

بررسی اثرات بارگذاری باریکه در تیوب شتابدهی موج‌رونده امپدانس ثابت

رضا کاوسی امید^{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

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸)

چکیده

در یک ساختار شتابدهی توان بالا، عامل جریان یک پارامتر محدود کننده است و بهره انرژی ذرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. باریکه قابلیت تحریک مدهای شتابدهی و مدهای مراتب بالا را دارد. 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 است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد تطابق مناسبی بین شبیه‌سازی و رابطه نظری وجود دارد. از طرف دیگر می‌توان ادعا کرد که میزان اثرات بارگذاری باریکه با تغییر طراحی بسامد رادیویی 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

تزریقگر برای سنکروترون‌ها و نیز در کاربردهای صنعتی و پزشکی مورد 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) پیش‌خوشه (۵) خوشه ساز (۶) تیوب شتابدهی. تیوب شتابدهی در این ساختار حیاتی‌ترین قسمت است؛ جایی که در آن ذرات خوشه شده بر روی قله موج قرار گرفته و بر انرژی‌شان

با توجه به مسیر ذرات در طول فرایند شتابدهی، همه شتاب‌دهنده‌ها را می‌توان به دو بخش اصلی حلقوی و خطی (لینک) 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 بسامدی ۱۰۰ مگاهرتز تا چندین گیگاهرتز کار می‌کنند. شتابدهنده‌های خطی در انرژی‌های پایین‌تر به عنوان

آن می‌توان به اتلاف توان در برانگیختن مدهای مرتبه بالاتر و ناپایداری‌های فروپاشی باریکه ناشی از رشد گسیلندگی اشاره کرد. بارگذاری باریکه در شتاب دهنده‌های 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 امپدانس ثابت با مد ساختاری $\frac{\pi}{2}$ است. به این منظور ابتدا نحوه طراحی ساختار موج‌رونده مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی الکترومغناطیسی با استفاده از کدهای سوپرفیش^۴ [۴] و سی‌اس‌تی^۵ [۵] انجام شده است. تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی ساختار شتابدهنده به همراه جفت‌کننده‌های 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 بسامد رادیویی ساختار شتابدهی

۲.۱. ساختار بارگذاری شده با قرص (DLS)

برای انتقال انرژی پیوسته 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 قرص‌هایی 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^۶ 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.

افزوده می‌شود. بخشی از مطالعات در این حوزه معطوف به اثرات جریان بالای باریکه در شتابدهنده‌های توان بالا است. در شتابدهنده‌های توان بالا بخش قابل توجهی از توان بسامد رادیویی به باریکه منتقل می‌شود. جریان بالای باریکه، در یک برخورددهنده ذرات لازمه دستیابی به درخشندگی^۱ مورد نظر است و در یک چشمه نور منجر به افزایش شدت و نیز همدوسی نور تابشی خواهد شد. در کاربردهای پرتودهی، جریان بالا با افزایش آهنگ دز، مدت زمان فرایند پرتودهی را کاهش می‌دهد. همچنین در تولید نوترون و رادیویوتوپ‌ها، آهنگ تولید متناسب با جریان باریکه الکترونی است. علاوه بر این، جریان باریکه از پارامترهای تعیین‌کننده در طراحی شتابدهنده است. در جریان‌های پایین تنها میدان‌های کاواک است که بر روی باریکه اثر می‌گذارند. 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 دیواره 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^۲ میزان افزایش انرژی باریکه در عبور از کاواک و نیز توزیع انرژی، آن را تحت تأثیر قرار خواهد داد. برانگیخته شدن مدهای غیر شتابدهی توسط باریکه‌های نسبی، تحت عنوان میدان‌های دنباله‌ای^۳ شناخته می‌شوند. در حالت کلی میدان‌های دنباله‌ای به واسطه تغییر هندسه در دیواره محفظه خلأ تولید می‌شوند. از جمله اثرات

۱. Luminosity

۲. Beam loading compensation

۳. Wakefields

۴. SUPERFISH

۵. CST-MWS

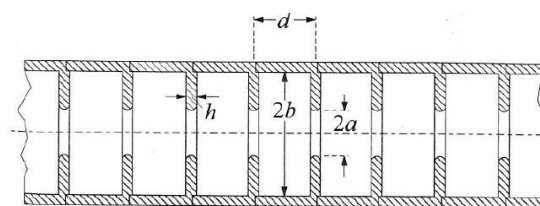
۶. Synchron

جدول ۱. مقیاس گذاری بسامد [۷].

