



طراحی خوشه‌ساز شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون از نوع موج‌رونده

فرشاد قاسمی^۱، فریدون عباسی‌دوانی^{۱*}، محمد لامعی‌رشتی^۲، حامد شاکر^۲
۱- گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران-ایران
۲- پژوهشگاه دانش‌های بنیادی (IPM)، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۵۵۳۱، تهران-ایران

چکیده: اجرای پروژه‌ی طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون توسط وزارت علوم، تحقیقات و فن‌آوری، به عهده‌ی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی گذاشته شده است. هدف تحقیقات جاری دست‌یابی به دانش و فن‌آوری ساخت اجزای شتاب‌دهنده‌ی خطی است که یکی از مؤلفه‌های آن، خوشه‌ساز است. در این مقاله دو نوع خوشه‌ساز معرفی شده و یکی از آن‌ها یعنی خوشه‌ساز نوع بارگذاری شده با صفحه برای طراحی و ساخت انتخاب شده است. با مطالعه‌ی حرکت الکترون‌ها در میدان مابین روزنه‌ی صفحه‌ها و استفاده از معادلات حاکم بر تئوری موج‌برهای بارگذاری شده با صفحه، ابعاد خوشه‌ساز موردنظر این طرح به دست آمده است. در محاسبات و برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار MATLAB و کد SUPERFISH استفاده شده و گستره‌ی فازی ورودی و خروجی این طراحی، به ترتیب، برابر ۳۴۸ و ۵۰ درجه تعیین گردیده است. این، به ضریب خوشه‌سازی حدود ۷ می‌انجامد که مقدار مناسبی برای این نوع خوشه‌سازها است.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون، خوشه‌ساز، موج‌بر بارگذاری شده با صفحه، کد سوپرفیش

Design of the Buncher of Travelling-Wave Linear Accelerator

F. Ghasemi¹, F. Abbasi Davani^{1*}, M. Lamehi Rashti², H. Shaker²

1- Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran
2- Institute for Research in Fundamental Sciences, P.O.Box: 19395-5531, Tehran - Iran

Abstract: The project of design and construction of linear electron accelerator is being performed by the Ministry of Science, Research and Technology and Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM). The aim of the current research is to achieve the knowledge and the technology of manufacturing the components of linear accelerator; one of these components is buncher. In this paper, two types of bunchers are introduced, while the disk-loaded type has been selected to be fabricated. Studying the electrons motion in the field through the aperture of the disks and using the equations of disk-loaded waveguide theory, the dimensions of the desired buncher for this project were obtained. MATLAB software and SUPERFISH code were used in calculations and simulations. The design led to the initial and final phase ranges of 348 degrees and 50 degrees, respectively. The mentioned values for the initial and final phase ranges resulted in a bunching factor of about 7 that is appropriate for this type of the bunchers.

Keywords: E-Linac, Buncher, Disk-Loaded Waveguide, SUPERFISH

*email: fabbasi@sbu.ac.ir



۱- مقدمه

با شفاف‌سازی مبحث میدان‌های الکترومغناطیسی به وسیله‌ی ماکسول، بسیاری از فیزیک‌دانان به این فکر افتادند که، ذرات می‌توانند به وسیله‌ی میدان‌های ناشی از امواج رادیویی شتاب گیرند. اما پیاده‌سازی عملی این ایده مدتی بعد از ارایه‌ی نظری آن صورت گرفت. طراحی و ساخت اولین شتاب‌دهنده‌ی خطی مربوط به سال ۱۹۲۴ است [۱]. در شتاب‌دهنده‌های خطی، ذرات باردار در مسیر مستقیم در اثر میدان الکتریکی حاصل از امواج الکترومغناطیسی شتاب می‌گیرند. کلمه‌ی خطی در این نوع شتاب‌دهنده، در مقابل انواع دیگر شتاب‌دهنده‌ها نظیر سیکلوترون و بتاترون، که در آن‌ها ذرات در حین شتاب گرفتن مسیره‌های دایره‌ای شکل را طی می‌کنند، آورده شده است.

امروزه شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون کاربرد فراوانی در مقاصد صنعتی، پزشکی و تحقیقاتی دارند، که از آن میان می‌توان به پرتونگاری صنعتی، درمان سرطان، سترون‌سازی تجهیزات پزشکی و ساخت پلی‌مرها و بهبود خواص آن‌ها و... اشاره کرد [۱].

اما یکی از کاربردهای مهم شتاب‌دهنده‌های خطی ذرات (به خصوص شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون) استفاده از آن‌ها به عنوان تزریق‌کننده در سینکروترون‌ها است. بسیاری از سینکروترون‌های الکترون برای تولید باریکه‌های ثانویه‌ی تابش سینکروترون ساخته شده‌اند و معمولاً از شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون برای تولید و دادن شتاب اولیه به الکترون‌های تزریقی استفاده می‌شود [۲].

در ایران نیز از یک طرف برای طراحی و ساخت سیستم کامل شتاب‌دهنده‌ی ملی تلاش‌هایی صورت گرفته است و از طرف دیگر، در سال‌های اخیر، تعدادی شتاب‌دهنده‌ی خطی پزشکی در بیمارستان‌های کشور نصب شده و در معالجه‌ی بیماران مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس طرحی در وزارت علوم تحقیقات و فن‌آوری اجرا می‌شود که هدف آن دستیابی به فن‌آوری ساخت یک شتاب‌دهنده‌ی خطی است. مطالعه‌ی حاضر نیز مربوط به طراحی قسمت خوشه‌ساز این شتاب‌دهنده است که براساس این طراحی ساخته خواهد شد.

در این مقاله، پس از معرفی انواع شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، ابتدا به شرح نقش خوشه‌ساز^(۱) در این نوع شتاب‌دهنده‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه، انواع خوشه‌ساز به کار رفته در شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون توضیح داده شده و روند

طراحی خوشه‌ساز بارگذاری شده با صفحه که نوع منتخب در این مقاله است، ارایه می‌شود. در پایان، طراحی خوشه‌ساز با مشخصات موردنظر آورده شده و ابعاد به دست آمده ارایه می‌گردد.

