

# افزایش بازدهی کلايسترون چهل پرتوی باند S با استفاده از طراحی به کمک محفظه گروهی و بهینه سازی ساختار

تاریخ دریافت:

۳۱ فروردین ماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۰ خرداد ماه ۱۴۰۳

علی جعفری<sup>۱\*</sup>، یعقوب قانع قره باغ، عماد حمیدی<sup>۲</sup>، سید احمد اشرفی قریه علی<sup>۳</sup>

۱. دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۴. دانشکده سایبری، دانشگاه جامع امام حسین، تهران(ع)، ایران.

## چکیده

امروزه، فشردگی لامپ کلايسترون در کنار داشتن توان و بازدهی بالای خروجی از مهمترین موضوعات مورد توجه شتاب دهنده ها به شمار می رود. کلايسترون های چند پرتوی قابلیت ایجاد توان بالای خروجی، با ولتاژ کاری و طول تعاملی موج با پرتو کمتری نسبت به کلايسترون تک پرتوی دارند و در نتیجه دارای حجم و وزن کمتری نیز خواهند بود. در این مقاله، طراحی و شبیه سازی ناحیه برهمکنش موج با پرتو برای یک لامپ کلايسترون چهل پرتوی در باند S با استفاده از روش استفاده از هارمونیک دوم انجام شده است و افزایش بازدهی، برای اولین بار توسط روش طراحی با محفظه گروهی، معرفی شده است. با توجه به نتایج طراحی، شبیه سازی و سپس بهینه سازی به روش لوکال (Local)، توان خروجی ۱۵ مگاوات در طول برهمکنش ۲۳۸/۸ میلی متر برای فرکانس کاری ۲۸۵۶ مگاهرتز در توان ورودی ۱۳ وات حاصل شده است. راندمان و بهره ساختار به ترتیب برابر ۷۶ درصد و ۶۰/۶۶ دسی بل گردیده است.

واژه های کلیدی: کلايسترون، باند L، چند پرتوی، کاهش طول دسته بندی، توان بالا، بهینه سازی.

## Efficiency enhancement of a 40-beam S-band klystron using clustered cavity design and optimization of the structure

Ali Jafari<sup>\*1</sup>, Yaghoob Qaneh Qarehbagh<sup>2</sup>, Emad Hamidi<sup>3</sup>, Seyed Ahmad Ashrafi gharyehali<sup>4</sup>

1. Ph.d Student, Department of Electrical Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran.

2. Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran.

3. Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

4. Department of Cyber, Imam Hussein University, Tehran, Iran.

### Abstract

Today, the compression of the klystron tube is one of the most important topics for accelerators, along with high output power and efficiency. Multi-beam klystrons have the ability to generate high output power, with lower working voltage and interaction length of the wavelength with the beam than single-beam klystrons, and as a result, they will have less volume and weight. In this paper, the design and simulation of the wave-beam interaction region for a 40-beam klystron tube in S-band has been done using the second harmonic method, and the increase in efficiency has been introduced for the first time by the design method with a clustered cavity. According to the results of design, simulation and then optimization by local method, the output power of 15MW has been achieved in the interaction length of 238.8mm for the working frequency of 2856MHz and the input power of 13W. The efficiency and gain of the structure are equal to 76% and 60.66 dB, respectively.

**Key words:** Klystron, L-band, Multi-beam, Reduce Bunching length, High power, Optimization.

پزشکی، تحقیقاتی و نظامی کاربرد دارند. بازدهی‌های گزارش شده برای کلايسترون‌های توان بالای چند پرتوی باند S که اخیراً توسعه یافته‌اند، تا نزدیکی ۷۰ درصد رسیده‌اند. در زیر به دو نمونه از مهم‌ترین کلايسترون‌های طراحی شده که دارای بهترین عملکرد را داشته‌اند اشاره شده است. شرکت VDBT در روسیه کلايسترونی چند پرتوی در باند S، برای شتاب دهنده‌ها در سال ۲۰۱۹ تولید کرده است [۷]. این کلايسترون از یک روش جدید به نام BAC استفاده کرده و به افزایش کارایی قابل توجهی دست یافته است که راندمانی بیشتر از ۶۴ درصد و توانی بیشتر از ۶.۴ مگاوات دارد. همچنین کلايسترون دیگری در باند S با توان خروجی ۱۲/۶ مگاوات با بازدهی زیر ۷۰ درصد توسط آقای لین در سال ۲۰۲۳ طراحی گردیده است [۸]. کلايسترون معرفی شده در این مقاله در راستای بهبود بازدهی و توان خروجی با حفظ طول کم برای لامپ کلايسترون، طراحی گردیده است که برای اولین بار بازدهی ۷۶ درصدی با توان خروجی ۱۵ مگاوات دارد که با استفاده از محفظه گروهی طراحی گردیده است.