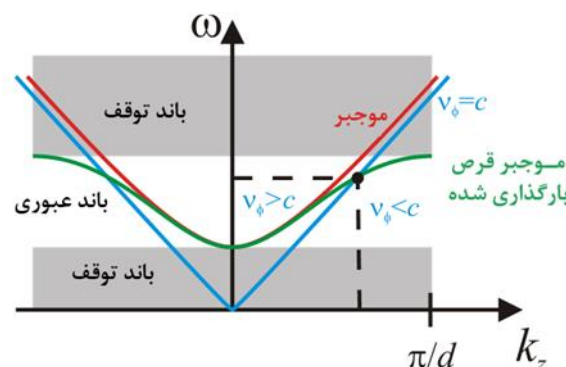
پارامترها	وابستگی بسامدی
شعاع کاواک	f^{-1}
ضریب کیفیت	$f^{-1/2}$
انرژی ذخیره شده	f^{-2}
شانت امپدانس	$f^{1/2}$
R/Q	f^1
مقاومت سطحی	$f^{1/2}$
توان اتلافی در یک متر	$f^{-1/2}$
اثرات طولی میدان دنباله‌ای	f^2
اثرات عرضی میدان دنباله‌ای	f^3

۲.۲. پارامترهای مهم طراحی

پارامترهای ساختاری باید به نحوی انتخاب شوند که فرایند شتابدهی با بازدهی بالایی انتقال توان همراه باشد و مطلوب است توان از دست رفته به دیواره‌ها و بار خارجی را به حداقل رساند. اولین و مهم‌ترین پارامتر طراحی، بسامد است. بسامد تشدید بیشتر تحت تأثیر شعاع سلول‌ها b است. بسامد بر روی پارامترهای مختلف ساختار طبق جدول ۱ تأثیرگذار است. با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود که در بسامدهای بالاتر مباحث مربوط به میدان‌های دنباله‌ای چالش برانگیز خواهد بود. در بسامدهای بالا به دلیل روزه‌های کوچک‌تر، تحمل قرارگیری باریکه را باید مدنظر قرار داد. امپدانس موازی و ضریب کیفیت با تغییر جنس ساختار تغییر می‌کنند، 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 روزه قابل کنترل است. سرعت گروه زمان پر شدن 1 کاواک را تعیین می‌کند. به همین دلیل طول تپ RF حداقل مقدار سرعت گروه را تعیین می‌کند. ضخامت قرص h باید به گونه‌ای باشد که مقاومت مکانیکی مناسب و تحمل خوب برای تخلیه الکتریکی داشته باشد. بعد از آن که شعاع سلول‌ها و شعاع روزه به ازای بسامد، سرعت گروه و دامنه



شکل ۱. ساختار بارگذاری شده با قرص.



شکل ۲. نمودار پاشندگی ساختار قرص بارگذاری شده.

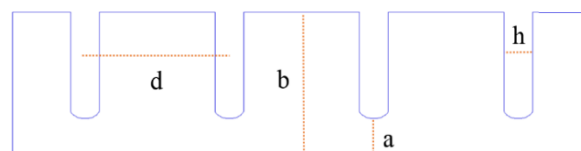
این قضیه اساس مطالعه انتشار موج در ساختارهای تناوبی است. میدان الکتریکی طولی را می‌توان به صورت

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

نوشت که در آن E_a یک تابع تناوبی و k_0 عدد موج است. برای یک کاواک منفرد مانند کاواک استوانه‌ای تعداد بی‌نهایت حالت تشدید وجود دارد که مدهای کاواک نامیده می‌شوند. این مدها به عنوان مدهایی که میدان الکتریکی عرضی (TE_{mnp}) و میدان مغناطیسی عرضی (TM_{mnp}) دارند، نامگذاری شده‌اند. برای آرایه‌ای از کاواک‌های به یکدیگر جفت شده، هر یک از مدهایی که برای کاواک منفرد داشتیم خانواده‌ای مدهای خود را ایجاد می‌کند. اصطلاحاً به این مدها، مدهای ساختاری اطلاق می‌شود [۲]. هر یک از این خانواده‌ها در یک باند بسامدی مشخص به نام باند عبور قرار دارند، که در نزدیکی بسامد 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 است) برای طراحی یک شتابدهنده الکترونی است. با تعیین نمودار پاشندگی می‌توان اطلاعات مفیدی (پیشروی فاز، سرعت فاز، سرعت گروه) از ساختار بارگذاری شده با قرص به دست آورد.