اساساً دو نوع شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون وجود دارد. شتاب‌دهنده از نوع موج رونده^(۲) (TW) و شتاب‌دهنده از نوع موج ایستا^(۳) (SW). هر کدام از این دو نوع دارای مزایا و معایبی هستند و به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. در شتاب‌دهنده‌های از نوع موج رونده توان RF در یک جهت ساختار شتاب‌دهنده پیش می‌رود و توان باقی‌مانده در انتهای موج‌بر شتاب‌دهنده، در مقاومت بار مناسبی جذب می‌شود. اما در شتاب‌دهنده‌های از نوع موج ایستا هر دو انتهای ساختار شتاب‌دهنده به طور مؤثری اتصال کوتاه شده‌اند. بنابراین توان RF به سمت عقب بازتاب می‌یابد. در هر دو نوع شتاب‌دهنده، مجموعه‌ای از کاواک‌های به هم پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. بازدهی انتقال توان RF ورودی به انرژی الکترون عبوری از کاواک‌ها در شتاب‌دهنده‌های نوع موج ایستا دو برابر شتاب‌دهنده‌های از نوع موج رونده است. با توجه به تمامی ملاحظات فوق و نیز ملاحظات ساخت، در مورد کاربردهای تحقیقاتی و باریکه‌های با توان بالا معمولاً از شتاب‌دهنده‌های از نوع موج رونده استفاده می‌شود و برای کاربردهای خاص پزشکی که فضای فیزیکی کم‌تری در اختیار است و پایداری باریکه اهمیت زیادی دارد، شتاب‌دهنده‌های از نوع موج ایستا مزایای بیش‌تری دارند [۳].

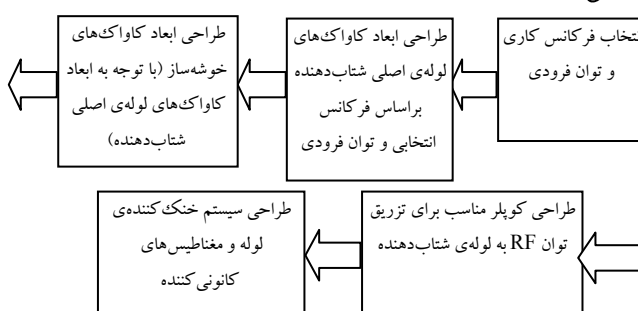
شتاب‌دهنده‌ی موردنظر ما در این طرح از نوع موج رونده است. همان‌طور که اشاره شد، در هر دو نوع شتاب‌دهنده، مجموعه‌ای از کاواک‌های به هم پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند و لوله‌ی اصلی شتاب‌دهنده را می‌سازند. خوشه‌ساز را نیز می‌توان قسمتی از لوله‌ی اصلی شتاب‌دهنده دانست. با این تفاوت که در آن، برخلاف لوله‌ی شتاب‌دهنده، ابعاد کاواک‌ها با هم یکسان نیستند. اما ساخت و پارامترهای اندازه‌گیری آن‌ها بسیار به هم نزدیک‌اند. این در حالی است که، خوشه‌ساز علاوه بر افزایش انرژی الکترون‌ها، وظیفه‌ی خوشه‌ای کردن آن‌ها را نیز برعهده دارد. روند طراحی کامل لوله‌ی شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون را می‌توان با توجه به شکل ۱ دنبال کرد.



مطابق آن چه که در لامپ‌های کلاسیک راجع است. دومین نوع خوشه‌ساز شامل طرح خاصی هم چون موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده است. در این نوع خوشه‌ساز، از موج‌برهای بارگذاری شده با صفحه‌هایی که قطر روزنه‌ی آن‌ها در حال کوچک شدن است، استفاده می‌شود [۶]. در اغلب شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، از خوشه‌ساز نوع دوم استفاده شده است. این نوع خوشه‌ساز از ویژگی‌های خوشه‌سازهای کوچک‌تر نسبت به نوع اول برخوردار است. هم‌چنین، از آن‌جا که ساختار کاواک‌های آن مشابه کاواک‌های موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده است، سازگاری بیش‌تری در اتصال به آن دارد. چنان‌چه به خوشه‌های الکترونی بسیار فشرده نیاز باشد، ترکیبی از هر دو نوع خوشه‌ساز به کار می‌رود. در این حالت خوشه‌ساز از نوع مدولاسیون سرعت، خوشه‌ساز اولیه برای نوع بارگذاری شده با صفحه است [۶]. شکل ۲ شتاب‌دهنده از نوع موج‌برونده و جای‌گاه خوشه‌ساز و پیش‌خوشه‌ساز در آن را نشان می‌دهد [۷].

۳- روند طراحی خوشه‌ساز بارگذاری شده با صفحه

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، خوشه‌ساز بارگذاری شده با صفحه از موج‌بر استوانه‌ای شکل تشکیل شده است که در داخل آن صفحه‌هایی با روزنه‌های به‌طور متوالی باریک شونده، قرار می‌گیرند. فاصله‌ی صفحه‌ها از یک‌دیگر برابر نیستند و شعاع موج‌بر استوانه‌ای نیز تغییر می‌کند. شکل ۳ یک نمونه از این نوع خوشه‌ساز را که قبل از موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده از نوع موج‌برونده قرار گرفته است، نشان می‌دهد [۳].



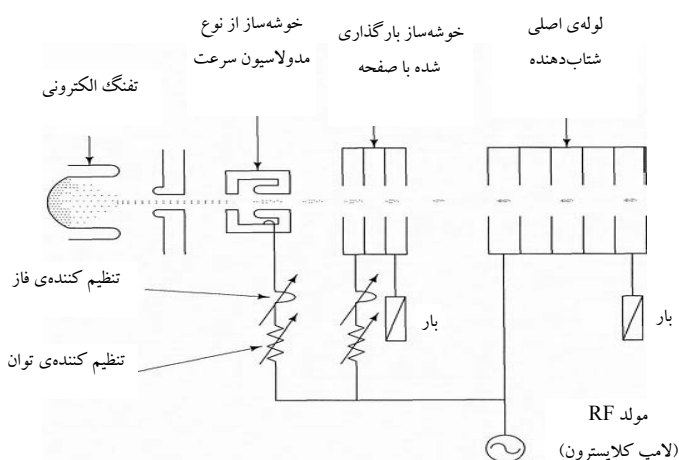
شکل ۱- روند طراحی کامل لوله‌ی شتاب‌دهنده.