## ۲- تاثیر محفظه گروهی بر روی دسته‌بندی پرتوهای

### الکترونی

با توجه به اینکه برای اولین بار در این مقاله به منظور افزایش بازدهی لامپ کلايسترون در طراحی ناحیه دسته‌بندی الکترون‌ها، از رزوناتور محفظه گروهی بهره برده شده است، بنابراین در این بخش به تفاوت تاثیر این رزوناتور با رزوناتورهای ساده پرداخته شده است. دسته‌بندی الکترون‌ها در تشدیدکننده محفظه گروهی، توسط چند محفظه کوتاه که فاصله بسیار نزدیکی با همدیگر دارند و همگام با یکدیگر عمل می‌کنند، انجام می‌شود. فاصله بین شکاف محفظه‌ها در تشدیدکننده محفظه گروهی، باید به قدری به همدیگر نزدیک شوند تا جفت‌شدگی قابل ملاحظه‌ای بین آن‌ها شکل نگیرد. فرکانس تشدید محفظه‌ها در محفظه گروهی می‌تواند شبیه یکدیگر یا متفاوت از همدیگر باشد که اگر فرکانس‌ها متفاوت از همدیگر باشند، باید حتماً همپوشانی داشته باشند. یکی از راه‌های توضیح بهبود بازدهی در رزوناتورهای محفظه گروهی این است که فرض کنیم تمامی محفظه‌ها در فرکانس تشدید یکسان تنظیم شده‌اند و به صورت هماهنگ، دسته‌بندی پرتو را توسط چند محفظه انجام می‌دهند. اگر با دیدگاه مداری به این قضیه نگاه کنیم در تحلیل سیگنال کوچک، ولتاژ دو سر مدار برای تک محفظه نشان داده شده در شکل ۱ (الف) از رابطه (۱) به دست می‌آید [۸].

$$V_S = I \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{Q_S}{1 - j2Q_S \frac{(\omega - \omega_{res})}{\omega_{res}}} \quad (1)$$

