



بررسی تأثیر تغییرات ابعادی کاواک استوانه ای بر پارامترهای موثر در شتاب ذره الکترون

علی محمد، پور صالح^{۱*}؛ ایرج، جباری^۱؛ حسین، خلفی^۲؛ بابک، شیرانی^۱؛ فرشاد، قاسمی^۲

۱. دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، گروه مهندسی هسته ای

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، معاونت توسعه کاربرد پرتوها، شرکت ساخت و توسعه شتابدهنده‌ها و کاربرد آنها (تکنوسان)

چکیده:

در این مقاله به طراحی و شبیه سازی اشکال مختلف یک محفظه استوانه ای بصورت ساده و با دماغه که یکی از اجزای اصلی یک شتابدهنده خطی الکترون می باشد پرداخته شده است. مهمترین هدف این تحقیق تأثیر تغییرات ابعادی کاواک استوانه ای در مد TM_{۱۰} بر روی فرکانس رزونانس، ضریب کیفیت، امپدانس شانت، ضریب زمان عبور و میزان میدان الکتریکی بوده است. در این تحقیق سعی شده است با انجام محاسبات و همچنین شبیه سازی با نرم افزار CST اشکال مختلف یک تک کاواک استوانه ای با هم مقایسه شده، مزایا و معایب هر کدام مطرح، و در نهایت یک شکل بهینه از کاواک استوانه ای انتخاب گردیده است.

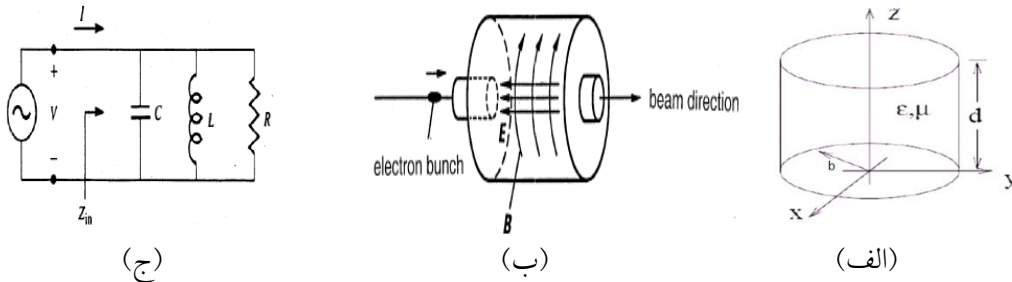
کلمات کلیدی: شتابدهنده خطی الکترون، کاواک استوانه ای، ضریب کیفیت، مد TM_{۱۰}، نرم افزار CST

مقدمه:

یک شتابدهنده دستگامی است که ذرات باردار را در یک مسیر مشخص شتاب می دهد. شتابدهنده های ذرات باردار انواع مختلفی دارند که یکی از متداول ترین آنها شتابدهنده های خطی موج رادیویی یا RF است که در آن ذرات باردار نظیر ذره الکترون را بوسیله میدان الکتریکی ایجاد شده در کاواک، ناشی از میدانهای RF شتاب می دهند. شتابدهنده های خطی که معمولاً به نام لینک (Linac) معروف می باشد کاربرد فراوانی در مقاصد صنعتی، پزشکی و تحقیقاتی دارند، که در این میان می توان به درمان سرطان، تولید رادیو داروها، سترون سازی مواد و تجهیزات پزشکی، پرتو دهی مواد غذایی، پرتو دهی مواد پلیمری، پرتو دهی سیم و کابل، آنالیز مواد، تحقیقات در فیزیک کاربردی و غیره اشاره کرد [۱ و ۲]. یکی از اجزای مهم شتابدهنده های خطی کاواک یا محفظه شتاب می باشد. این شتابدهنده ها بسته به نوع و انرژی آنها میتواند شامل یک کاواک یا چندین کاواک متوالی جهت شتاب ذرات باردار باشد. [۳] بطور مثال مدلهای از شتابدهنده های صنعتی مدل ILU تنها دارای یک کاواک هستند در حالی که در شتابدهنده های خطی پزشکی اغلب از چندین کاواک پشت سر هم در تیوب شتابدهی استفاده می گردد. [۴ و ۵] در شتابدهنده های موج رادیویی در اثر اعمال یک موج الکترومغناطیسی RF در هر کاواک منفرد به طور سینوسی در فرکانسی برابر با فرکانس تشدید شتابدهنده نوسان می کند. ابعاد کاواک تأثیر مستقیم بر روی فرکانس نوسان و سایر پارامترهای مهم در یک کاواک دارد که در این مقاله به آن پرداخته خواهد شد. جهت شبیه سازی کاواکهای مورد نظر از نرم افزار CST که یکی از نرم افزارهای مفید و کاربردی در زمینه مخابرات و طراحی شتابدهنده محسوب می شود استفاده شده است. [۶]

