



بررسی تنظیم فرکانسی کاواک‌های شتاب‌دهی موج ایستا برای شتاب‌دهنده خطی الکترون: محاسبات، شبیه‌سازی و نتایج عملی

سارا زارعی^{*}، فرشاد قاسمی، شاهین صنایع حجری، مهیار شیرشکن
پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

*Email: szarei@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱

چکیده

به علت تغییرات حجم ناشی از خطای ساخت، فرکانس کاواک‌های شتاب‌دهی در شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون تغییر می‌کند. در نتیجه تنظیم فرکانسی کاواک‌ها یکی از مراحل مهم تست سرد است که باید الزامات آن در طراحی لحاظ شود. در پروژه ساخت ساختار شتاب‌دهی موج‌ایستا برای شتاب‌دهنده خطی با دو انرژی، پس از طراحی، یک ساختار شتاب‌دهی آلومینیومی (شامل دو نیم کاواک شتاب‌دهی و یک کاواک تزویج) ساخته شد. در این پروژه برای جبران تغییرات ناشی از خطای ساخت، از پیچ‌های تنظیم استفاده شد. این پیچ‌ها با تغییر جزیی در حجم کاواک‌ها، فرکانس آن‌ها را تغییر می‌دهند. در این مقاله محاسبات و شبیه‌سازی تغییرات فرکانسی ناشی از تغییرات ابعادی انجام شد. بر اساس شبیه‌سازی انجام شده، طراحی پیچ‌ها برای تنظیم فرکانسی در شرایط عملی انجام شد. بر اساس نتایج این مقاله، با استفاده از پیچ‌های تعبیه شده بر روی دیواره‌ی کاواک‌ها با ابعاد طراحی شده، می‌توان به میزان حداکثر ۱۰ مگاهرتز فرکانس تشدید را تغییر داد. لذا با استفاده از روش انتخابی تنها تغییرات فرکانسی ناشی از خطای ساخت به میزان مورد اشاره قابل جبران است. در این پژوهش، فرکانس تشدید ساختار شتاب‌دهی برای مد $\pi/2$ برابر با ۲۹۹۸٫۵ مگاهرتز تنظیم شد و حد دقت مکانیکی ساخت در نمونه نهایی ۲۰۰ میکرومتر به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: تنظیم فرکانسی، تست سرد، کاواک شتاب‌دهی، شتاب‌دهنده خطی الکترون

The frequency adjustment study of standing-wave accelerating cavity of linac: calculations, simulations and measurement results

S. Zarei*, F. Ghasemi, Sh. Sanaye Hajari, M. Shirshakan

Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-3486, Tehran-Iran

Research Article

Received 16.11.2021, Accepted 22.12.2021

Abstract

The frequency of cavities in electron linear accelerators changes because of volume variation and manufacturing error. Adjusting the frequency of cavities is one of the most important steps in a cold test, which must be considered in the design. In constructing a standing-wave tube for dual-energy linac, an aluminum tube (including two half-acceleration cavities and one coupling cavity) was constructed. In this project, to modify the changes caused by a manufacturing error, adjustment screws were used. These screws change the frequency by somewhat changing the volume of the cavities. In this paper, the calculation and simulation of frequency changes due to dimensional variation were carried out. Based on the calculation and simulation, the design of screws for a frequency adjustment in experimental conditions is done. According to the results of this paper, using the screws on the cavities wall, the resonant frequency can be changed up to 10 MHz. Therefore, using the selected method, the frequency changes caused by the manufacturing error can be compensated to the extent mentioned. In this study, the tube's resonant frequency for the $\pi/2$ mode was set equal to 2998.5 MHz, and the mechanical accuracy of the construction was obtained at 200 μm .

