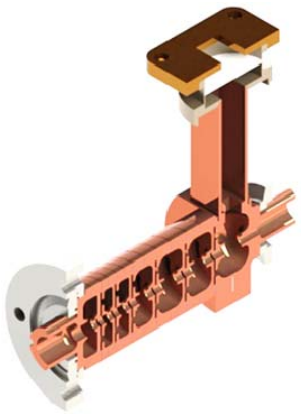
شکل ۱. ساختار طراحی شده شتاب دهندهٔ باند X.



شکل ۲. میدان‌های الکتریکی روی محور شتاب دهنده.



شکل ۳. نمونه ای از نقشهٔ فرایند ماشینکاری یک کاواک.



شکل ۴. طرح نهایی ساخت کاواک‌ها و نیم برش آن [۳].

قطعات را مورد پوشش خود قرار می‌دهد. در یک سیستم مطلوب CAD/CAM امکان دسترسی به اطلاعات و مشخصه‌های طرح‌های قبلی و اعمال تغییر و اصلاح آنها برای تولید قطعات جدید وجود دارد. همچنین برنامه های ماشینکاری و سایر فرامین کنترل لازم به صورت خودکار استخراج شده و توسط اجزای ارتباطی، مستقیماً به ایستگاه‌های کاری و یا تجهیزات کنترل عددی ارسال می‌گردد. در فرایند تولید کاواک‌ها، ارتباط بین گروهی از واحدهای طراحی تا ساخت به کار گرفته می‌شود.

طراحی‌های انجام شده در دپارتمان مخابرات [۱] منتج به ساختاری اولیه با تمهیدات الکترودینامیکی شده است. این طرح شامل ۷ کاواک می‌شود که جریان تفنگ الکترونی ۱۶ keV را با بازدهی دریافت ۲۰٪ به انرژی ۵۰۰ keV می‌رساند. این شتاب دهنده قلهٔ توان ۵۰ kW RF را از یک مگنترون دریافت می‌کند. نمایی از ساختار کاواک طراحی شده در شکل ۱ آورده شده است و میدان الکتریکی روی محور آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

پس از اتمام فرایند طراحی ساختار، طرح جهت لحاظ کردن ملاحظات ساختی و همچنین استخراج ساختار نهایی از طرح اولیه، در اختیار دپارتمان مکانیک قرار گرفته است. پس از اعمال محدودیت‌ها و در نظر گرفتن جوانب ساخت کاواک‌ها، طرح نهایی توسط نرم افزارهای نقشه‌کشی استخراج و نقشه‌های ساخت و مونتاژ مربوط به کلیه فرایندها تولید گردیده است (شکل ۳ و شکل ۴).

حاصل مطالعات و بررسی های مشترک بین دو دپارتمان نشان می‌دهد که در فرایند مهندسی ساخت و تولید کاواک‌های

شتاب دهندهٔ خطی، چهار پارامتر ذیل حائز اهمیت بالاتری می‌باشند:

۱. جنس کاواک

۲. انطباق ابعادی کاواک تولید شده با طراحی

۳. صافی سطوح

۴. هم محوری کاواک ها با یکدیگر

که در واقع مورد اول به پیش از فرایند تولید، موارد دوم و سوم به فرایند تولید و مورد چهارم به فرایندهای پس از تولید باز می‌گردند.

۲. ۱. جنس کاواک

به طور عمومی کاواک شتاب دهنده‌ها را از جنس مس OFHC و یا OFE تولید می‌کنند که سختی پایین‌تری در مقایسه با مس معمولی داشته و شرایط ماشینکاری بدتری دارند اما به دلیل خاصیت هدایت بالاتر و نیز عدم وجود اکسیژن در ساختار مس، مطلوب ساخت کاواک شتاب دهنده‌ها می‌باشند.

