

بررسی اثرات بارگذاری باریکه در تیوب شتابدهی موج‌رونده امپدانس ثابت

امیدرضا کاوسی^۱، سیدظفراله کلانتری^۱، شاهین صنایع حجری^۲ و فرشاد قاسمی^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان ۸۴۱۵۶۸۳۱۱

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

پست الکترونیکی: r.kavusiomid@ph.iut.ac.ir

چکیده:

در یک ساختار شتابدهی توان بالا عامل جریان یک پارامتر محدود کننده است و بهره انرژی ذرات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. باریکه قابلیت تحریک مدهای شتابدهی و مدهای مراتب بالا را داراست. اثرات باریکه در برانگیختن مدهای شتابدهی تحت عنوان بارگذاری باریکه شناخته می‌شود. در این مقاله اثر بارگذاری باریکه برای یک تیوب شتابدهی موج‌رونده امپدانس ثابت در باند S توسط نرم افزار CST شبیه سازی شده و نتایج حاصل از آن با رابطه نظری به دست آمده از پایستگی انرژی مقایسه شده است. هدف اصلی این مقاله صحت‌سنجی رابطه نظری و بررسی میزان اثرات بارگذاری باریکه در ساختارهای شتابدهی امپدانس ثابت می‌باشد. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد تطابق مناسبی بین شبیه‌سازی و رابطه نظری وجود دارد. از طرف دیگر می‌توان ادعا نمود که میزان اثرات بارگذاری باریکه با تغییر طراحی رادیوفرکانسی غیرقابل جبران است. نتایج این بررسی جهت طراحی شتابدهنده‌ای پرتوان با انرژی 30 MeV و توان متوسط 30 kW در باند S استفاده خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بهره انرژی، مدهای شتابدهی، بارگذاری باریکه، تیوب شتابدهی موج‌رونده، باند S

۱. مقدمه

استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که در انرژی‌های بالا به عنوان برخورددهنده ذرات به کار گرفته می‌شوند. برخورددهنده‌های ذرات سهم اندکی (حدود ۱ درصد) از تعداد کل شتابدهنده‌های موجود در دنیا را دارند. این شتابدهنده‌ها می‌توانند ذرات را تا چندین ترا الکترون ولت انرژی دهند [۱]. شتابدهنده خطی الکترون از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که عبارتند از: (۱) مدولاتور (۲) کلاستر (۳) تفنگ الکترونی (۴) پیش خوشه ساز (۵) خوشه ساز (۶) تیوب شتابدهی. تیوب شتابدهی در این ساختار حیاتی‌ترین قسمت می‌باشد. جایی که در آن ذرات خوشه شده بر روی قله موج قرار گرفته و بر انرژی‌شان افزوده می‌شود. بخشی از مطالعات در این حوزه معطوف به اثرات جریان بالای باریکه در شتابدهنده‌های توان بالا می‌باشد. در شتابدهنده‌های توان بالا بخش قابل توجهی از توان

با توجه به مسیر ذرات در طول فرآیند شتابدهی، همه شتابدهنده‌ها را می‌توان به دو بخش اصلی حلقوی و خطی (لینک ۱) تقسیم‌بندی کرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های شتابدهنده‌های خطی توسعه‌پذیری آن است. به این معنا که در انرژی‌های نسبی با تکرار ساختارهای شتابدهی - به میزان دلخواه - می‌توان به انرژی‌های بالاتر رسید. ذرات در شتابدهنده‌های خطی مسیر منبع تا هدف را فقط یک بار طی می‌کنند. معمولاً شتابدهنده‌های خطی در محدوده فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا چندین گیگاهرتز کار می‌کنند. شتابدهنده‌های خطی در انرژی‌های پایین‌تر به عنوان تزریق‌گر برای سنکروترون‌ها و نیز در کاربردهای صنعتی و پزشکی مورد

خطی موج‌رونده منجر به تغییر (کاهش) بهره انرژی ذرات خوشه‌شده عبوری از ساختار می‌شود [۳]. هدف این مقاله بررسی اثرات بارگذاری باریکه در ساختار موج‌رونده امیدانس ثابت با مد ساختاری $\frac{\pi}{2}$ می‌باشد. به این منظور ابتدا نحوه طراحی ساختار موج‌رونده مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی الکترومغناطیسی با استفاده از کدهای سوپرفیش^۷ [۴] و سی‌اس‌تی^۸ [۵] انجام شده است. تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی ساختار شتاب‌دهنده به همراه کوپلرهای توان ورودی و خروجی به منظور بررسی پیشروی فاز در هر سلول انجام شده است. در گام بعدی به صورت نظری و شبیه‌سازی به بررسی برهم‌کنش باریکه و کاواک و مقایسه آن‌ها پرداخته شده است.

۲. طراحی رادیوفرکانسی ساختار شتابدهی

۲.۱. ساختار بارگذاری شده با دیسک (DLS)

برای انتقال انرژی بیوسسته به یک ذره باردار در حال حرکت توسط موج الکترومغناطیسی، دو شرط زیر باید برقرار باشد: (۱) موج باید مولفه میدان الکتریکی در امتداد جهت حرکت ذرات داشته باشد و (۲) جهت حفظ هم‌زمانی، ذره و موج باید سرعت یکسان داشته باشند [۶]. راه‌حل شناخته‌شده برای دستیابی به این دو شرط استفاده از موجبرهایی است که در آن دیسک‌هایی به صورت تناوبی مطابق شکل ۱ تعبیه شده‌اند. ساختار تناوبی خاصیتی دارد که مدهای آن از بسط فوریه از امواج تشکیل شده است که بعضی از آنها برای شتاب ذره همگام^۹ مناسب هستند. انتشار امواج در ساختارهای تناوبی را قضیه فلوکه بیان می‌کند. طبق قضیه فلوکه برای یک مد انتشاری در ساختار تناوبی، میدان با پیشروی فاز ثابت سلول به سلول تغییر می‌کند.

