

طراحی کاواک‌های تیوب شتاب‌دهی موج ایستا برای شتاب‌دهنده خطی الکترون ۶ مگا الکترون ولت

سارا زارعی^۱، فریدون عباسی دوانی^۲، محمد لامعی رشتی^۱ و فرشاد قاسمی^۱

۱. پژوهشکده فیزیک و شتابگر، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۲. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

در شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون کم انرژی، تیوب‌های شتاب‌دهی موج ایستای جفت‌شدگی جانب در مد $\pi/2$ به علت گرا دیان بالای شتاب‌دهی و حساسیت کم نسبت به خطای ساخت، کاربرد گسترده‌ای دارند. استفاده از نرم‌افزارهای مختلف به منظور طراحی این نوع تیوب‌ها در حال حاضر بسیار مرسوم است. در این مقاله مراحل طراحی کاواک‌های شتاب‌دهی و جفت‌شدگی برای شتاب‌دهنده خطی الکترون با انرژی ۶ مگا الکترون ولت با استفاده از کد سوپرفیش و نرم‌افزار کامسول شرح داده شده است. کد سوپرفیش از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار کامسول از روش اجزا محدود برای حل معادلات استفاده می‌کند. همچنین ابعاد کاواک‌های شتاب‌دهی و جفت‌شدگی و حفره جفت‌شدگی جهت دستیابی به بسامد تشدید ۲۹۹۸۵ مگاهرتز و ثابت جفت‌شدگی ۰/۰۱۱۲ طراحی شده است. با استفاده از نتایج این مقاله و نیز پس از طراحی مجزای درگاه تزریق توان RF ، زمینه ساخت تیوب شتاب‌دهی ۶ مگا الکترون ولت فراهم خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده خطی، تیوب شتاب‌دهی، نرم‌افزار کامسول، کد سوپرفیش

۱. مقدمه

به طور مؤثری اتصال کوتاه است و توان RF درون ساختار بازتاب می‌کند. هرکدام از انواع این نوع شتاب‌دهنده مزایا و معایبی دارند که در مرجع [۱] به آنها اشاره شده است. مطالعه موردی نشان می‌دهد که برای شتاب‌دهنده‌های کوچک با انرژی حدود ۶ مگا الکترون ولت که کاربرد گسترده‌ای در پزشکی و بازرسی محموله‌های کامیونی در گمرک دارند، شتاب‌دهنده نوع موج ایستا مناسب‌تر است. هدف این مقاله طراحی و ارائه ابعاد کاواک‌های تیوب شتاب‌دهی از نوع جفت‌شدگی جانب است. برای تحقق این منظور ابتدا اشاره‌ای به نحوه طراحی کاواک‌های

تیوب شتاب‌دهی، از بخش‌های اصلی شتاب‌دهنده خطی الکترون است. شتاب‌دهنده‌های خطی بر اساس نوع تیوب شتاب‌دهی به انواع شتاب‌دهنده موج رونده و موج ایستا تقسیم می‌شوند. در تیوب‌های شتاب‌دهی موج رونده توان RF در یک جهت ساختار شتاب‌دهنده پیش می‌رود و توان باقیمانده در انتهای موجبر شتاب‌دهنده، در بار^۱ جذب می‌شود. اما در شتاب‌دهنده‌های موج ایستا ابتدا و انتهای ساختار شتاب‌دهنده

^۱. Load

بین دو کاواک مجانب φ ، معادله (۲) برقرار است. طول هر کاواک شتاب‌دهی از معادله (۲) محاسبه می‌شود [۲].

