



طراحی و ساخت یک کاواک شتاب‌دهنده‌ی صنعتی الکترون نوار بسامدی VHF با انرژی ۵ MeV و توان ۵۰ kW

علی محمد پور صالح^{۱،۲}، ایرج جباری*^۱، حسین خلفی^۲

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده‌ی علوم و فن آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران
۲. مجتمع پژوهشی ایران مرکزی یزد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۸۹-۸۹۱۷۵، یزد - ایران

چکیده: شتاب‌دهنده‌های الکترونی توان متوسط کاربرد زیادی در صنعت پرتودهی دارند. برای پاسخ‌گویی به نیاز صنعت‌های کشور، پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون موج رادیویی توان متوسط در نوار بسامدی VHF با محدوده‌ی انرژی ۱ MeV تا ۵ MeV در کشور آغاز شده است. یکی از مؤلفه‌های مهم این شتاب‌دهنده، کاواک آن است که در این مقاله نحوه‌ی طراحی و ساخت آن و مقایسه‌ی نتیجه‌های شبیه‌سازی و پارامترهای عملکردی کاواک معرفی شده است. در این پژوهش، با بررسی پارامترهای اساسی هم‌چون بسامد تشدید، ضریب کیفیت، امپدانس موازی، ضریب شایستگی کاواک و ضریب زمان عبور در هندسه‌های مختلف کاواک استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی سی.اس.تی، اچ.اف.اس.اس و سوپرفیش هندسه‌ی بهینه‌ی کاواک برای باریکه‌ی الکترونی با انرژی حداکثر ۵ MeV و توان ۵۰ kW با کم‌ترین از دست‌دادگی‌ها طراحی شد. پس از تکرار شبیه‌سازی‌ها و اطمینان از نتیجه‌های آن‌ها، کاواک طراحی شده ساخته و پارامترهای آن اندازه‌گیری شد. یافته‌ها نشان داد که پارامترهای اندازه‌گیری شده تطابق خوبی با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی دارد.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده‌ی صنعتی الکترون، کاواک استوانه‌ای، نوار بسامدی VHF

Design and Construction of a Cavity for 5 MeV Industrial Electron Accelerator in VHF Band Frequency with 50 kW Power

A.M. Poursaleh^{1,2}, I. Jabbari*¹, H. Khalafi²

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences and Technologies, University of Isfahan, P.O.Box:81746-73441, Isfahan - Iran
2. Central Iran Research Complex (Yazd), Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 89175-389, Yazd - Iran

Abstract: Medium power electron accelerators have many applications in industrial irradiations. In order to meet the industry needs of Iran, several investigations for design and construction of the medium power linear electron accelerator in the VHF band frequency with the energy range of 1 MeV - 5 MeV have been started. The acceleration cavity is one of the important components of this design. In this article the design and construction of the cavity are reported and the results of the simulations and measurements are compared. Mean while the essential parameters, including resonance frequency, quality factor, shunt impedance, figure of merit and transit time factor are evaluated for several configuration of cylindrical cavity using (CST), (HFSS) and (SUPERFISH) codes in order to design an efficient cavity for electron beam with the maximum energy up to 5 MeV and 50 kW power with the lowest power loss. After repeating the simulations and reliability of the results, the designed cavity was constructed and its parameters were measured. The results showed that the measured parameters are in good agreement with simulation results.

Keywords: Industrial Electron Accelerator, Cylindrical Cavity, VHF Band Frequency

*Email: i_jabbari@ast.ui.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۲/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۳/۱۷

۱. مقدمه

می‌کند [۱۲]. شتاب‌دهنده‌های ILU۶ و ILU۱۰ از مدل‌های متداول خانواده‌ی ILU هستند [۱۳-۱۵]. در این پژوهش کاواک شتاب‌دهنده‌ی الکترون توان متوسط صنعتی در نوار بسامدی (VHF) و مبتنی بر ساختار شتاب‌دهنده‌ی ILU۱۰ با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی سی.اس.تی^(۲)، سوپرفیش^(۳) و اچ.اف.اس.اس^(۴) طراحی، بهینه‌سازی و ساخته شد.

۲. بخش نظری و تجربی

در شتاب‌دهنده‌های موج رادیویی، کاواک مهم‌ترین قسمت محسوب می‌شود. در واقع کاواک محل ایجاد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در بسامد تشدید است. از میدان الکتریکی ایجاد شده در کاواک برای شتاب دادن باریکه‌ی الکترونی استفاده می‌شود. انتخاب بسامد تشدید در کاواک یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی است که در این پژوهش با توجه به آسان‌یاب بودن تجهیزهای مولد بسامد موج رادیویی در بسامد ۱۰۷/۵ MHz، این بسامد به عنوان مبنا انتخاب شد [۱۶]. در هر کاواک شکل و اندازه‌ی آن تأثیر مستقیم بر بسامد تشدید دارد. شکل اولیه‌ی کاواک مورد استفاده در این طرح به صورت استوانه‌ای است. در ابتدا رابطه‌ها و نظریه‌ی حاکم بر این کاواک ارائه می‌شود. شیوه‌ی اصلی مورد استفاده در شتاب دادن ذره‌ها در کاواک استوانه‌ای شیوه‌ی TM_{۱۰} است. به طور کلی برای محاسبه بسامد تشدید در یک کاواک استوانه‌ای ساده در این شیوه از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [۱۷]:

$$F = \frac{2,405c}{2\pi R} \quad (1)$$

که در آن، R شعاع کاواک استوانه‌ای و c سرعت نور است. از دست‌دادگی‌ها در بدنه‌ی کاواک استوانه‌ای ساده از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند [۱۸]:

$$P = \pi R R_s E_0^2 \frac{\epsilon_0}{\mu_0} J_1^2(2,405)(L + R) \quad (2)$$

که در آن، L طول یا ارتفاع کاواک، R شعاع کاواک استوانه‌ای، R_s مقاومت سطحی پوسته‌ی داخلی کاواک، J_۱(۲,۴۰۵) مربوط به ضریب تابع بسل، μ_۰ ثابت تراوایی خلأ و ε_۰ ثابت گذردهی خلأ است. ضریب کیفیت از جمله‌ی پارامترهای مهم در طراحی