منابع انرژی میکروویو اجزای کلیدی هستند که عملکرد شتاب دهنده‌های پرتون را تعیین می‌کنند. توسعه و ساخت منابع توان فشرده برای توسعه سیستم‌های شتاب‌دهنده پرتون بسیار مهم هستند [۱]. برای منبع تغذیه در سیستم‌های شتاب‌دهنده پرتون سنتی، معمولاً از مگنترون‌هایی استفاده می‌کنند که دارای اندازه کوچک‌تر و سبک‌تر هستند. با این حال، مگنترون‌ها توسط تمرکز میدان مغناطیسی و اتلاف گرما محدود می‌شوند و توان خروجی آن‌ها کم است و پیاده‌سازی راهکارهای افزایش توان آن بسیار دشوار است. همچنین نمی‌توان از آن به عنوان منبع انرژی میکروویو در سیستم‌های فشرده شتاب دهنده پرتون استفاده کرد [۲]. منابع تشعشع امواج میکروویوی سنکروترون در حال استفاده یا در حال ساخت بسیاری در جهان وجود دارد. امواج میکروویو با فرکانس ۲۸۵۶ مگاهرتز، عمدتاً به عنوان فرکانس پر کاربرد، توسط شتاب‌دهنده‌های خطی منابع تشعشع سنکروترون در سراسر جهان پذیرفته شده‌اند [۳]. کلايسترون‌ها همیشه منابع اصلی تولید امواج RF با توان بالا در شتاب دهنده‌های ذرات بوده‌اند. توسعه انواع جدید کلايسترون‌ها، کمک‌های بزرگ و مهمی در پیشرفت‌های قابل توجهی در دستیابی به انرژی بالا در شتاب‌دهنده‌های خطی کرده‌اند. پروژه‌ها و پیشنهادات اخیر لیناک‌های ابررسانا با انرژی بالا، نیازمند کلايسترون‌های توان بالا با راندمان بالا (۶۰٪ الی ۷۰٪) و مدت زمان پالس طولانی (به ترتیب ۱ میلی‌ثانیه) هستند [۴، ۵]. بیشترین توانی که توسط یک کلايسترون ارائه می‌شود، توسط ولتاژ حداکثری که تفنگ آن می‌تواند تحمل کند، محدود می‌شود. این محدودیت به این دلیل است که ولتاژ کاتد پایین‌تر (به بیان دقیق‌تر، حداکثر میدان الکتریکی سطحی در ناحیه تفنگ الکترونی) برای اطمینان از عملکرد قابل اعتماد بدون قوس شدن میدان در تفنگ الکترونی یا خرابی در نتیجه ولتاژ بالا، مطلوب است. با علم به این موضوع، در یک کلايسترون تک پرتوی، بهینه‌سازی همزمان توان، ولتاژ و بازدهی خروجی تقریباً غیرممکن است، زیرا افزایش توان خروجی نیازمند افزایش پروینس پرتو الکترونی می‌باشد. همچنین پروینس پرتو الکترونی، همه پارامترهای عملیاتی و حتی حداکثر بازده قابل دستیابی لامپ را تعیین می‌کند [۶]. دانشمندان برای حل این مشکل روش چند پرتوی را پیشنهاد دادند. از روش‌های بسیار موثر و کارآمد برای کوچک‌سازی کلايسترون، استفاده از کلايسترون چند پرتوی است. فناوری کلايسترون چند پرتویی، برای کاهش ولتاژ، حجم و وزن کلايسترون‌های تک پرتوی ایجاد گردیده است. این کلايسترون‌ها به طور گسترده در زمینه‌های

اعمال دسته‌بندی بیشتر می‌باشد و محفظه دوم با فاصله بسیار کمی بعد از آن در جایگاه محفظه سوم قرار داده شده است. هر دو محفظه گروهی در ابتدای مسیر به دلیل فشرده بودن لامپ کلايسترون قرار گرفته‌اند تا فضای کافی برای اعمال تغییر سرعت بیشتر اعمال شده به الکترون‌ها در طول مسیر نتیجه خود را نشان دهد. همانطور که از جدول ۱ قابل مشاهده است، محفظه گروهی اول از دو زیر محفظه هارمونیک اول و همچنین محفظه گروهی دوم از دو زیر محفظه که یکی در هارمونیک دوم و دیگری در هارمونیک اول کار می‌کند، تشکیل شده است. استفاده از محفظه گروهی شامل دو هارمونیک متفاوت، باعث تاثیر همزمان دسته‌بندی بیشتر بر روی هارمونیک اول و دوم شده است به طوری که همزمان می‌تواند هر دو هارمونیک را تقویت کند و همچنین طول مسیر دسته‌بندی را با توجه به کاهش فاصله محفظه‌های موثر، کمتر کرده است.

جدول ۱- مشخصات محفظه‌های لامپ کلايسترون چند پرتوی.

اندازه پارامتر	پارامتر مورد نظر
۲۸۵۶	فرکانس کاری (MHz)
۱۵	توان (MW)
۸۷	ولتاژ (KV)
۲۲۸	جریان (A)
بالای ۷۰	بازدهی (%)
۶۰	بهره (dB)
۴۰	تعداد پرتو

با توجه به لامپ‌های گزارش شده در بخش معرفی، مقدار میکروپروپروپنس در محدوده ۰/۲ در نظر گرفته شده است. در این صورت، با در نظر گرفتن ولتاژ کاری ۸۷ کیلوولت برای پرتوها و ۰/۲ برای پروپنس، جریان هر پرتو طبق رابطه (۳) تقریباً برابر ۵/۷ خواهد بود که جریان کل برای ۴۰ پرتو برابر ۲۲۸ آمپر می‌باشد.

$$I = PV^{3/2} \quad (3)$$

بنابراین توان تفنگ الکترونی از رابطه (۴) برابر ۱۹/۸۴ مگاوات خواهد بود.

$$P_{DC} = VI \quad (4)$$

در این صورت به ازای بالای ۷۰ درصد توان خروجی طبق رابطه (۵) بزرگتر از ۱۳/۸۸ مگاوات خواهد شد.

