

(IPM)

mlamehi@theory.ipm.ac.ir fabbasi@sbu.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۹۱/۲/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۹۱/۹/۱۵)

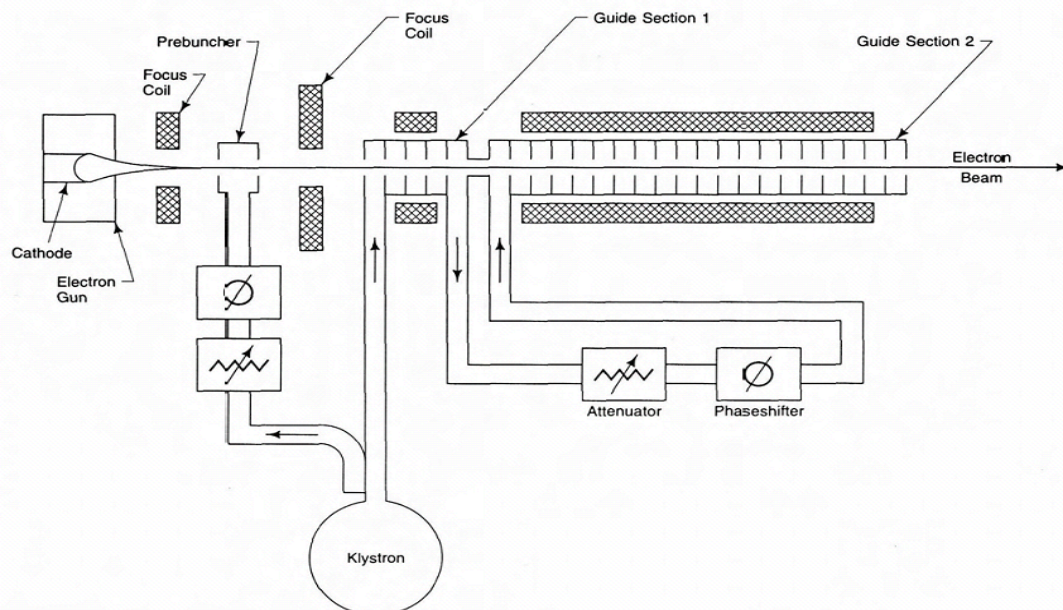
()

میان می توان به؛ فیزیک کاربردی، رادیوگرافی صنعتی، درمان سرطان، تولید رادیو داروها، سترون سازی تجهیزات پزشکی و . . . اشاره کرد. دو نوع شتابدهنده خطی الکترون وجود دارند. شتابدهنده موج رونده (TW) و شتابدهنده موج ایستا (SW). هر کدام از این دو نوع دارای مزایا و معایبی هستند و انواع مختلفی نیز دارند. قسمت اصلی شتابدهنده در هر دو نوع، از یک موجبر تشکیل شده است [۱].

شتابدهنده مورد نظر ما در این مقاله که دینامیک باریکه

یکی از انواع شتابدهنده های ذرات، شتابدهنده های خطی هستند. شتابدهنده های خطی با عبارت مخفف Linac شناخته شده اند. کلمه Linac مخفف عبارت Linear accelerator است. یعنی در این نوع از شتابدهنده ها، ذرات باردار در مسیر مستقیم در اثر میدان الکتریکی حاصل از امواج الکترومغناطیسی شتاب می گیرند.

امروزه شتابدهنده های خطی الکترون کاربرد فراوانی در مقاصد صنعتی، پزشکی و تحقیقاتی دارند، که در این



شکل ۱. نمایی از شتابدهنده موج رونده [۱].

پالس ولتاژ بالا و یک ترانسفورماتور پالسی هستند. کلاستر، توان RF پالسی تولیدی را از تقویت RF اعمالی به ورودی خود، تولید می‌کند. موج RF تولیدی توسط سیستم موجبری به کاواکها منتقل می‌شود.

الکترون در طول خوشه‌ساز^۱ آن مورد بررسی قرار گرفته است، از نوع موج رونده است. شکل ۱ نمایی ساده از یک شتابدهنده خطی الکترون از نوع موج رونده را نشان می‌دهد [۱].

قسمت‌های اصلی شتابدهنده خطی الکترون عبارتند از [۲]:

()
این قسمت‌ها وظایف زیر را برعهده دارند.

۱. تولید و شتاب اولیه باریکه الکترون.
۲. خوشه‌سازی اولیه الکترون‌ها توسط کاواک‌پیش خوشه‌ساز^۲.
۳. شتاب دادن و خوشه کردن بیشتر الکترون‌ها در خوشه‌ساز اصلی، به نحوی که الکترون‌ها هماهنگ با سرعت فازی موج RF تزریق شده به تیوب اصلی شتابدهنده باشند.
۴. تنگ‌تر کردن خوشه‌های الکترون همراه با طیف انرژی باریک‌تر.

این قسمت در واقع، یک خط انتقال موج RF می‌باشد، که از مجموعه‌ای از کاواک‌ها تشکیل شده است. توزیع میدان‌های

RF

منبع تغذیه RF یکی از عمده زیر مجموعه‌های شتابدهنده است که از قسمت‌های مختلفی ساخته شده است. از آنجا که تولید امواج الکترومغناطیسی نیازمند توان RF بسیار بالا (در حد چند مگاوات) می‌باشد، این توان به صورت پالس‌های با پهنای کم (در حد چند میکروثانیه) تولید و به وسیله تقویت‌کننده‌های لامپی میکروموج توان بالا (مثل کلاستر) تقویت می‌شوند. لامپ میکروموج به پالس‌های با ولتاژ و جریان بالا نیاز دارد، که به وسیله مدولاتور قدرت تولید می‌شود.

قسمت‌های اصلی سیستم RF، مدولاتور و کلاستر هستند. مدولاتور توان خط AC را به توان پالس ولتاژ بالا تبدیل می‌کند و اجزای اصلی آن یک منبع تغذیه ولتاژ بالا، یک واحد

۲. Prebuncher

۱. Buncher

خوشه‌ساز برای شتابدهنده‌های خطی الکترون مورد توجه قرار می‌گیرند. یکی خوشه‌ساز نوع مدولاسیون سرعت، مطابق آنچه که در لامپ‌های کلاسترون رایج است، و دیگری شامل طرح خاصی است که به موجبر اصلی شتابدهنده شباهت دارد و از موجبرهای بارگذاری شده با صفحه‌هایی که قطر روزنه آنها در حال کوچک شدن است، تشکیل شده است.

در اغلب شتابدهنده‌های خطی الکترون، خوشه‌ساز نوع دوم که ویژگی‌های خوشه‌سازی بهتری نسبت به نوع اول دارد، استفاده شده است. همچنین، از آن‌جا که ساختار کاواک‌های آن مشابه کاواک‌های موجبر اصلی شتابدهنده است، سازگاری بیشتری در اتصال به آن دارد [۳]. البته لزوم استفاده از خوشه‌ساز بارگذاری شده با صفحه علت دیگری نیز دارد. با توجه به انرژی (سرعت) کم الکترون‌های خروجی از تفنگ الکترونی و لزوم افزایش سرعت آنها به نزدیکی سرعت نور برای ورود به تیوب اصلی، لازم است تا از خوشه‌سازی استفاده شود که علاوه بر خوشه‌سازی، بهره انرژی قابل توجهی نیز داشته باشد. خوشه‌سازهای مدولاسیون سرعت این قابلیت را به اندازه نوع بارگذاری شده با صفحه، ندارند. به طور کلی خوشه‌ساز نوع مدولاسیون سرعت بیشتر به عنوان پیش خوشه‌ساز استفاده می‌شود. یعنی چنانچه به خوشه‌های الکترونی بسیار کوچک نیاز باشد، ترکیبی از این دو نوع به کار می‌رود. در این حالت خوشه‌ساز نوع مدولاسیون سرعت می‌تواند به عنوان یک خوشه‌ساز اولیه برای نوع بارگذاری شده با صفحه باشد [۳]. برای خوانندگان علاقمند توضیحات بیشتر برای خوشه‌ساز نوع مدولاسیون سرعت در مراجع [۴ و ۵] وجود دارد.

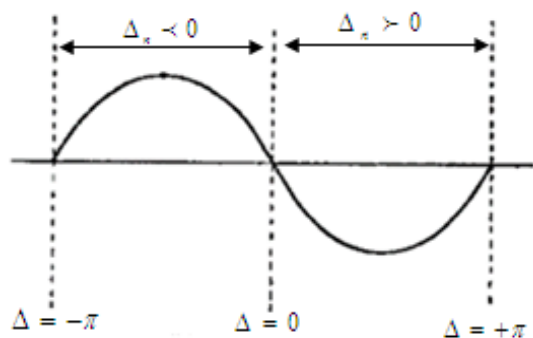
الکترون‌های خروجی از تفنگ الکترونی که به شتابدهنده تزریق می‌شوند، از لحاظ فازی، مکان مشخصی را بر روی موج رونده در شتابدهنده اشغال نمی‌کنند. اما روی بعضی از نقاط تعادل بر روی موج نوسان می‌کنند. نقطه تعادل در واقع یک زاویه فاز است که الکترون در آن، با سرعتی برابر سرعت موج، آن را

الکترومغناطیسی در خطوط انتقال از قوانین ماکسول تبعیت می‌کند و این کاواک‌ها در مد TM_{010} عمل می‌کنند [۲]. اگرچه تقسیم‌بندی صورت گرفته در بالا برای اجزای شتابدهنده خطی الکترون، خوشه‌ساز شتابدهنده را از موجبر اصلی آن جدا کرده است، اما این قسمت را می‌توان قسمت اولیه تیوب شتابدهنده دانست. چرا که این قسمت نیز در واقع یک خط انتقال خاص برای موج الکترومغناطیسی است.