به طور کلی شتاب‌دهنده‌های صنعتی الکترون را می‌توان به دو دسته‌ی شتاب‌دهنده‌های DC یا الکترواستاتیک و شتاب‌دهنده‌های RF یا موج رادیویی تقسیم‌بندی نمود. هر دو دسته در مدل‌های مختلف و سطح‌های مختلف انرژی و توان وجود دارند که در مقایسه با یک‌دیگر دارای مزیت‌ها و عیب‌هایی هستند. با وجود این، شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک دارای سطح انرژی محدودی هستند و از این‌رو، امروزه شتاب‌دهنده‌های RF کاربری بیشتری یافته‌اند [۱]. شتاب‌دهنده‌های RF الکترون استفاده‌ی زیادی در کاربردهای صنعتی، پزشکی و پژوهشی دارند. در این میان شتاب‌دهنده الکترونی توان-متوسط با محدوده‌ی انرژی ۱ تا ۵ MeV برای پرتودهی صنعتی به ویژه پرتودهی مواد پلی‌مری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. در شتاب‌دهنده‌های موج رادیویی یکی از مؤلفه‌های اصلی و بسیار مهم آن کاواک است و از این‌رو فعالیت‌های گسترده‌ای برای طراحی و ساخت انواع کاواک توسط پژوهش‌گران بسیاری صورت گرفته است که عمدتاً به منظور استفاده در شتاب‌دهنده‌های خطی با انرژی بالا و با چندین سلول شتاب‌دهی پشت سر هم با ساختار موج ایستا و یا موج رونده در نوار بسامدی یو.اچ.اف (UHF) و ریزموج^(۱) طراحی و ساخته شده است [۳-۶]. در بین شتاب‌دهنده‌های نوار بسامدی (VHF)، شتاب‌دهنده‌های رودترون و ILU متداول‌ترین [۷-۱۰]. اولین نمونه‌ی تجاری شتاب‌دهنده‌ی رودترون توسط شرکت IBM بلژیک در سال ۱۹۹۳ ساخته شد. این شتاب‌دهنده دارای یک کاواک هم‌محور فولادی با لایه‌ی آبکاری شده‌ی داخلی مسی به ضخامت ۵۰ μm است که با بسامد تشدید ۱۰۷ MHz و در شیوه‌ی TEM کار می‌کند [۱۱]. طرح شتاب‌دهنده ILU اولین بار توسط پژوهش‌گران روسی در سال ۱۹۷۹ به ثبت رسید. کاواک این شتاب‌دهنده یک استوانه‌ی دو لایه است که لایه‌ی بیرونی آن از فولاد و لایه‌ی داخلی آن از جنس مس است. لایه‌ی داخلی برای ایجاد میدان الکتریکی لازم برای شتاب دادن باریکه‌ی الکترونی و لایه‌ی بیرونی برای حفظ خلأ کاواک و نصب اتصال‌ها استفاده می‌شود. این کاواک دارای دو دماغه به صورت نیمه‌های بالایی و پایینی است. تفنگ الکترونی در دماغه‌ی بالایی قرار می‌گیرد که الکترون‌های خروجی از آن تحت تأثیر اختلاف پتانسیل بین دو دماغه به سمت نیمه‌ی پایینی شتاب می‌گیرند. این کاواک با بسامد تشدید ۱۱۰ MHz و در شیوه‌ی TM_{۱۰} کار

امپدانس موازی مؤثر ($R_{S,eff}$) مد نظر قرار می‌گیرد که از ضرب امپدانس موازی در توان دوم ضریب زمان عبور حاصل می‌شود. همانند ضریب کیفیت هرچه این امپدانس بالاتر باشد از دست دادگی‌های کاواک دست یافت. این پارامتر در کاواک و شیوه‌ی شتاب‌دهی مورد نظر به شکل زیر قابل محاسبه است [۱۸]:

کاواک است و رسیدن به بالاترین مقدار ضریب کیفیت در کاواک همواره مد نظر پژوهش‌گران است تا بتوان به کم‌ترین از دست دادگی‌ها در کاواک دست یافت. این پارامتر در کاواک و شیوه‌ی شتاب‌دهی مورد نظر به شکل زیر قابل محاسبه است [۱۸]:

$$Q = \frac{2,405 \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}}{2R_S(1 + R/L)} \quad (3)$$

$$F = 1,64E^2 e^{-\lambda_0/E} \quad (5)$$

که در آن، F بسامد موج رادیویی برحسب MHz و E میدان الکتریکی برحسب $MV m^{-1}$ است. در موردی که از موج رادیویی با عرض تپ کم‌تر از ۱ ms استفاده می‌شود (مانند شتاب‌دهنده‌ی مورد نظر در این طراحی)، می‌توان حد آستانه را تا دو برابر حد به دست آمده از رابطه‌ی (۵)، در نظر گرفت. مشخصه‌های فنی شتاب‌دهنده‌ی مورد نظر که مبنای این طراحی قرار گرفت، در جدول ۱ درج شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده و برای دستیابی به یک کاواک استوانه‌ای با مشخصات بهینه در بسامد تشدید ۱۰۷,۵ MHz، هندسه‌های مختلف این کاواک مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شد.

از مقایسه‌ی کاواک‌های شکل ۱، در این طرح، کاواک استوانه‌ای با دماغه‌ی مخروطی و طول متقارن (شکل ۱-ج) انتخاب شد. شکل‌های ۲ تا ۴ نماهای مختلف کاواک و مؤلفه‌های مختلف آن را که توسط نرم‌افزار سالیید ورکس^(۸) ترسیم شده است نشان می‌دهد.

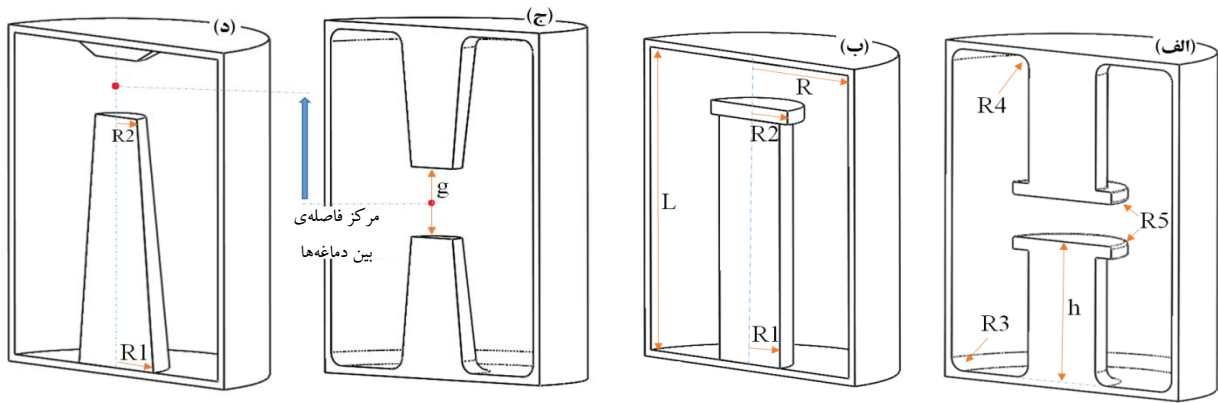
با توجه به رابطه‌ی (۱)، شعاع مهم‌ترین پارامتر مؤثر در تعیین بسامد تشدید کاواک است. به عبارت دیگر، در یک تک کاواک ساده‌ی استوانه‌ای، تغییر ارتفاع کاواک تأثیری در بسامد تشدید ندارد. با این وجود، در صورتی که درون کاواک دماغه ایجاد شود، ارتفاع کاواک اهمیت خود را باز می‌یابد. ایجاد دماغه در کاواک باعث افزایش ضریب زمان عبور^(۵) می‌شود. افزایش زمان عبور باعث می‌شود تا زمانی که ذره‌ی باردار تحت میدان الکتریکی قرار دارد ولتاژ بیش‌تری را تجربه نموده و در نتیجه ذره شتاب بیش‌تری یابد. بنابراین برای تمرکز میدان الکتریکی در مسیر عبور باریکه و افزایش ضریب زمان عبور و هم‌چنین همگرایی بهتر باریکه می‌توان در طراحی کاواک‌های استوانه‌ای از دماغه استفاده نمود. در حالت آرمانی ضریب زمان عبور برابر یک است و در طراحی نیز سعی می‌شود تا این ضریب به عدد یک نزدیک شود. این ضریب، اگر فاصله‌ی بین دو دماغه با g مشخص، چنین به دست می‌آید [۱۸].