روش کار:

کاواک استوانه ای به عنوان متداولترین کاواک در طراحی شتابدهنده ها مطرح است. ساده ترین شکل کاواک استوانه ای (Pillbox Cavity) مطابق شکل (۱ الف) در واقع یک استوانه ساده فلزی تو خالی می باشد. مد اصلی مورد استفاده در شتاب ذرات در کاواک استوانه ای مد $TM_{1,0}$ می باشد که شکل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در این مد در شکل (۱ ب) نشان داده شده است



شکل ۱: الف) کاواک استوانه ای، ب) شکل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی ج) مدار معادل

بطور کلی یک کاواک استوانه ای را در حالت رزونانس را میتوان بصورت یک مدار RLC موازی در نظر گرفت که این مدار معادل را در شکل (۱ ج) مشاهده می کنید. در این مدار سلف و خازن مدار اصلی رزونانس بوده و مقاومت جهت تلفات در مدار رزونانس در نظر گرفته شده است. بدیهی است که هرچه امپدانس ورودی این مدار بالاتر باشد تلفات در مدار کمتر می گردد. بعبارت دیگر حالت ایده ال بی نهایت بودن میزان R است ولی در عمل همواره با مشکل وجود این مقاومت و تلفات در کاواک مواجه هستیم. جهت محاسبه فرکانس در

یک کاواک استوانه ای ساده در مد $TM_{1,0}$ از رابطه (۱) استفاده می کنیم. [۷]

$$F = \frac{2.405 C}{\pi b} \quad (1)$$

در این رابطه b شعاع کاواک استوانه ای و C سرعت نور می باشد. چنانچه مشاهده می شود مطابق رابطه (۱) مهمترین پارامتر موثر در تغییر فرکانس رزونانس شعاع محفظه می باشد و در یک تک کاواک ساده طول محفظه تاثیری در فرکانس رزونانس ندارد. لیکن در صورتی که بخواهیم شکل کاواک را تغییر بدهیم مثلا در آن ایجاد دماغه کنیم و یا از چندین کاواک پشت سر هم استفاده کنیم، قطعا طول کاواک بسیار مهم خواهد بود. جهت محاسبه میدان الکتریکی در محور شتاب و همچنین میدان مغناطیسی عمود بر آن در یک کاواک استوانه ای در

مد $TM_{1,0}$ از روابط (۲) و (۳) استفاده می نمائیم. [۷ و ۸]

$$E_z = E_0 J_0(k_r r) \cos \omega t \quad (2)$$

$$B_\theta = -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin \omega t \quad (3)$$

همچنین محاسبه انرژی ذخیره شده در کاواک استوانه ای و توان تلفاتی RF در دیواره های کاواک با استفاده

از روابط (۴) و (۵) انجام می شود. [۹]

$$U = \frac{\pi \epsilon_0 d b^2}{\gamma} E^2 J_1^2(2.405) \quad (4)$$

$$P = \pi b R_S E^2 \frac{\epsilon_0}{\mu_0} J_1^2(2.405) (d + b) \quad (5)$$

که در آن d طول کاواک استوانه ای و R_S مقاومت سطحی پوسته داخلی کاواک استوانه ای می باشد. از جمله پارامترهای مهم در طراحی و محاسبات کاواک می توان به ضریب کیفیت اشاره نمود که جهت محاسبه این پارامتر در مد شتابدهی مورد نظر از رابطه (۶) استفاده نمودیم. [۹]

$$Q = \frac{\omega U}{P} = \frac{2.405 \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}}{2 R_S (1 + b/d)} \quad (6)$$