Keywords: Frequency tune, Cold test, Accelerating cavity, Electron linear accelerator



۱. مقدمه

از اواسط دهه ۱۹۴۰ طراحی و ساخت شتابدهنده‌های خطی الکترون به‌طور جدی آغاز شد و انواع مختلفی از ساختارهای این نوع شتابدهنده با انرژی‌های مختلف تجاری شدند. شتابدهنده‌های خطی کاربردهای مختلفی از جمله در حوزه پزشکی، صنعتی، بازرسی محموله‌های کامیونی، پرتودهی مواد غذایی و استریل کردن تجهیزات پزشکی دارند. کاربردهای گسترده شتابدهنده‌های خطی الکترون باعث شد تا آن‌ها به‌عنوان موضوع پژوهشی دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی مطرح شوند [۱]. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی طراحی، بهینه‌سازی، ساخت و کاربرد شتابدهنده‌های خطی انجام شده است و پژوهش‌های بیش‌تر نیز در حال انجام است.

انواع شتابدهنده‌های خطی الکترون از اجزاء مختلفی ساخته شده است. برخی از اجزا مانند تفنگ الکترونی، ساختار شتابدهی، منابع تولید توان رادیوفرکانسی و مدولاتور، سیستم انتقال توان امواج بسامد رادیویی، سیستم خلاء، سیستم خنک‌کننده، سیستم کنترل و سیستم شکل‌دهی به باریکه برای همی شتابدهنده‌های خطی الکترون مشترک است. یکی از قسمت‌های مهم شتابدهنده‌های خطی، ساختار شتابدهی آن است که از مجموعه‌ای کاواک تشدید تشکیل شده است. اساس عملکرد همه ساختارهای شتابدهی در شتابدهنده‌های خطی الکترون برهم‌کنش میدان‌های الکترومغناطیسی با الکترون‌ها و در نتیجه شتابدهی به آن‌ها است. تیوب شتابدهی و لوله‌ی شتابدهی نیز اصطلاحات رایج برای ساختار شتابدهی هستند. امروزه طراحی ساختارهای شتابدهی در شتابدهنده‌های خطی به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف انجام می‌شود [۲]. برای طراحی ساختارهای شتابدهی چندین مرحله انجام می‌شود. اولین مرحله طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار شتابدهی به لحاظ الکترومغناطیسی است که بر اساس عبور امواج الکترومغناطیسی درون ساختارهای موج‌بری و حل معادلات ماکسول درون این ساختارها استوار است. با انجام این مرحله از طراحی، پارامترهای الکترومغناطیسی ساختار و تأثیر آن‌ها بر شتابدهی به الکترون‌ها حاصل می‌شود. طراحی دقیق ساختار به لحاظ الکترومغناطیسی بر اندرکنش میدان‌های الکترومغناطیسی و باریکه عبوری تأثیر بسیار دارد.

پس از طراحی الکترومغناطیسی، بررسی دینامیک طولی و عرضی باریکه درون این ساختارها حایز اهمیت خواهد بود. در

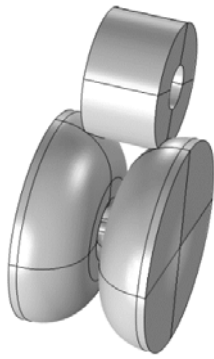
صورت مطلوب نبودن مشخصات باریکه خروجی از ساختار، طراحی‌ها باید بازنگری شده تا به خروجی مطلوب دست‌یابیم. هم‌چنین با توسعه نرم‌افزارهای مدل‌سازی کامپیوتری، تحلیل‌های حرارتی، سیالاتی و مکانیکی ساختارهای شتابدهی با دقت بالا انجام می‌شود.

پس از انجام طراحی و اطمینان از نتایج، کاواک‌های ساختار شتابدهی ساخته شده و پس از آن اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی که به تست‌های سرد معروف هستند بر روی ساختار شتابدهی انجام می‌شود. در صورت مناسب بودن نتایج تست سرد، با اعمال توان بالا به ساختار شتابدهی، تست گرم و با اعمال باریکه، اندازه‌گیری پارامترهای باریکه (تست اکتیو) ساختار شتابدهی انجام خواهد شد.