$$T = \frac{\sin \frac{\pi g}{\beta \lambda}}{\frac{\pi g}{\beta \lambda}} \quad (4)$$

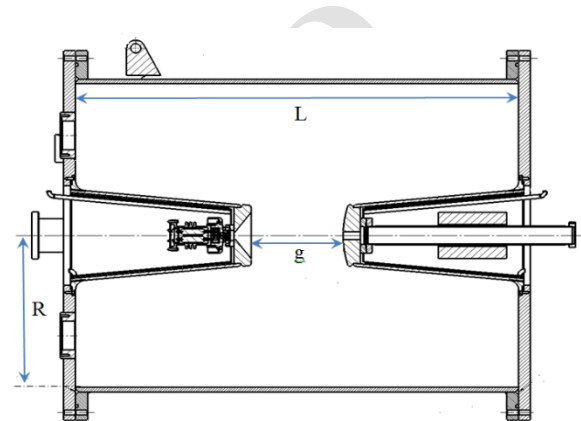
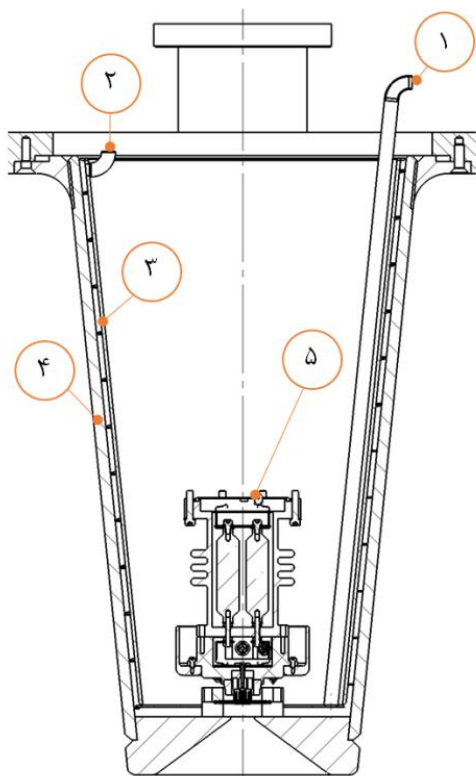
که در آن β نسبت سرعت ذره به سرعت نور و λ طول موج تشدید است. از دیگر پارامترهای مد نظر در طراحی کاواک، امپدانس موازی^(۶) است که تأثیر مستقیمی بر از دست دادگی‌های کاواک دارد. امپدانس موازی از رابطه‌ی کلی ($R_S = \frac{V^2}{P}$) قابل محاسبه است. که در آن V ولتاژ شتاب‌دهی و P از دست دادگی‌ها در بدنه‌ی کاواک است. به طور کلی در طراحی کاواک اغلب

جدول ۱. مشخصه‌های کلی شتاب‌دهنده‌ی الکترونی توان - متوسط مورد نظر برای ساخت

محدوده‌ی انرژی باریکه	حداکثر توان باریکه	حداکثر جریان باریکه	بسامد تشدید	مدت زمان تپ	بسامد تکرار تپ	طول پویش	حداقل بازده
(MeV)	(kW)	(mA)	(MHz)	(ms)	(Hz)	(cm)	
۵ تا ۱	۵۰	۱۰	۱۰۷,۵	۰,۵	۵۰	۹۰	۲۵%



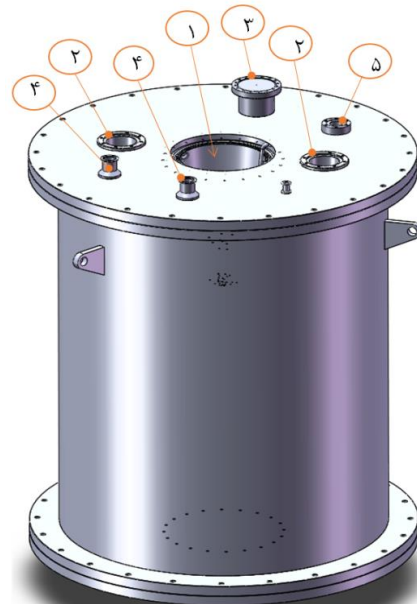
شکل ۱. (الف) کاواک استوانه‌ای با دماغه، دیسک و طول متقارن، (ب) کاواک استوانه‌ای با یک دماغه و دیسک تکی، (ج) کاواک استوانه‌ای با دماغه‌ی مخروطی شکل و با طول متقارن، (د) کاواک استوانه‌ای با دماغه‌ی مخروطی شکل و با طول نامتقارن.



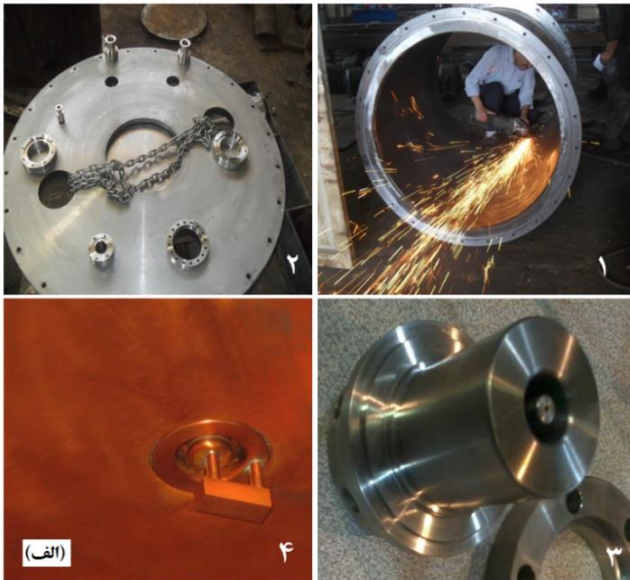
شکل ۲. برشی از طرح ابعادی کاواک طراحی شده.

شکل ۴. نمایی از نحوه‌ی خنک‌سازی دماغه‌ی کاواک طراحی شده و مؤلفه‌های آن شامل: (۱) ورودی آب خنک‌کننده، (۲) خروجی آب خنک‌کننده، (۳) جداره‌ی مسیر چرخش آب در امتداد دماغه، (۴) دیواره‌ی دماغه در داخل کاواک، (۵) تفنگ الکترونی.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، کاواک دارای دو محل جفت شدن توان RF به کاواک است. هرچند که در این کاواک برای تولید باریکه‌ی الکترونی با انرژی ۲/۵ MeV یک کوپلر نیز برای تغذیه کافی است، ولی برای افزایش بهره‌ی انرژی، از دو محل جفت‌شدگی توان استفاده شد. بنابراین، می‌توان دو منبع



شکل ۳. (۱) طرح سه‌بعدی کاواک طراحی شده که در آن دماغه‌ی اتصال تفنگ الکترونی نشان داده شده است، (۲) محل اتصال کوپلرهای جفت شده‌ی توان، (۳) محل اتصال پمپ خلأ، (۴) محل اتصال سنسورهای خلأ، (۵) محل اتصال فیدبک RF.