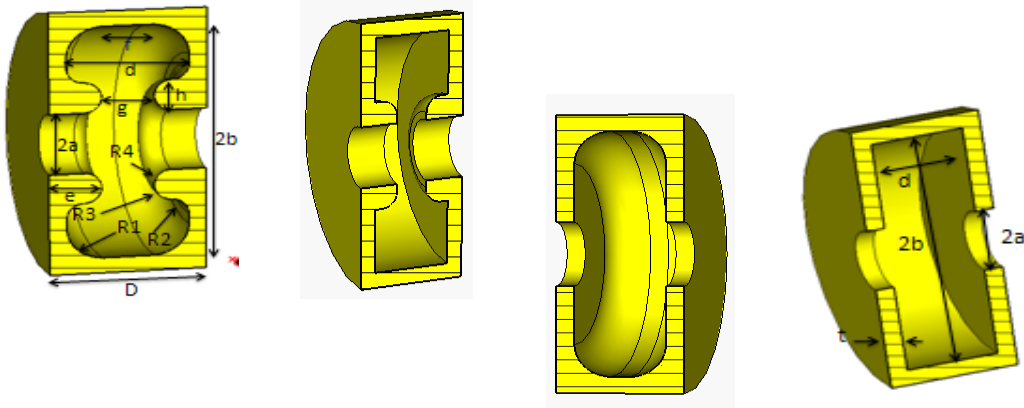
در طراحی کاواک همواره رسیدن به بالاترین میزان ضریب کیفیت مد نظر است تا به کمترین میزان تلفات کمتر در کاواک دست یابیم و توان RF کمتری نیاز داشته باشیم. پارامتر دیگر مورد نظر در شتابدهنده ها ضریب زمان عبور (Transit Time Factor) می باشد که در واقع زمانی است که ذره باردار میدان را می بیند. این ضریب از رابطه (۷) بدست می آید. [۱۰]

$$T = \frac{\int_{-L/\gamma}^{L/\gamma} E(\cdot, z) \cos \omega t(z) dz}{\int_{-L/\gamma}^{L/\gamma} E(\cdot, z) dz} \quad (7)$$

که در آن L متناظر با فاصله بین دو روزنه شتاب می باشد و در کاواک استوانه ای ساده در واقع همان طول کاواک و در کاواک استوانه ای با دماغه فاصله بین دماغه ها می باشد که در صورتیکه این فاصله را g در نظر بگیریم. این ضریب در مد $TM_{1,0}$ به بصورت رابطه $T = \frac{\sin \frac{\pi g}{\beta \lambda}}{\frac{\pi g}{\beta \lambda}}$ خلاصه می گردد. در حالت ایده ال این ضریب یک است و ما در طراحی سعی داریم این ضریب به یک نزدیک شود و لی معمولاً به عددی کمتر از این دست پیدا می کنیم. امپدانس شانت نیز از دیگر فاکتورهای مد نظر در طراحی کاواک است که تاثیر مستقیمی بر روی تلفات توان در دیواره ها دارد این امپدانس مطابق شکل (۱ ج) در واقع امپدانس معادل کاواک می باشد و در صورتیکه ولتاژ اعمالی کاواک را V و تلفات در دیوارها را P در نظر بگیریم امپدانس شانت از رابطه $R = \frac{V^2}{P}$ قابل محاسبه است. همانند ضریب کیفیت هرچه این امپدانس بالاتر باشد مطلوب تر است. پارامتر دیگری که هندسه کاواک بر آن تاثیر مستقیم دارد فاکتور R/Q می باشد که می بایست در طراحی مد نظر قرار گیرد. و ارتباط آن با ولتاژ ایجاد شده در کاواک و انرژی ذخیره شده در آن بصورت $\frac{R}{Q} = \frac{V^2}{\gamma \omega U}$ تعریف می گردد. [۱۱] علاوه بر کاواک استوانه ای ساده مطابق شکل (۲ الف) شکلهای مختلف دیگری از این کاواک را می توان در نظر گرفت. که برخی از این حالتها در قسمتهای (ب، ج، د) شکل ۲ نشان داده شده است. یکی از حالتها این کاواک ایجاد دماغه در محور شتاب می باشد که نحوه ایجاد این دماغه از نظر ابعادی از پارامترهای موثر بر روی شتاب ذره الکترون در یک شتابدهنده می باشد. در شکل (۲ د) یک کاواک استوانه ای با دماغه و با جزئیات کامل



ابعادی به عنوان شکل منبأ نشان داده شده است که تاثیرات تغییرات ابعادی آن با دقت بررسی خواهد شد در واقع با تغییرات ابعادی این شکل از کاواک استوانه ای میتوان به سایر اشکال دست می یابیم بطور مثال اگر در این شکل دماغه ها حذف شود به شکل (۲ ب) می رسیم و یا اگر زاویه قوسها صفر شود به شکل (۲ ج) دست خواهیم یافت .