۲. ۲. انطباق ابعادی کاواک تولید شده با طراحی

به جهت حساسیت بالای ساختار کاواک‌ها نسبت به تغییرات ابعادی، انطباق دقیق ابعادی قطعات تولید شده با طراحی انجام شده از اهمیت بالایی برخوردار است. به جهت حصول اطمینان از این انطباق پس از فرایند تولید، کنترل کیفی ابعاد کاواک‌ها به دقت توسط دستگاه CMM انجام پذیرفته است. دستگاه مورد استفاده تمامی ابعاد قطعه را با دقت $\pm 1\mu m$ اندازه‌گیری کرده و در پایان شکل دقیق هر کاواک استخراج شده است.

از آنجا که میزان گرم شدن قطعه در طی فرایند تولید و تغییرات ابعادی پس از آن متناسب با ضریب انبساط قطعه بوده و مس دارای ضریب انبساط حرارتی بالایی است، توصیه می‌شود تا با استفاده از مایع خنک کنندهٔ مخصوص، از افزایش دمای قطعه جلوگیری شده و تغییرات دمایی از یک درجه سانتی‌گراد نسبت به شرایط محیطی تجاوز نکند. همچنین کمینه بودن میزان لقی محور چرخان و خطاهای دستگاه در این انطباق مؤثر هستند که به همین جهت برای تولید قطعات از دستگاه تراش CNC استفاده می‌شود.

۳.۲. صافی سطح

صافی سطح سطوح داخلی کاواک در شتاب دهنده‌ها نیز می‌بایست با توجه به شرایط الکترومغناطیسی ساختار مورد توجه ویژه قرار گیرد. در راستای دستیابی به این هدف باید پارامترهایی نظیر جنس ابزار، زوایای ابزار، سرعت دوران بهینه اسپیندل، ارتعاشات دستگاه و شرایط محلول خنک کننده به دقت انتخاب شود. در این بین قطعاً پایین بودن ارتعاشات دستگاه تراش و اسیدی نبودن PH محلول خنک کننده، تیزی و سختی نوک ابزار در تامین صافی سطح مناسب مؤثر می‌باشند.

۴.۲. هم محوری کاواک ها

کاواک‌های هر شتاب دهنده می‌بایست با دقت بالایی با یکدیگر هم محور گردند. به طور کلی از سه روش عمده در جهت تأمین این هم محوری استفاده می گردد:

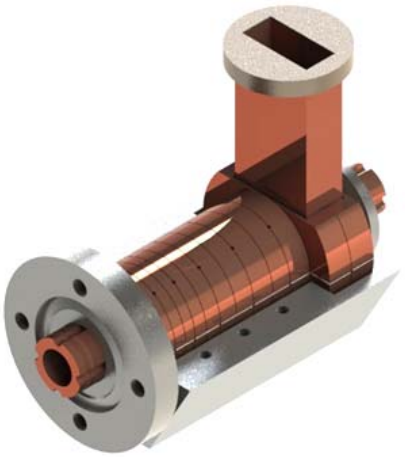
۱. پله هم محوری بر روی قطعات (خود هم محور)

۲. استفاده از پین مرکزی (هم محوری از داخل)

۳. استفاده از قید و بند V-Type (هم محوری از خارج)

یکی از معایب روش اول افزایش پیچیدگی فرایند تولید و زمان ماشینکاری است. اگرچه فلز مس به دلیل نرم بودن و اصطکاک حین مونتاژ قطعات در قسمت پله هم محوری، پتانسیل قفل شدن را نیز داراست و این موضوع چالش‌هایی را در زمان مونتاژ ایجاد می‌کند. استفاده از پین مرکزی نیز به دلیل احتمال آسیب به ساختار داخلی و صافی سطوح و همچنین ملاحظات اختلاف ضرایب انبساط قطعات، دارای ارجحیت پایین‌تری نسبت به روش هم محوری از خارج می‌باشد. در نهایت در طراحی و مونتاژ قید و بند هم محوری کاواک‌ها از قید و بند V-Type استفاده شده است که در شکل ۵ قابل مشاهده است.

در نهایت پس از اتمام فرایند ساخت کاواک‌ها و



شکل ۵. طرح قید و بند مورد استفاده جهت هم محوری کاواک‌ها.