رادیوفرکانسی به باریکه منتقل می‌شود. جریان بالای باریکه، در یک برخورددهنده‌ی ذرات لازمه دستیابی به درخشندگی^۱ مورد نظر است و در یک چشمه نور^۲ منجر به افزایش شدت و نیز همدوسی نور تابشی خواهد شد. در کاربردهای پرتودهی، جریان بالا با افزایش آهنگ دز، مدت زمان فرآیند پرتودهی را کاهش می‌دهد. همچنین در تولید نوترون و رادیوایزوتوپ‌ها آهنگ تولید متناسب با جریان باریکه الکترونی است. علاوه بر این، جریان باریکه از پارامترهای تعیین‌کننده در طراحی شتاب‌دهنده می‌باشد. در جریان‌های پایین تنها میدان‌های کاواک است که بر روی باریکه اثر می‌گذارد. در جریان‌های بالا اما عملاً با برهم‌کنش متقابل باریکه و کاواک مواجه خواهیم بود. با افزایش جریان، خود باریکه نیز در نقش مولد ظاهر شده و می‌تواند مدهای مختلف کاواک را برانگیخته کند. میدان‌های الکترومغناطیسی این مدهای ناخواسته به نوبه خود بر روی باریکه اثر نامطلوب دارند. به لحاظ فیزیکی بارها و جریان‌های تصویری القا شده توسط باریکه بر روی دیواره‌ی کاواک مسئول برانگیخته شدن مدهای آن هستند. اثر باریکه در برانگیختن مدهای شتابدهی (مدهای دارای میدان الکتریکی محوری) تحت عنوان بارگذاری باریکه شناخته می‌شود [۲]. اثر بارگذاری باریکه یکی از مشکلات اصلی محدود کننده جریان باریکه است. بارگذاری باریکه در صورت عدم جبران^۳ میزان افزایش انرژی باریکه در عبور از کاواک و نیز توزیع انرژی آن را تحت تاثیر قرار خواهد داد. برانگیخته شدن مدهای غیر شتابدهی توسط باریکه‌های نسبی، تحت عنوان میدان‌های دنباله‌ای^۴ شناخته می‌شوند. در حالت کلی میدان‌های دنباله‌ای به واسطه‌ی تغییر هندسه در دیواره محفظه‌ی خلاء تولید می‌شوند. از جمله اثرات آن می‌توان به اتلاف توان در برانگیختن مدهای مرتبه بالاتر^۵ و ناپایداری‌های فروپاشی باریکه^۶ ناشی از رشد گسیلندگی اشاره نمود. بارگذاری باریکه در شتاب دهنده‌های

¹ Luminosity

² Light source

³ Beam loading compensation

⁴ wakefields

⁵ Higher-order-mode power losses

⁶ Beam-breakup instability

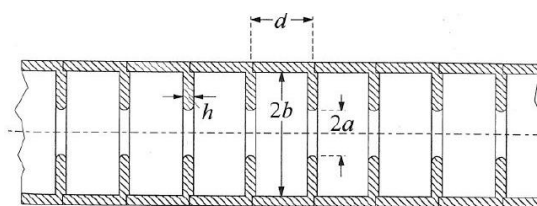
⁷ SUPERFISH

⁸ CST-MWS

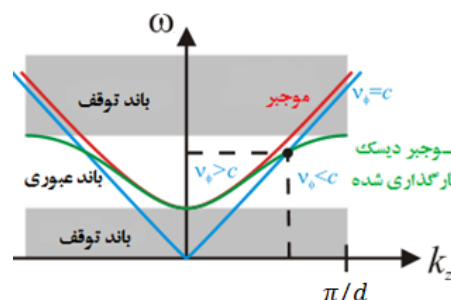
⁹ synchron

جدول ۱. مقیاس گذاری فرکانس [۷]

پارامترها	وابستگی فرکانسی
شعاع کاواک	f^{-1}
ضریب کیفیت	$f^{-1/2}$
انرژی ذخیره شده	f^{-2}
شانت امپدانس	$f^{1/2}$
R/Q	f^1
مقاومت سطحی	$f^{1/2}$
توان اتلافی در یک متر	$f^{-1/2}$
اثرات طولی میدان دنباله‌ای	f^2
اثرات عرضی میدان دنباله‌ای	f^3



شکل ۱. ساختار بارگذاری شده با دیسک



شکل ۲. نمودار پاشندگی ساختار دیسک بارگذاری شده

جدول ۲. نتایج به دست آمده از کد سوپرفیش

پارامترها	تیوب شتابدهی
شعاع سلول (mm)	۳۹/۲۵۲
طول سلول (mm)	۲۵
شعاع روزنه (mm)	۱۰
ضخامت دیسک (mm)	۵
فرکانس (MHz)	۲۹۹۸/۳۳
سرعت فاز (m/s)	3×10^8
ضریب کیفیت	۱۰۹۰۸
شانت امپدانس ($\frac{M\Omega}{m}$)	۳۷/۹۶
فاکتور گذر زمان	۰/۸۵

این قضیه اساس مطالعه انتشار موج در ساختارهای تناوبی می‌باشد. میدان الکتریکی طولی را می‌توان به صورت

$$E_z(r, z) = E_a(r, z)e^{\pm jk_0 z} \quad (1)$$

نوشت. که در آن E_a یک تابع تناوبی و k_0 عدد موج می‌باشد.

برای یک کاواک منفرد مانند کاواک استوانه‌ای تعداد بی نهایت حالت تشدید وجود دارد که مدهای کاواک نامیده می‌شود. این

مدها به عنوان مدهایی که دارای میدان الکتریکی عرضی (TE_{mnp}) و میدان مغناطیسی عرضی (TM_{mnp}) هستند،

نامگذاری شده‌اند. برای آرایه‌ای از کاواک‌های به یکدیگر جفت شده، هر یک از مدهایی که برای کاواک منفرد داشتیم خانواده

مدهای خود را ایجاد می‌کند. اصطلاحاً به این مدها، مدهای ساختاری اطلاق می‌شود [۲]. هر یک از این خانواده‌ها در یک

باند فرکانسی مشخص به نام باند عبور قرار دارند، که در نزدیکی فرکانس تشدید مد کاواک جفت نشده قرار دارد. برای

یک آرایه تناوبی، پاسخ‌های موج (موج‌هایی که قابلیت انتشار دارند) به شکل نمودار بریلوین یا پاشندگی بیان می‌شود. محل

تقاطع دو نمودار آبی و سبز در شکل ۲ نقطه بهینه (نقطه‌ای که سرعت فاز آن نزدیک به سرعت نور می‌باشد) برای طراحی

یک شتابدهنده الکترونی می‌باشد. با تعیین نمودار پاشندگی می‌توان اطلاعات مفیدی (پیشروی فاز، سرعت فاز، سرعت گروه)

از ساختار بارگذاری شده با دیسک به دست آورد.

