

## بهینه‌سازی روند طراحی حفره کوپلاژین کاواک‌های شتاب‌دهی و کوپلینگ

### تیوب شتاب‌دهی کوپل جانب با استفاده همزمان از دو نرم افزار CST و Superfish

ساسان احمدیان نمینی<sup>۱</sup>، فریدون عباسی دوانی<sup>۱\*</sup>، فرشاد قاسمی<sup>۱</sup>، محمدلامعی رشتی<sup>۲</sup>، سارا زارعی<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه شهید بهشتی- دانشکده مهندسی هسته‌ای- گروه کاربرد پرتوها

۲- پژوهشگاه دانش‌های بنیادی (IPM)، پژوهشکده ذرات و شتاب‌دهنده‌ها

۳- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

#### چکیده

تیوب شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی الکترون بدلیل مزیت‌ها و برتری ساختارهای موج ایستا بر موج رونده در انرژی‌های پایین، عموماً از این نوع انتخاب می‌شوند. ساختارهای موج ایستا خود به دو دسته کوپل جانب (side-coupled) و کوپل محوری (on-axis-coupled) تقسیم می‌شوند. چون کاواک‌های موج ایستای کوپل جانب نسبت به کوپل محوری از طول کمتری برخوردار هستند، در نوع لینک پزشکی in-line عموماً به کار گرفته می‌شوند. در پژوهش صورت گرفته، به منظور کاهش خطای نرم‌افزار سه بعدی CST روشی برای تعبیه ابعاد حفره کوپلاژ ارائه شده و کوپلاژ بین کاواک‌های شتاب‌دهی و کوپلینگ یک نمونه متشکل از دو کاواک شتاب‌دهی و یک کاواک کوپلاژ با این روش بهینه شده است.

کلید واژه: شتاب‌دهنده خطی الکترون، کاواک کوپل جانبی، CST، ضریب کوپلاژ

#### مقدمه

شتاب‌دهی به الکترون‌ها در یک لینک توسط موجبرهایی صورت می‌گیرد که با دیسک بارگذاری شده‌اند. هدف اصلی در روند طراحی تیوب شتاب‌دهی یک لینک in-line پزشکیستایی به ساختاری با کوتاه‌ترین طول ممکن است که بتوان آن را در سر لینک روی گانتری بطور عمود بر بدن بیمار قرار داد [۱]. در این طراحی با حذف مگنت‌های انتقال باریکه الکترونی، می‌توان پیچیدگی، وزن و هزینه ساخت لینک را به میزان قابل توجهی کاهش داد. روند بهینه‌سازی ساختار کاواک‌های محوری که وظیفه شتاب‌دهی را برعهده دارند پیش از این صورت پذیرفته و بصورت مقاله‌ای انتشار یافته است [۲]. از آنرو که مقوله درمان با الکترون یا پرتو ایکس بسیار حساس بوده و عملکرد صحیح لینک بسیار مهم و حیاتی است، پرداختن به راندمان و پایداری کاواک شتاب‌دهی باید با جزئیات بیشتر و دقیقتری صورت گیرد. در این پژوهش هدف ارائه روشی برای تعبیه حفره کوپلاژ با هدف دستیابی به ضریب کوپلاژ مناسب و حفظ فرکانس تشدید در ۲۹۹۷/۹۲ مگاهرتز می‌باشد. ضریب کوپلاژ در طراحی ساختار تشدیدگرهای کوپل شده متضمن پایداری سیستم در مقابل خطاهای ساخت مکانیکی و اثرات بارگذاری باریکه است. حفظ فرکانس تشدید پارامتر مهم دیگری است که باعث افزایش راندمان ساختار شتاب‌دهی می‌گردد.

## محاسبه ضریب کوپلاژ

بررسی ابعاد حفره‌های کوپلاژ بین کاواک‌های شتاب‌دهی و کوپلینگ را باید یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی رادیوفرکانسی ساختارهای موج ایستا دانست. ابعاد حفره کوپلاژ برای رسیدن به ضریب کوپلاژ حاصل از محاسبات است. این ضریب باید با توجه به کاهش امپدانس شانت و ملاحظاتی مربوط به پایداری فرکانسی ساختار صورت گیرد. با توجه به مطالعات صورت گرفته براساس نمونه‌های ساخته شده از کاواک‌های شتاب‌دهی، به ازای هر یک درصد افزایش در ضریب کوپلینگ، امپدانس شانت به میزان ۳ تا ۵/۵ درصد کاهش می‌یابد [۳]. ولی دستیابی به ضریب کوپلاژ بالا از چند جنبه بسیار حائز اهمیت است. ضریب کوپلاژ در واقع تعیین کننده پهنای باند گذر ساختار موجبری طراحی شده می‌باشد. از طرفی این ضریب، تضمین کننده تخت بودن میدان در طول کاواک‌های شتاب‌دهی موج ایستا است.