شکل ۶. ساختار کاواک‌ها پس از فرایند لحیم‌کاری.

شکل ۷. نگهدارندهٔ طراحی شده جهت اندازه‌گیری بسامد تشدید و ضریب کیفیت هر کاواک.

قید و بندهای لازم، مونتاژ کاواک‌ها به دقت انجام شده و کاواک‌ها پس از فرایند لحیم‌کاری، آمادهٔ انجام تست‌های عملکردی شده است. در شکل ۶ ساختار کامل پس از فرایند لحیم‌کاری نشان داده شده است.

۳. اندازه‌گیری بسامد و ضریب کیفیت

اطمینان از روند ساخت کاواک‌ها هنگامی صورت می‌پذیرد که در عمل مشخصات الکترومغناطیسی ساختار اندازه‌گیری و بررسی شود. دو پارامتر مهم تأثیرگذار، بسامد تشدید و ضریب کیفیت کاواک‌ها است. دو روش جهت اندازه‌گیری‌های مشخصات مذکور ارائه می‌شود. طبیعتاً بعد از اندازه‌گیری دقیق بسامد تشدید، کاواک جهت قرار گرفتن در بازهٔ بسامدی مجاز انتخاب و تنظیم می‌شود.

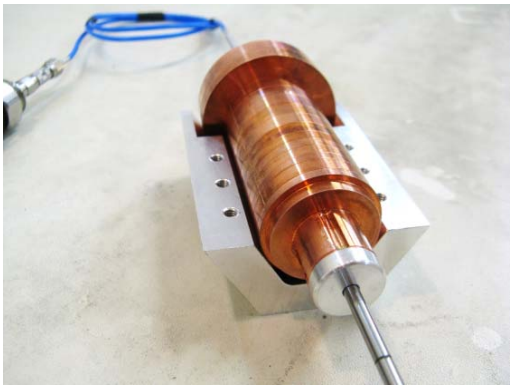
۱.۳. روش اول

در این روش هر کاواک در نگهدارندهٔ ویژه‌ای قرار می‌گیرد و با دو درگاه تحریک می‌شود. در این روش بسامد تشدید کاواک اصلی و کاواک تزویج قابل اندازه‌گیری است. علاوه بر این به خاطر تحریک از دو درگاه، اندازه‌گیری ضریب کیفیت کاواک با دقت زیادی قابل انجام است. شکل ۷ تصویری از نگهدارندهٔ طراحی شده در حال اندازه‌گیری یک کاواک را نشان می‌دهد.

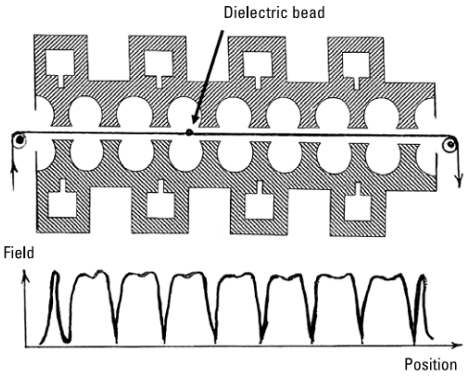
با روش مذکور، ضریب کیفیت همهٔ کاواک‌ها اندازه‌گیری شده و مقدار آن تقریباً ۲۶۰۰ به دست آمده است. این مقدار بدون در نظر گرفتن هیچ گونه عملیات پرداخت در روند ساخت محقق شده است و مقدار آن ۳۰٪ کمتر از مقدار به دست آمده از شبیه‌سازی است که در ادامه روند تطبیق ورودی و محاسبات الکترودینامیکی مد نظر قرار گرفته است.

۲.۳. روش دوم

در این روش کاواک‌ها در نگهدارندهٔ ویژه‌ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و با نمونه‌گیر مخصوص از یک سمت تحریک می‌شوند و با المانی دیگر از سمت دیگر اتصال کوتاه می‌شوند [۲]. از آن جایی که نوع تحریک در این روش متفاوت با روش



شکل ۸. نگهدارندهٔ طراحی شده برای روش دوم.