(الف)



(ب)

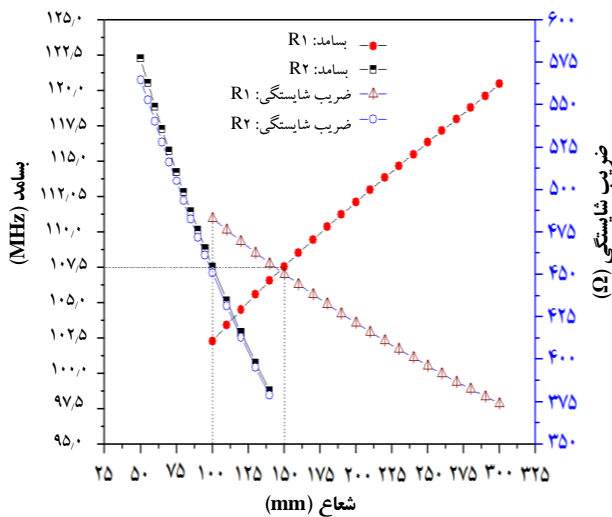
شکل ۵. (الف) نمایی از برخی قطعه‌ها و مرحله‌های ساخت کاواک، (۱) بدنه‌ی اصلی کاواک، (۲) صفحه‌ی بالای کاواک و اتصال‌های مربوطه، (۳) نمونه‌ی کاوه‌ی استفاده شده در اندازه‌گیری ضریب کیفیت، و (۴) حلقه‌ی کوپلر جفت‌شدگی توان نصب شده در داخل کاواک؛ و (ب) کاواک ساخته شده در حال انجام آزمایش.

مولد توان RF را به کاواک متصل نمود و در نتیجه میدان الکتریکی در فاصله‌ی بین دو دماغه برای شتاب را دو برابر کرد تا به باریکه‌ی الکترونی با انرژی ۵ MeV دست یافت. لازم به ذکر است که فاصله‌ی بین دماغه‌ها و شکل قوس رأس آن‌ها با توجه به حد کیلیپاتریک به گونه‌ای انتخاب شد که با اطمینان کافی، کاواک تحمل میدان الکتریکی لازم برای شتاب دادن الکترون تا انرژی ۵ MeV را داشته باشد و شکست ولتاژ رخ ندهد.

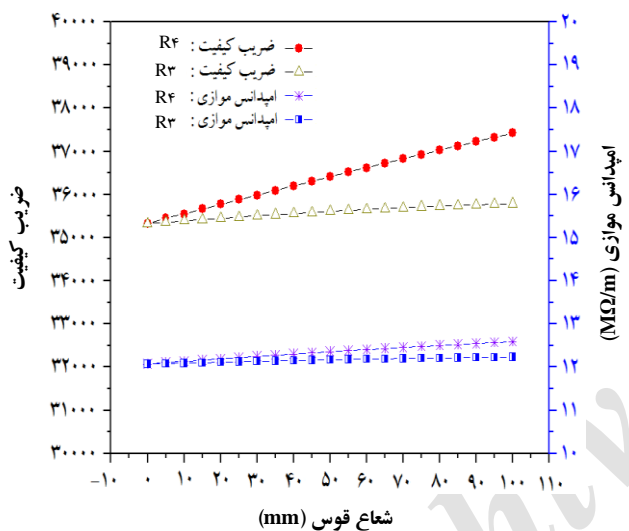
بدنه‌ی کاواک از جنس فولاد A-۳۷ با آبکاری داخلی مس به ضخامت $50 \mu\text{m}$ انتخاب شد. هم‌چنین ضخامت پوسته‌ی آن به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن تحمل فشار منفی ایجاد شده توسط پمپ خلأ در حد 10^{-7} mbar ، تحمل گرما یا تنش حرارتی ناشی از دست‌دادگی‌های توان RF با خنک‌کنندگی هوا را نیز داشته باشد. با وجود این، با توجه به نتایج، صرفاً در دماغه‌ی کاواک که دارای بیش‌ترین از دست‌دادگی‌ها است، مطابق شکل ۴ سیستم خنک‌سازی با آب در نظر گرفته شد.

در شکل ۵- الف تصویری از مرحله‌های ساخت کاواک و کاوه^(۹) برای اندازه‌گیری ضریب کیفیت و حلقه‌ی کوپلر نصب شده در داخل کاواک نشان داده شده است. با توجه به این که برای جفت‌شدگی توان موج رادیویی به کاواک، اتصال کوپلر الزامی است و اتصال آن باعث تغییر جزئی در بسامد تشدید می‌شود، در آزمایش‌های تجربی بسامد تشدید نهایی کاواک پس از نصب کوپلر در کاواک مطابق تصویر چهارم شکل ۵- الف، از طریق اندازه‌گیری پارامتر S_{11} اندازه‌گیری شد. هم‌چنین ضریب کیفیت کاواک نیز با استفاده از دو کاوه مطابق تصویر سوم شکل ۵- الف و به روش اندازه‌گیری پارامتر S_{12} و محاسبه‌ی افت ۳dB و

رابطه‌ی کلی $(Q = \frac{f_0}{\Delta f})$ اندازه‌گیری شد. این کاوه‌ها به صورت موقت در محل ۲ نشان داده شده در شکل ۳ نصب شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سعی شده است ابعاد کاوه‌ها تا حد ممکن کوچک باشد تا اثر کم‌تری بر تغییر بسامد تشدید کاواک داشته باشد و اندازه‌گیری ضریب کیفیت به حالت بی‌باری نزدیک باشد. اندازه‌گیری تجربی پارامترهای S_{11} و S_{12} در کاواک ساخته شده با استفاده از نورتک آنالایز^(۱۰) مدل HP-۸۷۱۲ET انجام شد. شکل ۵- ب تصویری از کاواک ساخته شده را در حال آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۶. تأثیر مخروطی کردن دماغه بر بسامد و ضریب شایستگی کاواک (R/Q).



شکل ۷. تأثیر گرد کردن گوشه‌های کاواک بر ضریب کیفیت و امپدانس موازی.

در شکل ۸ تأثیر فاصله‌ی بین دماغه‌ها (یا به عبارتی طول دماغه‌ها) بر بسامد تشدید، ضریب زمان عبور، ضریب شایستگی کاواک، امپدانس موازی و هم‌چنین امپدانس موازی مؤثر نشان داده شده است. با توجه به این نتیجه‌ها، مشاهده می‌شود که افزایش فاصله‌ی بین دماغه‌ها باعث افزایش بسامد تشدید و امپدانس موازی می‌شود. با وجود این، افزایش این فاصله باعث کاهش ضریب زمان عبور و در نتیجه کاهش امپدانس موازی مؤثر و ضریب شایستگی می‌شود. بنابراین، طول یا فاصله‌ی بین دماغه‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که ضمن رعایت حد آستانه‌ی شکست ولتاژ در بین دماغه‌ها، بتوان به بسامد تشدید مورد نظر و ضریب زمان عبور بهینه دست یافت.

