

## طراحی یک شتاب دهنده‌ی خطی موج ایستا در باند X

محمد برده‌گر\*، حسین فرهنگ، احمدرضا محمد

شرکت فن آوری مقتدر، گروه توسعه‌ی کاربردهای بیم الکترونی

### چکیده

یک ساختار شتاب‌دهنده موج ایستا در باند X طراحی شده است. روند طراحی با انتخاب یک ساختار دوتابویه<sup>۱</sup> برای کارکرد در مود  $\pi/2$  در فرکانس  $9.3\text{GHz}$  آغاز گردید و جهت تحقق حداکثر امپدانس شانت و بیشینه مقدار  $R/Q$  تنظیم و بهینه‌سازی شد. شبیه‌سازی ذرات توسط نرم‌افزار MAGIC نشان می‌دهد که انرژی الکترون‌ها در خروجی به بیش از  $6\text{MeV}$  می‌رسد. این در حالی است که توان ورودی برای این ساختار در حدود  $1.5\text{MW}$  در نظر گرفته شده و توسط مگنترون‌های صنعتی، در این باند فرکانسی قابل تأمین است. همچنین پورت موجبری طراحی شده انرژی را در وسط تیوب شتاب‌دهنده تزریق می‌کند.

کلید واژه: شتاب‌دهنده، موج ایستا، *biperiodic*، باند X، مگنترون، MAGIC

### ۱- مقدمه

پیشرفت شتاب‌دهنده‌ها وابستگی زیادی به منابع تغذیه مایکروویو (تیوب‌های خلأ) دارد. در نتیجه کارکرد بسیاری از شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی در باند فرکانسی S، به علت وجود این تیوب‌های توان بالا در این باند فرکانسی است. با پیشرفت تیوب‌های مگنترون و کلایسترون با توان‌های خروجی چند مگاواتی در باند X، زمینه برای طراحی و تولید شتاب‌دهنده‌ی خطی در این باند فرکانسی مهیا شده است. طراحی ساختار در باند فرکانسی بالاتر، سبب کوچک شدن ابعاد شتاب‌دهنده و نیز سبک شدن آن می‌شود. علاوه براین، در این باند فرکانسی امکان طراحی ساختار با گرادیان بالاتر نیز وجود دارد. در همین راستا، وابستگی برخی پارامترهای طراحی

<sup>۱</sup> Bi-periodic

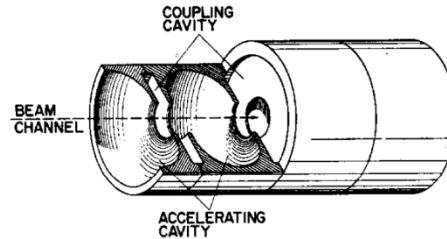
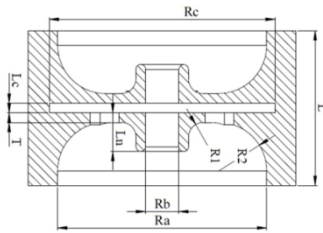
شتاب‌دهنده‌ها به فرکانس، در جدول ۱ گزارش شده است. کاهش وزن و ابعاد در ساختار شتاب‌دهنده‌ها باعث ایجاد تجهیزاتی شده است که قابل حمل هستند. [۲] و [۳] دو نمونه از دستگاه‌هایی هستند که در آن‌ها از شتاب‌دهنده باند X برای بالابردن کارایی آن‌ها استفاده شده است. بدین ترتیب، در ابتدا به طراحی کاواک‌های شتاب‌دهنده در باند X، و سپس بهینه کردن آن ساختار پرداخته می‌شود. در ادامه نیز طراحی تیوب شتاب‌دهنده برای تولید انرژی ۶ MeV توصیف و توسط نرم‌افزار MAGIC شبیه‌سازی می‌شود. جهت افزایش دقت طراحی، تمامی شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی (علی‌رغم زمان‌بر بودن) به صورت سه‌بعدی، توسط نرم‌افزار CST انجام شده است.