ویژگی اول تعیین کننده پایداری ساختار در مقابل تغییرات فرکانسی ناشی از خطاهای احتمالی در حین ساخت مکانیکی و تغییر روند کارکرد منابع تولید توان است. همچنین این ویژگی میزان پایداری ساختار در مقابل اثرات بارگذاری باریکه ۱ را مشخص می‌کند. از طرفی تخت بودن میدان الکتریکی تعیین کننده کیفیت باریکه خروجی می‌باشد. زیرا غیریکنواختی شکل میدان باعث واگرایی عرضی باریکه می‌شود. بنابراین با توجه به این موضوع که شتاب‌دهنده‌های پزشکی باید از کیفیت باریکه خروجی مطلوب برخوردار باشند این مورد اهمیت بیشتری می‌یابد. همچنین لازم است تا شرایط محیطی وعدم دقت ساخت، کمترین تاثیر را روی کارکرد رادیوفرکانسی تیوب شتاب‌دهی داشته باشد [۴]. در نتیجه انتخاب این پارامتر و بهینه‌سازی ساختار به منظور دستیابی به پایداری مطلوب نسبت به خطاهای ساخت اولین هدفی است که در طراحی مد نظر قرار گرفت. مگنترون‌ها در ابتدای شروع به کار نوسانات فرکانسی ۱۰ مگاهرتزی را دارند. علاوه بر آن با لحاظ خطای ابعادی ناشی از عدم دقت ساخت که در حدود ۱۰ مگاهرتز خطا در فرکانس ایجاد می‌کند، برای جلوگیری از برانگیخته شدن مدهای غیر شتاب‌دهی مجاور با مد  $\pi/2$ ، فاصله فرکانسی در حدود ۲۰ مگاهرتز که ماکزیمم ترانس فرکانسی است، منظور می‌گردد. در این طراحی تزریق توان از طریق کاواک میانی صورت می‌گیرد. به همین دلیل تعداد کاواک‌ها فرد و ۹ سلول شتاب‌دهی انتخاب شد. با این انتخاب تنها مدهای زوج در کاواک برانگیخته می‌شوند. این بدان معنی است که جدایی مدهای اطراف مد  $\pi/2$  دو برابر می‌شود. از این رو با توجه به رابطه ۱ مدهای همسایه مد  $\pi/2$  اکنون  $7\pi/18$  و  $11\pi/18$  می‌باشند.

$$\emptyset = \frac{\pi(2q+1)}{4N+2}, q = 0, 1, \dots, 2N(1)$$

در رابطه ۱،  $2N$  برای شماره‌گذاری مدها بکار می‌رود. با توجه به فازهای همسایه مد  $\pi/2$  و با استفاده از رابطه ۲ حداقل ضریب کوپلینگ مورد نیاز  $3/2$  درصد بدست می‌آید.

<sup>1</sup>Beam loading

$$1 + k\cos(\theta) = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \quad (2)$$

با لحاظ اتلاف اهمی در داخل ساختار، شدت میدان با دور شدن از نقطه تزریق توان براساس رابطه ۳ کاهش می‌یابد [۵].

$$x_{2n} = x_0(-1)^n \left\{ 1 + \frac{2n^2}{k^2_{ac} Q_a Q_c} \right\} \quad (3)$$

در رابطه ۳، n شماره سلول نسبت به سلول تزریق توان،  $K_{ac}$  ضریب کوپلاژ،  $Q_a$  ضریب کیفیت کاواک‌های شتاب‌دهی،  $Q_c$  ضریب کیفیت کاواک کوپلاژ،  $x_0$  شدت میدان الکتریکی در کاواک اول و شدت میدان در کاواک‌های شتاب‌دهی است. با پذیرفتن یک درصد کاهش در شدت میدان و با فرض تزریق توان از کاواک میانی، برای  $n=8$  ثابت کوپلینگ ( $K_{ac}$ ) باید بزرگتر از یک درصد باشد. با منظور کردن حدود اطمینان، کوپلینگ مورد نظر باید بزرگتر از ۳/۴ منظور گردد.