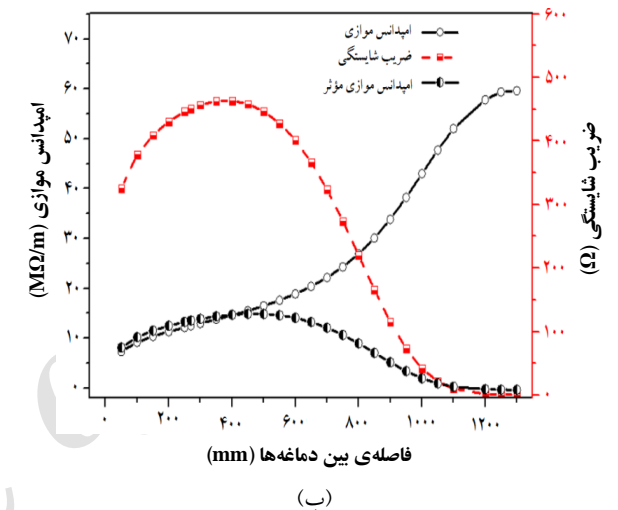
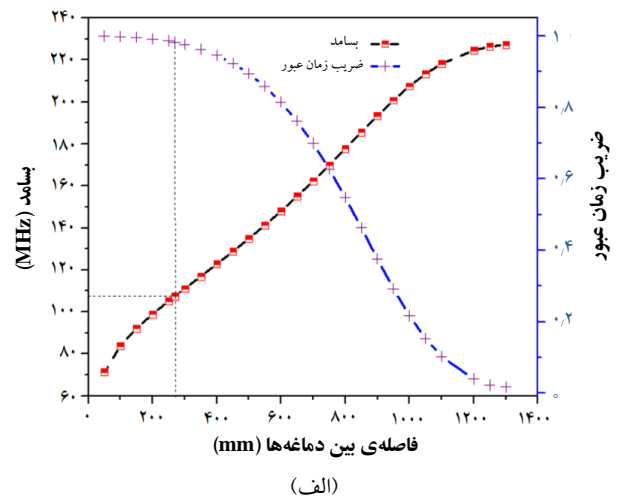
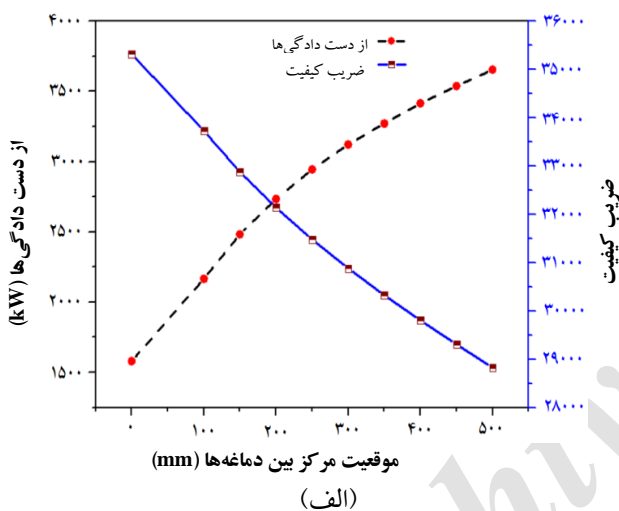
۳. یافته‌ها و بحث

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، در این پژوهش طراحی ابعادی کاواک براساس بسامد مولدهای RF موجود در نوار (VHF) (بسامد تشدید ۱۰۷/۵ MHz) انجام شد. شایان ذکر است، علاوه بر شعاع استوانه که مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده‌ی بسامد تشدید در شیوه‌ی نوسانی مورد نظر کاواک است، طول یا فاصله‌ی بین دماغه‌ها و شکل این دماغه نیز تأثیر زیادی بر کاهش بسامد تشدید کاواک و سایر پارامترهای مؤثر در طراحی کاواک دارد. در شکل ۶ نتیجه‌های شبیه‌سازی مربوط به تأثیر شکل مخروطی دماغه براساس پارامترهای ابعادی نشان داده شده در شکل ۱ یعنی تغییر شعاع قاعده (R1) و رأس (R2) بر بسامد تشدید و ضریب شایستگی کاواک (R/Q) نشان داده شده است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که افزایش شعاع قاعده‌ی دماغه، باعث افزایش بسامد و کاهش ضریب شایستگی می‌شود. هم‌چنین افزایش شعاع رأس دماغه باعث کاهش بسامد و کاهش ضریب شایستگی می‌شود. بنابراین برای رسیدن به بسامد مورد نظر باید حالت بهینه‌ی ضریب شایستگی انتخاب شود. بر این اساس می‌توان گفت که دماغه‌ی مخروطی شکل با حداقل مقدار ممکن شعاع رأس دماغه نسبت به دماغه‌ی استوانه‌ای ساده گزینه‌ی مناسب‌تری است.

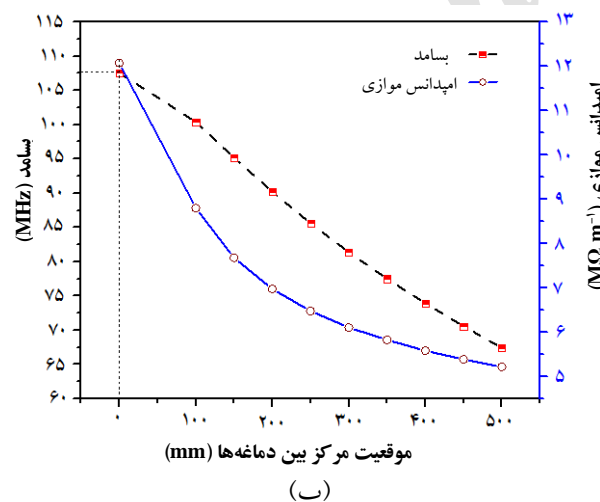
در شکل ۷ تأثیر شعاع قوس در گوشه‌های کاواک بر ضریب کیفیت و امپدانس موازی نشان داده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که ایجاد قوس در گوشه‌ها باعث بهبود ضریب کیفیت و امپدانس موازی می‌شود. با وجود این، تأثیر افزایش قوس در گوشه‌ی قاعده‌ی دماغه‌ها (R4) نسبت به گوشه‌های کاواک (R3) بیش‌تر است. بنابراین، با در نظر گرفتن مشکلات ساخت از ایجاد قوس در گوشه‌های کاواک صرف نظر شد و صرفاً نسبت به ایجاد قوس با شعاع بهینه شده‌ی ۳۰ mm در قاعده‌ی دماغه اقدام شد. شعاع این قوس به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن حفظ بسامد تشدید مد نظر، هیچ‌گونه برخوردی با محل اتصال کوپلرهای جفت‌ساز توان نداشته باشد.

کوچک کردن شعاع کاواک به بسامد تشدید مد نظر بازگشت، اما این کار باعث افزایش از دست دادگی‌ها می‌شود. بنابراین در این طرح موقعیت مرکز فاصله‌ی بین دماغه‌های مخروطی شکل در مرکز کاواک در نظر گرفته شد.

در شکل ۱۰-الف تأثیر تغییر طول دماغه‌ها به صورت متقارن یا در واقع تغییر فاصله‌ی بین دماغه‌ها در حالتی که مرکز فاصله‌ی دماغه‌ها در مرکز کاواک قرار دارد بر توزیع میدان الکتریکی در امتداد محور شتاب، نشان داده شده است. هم‌چنین در شکل ۱۰-ب تأثیر تغییر موقعیت مرکز فاصله‌ی بین دماغه‌ها (با طول ثابت ۲۷۰ mm) در امتداد طول کاواک و به سمت دیواره‌ی بالایی بر توزیع میدان الکتریکی در امتداد محور شتاب، نشان داده شده است.