در این مقاله که مطالعه آن به منظور طراحی و ساخت خوشه‌ساز اولین شتابدهنده خطی الکترون ساخته شده در ایران صورت گرفته است، پس از ارائه توضیحات بیشتری پیرامون نقش خوشه‌ساز و انواع آن، به اصول عملکرد خوشه‌ساز بارگذاری شده با صفحه، می‌پردازیم و عوامل مؤثر بر دینامیک باریکه الکترون در طول این نوع خوشه‌ساز را بررسی می‌کنیم.

دلیل اصلی خوشه‌کردن الکترون‌ها، فراهم کردن شرایطی برای به دست آوردن طیف انرژی مناسب در باریکه شتابدهنده است. بدون خوشه‌سازی، قبل از ورود به موجبر اصلی شتابدهنده، توزیع گسترده‌ای از لحاظ فازی بر روی موج RF برای الکترون‌ها به وجود می‌آید، که این توزیع گسترده انرژی، مطلوب نیست. زیرا در اکثر کاربردها محدوده انرژی به خصوصی برای الکترون‌ها مورد نیاز است [۲]. از طرف دیگر، با تحلیل مغناطیسی می‌توان دریافت که الکترون‌های با یک انرژی مشخص در طی حرکت خود از هم فاصله خواهند گرفت که این موضوع منجر به از دست رفتن بخشی از جریان باریکه الکترون و گسترش تابش زمینه خواهد شد. در این صورت ناگزیر به استفاده از حفاظ‌سازی گسترده خواهیم بود که به کارگیری شتابدهنده را برای اهداف گوناگون مشکل می‌سازد [۱].

علاوه بر بهبود طیف انرژی باریکه خروجی، استفاده از خوشه‌ساز می‌تواند باعث افزایش کسر الکترون‌های تزریق شده به موجبر اصلی شتابدهنده شود [۱]. از این رو دو نوع



شکل ۳. قرار داد علامت فاز موج و الکترون.

بازگرداننده (همان نیرویی که باعث بازگشت الکترون‌ها به نقطه تعادل می‌شود) افزایش می‌یابد و دامنه نوسان الکترون‌ها متناسب با آن کاهش پیدا می‌کند.

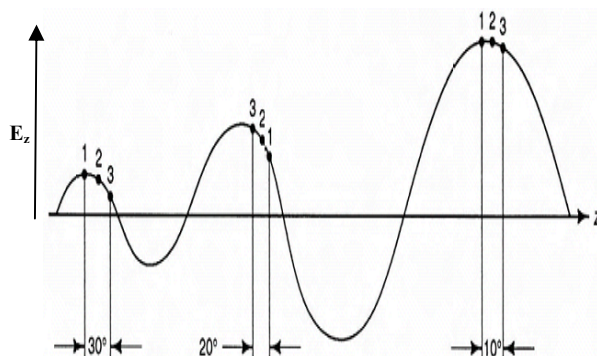
ساز و کار دوم در کاهش دامنه نوسان و در نتیجه خوشه شدن الکترون‌ها، از افزایش بهره انرژی الکترون ناشی می‌شود [۲]. با پذیرش تعدادی از فرضیات که حل مسئله را ساده تر می‌کنند، می‌توان نشان داد که دامنه نوسان الکترون حول نقطه تعادل به صورت رابطه زیر است:

$$\left(\frac{\beta}{\alpha m_1} \cos \Delta_n\right)^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

که در آن α جرم طولی، m_1 شدت میدان و β سرعت فاز است. Δ_n زاویه فاز نقطه تعادل است که برای آن، از قرارداد شکل ۳ استفاده می‌شود [۳].

جرم طولی m_1 متناسب با $\frac{3}{2}(1-\beta^2)$ افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه (۱) مشاهده می‌شود که افزایش در جرم طولی الکترون، کاهش دامنه نوسان حول نقطه تعادل را نتیجه می‌دهد.

برای مثال اگر الکترون‌ها با انرژی 80 keV ($\beta_e = 0.5$) وارد خوشه ساز شوند و با انرژی 5 MeV ($\beta_e = 1$) خارج گردند، جرم طولی 800 برابر خواهد شد. در این صورت چنانچه شدت میدان با ضریب 10 افزایش یابد، دامنه نوسانات الکترون در $\Delta_n = 0$ با ضریب $7/95$ کاهش می‌یابد. این عدد مقدار ضریب کاهش در دامنه نوسان را نشان می‌دهد. اما همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، زاویه اشغال شده توسط الکترون‌ها دو برابر دامنه نوسان است. بنابراین زاویه خوشه با ضریب $15/9$ کاهش می‌یابد.



شکل ۲. ساز و کار دسته شدن الکترون‌ها بر اثر نوسان حول نقطه تعادل بر روی موج.

دنبال می‌کند. شکل ۲، این نوسان را نشان می‌دهد. در این شکل، ساز و کار نوسان الکترون‌ها در طول چند قله موج که شدت میدان و سرعت فاز در آن در حال افزایش است، نشان داده شده است [۶]. در شکل ۲ فرض شده است که الکترون‌ها در یک خوشه 30° درجه‌ای (که در نزدیکی قله قرار دارد) از خوشه ساز اولیه وارد خوشه ساز اصلی شده‌اند. همچنانکه در شکل نمایان است، سه الکترون ۱، ۲ و ۳ به نمایندگی از کل الکترون‌های موجود در خوشه، نشان داده شده‌اند.

الکترونی که در ابتدا در مکان ۱ قرار دارد میدان الکتریکی بزرگتری را لمس کرده و شتاب بیشتری خواهد گرفت. از لحاظ فازی به سمت جلو رفته و الکترون ۲ را پشت سر می‌گذارد. الکترون مکان ۳ شتاب کمتری گرفته و از الکترون مکان ۱ و ۲ جا می‌ماند. به همین صورت این نوسان ادامه می‌یابد و سرانجام الکترون‌ها با چنین سازوکاری، به نزدیکی قله رسیده تا سرعت آنها به سرعت نور برسد. مشاهده می‌شود که دامنه نوسان کوچکتر شده و در انتها خوشه‌ای 10° درجه‌ای به دست آمده است. به نوعی، مکان نقطه ۲ در این مثال را می‌توان همان نقطه تعادل در نظر گرفت [۶].

چنانچه بتوانیم به کاهش تدریجی اندازه نوسان حول نقطه تعادل دست یابیم، دسته‌ای از الکترون‌های خوشه شده را در انتها خواهیم داشت [۳]. برای دست یابی به این منظور، دو ساز و کار وجود دارد. اول آنکه شدت میدان را می‌توان به گونه‌ای در نظر گرفت که پیشروی تدریجی و آهسته الکترون‌ها در طول خوشه ساز را به دنبال داشته باشد. به طوری که نیروی

فضای آزاد ($\approx 10 \text{ cm}$) برابر 0.58 خواهد شد. در این حالت چنانچه بخواهیم دو نوسان کامل داشته باشیم، طول خوشه ساز باید $\frac{1}{\beta} \left(\frac{v'}{v} \right) = 3/5$ برابر طول موج باشد. البته این مقدار بسیار کم است و در واقعیت علاوه بر α و β مقدار m_l نیز افزایش می یابد.

همان طور که در ابتدای این بخش اشاره شد، تعریف ساده تری از ضریب خوشه سازی را می توان به صورت زیر داشت [۲]:

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

که در آن به ترتیب $\Delta \phi_{in}$ و $\Delta \phi_{out}$ گستره فاز ورودی و خروجی الکترون هاست. معمولاً، برای مقایسه این ضریب در خوشه سازهای مختلف، $\Delta \phi_{in}$ را 60° درجه، در نظر می گیرند و $\Delta \phi_{out}$ را با هم مقایسه می کنند [۶].

خوشه ساز بار گذاری شده با صفحه از یک موجبر استوانه ای تشکیل شده است که داخل آن صفحه هایی با روزهایی که به طور متوالی باریک می شوند، قرار می گیرند. فاصله صفحه ها از یکدیگر برابر نبوده و شعاع موجبر استوانه ای نیز تغییر می کند. شکل ۴ یک نمونه از این نوع خوشه ساز را که قبل از موجبر اصلی شتاب دهنده موج رونده قرار گرفته است، نشان می دهد.

در این نوع از خوشه ساز، سرعت فاز و شدت میدان به تدریج از مقدار نسبی کم در ورودی، به مقدار معینی در انتهای خوشه ساز می رسد. اندازه انتهایی این کمیت ها با مقادیر مشخصه آنها در موجبر اصلی شتاب دهنده برابرند. به طور کلی، کاواک های انتهایی خوشه ساز، مشابه کاواک های موجبر اصلی اند.

تغییرات سرعت فاز و شدت میدان در طول خوشه ساز، به گونه ای است که الکترون های عبوری از خوشه ساز، در حالی که همگی انرژی می گیرند به طور طولی خوشه می گردند.

توان همگرایی یک خوشه ساز در دسته کردن هر چه بیشتر الکترون ها، توسط ضریب خوشه سازی بیان می گردد. این ضریب که بر پایه زاویه فاز اندازه گیری شده در ابتدا و انتهای خوشه ساز استوار است به صورت رابطه (۲) تعریف می شود [۳].

$$B = \left[\frac{\beta_2^2 m_l \alpha_2}{\beta_1^2 m_l \alpha_1} \cos \Delta n \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

که در آن زیر نویس های ۱ و ۲ به مقادیر اولیه و نهایی اشاره دارند.