با توجه به شکل ۱ طراحی و ساخت لوله‌ی اصلی شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون، پیش از خوشه‌ساز صورت می‌گیرد و ابعاد کاواک‌های انتهایی خوشه‌ساز دقیقاً برابر با ابعاد کاواک‌های لوله‌ی اصلی است. از این‌رو، ساخت لوله‌ی شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون، مقدمه‌ی طراحی و ساخت خوشه‌ساز متناسب با آن است. این مرحله انجام پذیرفته و گزارش‌های آن در مراجع [۴ و ۵] آمده است.

دلیل اصلی خوشه‌ساز کردن الکترون‌ها، فراهم کردن شرایط لازم برای به دست آوردن طیف انرژی مناسب در باریکه‌ی شتاب‌دهنده است. بدون خوشه‌ساز، الکترون‌ها قبل از ورود به موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده، دارای توزیع گسترده‌ای به لحاظ فازی نسبت به RF هستند. این توزیع گسترده‌ی فاز به توزیع گسترده‌ی انرژی می‌انجامد که مطلوب نیست. چرا که در اکثر کاربردها، محدوده‌ی انرژی به خصوصی برای الکترون‌ها مورد نیاز است [۶]. از طرف دیگر، با تحلیل نیروهای الکترومغناطیسی می‌توان دریافت که الکترون‌های هم‌انرژی ولی با فاز متفاوت در طی حرکت خود از هم فاصله خواهند گرفت که این موضوع منجر به از دست رفتن بخشی از جریان باریکه‌ی الکترونی و گسترش تابش زمینه خواهد شد. در این صورت ناگزیر به استفاده از حفاظ‌سازی گسترده خواهیم بود که به کارگیری شتاب‌دهنده برای اهداف گوناگون را مشکل می‌سازد. استفاده از خوشه‌ساز، علاوه بر بهبود طیف انرژی باریکه‌ی خروجی، می‌تواند الکترون‌های تزریق شده به موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده را (که مقید به موج‌برونده‌ی موجود در آن می‌باشند) افزایش دهد [۷].

۲- انواع خوشه‌ساز به کار رفته در شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون

دو نوع خوشه‌ساز برای شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون مورد توجه قرار گرفته‌اند. اولین خوشه‌ساز از نوع مدولاسیون سرعت،



شکل ۲- ساختار شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون.



مرحله‌ی دوم؛ طراحی فیزیکی خوشه‌ساز، تحلیل و تفسیر این منحنی‌ها و استفاده از معادلات حاکم بر تئوری موج‌برهای بارگذاری شده با صفحه برای به دست آوردن ابعاد است. در طراحی ابعاد خوشه‌ساز، به طور کلی سه کمیت مورد نیاز است: فاصله‌ی بین صفحه‌ها، قطر روزنه‌ی صفحه‌ها و قطر استوانه‌ای که صفحه‌ها در داخل آن قرار می‌گیرند، که، به ترتیب، با d ، a و b نشان داده می‌شوند.

هر کدام از این مقادیر به طور جداگانه به صورت تابعی از فاصله بر روی محور خوشه‌ساز، تغییر می‌کنند.

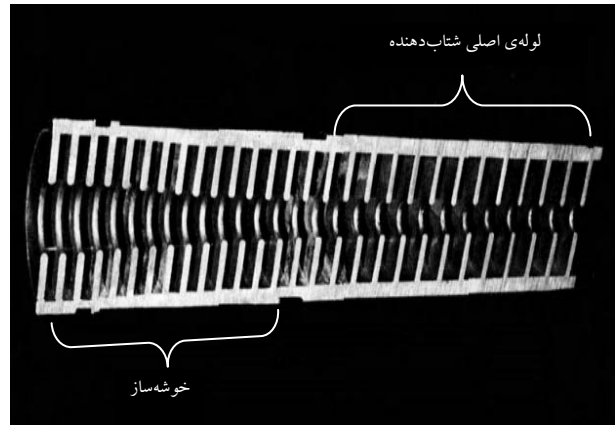
۴- طراحی خوشه‌ساز با مشخصات موردنظر

پس از بررسی عوامل مؤثر بر خوشه‌ای‌سازی الکترون‌ها [۷]، به طراحی خوشه‌ساز با مشخصات موردنظر پرداختیم. مشخصات مورد استفاده در طراحی خوشه‌ساز موردنظر این مقاله، در جدول ۱ آورده شده است. این مقادیر، اندازه‌هایی هستند که در عمل در اختیار ما قرار دارند.

با بررسی پارامترهای مؤثر بر خوشه‌ای‌سازی الکترون‌ها، در نهایت به دو منحنی که تغییرات مناسب شدت میدان الکتریکی و سرعت فاز برای دست‌یابی به عملکرد مناسب در طول خوشه‌ساز را نشان می‌دهند، رسیدیم. لازم به ذکر است که با توجه به نزدیکی مشخصات و اندازه‌های شتاب‌دهنده‌ی موردنظر این مقاله به شتاب‌دهنده‌ی مرجع [۶]، طراحی خوشه‌ساز این شتاب‌دهنده‌ی مبنای تخمین اولیه‌ی طراحی خوشه‌ساز قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات مورد استفاده در طراحی خوشه‌ساز

| | |
|---|-----------------|
| طول خوشه‌ساز | ۶۰ سانتی‌متر |
| ولتاژ تغذیه الکترونی | ۴۵ کیلوولت |
| توان RF تزریقی | ۲ مگاوات |
| فرکانس موج RF | ۲۹۹۷٫۹۲ مگاهرتز |
| طول موج RF | ۱۰ سانتی‌متر |
| شعاع روزنه‌ی صفحه‌های انتهایی (شعاع روزنه‌ی موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده) | ۱ سانتی‌متر |
| شعاع انتهایی لوله‌ی خوشه‌ساز (شعاع موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده) | ۳٫۹۲۵ سانتی‌متر |
| ضخامت صفحه‌ها (برابر ضخامت صفحه‌های موج‌بر اصلی) | ۰٫۵ سانتی‌متر |