### تنظیم فرکانس و ضریب کوپلاژ بین کاواک شتاب‌دهی و کوپلینگ

پس از انجام محاسبات لازم برای تعیین میزان ضریب کوپلاژ اکنون باید ساختار شتاب‌دهنده را برای دستیابی به مقدار مورد نظر تیون کنیم. آنچه که در این مرحله باید مد نظر قرار بگیرد، تغییر فرکانسی ناشی از ایجاد حفره‌های کوپلاژ در حین ایجاد آن بین کاواک‌های مجاور می‌باشد. در شبیه‌سازی، فرایند ایجاد حفره‌های کوپلاژ از طریق تغییر فاصله مراکز بین کاواک شتاب‌دهی و کوپلاژ، یعنی فاصله  $D$  ایجاد می‌شود. ساختار شبیه‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است. در روند انجام این مرحله از روشی استفاده شده که در ادامه به آن اشاره می‌گردد. این روش شامل استفاده همزمان از دو نرم‌افزار  $CST$  و سوپرفیش می‌باشد. در واقع کد دو بعدی سوپرفیش در مقایسه با کد سه بعدی  $CST$  از دقت بیشتری برخوردار بوده و لازم است دقت آن با توانایی شبیه‌سازی سه بعدی  $CST$  تلفیق گردد. مش‌بندی مناسب روی جواب حاصل از کدهای سه بعدی تأثیر زیادی دارد. اما با افزایش تعداد مش باز هم در دقت قابل حصول در محاسبات محدودیت‌هایی وجود دارد. این محدودیت‌ها در این مرحله از دو منبع ناشی می‌گردند. اول ناشی از قدرت سیستم سخت‌افزاری بکاررفته و تعداد ارقام با معنی آن است. مورد بعدی ناشی از تقریب‌های بکاررفته در روش تفکیک معادلات انتگرالی یا دیفرانسیلی ماکسول می‌باشد. این خطاها بر روی فرکانس تشدید محاسبه شده توسط نرم‌افزار  $CST$  تأثیر خواهند داشت. ولی تأثیر چندانی بر روی تغییرات فرکانس ندارند (چراکه اندازه‌گیرها نسبی‌اند). در روش بکار رفته از این مزیت بهره گرفته شده و روند مورد استفاده در این طراحی بصورت زیر می‌باشد.

۱. هندسه بهینه سلول‌های کوپلینگ و شتاب‌دهی برای تشدید در فرکانس ۲۹۹۷/۹۲ به کمک کد دو بعدی

سوپرفیش محاسبه و طراحی می‌گردد.

۲. پس از بهینه‌سازی در کد سوپرفیش، با استفاده از کد  $CST$  که امکان محاسبه ضریب کوپلینگ مطلوب

بین کاواک‌های مجاور را فراهم می‌کند، هندسه حاصل از کد سوپرفیش مجدداً شبیه‌سازی شده و فرکانس تشدید کاواک‌های کوپلینگ و شتاب‌دهی که به ترتیب  $f_c$  و  $f_a$  هستند محاسبه می‌گردد.

۳. در مرحله بعدی شبیه سازی هندسه دو نیم کاواک شتاب دهی و یک کاواک کوپلاژ در کد CST انجام می گیرد. در این حالت با ایجاد حفره کوپلینگ به وسیله جابجا کردن فاصله مرکز سلول شتاب دهی و کوپلاژ، فرکانس تشدید برای سه مد صفر،  $\pi/2$  و  $\pi$  برای این ساختار کوپل شده سه کاواکی محاسبه گردید. سپس با استفاده از روابط ۴، ۵ و ۶ که از تحلیل مدل مداری ساختار بدست می آید، فرکانس های تشدید جدید کاواک های کوپلاژ و شتاب دهی در حضور برش کوپلینگ محاسبه گردید.

$$\omega_a = \omega_{\pi/2} \quad (4)$$

$$\omega_c = (1/\omega_0^2 + 1/\omega_{\pi/2}^2 - 1/\omega_{\pi/2}^2) \quad (5)$$

$$k_{ac} = -\left(1 - \frac{\omega_{\pi/2}^4}{\omega_0^2 \omega_{\pi/2}^2 + \omega_{\pi/2}^2 \omega_{\pi/2}^2 - \omega_0^2 \omega_{\pi/2}^2}\right)^{1/2} \quad (6)$$

با بررسی و مقایسه نتایج محاسباتی و شبیه سازی کاواک های منفرد در CST به دلیل وجود حفره های کوپلینگ، دو تغییر در فرکانس  $\Delta f_c$  و  $\Delta f_a$  به ترتیب برای کاواک های کوپلاژ و شتاب دهی بدست می آید.