رابطه (۲) برای ضریب خوشه سازی تقریبی است. چرا که بر پایه فرض ساده کننده، خطی فرض کردن نیروی بازگرداننده الکترون ها در نوسان حول نقطه تعادل، استوار است. اما می تواند ملاک خوبی برای سنجش شایستگی خوشه ساز طراحی شده باشد [۳].

با مقایسه نوسان الکترون با یک نوسانگر خطی (که اشاره دارد به خطی فرض کردن نیروی بازگرداننده)، فرکانس نوسان آن حول نقطه تعادل به صورت رابطه (۳) خواهد بود [۳].

$$v' = v \left(\frac{\alpha / \sqrt{\pi} \cos \Delta n}{\beta (m_l / m)} \right), \quad (3)$$

که در آن v فرکانس موج رونده RF، و m جرم سکون الکترون است. چنانچه جرم طولی با آهنگی سریعتر از افزایش شدت میدان (پارامتر α) رشد یابد، فرکانس نوسانات کاهش خواهد یافت.

بزرگ بودن این فرکانس دارای اهمیت است. به گونه ای که بتوان بیشترین نوسان ممکن الکترون حول نقطه تعادل را در طول خوشه ساز داشته باشیم. هر چه تعداد این نوسانات بیشتر باشد عمل خوشه سازی بهتر صورت می پذیرد [۳]. برای مثال، چنانچه در نظر بگیریم که در ابتدای تزریق الکترون ها در ورودی خوشه ساز، $\alpha = 0.4^\circ$ ، $\Delta n = 0$ و $\beta_e = 0.5$ باشد. آنگاه: $\frac{m_l}{m} = 1/56$ خواهد بود و $v'/v = 0.29$ می شود. در چنین شرایط اولیه ای تعداد نوسانات کامل در فاصله یک طول موج در

پس از حل دو مسئله فوق و طراحی وساخت، لازم است تا خوشه ساز مورد ارزیابی قرار گرفته تا تغییرات سرعت فاز و شدت میدان در طول محور آن و نیز عملکرد خوشه سازی آن محاسبه گردد. پس از طراحی نهایی ابعاد، لازم است تا به ملاحظات مربوط به اثر جریان باریکه^۱ و بار فضایی^۲ و نیز حرکت عرضی ابعاد توجه شود [۲].

در این بخش به توصیف رفتار α و β_{ω} که در طول خوشه ساز تغییر می‌کنند و نقش آنها می‌پردازیم.

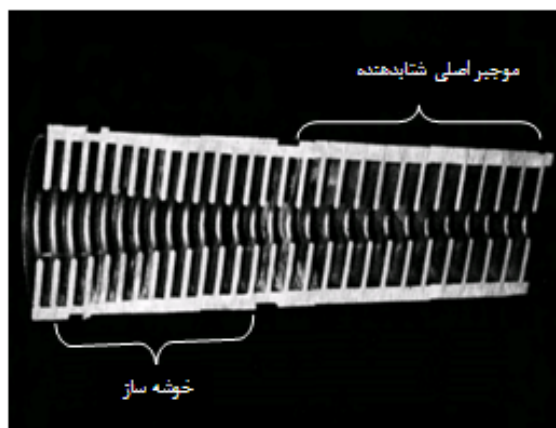
به دلایل زیر بهتر است تا سرعت فاز (β_{ω}) از مقدار کمی در ابتدا شروع شود و به طور آهسته شروع به افزایش کند [۳].

مقدار اولیه کم β_{ω} ، مقدار کوچک β_e و در نتیجه مقدار کوچک m_1 را در ابتدا نتیجه می‌دهد. بنابراین نسبت مقدار نهایی به مقدار اولیه جرم طولی، بزرگ می‌شود. و این یکی از موارد لازم برای همگرایی مؤثرتر است و بنا بر رابطه (۲) ضریب خوشه‌سازی بزرگتری را نتیجه می‌دهد.

مقدار اولیه کوچک برای β_{ω} باعث افزایش تعداد نوسانات کامل الکترون در واحد طول موج آزاد می‌شود. و اجازه همگرایی مؤثرتر در واحد طول را می‌دهد.

سرعت فاز (β_{ω}) در ابتدا باید به آرامی افزایش یابد تا نقطه تعادل نزدیک نقطه $\Delta_n = 0$ باشد. اهمیت این مورد در دستیابی به ضریب خوشه سازی بالاتر، در روابط (۲) و (۳) به خوبی نمایان است.

دلیل دیگری برای کوچک بودن مقدار اولیه کم برای سرعت فاز در ابتدای خوشه ساز وجود دارد. چنانچه هر الکترون به زاویه فاز $(-\pi/2 + \Delta_n)$ و یا کمتر از آن دست یابد (یعنی عقب‌تر از قله قرار گیرد)، ممکن است روند پس رونده‌ای را داشته، و از باریکه اصلی خارج شده و از دست برود. (زیرا نیروی کمتری را دریافت می‌کند و از لحاظ فازی نیز از بقیه



شکل ۴. برشی از یک موجبر شتابدهنده موج رونده که قسمت ابتدایی آن را خوشه ساز تشکیل می‌دهد [۱].

طراحی خوشه‌ساز نوع بار گذاری شده با صفحه را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد [۶]:

مرحله اول، مطالعه حرکت الکترون‌ها در میدان بین روزنه صفحه‌هاست. در طراحی خوشه ساز هر شتابدهنده الکترونی، این مطالعات در نهایت به ارائه چندین منحنی ختم می‌شوند.

این منحنی‌ها معمولاً، رفتار تغییرات مناسب شدت میدان الکتریکی و سرعت فاز را برای دستیابی به خوشه سازی مناسب در طول خوشه ساز نشان می‌دهند. انتخاب نحوه این تغییرات اختیاری است و متناسب با انتظاری که از خوشه‌ساز در هر شتابدهنده‌ای می‌رود، طراحی می‌شوند [۶]. البته ملاحظات نیز وجود دارند که انتخاب این توابع مولد را برای داشتن حالت بهینه، هدایت می‌کنند [۳].

مرحله دوم، طراحی فیزیکی خوشه ساز، تحلیل و تفسیر این منحنی‌ها و استفاده از معادلات حاکم بر نظریه موجبرهای بارگذاری شده با صفحه در به دست آوردن ابعاد است [۶].

در طراحی ابعاد خوشه ساز، به طور کلی سه پارامتر مورد نیاز است:

۱. فاصله بین صفحه‌ها (d).

۲. قطر روزنه صفحه‌ها (2a).

۳. قطر استوانه‌ای که صفحه‌ها در داخل آن قرار می‌گیرند (2b).

هر کدام از این مقادیر به طور جداگانه به صورت تابعی بر

حسب فاصله روی محور خوشه ساز، تغییر می‌کنند.

۱. Beam loading

۲. Space charge

خوشه عقب‌تر است).

آوردی برای بهبود ضریب خوشه‌سازی از طریق افزایش جرم طولی نخواهیم داشت. تاکید می‌شود که با توجه به رابطه (۲) ضریب خوشه‌سازی متناسب با جذر چهارم نسبت جرم طولی در انتها به ابتدا، افزایش می‌یابد. بنابراین باید میان این ضرایب مقدار بهینه‌ای را در نظر گرفت [۳].

یک راه حل مناسب، افزایش تدریجی و آهسته Δ_n است. برای این منظور، با توجه به تفاوت میان سرعت فاز و سرعت ذره می‌توان مکان ذره روی موج را عوض کرد.

چنانچه طول خوشه‌ساز را بزرگ انتخاب کنیم، زمان کافی برای کنترل فرایند خوشه‌سازی، به وسیله اعمال تغییرات مناسب در توابع α و β_ω وجود دارد. علاوه بر آن در این حالت، می‌توان از تفنگ الکترونی با ولتاژ کمتر استفاده کرد که باعث کاهش هزینه‌ها می‌گردد.

با انتخاب طول کوچک برای خوشه‌ساز، ناگزیر هستیم تا شدت میدان الکتریکی بزرگی داشته باشیم. در نتیجه الکترون‌ها، خیلی سریع شتاب می‌گیرند. در این صورت بعد از چندین سانتی‌متر، عملاً امکان کنترلی بر روی فرایند خوشه‌سازی وجود نخواهد داشت.

این نوع از خوشه‌سازها برای جریان‌های متوسط و بالا مناسب هستند. چون از اثر بارگذاری جریان باریکه در آنها (در طی فرایند خوشه‌سازی) می‌توان صرف نظر کرد.

همان‌گونه که در بخش ۴ توضیح داده شد. نسبت گستره ورودی فاز الکترون‌ها به گستره نهایی را ضریب خوشه‌سازی گویند. بزرگتر بودن هر چه بیشتر این مقدار حائز اهمیت است.

این کمیت در دستیابی به طیف انرژی باریک در خروجی خوشه‌ساز، حائز اهمیت است. ممکن است ضریب خوشه‌سازی خوبی داشته باشیم اما گستره نهایی چندان مطلوب نباشد.

مقدار اولیه کوچک β_ω ، ساخت تفنگ الکترونی را نیز ساده‌تر می‌کند. زیرا به ولتاژ کمتری برای آن نیاز خواهد بود. پارامتر شدت میدان (α) نیز، باید به دو دلیل از مقادیر کوچک شروع شود [۳]. مطابق توضیحات بخش ۴، افزایش تدریجی در شدت میدان در عملکرد خوشه‌سازی نقش موثری دارد.