جدول ۱- وابستگی پارامترهای طراحی شتاب‌دهنده به فرکانس [۱]

Parameters	Frequency dependence
Shunt impedance per unit length ( $r$ )	$f^{\frac{1}{2}}$
Maximum permissible electric field strength	$f^{\frac{1}{2}}$
RF loss factor ( $Q$ )	$f^{-\left(\frac{1}{2}\right)}$
Power dissipation capability of accelerator structure	$f^{-1}$

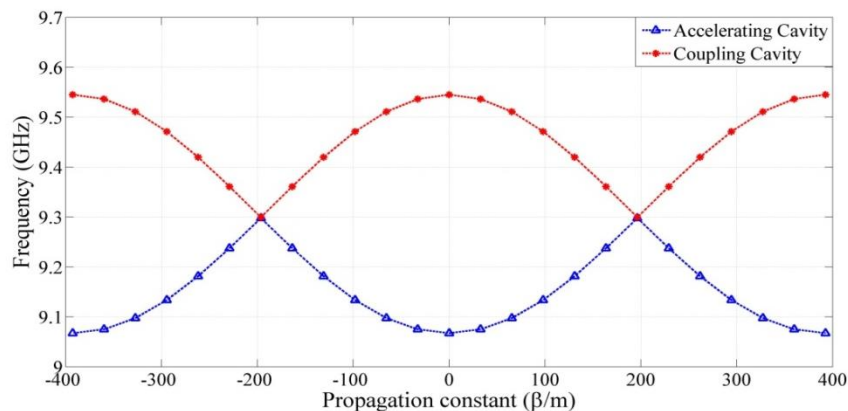
## ۲- طراحی و شبیه‌سازی کاواک در مود $\pi/2$

در شتاب‌دهنده‌های موج ایستا، مود  $\pi/2$  دارای ویژگی‌های خاصی است، که از جمله‌ی آن می‌توان به بالا بودن سرعت گروه (سرعت انتقال انرژی) و تفکیک مود اشاره کرد. توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در این مود به صورتی است که کمترین حساسیت، در فرکانس و دامنه میدان، را نسبت به نواقص ناشی از ساخت ایجاد می‌کند. اما برای افزایش امیدانس شانت از ساختارهای معروف به «دوتناوبه» استفاده می‌کنند. نمونه‌ای از این ساختار در شکل ۱ توصیف شده است. با توجه به برتری‌های بیان شده، برای طراحی از این ساختار استفاده می‌شود. در شکل ۲ یک دوره از کاواک طراحی شده آورده شده است. ابعاد نشان داده شده برای بدست آوردن ماکزیمم مقدار امیدانس شانت، مقدار  $R/Q$  و نیز تنظیم منحنی پاشندگی بهینه شده‌اند. نتایج بهینه‌سازی در جدول ۲ آورده شده است. دو کاواک شتاب‌دهنده و کوپلینگ طوری تنظیم شده‌اند که کمترین باند توقف بین دو منحنی ایجاد شود و نتیجه‌ی آن در منحنی پاشندگی (شکل ۳) قابل مشاهده است.



شکل ۲- هندسه ساختار طراحی شده برای تیوب شتاب‌دهنده

شکل ۱- کاواک‌های ساختار دوتناوبه با کوپلینگ الکتریکی [۴]



شکل ۳- منحنی پاشندگی ساختار دوتناوبه طراحی شده

جدول ۲- پارامترهای بدست آمده برای ساختار بهینه شده

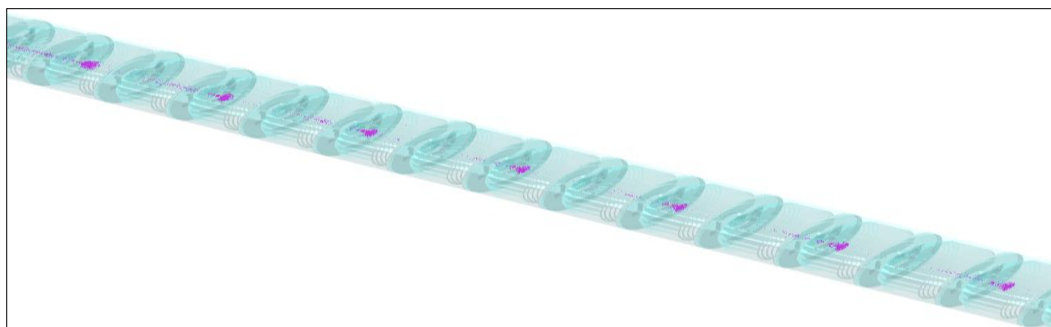
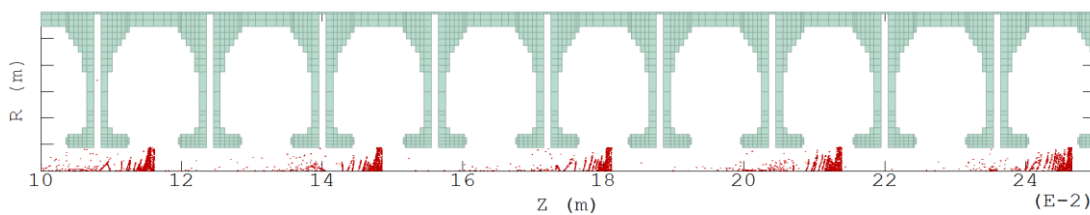
Shunt impedance	۱۳۹.۹ MΩ/m
R/Q	۱۹,۳۵ kΩ/m
Stop-band	۲ MHz
Q	۶۱۰۰
Transient Time factor	۰,۸۵
Bore diameter	۱,۷۵ mm