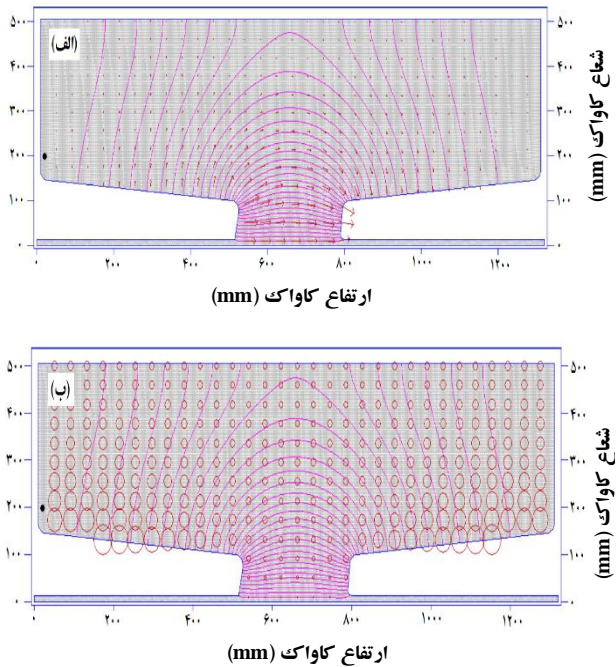
شکل ۸. الف) تأثیر فاصله‌ی دماغه‌ها بر بسامد و ضریب زمان عبور، ب) امپدانس موازی، امپدانس موازی مؤثر و ضریب شایستگی (R/Q).



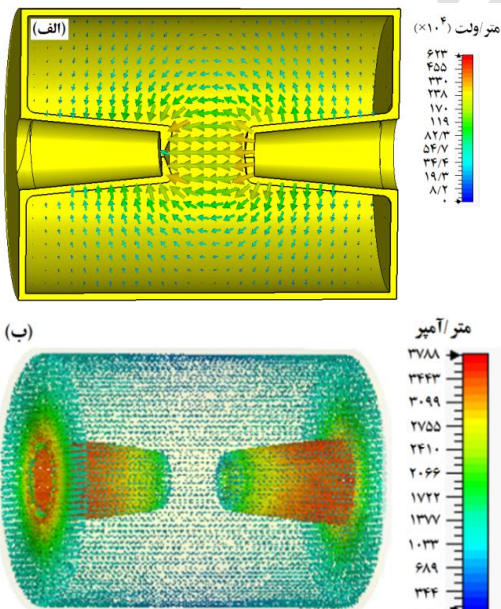
شکل ۹. الف) تأثیر جابه‌جایی مرکز فاصله‌ی بین دماغه‌ها بر از دست دادگی‌ها و ضریب کیفیت، و ب) بسامد و امپدانس موازی.

در شکل ۹ تأثیر جابه‌جایی مرکز فاصله‌ی بین دماغه‌ها بر میزان از دست دادگی‌ها، ضریب کیفیت، بسامد تشدید و امپدانس موازی نشان داده شده است. هدف از این بررسی‌ها، انتخاب موقعیت بهینه‌ی مرکز فاصله‌ی بین دماغه‌ها و به عبارتی طول دماغه‌ها بود (شکل ۱). در شکل ۹ مرکز صفر حاکی از این است که مرکز فاصله‌ی بین دماغه‌ها و یا گاف شتاب، درست در مرکز کاواک قرار دارد و با افزایش این مقدار مرکز گاف شتاب مطابق شکل ۱-ب و ۱-د به سمت دیواره‌ی بالایی کاواک حرکت می‌کند. بر این اساس جابه‌جایی فاصله‌ی بین دماغه‌ها به سمت دیواره‌ها باعث کاهش بسامد تشدید، ضریب کیفیت و امپدانس موازی و افزایش از دست دادگی‌ها در کاواک می‌شود. با توجه به شکل ۹-ب، در حالتی که گاف شتاب در مجاورت دیواره‌ی کاواک واقع شود (افزایش مرکز فاصله‌ی بین دماغه‌ها)، بسامد تشدید کاواک کاهش می‌یابد. در این شرایط گرچه می‌توان با

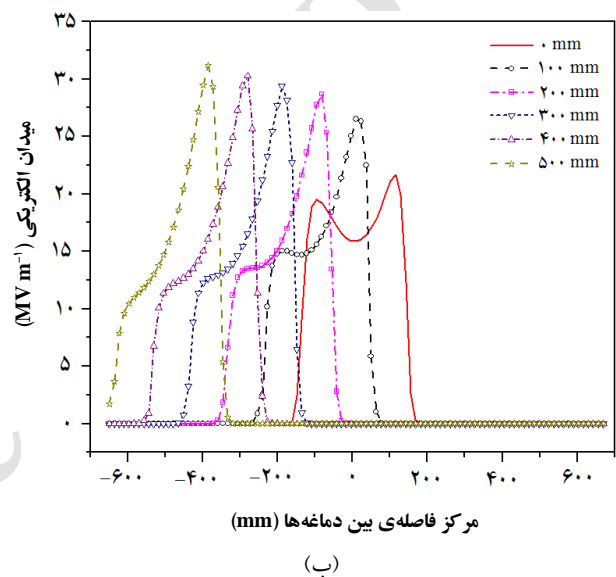
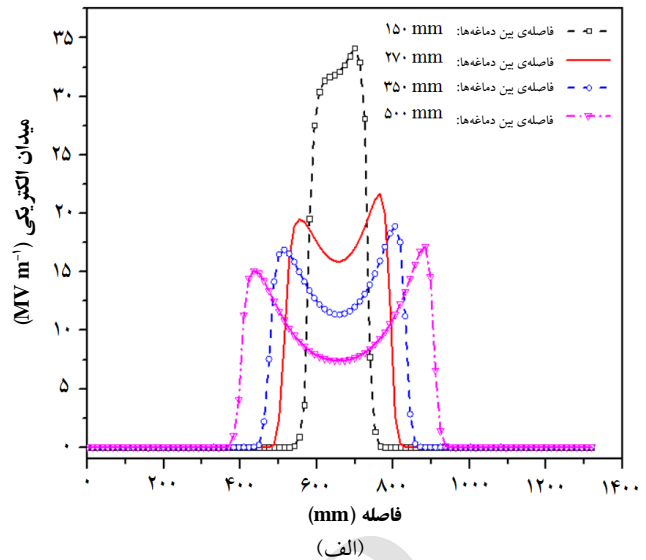
کاواک از طریق هوا لحاظ شد. هم‌چنین، با توجه به توزیع میدان مغناطیسی، بهترین محل برای قرار دادن کوپلر جفت‌ساز توان RF، نزدیک‌ترین محل ممکن به قاعده‌ی دماغه کاواک است، تا کوپلر در معرض حداکثر میدان مغناطیسی ممکن قرار داشته باشد.



شکل ۱۱. (الف) شکل دوبعدی میدان الکتریکی و (ب) میدان مغناطیسی، در کاواک شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار سوپرفیش.



شکل ۱۲. (الف) شکل سه‌بعدی میدان الکتریکی برحسب ولت بر متر و (ب) جریان سطحی برحسب آمپر بر متر، در کاواک شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار سی.اس.تی.