$$l = \frac{\beta\lambda\varphi}{2\pi} \quad (2)$$

پایه نظری برای طراحی تیوب شتاب‌دهی جهت نوسان در بسامد تشدید با استفاده از مدل مداری برای شتاب‌دهنده خطی با جفت‌شدگی جانب توسط ناگل ارائه شده است [۲]. جفت‌شدگی در شتاب‌دهنده‌های خطی با جفت‌شدگی جانب توسط حفره‌های جفت‌شدگی انجام می‌شود که این حفره‌ها جایی قرار می‌گیرند که میدان مغناطیسی بیشینه و میدان الکتریکی کمینه باشد و در حقیقت توان از یک کاواک به کاواک مجاورش توسط القای متقابل انتقال داده می‌شود. بر اساس رابطه اختلال اسلاتر^۱ [۳] وجود حفره جفت‌شدگی در محل میدان مغناطیسی قوی باعث کاهش بسامد تشدید می‌شود. با تقریبی ساده از مدل مداری نشان داده می‌شود که مربع بسامد تشدید هر کاواک با عکس حاصل ضرب ظرفیت سلفی کاواک L و ظرفیت خازنی کاواک C متناسب است [۵]. بر اساس نظریه اختلال اسلاتر وجود حفره جفت‌شدگی ظرفیت سلفی را افزایش و در نتیجه بسامد تشدید را کاهش می‌دهد. در حالت کلی به منظور ثابت نگهداشتن بسامد تشدید بعد از ایجاد، حذف یا تغییر حفره جفت‌شدگی ظرفیت خازنی کاواک‌های شتاب‌دهی توسط تغییر طول دماغه تنظیم می‌شود و ظرفیت سلفی با تغییر قطر کاواک تغییر می‌کند [۲].

۲.۲. طراحی کاواک شتاب‌دهی در کد سوپرفیش

ساختار تیوب شتاب‌دهی شامل زنجیره‌ای از کاواک‌ها است که در مد TM_{01} تشدید می‌کنند. برای طراحی و شبیه‌سازی کل تیوب شتاب‌دهی لازم است تا ابتدا هر کاواک به تنهایی طراحی شود تا در بسامد مورد نظر تشدید کند و همچنین پارامترهای الکترومغناطیسی مطلوب حاصل شود. هدف این کار طراحی ابعاد کاواک‌های شتاب‌دهی و کاواک‌های جفت‌شدگی و همچنین بررسی خطای ساخت است.

برای انجام این هدف از کد سوپرفیش استفاده می‌شود که

بسامد رادیویی خواهد شد، سپس نحوه طراحی‌ها و ابزارهای مورد استفاده جهت طراحی توضیح داده خواهد شد. نتایج حاصل از طراحی شامل ابعاد کاواک‌ها و پارامترهای مهم به دست آمده از طراحی در بخش سوم مقاله ارائه می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

در ابتدای ساخت و به کارگیری کاواک‌های تشدید برای شتاب‌دهنده خطی الکترون، پیش از استفاده از محاسبات عددی، قسمت‌های تیوب شتاب‌دهی ساخته و پس از بررسی نتایج آزمایش‌ها دوباره طراحی و تصحیح می‌شدند و این فرایند آن قدر انجام می‌شد تا اینکه پارامترهای مطلوب به دست آید. اما از چندین دهه قبل طراحی کاواک‌های تیوب شتاب‌دهی شتاب‌دهنده خطی به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف انجام شده است. در برخی موارد (مانند ساختارهای بزرگ با اجزای خطوط باریکه زیاد) به علت حجم بالای محاسبات و زمان، نمی‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای عددی کل ساختار را شبیه‌سازی کرد. در این موارد تنها قسمتی از ساختار شبیه‌سازی شده و نتایج با اندازه‌گیری تست سرد مقایسه می‌شود. هنگامی که تنها بخشی از ساختار مدل شود، خصوصیات باریکه الکترون را می‌توان به صورت جداگانه در هر بخش تخمین زد [۱].