### ۳- طراحی تیوب شتاب‌دهنده

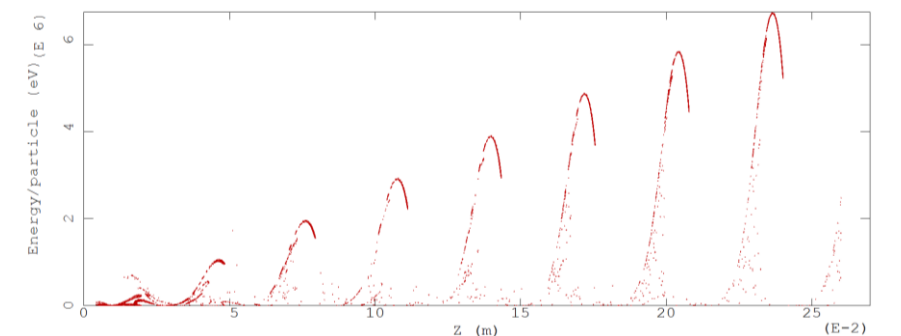
ساختار تیوب شتاب‌دهنده یک ساختار موج ایستا است، که برای انرژی خروجی ۶ MeV طراحی شده است. انرژی الکترون‌ها در هنگام ورود به تیوب شتاب‌دهنده، در خروجی تفنگ الکترونی، ۲۰ keV در نظر گرفته شده است<sup>۱</sup>. با توجه به انرژی ۱,۵ MW تزریق شده در ساختار، برای رساندن سرعت الکترون‌ها به  $\beta \approx 1$ ، چهار کاواک buncher با سرعت‌های ۰/۵ و ۰/۸ در نظر گرفته شده است. ساختار نهایی دارای ۱۹ کاواک

<sup>۱</sup> تفنگ الکترونی طراحی شده دارای قطر بیم الکترونی خروجی کمتر از ۱ mm و ولتاژ ۲۰ kV است.

شتاب‌دهنده و ۱۸ کاواک کوپلینگ است. بعد از یک شبیه‌سازی و طراحی الکترومغناطیسی، برای مشاهده رفتار ذرات در تیوب طراحی شده، از شبیه‌سازی ذرات در حوزه‌ی زمان<sup>۱</sup> در نرم‌افزار MAGIC بهره گرفتیم. شکل ۴ دسته‌بندی ذرات در فاز پایدار را نشان می‌دهد. در شکل ۵ انرژی الکترون‌ها در طول تیوب شتاب‌دهنده نشان داده شده است. طول تیوب شتاب‌دهنده ۲۷۴ mm است و زمان پُر شدن ساختار از انرژی، فقط  $0.52 \mu s$  است.