اگر اندازه میدان اولیه خیلی بزرگ باشد، بعضی از الکترون‌های تولیدی از تفنگ به عقب برخواهند گشت و از باریکه دور می‌شوند. در حالی که با شدت میدان اولیه کم، همه الکترون‌ها گیر خواهند افتاد. می‌توان نشان داد که اندازه میدان بحرانی (یعنی اندازه میدانی که در آن مقدار کمی از الکترون‌ها به عقب باز خواهند گشت) به صورت رابطه (۵) است.

$$\alpha_c = \pi \left[\frac{1 - \left(1 - \beta^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\beta} \right] \quad (5)$$

لازم است تا برای داشتن کسر بزرگی از الکترون‌های تزیقی، مقدار اولیه α زیر مقدار بحرانی نگه داشته شود. معادلات حاکم بر حرکت طولی الکترون در شتابدهنده به صورت زیر هستند و معمولاً توسط محاسبات کامپیوتری و با حل عددی، به جواب می‌رسند [۶]:

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = -\alpha(\xi) \sin \Delta(\xi), \quad (6)$$

$$\gamma(\xi) = \frac{1}{\left(1 - \beta_e(\xi)^2\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (7)$$

$$\frac{d\Delta}{d\xi} = \pi \left(\frac{1}{\beta_\omega(\xi)} - \frac{1}{\beta_e(\xi)} \right). \quad (8)$$

اما $\beta_\omega(\xi)$ باید در ابتدا به آرامی افزایش یابد تا فاز نقطه تعادل از $\Delta_n = 0^\circ$ فاصله نگیرد. اهمیت این زاویه با توجه به شیب منحنی موج مشخص است. در این فاز بیشترین شیب و در نتیجه بیشترین نیروی بازگرداننده را خواهیم داشت. با این تحلیل، بیشترین همگرایی حول این نقطه حاصل خواهد شد.

با وجود داشتن بیشترین مقدار نیروی بازگرداننده پیرامون نقطه $\Delta_n = 0^\circ$ و بهبود ضریب خوشه‌سازی، بهره انرژی در آن صفر است و انرژی‌ای به الکترون‌ها منتقل نخواهد شد. در نتیجه جرم طولی ثابت باقی خواهد ماند و از این لحاظ هیچ دست

ورود به خوشه ساز اصلی داشت.

به ملاحظات لازم برای تعریف شدت میدان و سرعت فاز خوشه ساز در بخش ۶ اشاره شد. با در نظر گرفتن چنین ملاحظاتی می توان تابعی مناسب را برای شدت میدان در نظر گرفت. در این مقاله شدت میدانی مطابق آنچه که در مرجع [۳] آمده است را در نظر گرفتیم و با تغییر عوامل مختلف، اثر هر یک را بررسی کردیم.

در این مرجع، در ابتدای خوشه ساز مقادیر در نظر گرفته شده برای β_{ω} از حل معادلات حرکت، به دست آمده است. در فاصله های بزرگتر، به گونه ای لحاظ شده است که β_{ω} به طور خطی افزایش یابد تا به مقداری بیشتر از یک برسد و پس از آن با کاهش خطی به مقدار ۱ می رسد و ثابت می ماند. این کار به منظور جابه جایی فاز نهایی خوشه به $\pi/2$ ، در نظر گرفته شده است. شکل های ۵ و ۶ به ترتیب شدت میدان و سرعت فاز در نظر گرفته شده در این مرجع را نشان می دهند. با داشتن شدت میدان و سرعت فاز، می توان با حل عددی معادلات ۶ تا ۸، تغییرات فاز الکترون ها در طول خوشه ساز را به دست آورد و در نتیجه نوسان آنها را در طی فرایند خوشه سازی، شبیه سازی کرد. شکل ۷ شمای عملیاتی چنین شبیه سازی را نشان می دهد، که با نرم افزار MATLAB پیاده سازی شده است.

شکل های ۸ و ۹ نتیجه به دست آمده برای طراحی این مرجع را نشان می دهند. در شکل ۸، که تغییرات فاز الکترون ها در طول خوشه ساز را نشان می دهد، گستره ورودی و خروجی و تغییر فاز ناشی از بیشتر شدن سرعت فاز الکترون ها از یک (برای رسیدن به فاز ۹۰ درجه)، نشان داده شده اند. شکل ۹ نیز تغییرات مقدار ضریب گاما (نسبت انرژی به انرژی سکون)، را نشان می دهد. گستره ورودی به دست آمده از شبیه سازی برابر ۳۴۱ است. این گستره زاویه (۱۷۸-) درجه تا زاویه (۱۶۳+) درجه در ورودی را پوشش می دهد. چنانچه الکترونی با فاز ورودی خارج از این بازه وارد خوشه ساز شود، خوشه نخواهد شد

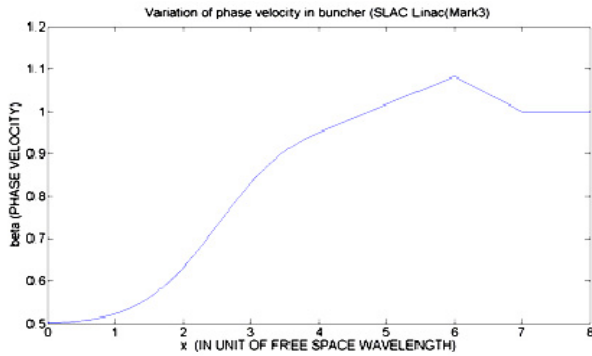
منظور از گستره اولیه، بازه زاویه ای از کل زاویه ۳۶۰ درجه ورودی به خوشه ساز است که بر روی الکترون های موجود در این بازه، خوشه سازی صورت گرفته، و از دست نخواهند رفت. هرچه میزان گستره بزرگتر باشد تعداد بیشتری از الکترون های خارج شده از تفنگ الکترونی، خوشه شده و جریان باریکه بیشتری خواهیم داشت.

همان طور که در بخش ۴ اشاره شد، ضریب خوشه سازی از تقسیم گستره اولیه به گستره نهایی به دست می آید. اما باید توجه داشت، ممکن است که ضریب خوشه سازی خوبی داشته باشیم اما گستره اولیه کوچک باشد.

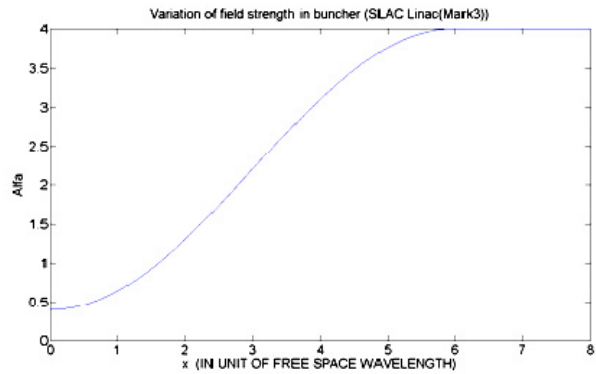
کوچکتر بودن گستره نهایی، طیف انرژی باریکتری را در خروجی نتیجه می دهد. اما گستره اولیه کم، باعث از دست رفتن الکترون ها از خوشه می شود.

با توجه به توضیحات مربوط به گستره اولیه، باید به جریان تفنگ الکترونی در انتخاب کمیت های مناسب برای طراحی خوشه ساز، توجه داشت. چنانچه جریان تفنگ در دسترس، بالا باشد، دغدغه از دست دادن الکترون ها به واسطه کوچک بودن گستره اولیه کمتر می گردد و می توان از خوشه سازی استفاده کرد که با وجود گستره اولیه کوچکتر خود، ضریب خوشه سازی بزرگتری داشته باشد. در صورت کم بودن جریان تفنگ الکترونی، ناگزیر به طراحی خوشه سازی با گستره اولیه بزرگتر هستیم تا مقدار بیشتری از جریان را داشته باشیم.

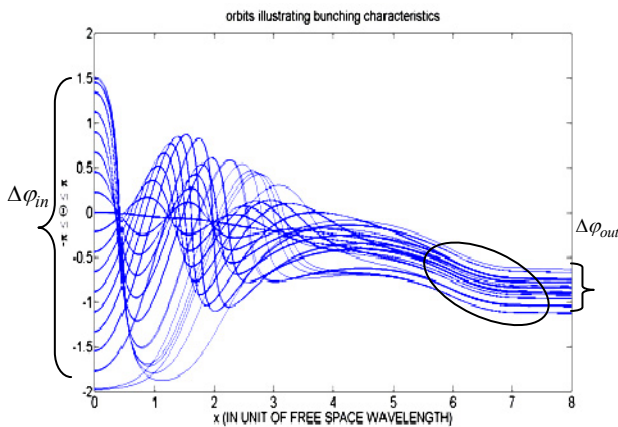
یکی از موارد اختیاری، استفاده از پیش خوشه ساز و کوچک کردن گستره الکترون های ورودی به خوشه ساز اصلی است. در این صورت می توان از خوشه سازی استفاده کرد که از ضریب خوشه سازی بزرگتری برخوردار است. برای مثال اگر پس از تفنگ الکترونی از یک پیش خوشه ساز با ضریب خوشه سازی برابر ۲ استفاده شود، در بهترین حالت، می توان از کل زاویه ۳۶۰ درجه ای الکترون ها، گستره ای ۱۸۰ درجه ای برای



شکل ۶. سرعت فاز در طول خوشه ساز مرجع [۳].