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای به‌عنوان یکی از مراکز فعال در حوزه طراحی، ساخت و بهره‌برداری از شتابدهنده‌ها، در زمینه‌ی طراحی و ساخت ساختار شتابدهی موج ایستای دو انرژی در باند S گام‌های مؤثری برداشته است. در حال حاضر مراحل طراحی این ساختار شتابدهی در حال انجام است. در جدول ۱ مشخصات ساختار شتابدهی ارائه شده است. با توجه به هزینه‌ی بالای ساخت ساختارهای شتابدهی، متداول است ابتدا یک نمونه چند کاواک از ساختار شتابدهی ساخته شود. در صورت به دست آمدن نتایج مطلوب از تست سرد نمونه ساخته شده، نمونه‌ی نهایی ساخته و اندازه‌گیری‌ها و تنظیمات روی نمونه کامل شده انجام می‌شود. بر این اساس در این پروژه ابتدا یک نمونه‌ی آلومینیمی سه کاواک طراحی و ساخته شد. هم‌چنین در نمونه آلومینیمی تمهیدات ساخت و اندازه‌گیری بررسی شد تا اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری و شرایط جبران آن‌ها در طراحی نمونه نهایی در نظر گرفته شود.

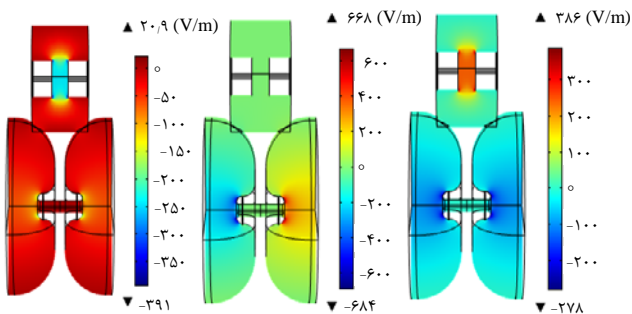
در این پژوهش تأثیر تغییرات ابعادی بر فرکانس تشدید یک ساختار شتابدهی شامل دو نیم‌کاواک شتابدهی و یک کاواک تزویج با در نظر گرفتن شرایط جبران آن بررسی شده است. هم‌چنین در این پژوهش برای ساختار مد نظر نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری با هم مقایسه شده است. در این پژوهش با استفاده از پیچ‌های تنظیم اختلاف ابعادی ناشی از ساخت جبران و فرکانس تشدید ساختار تنظیم شد.





شکل ۱. طرح‌واره سه کاواک در نرم‌افزار کامسول [۶].

جدول ۱. مشخصات ساختار شتاب‌دهی مورد نظر	
مقدار	کمیت
۲۹۹۸٫۵ مگاهرتز	فرکانس منبع بسامد رادیویی
۴ و ۶ مگا الکترون‌ولت	انرژی خروجی تیوب
۲٫۶ مگاوات	بیشینه توان ورودی
موج ایستا	نوع ساختار
TM _{۱۰}	مد نوسانی
$\pi/2$	مد شتاب‌دهی
تزیویج جانبی	نوع تزیویج بین کاواک‌ها
موج‌بر WG۲۸۴	سیستم انتقال توان به تیوب



شکل ۲. میدان الکتریکی محوری برای مدهای صفر (شکل سمت چپ)، $\pi/2$ (شکل وسط) و π (شکل سمت راست) [۶].

۲. روش کار

اگرچه با افزایش دقت ساخت، اختلاف ابعاد ساختار شتاب‌دهی ساخته شده نسبت به ابعاد ساختار شتاب‌دهی شبیه‌سازی شده کاهش می‌یابد، اما معمولاً باید برای جبران اختلاف ابعادی در مرحله ساخت تمهیداتی اندیشید. مهم‌ترین تأثیر اختلاف ابعادی در مراحل ساخت، تغییر فرکانس تشدید کاواک‌ها است. طبق نتایج به‌دست‌آمده به سه طریق مقدار فرکانس تشدید تغییر یافته را می‌توان تنظیم کرد. این سه روش شامل تغییر با پیچ‌های تنظیم، تغییرات دمایی و ایجاد برآمدگی در دیواره‌ی داخلی کاواک است [۳، ۴].