۲.۲ پارامترهای مهم طراحی

پارامترهای ساختاری باید به نحوی انتخاب شوند که فرآیند شتابدهی با بازدهی بالای اشغال توان همراه باشد و مطلوب است توان از دست رفته به دیواره‌ها و بار خارجی را به حداقل رساند. اولین و مهم‌ترین پارامتر طراحی، فرکانس است. فرکانس تشدید بیشتر تحت تاثیر شعاع سلول‌ها b می‌باشد. فرکانس بر روی پارامترهای مختلف ساختار طبق جدول ۱ تاثیرگذار است. با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود که در فرکانس‌های بالاتر مباحث مربوط به میدان‌های دنباله‌ای چالش برانگیز خواهد بود. در فرکانس‌های بالا به دلیل روزنه‌های کوچکتر، تحمل قرارگیری باریکه را باید مدنظر قرار داد. امپدانس موازی و ضریب کیفیت با تغییر جنس ساختار تغییر می‌کند، از این رو انتخاب جنس مناسب یکی دیگر از

پارامترهای طراحی محسوب می‌شود. از طرف دیگر صافی سطح و شکل هندسه در تعیین امپدانس موازی و ضریب کیفیت اثرگذار هستند. پارامتر مهم دیگر انتخاب سرعت گروه v_g مناسب است که با انتخاب شعاع روزنه قابل کنترل است. سرعت گروه زمان پرشدن اکاواک را تعیین می‌کند به همین دلیل طول پالس RF حداقل مقدار سرعت گروه را تعیین می‌کند. ضخامت دیسک h باید به گونه‌ای باشد که مقاومت مکانیکی مناسب و تحمل خوب برای تخلیه الکتریکی داشته باشد. بعد از آنکه شعاع سلول‌ها و شعاع روزنه به ازای فرکانس، سرعت گروه و دامنه میدان الکتریکی مورد نظر تعیین شدند، سرعت فاز تنها تحت تاثیر طول سلول‌ها d خواهد بود. آخرین پارامتر مهم S (ماتریس پراکندگی) است که نشان دهنده ضرایب بازتاب و عبور یک جفت‌کننده است. در طراحی جفت‌کننده‌ها باید تا حد امکان از لبه‌های تیز استفاده نشود که تخلیه در توان بالا صورت نگیرد. همچنین ابعاد شیار باید به اندازه‌ای باشد که بتواند شرایط تطبیق را فراهم کند.

۳.۲. روش طراحی

امروزه طراحی RF شتابدهنده‌های خطی با کدهای طراحی الکترومغناطیسی عددی انجام می‌شود. در ساختارهای طولی به دلیل حجم بالای محاسبات بخشی از ساختار (با تعیین شرایط مرزی مناسب) که تخمین درستی از رفتار کلی سیستم را به ما می‌دهد مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۳.۲.۱. طراحی ساختار با کد سوپرفیش

فرکانس تشدید ساختار با توجه به فرکانس کاری لامپ‌های کلایسترون تجاری باند فرکانسی ۲۹۹۸ مگاهرتز در نظر گرفته شده است. با استفاده از فرکانس تشدید می‌توان یک تخمین اولیه‌ای از شعاع سلول‌های ساختار طبق رابطه $b = \frac{2/4 \cdot 0.5 \lambda}{\sqrt{\pi}}$ به دست آورد. در این رابطه λ طول موج می‌باشد. یک ساختار موج‌رونده امپدانس ثابت با مد ساختاری $\frac{\pi}{4}$ برای طراحی انتخاب شده است. اگرچه مد شتابدهی $\frac{2\pi}{3}$ دارای امپدانس موازی بالاتری می‌باشد ولی مد $\frac{\pi}{4}$ نسبت به خط‌های هندسی حساسیت کمتری دارد [۲]. در این مد، فاز موج الکترومغناطیسی

در حال حرکت 90° در هر سلول تغییر می‌کند. هندسه یک تیوب شتابدهی ۴ سلولی بارگذاری شده با دیسک در شکل ۳ نشان داده شده است. از این ترکیب برای محاسبه فرکانس تشدید و سایر پارامترهای RF استفاده می‌شود. برای یافتن مقدار بهینه این پارامترها از کد الکترومغناطیسی دو بعدی سوپرفیش استفاده شده است. برای مد $\frac{\pi}{4}$ ، طول سلول d از رابطه $\frac{\lambda v}{4c}$ محاسبه می‌شود. در این رابطه v و c به ترتیب سرعت ذره همگام و سرعت نور می‌باشد.

از پس پردازشگر SFO در سوپرفیش برای محاسبه پارامترهای شتابدهنده مانند ضریب کیفیت، امپدانس موازی، فاکتور گذر زمان و غیره استفاده می‌شود. سوپرفیش محاسبات را برای ساختارهای موج‌ایستاده انجام می‌دهد و این مقادیر سپس به حالت موج‌رونده تبدیل می‌شوند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازهای سوپرفیش در جدول ۲ گزارش شده‌اند.

یکی دیگر از پس پردازشگرهای سوپرفیش برنامه SF7 می‌باشد که برای درون‌یابی میدان‌ها بر روی خطوط و منحنی‌ها مورد استفاده کاربر قرار می‌گیرد. با اجرای این برنامه میدان الکتریکی هندسه چهارسلولی بر حسب E_r و E_z بصورت شکل ۵ به دست می‌آید. باید دقت نمود که میدان محاسبه شده نمایش میدان موج‌ایستاده می‌باشد و باید به شکل موج‌رونده تبدیل شود.

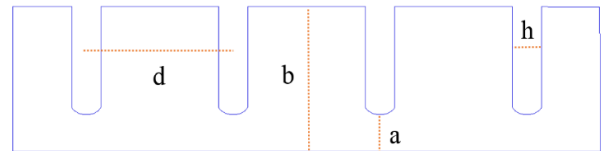
همان‌طور که در بخش ۱ توضیح داده شد نمودار پاشندگی اطلاعات مهمی در اختیار ما می‌گذارد. یکی از خروجی‌های نمودار پاشندگی سرعت گروه می‌باشد. سرعت گروه برای یک مد شتابدهی از شیب نمودار پاشندگی در فرکانس موردنظر به دست می‌آید. نمودار نشان می‌دهد که سرعت گروه همواره کوچکتر از سرعت نور می‌باشد و در دو نقطه نیز دارای سرعت گروه صفر (مدهای 0 و π) می‌باشد. برای رسم نمودار پاشندگی ابتدا باید فرکانس رزونانس مدهای شتابدهی مختلف را استخراج کنیم.