شکل ۹. طرح‌واره‌ای از روش کشش گوی و میدان الکتریکی بر روی محور یک شتاب دهندهٔ موج ایستا [۴].

جدول ۱. اختلاف بسامد بین مقدار تنظیم شده و مقادیر طراحی.

شماره کاواک	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
$\Delta f\ (MHz)$	−۱۵	−۷	−۱۰	−۱۰	−۱۵	−۱۳	−۱۵

قبل است، می‌تواند خطاهای اندازه‌گیری را کاهش دهد. بدین ترتیب در این روش هر یک از کاواک‌ها به طور جداگانه قابل تنظیم هستند. شکل ۸ تصویری از یک نگهدارنده را نشان می‌دهد.

پس از اطمینان از اندازه‌گیری بسامد، کاواک‌ها طوری تنظیم می‌شوند تا بسامد تشدید آنها کمی کمتر از مقدار طراحی شده قرار گیرد. این اختلاف بسامد جهت جبران خطاهای محتمل در روند لحیم‌کاری معقول خواهد بود و در انتها می‌تواند با کاهش حجم کاواک به مقدار مورد نظر جبرا ن شود. جدول ۱ مقدار اختلاف بسامد بین مقادیر اندازه‌گیری شده بعد از تنظیم کاواک‌ها و مقادیر در نظر گرفته شده در طراحی بر اساس شماره کاواک را نشان می‌دهد.

۳. ۳. اندازه‌گیری شکل میدان

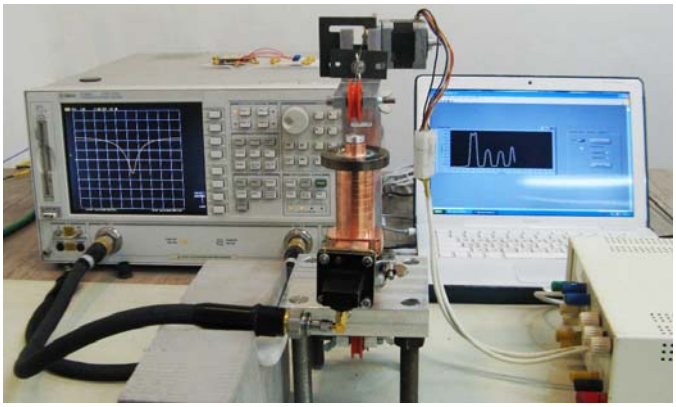
از آن جایی که اختلال در میدان موجب تغییرات در بسامد می‌شود، با این روش می‌توان دامنهٔ میدان الکتریکی در محور یک شتاب دهندهٔ خطی را اندازه‌گیری کرد. در این روش درگاه ورودی به دستگاه تحلیل‌گر شبکه[۱] متصل می‌شود و با حرکت دادن یک گوی، می‌توان در هر موقعیت تغییرات بسامد تشدید را ثبت و سپس میدان را از آن به دست آورد [۳]:

$$\frac{\Delta f(z)}{f_0} \approx -\frac{k_z E_z^2(z)}{W}, \qquad (۱)$$

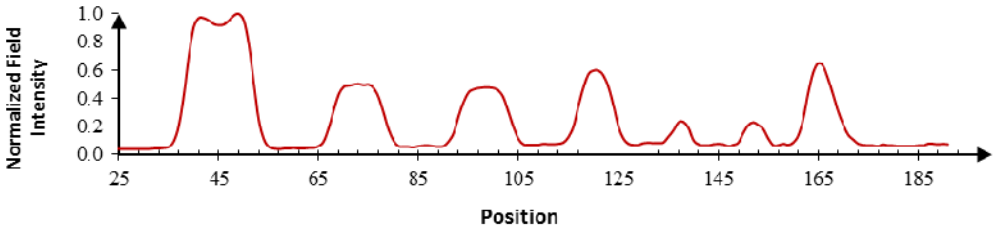
که در آن W انرژی ذخیره شده در ساختار، E_z میدان الکتریکی، f_0 بسامد بدون اختلال سیستم و Δf تغییرات بسامدی است. در شکل ۹ طرح‌واره‌ای از روش کشش گوی و نتایج آن نمایش داده شده است. همچنین ساز و کار در نظر گرفته شده در عمل جهت انجام این تست در شکل ۱۰ به تصویر در آمده است و در شکل ۱۱ شکل میدان به دست آمده از این روش به نمایش گذاشته شده است.