جدول ۲. ابعاد هندسی کاواک شتاب‌دهی و تزیویج [۶]

مقدار (میلی‌متر)	کمیت
۵۰	طول کاواک شتاب‌دهی
۲۷	طول کاواک تزیویج
۳۸٫۴۱	شعاع کاواک شتاب‌دهی
۲۲٫۵۹	شعاع کاواک تزیویج
۲٫۵	شعاع روزنه کاواک شتاب‌دهی
۸٫۳	شعاع روزنه کاواک تزیویج
۷٫۷۸	فاصله بین دو دماغه کاواک شتاب‌دهی
۹٫۶۱	فاصله بین دو دماغه کاواک تزیویج
۱۹٫۶	شعاع انحنا کاواک شتاب‌دهی
۲٫۷	شعاع انحنا بالای دماغه کاواک شتاب‌دهی
۱	شعاع انحنا پایین دماغه کاواک شتاب‌دهی

استفاده از پیچ‌های تنظیم جهت انجام تغییرات پس از ساخت مزایا و معایبی دارد. از جمله مزایای این روش می‌توان به‌سادگی انجام آن و گستره بزرگ میزان جابه‌جایی فرکانس اشاره کرد. اما این روش معایبی نیز دارد که شامل کاهش ضریب کیفیت، وجود لبه‌های تیز در پیچ و مشکلات ناشی از آن در توان‌های بالا و احتمال ایجاد مشکل در خلأ سیستم است.

۱۰۲ شبیه‌سازی الکترومغناطیسی سه کاواک

در این پژوهش جهت بررسی تأثیر پیچ‌های تنظیم بر فرکانس، ابتدا ساختار مدنظر شبیه‌سازی، جهت تشدید در فرکانس مطلوب بهینه شد و سپس با در نظر گرفتن پیچ‌های تنظیم، تأثیر آن‌ها بر فرکانس تشدید بررسی شد. بدین منظور، ابتدا یک ساختار شتاب‌دهی با تزیویج جانبی شامل دو نیم‌کاواک شتاب‌دهی و یک کاواک تزیویج بین آن‌ها در نظر گرفته شد و در نرم‌افزار کامسول^۱ طراحی و شبیه‌سازی این ساختار انجام شد. در طراحی ابعاد هندسی برای نوسان در فرکانس ۲۹۹۸٫۵ مگاهرتز در مد $\pi/2$ بهینه شدند. روند طراحی و نتایج بهینه‌سازی ابعاد در مراجع [۵، ۶] آورده شده است. در شکل ۱ طرح‌واره مدل شبیه‌سازی شده، در شکل ۲ میدان الکتریکی در راستای محوری برای مدهای صفر، $\pi/2$ و π و در جدول ۲ ابعاد هندسی ساختار نشان داده شده است.

۲۰۲ محاسبات تغییرات فرکانسی برحسب تغییرات ابعادی

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، تغییرات ابعادی پس از ساخت قابل پیش‌بینی است، به همین منظور پیچ‌های تنظیم جهت جبران تغییرات ابعاد پس از ساخت بر روی دیواره کاواک‌ها در نظر گرفته شد. وجود پیچ‌های تنظیم امکان کاهش یا افزایش حجم داخلی کاواک‌ها را میسر کرد.

1. COMSOL



با در نظر گرفتن اختلاف فرکانس مد $\pi/2$ از مدهای کناری برابر با ۱۰ مگاهرتز (برابر با بازه فرکانسی منبع بسامد رادیویی [۹]) و با استفاده از رابطه ۵، تغییرات حجم مورد نیاز حدود ۱۵۵۰ میلی‌متر مکعب است. برای به دست آوردن چنین تغییراتی در حجم، برای هر کاواک شتابدهی ۶ پیچ تنظیم استفاده شده است که هر کدام تغییراتی حدود ۲۶۰ میلی‌متر مکعب به وجود آورند. هم‌چنین برای کاواک تزویج یک پیچ تنظیم بر روی دیواره‌ی انتهایی در نظر گرفته شده است.