(د)

(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۲: اشکال مختلف کاواک استوانه ای ساده و با دماغه با جزئیات ابعادی

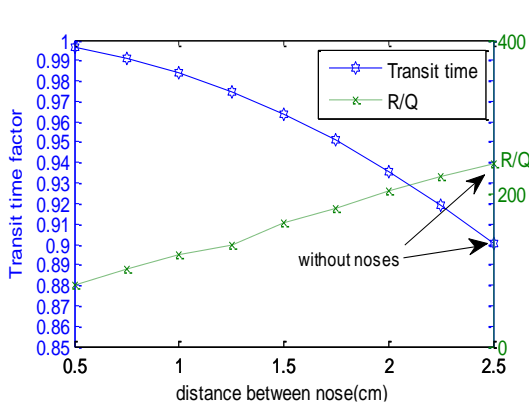
جنس مورد استفاده در طراحی این کاواک ها مس با کیفیت بالا در نظر گرفته شده است. در ساخت نیز برای دست یابی به ضریب کیفیت بالا از مس OFHC استفاده می گردد که در محاسبات و همچنین شبیه سازی لحاظ شده است.

نتایج:

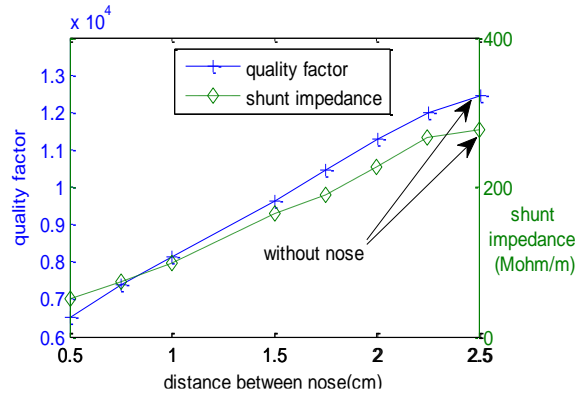
پس از محاسبه پارامترهای موثر در شتاب با استفاده از روابط ۲ تا ۷ و همچنین شبیه سازی اشکال مختلف کاواک استوانه مطابق شکل ۲ بویژه قسمت (د) بعنوان شکل منبأ، دریافتیم که فاصله بین دماغه ها (g) از پارامترهای بسیار تاثیر گذار بر روی ضرایب مختلف مربوط به یک شتابدهنده الکترون تک کاواک می باشد. شکل ۳ تاثیر این فاصله بر روی امپدانس شانت و ضریب کیفیت را نشان می دهد. همچنین در شکل ۴ تاثیر تغییرات این فاصله را بر روی ضریب R/Q و ضریب زمان عبور مشاهده می شود. تاثیر تغییرات قوس های



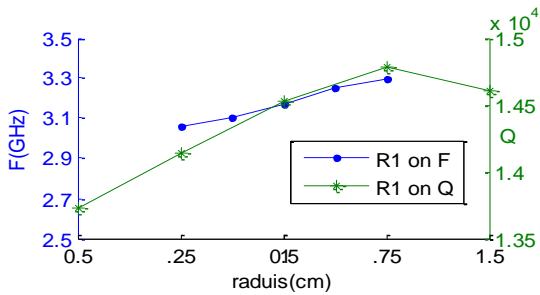
مهم R_1, R_3 ایجاد شده در کاواک استوانه ای بر روی فرکانس نوسان و ضریب کیفیت کاواک مورد نظر در شکلهای ۵ و ۶ نشان داده شده است



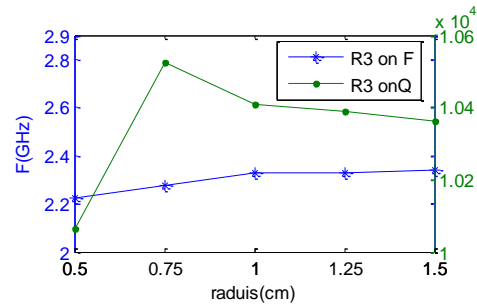
شکل ۴: تاثیر تغییرات فاصله بین دماغه ها بر روی ضریب زمان عبور و فاکتور R/Q



شکل ۳: تاثیر تغییرات فاصله بین دماغه ها بر روی ضریب کیفیت و امپدانس شانت

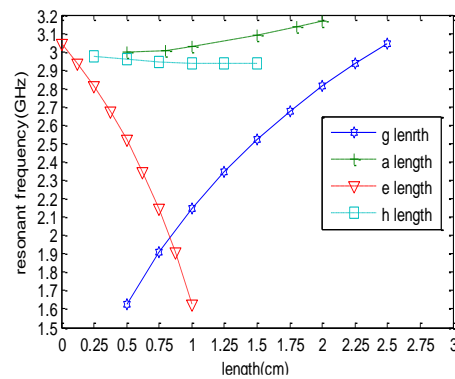
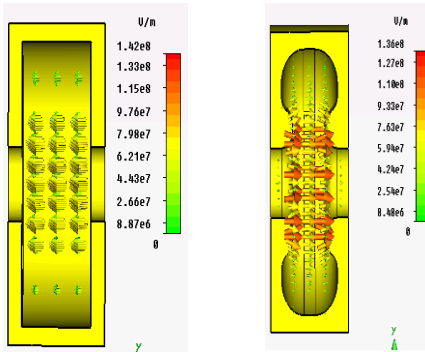