۲.۳.۲. طراحی ساختار در نرم افزار سی اس تی

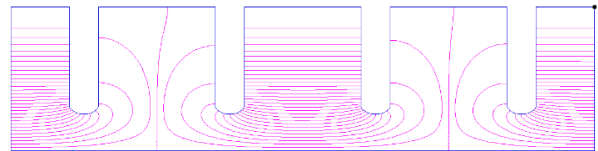
در بخش قبل، در مورد طراحی الکترومغناطیسی دو بعدی تیوب شتابدهی بحث کردیم. اجزای مهم ساختار شتاب دهی، جفت کننده های ورودی و خروجی هستند. در اینجا اولین سلول تیوب به عنوان سلول جفت کننده ورودی و آخرین سلول به عنوان سلول جفت کننده خروجی استفاده می شود. جفت شدگی با ایجاد یک شیار در سلول ابتدایی و انتهایی انجام می شود. شرایط مرزی در سلول های جفت کننده با سلول مجاور متفاوت است و بنابراین قطر داخلی سلول های جفت کننده کمی تغییر می کند. انتخاب پارامترهای هندسی مناسب برای سلول های جفت کننده به منظور به حداقل رساندن میزان بازگشتی اجتناب ناپذیر است. طرحواره سلول جفت کننده در شکل ۷ قابل مشاهده است. روزه ای مستطیلی با ابعاد $20 \text{ mm} \times 26/6$ برای جفت شدگی توان ایجاد شده است و قطر سلول جفت کننده و ارتفاع شیار به ترتیب 12.77 میلی متر و 2.24 میلی متر می باشد. در سلول ورودی، توان RF از کلاستران با استفاده از یک موجبر مخروطی منطبق با موجبر استاندارد WR284 به داخل تیوب تغذیه می شود.

پارامترهای تاثیرگذار در جفت شدگی مناسب شعاع سلول، طول شیار و ارتفاع شیار می باشد. مدهای ساختاری $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi$ داخل ساختاری با تعداد ۵ سلول تحریک می شوند. اگر ابعاد موثر در جفت شدگی به درستی انتخاب شوند نمودار S_{11} دارای ۵ حالت رزونانس خواهد بود. تحلیل الکترومغناطیسی سه بعدی تیوب موجرونده ۵ سلولی با جفت کننده های ورودی و خروجی با استفاده از کد شبیه سازی سی اس تی انجام شده است. شکل ۸ هندسه این ساختار را نشان می دهد.

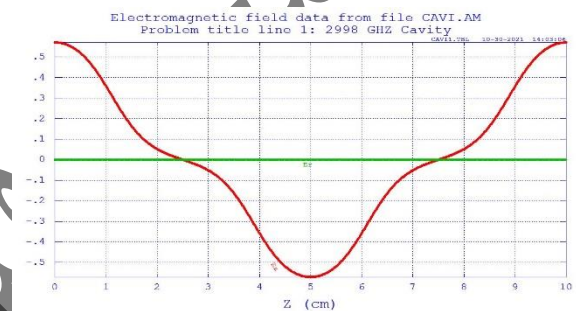
جنس تیوب شتابدهی از مس با رسانندگی 58 MS/m است. از طریق نمودار S_{11} می توان باند عبور را مشاهده کرد که در آن تمام فرکانس ها از طریق ساختار موجرونده منتقل می شوند. این برخلاف ساختار موج ایستاده است که در فرکانس های گسسته رزونانس حاصل می شود. همانطور که در نمودار S_{11} قابل مشاهده است، باند عبور $2975-3019$ مگاهرتز است.



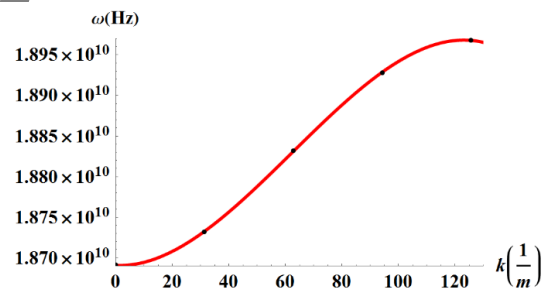
شکل ۳. هندسه ۴ سلولی تیوب شتابدهی



شکل ۴. الگوی میدان ها در مد شتابدهی $\frac{\pi}{4}$



شکل ۵. میدان الکتریکی حقیقی محاسبه شده توسط کد سیرفیش بر روی محور



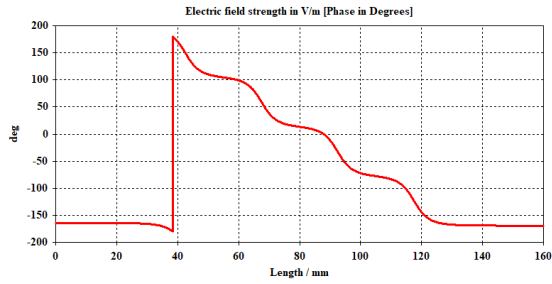
شکل ۶. نمودار پاشندگی برای ۵ مد مختلف

قدم بعدی برازش یک منحنی درجه ۳ بر روی نقاط به دست آمده نمودار پاشندگی است. تابع درجه ۳ برازش شده به شکل رابطه (۲) می باشد

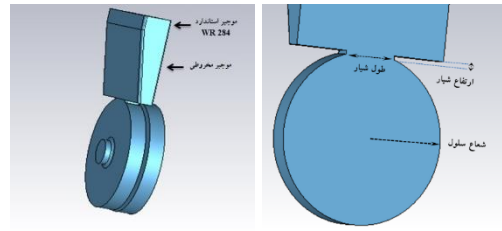
$$\omega = -309/1k^3 + 57826/7k^2 + 1/8 \times 10^6$$

نمودار برازش شده با استفاده نرم افزار ممتیکا^۱ به صورت شکل ۶ می باشد. سرعت گروه مشتق تابع در نقطه $k = \frac{\pi}{\lambda a}$ است که برابر $3/42458 \times 10^6$ می باشد.

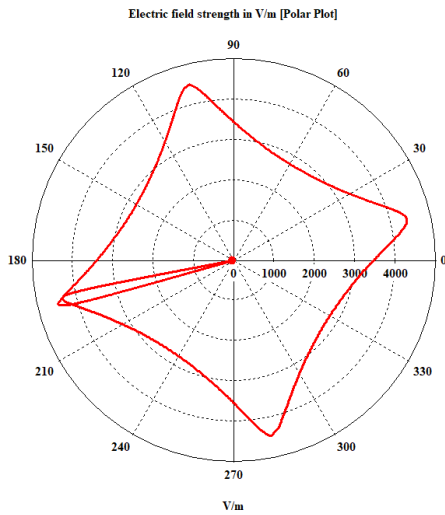
¹ Mathematica
² coupler



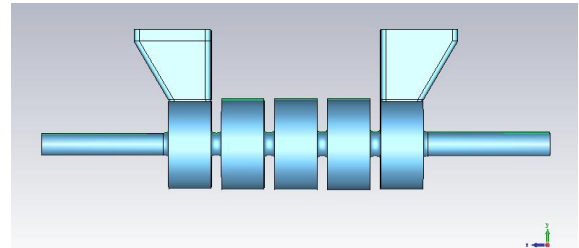
شکل ۱۲. پیشروی فاز میدان الکتریکی در فرکانس ۲۹۹۷/۸ مگاهرتز