شکل ۱۰. (الف) نمودار توزیع میدان الکتریکی بر روی محور شتاب به صورت تابعی از فاصله‌ی بین دماغه‌ها و (ب) تغییر موقعیت مرکز بین دماغه‌ها.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در کاواک طراحی شده با دماغه‌های مخروطی شکل متقارن توسط دو نرم‌افزار سوپرفیش و سی.اس.تی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمرکز حداکثر میدان الکتریکی در فاصله‌ی بین دو دماغه و حداکثر میدان مغناطیسی بر روی بدنه دماغه‌ها است. میدان مغناطیسی ایجاد شده، باعث توزیع جریان سطحی در بدنه‌ی کاواک می‌شود که با توجه به شکل ۱۲-ب بیش‌ترین جریان در نزدیک قاعده‌ی دماغه‌ها است. بنابراین، بیش‌ترین از دست دادگی‌های کاواک در این قسمت یعنی قاعده‌ی مخروط‌ها رخ می‌دهد. از این‌رو در طراحی، صرفاً برای دماغه‌ها سیستم خنک‌سازی با آب در نظر گرفته شد و خنک‌سازی بدنه‌ی بیرونی

نتیجه‌های اندازه‌گیری توسط پارامتر S_{12} و محاسبه‌ی ضریب شبیه‌سازی، به گونه‌ای صورت گرفت که ضمن دستیابی به بسامد تشدید 107.5 MHz با در نظر گرفتن مشکلات و امکان‌ها در ساخت کاواک و فضای مناسب برای جانمایی تفنگ الکترونی و مغناطیس همگرایی در دماغه‌های ورودی و خروجی و حداقل فاصله‌ی ممکن بین دماغه‌ها، بتوان به مقادیرهای بهینه برای پارامترهای مهم در طراحی کاواک دست یافت تا با کم‌ترین از دست دادگی‌ها و صرف حداقل توان مولد موج رادیویی، میدان الکتریکی لازم برای شتاب دادن باریکه‌ی الکترونی تا انرژی 5 MeV فراهم شود.

ابعاد بهینه‌ی حاصل از شبیه‌سازی این کاواک در جدول ۲ درج شده است. با توجه به ابعاد کاواک طراحی شده (جدول ۲) و مقادیرهای مفروض در جدول ۱، نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی این کاواک با استفاده از نرم‌افزارهای سوپرفیش، سی.اس.تی و اچ.اف.اس برای پارامترهای اساسی کاواک در حالت بی‌باری از قبیل بسامد تشدید، ضریب کیفیت و امپدانس موازی در جدول ۳ فهرست شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتیجه‌های این سه نرم‌افزار از تطابق خوبی برخوردار است.

در شکل ۱۳- الف بسامد تشدید اندازه‌گیری شده توسط پارامتر S_{11} از طریق تجربه و شبیه‌سازی با نرم‌افزار سی.اس.تی پس از نصب کوپلر جفت‌ساز توان نشان داده شده است. بسامد تشدید کاواک ساخته شده پس از نصب کوپلر جفت‌ساز توان با ده بار تکرار آزمایش برابر $107.62 \pm 0.13 \text{ MHz}$ به دست آمد که تطابق قابل قبولی با نتیجه‌های شبیه‌سازی داشت. شکل ۱۳- ب

نتیجه‌های اندازه‌گیری توسط پارامتر S_{12} و محاسبه‌ی ضریب کیفیت به صورت تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. بر این اساس ضریب کیفیت اندازه‌گیری شده به صورت تجربی با ده بار تکرار برابر با 25800 با خطای کم‌تر از 2% و ضریب کیفیت حاصل از شبیه‌سازی در حدود 27900 به دست آمد. اختلاف جزئی در بسامد مرکزی در هنگام اندازه‌گیری ضریب کیفیت، ناشی از برداشتن کوپلرهای جفت‌ساز توان و جای‌گزینی موقت کاوه‌های کوچک برای اندازه‌گیری ضریب کیفیت است. در واقع وجود کوپلر یا کاوه‌ها در کاواک باعث افزایش جزئی بسامد تشدید می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیرهای نشان داده شده در جدول ۳، حاصل شبیه‌سازی در محیط ایجین‌مد^(۱۱) نرم‌افزار و مربوط به حالت بی‌باری است. در واقع در این حالت هیچ کوپلر یا کاوه‌ی اندازه‌گیری به کاواک متصل نیست. ولی با توجه به این که برای جفت‌شدگی توان موج رادیویی به کاواک اتصال کوپلر الزامی است، این مقادیرها در حد کمی تغییر می‌کند. هر چند که سعی شده برای اندازه‌گیری ضریب کیفیت، ابعاد کاوه تا حد ممکن کوچک باشد تا اندازه‌گیری‌ها به حالت بی‌باری نزدیک شود. با وجود این، تأثیر اتصال کوپلر یا کاوه به کاواک باعث تغییر جزئی بسامد تشدید و کاهش ضریب کیفیت شده است. ولی با توجه به این که برای سیستم مولد موج رادیویی پهنای نوار بسامدی 500 kHz در نظر گرفته شده است، این اختلاف جزئی در بسامد تشدید قابل قبول است.

جدول ۲. ابعاد نهایی کاواک شتاب‌دهنده‌ی طراحی شده

قطر داخلی (mm)	ضحات پوسته (mm)	ارتفاع داخلی (mm)	ارتفاع خارجی (mm)	شعاع قاعده‌ی دماغه (mm)	شعاع رأس دماغه (mm)	ارتفاع دماغه‌ها (mm)	فاصله‌ی بین دماغه‌ها (mm)
۹۸۶	۲۵	۱۳۰۰	۱۴۹۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۱۵	۲۷۰.۲

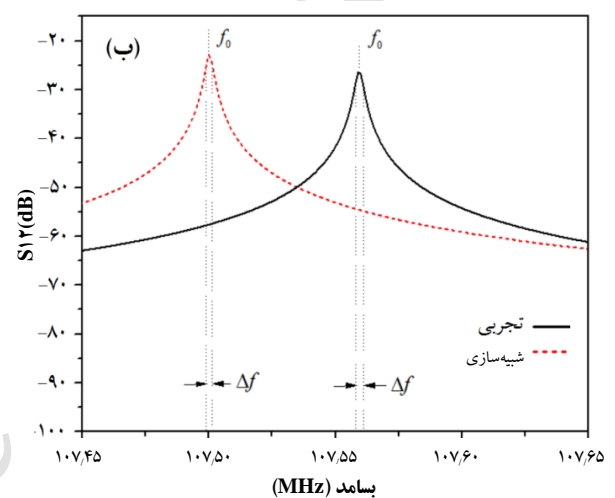
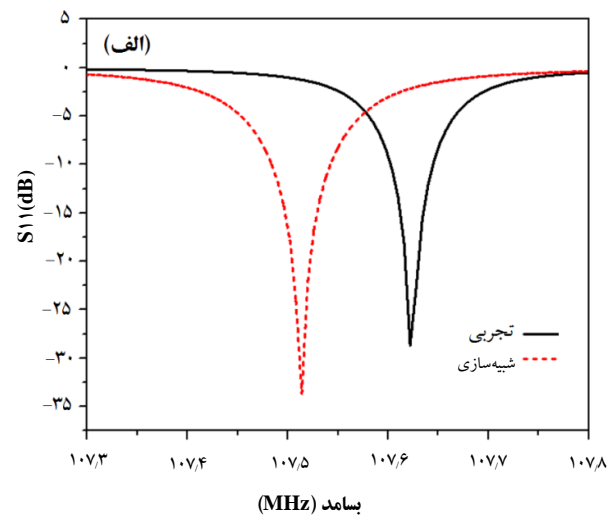
جدول ۳. پارامترهای اساسی کاواک طراحی شده، به دست آمده از شبیه‌سازی توسط سه نرم‌افزار سی.اس.تی، سوپرفیش و اچ.اف.اس.