شکل ۶: تغییرات قوس R_1 بر فرکانس و ضریب کیفیت



شکل ۵: تغییرات قوس R_3 بر فرکانس و ضریب کیفیت

با توجه به این نتایج مشاهده می شود که کاهش فاصله بین دماغه ها باعث افزایش ضریب زمان عبور می گردد و لی تا حدودی باعث کاهش امپدانس شانت و ضریب کیفیت می شود. تاثیر تغییرات ابعاد a, g, e, h در کاواک طراحی شده در شکل (۲ د) بر روی فرکانس نوسان را در شکل ۷ مشاهده می کنید.



شکل ۷: تاثیر تغییرات ابعادی بر روی فرکانس رزونانس
شکل ۸: میدان الکتریکی در دو شکل از کاواک

همچنین میدان الکتریکی در کاواک استوانه ای ساده و کاواک با دماغه در شکل ۸ مشاهده می شود که با توجه به آن میزان میدان الکتریکی در حالت کاواک استوانه ای با دماغه در محل شتاب ذره الکترون بزرگتر از کاواک استوانه ای ساده می باشد. همچنین در این حالت وجود دماغه باعث همگرایی باریکه و تمرکز میدان در فاصله شتاب ذره الکترون نیز می گردد.

بحث و نتیجه گیری:

با توجه به نتایج حاصله از مقایسه شکلهای مختلف تک کاواک استوانه ای مشاهده می شود که در یک کاواک با دماغه ضریب عبور افزایش می یابد و راندمان انتقال توان RF به میدان الکتریکی در محور شتاب افزایش می یابد. وجود دماغه باعث تمرکز میدان در راستای شتاب و همچنین همگرایی باریکه می گردد. وجود قوس در گوشه ها و یا در واقع نزدیک شدن شکل استوانه ای به کروی باعث افزایش ضریب کیفیت و امیدانس شانت و یا کاهش تلفات می گردد و لذا بهترین شکل برای یک تک کاواک استوانه ای ایجاد دماغه با طول مناسب و همچنین ایجاد قوس مناسب در گوشه ها می باشد.

مراجع:

- [۱] P. J. Bryant, "A brief history and review of accelerators." Cern Accelerator School. report , ۱۹۹۴.
- [۲] A. J. berejka, "Prospects and challenges for the industrial use of electron beam accelerators", International Atomic Energy Agency Document reports , ۲۰۱۱
- [۳] D. whittum, "Introduction to Microwave Linacs". slac-pub-۸۰۲۶, ۱۹۹۸.
- [۴] V. A. Polyakov, et al., "The installation for the single-use medical devices sterilization based on the electron accelerator type ILU", Radiation Physics and Chemistry, Vol. ۴۲, pp. ۵۶۳- ۵۶۶, ۱۹۹۳.



دانشگاه گیلان

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۲
رشت - دانشگاه گیلان

بیستین کنفرانس
انرژی هسته ای



Nuclear society of Iran
20th Iranian Nuclear Conference
26-27 February , 2014
University of Guilan Rasht - Iran

[۵] A. Chao, M. Tigner: "Handbook of Accelerator Physics and Engineering", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, ۲nd printing, ۲۰۰۲

[۶] CST studio suite document, cst computer simulation technologAG, ۲۰۱۰ (www.cst.com)

[۷] J.Humphries, "Principles of Charged particle acceleration", Wiley & sons, New York, ۱۹۹۸

[۸] C.J.Karzmark "Medical Electron Accelerators" Department of Radiation Oncology Stanford University School of Medicine. Mcgraw hill- New York / ۱۹۹۳

[۹] T.Wangler "principles of RF linear accelerators" john wiley & sons, ۱۹۹۸

[۱۰] P. M. Lapostolle ,A.Septier, " Linear accelerators". North- Holland publishinCompany. ۱۹۷۰

[۱۱] R. B. Miller" electronic irradiation of foods "Springer publication , Inc, ۲۰۰۵