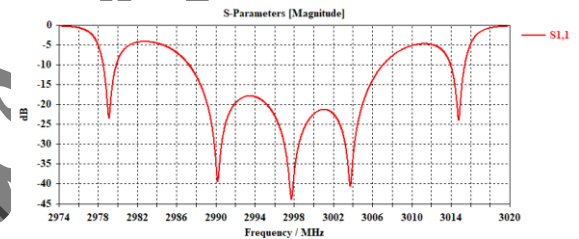
شکل ۷. هندسه جفت کننده ورودی و خروجی



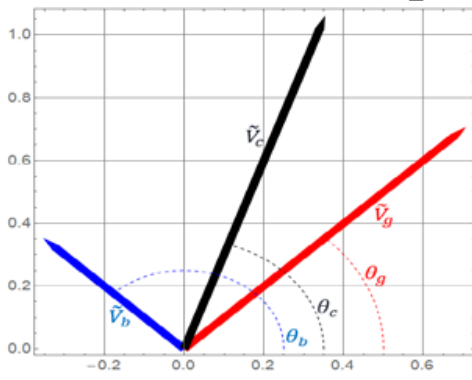
شکل ۱۳. نمودار قطبی میدان الکتریکی در فرکانس ۲۹۹۷/۸ مگاهرتز



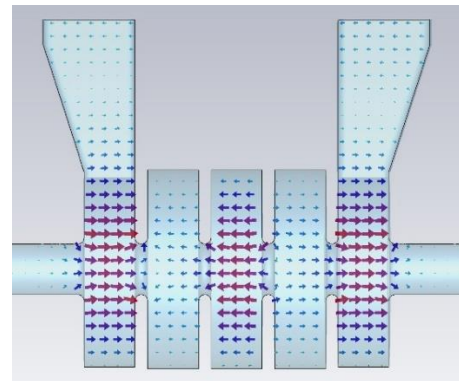
شکل ۸. هندسه طراحی شده تیوب شتابدهی امپدانس ثابت به همراه جفت کننده‌ها



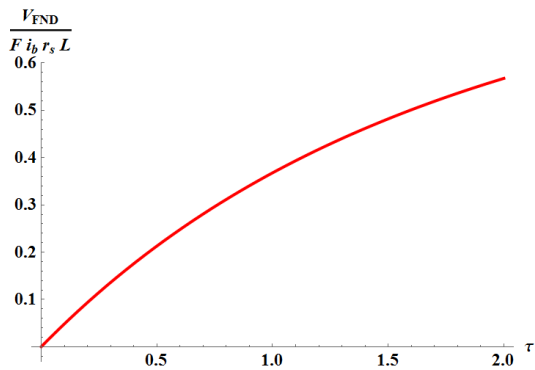
شکل ۹. نمودار S_{11} (بازگشت موج از جفت کننده بر حسب فرکانس)



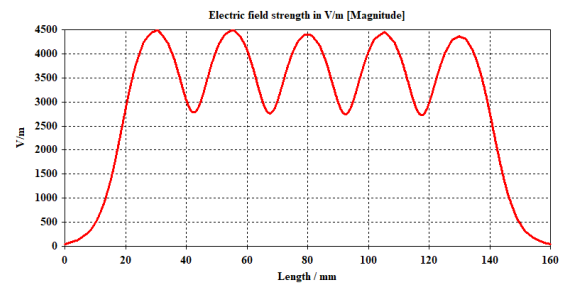
شکل ۱۴. برهم‌نهی فازورهای ولتاژ در صفحه مختلط



شکل ۱۰. توزیع میدان الکتریکی حقیقی در یک لحظه از زمان در فرکانس ۲۹۹۷/۸ مگاهرتز



شکل ۱۵. نمودار تغییرات ولتاژ القایی بر حسب ثابت تضعیف



شکل ۱۱. بزرگی میدان الکتریکی مختلط در فرکانس ۲۹۹۷/۸ مگاهرتز

از حل کننده دامنه فرکانسی سی اس تی جهت ارزیابی توزیع، بزرگی و پیشرفت فاز میدان در هر سلول، استفاده شده است. نمایشگرهای ۱ میدان الکتریکی در فرکانس های مختلف برای ثبت نتایج تعریف می شوند. شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب توزیع میدان و بزرگی میدان را در فرکانس ۲۹۹۷/۸ مگاهرتز نشان می دهند. شکل ۱۲ و ۱۳ نشان دهنده تغییرات فاز میدان الکتریکی می باشد که از طریق آن می توان پیشروی فاز در هر سلول را محاسبه نمود. نمودارها به طور میانگین پیشروی فاز میدان در هر سلول را محدوده فاز $92^{\circ} - 89^{\circ}$ نشان می دهند.

۳. تئوری بارگذاری باریکه در ساختار موجرونده امپدانس ثابت (هندسه یکنواخت)

شتاب یک باریکه جریان بالا باعث کاهش شارش توان در تیوب شتابدهی و دامنه میدان شتاب دهنده می شود که نتیجه آن کاهش انرژی باریکه خروجی می باشد. همچنین، در جریان های بالا اگر باریکه نسبی نباشد باید اثرات بارفضایی در نظر گرفته شود. بار فضایی می تواند بر پایداری دینامیک طولی یا عرضی تأثیر بگذارد. از طرف دیگر همانطور که در بخش مقدمه اشاره شد حرکت باریکه داخل ساختار شتابدهی جریانی بر روی دیواره ها القا می کند که می تواند سرعت فاز موج الکترومغناطیسی را تغییر دهد. این جریان القایی یکسری مدهای شتابدهی و مدهای مراتب بالاتر داخل ساختار شتابدهی تحریک می کند که به نوبه خود کیفیت پرتو و راندمان شتابدهی را کاهش می دهد. در این مقاله موضوع مورد بحث، بررسی اثرات باریکه در برانگیختن مدهای شتابدهی یا اثرات طولی ناشی از باریکه در ساختارهای موجرونده هندسه یکنواخت یا به اصطلاح امپدانس ثابت می باشد. در صورت وجود میدان های متغیر سینوسی، مناسب تر است که ولتاژها به صورت فازورهای در صفحه مختلط در نظر گرفته شود.