۲.۱. اساس طراحی کاواک‌ها

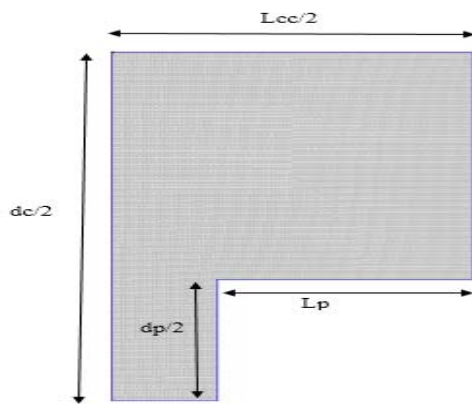
هر کاواک یک تشدیدگر بسامد رادیویی است که ابعاد اولیه آن با حل معادلات ماکسول قابل تخمین زدن است. با توجه به معادله (۱) که از حل معادلات ماکسول برای موجبر استوانه حاصل شده است، تخمین اولیه شعاع کاواک به دست می‌آید [۲]

$$\gamma = \frac{\sqrt{405c}}{2\pi f} \quad (1)$$

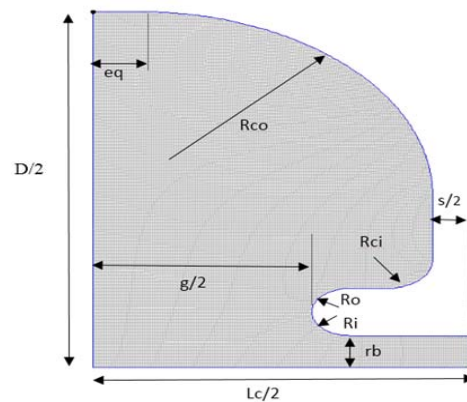
در معادله (۱)، c سرعت نور، f بسامد تشدید و γ شعاع کاواک است.

به منظور همزمان کردن حرکت خوشه الکترون و میدان RF ، بین طول ساختار تناوبی l ، طول موج λ و جابه‌جایی فاز

۱. Slater's Perturbation



شکل ۲. هندسه کاواک جفت شدگی.



شکل ۱. هندسه کاواک شتاب‌دهی.

شبیه سازی حداقل امیدانس موازی مؤثر برابر با ۱۱۵ مگا اهم بر متر در نظر گرفته شده است تا نسبت به دستیابی به حداقل امیدانس موازی ۱۰۰ مگا اهم بر متر بعد از ساخت اطمینان حاصل شود. نکته مهم دیگری که در طراحی هندسه کاواک شتاب‌دهی باید به آن توجه کرد، نسبت بیشینه میدان سطحی (روی سطح داخلی) به میانگین میدان محوری است. طراحی باید به گونه ای انجام شود که این نسبت تا حد امکان کوچک باشد تا میدان سطحی از بیشینه میدان سطحی قبل از شکست کمتر باشد. بر اساس رابطه کیلپاتریک^۲ بیشینه میدان سطحی برای بسامد ۲۹۹۸٫۵ مگاهرتز برابر با ۴۶٫۸۲۲ مگا ولت بر متر است، که با در نظر گرفتن ضریب b برابر با ۱٫۸ این مقدار ۸۴٫۲۷۹۶ مگا ولت بر متر است [۶]. در نتیجه بیشینه میدان سطحی که در نواحی اطراف دماغه‌های مخروطی وجود دارد باید کمتر از ۸۴٫۲۷۹۶ مگا ولت بر متر باشد که این امر با در نظر گرفتن مقدار نسبت بیشینه میدان روی سطوح داخلی کاواک به متوسط گرایان شتاب‌دهی محوری کمتر از ۴ امکان‌پذیر است.

با توجه به اینکه ضریب کیفیت به دلیل عملیات لحیم کاری وجود ناخالصی‌ها و ناکاملی‌های سطحی مس و همچنین اعمال برش‌های جفت شدگی در حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد، مقدار ضریب کیفیت قابل قبول در طراحی حداقل ۱۷۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

برای طراحی الکترومغناطیسی دارای دقت و سرعت بالا است. از زمان استفاده از برنامه های عددی، کد سوپرفیش، که یک برنامه تفاضل محدود^۱ دوبعدی با تقارن محوری است، بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. کد سوپرفیش برای طراحی سیستم های موجبری با تقارن محوری و برای صحت سنجی طراحی‌ها به علت دقت بسیار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشکل این کد این است که برای هندسه‌های غیر متقارن جوابگو نیست. از این جهت از این کد جهت طراحی کاواک‌ها با تقارن محوری بدون در نظر گرفتن جفت شدگی استفاده می‌شود.