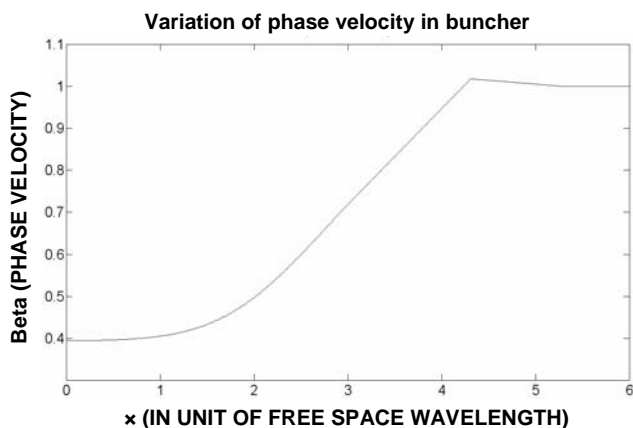
شکل ۳- برش طولی یک موج‌بر شتاب‌دهنده از نوع موج‌رونده که قسمت ابتدایی آن را خوشه‌ساز تشکیل می‌دهد.

در این نوع خوشه‌ساز، سرعت فاز و شدت میدان به تدریج از یک مقدار نسبی کم در ورودی به مقدار معینی در انتهای خوشه‌ساز می‌رسد. اندازه‌ی انتهایی این کمیت‌ها با مقادیر مشخصه‌ی آن‌ها در موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده برابراند و به طور کلی، کاواک‌های انتهایی خوشه‌ساز، مشابه کاواک‌های موج‌بر اصلی اند [۱ و ۶].

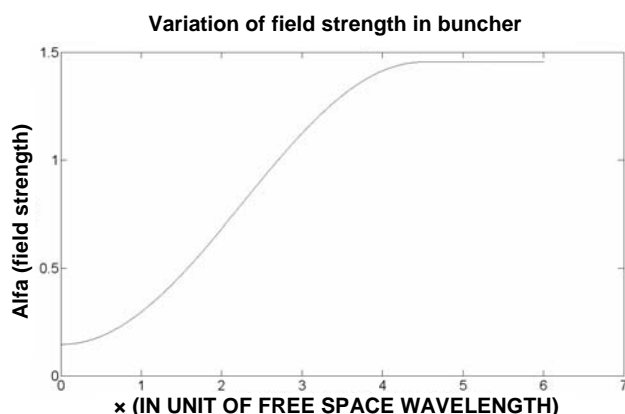
تغییرات سرعت فاز و شدت میدان در طول خوشه‌ساز، به گونه‌ای است که الکترون‌های عبوری از خوشه‌ساز، در حالی که انرژی‌شان افزایش می‌یابد، به طور طولی خوشه-خوشه می‌شوند.

طراحی خوشه‌ساز از نوع بارگذاری شده با صفحه را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد:

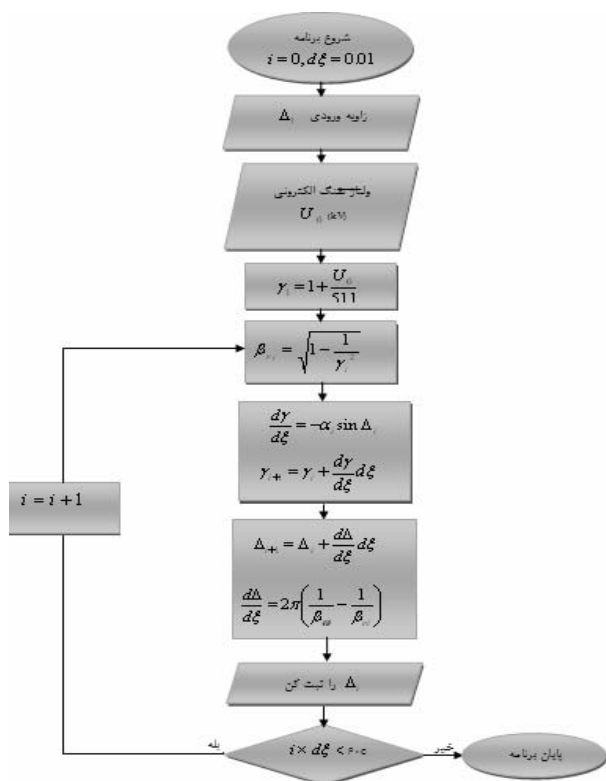
مرحله‌ی اول؛ مرحله‌ی مطالعه‌ی حرکت الکترون‌ها در میدان مابین روزنه‌ی صفحه‌ها است. در طراحی خوشه‌ساز هر شتاب‌دهنده‌ی الکترون، این مطالعات در نهایت به ارایه‌ی چندین منحنی ختم می‌شوند. این منحنی‌ها معمولاً، رفتار تغییرات مناسب شدت میدان الکتریکی و سرعت فاز برای دست‌یابی به خوشه‌ای‌سازی مناسب در طول خوشه‌ساز را نشان می‌دهند. انتخاب نحوه‌ی این تغییرات اختیاری است و متناسب با انتظاری که از خوشه‌ساز در هر شتاب‌دهنده‌ای می‌رود طراحی می‌شوند. البته ملاحظاتی نیز وجود دارد که به انتخاب توابع مولد برای دست‌یابی به حالت بهینه، می‌انجامد. در مرجع [۷] توضیحات بیش‌تری پیرامون چندین خوشه‌ساز به کار رفته در عمل که به فراخور کاربرد خود از توابع متفاوتی استفاده کرده‌اند، ارایه شده است.



شکل ۴- تغییرات سرعت فاز در طول خوشه‌ساز.



شکل ۵- تغییرات شدت میدان در طول خوشه‌ساز.



شکل ۶- روندنمای شبیه‌سازی تغییرات فاز الکترون‌ها در طول خوشه‌ساز.