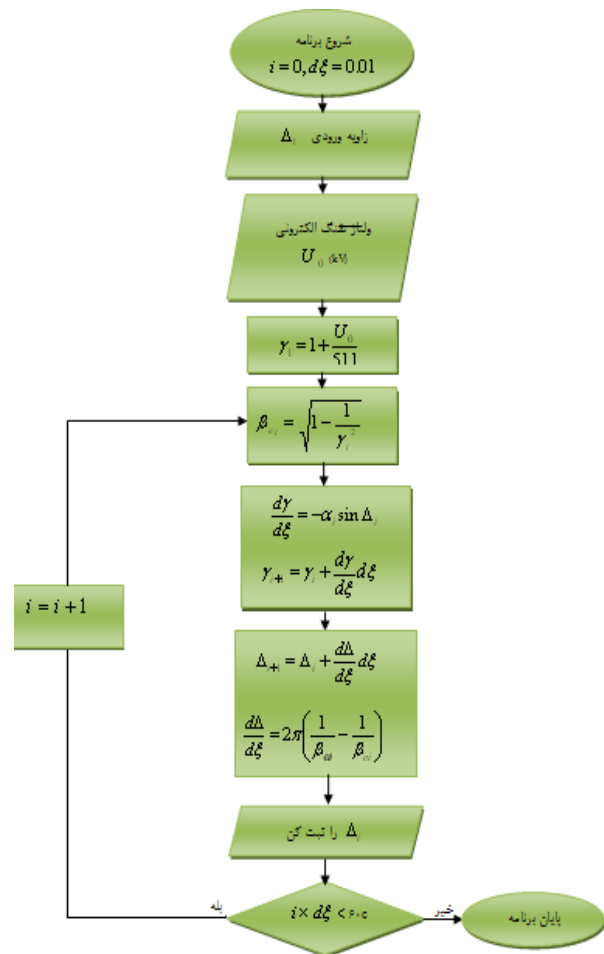
شکل ۵. شدت میدان در طول خوشه ساز مرجع [۳].



شکل ۸. تغییرات فاز الکترون‌ها در طول خوشه ساز مرجع [۳].

خواهد بود که با مقدار به دست آمده از مرجع [۳] اندکی تفاوت دارد.

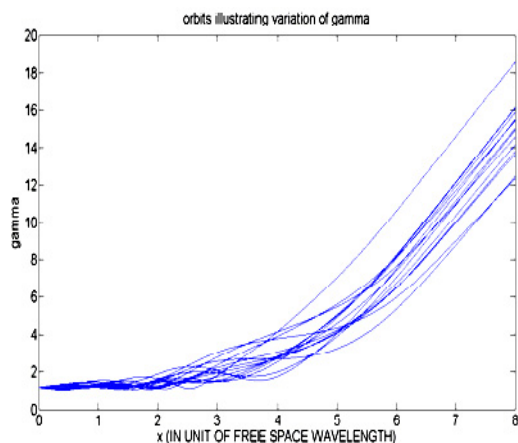
در شکل ۸ مشاهده می‌شود که از حدود $\xi = 4/5$ به بعد، گستره فازی خوشه الکترون‌ها تغییری نکرده است و ما شاهد جابه‌جایی فاز کل خوشه هستیم (قسمت نشان‌داده شده در منحنی بیضی شکل). این جابه‌جایی فاز به منظور تغییر فاز الکترون‌ها و جابه‌جایی آنها تا نزدیکی فاز $(-\pi/2)$ به منظور کسب بیشترین بهره انرژی است. این موضوع در شکل ۸ به خوبی روشن است. در این شکل مشاهده می‌شود که مقدار گاما که متناسب با انرژی الکترون‌هاست، تا نزدیکی $\xi = 4/5$ تقریباً ثابت بوده و در ادامه با جابه‌جایی فاز الکترون‌ها به نزدیکی فاز $-\pi/2$ ، شروع به افزایش می‌کند.



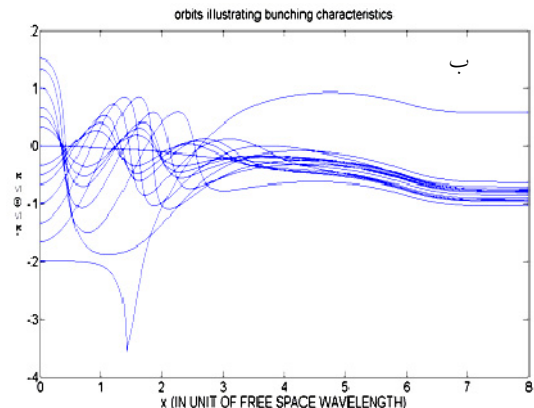
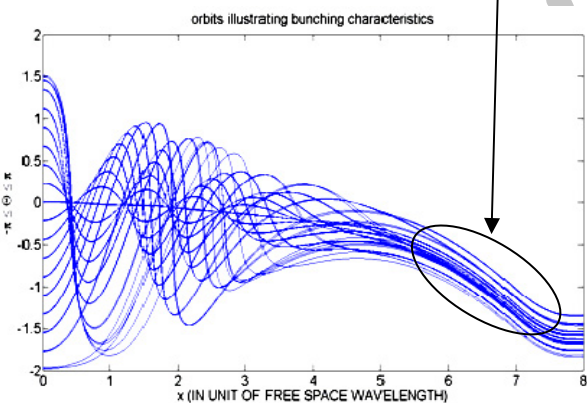
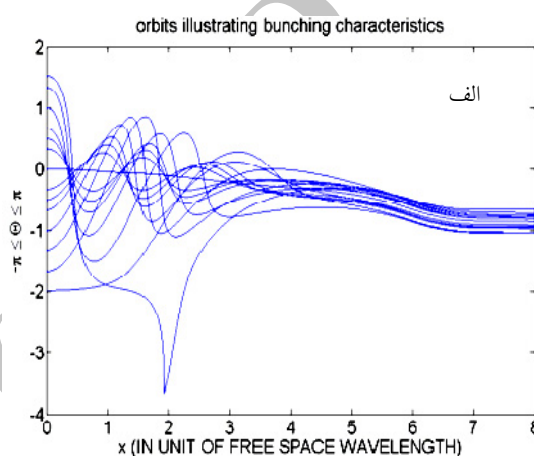
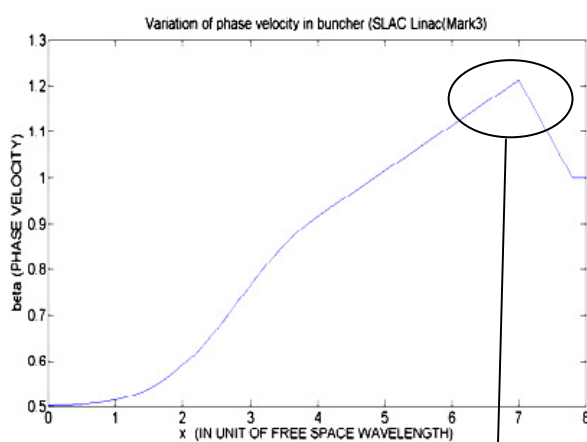
شکل ۷. شمای عملیاتی روند شبیه‌سازی تغییرات فاز الکترون‌ها در طول خوشه ساز.

و از دست خواهد رفت. شکل ۱۰ از دست رفتن الکترون‌های با فاز ورودی خارج از گستره ورودی را نشان می‌دهد.

گستره خروجی به دست آمده از شبیه‌سازی تقریباً برابر ۳۰ است. در نتیجه ضریب خوشه‌سازی به دست آمده، برابر ۱۱/۴



شکل ۹. تغییرات مقدار گاما در خوشه ساز مرجع [۳].

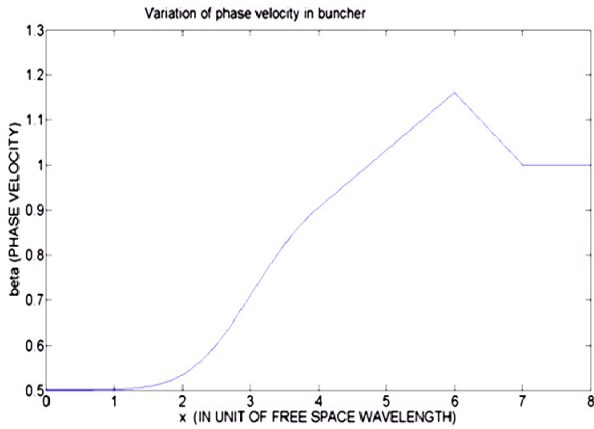


شکل ۱۱. جابه جا کردن خوشه الکترون‌ها با بزرگتر کردن اندازه $\beta_\omega(\xi)$ از ۱.

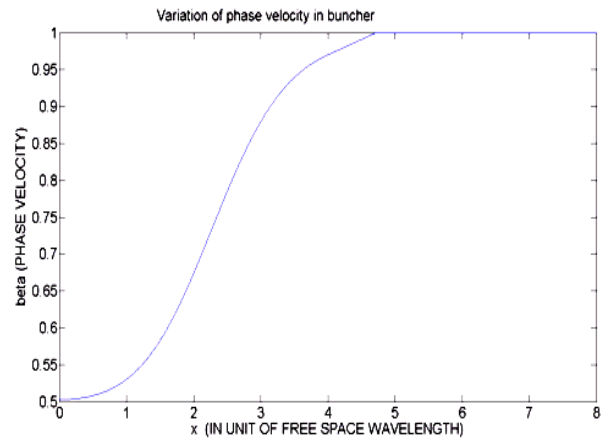
شکل ۱۰. از دست رفتن الکترون‌های خارج از گستره ورودی: الف) $\theta_0 < -178$ ، ب) $\theta_0 > 136$.