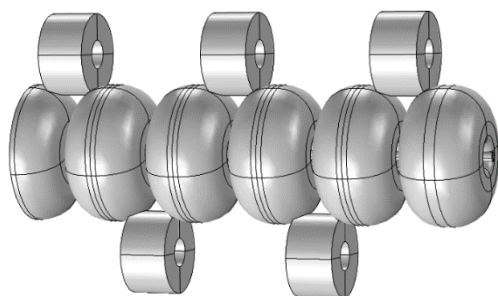
در مراحل شبیه سازی دوبعدی با تغییر ابعاد هندسی، پارامترهای الکترومغناطیسی مطلوب شامل بسامد تشدید، ضریب کیفیت، امیدانس موازی و نسبت بیشینه میدان سطحی به میانگین میدان محوری محاسبه می‌شود.

در شکل ۱ کاواک شتاب‌دهی و در شکل ۲ کاواک جفت شدگی مورد نظر به همراه ابعاد هندسی آنها آورده شده است. با تغییر ابعاد نشان داده شده، پارامترهای الکترومغناطیسی مورد نظر حاصل خواهد شد.

بسامد تشدید با توجه به بسامد مولد RF برابر با 2298.5 ± 0.1 مگاهرتز در نظر گرفته شده است. با توجه به این نکته که نتایج حاصل از محاسبه امیدانس موازی در شبیه سازی از اندازه گیری آن بعد از ساخت ۱۵ درصد بیشتر است [۱]، در

۲. Kilpatrick limit

۱. Finite Difference Method(FDM)



شکل ۳. طرح کل تیوب شتابدهی مورد نظر.

جدول ۱. ابعاد هندسی کاواک جفت شدگی.

مقدار	کمیت
۲۲/۵۹mm	شعاع کاواک جفت شدگی $dc/2$
۲۷mm	طول کاواک جفت شدگی $Lcc/2$
۹/۶۱ mm	طول دماغه کاواک جفت شدگی Lp
۸/۳mm	شعاع دماغه کاواک جفت شدگی $dp/2$

مرحله ۳ در نرم افزار کامسول در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳. نتایج

۳.۱. نتایج طراحی کاواک‌ها در کد سوپرفیش

برای بهینه کردن ابعاد کاواک ابتدا تغییرات بر روی شعاع روزنه باریکه rb اعمال شد تا بتوان به امیدانس موازی مورد نظر نزدیک شد. اما به این نکته توجه شد که شعاع روزنه باریکه نباید از ۲/۵ میلی متر کمتر شود. سپس تغییرات بر روی شعاع قسمت پایین دماغه مخروطی Ri و شعاع انحنای دیواره کاواک Rci انجام شد، زیرا تغییر این ابعاد با گام های بزرگ تری قابل انجام است. با توجه به محدودیت ضخامت پوسته جانبی و مسافت سطح مسطح، شعاع انحنای دیواره جانبی کاواک Rco بیش از ۲۰/۵ میلی متر نمی توانست افزایش یابد. پس از بررسی تأثیرات هر یک از ابعاد بر پارامترهای الکترومغناطیسی، محدودیت های هر یک از ابعاد و در نظر گرفتن پارامترهای الکترومغناطیسی مطلوب، ابعاد نهایی کاواک جفت شدگی و شتابدهی مطابق جدول ۱ و جدول ۲ به دست آمده است.

برخی از ابعاد در کل طراحی به علت محدودیت های ساخت و یا فرض های اولیه ثابت نگه داشته می شوند. این ابعاد عبارت اند از زاویه دماغه مخروطی شکل که با توجه به هندسه دماغه مخروطی بدون شیب در نظر گرفته شده است، طول کاواک Lc ، ۵ سانتی متر منظور شده است (با توجه به معادله (۲)) و در تمام مراحل سعی بر این بود که ضخامت دیواره جانبی کاواک s به علت محدودیت ساخت از ۴ میلی متر کمتر نشود.