شکل میدان الکتریکی محوری به دست آمده از نتایج تست کشش گوی نشان از آن دارد که مقادیر بسامد تشدید کاواک‌ها به نحو مناسبی تنظیم نیستند؛ که البته این موضوع از نتایج گزارش شده در جدول ۱ نیز انتظار می‌رفت. پروفایل به دست آمده هم از دامنه‌های میدان مورد انتظار تخطی کرده است و هم اینکه در کاواک‌های تزویج ، مقادیر میدان به نحو کاملی صفر نشده است. بدین ترتیب نیاز به درجه بندی بسامد کاواک‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بعد از ایجاد حفره‌هایی جهت تنظیم بسامد تشدید

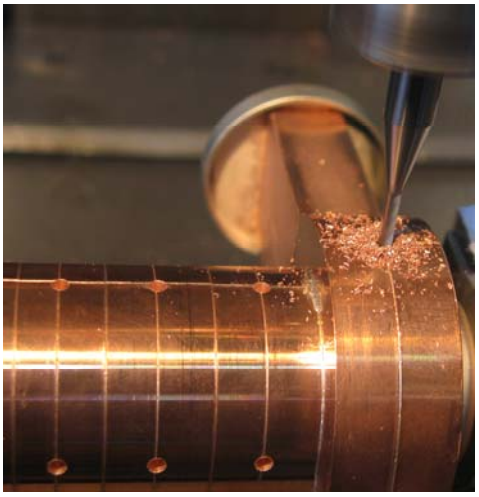
۱. Network Analyzer



شکل ۱۰. ساز و کار طراحی شده جهت اندازه‌گیری شکل میدان در راستای محور به روش کشش گوی.



شکل ۱۱. شکل میدان الکتریکی محوری به دست آمده از تست کشش گوی قبل از تنظیم.



شکل ۱۲. تیوب شتاب دهنده در حال ایجاد سوراخ‌های درجه بندی.

کاواک‌ها می‌توان روند تنظیم را تا رسیدن به بسامد مطلوب سیستم نهایی و شکل میدان مورد نظر ادامه داد. شکل ۱۲نشان دهندهٔ تیوب شتاب دهنده در حال ایجاد حفره‌های درجه بندی است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله ساخت کاواک‌ها و بررسی‌های انجام شده منتج به استخراج روندی قابل اعتماد جهت تولید کاواک‌ها گشته است. همچنین روش‌های اندازه‌گیری مشخصات الکترومغناطیسی نیز از حساسیت لازم برخوردار است و می‌تواند خطاهای مجاز ساخت و عدم مطابقت‌های ابعادی را نشان دهد. در ادامهٔ روند ارائه شده باید درجه بندی کاواک‌ها بعد از لحیم‌کاری به طور کامل صورت گیرد تا نوبت به تست عملیاتی شتاب دهنده شود. از آن جایی که تفنگ الکترونی و سیستم آنالیز انرژی خروجی نیز طراحی و ساخته شده است، به نظر تمام شرایط برای ارزیابی نمونهٔ طراحی و ساخته شده آماده است.

مراجع

1. M Bardegar, H Farhang and A R Mohammad, "*Prototype Design of an X-band,500 keV Linear Accelerator Tube*", Iran Particle Accelerator Conference, (2015).
2. S M Hanna, "*Characterization Techniques for X-Band Medical Accelerator Structures*", in EPAC 2000, Vienna, Austria, 2000.
3. D C Barrera, "*C-Band LINAC for Race Track Microtron*", Universidad Complutense de Madrid, Madrid, (2010).
4. S Hanna, "*RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications*", Artech house, (2012).