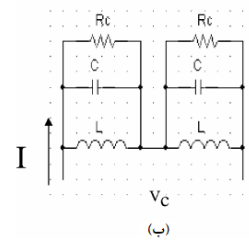
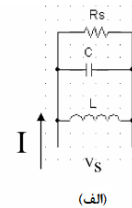
$$P_{out} = \eta \times P_{DC} \quad (5)$$

در ادامه خواهیم دید با روش بکار برده شده، بازدهی ۷۶ درصد با توان خروجی ۱۵ مگاوات حاصل گردیده است. در این مقاله از محفظه‌های هارمونیک‌های دوم در طراحی برای افزایش بازدهی و کمتر کردن طول ناحیه برهمکنش لامپ، استفاده شده است و سپس توسط

$Q_s$  ضریب کیفیت مدار و  $\omega_{res}$  فرکانس رزونانس مدار است. برای  $m$  محفظه در رزوناتور محفظه گروهی (برای دو محفظه در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است) ولتاژ محفظه‌ها به صورت سری با هم جمع می‌شوند و ولتاژ کل حاصل طبق رابطه (۲) به دست می‌آید [۸].

$$V_s = I \sqrt{\frac{L}{C} \frac{mQ_c}{1 - j2Q_c \frac{(\omega - \omega_{res})}{\omega_{res}}}} \quad (2)$$

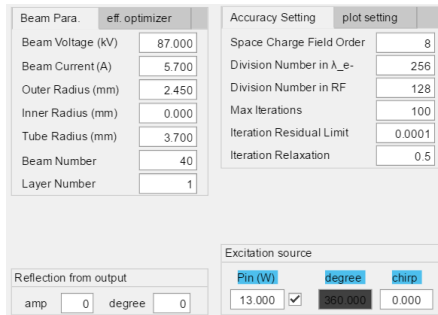
$Q_c$ ، ضریب کیفیت برای هر کدام از محفظه‌ها در رزوناتور محفظه گروهی است. برای اثبات افزایش ولتاژ دسته‌بندی پرتو می‌توانیم از دیدگاه مداری به این قضیه نگاه کنیم. بنابراین، دو محفظه یکسان با تک محفظه برای محفظه گروهی، دارای دو امپدانس سری که هر کدام با امپدانس تک محفظه برابر هستند خواهیم داشت. در نتیجه امپدانس شکاف محفظه گروهی دو برابر امپدانس شکاف تک محفظه می‌باشد. در دیدگاه مداری امپدانس بزرگتر در جریان یکسان، میزان ولتاژ بزرگتری ایجاد می‌کند که نتیجه می‌گیریم، ولتاژ دسته‌بندی بیشتر می‌شود. همچنین از رابطه (۱) و (۲) نیز مشخص است که در پارامترهای یکسان نسبت ولتاژ دسته‌بندی محفظه گروهی با  $m$  زیر محفظه به تک محفظه، با تعداد زیر محفظه برابر است.



شکل ۱- مدار معادل تشدیدکننده، (الف) تک محفظه و (ب) محفظه گروهی.

### ۳- روش طراحی

همانطور که از تحقیقات انجام شده [۹] ملاحظه می‌شود، دستیابی به بازده بیش از ۷۰ درصد لبه تکنولوژی محسوب می‌شود و در چند سال اخیر است که نمونه‌هایی از لامپ‌های چند پرتوی با تعداد پرتو و بازده بالا معرفی شده‌است [۱۰]. پارامترهای اصلی مخابراتی لامپ مورد نظر در جدول ۱ آورده شده است. برای طراحی این لامپ از هشت محفظه استفاده شده است که دوتای آن از نوع محفظه گروهی می‌باشند. محفظه گروهی اول در ابتدای دسته‌بندی برای

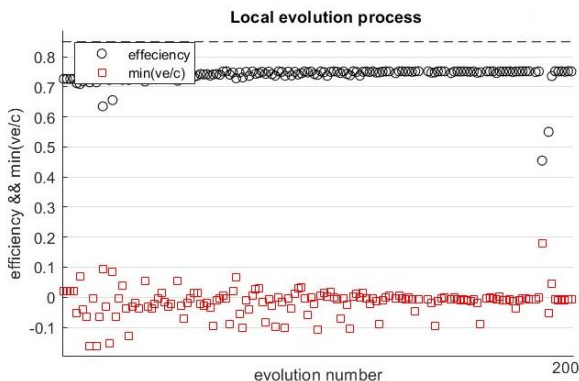


شکل ۵- پارامترهای ورودی در نرم افزار KlyC.