۳.۲. طراحی تیوب شتابدهی در نرم افزار کامسول

پس از طراحی ابعاد کاواک های جفت شدگی و شتابدهی در کد دوبعدی سوپرفیش، از آنجا که این کد به علت در نظر گرفتن تقارن محوری قادر به شبیه سازی تیوب کامل شتابدهی با جفت شدگی جانب نیست و فقط برای ساختارهای متقارن کاربرد پذیر است، از نرم افزار سه بعدی کامسول برای شبیه سازی کل ساختار استفاده شده است. این نرم افزار بر مبنای روش اجزای محدود^۱ کار می کند و با تفکیک فرم انتگرالی معادلات ماکسول به حل آنها می پردازد. مش های سه بعدی در نرم افزار کامسول با استفاده از المان های چهار ضلعی ایزوپارامتریکی ساخته شده اند تا حل میدان یکنواخت با افزایش دقت را به دست آورد [۷]. روند طراحی و شبیه سازی تیوب در نرم افزار کامسول در سه مرحله انجام شده است که می توان مطابق مراحل زیر خلاصه کرد:

مرحله اول: طراحی مجزای کاواک شتابدهی جهت مقایسه نتایج با نتایج کد سوپرفیش.

مرحله دوم: طراحی یک مجموعه سه کاواکی شامل دو نیم کاواک شتابدهی و یک کاواک جفت شدگی به منظور بهینه کردن ثابت جفت شدگی.

مرحله سوم: طراحی کل ساختار به منظور بررسی بسامد تشدید کل ساختار، بررسی نمودار پاشندگی و بررسی توزیع میدان درون ساختار.

در تمام این مراحل بسامد تشدید در محیط CAEFS^۲ نرم افزار کامسول محاسبه شده است. طرح نهایی تیوب طراحی شده در

۱. Finite Element Method(FEM)

جدول ۲. ابعاد هندسی کاواک شتاب‌دهی.

مقدار	کمیت
۳۸/۳۸mm	شعاع کاواک D
۵۰mm	طول کاواک Lc
۱۰/۹ mm	فاصله بین دو دماغه $g/2$
۲/۵mm	شعاع روزنه باریکه rb
۱۹/۶mm	شعاع انحنای دیواره کاواک Rco
۱mm	شعاع قسمت پایین دماغه مخروطی Ri
۲/۷mm	شعاع قسمت بالای دماغه مخروطی Ro
۵/۳mm	شعاع بین دیوار کاواک و دماغه Rci
۳mm	طول سطح مسطح eq

جدول ۳. نتایج سوپرفیش و نرم‌افزار کامسول برای کاواک شتاب‌دهی.

پارامترها	کد سوپرفیش	نرم‌افزار کامسول
بسامد تشدید	۲۹۹۸/۴۲ MHz	۲۹۹۸/۲۵ MHz
ضریب کیفیت	۱۷۴۴۲/۴	۱۷۴۳۶/۴
امپدانس موازی	۱۶۴/۶۸ $M\Omega/m$	۱۶۴/۵۵ $M\Omega/m$
عامل زمان گذار	۸۳۸	۸۴۰
E_{max} / E_0	۳/۷۹	۳/۸۱

جدول ۴. ثابت جفت شدگی بر حسب فاصله مراکز کاواک‌ها.

فاصله مرکز کاواک‌ها (هم‌پوشانی)	ثابت جفت شدگی
۱۰ میلی‌متر	۰/۰۳۸۵
۹ میلی‌متر	۰/۰۳۰۸
۸ میلی‌متر	۰/۰۲۳۶
۷ میلی‌متر	۰/۰۱۷۳
۶ میلی‌متر	۰/۰۱۱۷
۵ میلی‌متر	۰/۰۰۷۰

۲.۳. نتایج طراحی تیوب شتاب‌دهی در نرم‌افزار کامسول

۱.۲.۳. مرحله اول

نتایج حاصل از طراحی دوبعدی کاواک شتاب‌دهی در کد سوپرفیش و طراحی سه‌بعدی در نرم‌افزار کامسول در جدول ۳ آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامترهای الکترومغناطیسی مهم برای طراحی کاواک (بسامد تشدید، ضریب کیفیت، امپدانس موازی، عامل زمان گذار و نسبت بیشینه میدان سطحی به میانگین میدان محوری) حاصل از نرم‌افزار کامسول و کد سوپرفیش با هم همخوانی دارند.