۲.۲ بررسی تأثیر پیچ‌های تنظیم

جهت بررسی تأثیر پیچ‌های تنظیم، تغییرات فرکانسی نسبت به تغییرات حجم که در اثر اضافه کردن پیچ‌های تنظیم به یک ساختار شتابدهی شامل دو نیم‌کاواک شتابدهی و یک کاواک تزویج به وجود می‌آید بررسی شد.

برای این منظور ۳ پیچ تنظیم روی دیواره‌ی جانبی هر نیم‌کاواک شتابدهی (در مجموع ۶ پیچ تنظیم روی دیواره‌ی جانبی هر کاواک شتابدهی) با فاصله ۱۲۰ درجه در نظر گرفته شد و برای کاواک تزویج یک پیچ تنظیم بر روی دیواره‌ی انتهایی (قاعده کاواک) در نظر گرفته شد. برای بررسی تغییرات فرکانسی نسبت به تغییرات حجم، موقعیت‌های مختلفی برای پیچ‌های تنظیم فرکانس در نظر گرفته شد. در این بررسی برای هر یک از پیچ‌ها سه موقعیت جابه‌جایی در نظر گرفته شد. در حالتی که پیچ‌های تنظیم به طور مماس قرار دارند، تقریباً حجم داخلی کاواک را تغییر نمی‌دهند. موقعیت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای پیچ‌های تنظیم در جدول ۳ آورده شده است.

برای بررسی نتایج شبیه‌سازی، یک نمونه آلومینیمی از ساختار شبیه‌سازی شده با دقتی بیش‌تر از ۲۰۰ میکرومتر ساخته شد. در نمونه ساخته شده نیز ۳ محل با فاصله ۱۲۰ درجه روی دیواره‌ی جانبی هر نیم‌کاواک شتابدهی و یک محل روی دیواره‌ی کاواک تزویج جهت قرارگیری پیچ تنظیم در نظر گرفته شد. در شکل ۳ محل قرارگیری پیچ‌های تنظیم روی کاواک تزویج و شتابدهی نمونه ساخته‌شده‌ی آلومینیمی نشان داده شده است.

هرکدام از پیچ‌های نیم‌کاواک‌های شتابدهی قطری برابر با ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲ میلی‌متر دارند. پیچ کاواک تزویج نیز قطری برابر با ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر دارد. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده پیچ‌های تنظیم با قطر ۶ میلی‌متر و طول ۱۰ میلی‌متر می‌تواند تغییرات ابعادی حدود ۲۶۰ میلی‌متر مکعب را به وجود آورد که می‌تواند در مجموع حجم داخلی هر کاواک را ۱۵۶۰ میلی‌متر مکعب تغییر دهند. شکل ۴ نمایی از پیچ‌های تنظیم ساخته شده را نشان می‌دهد.

مطابق معادله اختلال اسلاتر^۱، تغییر فرکانس شدید برحسب تغییرات حجم از رابطه (۱) به دست می‌آید [۷]. در کاواک‌های استوانه‌ای در مد نوسانی TM_{10} میدان مغناطیسی نزدیک دیواره‌های جانبی کاواک، دامنه قابل توجهی دارد، اما دامنه میدان الکتریکی نزدیک به صفر است. بر این اساس می‌توان رابطه (۱) را به صورت رابطه (۲) ساده کرد [۸]:

$$\frac{\Delta\omega_e}{\omega_e} = \frac{\int_{AV} (\mu H^r - \varepsilon E^r) dV}{\int_V (\mu H^r + \varepsilon E^r) dV} = \frac{\Delta U_m - \Delta U_e}{U} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta f}{f_e} = \frac{\int_{AV} (\mu H^r) dV}{\int_V (\mu H^r + \varepsilon E^r) dV} = \frac{\Delta U_m}{U} \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، \bar{U} متوسط انرژی ذخیره شده در کاواک با حجم V ، ΔU_e و ΔU_m به ترتیب تغییرات انرژی الکتریکی و مغناطیسی ذخیره شده در اثر تغییرات حجم ΔV است.