طبق قضیه اساسی بارگذاری باریکه ولتاژ کاواک مطابق شکل ۱۴ از برهم نهی خطی ولتاژ منبع و ولتاژ القایی باریکه به دست می آید.

$$\vec{V}_c = \vec{V}_g + \vec{V}_b \quad (2)$$

فرض می کنیم که ساختار موجرونده امپدانس ثابت به منبع انرژی متصل نباشد، در این صورت ولتاژ خالص ساختار شتابدهی ناشی از باریکه خواهد بود. دامنه میدان الکتریکی شتاب دهنده $E_{FND}(z)$ ، توان تلف شده در واحد طول در دیواره های ساختار $P_w(z)$ ، انرژی ذخیره شده در واحد طول $U(z)$ و توان کل $P(z)$ به صورت زیر مرتبط هستند.

$$E_{FND}^{\vee}(z) = r_s P_w(z) = r_s \frac{\omega}{Q} U(z) = 2r_s \frac{\omega}{\sqrt{Qv_g}} P(z) \quad (3)$$

ω ، r_s ، Q ، v_g به ترتیب فرکانس زاویه ای، شانت امپدانس، ضریب کیفیت و سرعت گروه می باشند. با تعریف ثابت میرایی در واحد طول به شکل $\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{Qv_g}}$ خواهیم داشت

$$E_{FND}^{\vee}(z) = 2r_s \alpha P(z) \quad (4)$$

میدان الکتریکی القایی در ابتدای ساختار باید صفر باشد بنابراین

$$E_{FND}(0) = 0 \quad (5)$$

با استفاده از بقای انرژی، ولتاژ شتابدهی موثر القاشده توسط باریکه محاسبه می شود. بقای انرژی به این معنی است که وقتی باریکه ای با جریان متوسط I_B داخل شتابدهنده جریان دارد، آنگاه کاهش شارش توان در واحد طول برابر است با مجموع توان تلف شده در واحد طول در دیواره ها و توانی که در واحد طول به باریکه تحویل داده می شود.

$$-\frac{d}{dz} P(z) = P_w(z) + F I_B E_{FND}(z) \quad (7)$$

$$-\frac{d}{dz} \left(\frac{E_{FND}^{\vee}(z)}{2r_s \alpha} \right) = \frac{E_{FND}^{\vee}(z)}{r_s} + F I_B E_{FND}(z)$$

از حل معادله دیفرانسیل بالا مطابق شرایط اولیه به دست می آید

$$E_{FND}(z) = -F I_B r_s (1 - e^{-\alpha z}) \quad (8)$$

اکنون می توان ولتاژ خالص القاشده را محاسبه نمود

$$V_{FND} = -F I_B r_s \int_0^L (1 - e^{-\alpha z}) dz \quad (9)$$

با توجه به تعریف ثابت تضعیف $\tau = \alpha L$

$$V_{FND} = -F I_B r_s L \int_0^{\tau} (1 - e^{-x}) dx \quad (10)$$

در نتیجه ولتاژ القایی باریکه هنگامی که یک خوشه ذرات با بار q با داشتن فاکتور شکل F و با سرعت نور از یک ساختار موجرونده امپدانس ثابت عبور می کند به شکل زیر خواهد بود [۸ و ۹]:

$$V_{FND} = -\frac{\tau_n + e^{-\tau_n} - 1}{\tau_n} F I_B r_s L \quad (11)$$

در رابطه ولتاژ L طول موثر تیوب شتابدهی است. فاکتور شکل خوشه F ، میانگین کسینوس فاز ذرات موجود در هر خوشه را نشان می‌دهد و طبق رابطه ۱۲ تعریف می‌گردد.

$$F = \frac{1}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \cos(\theta_n) = \langle \cos(\theta) \rangle \quad (12)$$

رابطه ولتاژ با پارامترهای F ، r_s ، I_B به صورت خطی است. از طرف دیگر برای مقادیر کوچک τ

$$\frac{\tau + e^{-\tau} - 1}{\tau} \approx \frac{\tau}{2} = \frac{\omega L}{4Qv_g} \quad (13)$$

خواهد بود و رابطه ولتاژ را می‌توان به شکل رابطه (۱۴) بازنویسی نمود.

$$V_{KND} = -\frac{\omega_n L}{4Q_n v_{ng}} F I_B T_s L \quad (14)$$

همچنین تابعیت ولتاژ به ثابت تضعیف را می‌توان به شکل نمودار زیر نشان داد.

تاکنون اعتبارسنجی دقت این محاسبات نظری انجام نشده است و هدف اصلی این مقاله بررسی این مسئله از طریق شبیه‌سازی می‌باشد.

۳.۱. شبیه‌سازی بارگذاری باریکه در ساختار موج‌رونده

هندسه یکنواخت

در این قسمت برای مشاهده اثرات بارگذاری باریکه از حل‌کننده ذره در سلول ۱ در نرم افزار سی‌اس‌تی استفاده شده است. اساس این روش بر مبنای حل معادلات حرکت و ماکسول است و از الگوریتم تفاضل محدود در حوزه زمان ۲ برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. پس از طراحی رادیوفرکانسی و محاسبه پارامترهای تیوب شتابدهی در حل‌کننده فرکانس بالا، هندسه مورد نظر به حل‌کننده ذره در سلول منتقل می‌شود. باریکه خوشه‌ای الکترون با انرژی ۲ مگا الکترون ولت انرژی باریکه در انتهای خوشه‌ساز ۳ و جریان ۳ آمپر ۴ از کاواک عبور می‌کند. در شبیه‌سازی‌های ذره در سلول از یک باریکه ایده‌آل خوشه‌شده استفاده شده است. یعنی فرض کرده‌ایم عملیات خوشه‌سازی ذرات توسط خوشه‌ساز انجام شده است. به همین منظور از مدل انتشار گاوسی برای انتشار ذرات استفاده شده است. یک میدان مغناطیسی به بزرگی ۰/۲ تسلا