در جابه‌جایی فاز الکترون‌ها نشان می‌دهد. زیرا سرعت الکترون‌ها نمی‌تواند از سرعت نور بیشتر شود. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ جابه‌جایی خوشه الکترون‌ها بر اثر تغییر در اندازه $\beta_\omega(\xi)$ را نشان می‌دهند. لازم به تاکید است که این جابه‌جایی اختیاری بوده و بهترین

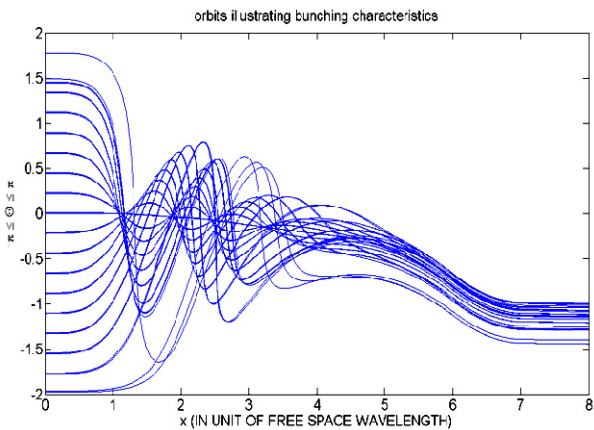
در واقع افزایش اندازه $\beta_\omega(\xi)$ از مقدار ۱ در این محدوده، باعث چنین جابه‌جایی شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، اندازه $\beta_\omega(\xi)$ در بازه حدود ۴/۵ تا ۷ از ۱ بیشتر می‌گردد (قسمت داخل منحنی بیضی شکل). این افزایش خود را



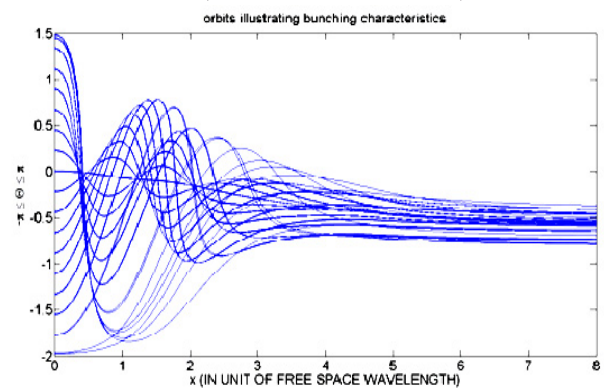
شکل ۱۴. اثر کاهش شدت میدان اولیه بر آهنگ افزایش سرعت فاز.



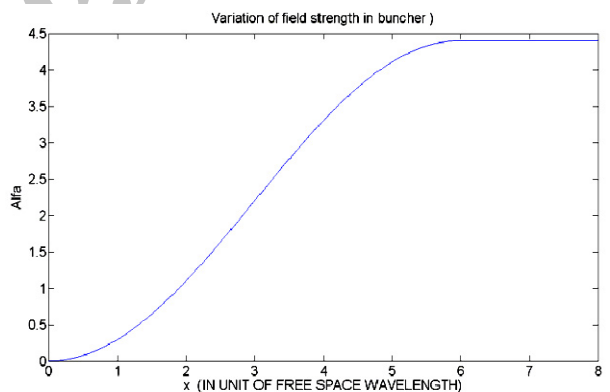
شکل ۱۲. جابه‌جا نشدن خوشه الکترون‌ها و حفظ فاز متوسط.



شکل ۱۵. تغییرات فاز الکترون‌ها در طول خوشه ساز.



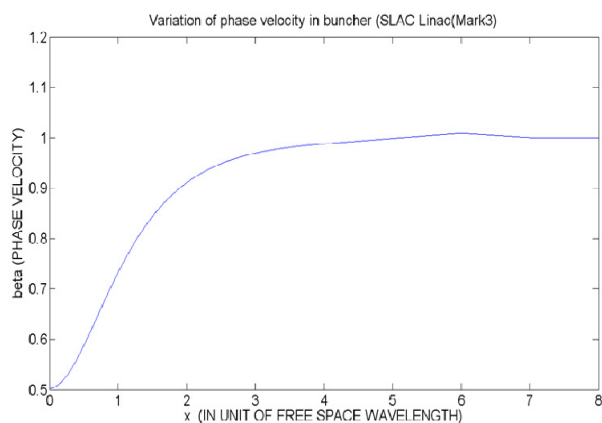
شکل ۱۳. شدت میدان از مقدار اولیه صفر آغاز شده است.



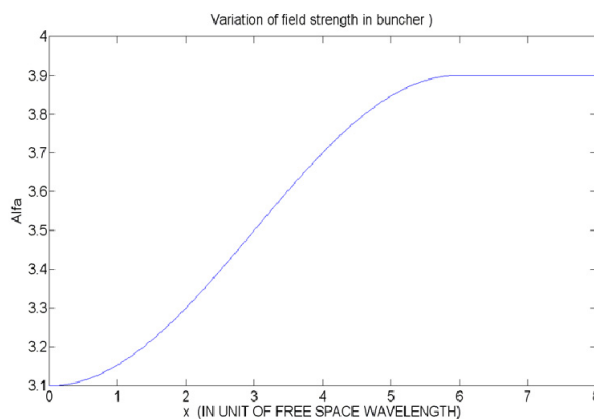
حالت نزدیک کردن خوشه به فاز $-\pi/2$ است.

مقدار اولیه $0/4$ شروع می‌شد از مقدار صفر شروع گردد. شکل ۱۳ شدت میدان مورد نظر را نشان می‌دهد. در این صورت، با توجه به رابطه‌ای که بین شدت میدان و سرعت فاز وجود دارد، $\beta_{\omega}(\xi)$ با آهنگ آهسته‌ای شروع به افزایش می‌کند. شکل ۱۴ اثر کاهش میدان بر روی سرعت فاز را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ که شبیه‌سازی تغییرات فاز الکترون‌ها در این حالت است، نشان می‌دهد که کاهش شدت میدان اولیه باعث افزایش گستره ورودی نسبت به حالت قبلی شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که گستره اولیه نسبت به حالت قبلی افزایش داشته است و ابتدای خوشه‌ساز الکترون‌ها هیچ تغییر فازی نداشته‌اند. چنانچه شدت میدان از ابتدا مقدار بزرگی را داشته باشد، تغییرات سرعت فاز بزرگ خواهد بود و $\beta_{\omega}(\xi)$ به سرعت به مقدار یک خواهد رسید. در خوشه‌سازهایی که طول کوتاه‌تر دارند، از این حالت استفاده می‌شود. در شکل ۱۶

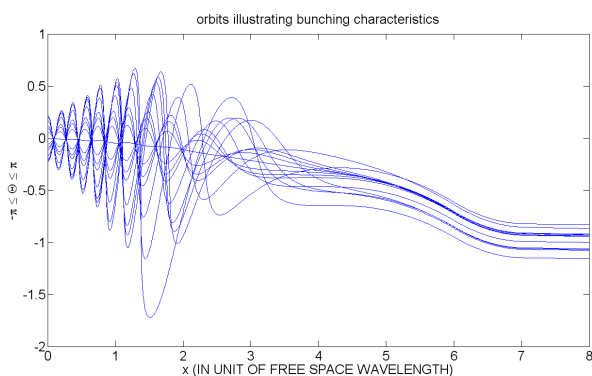
چنانچه شدت میدان در ابتدای خوشه ساز کم بوده و سرعت فاز به نرمی شروع به افزایش کند، فرصت کافی برای گیراندازی الکترون‌ها وجود خواهد داشت و گستره ورودی افزایش پیدا خواهد کرد. برای بررسی این حالت در نظر می‌گیریم که شدت میدان در نظر گرفته شده در خوشه‌ساز که تا کنون، از



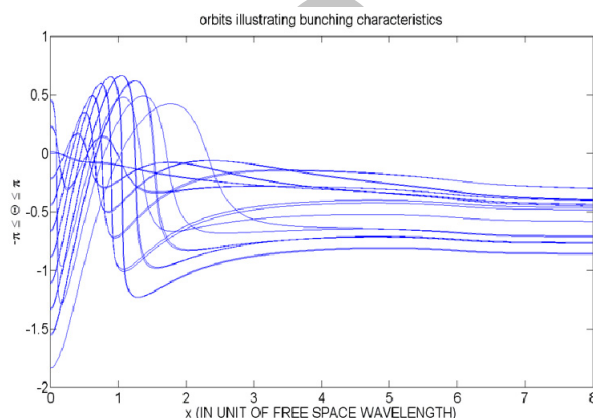
شکل ۱۷. تغییرات سریع سرعت فاز.



شکل ۱۶. شدت میدان بزرگ در ابتدا ی خوشه ساز.



شکل ۱۹. تغییرات فاز الکترون‌ها در ولتاژ تفنگ ۱۰ kV.



شکل ۱۸. گستره اولیه کم الکترون‌ها در شدت میدان‌های اولیه زیاد.

فاز را تغییر می‌دهد. افزایش ولتاژ تفنگ، زیاد شدن گستره ورودی را در بر خواهد داشت و برعکس. برای بررسی این موضوع ولتاژ تفنگ الکترونی را در دو مرحله تغییر دادیم تا اثر تغییر این پارامتر را به تنهایی بررسی کنیم. در حالت اول ولتاژ تفنگ ۱۰ کیلو ولت در نظر گرفته شده است. شکل ۲۰ تغییرات فاز الکترون‌ها در طول خوشه‌ساز را در این حالت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ولتاژهای کوچک گستره ورودی به مراتب کمتر شده است.