در رابطه ۲ متوسط انرژی ذخیره شده درون کاواک و تغییرات انرژی مغناطیسی ذخیره شده به علت تغییرات حجم به ترتیب از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند.

$$\Delta U_m = \frac{1}{\mu_0} \int_V \mu_0 H^r dV = \frac{1}{\mu_0} (\varepsilon_0 E_0^r J_1(ha)) \Delta V \quad (3)$$

$$U = A \pi d a^r \varepsilon_0 E_0^r \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴، $J_1(ha)$ تابع بسل مرتبه یک در شعاع d طول کاواک و $r = a$ است.

با در نظر گرفتن ابعاد کاواک شتابدهی مطابق جدول ۲، مقادیر a و d به ترتیب برابر با ۳۸/۴۱ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و با استفاده از روابط ۳ و ۴ مقادیر ΔU_m به ترتیب برابر با ۰/۱۳۵ و ۰/۲۶۹ $\varepsilon_0 E_0^r$ به دست آمد. با قرار دادن مقادیر به دست آمده در رابطه ۲، تغییرات حجم داخلی کاواک مطابق رابطه ۵ به صورت ضریبی از $\Delta f / f_0$ به دست می‌آید. در این رابطه Δf اختلاف فرکانس مد $\pi/2$ از مدهای جانبی آن است.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{4} \times \frac{0.269 \varepsilon_0 E_0^r \Delta V}{50 \times 38.41^2 \times 0.135 \pi \varepsilon_0 E_0^r} = 2.151 \times 10^{-6} \Delta V \quad (5)$$

1. Slater Perturbation Theorem





شکل ۳. محل قرارگیری پیچ‌های تنظیم کاواک شتاب‌دهی و تزویج.

۳. نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش ۱.۲ ذکر شد، ساختار شتاب‌دهی با هندسه‌ای شامل دو نیم‌کاواک شتاب‌دهی و یک کاواک تزویج با موقعیت‌های مختلف قرار گرفتن پیچ‌های تنظیم شبیه‌سازی شد. در همه موقعیت‌ها با توجه به در نظر گرفتن مد $\pi/2$ به عنوان مد شتاب‌دهی مدنظر، فرکانس تشدید این مد به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی برای موقعیت‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که از جدول ۳ قابل مشاهده است، اختلاف فرکانس مد تشدید ردیف‌های ۲ و ۵ برابر با $8/4$ مگاهرتز است که نزدیک به محاسبات تئوری انجام شده است. همچنین از جدول ۳ می‌توان استنباط کرد که با جابه‌جا کردن پیچ‌های تنظیم کاواک شتاب‌دهی به سمت داخل فرکانس تشدید افزایش می‌یابد و این تغییرات در کاواک‌های تزویج برعکس و با حساسیت فرکانسی کم‌تری است. در نتیجه می‌توان با قرار دادن پیچ‌های تنظیم بر روی دیواره‌ی جانبی کاواک‌های شتاب‌دهی و تزویج حجم داخلی آن‌ها را تغییر داد و این امر منجر به تغییر فرکانس تشدید ساختار شتاب‌دهی خواهد شد.

برای بررسی شبیه‌سازی انجام شده، برای سه موقعیت قرارگیری پیچ‌های تنظیم، فرکانس تشدید با استفاده از پروب مغناطیسی برای مدهای صفر، $\pi/2$ و π اندازه‌گیری فرکانسی شد. روش اندازه‌گیری فرکانس تشدید با استفاده از پروب مغناطیسی در مرجع [۱۰] آورده شده است. در جدول ۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای مد $\pi/2$ برای سه موقعیت مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۴ قابل مشاهده است، فرکانس تشدید برای مد $\pi/2$ در اندازه‌گیری نسبت به شبیه‌سازی کم‌تر است. این اختلاف فرکانس که در بدترین شرایط حدود $0/08$ درصد است، در اثر خطای ساخت و اندازه‌گیری از یک روند یکسان تبعیت می‌کند.

پس از بررسی تغییرات فرکانسی حاصل از قرارگیری پیچ‌های تنظیم، با استفاده از این پیچ‌ها، فرکانس تشدید در مد $\pi/2$ برابر با $2998/5$ مگاهرتز تنظیم شد. در شکل ۵ میدان الکتریکی محوری ساختار در مد $\pi/2$ در فرکانس $2998/5$ مگاهرتز نشان داده شده است.