منحنی‌های به دست آمده برای سرعت فاز و شدت میدان الکتریکی خوشه‌ساز در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. این منحنی‌ها مقادیر بهینه‌ی دو متغیر سرعت فاز و شدت میدان الکتریکی برای خوشه‌ساز را به دست می‌دهند.

با داشتن شدت میدان و سرعت فاز، می‌توان معادلات حاکم بر حرکت طولی الکترون در شتاب‌دهنده را به طور عددی حل کرده، تغییرات فاز الکترون‌ها در طول خوشه‌ساز را به دست آورد، و نوسان آن‌ها در طی فرایند خوشه‌ای سازی را، شبیه‌سازی کرد. روابط ۱، ۲ و ۳ این معادلات را نشان می‌دهند [۶].

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = -\alpha(\xi) \sin \Delta(\xi) \quad (1)$$

$$\gamma(\xi) = \frac{1}{(1 - \beta_e(\xi)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta}{d\xi} = 2\pi \left(\frac{1}{\beta_\omega(\xi)} - \frac{1}{\beta_e(\xi)} \right) \quad (3)$$

در این معادلات، ξ طول موج متناظر با فرکانس موردنظر در فضای آزاد است که به ۱۰ سانتی‌متر بهنجار شده است.

حل عددی این معادلات مطابق روندنمای شکل ۶، توسط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفت. نتیجه‌ی به دست آمده در شکل ۷ نشان داده شده است. محور افقی نماینده‌ی طول موج مربوط به فرکانس موردنظر (۱۰ سانتی‌متر) است.

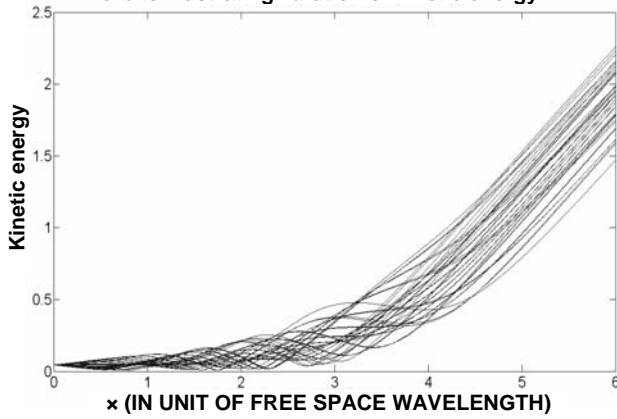
توان همگرایی یک خوشه‌ساز در دسته‌ای کردن هر چه بیش‌تر الکترون‌ها، توسط ضریب خوشه‌ای سازی بیان می‌شود. این ضریب، بر زاویه‌ی فاز اندازه‌گیری شده در ابتدا و انتهای خوشه‌ساز استوار است. در نتیجه، تعریف ساده‌ای از ضریب خوشه‌ای سازی را می‌توان به صورت رابطه‌ی زیر نوشت

$$B = \frac{\Delta\phi_{in}}{\Delta\phi_{out}} \quad (4)$$

که در آن، $\Delta\phi_{in}$ و $\Delta\phi_{out}$ به ترتیب، گستره‌ی فاز ورودی و خروجی الکترون است. این گستره‌ها در شکل ۷ مشخص شده‌اند.

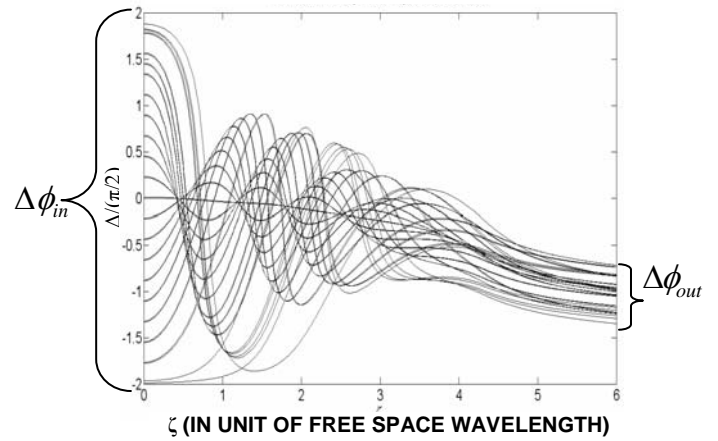


orbits illustrating variation of kinetic energy

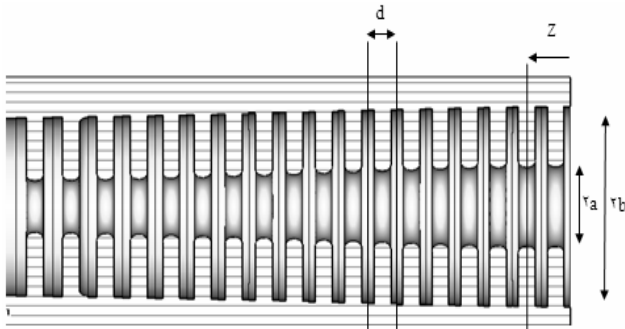


شکل ۸- تغییرات انرژی جنبشی الکترون در طول خوشه‌ساز.

orbits illustrating bunching characteristics



شکل ۷- شبیه‌سازی پویای حرکت الکترون‌ها در طول خوشه‌ساز.



شکل ۹- ابعاد کاواک در خوشه‌ساز.

که در آن J ها توابع بسل، β_ω سرعت فاز، E_0 شدت

$$\text{میدان، } k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ و } k_1 = k \left[\frac{(\beta_\omega^2 - 1)^{\frac{1}{2}}}{\beta_\omega} \right] \text{ است.}$$

در رابطه‌ی ۶ توان برحسب وات و شدت میدان برحسب ولت بر متر هستند. با ثابت فرض کردن توان عبوری در خوشه‌ساز به رابطه‌ی زیر می‌رسیم

$$\frac{a^4 \alpha^2}{\beta_\omega} f(k_1 a) = \text{مقدار ثابت} \quad (7)$$

که در آن،

$$f(k_1 a) = \frac{8}{(k_1 a)^2} [J_1^2(k_1 a) - J_0(k_1 a)J_2(k_1 a)] \quad (8)$$

با جای‌گذاری مقادیر پارامترهای موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده (که در واقع برابر پارامترهای کاواک‌های نهایی خوشه‌ساز هستند)، در رابطه‌ی ۷ می‌توان مقدار ثابت را به دست آورد. این مقادیر در جدول ۱ آمده‌اند. رابطه‌ی ۷ را می‌توان با استفاده از یک سری

گستره‌ی ورودی و خروجی در این طراحی، به ترتیب، برابر $\Delta\phi_{in} = 348^\circ$ و $\Delta\phi_{out} = 50^\circ$ به دست آمده‌اند که ضریب خوشه‌ای‌سازی حدود $B=7$ را به دست می‌دهد که مقدار مطلوبی برای این نوع خوشه‌ساز است.