گروهی ها به صورت جداگانه مشخص شده است. قابل ذکر است که مشخصات فرکانسی و مقدار R/Q محفظه‌ها از نرم افزار CST محاسبه شده است. نتایج وارد شده در جدول ۲ بعد از بهینه‌سازی بازدهی خروجی توسط بهینه‌ساز Local در نرم افزار KlyC حاصل شده است که در شکل ۶ نمودار بهینه‌سازی نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می‌کنید، بازدهی از ۷۳ درصد طراحی اولیه شروع شده و به سمت ۷۶ درصد همگرا شده است. قابل ذکر است که این نمودار بازدهی Eff.BI (به شکل ۷ مراجعه کنید) را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات محفظه‌های لامپ کلاسترون چند پرتوی.

محفظه	هارمونیک	فرکانس (MHz)	R/Q	Z (mm)
۱	اول	۲۸۶۰	۱۱/۸۳	۷/۲۱
	اول	۲۸۶۰	۱۱/۸۳	۷/۲۱
۲	اول	۲۸۵۱/۳	۱۱/۷۲	۴۷/۹۱
	دوم	۵۶۹۱/۳	۳/۳۴	۸۹/۳۴
۳	اول	۲۹۱۳/۷	۱۱/۴۶	۱۲۲/۰۶
	دوم	۵۶۹۵	۳/۲۶	۱۵۲/۲۶
۴	اول	۳۰۹۷	۱۱/۳۸	۱۸۲/۱۲
	اول	۳۱۰۰/۹	۱۱/۳۵	۲۰۲/۳۲
۵	دوم	۵۶۰۸	۳/۰۱	۲۳۷/۸۷
	اول	۲۸۵۲/۲	۱۱/۷۵	



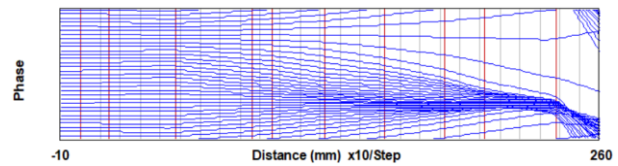
شکل ۶- نمودار خروجی حاصل از بهینه‌سازی با روش Local، شکل دایره نشان دهنده بازدهی و مربع برای سرعت الکترون که نرمالیزه شده با سرعت نور است، می‌باشد.

نتایج حاصل خروجی از شبیه‌سازی لامپ کلاسترون ۴۰ پرتوی در شکل ۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌کنید که بازدهی بالای ۷۶

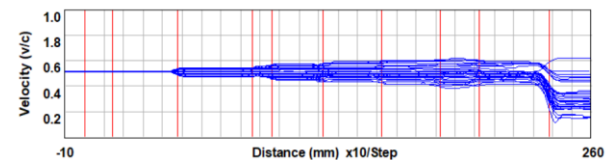
بهینه‌سازی با روش Local در نرم افزار KLYC، پارامترهای طراحی برای به دست آوردن بیشیه مقدار خروجی، بهینه شده‌اند. استفاده از محفظه گروهی در طراحی ناحیه برهمکنش برای اولین بار در این مقاله به منظور افزایش بازدهی استفاده شده، در صورتی که همیشه معمولاً در محفظه آخر برای افزایش پهنای باند به کار برده شده است.