شکل ۴. پیچ‌های تنظیم نیم‌کاواک‌های شتاب‌دهی و کاواک تزویج.

جدول ۳. فرکانس تشدید برای مد تشدید برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری پیچ‌های تنظیم

ردیف	پیچ‌های تنظیم کاواک شتاب‌دهی	پیچ تنظیم کاواک تزویج	فرکانس (مگاهرتز)
۱	همه داخل	داخل	۳۰۰۳/۸
۲	همه داخل	خارج	۳۰۰۴/۴
۳	همه داخل	مماسی	۳۰۰۴/۱
۴	همه خارج	خارج	۲۹۹۶/۴
۵	همه خارج	داخل	۲۹۹۶/۰
۶	همه خارج	مماسی	۲۹۹۶/۲
۷	همه مماسی	خارج	۲۹۹۸/۸
۸	همه مماسی	داخل	۲۹۹۸/۳
۹	همه مماسی	مماسی	۲۹۹۸/۷
۱۰	یکی داخل بقیه مماس	مماسی	۲۹۹۹/۶
۱۱	یکی خارج بقیه مماس	مماسی	۲۹۹۷/۸
۱۲	دو تا داخل بقیه مماس	مماسی	۳۰۰۰/۶
۱۳	دو تا خارج بقیه مماس	مماسی	۲۹۹۶/۹



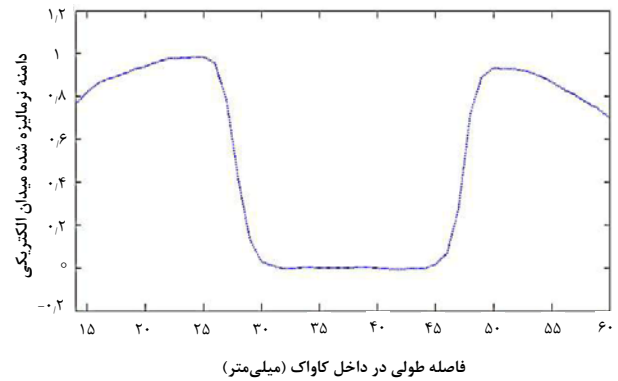
بررسی شد که می‌توان با قرار دادن سه پیچ تنظیم بر روی هر نیم‌کاواک شتاب‌دهی و یک پیچ تنظیم بر روی کاواک تزویج، فرکانس تشدید را حدود ۱۰ مگاهرتز تغییر داد و با تغییر موقعیت پیچ‌های تنظیم فرکانس تشدید برای مد $\pi/2$ برابر با ۲۹۹۸٫۵ مگاهرتز تنظیم شد. با بررسی انجام شده می‌توان اطمینان حاصل کرد تغییرات ابعادی حاصل از ساخت در حد ۲۰۰ میکرومتر را می‌توان با در نظر گرفتن حفره‌ها یا برآمدگی‌هایی در دیواره‌ی کاواک‌های ساختار شتاب‌دهی جبران کرد و به فرکانس مطلوب در نمونه‌ی نهایی دست یافت.

تشکر و قدردانی

از زحمات و راهنمایی‌های اساتید گرانقدر دکتر محمد لامعی رشتی، دکتر فریدون عباسی دوانی و مهندس مهدی بهرامی در انجام این پروژه بسیار سپاسگزاریم. انجام این پژوهش بدون حمایت و مشورت این بزرگواران میسر نبود.