¹¹ Particle in cell

² FDTD

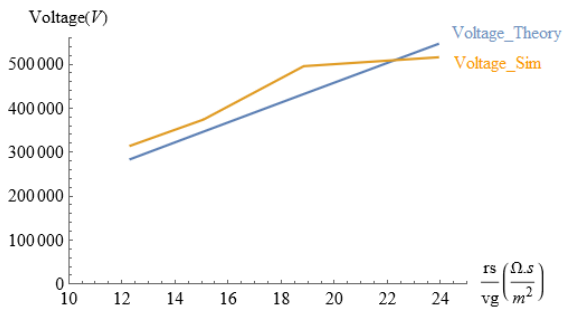
³ Buncher

^۴ معادل یک نانو کولن در هر خوشه

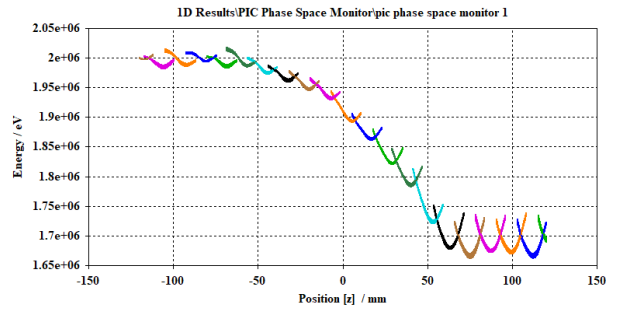
در راستای حرکت باریکه، برای جلوگیری گسترش عرضی ذرات در نظر گرفته شده است. قدم بعدی تعریف نمایشگرهای فضای فاز ذرات می‌باشد که با استفاده از آنها می‌توان اطلاعات مفیدی استخراج نمود. یکی از راههای محاسبه ولتاژ بارگذاری باریکه استفاده از فضای فاز طولی و تعریف نمایشگر انرژی جنبشی بر حسب مکان می‌باشد. در حقیقت بیشینه تغییر انرژی ذرات در واحد بار هنگام عبور از ساختار ولتاژ بارگذاری باریکه می‌باشد.

شکل ۱۶ نمودار استخراجی از نمایشگر فضای فاز ذرات در ۸ گام زمانی مختلف است. خوشه‌هایی که دارای رنگ یکسانی هستند مربوط به یک گام زمانی است و فاصله گام‌های زمانی ۰/۶۲۵ میکروثانیه می‌باشد. نتیجه ارائه شده مربوط به حالت پایدار می‌باشد. نمودار نشان می‌دهد باریکه‌ای با جریان ۳ آمپر القاکننده ولتاژ بارگذاری شده ۳۳۰ کیلوولتی برای ساختار مورد نظر می‌باشد. در ادامه برای صحت سنجی رابطه نظری و نتایج شبیه‌سازی تغییراتی هدفمند در هندسه مسئله، جنس و پارامترهای باریکه ایجاد کرده و نتایج به صورت نمودارهایی ارائه شده است. شکل ۱۷ تغییرات ولتاژ بارگذاری در اثر افزایش جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار داریم ولتاژ بارگذاری با جریان رابطه خطی دارد. در این مقایسه از طراحی رادیوفرکانسی انجام شده در بخش قبل استفاده شده است. با تغییر جریان متوسط باریکه میزان ولتاژ بارگذاری باریکه در حل‌کننده ذره در سلول محاسبه و گزارش شده است.

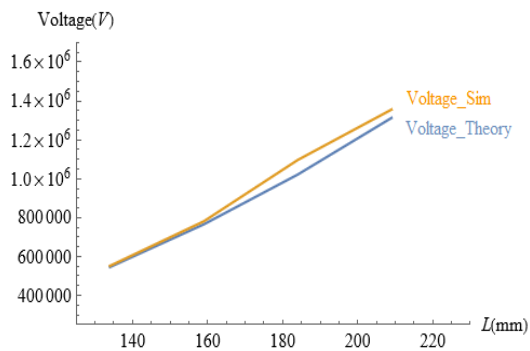
یکی دیگر از پارامترهای ظاهر شده در رابطه ولتاژ ضریب کیفیت است. با تغییر جنس تیوب شتابدهی بدون تغییر در هندسه تیوب، می‌توان مقدار این پارامتر را تغییر داد.



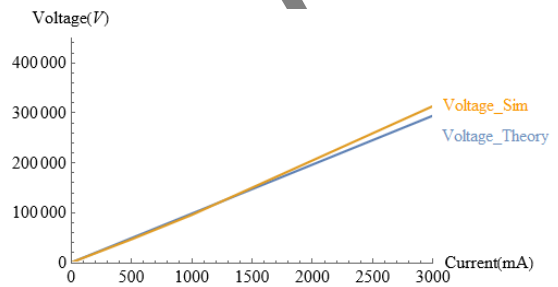
شکل ۲۰. مقایسه نتایج محاسبات نظری و شبیه‌سازی تغییرات ولتاژ بر حسب $\frac{r_s}{v_g}$



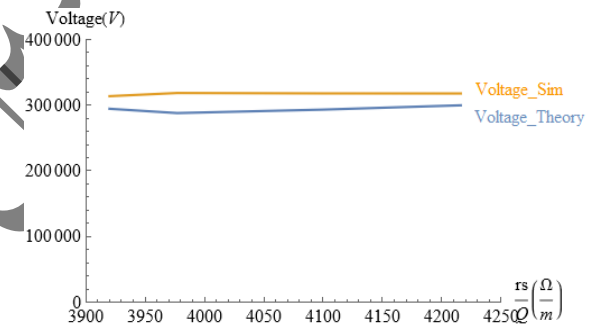
شکل ۱۶. فضای فاز طولی ذرات (انرژی بر حسب مکان)



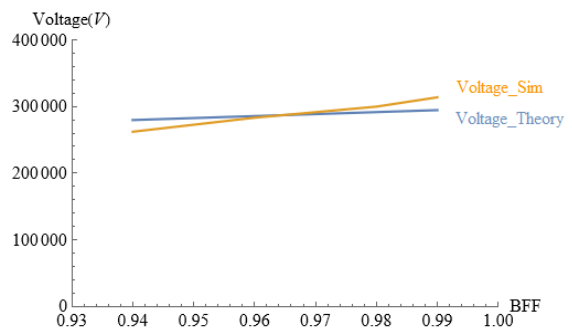
شکل ۲۱. مقایسه نتایج محاسبات نظری و شبیه‌سازی تغییرات ولتاژ بر حسب L



شکل ۱۷. مقایسه نتایج محاسبات نظری و شبیه‌سازی تغییرات ولتاژ بر حسب جریان



شکل ۱۸. مقایسه نتایج محاسبات نظری و شبیه‌سازی تغییرات ولتاژ بر حسب $\frac{r_s}{Q}$



شکل ۱۹. مقایسه نتایج محاسبات نظری و شبیه‌سازی تغییرات ولتاژ بر حسب F

جدول ۳. اطلاعات تکمیلی شبیه‌سازی‌های ذره در سلول

پیشینه اختلاف نتایج نظری و شبیه‌سازی (درصد)	جریان باریکه عبوری (آمپر)	پارامتر تغییر داده شده ساختار شتابدهی
۶	۰-۳	جریان باریکه (I_B)
۹	۳	جنس تیوب (رسانایی)
۶	۳	فاکتور شکل خوشه (F)
۱۲	۳	روزنه عبور باریکه (a)
۶	۳	طول تیوب شتابدهی (L)