به دست آورد. در این رابطه، λ طول موج است. یک ساختار موج رونده امپدانس ثابت با مد ساختاری $\frac{\pi}{4}$ برای طراحی انتخاب شده است. اگرچه مد شتابدهی $\frac{2\pi}{3}$ امپدانس موازی بالاتری دارد ولی مد $\frac{\pi}{4}$ نسبت به خطاهای 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 قرص در شکل ۳ نشان داده شده است. از این ترکیب برای محاسبه بسامد 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 $\frac{2v}{4c}$ محاسبه می‌شود. در این رابطه، v و c به ترتیب سرعت ذره همگام و سرعت نورند. از پس پردازشگر SFO در سوپرفیش برای محاسبه پارامترهای شتابدهنده مانند ضریب کیفیت، امپدانس موازی، ضریب گذر زمان و غیره استفاده می‌شود. سوپرفیش محاسبات را برای ساختارهای موج ایستاده انجام می‌دهد و این مقادیر سپس به حالت موج رونده تبدیل می‌شوند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازهای سوپرفیش در جدول ۲ گزارش شده‌اند.

یکی دیگر از پس پردازشگرهای سوپرفیش برنامه SF7 است 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 به صورت شکل ۴ و ۵ به دست می‌آید. باید دقت کرد که میدان محاسبه شده نمایش میدان موج ایستاده است و باید به شکل موج رونده تبدیل شود. همان طور که در بخش ۲.۱ توضیح داده شد نمودار پاشندگی اطلاعات مهمی در اختیار ما می‌گذارد. یکی از خروجی‌های نمودار پاشندگی سرعت گروه است. سرعت گروه برای یک مد شتابدهی از شیب نمودار پاشندگی در بسامد مورد نظر به دست می‌آید. نمودار نشان می‌دهد که سرعت گروه همواره کوچک‌تر از سرعت نور است و در دو نقطه نیز سرعت گروه صفر (مدهای 0 و π) دارد. برای رسم نمودار پاشندگی ابتدا باید بسامد تشدید مدهای شتابدهی مختلف را استخراج کنیم. قدم بعدی برآزش یک منحنی درجه ۳ بر روی نقاط به دست آمده نمودار پاشندگی است.



شکل ۳. هندسه ۴ سلولی تیوب شتابدهی.

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 قرص (mm)	۵
بسامد (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

میدان الکتریکی مورد نظر تعیین شدند، سرعت فاز تنها تحت تأثیر 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 سامانه را به ما می‌دهد مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۳.۲.۱. طراحی ساختار با کد سوپرفیش

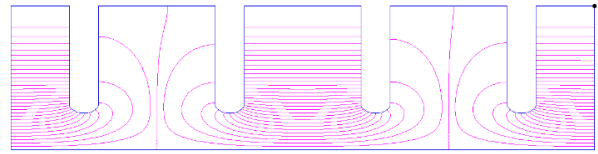
بسامد تشدید ساختار با توجه به بسامد کاری لامپ‌های کلاسیک تجاری باند بسامدی ۲۹۹۸ s مگاهرتز در نظر گرفته شده است. با استفاده از بسامد تشدید می‌توان یک تخمین اولیه‌ای از شعاع سلول‌های ساختار طبق رابطه $b = \frac{2/405\lambda}{\sqrt{\pi}}$

۲.۳.۲. طراحی ساختار در نرم افزار سی‌اس‌تی

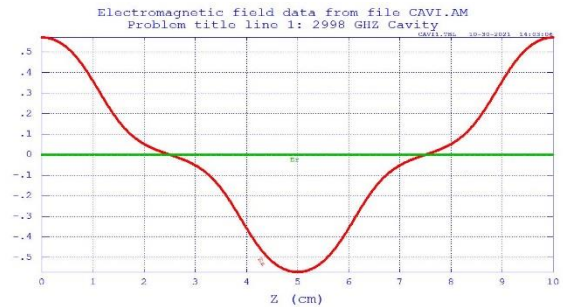
در بخش قبل، در مورد طراحی الکترومغناطیسی دو بعدی تیوب شتابدهی بحث کردیم. اجزای مهم ساختار شتاب دهی، جفت کننده‌های ورودی و خروجی هستند. در اینجا اولین سلول تیوب به عنوان سلول جفت‌کننده ورودی و آخرین سلول به عنوان سلول جفت‌کننده خروجی استفاده می‌شود. جفت‌شدگی با ایجاد یک شیار در سلول ابتدایی و انتهایی انجام می‌شود. شرایط مرزی در سلول‌های جفت‌کننده با سلول مجاور متفاوت است و بنابراین قطر داخلی سلول‌های جفت‌کننده کمی تغییر می‌کند. انتخاب پارامترهای هندسی مناسب برای سلول‌های جفت‌کننده به منظور به حداقل رساندن میزان توان بازگشتی اجتناب ناپذیر است. طرحواره سلول جفت‌کننده در شکل ۷ قابل مشاهده است. روزنه‌ای مستطیلی با ابعاد $26/6 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ برای جفت‌شدگی توان ایجاد شده است و قطر سلول جفت‌کننده و ارتفاع شیار به ترتیب $77/12$ میلی‌متر و $2/24$ میلی‌متر است. در سلول ورودی، توان RF از کلاسترون با استفاده از یک موجبر مخروطی منطبق با موجبر استاندارد WR284 به داخل تیوب تغذیه می‌شود.