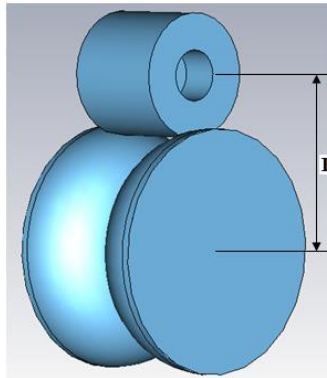
۴. مجدداً دو سلول کوپلاژ و شتاب دهی برای تشدید در فرکانس های  $2997/92 + \Delta f_c$  و  $2997/92 + \Delta f_a$  در کد سوپرفیش طراحی می شوند. این فرایند با استفاده از روش خاصی صورت می گیرد که همگرایی سریعتر به جواب نهایی را امکان پذیر می سازد.

مراحل ۲ و ۳ برای ابعاد جدید بدست آمده از کد سوپرفیش، تکرار می شود. بدین ترتیب مقادیر جدیدی برای  $\Delta f_c$  و  $\Delta f_a$  بدست می آید.

۵. فرکانس های تشدید و ثابت کوپلینگ مجدداً محاسبه می شود. هرگاه این مقادیر با اعمال تغییرات،  $\Delta f_c$  و  $\Delta f_a$  نسبت به فرکانس تشدید محاسبه شده برای کاواک شتاب دهی در کد CST (یعنی فرکانس تشدید  $2996/57$  مگاهرتز) کمتر از ۱ مگاهرتز اختلاف داشتند و ثابت کوپلینگ نیز حد مناسب را داشت، شبیه سازی به پایان می رسد. اگر میزان ضریب کوپلینگ برآورده شد ولی فرکانس های تشدید بیش از این مقدار فاصله داشتند باید بهینه سازی ساختار در کد سوپرفیش برای فاصله بدست آمده D مجدداً تکرار شود. اما اگر ضریب کوپلینگ محاسبه شده نیز مناسب نبود، باید D تغییر یافته و کل فرایند مطرح شده از ابتدا آغاز شود.

۶. اگرچه این روش بسیار پیچیده به نظر می رسد، اما نتایج حاصل از این روش بسیار مطلوب است. کارآمد بودن این روش توسط ساخت یک نمونه آزمایشی آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج شبیه سازی با این روش، تطابق خوبی با نتایج حاصل از اندازه گیری داشته است [۶].

۷. در بکارگیری روش فوق در مورد تیون کردن ساختار با کد سوپرفیش به منظور دستیابی به فرکانس تشدید  $2997/92 + \Delta f_c$  و  $2997/92 + \Delta f_a$  از روش خاصی استفاده شده است. در واقع تغییرات ابعاد کاواک های شتاب دهی و کوپلاژ باعث تغییر ضریب کوپلینگ می گردد و فرایند محاسبه سه کاواکی را دشوار می سازد. در مرحله اول شبیه سازی در این بخش طراحی چگونگی تغییر ضریب کوپلینگ و فرکانس تشدید دو کاواک کوپلاژ و شتاب دهی مورد بررسی قرار گرفت. تغییر D تا جایی صورت گرفت که ضریب کوپلاژ  $3/9$  درصد برآورده گردد.