در همین راستا با انتخاب جنس‌های مختلف برای تیوب شتابدهی طراحی شده (مس، آهن، استیل، آلومینیوم) ملاحظه

می‌شود که رسانایی بر روی ولتاژ بارگذاری تاثیر چندانی ندارد. نتیجه اینکه تغییر جنس به همان اندازه که ضریب کیفیت را تغییر می‌دهد، به همان میزان امیدانس موازی را تغییر خواهد داد و میزان $\frac{r_s}{Q}$ بدون تغییر خواهد ماند. البته تغییرات جزئی در نمودار نشان می‌دهد $\frac{r_s}{Q}$ در تقریب‌های مراتب بالاتر به رسانایی وابسته است. فاکتور شکل خوشه تغییر بعدی است. فاکتور شکل خوشه میزان خوشه شدن ذرات را نشان می‌دهد و از پارامترهای مربوط به باریکه است. در این قسمت به مانند مقایسه‌های قبلی تغییری در طراحی رادیوفرکانسی تیوب شتابدهی انجام نشده است. رابطه نظری و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هر چه پارامتر خوشه‌سازی به بیشینه مقدار خود (فاکتور شکل خوشه عددی بین صفر و یک است) نزدیک شود، ولتاژ بارگذاری نیز افزایش خواهد یافت. یکی دیگر از پارامترهای موثر در میزان ولتاژ بارگذاری، امیدانس موازی است. یکی از راههای تغییر امیدانس موازی تغییر قطر روزنه عبور باریکه است. تغییرات روزنه فرکانس تیوب شتابدهی را تغییر می‌دهد. به همین منظور برای هر روزنه یک طراحی رادیوفرکانسی جداگانه انجام گرفته است. از طرفی تغییر روزنه سرعت گروه را هم تغییر خواهد داد. به همین دلیل با تغییرات روزنه باید میزان تغییر $\frac{r_s}{v_g}$ را مد نظر قرار داد. نتایج نشان می‌دهد با کاهش روزنه میزان $\frac{r_s}{v_g}$ افزایش می‌یابد و منجر به افزایش ولتاژ بارگذاری می‌شود. آخرین پارامتر بررسی شده و تاثیرگذار در ولتاژ بارگذاری طول تیوب شتابدهی است. رابطه نشان می‌دهد که در ضرایب تضعیف کوچک ولتاژ با مربع طول تیوب متناسب است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده تاییدی بر این مدعاست که با افزایش تعداد سلول‌های شتابدهی ولتاژ بارگذاری باریکه افزایش می‌یابد. جدول ۳ اطلاعات تکمیلی نتایج شبیه‌سازی ذره در سلول در هر مقایسه را نشان می‌دهد. پس از آنکه این مقایسه انجام شد این سوال مطرح می‌شود که آیا شناخت حاصل شده نسبت به ولتاژ بارگذاری باریکه در نحوه طراحی رادیوفرکانسی تیوب کمک کننده است یا خیر.

۵. مراجع

مسئله‌ای که در شتابدهنده‌های توان بالا مطرح است این است که چگونه می‌توان میزان ولتاژ بارگذاری را جبران نمود. رابطه نظری نشان می‌دهد که اگر بتوانیم تضعیف در ساختار را کاهش دهیم عملکرد سیستم بهبود می‌یابد. کاهش تضعیف از دو مسیر امکان پذیر است. مسیر اول بهبود ضریب کیفیت از طریق خمش لبه‌های نوک تیز می‌باشد. این مسیر به دلیل اینکه افزایش امیدانس موازی را به دنبال دارد عملاً تاثیری ندارد. مسیر بعدی بهبود سرعت گروه با استفاده از افزایش روزنه عبوری می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم افزایش روزنه عبوری امیدانس موازی را کاهش می‌دهد و باید با افزایش دماغه این کاهش جبران شود. اگرچه افزودن دماغه مقدار امیدانس موازی را جبران می‌کند ولی افزودن دماغه به معنای افزایش ضخامت دیسک می‌باشد. با توجه به وابستگی نمایی سرعت گروه به ضخامت دیسک [۲] نمی‌توان به مقدار قابل توجهی سرعت گروه را بهبود بخشید.

۴. نتایج

در این مقاله مقدار ولتاژ بارگذاری شده در تیوب شتابدهی امیدانس ثابت مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان می‌دهند بیشینه اختلاف نتایج شبیه‌سازی و نظری ۱۲ درصد می‌باشد. از طرف دیگر نتیجه‌ای که حاصل می‌شود این است که در ساختار امیدانس ثابت نمی‌توان تغییری در طراحی رادیوفرکانسی انجام داد که ولتاژ بارگذاری به طور قابل توجهی کاهش یابد. رویکرد درست طراحی در ساختارهای توان بالا بهبود بازدهی انتقال توان و کاهش طول ساختار از طریق افزایش گرادیان میدان سلول به سلول می‌باشد. هدف این بررسی مطالعه‌ی اثرات حاصل از افزایش جریان در شتابدهنده‌های خطی الکترون و استفاده از آن در طراحی شتابدهنده‌ای پرتوان با انرژی ۳۰ MeV و توان متوسط ۳۰ kW بر مبنای کاواک‌های غیر ابر رسانا در باند S است.

1. Kutsaev, S. V. (2021). Electron bunchers for industrial RF linear accelerators: theory and design guide. The European Physical Journal Plus, 136(4), 1-73.

2. T.P. Wangler et al., RF Linear Accelerator, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2008.
3. Towne, N., & Rose, J. (2011). Beam loading compensation of traveling wave linacs through the time dependence of the rf drive. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 14(9), 090402.
4. Poisson Superfish, http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml.
5. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
6. Wille, K. (2000). The physics of particle accelerators: an introduction. Clarendon Press.
7. Borghi, R. P., Eldredge, A. L., Loew, G. A., & Neal, R. B. (1966). Design and fabrication of the accelerating structure for the Stanford two-mile accelerator. Advances in Microwaves, 1, 1-73.
8. Shumail, M., & Dolgashev, V. A. (2018). Efficiency analysis of high average power linacs. In 9th International Particle Accelerator Conference IPAC2018 (pp. 4970-4973). JACoW Publishing Vancouver, BC, Canada.
9. Wiedemann, H. (2015). Particle accelerator physics. Springer Nature.

سیستم فیلد از انتشار