## ۴- نتایج و بحث

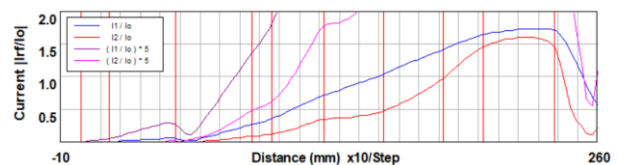
در این قسمت نتایج حاصل از طراحی ذکر شده با توجه به رابطه‌های ذکر شده در قسمت قبلی نشان داده شده‌است. برای صحت سنجی طراحی، ساختار در دو نرم افزار AjDisk و KlyC به صورت یک بعدی و دو بعدی شبیه‌سازی شده و مقایسه گردیده است. برای کلاسترون طراحی شده، مقدار ولتاژ پرتو برابر ۸۷ کیلوولت و جریان پرتو برای ۵/۷ آمپر می‌باشند. در شکل‌های ۲ تا ۴ به ترتیب نمودار فاز پرتو الکترونی، سرعت الکترون‌ها و نسبت جریان در طول مسیر به جریان اولیه حاصل از پیاده سازی لامپ طراحی شده در نرم افزار AjDisk نشان داده شده است. بازدهی خروجی برابر ۸۲/۲۳ درصد و توان خروجی ۱۵/۴۱ مگاوات حاصل گردیده است.



شکل ۲- دیاگرام فاز الکترون‌ها در داخل ناحیه تعاملی موج با پرتو الکترونی



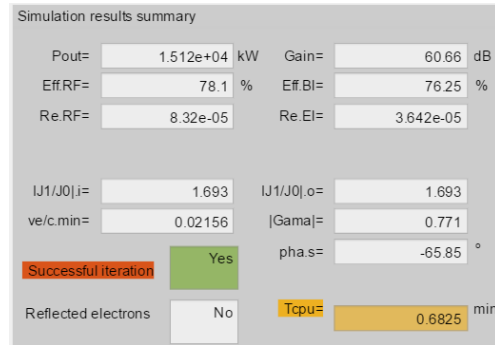
شکل ۳- نسبت سرعت پرتو به سرعت نور بر حسب طول لامپ.



شکل ۴- نسبت جریان هارمونیک‌ها به جریان اولیه، بر حسب طول لامپ

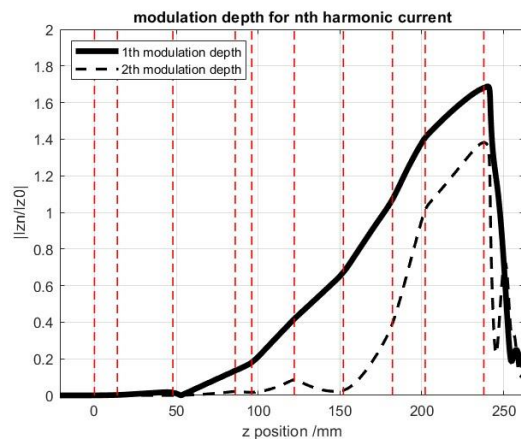
در شکل ۵ مقادیر ورودی برای تعداد ۴۰ پرتوی وارد شده در قسمت Beam Number در نرم افزار KlyC قابل مشاهده است. پارامترهای ورودی حاصل از طراحی برای محفظه‌های لامپ کلاسترون در جدول ۲، قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به داده‌ها، طول ناحیه برهمکنش موج RF با پرتو الکترونی برابر با ۲۳۷/۸۷ میلی‌متر می‌باشد. در جدول ۲ مشاهده می‌کنید که محفظه‌های اول و سوم از نوع محفظه گروهی می‌باشند. فرکانس و هارمونیک زیرمحفظه‌های در هر کدام از محفظه

درصد و توان خروجی بالای ۱۵ مگاوات حاصل گردیده است. گین به دست آمده برابر با ۶۰/۶۶ دسی بل می باشد.



شکل ۷- نتایج خروجی شبیه سازی در نرم افزار KlyC.