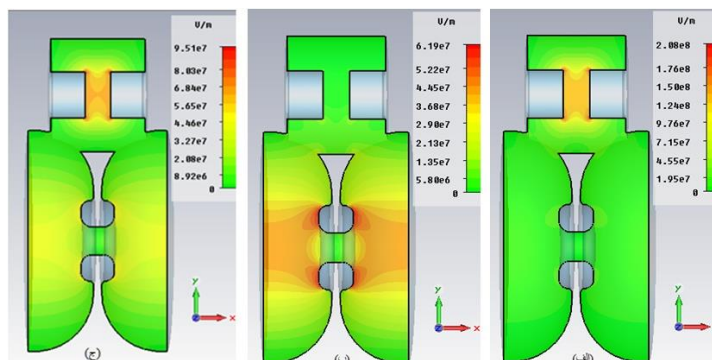


شکل ۱- هندسه شبیه‌سازی شده ساختار دوزنجیره‌ای سه کاواکه در کد CST

### نتایج

کوپلاژ مطلوب زمانی حاصل می‌شود که فاصله بین مراکز دو کاواک شتاب‌دهی و کوپلینگ  $52/6$  میلی‌متر باشد. در این حالت کوپلینگ حدود  $3/9$  درصد بین کاواک‌ها بدست می‌آید. اما فرکانس تشدید کاواک شتاب‌دهی و کوپلینگ به دلیل ایجاد حفره در ناحیه میدان مغناطیسی داخل کاواک کاهش می‌یابد. این کاهش با تغییر هندسه ساختار کاواک‌های کوپلاژ و شتاب‌دهی جبران شدند. با توجه به نتایج حاصل دو کاواک کوپلاژ و شتاب‌دهی باید به ترتیب برای رزونانس در فرکانس‌های تشدید  $3109/44$  و  $3022/9$  مگاهرتز طراحی شوند. در این حالت کوپلاژ مرتبه اول بین سلول‌های مجاور  $3/5$  درصد حاصل گردید. ابعاد نهایی کاواک‌های کوپلاژ و شتاب‌دهی پس از انجام این مرحله محاسبه شد که در جدول ۱ و ۲ گزارش شده است. همچنین شکل ۲، نمای دو بعدی میدان رزونانسی برای مدهای صفر،  $\pi/2$  و  $\pi$  را نشان داده است.

بعد از انجام مراحل بهینه‌سازی ابعاد حفره کوپلاژ، برای پارامترهای هندسی مطرح در طراحی کاواک‌های محوری و جانبی مطابق شکل ۳، ابعاد مطرح شده در جدول ۱ و ۲ بدست آمد.



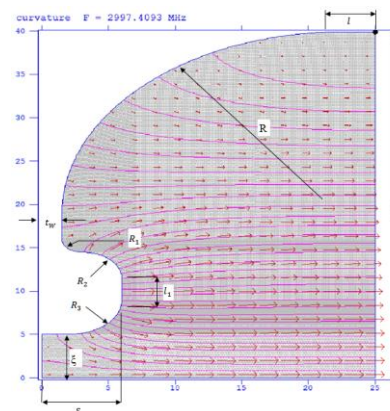
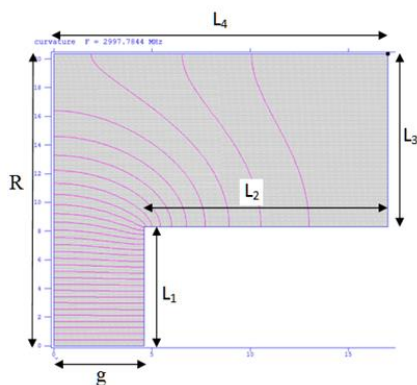
شکل ۲- پروفایل دو بعدی میدان رزونانسی برای مدهای صفر،  $\pi/2$  و  $\pi$

جدول ۱- ابعاد نهایی کاواک شتاب‌دهی بر حسب میلی‌متر

$\gamma$	L	$L_1$	R	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$t_w$	$\xi$	$\varepsilon$
۳۹/۶۵	۲/۵	۲	۲۱	۲/۱	۲/۵	۳/۴	۱/۵	۵	۶/۱

جدول ۲- ابعاد نهایی کاواک کوپلاژ بر حسب میلی‌متر

$L_1$	g	R	$L_4$
۳۹/۶۵	۲/۵	۲	۲۱



شکل ۳- کاواک‌های محوری و جانبی به‌همراه پارامترهای هندسی مورد استفاده در روند طراحی آنها در شبیه‌سازی با نرم‌افزار سوپرفیش و پروفایل میدان الکتریکی در آنها

## مراجع

1. C. J. Karzmark, C. S. Nunan, and E. Tanabe, Medical electron accelerators (McGraw-Hill, New York, 1993).
2. ساسان احمدیان‌نمینی، فریدون عباسی‌دوانی، فرشاد قاسمی، سارا زارعی، "طراحی و محاسبه اولیه ابعاد سلول محوری بهینه کاواک شتاب‌دهی کوپل جانبی، به منظور تولید بیم الکترونی ۶ مگا‌الکترون‌ولتی با هدف استفاده در کاربردهای پزشکی"، کنفرانس هسته‌ای یزد، ۱۳۹۰
3. R.j.Noble,P.Zhou/Geometry optimization of the side coupled structure used for the fermilablinacupgrade.
4. Jiahangshao,H.chen,Q.xing/design of a C-band 6 MeV standing wave linear accelerator accelerating structure/IPAC2012.
5. Knapp E.A., Standing wave high energy linear accelerator structures, Rev. of Sci.Instr. 39, (1968) 979-991.
6. Chang C.R., Yao C.G., Swenson D.A., Funk L.W., Computer simulations and cold model testing of CCL cavities, Proc. Part. Acc. Conf. Washington (1993)812-814