شکل ۸ تغییرات انرژی جنبشی الکترون در طول خوشه‌ساز طراحی شده را نشان می‌دهد. مقدار انرژی جنبشی الکترون از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید

$$k = (\gamma - 1)m_0 c^2 \quad (5)$$

پس از یافتن تغییرات مناسب سرعت فاز و شدت میدان الکتریکی که نتایج خوشه‌ای‌سازی مطلوبی را به دست داد، ابعاد خوشه‌ساز باید به گونه‌ای طراحی شود که چنین تغییراتی را در عمل و به طور فیزیکی در داخل خوشه‌ساز ایجاد نماید.

شکل ۹ ابعاد کاواک در خوشه‌ساز را که باید به دست بیاید، نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش ۳ اشاره شد، در طراحی ابعاد خوشه‌ساز، سه کمیت مورد نیاز است: فاصله‌ی بین صفحه‌ها (d)، قطر روزنه‌ی صفحه‌ها (۲a) و قطر استوانه‌ای که صفحه‌ها در داخل آن قرار می‌گیرند (۲b). در ادامه نحوه‌ی محاسبه‌ی این کمیت‌ها آورده شده است [۶].

توان عبوری از ساختار بارگذاری شده با صفحه، برحسب شدت میدان و اندازه‌ی روزنه‌ی صفحه‌ها چنین تعیین می‌شود [۶]

$$P = \frac{(E_0 \lambda)^2}{30} \times \frac{1}{32\pi^2} \times \frac{(ka)^4}{\beta_\omega} \times \frac{J_1^2(k_1 a) - J_0(k_1 a)J_2(k_1 a)}{(k_1 a)^2} \quad (6)$$



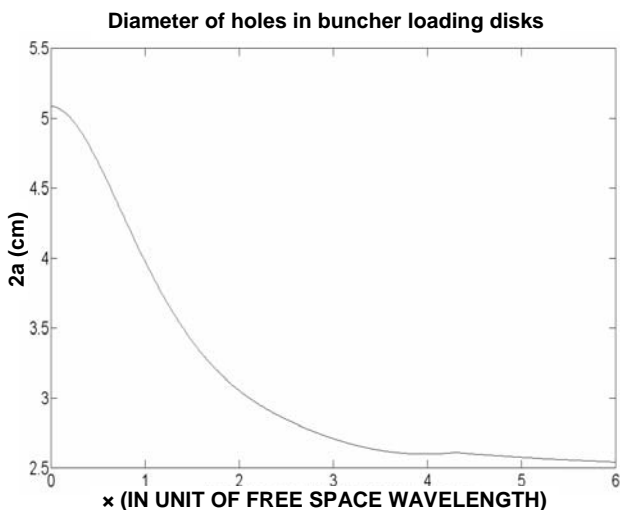
مشاهده شود. سوپرفیش مجموعه‌ای از کدها برای محاسبه‌ی میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی ایستا و میدان‌های الکترومغناطیسی بسامد رادیویی در مختصات دویبعدی دکارتی یا مختصات سه‌بعدی استوانه‌ای با تقارن محوری است.

در صورت وجود اختلاف بین فرکانس به دست آمده از شبیه‌سازی و مقدار ۲۹۹۷/۹۵ (فرکانس کاری)، با جزیی تغییر در مقدار b_n می‌توان فرکانس به دست آمده را دقیقاً با فرکانس موردنظر مساوی کرد. انتخاب اعمال تغییر بر روی پارامتر b_n برای تنظیم فرکانس، از این رو بود که، محاسبات انجام شده در مرجع [۴] نشان می‌دهد که تغییرات b_n بیش‌ترین اثر بر فرکانس را دارد.

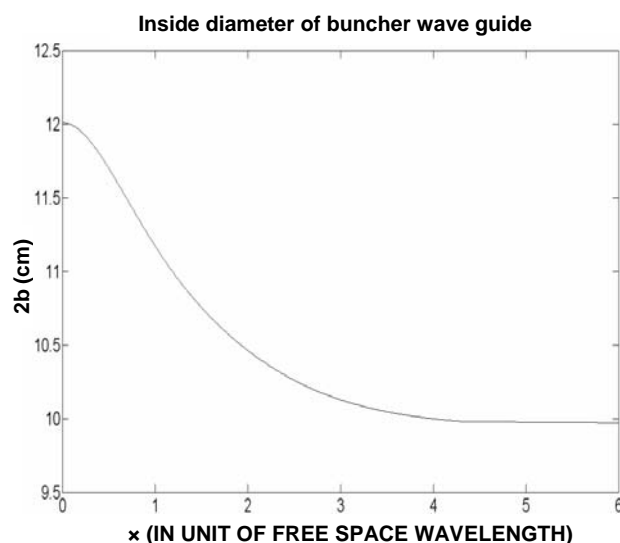
همگرا حل کرد و مقادیر شعاع روزنه‌ی صفحه‌ها را برحسب طول موج به دست آورد. در حل این رابطه، $\alpha(\xi)$ و $\beta(\xi)$ همان توابع شدت میدان و سرعت فاز هستند که در مرحله‌ی قبل مشخص شدند.