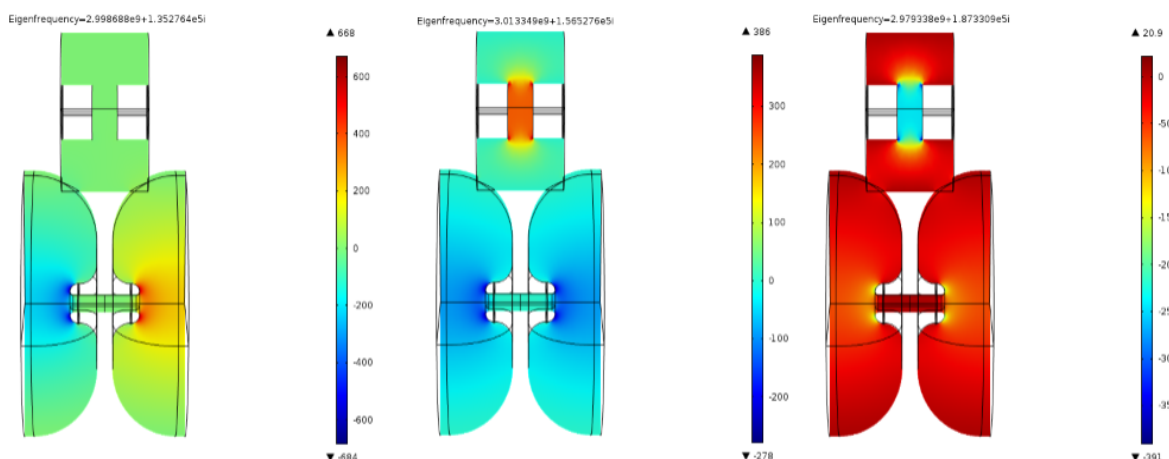
۲.۲.۳. مرحله دوم

در این مرحله ابتدا فاصله مناسب بین مراکز کاواک‌های جفت

شدگی و شتاب‌دهی برای رسیدن به ثابت جفت شدگی مناسب به دست می‌آید. بر اساس مدل مداری و نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۴] ثابت جفت شدگی مناسب برای تیوب ۶ مگا الکترون ولت ۰/۰۱۱۲ است [۴]. در نتیجه در این مرحله فاصله مناسب بین مراکز کاواک‌های جفت شدگی و شتاب‌دهی (هم‌پوشانی) برای ثابت جفت شدگی ۰/۰۱۱۲ در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای محاسبه فاصله مناسب در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود، با هم‌پوشانی ۶ میلی‌متری کاواک‌های جفت شدگی و شتاب‌دهی، ثابت جفت شدگی ۰/۰۱۱۷ به دست آمد که نزدیک‌ترین مقدار به مقدار مطلوب است.

برای طول هم‌پوشانی ۶ میلی‌متر ابعاد بهینه شده برای



شکل ۴. میدان الکتریکی در راستای محوری برای مدهای صفر، $\pi/2$ و π .

۳.۲.۳. مرحله سوم

تیوب مورد نظر شامل ۵ کاواک جفت شدگی، ۵ کاواک کامل شتاب‌دهی و یک نیم کاواک در ابتدای تیوب مانند آنچه در شکل ۳ نشان داده شده است، مطابق مدل مداری کاواک‌های تشدید در ۱۱ بسامد متفاوت مطابق با ۱۱ جابه‌جایی فاز تشدید می‌کند. نکته قابل توجه در این مرحله هندسه آخرین کاواک شتاب‌دهی است. بسامد آخرین کاواک شتاب‌دهی به دلیل داشتن تنها یک حفره جفت شدگی با بسامد سایر کاواک‌ها متفاوت است. در نتیجه برای تنظیم بسامد این کاواک برابر با سایر کاواک‌ها نیاز به تغییر طول دماغه دارد.