مراجع

1. E.L. Ginzton, C.S. Nunan, *History of microwave electron linear accelerators for radiotherapy*, *IJROBP.*, **11**, 205 (1985).
2. J.St. Aubin, *The Design of a Simulated In-line Side Coupled 6MV Linear Accelerator Waveguide*, *Med. Phys.*, **37**, 466 (2010).
3. P.M. Lapostolle, A.L. Septier, *Linear accelerators*, (North-Hall and Publishing Company, Amsterdam, 1970).
4. S. Nazemi, *M.Sc. thesis*, *Shahid Beheshti University*, 2008 (In Persian).
5. S. Zarei, et al., *Design of a side coupled standing wave accelerating tube for NSTRI e-Linac*, *JINST*, **12**, 9026 (2017).
6. S. Zarei, *Phd. thesis*, *Nuclear Science and Technology Research Institute*, 2018 (In Persian).
7. L.C. Maier, J.C Slater, *Determination of field strength in a linear accelerator cavity*, *Applied Phys.*, **23**, 78 (1952).
8. F. Ghasemi, *Phd. thesis*, *Shahid Beheshti University*, 2015 (In Persian).
9. *Teledyne-e2v*, *Magnetrons, MG5193 Datasheet*, <https://www.teledyne-e2v.com/products/rf-power/medical-magnetrons/>.
10. G. Benguang, et al., *A Tuning Method for Side coupled standing Wave Accelerating Tubes*, *Nucl. Instrum. Meth.- A*, **261**, 339 (1987).



شکل ۵. میدان الکتریکی محوری مد $\pi/2$ در فرکانس ۲۹۹۸٫۵ مگاهرتز.

جدول ۴. فرکانس تشدید حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

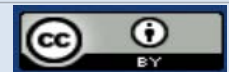
موقعیت‌های مختلف پیچ‌های تنظیم (مگاهرتز)	شبیه‌سازی اندازه‌گیری اختلاف (مگاهرتز)	موقعیت‌های مختلف پیچ‌های تنظیم (مگاهرتز)	موقعیت‌های مختلف پیچ‌های تنظیم (مگاهرتز)
کاواک شتاب‌دهی داخل / کاواک تزویج داخل	۳۰۰۳٫۸	۳۰۰۶٫۲	۰٫۰۸
کاواک شتاب‌دهی خارج / کاواک تزویج خارج	۲۹۹۶٫۴	۲۹۹۶٫۰	۰٫۰۱
کاواک شتاب‌دهی مماسی / کاواک تزویج مماسی	۲۹۹۸٫۷	۲۹۹۷٫۹	۰٫۰۲

۴. نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای مهم در تست سرد ساختارهای شتاب‌دهی فرکانس تشدید آن‌ها است. در صورتی که پس از ساخت ساختار شتاب‌دهی، فرکانس تشدید آن برابر با مقدار مطلوب نباشد، ساختار در مد شتاب‌دهی مورد نظر نوسان نخواهد کرد. در اثر خطای ناشی از ساخت، فرکانس تشدید به دست آمده از شبیه‌سازی با مقدار اندازه‌گیری شده آن تفاوت دارد. از آن‌جا که شبیه‌سازی اصولاً بر اساس فرکانس تشدید مطلوب انجام می‌شود، فرکانس تشدید اندازه‌گیری شده با مقدار مطلوب اختلاف دارد. در نتیجه پس از ساخت کاواک‌ها، با تغییرات جزئی در حجم آن‌ها می‌توان به فرکانس تشدید مطلوب رسید. در این پروژه برای بررسی تغییرات فرکانسی ناشی از خطای ساخت و جبران تغییرات فرکانسی، ابتدا نمونه ساختار شتاب‌دهی با سه کاواک جهت نوسان در فرکانس ۲۹۹۸٫۵ مگاهرتز شبیه‌سازی شد، سپس جهت جبران خطای ساخت پیچ‌های تنظیم بر روی دیواره کاواک‌ها طراحی شد. این نمونه سه کاواکه با دقت بهتر از ۲۰۰ میکرومتر ساخته و اندازه‌گیری‌های سرد بر روی آن انجام شد. در این پژوهش

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سارا زارعی، فرشاد قاسمی، شاهین صنایع حجری، مهیار شیرشکن (۱۴۰۲)، بررسی تنظیم فرکانسی کاواک‌های شتاب‌دهی موج ایستا برای شتاب‌دهنده خطی الکترون: محاسبات، شبیه‌سازی و نتایج عملی، ۱۰۳، ۳۴-۳۹

DOI: 10.24200/NST.2023.1323

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1323.html