قدم بعدی در طراحی خوشه‌ساز تعیین قطر خارجی موج‌بر آن است. برای این منظور از رابطه‌ی به دست آمده در مرجع [۶] استفاده شده است.

$$\frac{1}{k_1 a} \times \frac{J_1(k_1 a)}{J_0(k_1 a)} = \frac{1}{(1-\eta)ka} \times \left[\frac{J_1(ka)N_0(kb) - N_1(ka)J_0(kb)}{J_0(ka)N_0(kb) - N_0(ka)J_0(kb)} \right] \quad (9)$$



شکل ۱۰- تغییرات قطر روزنه‌ی صفحه‌ها.



شکل ۱۱- تغییرات قطر لوله‌ی خوش‌ساز.

که در آن J و N توابع بسل نوع اول و دوم، و η نیز مقداری است که از ضخامت در نظر گرفته شده برای دیسک‌ها به دست می‌آید [۶]. شکل ۱۰ و ۱۱ منحنی به دست آمده برای تغییر قطر، به ترتیب، روزنه‌ها و لوله‌ی خوشه‌ساز را نشان می‌دهند. البته مقادیر گسسته‌ای از این پارامترها مورد نیاز هستند. این مقادیر پس از به دست آوردن فاصله‌ی بین صفحه‌ها مشخص می‌شوند، به این نحو که ابتدا مقدار d از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید و پس از مشخص شدن مکان صفحه‌ها شعاع روزنه‌ی هر یک و نیز شعاع لوله‌ی خوشه‌ساز در محل قرارگیری صفحه‌ها، محاسبه می‌شود. شکل ۱۲ روندنمای حل رابطه‌ی ۹ به روش بازگشتی را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی به دست آمده برای این کمیت در شکل ۱۳ آمده است.

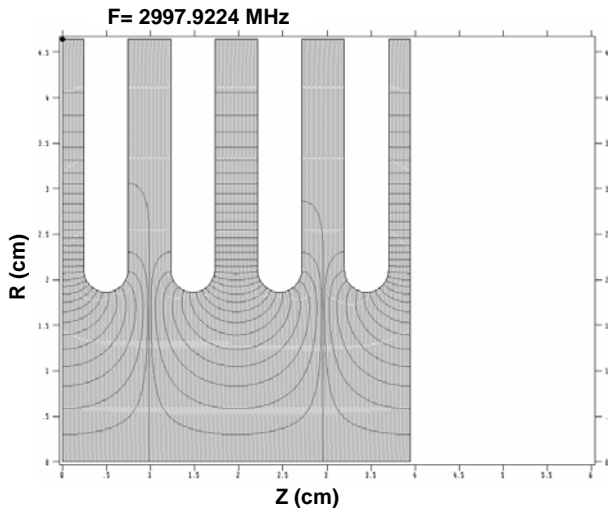
البته اساس رابطه‌ی ۷ و در نتیجه سایر روابط بعد آن بر فرض ثابت بودن توان در طول خوشه‌ساز استوار است. این فرض تا حد زیادی درست است اما به طور دقیق باید ذکر کرد که دو عامل - افت میدان در طول خوشه‌ساز و کاهش نسبت توان به شار کل در طول آن - باعث می‌شوند که توان در طول خوشه‌ساز ثابت باقی نماند.

با توجه به مقدار بالای ضریب کیفیت و سرعت فاز، می‌توان از عامل اول صرف‌نظر کرد. عامل دوم نیز با تصحیحی در مقدار شعاع روزنه (a)، رفع شده و کاهش نسبت توان به شار کل در طول خوشه‌ساز جبران می‌شود [۷].

در ادامه بهتر است از هر کاواک یک مدل ۴ تایی برای کد سوپرفیش طراحی شود تا فرکانس به دست آمده از این ابعاد



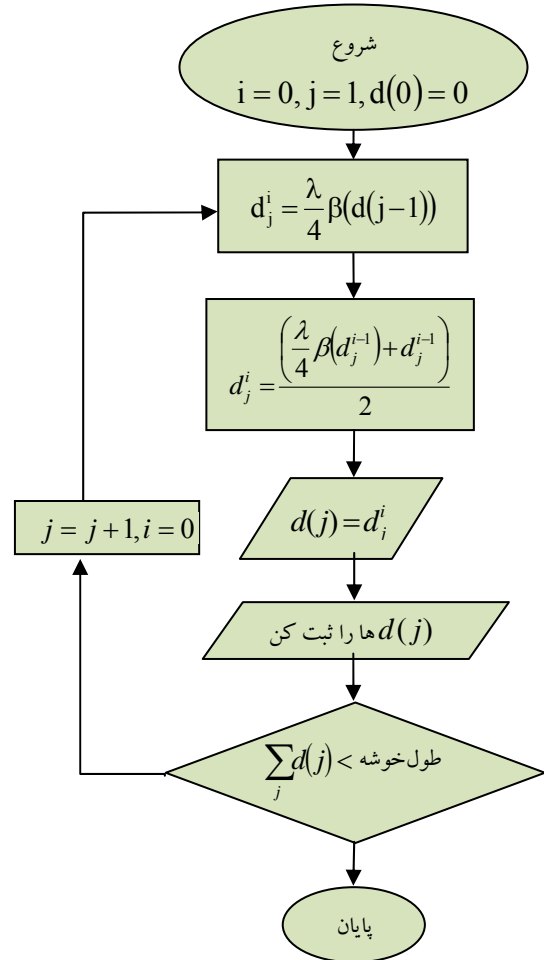
مد $\pi/2$ است. مقادیر نهایی ابعاد به دست آمده، در جدول ۲ داده شده‌اند.



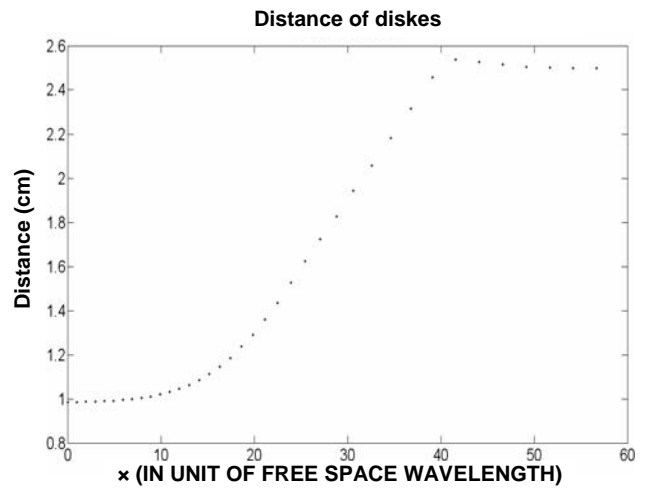
شکل ۱۴- شبیه‌سازی چهارتایی کاواک‌های خوشه‌ساز در کد سوپرفیش.