نمودار میدان الکتریکی بر روی محور شتاب‌دهی برای مدهای $\pi/2$ در شکل ۶ نشان داده شده است. منحنی پاشندگی بر حسب جابه‌جایی فاز نیز برای این ساختار در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، این ساختار در ۱۱ بسامد متناظر با جابه‌جایی فازهای مختلف در مد TM_{01} نوسان می‌کند.

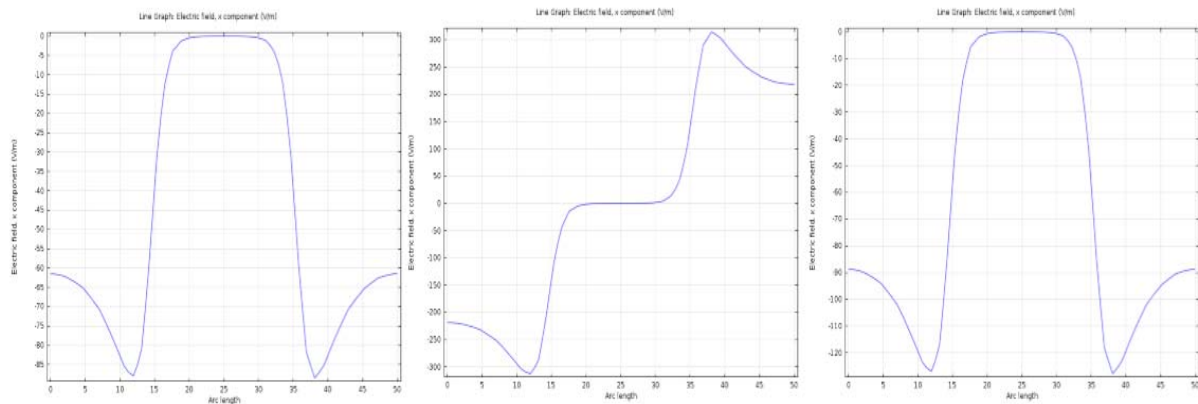
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مراحل طراحی کاواک‌های تیوب شتاب‌دهی برای شتاب‌دهنده خطی الکترون با انرژی ۶ مگا الکترون ولت با

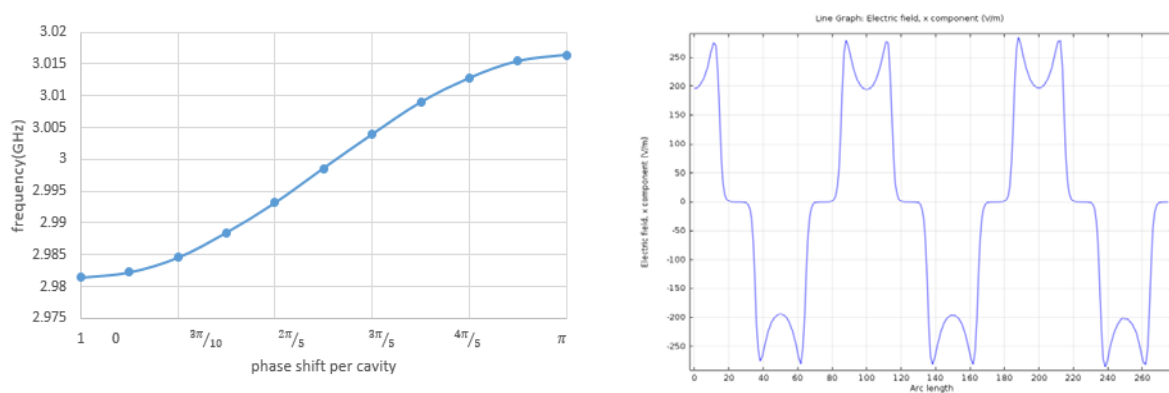
جدول ۵. ابعاد نهایی تیوب شتاب‌دهی.