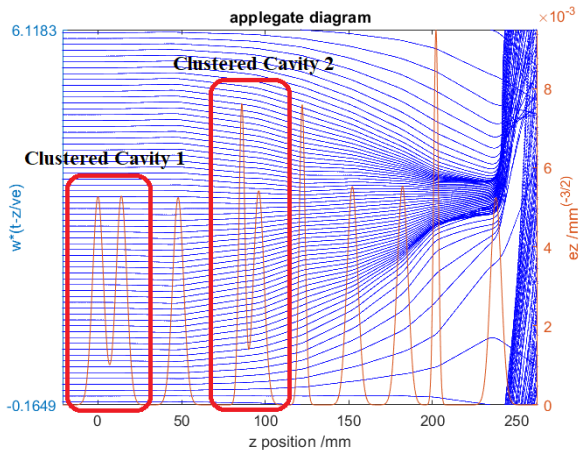
نمودارهای خروجی حاصل از طراحی لامپ کلاسترون ۴۰ پرتوی برای درک بهتر از نحوه دسته بندی الکترون ها و موقعیت محفظه ها در طول لامپ در شکل های ۱۰-۸ نشان داده شده اند. در شکل ۸، مقایسه جریان هارمونیک های مختلف ایجاد شده در لامپ را نشان می دهد. محفظه ها، باید طوری تنظیم شوند که بیشترین مقدار به ترتیب هارمونیک ها از اول به آخر، در خروجی ظاهر گردند تا بتوانیم بیشترین بازدهی را داشته باشیم. ساختار طوری طراحی شده است که ابتدا هارمونیک اول و سپس هارمونیک دوم در بیشینه ترین حالت خود قرار داشته باشد.



شکل ۸- نسبت جریان هارمونیک های مختلف به جریان اولیه، بر حسب طول لامپ

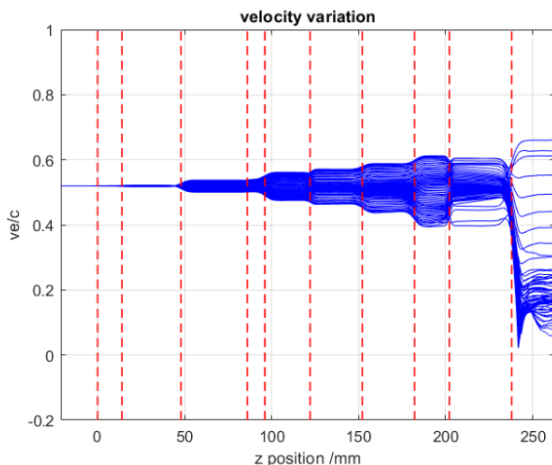
شکل ۹، هسته دسته بندی الکترون ها و نحوه ملحق شدن الکترون های خارج هسته به داخل هسته را نشان می دهد. ساختار طراحی هر چقدر بتواند الکترون های بیشتری به داخل هسته اضافه کند، لامپ طراحی شده، بازدهی بیشتر خواهد داشت. ایده آل ترین ساختار، ساختاری است که تمام الکترون ها در داخل هسته دسته بندی باشند. در شکل ۹ ملاحظه می کنید شیب ملحق شد الکترون ها بعد از اعمال محفظه های گروهی افزایش یافته است که باعث می شود الکترون های کناری با سرعت بیشتری به داخل هسته دسته بندی ملحق شوند. بنابراین در لامپ های فشرده، هرچه قدر در ابتدای ناحیه از محفظه گروهی استفاده

شود بهتر است. با توجه به اینکه محفظه گروهی توانایی این را دارد که باعث می شود فاز الکترون ها با شیب بیشتری به سمت مرکز دسته بندی الکترون ها تمایل پیدا کنند. بنابراین هر چقدر الکترون های خارج از هسته، شیب بیشتری داشته باشند، با سرعت بیشتری به سمت هسته حرکت می کنند و این سرعت در کلاسترون های با طول لوله رانش کوتاه یک مزیت به حساب می آید. چون لامپ مورد نظر ما برای طول های کوتاه تر طراحی می گردد، با استفاده از محفظه گروهی به نتایج بهتری توانسته ایم برسیم.



شکل ۹- دیاگرام فاز مربوط به ساختار دسته بندی الکترون ها در داخل ناحیه تعاملی موج با پرتو الکترونی

در شکل ۱۰، تغییرات سرعت الکترون ها در طول مسیر تعاملی موج با پرتو، نشان داده شده است. از روی شکل، سرعت اولیه پرتو الکترونی نسبت به سرعت نور، نزدیک ۰/۵۵ می باشد که در ادامه با تغییرات سرعت توسط محفظه ها؛ سرعت الکترون ها در انتهای مسیر بین صفر تا ۰/۶۵ تغییر می کند که بیشتر الکترون ها سرعت کمتر از ۰/۲ دارند و یعنی تقریباً بیشتر انرژی آن ها در محفظه آخر گرفته شده است. برای مشاهده میزان بهبود بازدهی طراحی این مقاله با طراحی های انجام شده اخیر، مقایسه خروجی لامپ ها در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نسبت سرعت پرتو به سرعت نور بر حسب طول لامپ برای کلاسترون ۴۰ پرتوی.