نرم‌افزار شبیه‌سازی	بسامد تشدید (MHz)	امپدانس موازی (MΩ/m)	ضریب کیفیت (شرایط بی‌باری)
سی.اس.تی	۱۰۷.۴۹	۱۲.۹۴	۳۵۹۸۱.۴
سوپرفیش	۱۰۷.۵۶	۱۲.۵۱	۳۵۳۱۹.۵
اچ.اف.اس.	۱۰۷.۵۹	۱۲.۸۵	۳۵۷۲۱.۴

دماغه‌ها و یا فاصله‌ی بین آن‌ها و مرکز این فاصله نیز در بهترین حالت به گونه‌ای طراحی شد که ضمن حفظ بسامد تشدید 107.5 MHz و حد آستانه‌ی شکست ولتاژ، میدان الکتریکی لازم برای شتاب دادن باریکه‌ی الکترونی تا انرژی 5 MeV فراهم شود. پس از بهینه‌سازی و تعیین ابعاد نهایی مجدداً پارامترهای اساسی کاواک طراحی شده با استفاده از نرم‌افزارهای سی.اس.تی، سوپرفیش و اچ.اف.اس.اس بررسی شد که تطابق خوبی را نشان داد. پس از تکرار شبیه‌سازی‌ها با مش‌بندی‌های مختلف و اطمینان از نتیجه‌های آن‌ها، کاواک طراحی شده ساخته و آزمون‌های عملی بر روی آن انجام شد. نتیجه‌ها نشان داد که این کاواک در بسامد تشدید 107.62 MHz دارای مقدارهای بهینه است و برای استفاده در شتاب‌دهنده‌ی الکترونی با باریکه‌ی خروجی ۱ تا 5 MeV و حداکثر توان باریکه‌ی 50 kW به منظور پرتودهی صنعتی به ویژه مواد پلی‌مری مناسب است.

پی‌نوشت‌ها

1. Microwave
2. CST
3. Superfish
4. HFSS
5. Transit Time Factor
6. Shunt Impedance
7. Kilpatrick Limit
8. Solid Works
9. Probes
10. Network Analyzer
11. Eigenmode



شکل ۱۳. (الف) بسامد تشدید اندازه‌گیری شده توسط پارامتر S_{11} پس از نصب کوپلر جفت‌ساز توان، (ب) اندازه‌گیری ضریب کیفیت براساس اندازه‌گیری پارامتر S_{12} در کاواک ساخته شده حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار سی.اس.تی.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله مرحله‌های طراحی و ساخت کاواک یک شتاب‌دهنده‌ی الکترون صنعتی توان متوسط در نواری بسامدی (VHF) تشریح شد. برای رسیدن به طرح نهایی کاواک، ابتدا هندسه‌های مختلف یک کاواک استوانه‌ای با یک‌دیگر مقایسه شد. براساس داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای اساسی هم‌چون بسامد تشدید، ضریب کیفیت، امپدانس موازی، ضریب شکستگی کاواک، از دست دادگی‌ها و ضریب زمان عبور، بهترین ساختار کاواک برای استفاده در شتاب‌دهنده‌ی مورد نظر، کاواک استوانه‌ای با دماغه‌های مخروطی شکل به دست آمد. هم‌چنین طول

مراجع

- [1] P.J. Bryant, A brief history and review of accelerators, CERN Accelerator School Report (1994).
- [2] A.J. Berejka, Prospects and challenges for the industrial use of electron beam accelerators, International Atomic Energy Agency Document Reports (2011).
- [3] F. Ghasemi, F. Abbasi Davani, Investigation of using shrinking method in construction of Institute for Research in Fundamental Sciences Electron Linear Accelerator TW-tube (IPM TW-Linac tube), Journal of Instrumentation, 10, P06011 (2015).
- [4] I.A. Labanc, Investigation of electrical axes of TESLA superconducting accelerating cavities, Ph.D. Thesis, Slovak University of Technology, Germany, (February 2007).
- [5] M. Chodorow, E.L. Ginzton, W.W. Hansen, R.L. Kyhl, R.B. Neal, W.K.H. Panofsky, The Staff, Stanford high-energy linear electron accelerator, Review of Scientific Instruments, 26 (1955) 134-204.
- [6] S.V. Kutsaev, N.P. Sobenin, A.Y. Smirnov, D.S. Kamenschikov, Design of hybrid electron Linac with standing wave buncher and traveling wave structure, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 636 (2011) 13-30.
- [7] T. Fujisawa, T. Hirashima, T. Katori, S. Wada, S. Kohmoto, M. Odera, Compact RF accelerator for electron beam irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B., 124 (1997) 120- 127.
- [8] V. L. Auslender, ILU-type electron accelerators for industrial technologies, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B, 89 (1994) 46-48.
- [9] J.M. Bassaler, J.M. Capdevila, O. Gal, F. Lainé, A. N'Guyen, J.P. Nicolai, K. Umiastowski, Rhodotron, an accelerator for industrial irradiation, Proceedings of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 68 (1992) 92-95.
- [10] V.L. Auslender, A.A. Bryazgin, B.L. Faktorovich, V.A. Gorbunov, E.N. Kokin, M.V. Korobeinikov, Accelerators for E-beam and X-ray processing, Radiation Physics and Chemistry, 63 (2002) 613-615.
- [11] Y. Jongen, M. Abs, F. Genin, A. N'Guyen, J.M. Capdevila, D. Defrise, The Rhodotron, a new 10 MeV, 100 kW, CW metric wave electron accelerator, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 79 (1993) 865-870.
- [12] V.L. Auslender, G.I. Budker, G.B. Glagolev, A.A. Livshits, G.N. Ostreiko, A.D. Panfilov, V.A. Polyakov, Radio frequency electron accelerator, United States patent, Patent Number 4140942 (1979).
- [13] A.M. Poursaleh, I. Jabbari, H. Khalafi, Study and comparison of all type of ILU accelerators, 1st National Conference on Particle Accelerator and their Application, Tehran Amir Kabir University, (2013).
- [14] V.L. Auslender, V.V. Bezuglov, A.A. Bryazgin, M.V. Korobeynikov, A.V. Sidorov, E.A. Shtarklev, Electron beam treatment line with ILU-6 machine for medicinal raw decontamination, Proceedings of RuPAC 2008, Russia (2008).
- [15] V.L. Auslender, I.G. Makarov, G.N. Ostreiko, A.D. Panfilov, V.S. Podobae, N.D. Romashko, V. Tarnetsky, M.A. Tiunov, V. Tkachenko, Narrowing of the Electron Energy Spectrum in the ILU-10 Accelerator, Instruments and Experimental Techniques, 52 (2009) 574-580.
- [16] A.M. Poursaleh, H. Khalafi, S. Haseltalab, M. Mortazavi, S.K. Mousavi, F. Ghasemi, K. Jekar, Design and construction of Iran's first high-power industrial electron accelerator, Iranian Journal of Physics Research, 15(2) (2015) 137-144.
- [17] A. Chao, M. Tigner, Handbook of Accelerator Physics and Engineering, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2nd printing (2002).
- [18] T. Wangler, Principles of RF linear accelerators, John Wiley & Sons (1998).
- [19] P.M. Lapostolle, A. Septier, Linear accelerators, North-Holland publishing company (1970).