مقدار	ابعاد هندسی کاواک‌های طراحی شده
$38/41 \text{ mm}$	شعاع کاواک D
50 mm	طول کاواک Lc
$14/19 \text{ mm}$	فاصله بین دو دماغه $g/2$
$2/5 \text{ mm}$	شعاع روزنه باریکه rb
$19/6 \text{ mm}$	شعاع انحنای دیواره کاواک Rco
1 mm	شعاع قسمت پایین دماغه مخروطی Ri
$2/7 \text{ mm}$	شعاع قسمت بالای دماغه مخروطی Ro
$5/3 \text{ mm}$	شعاع بین دیوار کاواک و دماغه Rci
3 mm	طول سطح مسطح eq
$22/57 \text{ mm}$	شعاع کاواک جفت شدگی $dc/2$
$27/2 \text{ mm}$	طول کاواک جفت شدگی $Lcc/2$
$9/61 \text{ mm}$	طول دماغه کاواک جفت شدگی Lp
$8/3 \text{ mm}$	شعاع دماغه کاواک جفت شدگی $dp/2$

ساختار مورد نظر جهت تشدید در بسامد $2998/5$ مگاهرتز در جدول ۵ ارائه شده است. برای ابعاد به دست آمده، میدان الکتریکی در راستای حرکت باریکه برای مدهای صفر، $\pi/2$ و π درون کاواک و همچنین نمودار میدان الکتریکی بر روی محور شتاب‌دهی برای مدهای صفر، $\pi/2$ و π به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار میدان الکتریکی بر روی محور شتاب‌دهی برای مدهای صفر، $\pi/2$ و π .



شکل ۶. میدان الکتریکی بر روی محور شتاب‌دهی برای مدهای $\pi/2$.

شکل ۷. منحنی پاشندگی.

نرم‌افزار با نتایج سایر شتاب‌دهنده‌های خطی ساخته شده همخوانی مناسبی داشته و می‌توان انتظار داشت از نتایج این مقاله جهت ساخت تیوب شتاب‌دهی ۶ مگا الکترون ولت استفاده کرد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از همکاری آقای ساسان احمدیان در انجام فعالیت‌های مربوط به پژوهشی که این مقاله حاصل آن است، تشکر می‌کنند.

استفاده از کد سوپرفیش و نرم‌افزار کامسول انجام شده است. از آنجا که کد سوپرفیش جهت طراحی کاواک‌های متقارن سرعت و دقت بالایی دارد، طراحی کاواک‌های جفت شدگی و کاواک‌های شتاب‌دهی به صورت مجزا جهت تشدید در بسامد 2298.5 مگاهرتز انجام پذیرفته است. در این مرحله، بهینه‌سازی ابعاد بر اساس پارامترهای الکترومغناطیسی مطلوب صورت گرفته که مطابقت مناسبی با پارامترهای الکترومغناطیسی سایر شتاب‌دهنده‌های خطی ساخته شده دارند. در ادامه طراحی، از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است تا بتوان تأثیرات حفره جفت شدگی را بررسی کرده و شبیه‌سازی کل ساختار را انجام داد. همان‌طور که در قسمت نتایج آورده شده است نتایج این

مراجع

۱. ف قاسمی، "طراحی و ساخت تیوب شتاب‌دهی شتاب‌دهنده خطی الکترون موج رونده و اندازه‌گیری پارامترهای آن"، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۹۴).
۲. J S Aubin, S Stephen, and G B Fallonea, *medical physics*, February (2010) 466.
۳. C J Karzmark and C S Nunan, "Microwave Accelerator Structures", *Medical Electron Accelerators*, (1993).
۴. D E Nagle, E A Knapp, and B C Knapp, *Review of Scientific Instruments*, (1967) 1583.
۵. J C Slater, *Microwave electronics*, D.Van Nostrand Company Inc, (1954).
۶. R F Holsinger, "super fish", LANL: http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml.
۷. P Puggioni, "Radiofrequency Design and Measurments of a Linear Hadron Accelerator for Cancer Therapy", (2008).
۸. "comsol", Available:<https://www.comsol.com>.
۹. R Roy and O Shanker, *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, (1993) 1233.