## ۶-مراجع

- [1] M. Durante, J. Debus, and J. S. Loeffler, "Physics and biomedical challenges of cancer therapy with accelerated heavy ions," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, no. 12, pp. 777-790, 2021.
- [2] J. Grillenberger, C. Baumgarten, and M. Seidel, "The high intensity proton accelerator facility," *SciPost Physics Proceedings*, no. 5, p. 002, 2021.
- [3] X. Lin *et al.*, "Design and simulation of an S-band compact multi-beam klystron," *AIP Advances*, vol. 13, no. 11, 2023.
- [4] Z.-c. Zhang, B.-l. Shen, C.-j. Fu, X.-j. Yu, F. Zhang, and Y.-p. Huang, "18.5: Development of an S-band, 200 MHz instantaneous bandwidth, 22 kW average power klystron," in *2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2010: IEEE, pp. 437-438.
- [5] C. Marrelli, M. Jensen, A. K. Bhattacharyya, and S. Calic, "Optimisation of klystron operational efficiency at ESS," *Vacuum*, vol. 220, p. 112804, 2024.
- [6] Y. Ding, D. K. Abe, B. Shen, D. Gao, and H. Ding, "An Overview of Multibeam Klystron Technology," *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023.
- [7] R. Egorov, I. Guzilov, O. Y. Maslennikov, and V. Savvin, "BAC-klystrons: A new generation of klystrons in vacuum electronics," *Moscow University Physics Bulletin*, vol. 74, pp. 38-42, 2019.
- [8] Y. Miao, T. M. Antonsen, G. S. Nusinovich, A. N. Vlasov, H. Guo, and V. L. Granatstein, "Prebunching of electrons in harmonic-multiplying cluster-cavity gyro-amplifiers," *IEEE transactions on plasma science*, vol. 32, no. 3, pp. 970-980, 2004.
- [9] H. Song, A. Le, and M. Kirshner, "50 MW C-Band Multiple Beam Klystron (MBK) for High Gradient Accelerators [PowerPoint presentation]," Los Alamos National Laboratory (LANL), 2019.
- [10] I. Guzilov, O. Maslennikov, R. Egorov, I. Syratchev, V. Kobets, and A. Sumbaev, "Comparison of 6 MW S-band pulsed BAC MBK with the existing SBKs," in *2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2017: IEEE, pp. 1-2.
- [11] Guzilov, I. *BAC method of increasing the efficiency in klystrons*. in *2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*. 2014. IEEE.

جدول ۳- مقایسه نتایج خروجی‌های طراحی این مقاله با نتایج

طراحی‌های اخیر				
طراحی	ابعاد طراحی	فرکانس (MHz)	بازدهی (%)	توان خروجی
طراحی مقاله	یک بعدی	۲۸۵۶	۸۲/۲۳	۱۵/۴۱
طراحی مقاله	دو بعدی	۲۸۵۶	۷۶/۲۵	۱۵/۱۲
طراحی آقای گازیلوف [۱۱]	یک بعدی	۲۸۵۶	۷۴/۲۶۵۲	۶
طراحی آقای لین [۳]	یک بعدی	۲۵۸۶	۷۰	۱۲/۶

## ۵-نتیجه‌گیری و بحث

کلاسترهای چند پرتوی به منظور کاهش ابعاد، هزینه ساخت لامپ کلاستر و همچنین افزایش بازدهی خروجی لامپ وارد عرصه تکنولوژی ساخت شتابدهنده‌ها گردیده‌اند. ملاحظه کردید که محفظه‌های گروهی علاوه بر داشتن قابلیت افزایش پهنای باند، دارای قابلیت استفاده درست در ناحیه تعاملی برای افزایش بازدهی نیز هستند. قابلیت استفاده از محفظه‌های گروهی به عنوان یک عامل دسته‌بندی کننده قدرتمند تنها به دو زیر محفظه ختم نمی‌شود بلکه در آینده می‌توان محفظه‌های گروهی با محفظه‌های بیشتری برای بهبود کار نیز استفاده کرد.