پارامترهای تأثیرگذار در جفت‌شدگی مناسب شعاع سلول، طول شیار و ارتفاع شیار است. مدهای ساختاری π ، $\frac{3\pi}{4}$ ، $\frac{\pi}{2}$ ، $\frac{\pi}{4}$ و 0 داخل ساختاری با تعداد ۵ سلول تحریک می‌شوند. اگر ابعاد مؤثر در جفت‌شدگی به درستی انتخاب شوند نمودار S_{11} حالت تشدید خواهد بود. تحلیل الکترومغناطیسی سه بعدی تیوب موج‌رونده ۵ سلولی با جفت‌کننده‌های ورودی و خروجی با استفاده از کد شبیه‌سازی سی‌اس‌تی انجام شده است. شکل ۸ هندسه این ساختار را نشان می‌دهد.

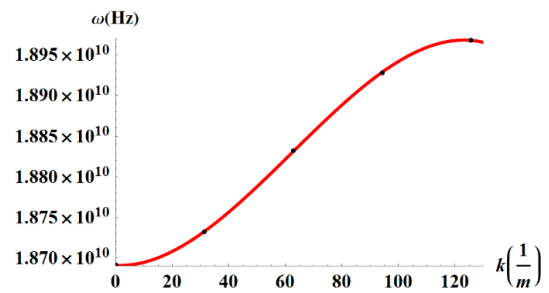
جنس تیوب شتابدهی از مس با رسانندگی 58 MS/m است. از طریق نمودار S_{11} می‌توان باند عبور را مشاهده کرد که در آن تمام بسامدها از طریق ساختار موج‌رونده منتقل می‌شوند. این برخلاف ساختار موج‌ایستاده است که در بسامدهای گسسته تشدید حاصل می‌شود. همانطور که در نمودار S_{11} شکل ۹ قابل مشاهده است، باند عبور $2975-3019$ مگاهرتز است.



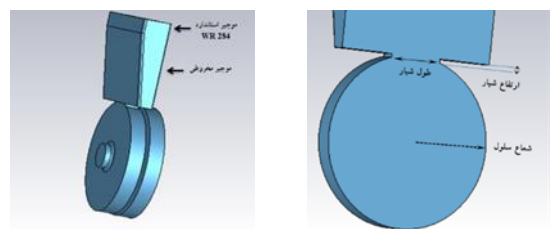
شکل ۴. الگوی میدان‌ها در مد شتابدهی $\frac{\pi}{4}$



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



شکل ۶. نمودار پاشندگی برای ۵ مد مختلف.

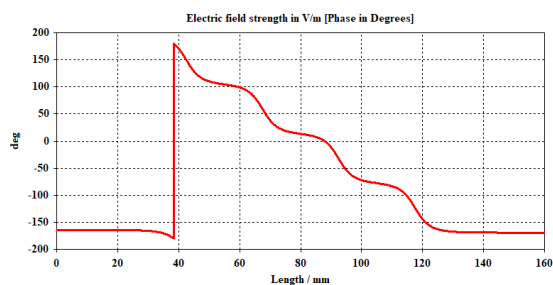


شکل ۷. هندسه جفت‌کننده ورودی و خروجی.

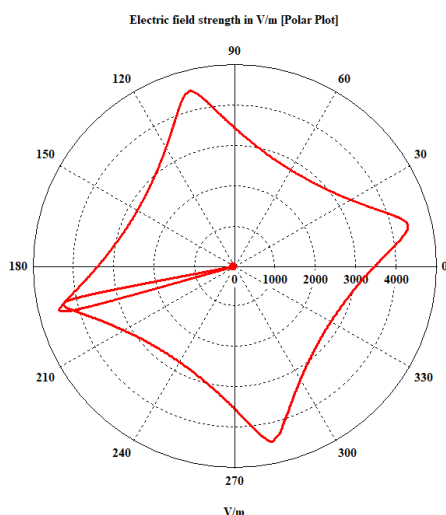
تابع درجه ۳ برازش شده به شکل رابطه (۲) است:

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

نمودار برازش شده با استفاده نرم‌افزار ممتیکا به صورت شکل ۶ است. سرعت گروه مشتق تابع در نقطه $k = \frac{\pi}{\lambda_d}$ است که برابر $3/42458 \times 10^6$ است.



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

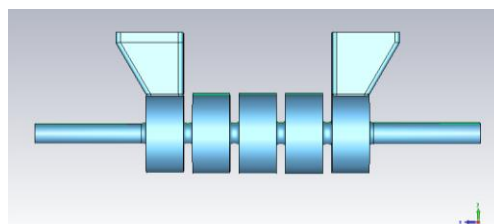


شکل ۱۳. نمودار قطبی میدان الکتریکی در بسامد ۲۹۹۷/۸ مگاهرتز.