جدول ۲- مقادیر نهایی ابعاد کاواک‌های خوشه‌ساز

| Z_n (cm) | a_n (cm) | b_n (cm) | f (MHz) |
|------------|------------|------------|-----------|
| 0/493 | 2/000 | 4/7495 | 2997/9121 |
| 1/478 | 1/984 | 4/7365 | 2997/9161 |
| 2/464 | 1/956 | 4/7142 | 2997/9421 |
| 3/452 | 1/917 | 4/6836 | 2997/9183 |
| 4/440 | 1/875 | 4/6510 | 2997/9002 |
| 5/431 | 1/824 | 4/6110 | 2997/9538 |
| 6/424 | 1/768 | 4/5680 | 2997/8893 |
| 7/420 | 1/711 | 4/5245 | 2997/9081 |
| 8/422 | 1/654 | 4/4814 | 2997/9195 |
| 9/429 | 1/598 | 4/4391 | 2997/9397 |
| 10/444 | 1/545 | 4/3991 | 2997/9400 |
| 11/470 | 1/490 | 4/3581 | 2997/9260 |
| 12/508 | 1/443 | 4/3224 | 2997/9255 |
| 13/562 | 1/395 | 4/2858 | 2997/9665 |
| 14/637 | 1/356 | 4/2546 | 2997/8847 |
| 15/736 | 1/317 | 4/2233 | 2997/9084 |
| 16/865 | 1/279 | 4/1926 | 2997/9025 |
| 18/030 | 1/249 | 4/1658 | 2997/8933 |
| 19/241 | 1/219 | 4/1377 | 2997/9419 |
| 20/504 | 1/192 | 4/1128 | 2997/9598 |
| 21/829 | 1/168 | 4/0880 | 2997/8986 |
| 23/227 | 1/145 | 4/0648 | 2997/9342 |
| 24/708 | 1/124 | 4/0421 | 2997/9647 |
| 26/283 | 1/104 | 4/0218 | 2997/9354 |
| 27/955 | 1/086 | 4/0036 | 2997/8867 |
| 29/731 | 1/069 | 3/9874 | 2997/9153 |
| 31/616 | 1/053 | 3/9724 | 2997/9623 |
| 33/615 | 1/040 | 3/9600 | 2997/9501 |
| 35/735 | 1/030 | 3/9490 | 2997/9541 |
| 37/983 | 1/024 | 3/9400 | 2997/8948 |
| 40/368 | 1/023 | 3/9326 | 2997/9009 |
| 42/866 | 1/027 | 3/9298 | 2997/9432 |
| 45/399 | 1/022 | 3/9291 | 2997/9574 |
| 47/919 | 1/017 | 3/9285 | 2997/9230 |
| 50/429 | 1/013 | 3/9280 | 2997/9608 |
| 52/931 | 1/009 | 3/9273 | 2997/9117 |
| 55/431 | 1/006 | 3/9266 | 2997/9123 |
| 57/931 | 1/003 | 3/9259 | 2997/9195 |
| 60/431 | 1/000 | 3/9252 | 2997/9245 |



شکل ۱۲- روندنمای محاسبه‌ی مقادیر d.



شکل ۱۳- تغییرات فاصله‌ی d بین صفحه‌ها.

شکل ۱۴ یک نمونه از شبیه‌سازی چهارتایی کاواک‌های خوشه‌ساز با کد سوپرفیش را نشان می‌دهد که در آن با تغییر مقدار b، فرکانس موردنظر با دقت حدود ۰٫۰۳MHz حاصل شده است. انتخاب ۴ کاواک، حداقل تعداد کاواک برای پوشش



References:

1. M. Pierre, Lapostolle & albert I. Septier/ Linear Accelerators/ NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY-AMSTERDAM (1970).
2. WALDEMAR SCHARF/ PARTICLE ACCELERATORS AND THEIR USES/ Harwood academic publishes/ London (1986).
3. C.J. Karzmark, "Department of Radiation Oncology Stanford University School of Medicine," Medical Electron Accelerators, McGraw Hill-New York (1993).
4. س. ناظمی، "طراحی و ساخت کاواک شتاب‌گر خطی الکترون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۷).
5. ف. عباسی‌دوانی و س. ناظمی، "محاسبه ابعاد کاواک یک شتاب‌گر خطی الکترون پزشکی"، پذیرفته شده در مجله علوم و فنون هسته‌ای (۱۳۸۸).
6. M. Chodorow, E.L. Ginzton, W. Hansen, L. Kyhl, B. Neal, W.K.H. Panofsk, "Stanford high-energy linear electron accelerator (Mark III)," The Review of Scientific Instrument, VOLUME 26 (1955).
7. ف. قاسمی، "طراحی و شبیه‌سازی خوشه‌ساز شتاب‌دهنده خطی الکترون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۸).

۵- بحث و نتیجه‌گیری

طراحی خوشه‌ساز براساس مشخصات مورد درخواست در طرح ساخت شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون، گستره‌ی ورودی و خروجی را، به ترتیب، برابر، $\Delta\phi_{in}=348^\circ$ و $\Delta\phi_{out}=50^\circ$ نتیجه داده است که به ضریب خوشه‌ای‌سازی (B) حدود ۷ می‌انجامد. با استفاده از کد سوپرفیش می‌توان دقت ابعاد به دست آمده برای رسیدن به فرکانس موردنظر را بالا برد. ابعاد به دست آمده برای خوشه‌ساز به گونه‌ای است که به راحتی می‌توان آن را ساخت. البته با توجه به تغییرات ابعاد در هر کاواک، ساخت خوشه‌ساز مشکل‌تر از ساخت موج‌بر اصلی شتاب‌دهنده است.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Buncher
- ۲- Traveling Wave
- ۳- Standing Wave