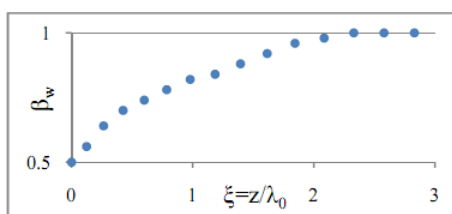
در حالت بعدی ولتاژ تفنگ ۱۵۰ کیلو ولت در نظر گرفته شده است. شکل ۲۰ تغییرات فاز الکترون‌ها در طول خوشه‌ساز را در این حالت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ گستره ورودی نیز بزرگتر می‌گردد. نتایج فوق، انتخاب یک تفنگ الکترونی با ولتاژ پایدار را با اهمیت نشان می‌دهد.

شدت میدان در ابتدا مقدار بزرگی دارد. شکل ۱۷ تغییرات سریع سرعت فاز در این حالت را نشان می‌دهد. خوشه‌سازهای از این نوع (طول کوتاه) که کاربرد زیادی در شتابدهنده‌های خطی جریان بالا دارند، گستره ورودی کوچکی خواهند داشت. شکل ۱۸ گستره ورودی و تغییرات سرعت فاز الکترون‌ها در این حالت را نشان می‌دهد.

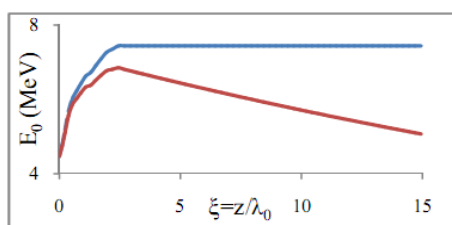
تاکنون، ولتاژ در نظر گرفته شده برای تفنگ الکترونی شتابدهنده برابر ۸۰ کیلو ولت بود. ولتاژ تفنگ نقش مهمی در میزان گامای اولیه دارد. در نتیجه بر روی سازو کار خوشه ساز نیز موثر است. زمانی که تغییرات سرعت فاز سریع باشد، ولتاژ تفنگ مقدار بزرگی دارد و در تغییرات آرام سرعت فاز ولتاژ تفنگ نیز مقدار کوچکی دارد. ولتاژ تفنگ الکترونی اندازه اولیه سرعت

جدول ۲. مشخصات باریکه در خوشه‌ساز طراحی شده.

مقدار	کمیت
۲۴۴ درجه	گستره فاز اولیه
۱۵ درجه	گستره فاز نهایی
۱۶/۲	ضریب خوشه‌سازی
۱/۴۴ مگا الکترون‌ولت	انرژی الکترون‌های خروجی



شکل ۲۱. سرعت فاز در طول خوشه‌ساز طراحی شده.



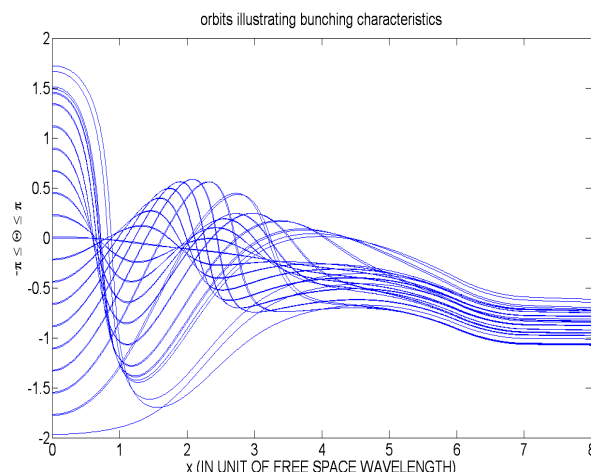
شکل ۲۲. شدت میدان در طول خوشه‌ساز و بعد از آن (طول خوشه-ساز، قسمت‌های ابتدایی تا واحد ۳ است).

آنها به شکل تغییرات سرعت فاز و شدت میدان در طول خوشه‌ساز بستگی دارد.

طی شبیه‌سازی‌های مختلف، مناسب‌ترین تغییرات برای سرعت فاز و شدت میدان در طول خوشه‌ساز محاسبه شدند که به وسیله آنها می‌توان به خوشه‌سازی با مشخصات باریکه آورده شده در جدول ۲، دست یافت.

شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به ترتیب شدت میدان و سرعت فاز طراحی شده برای خوشه‌ساز مورد نظر و شکل ۲۳ نیز تغییرات فاز الکترون‌ها در طول آن را نشان می‌دهند. در مراجع [۶ و ۷] جزئیات بیشتری در رابطه طراحی آورده شده است.

پس از یافتن تغییرات مناسب سرعت فاز و شدت میدان الکتریکی که نتایج خوشه‌سازی مطلوبی را به دست داد، ابعاد خوشه‌ساز باید به گونه‌ای طراحی شوند که چنین تغییراتی را



شکل ۲۰. تغییرات فاز الکترون‌ها در ولتاژ تفنگ ۱۵۰ kV.

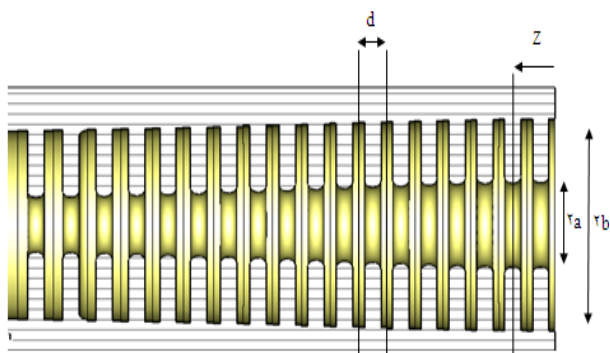
جدول ۱. مشخصات خوشه‌ساز مورد نظر.

کمیت	مرجع [۳]	شتاب‌دهنده مورد نظر
طول خوشه‌ساز	۸۰ سانتی متر	۳۰ سانتی متر
سرعت فاز اولیه	۰/۵	۰/۳۹
توان RF تزریقی	۱۲ مگاوات	۲ مگاوات
فرکانس موج RF	۲۸۸۶ مگاهرتز	۲۹۹۷/۹۲ مگاهرتز

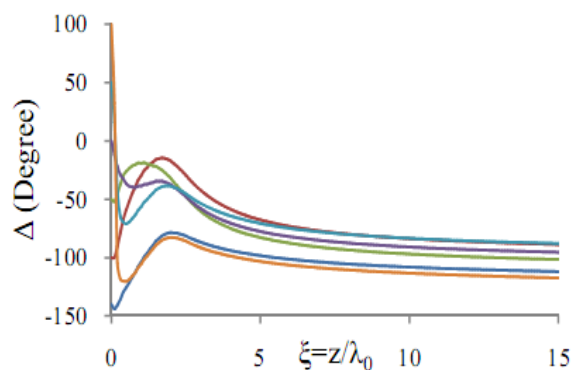
در بخش‌های قبلی، مبانی طراحی خوشه‌ساز و عوامل مؤثر در آن بررسی شدند. در ادامه با انتخاب روش به کار رفته در طراحی خوشه‌ساز مرجع [۳]، نحوه اعمال تصحیحات لازم جهت تطبیق طراحی آن خوشه‌ساز با مشخصات خوشه‌ساز مورد نظر در این پژوهش، مشخص شد. جدول ۱ مشخصات نهایی خوشه‌ساز مورد نظر و تفاوت‌های آن با خوشه‌ساز مرجع [۳] را نشان می‌دهد. این مشخصات با توجه به امکانات در دسترس این پروژه نظیر لامپ توان بالای مایکروویو، تفنگ الکترونی در دسترس و نیز محدودیت‌های مکانیکی ساخت انتخاب شده‌اند.

همان‌طور که در بخش ۵ توضیح داده‌شد، در طراحی ابعاد خوشه‌ساز، به طور کلی سه پارامتر d ، a و b نیاز است:

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



شکل ۲۴. ابعاد کاواک‌ها در خوشه‌ساز.



شکل ۲۳. تغییرات فاز الکترون در طول خوشه‌ساز طراحی شده.

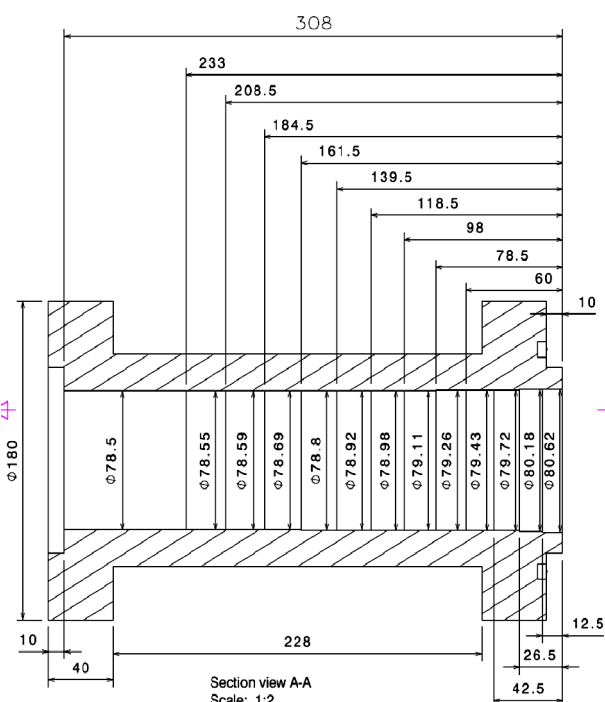
پیچیده‌تر از کاواک‌های یک تیوب ساده بارگذاری شده با صفحه (نظیر تیوب اصلی شتاب‌دهنده) می‌باشد.