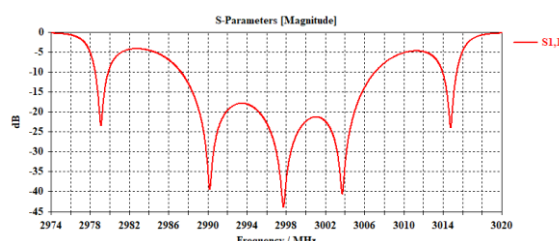
می توان پیشروی فاز در هر سلول را محاسبه کرد. نمودارها به طور میانگین پیشروی فاز میدان در هر سلول را محدوده فاز ۹۲° - ۸۹° نشان می دهند.

۳. تئوری بارگذاری باریکه در ساختار موج رونده امیدانس ثابت (هندسه یکنواخت)

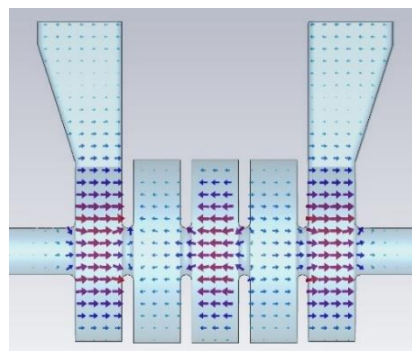
شتاب یک باریکه جریان بالا باعث کاهش شارش توان در تیوب شتابدهی و دامنه میدان شتاب دهنده می شود که نتیجه آن کاهش انرژی باریکه خروجی است. همچنین، در جریان های بالا اگر باریکه نسبتی نباشد باید اثرات بارفضایی در نظر گرفته شود. بار فضایی می تواند بر پایداری دینامیک طولی یا عرضی تأثیر بگذارد. از طرف دیگر همانطور 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



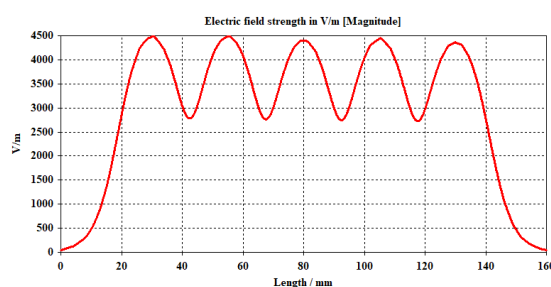
شکل ۸. هندسه طراحی شده تیوب شتابدهی امیدانس ثابت به همراه جفت کننده ها.



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



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



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

از حل کننده دامنه بسامدی سی اس تی جهت ارزیابی توزیع، بزرگی و پیشرفت فاز میدان در هر سلول، استفاده شده است. نمایشگرهای میدان الکتریکی در بسامدهای مختلف برای ثبت نتایج تعریف می شوند. شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب توزیع میدان و بزرگی میدان را در بسامد ۲۹۹۷/۸ مگاهرتز نشان می دهند. شکل ۱۲ و ۱۳ نشان دهنده تغییرات فاز میدان الکتریکی است که از طریق آن

با استفاده از بقای انرژی، ولتاژ شتاب‌دهی مؤثر القاشده توسط باریکه محاسبه می‌شود. بقای انرژی به این معنی است که وقتی باریکه‌ای 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 دیوارها و توانی که در واحد طول به باریکه تحویل داده می‌شود.

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

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

از حل معادله دیفرانسیل بالا مطابق شرایط اولیه به دست می‌آید:

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

اکنون می‌توان ولتاژ خالص القاشده را محاسبه کرد

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

با توجه به تعریف ثابت تضعیف

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

در نتیجه ولتاژ القایی باریکه هنگامی که یک خوشه ذرات با بار q با داشتن عامل شکل F و با سرعت نور از یک ساختار موج‌رونده امپدانس ثابت عبور می‌کند 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 مؤثر تیوب شتابدهی است. عامل شکل خوشه F ، میانگین کسینوس فاز ذرات موجود در هر خوشه را نشان می‌دهد و طبق رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

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

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

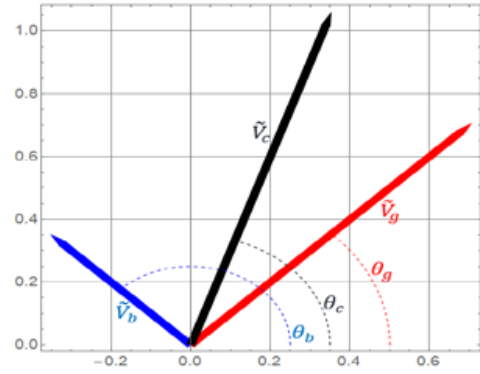
$$\frac{\tau + e^{-\tau} - 1}{\tau} \approx \frac{\tau}{\tau} = \frac{\omega L}{\gamma Q v_g}, \quad (13)$$

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

$$V_{FND} = -\frac{\omega n L}{\gamma Q n v_{ng}} F I_B r_s L \quad (14)$$

همچنین تابعیت ولتاژ به ثابت تضعیف را می‌توان به صورت نمودار شکل ۱۵ نشان داد.

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



شکل ۱۴. برهم‌نهی فازورهای ولتاژ در صفحه مختلط.

تحریک می‌کند که به نوبه خود کیفیت پرتو و راندمان شتابدهی را کاهش می‌دهد. 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 است. در صورت وجود میدان‌های متغیر سینوسی، مناسب‌تر است که ولتاژها به صورت فازورهای در صفحه مختلط در نظر گرفته شوند.

طبق قضیه اساسی بارگذاری باریکه ولتاژ کاواک مطابق شکل ۱۴ از برهم‌نهی خطی ولتاژ منبع و ولتاژ القایی باریکه به دست می‌آید.

$$\vec{V}_c = \vec{V}_g + \vec{V}_b, \quad (3)$$

فرض می‌کنیم 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 دیواره‌های ساختار $P_w(z)$ ، انرژی ذخیره شده در واحد طول $U(z)$ و توان کل $P(z)$ به صورت زیر مرتبط هستند:

$$E_{FND}(z) = r_s P_w(z) = r_s \frac{\omega}{Q} U(z) = \gamma r_s \frac{\omega}{\gamma Q v_g} P(z), \quad (4)$$

ω ، r_s ، Q و v_g به ترتیب بسامد زاویه‌ای، شانت امپدانس، ضریب کیفیت و سرعت گروه هستند. با تعریف ثابت میرایی در واحد طول به شکل $\alpha = \frac{\omega}{\gamma Q v_g}$ خواهیم داشت:

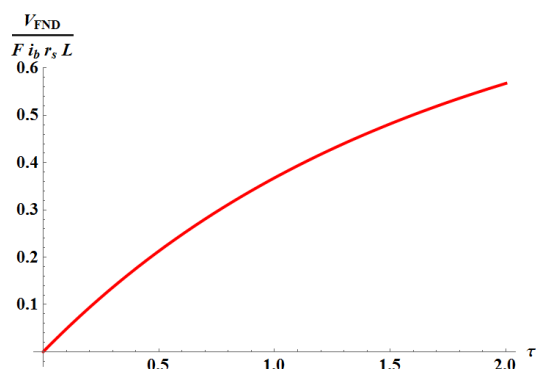
$$E_{FND}(z) = \gamma r_s \alpha P(z), \quad (5)$$

میدان الکتریکی القایی در ابتدای ساختار باید صفر باشد بنابراین

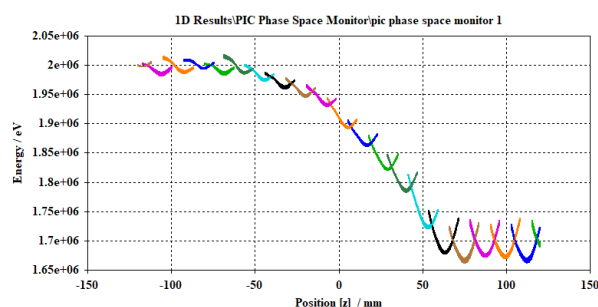
$$E_{FND}(0) = 0, \quad (6)$$

بسامد رادیویی و محاسبه پارامترهای تیوب شتابدهی در حل‌کننده بسامد بالا، هندسه مورد نظر به حل‌کننده ذره در سلول منتقل می‌شود. باریکه خوشه‌ای الکترون با انرژی ۲ مگاالکترون ولت انرژی باریکه در انتهای خوشه‌ساز و جریان ۳ آمپر^۲ از کاواک عبور می‌کند. در شبیه‌سازی‌های ذره در سلول از یک باریکه آرمانی خوشه‌شده استفاده شده است. یعنی فرض کرده‌ایم عملیات خوشه‌سازی ذرات توسط خوشه‌ساز انجام شده است. به همین منظور از مدل انتشار گوسی برای انتشار ذرات استفاده شده است. یک میدان مغناطیسی به بزرگی ۰/۲ تسلا در راستای حرکت باریکه، برای جلوگیری گسترش عرضی ذرات در نظر گرفته شده است. قدم بعدی تعریف نمایشگرهای فضای فاز ذرات است که با استفاده از آنها می‌توان اطلاعات مفیدی استخراج کرد. یکی از راه‌های محاسبه ولتاژ بارگذاری باریکه استفاده از فضای فاز طولی و تعریف نمایشگر انرژی جنبشی بر حسب مکان است. در حقیقت بیشینه تغییر انرژی ذرات در واحد بار هنگام عبور از ساختار ولتاژ بارگذاری باریکه است.