بر این اساس خوشه‌ساز باید از یک تیوب استوانه‌ای ساخته شود. داخل این تیوب صفحه‌هایی با روزنه‌هایی که به طور متوالی باریک می‌شوند، قرار می‌گیرند. فاصله صفحه‌ها از یکدیگر نیز برابر نبوده و شعاع موجبر استوانه‌ای نیز تغییر می‌کند. دقت این ابعاد بسیار مهم است، بنابراین لازم است تا از روشی مناسب استفاده شود.

برای ساخت خوشه‌ساز در این پروژه، ابتدا نمونه‌ای آلومینیومی ساخته و برش داده شد. سپس با استفاده از روش اندازه‌گیری دقیق CMM، ابعاد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان می‌دهند که روش انتخابی که در آن ابتدا تیوب به صورت پله‌ای ساخته شده و آنگاه دیسک‌ها در داخل آن قرار گیرند، دقت خوبی را دست خواهد داد. شکل ۲۶ نمونه آلومینیومی ساخته شده را نشان می‌دهد که دقت ساخت آن تا حد ۰/۰۲ میلی‌متر به دست آمده است.

پس از اطمینان از دقت روش ساخت، استوانه اصلی خوشه‌ساز که جهت بالا بودن هدایت الکتریکی و ضریب کیفیت باید از جنس مس با خلوص بالا باشد، ساخته شد. شکل ۲۷ استوانه ساخته شده برای خوشه‌ساز را نشان می‌دهد که داخل آن کاملاً صیقلی شده است.

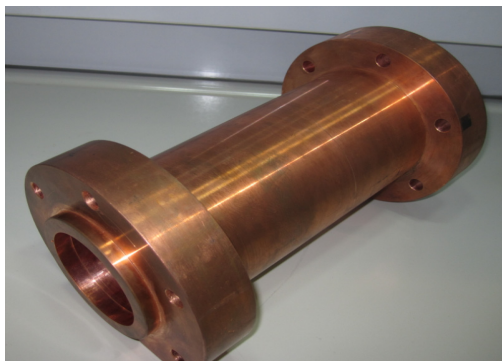
در مرحله بعدی لازم بود تا صفحه‌ها متناسب با ابعاد به دست آمده برای قطر و فاصله آنها در داخل استوانه قرار گیرند. برای این منظور صفحه‌های کاواک‌های خوشه‌ساز را



شکل ۲۵. نقشه و ابعاد نهایی خوشه‌ساز طراحی شده

در عمل و به طور فیزیکی در داخل خوشه‌ساز ایجاد نماید. شکل ۲۴ کمیت‌های ابعاد کاواک‌ها در خوشه‌ساز را که باید به دست بیایند، نشان می‌دهد.

در مراجع [۳] و [۷] روابط ریاضی نسبتاً پیچیده میان کمیت‌های سرعت فاز و شدت میدان با ابعاد کاواک‌های خوشه‌ساز به خوبی تشریح شده‌اند. پس از انجام این محاسبات، ابعاد نهایی خوشه‌ساز مورد نظر به دست آمد که شکل ۲۵، نقشه نهایی آن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، کاواک‌های خوشه‌ساز



شکل ۲۷. استوانه نهایی خوشه‌ساز.



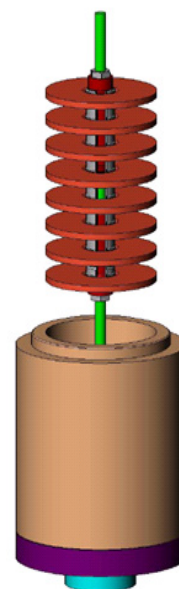
شکل ۲۶. نمونه ساخته شده برای اندازه‌گیری دقت ساخت.



شکل ۲۹. خوشه‌ساز ساخته شده به همراه سایر اجزاء.

آورده و در جای خود ثابت می‌ماند. شکل ۲۹، خوشه‌ساز ساخته شده به همراه سایر اجزای محفظه اصلی شتابدهنده (تیوب اصلی شتابدهی و کوپلرهای تزریق RF) را نشان می‌دهد. این قسمت‌ها پس از ساخت سیستم‌های خنک‌سازی و سلونویدهای لازم برای تزریق توان بالای RF برای شتابدهی به الکترون مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

طول خوشه‌ساز، ضریب خوشه‌سازی، گستره نهایی، گستره اولیه



شکل ۲۸. شمایی از آزمایش مونتاژ صفحه‌ها در خوشه‌ساز.

که دارای قطر بزرگتری از قطر داخلی لوله استوانه‌ای بودند، پس از تنظیم و نگه‌داری در فواصل مورد نظر، در دمای ازت مایع (تقریباً ۱۹۵- سانتی‌گراد) سرد کرده و لوله استوانه‌ای را نیز توسط سشوار صنعتی گرم کردیم. سرد شدن صفحه‌ها در دمای ازت مایع باعث انقباض آنها و کوچکتر شدنشان می‌شود و گرم کردن لوله نیز باعث انبساط آن می‌گردد. شکل ۲۸ شمایی از آزمایش مونتاژ را نشان می‌دهد. البته لازم است تا قبل از انجام مونتاژ، کلیه قطعات به‌طور کامل شسته شده و با بخار حلال مناسب چربی زدایی گردند.

پس از صرف زمان مناسب مجموعه تقریباً هم دما شده و صفحه‌ها که در داخل استوانه قرار گرفته‌اند به دیواره فشار

با استفاده از نتایج به دست آمده از مطالعه عوامل موثر بر دینامیک باریکه الکترون در طول خوشه‌ساز، طراحی خوشه‌ساز برای شتابدهنده خطی الکترون که در حال ساخت است، انجام شد. بر اساس طراحی انجام شده گستره فاز اولیه ۲۴۴ درجه، گستره فاز نهایی ۱۵ درجه، ضریب خوشه‌سازی ۱۶/۲ و انرژی الکترون‌های خروجی ۱/۴۴ مگا الکترون ولت به دست خواهد آمد.

با استفاده از محاسبه روابط میان کمیت‌های سرعت فاز و شدت میدان با ابعاد خوشه ساز، می‌توان این ابعاد را به گونه‌ای طراحی کرد که چنین تغییراتی را در عمل و به طور فیزیکی در داخل خوشه ساز ایجاد نماید.

پس از یافتن ابعاد، لازم است تا روشی با دقت مناسب برای ساخت به‌کار رود. ساخت یک نمونه آزمایشی و اندازه‌گیری دقیق آن کمک زیادی به ساخت صحیح نمونه نهایی می‌کند. نتایج به دست آمده از ساختن نمونه آزمایشی آلومینیومی، دقت ساخت قطعات در این پژوهش را ۰/۰۲ میلی‌متر نتیجه داده است.

در این مقاله برای ساخت خوشه‌ساز از روش گرم و سرد کردن در موتناژ قطعات استفاده شده است. ساخت خوشه‌ساز مناسب شتابدهنده خطی موج رونده در حال ساخت، منطبق با طراحی انجام شده برای آن، از نتایج این مقاله است.

و جریان تفنگ الکترونی مهمترین پارامترهایی هستند که در طراحی یک خوشه ساز باید مورد توجه قرار گیرند.

تغییرات شدت میدان، تغییرات سرعت فاز و تغییرات ولتاژ تفنگ الکترونی عواملی هستند که بر این پارامترها اثر دارند.

با شبیه‌سازی دینامیک حرکت الکترون در طول خوشه ساز این نتیجه حاصل شد که:

الف) تغییر اندازه سرعت فاز باعث جابه‌جایی فازی الکترون‌ها می‌شود. به نحوی که بهترین شکل سرعت فاز، آن است که پس از خوشه‌کردن الکترون‌ها، باعث رسیدن آنها به فاز (۹۰-)

گردد، تا بیشترین انرژی را دریافت کند. ب) کاهش شدت میدان اولیه باعث افزایش گستره فاز اولیه می‌گردد. زیرا در این صورت فرصت کافی برای گیراندازی الکترون‌ها وجود خواهد داشت و در نتیجه گستره فاز اولیه افزایش پیدا خواهد کرد.

ج) چنانچه شدت میدان از ابتدا مقدار بزرگی را داشته باشد، تغییرات سرعت فاز بزرگ خواهد بود و به سرعت به مقدار یک خواهد رسید. در این صورت گستره فاز اولیه کوچک خواهد شد.

د) ولتاژ تفنگ الکترونی اندازه اولیه سرعت فاز را تغییر می‌دهد. افزایش ولتاژ تفنگ، زیادشدن گستره ورودی را در برخواهد داشت و برعکس.

for *Electron Linear Accelerator*”, Master of Science Thesis, Radiations Application Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (2011).

6. F Ghasemi, “*Designing and Simulation of a Buncher for Electron Linear Accelerator*”, Master of Science Thesis, Radiations Application Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (2009).

7. S H F Ghasemi, “*Design of a Pi, 2 Mode S-Band Low Energy TW Electron Linear Accelerator*”, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain (2011).

1. C J Karzmark, “*Medical Electron Accelerators*”, McGRAW Hill, New York (1993).

2. Pierre M Lapostolle and I Albert Septier, “*Linear Accelerators*”, North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1970).

3. M Chodorowe et al., “*Stanford High-Energy Linear Electron Accelerator (Mark III), The Review of Scientific Instrument*”, **26**, 2 (1955).

4. P Musumeci et al., “*Velocity Bunching Experiment at the Neptune Laboratory, Advance Accelerator Concepts*”, American Institute of Physics (2002).

5. S Zareei, “*Designing and Simulation of a Prebuncher*”