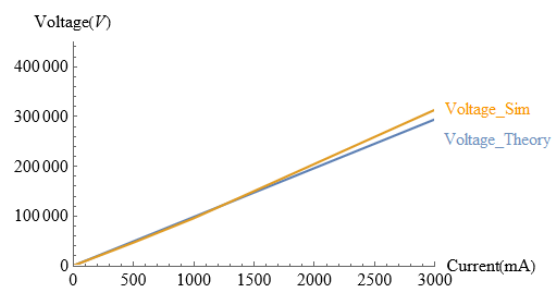
شکل ۱۶ نمودار استخراجی از نمایشگر فضای فاز ذرات در ۸ گام زمانی مختلف است. خوشه‌هایی که رنگ یکسانی دارند مربوط به یک گام زمانی و فاصله گام‌های زمانی ۰/۶۲۵ میکروثانیه است. نتیجه ارائه شده مربوط به حالت پایدار است. نمودار نشان می‌دهد باریکه‌ای با جریان ۳ آمپر القاکننده ولتاژ بارگذاری شده ۳۳۰ کیلوولتی برای ساختار مورد نظر است. 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 بسامد رادیویی 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.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات ولتاژ القایی بر حسب ثابت تضعیف.



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



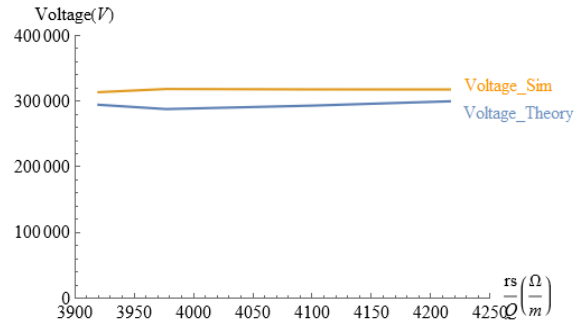
شکل ۱۷. مقایسه نتایج محاسبات نظری و شبیه‌سازی تغییرات ولتاژ بر حسب جریان.

۱.۳. شبیه‌سازی بارگذاری باریکه در ساختار موج‌رونده هندسه یکنواخت

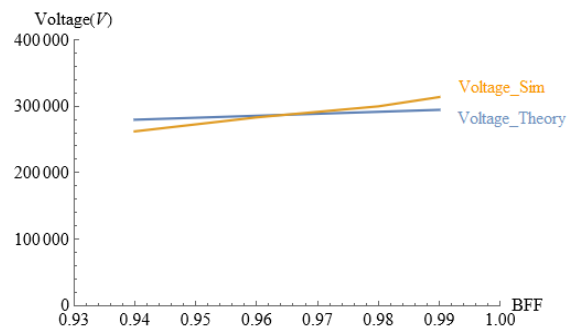
در این قسمت برای مشاهده اثرات بارگذاری باریکه از حل‌کننده ذره در سلول در نرم افزار سی‌اس‌تی استفاده شده است. اساس این روش حل معادلات حرکت و ماکسول است و از الگوریتم تفاضل محدود در حوزه زمان^۱ برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. پس از طراحی

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

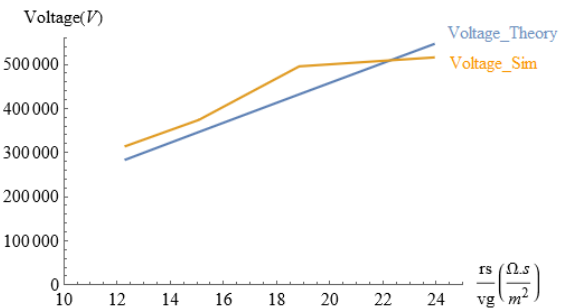
در همین راستا با انتخاب جنس های مختلف برای تیوب شتابدهی طراحی شده (مس، آهن، استیل و آلومینیوم) ملاحظه می شود که رسانایی بر روی ولتاژ بارگذاری تأثیر چندانی ندارد (شکل ۱۸). نتیجه این که تغییر جنس به همان اندازه که ضریب کیفیت را تغییر می دهد، امپدانس موازی را نیز تغییر خواهد داد و میزان $\frac{r_s}{Q}$ بدون تغییر خواهد ماند. البته تغییرات جزئی در نمودار نشان می دهد $\frac{r_s}{Q}$ در تقریب های مراتب بالاتر به رسانایی وابسته است. عامل شکل خوشه تغییر بعدی است. عامل شکل خوشه میزان خوشه شدن ذرات را نشان می دهد و از پارامترهای مربوط به باریکه است. در این قسمت به مانند مقایسه های قبلی تغییری در طراحی بسامد رادیویی تیوب شتابدهی انجام نشده است. رابطه نظری و نتایج شبیه سازی مطابق شکل ۱۹ نشان می دهند که هر چه پارامتر خوشه سازی به بیشینه مقدار خود (عامل شکل خوشه عددی بین صفر و یک است) نزدیک شود، ولتاژ بارگذاری نیز افزایش خواهد یافت. یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در میزان ولتاژ بارگذاری، امپدانس موازی است. یکی از راه های تغییر امپدانس موازی تغییر قطر روزنه عبور باریکه است. تغییرات روزنه بسامد تیوب شتابدهی را تغییر می دهد. به همین منظور برای هر روزنه یک طراحی بسامد رادیویی 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 می دهد با کاهش روزنه میزان $\frac{r_s}{v_g}$ افزایش می یابد و منجر به افزایش ولتاژ بارگذاری می شود. شکل ۲۰ نحوه تغییرات ولتاژ بارگذاری بر حسب $\frac{r_s}{v_g}$ را نشان می دهد. آخرین پارامتر بررسی شده و تأثیرگذار در ولتاژ بارگذاری طول تیوب شتابدهی است. رابطه نشان می دهد که در ضرایب تضعیف کوچک، ولتاژ با مربع طول تیوب متناسب است. نتایج شبیه سازی های انجام شده تأییدی بر این مدعاست که با افزایش تعداد سلول های شتابدهی ولتاژ بارگذاری باریکه مطابق نمودار شکل ۲۱ افزایش می یابد. جدول ۳ اطلاعات تکمیلی نتایج شبیه سازی ذره در سلول در هر مقایسه را نشان می دهد.



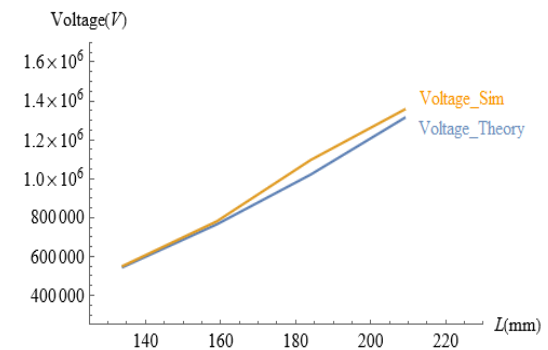
شکل ۱۸. مقایسه نتایج محاسبات نظری و شبیه سازی تغییرات ولتاژ بر حسب $\frac{r_s}{Q}$.



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



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



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

جدول ۳. اطلاعات تکمیلی شبیه‌سازی‌های ذره در سلول.

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

خمش لبه‌های نوک تیز است. این مسیر به دلیل این که افزایش امیدانس موازی را به دنبال دارد عملاً تأثیری ندارد. مسیر بعدی بهبود سرعت گروه با استفاده از افزایش روزنه عبوری است. 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 قرص است. با توجه به وابستگی نمایی سرعت گروه به ضخامت قرص [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 است. از طرف دیگر نتیجه‌ای که حاصل می‌شود این است که در ساختار امیدانس ثابت نمی‌توان تغییری در طراحی بسامد رادیویی 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 است. هدف این بررسی مطالعه 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.

پس از آن که این مقایسه انجام شد این سوال مطرح می‌شود که آیا شناخت حاصل شده نسبت به ولتاژ بارگذاری باریکه در نحوه طراحی بسامد رادیویی تیوب کمک کننده است یا خیر. مسئله‌ای که در شتابدهنده‌های توان بالا مطرح است این است که چگونه می‌توان میزان ولتاژ بارگذاری را جبران کرد. رابطه نظری نشان می‌دهد که اگر بتوانیم تضعیف در ساختار را کاهش دهیم عملکرد سامانه بهبود می‌یابد. کاهش تضعیف از دو مسیر امکان پذیر است. مسیر اول بهبود ضریب کیفیت از طریق

مراجع

1. V Kutsaev Sergey, *Eur. Phys. J. Plus.* **136**, 4 (2021) 446.
2. P Wangler Thomas, "RF Linear accelerators", John Wiley & Sons (2008).
3. N Towne and J Rose, *Phys. Rev. Accel. Beams.* **14**, 9 (2011) 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. K Wille, "The physics of particle accelerators: an introduction", Clarendon Press. (2000).
7. R P Borghi, et al, *Advances in Microwaves.* **1** (1966) 1.
8. M Shumail and V A Dolgashev, *IPAC2018.* (2018) 4970.
9. H Wiedemann, "Particle accelerator physics", Springer Nature (2015).