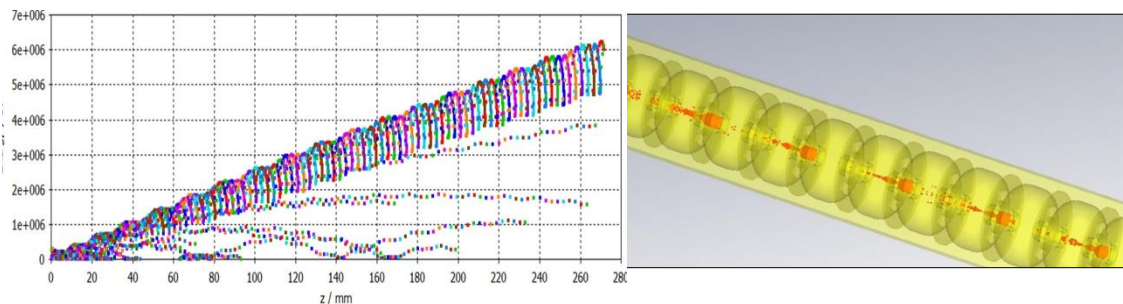


شکل ۴- خروجی نرم‌افزار MAGIC (بالا) نمای دو بعدی  $(r, z)$  (پایین) نمای سه‌بعدی ذرات در راستای طول تیوب



شکل ۵- انرژی ذرات در طول تیوب شتاب‌دهنده

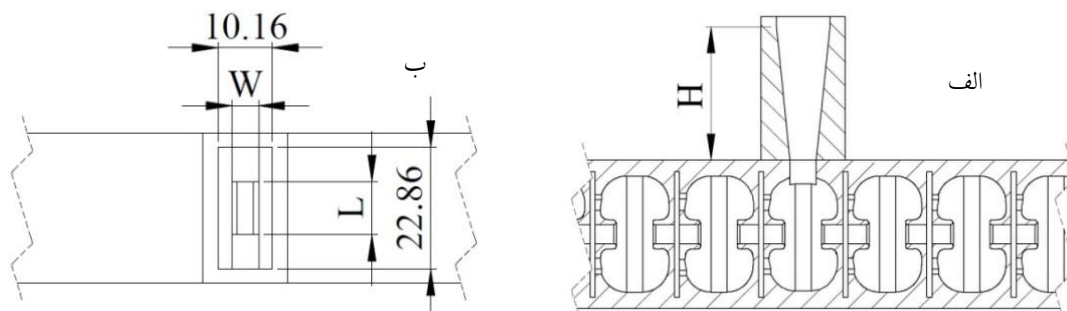
البته شبیه‌سازی ذرات در نرم‌افزار CST نیز به نحوی امکان‌پذیر است. مطابقت خوب نتایج CST با نتایج ارائه شده از نرم‌افزار MAGIC، مؤید عملکرد صحیح شبیه‌سازی ذرات این نرم‌افزار است. نتایج نرم‌افزار CST در شکل ۶ به نمایش گذاشته شده است.



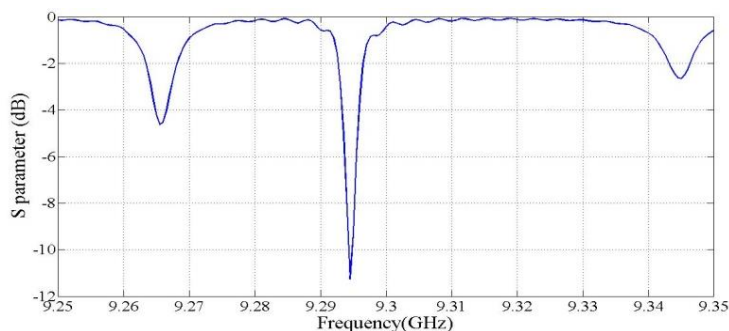
شکل ۶ - خروجی نرم‌افزار CST - (راست) نمای سه بعدی ذرات (چپ) انرژی ذرات در راستای طول تیوب

#### ۴- طراحی کوپلینگ توان مایکروویو

در ساختارهای موج ایستا تنها از یک پورت برای تزریق توان به داخل ساختار استفاده می‌شود. به صورت معمول این پورت به یکی از کاواک‌ها در میانه تیوب شتاب‌دهنده کوپل می‌شود. آنچه در طراحی کوپلر باید بهینه شود مشخصه موج برگشتی از پورت است. با کوپلر پورت به یکی از کاواک‌های شتاب‌دهنده، فرکانس رزونانس تغییر می‌کند. در نتیجه ابعاد کاواک باید برای فرکانس مورد نظر مجدداً بهینه شود. برای این منظور می‌توان مشخصه موج برگشتی را تنها برای یک کاواک در نظر گرفت و ابعاد پورت و کاواک را تنظیم کرد و پس از آن نتایج را برای کل ساختار بررسی کرد. ساختار پورت به همراه کاواک‌های تیوب شتاب‌دهنده در شکل ۷ توصیف شده است. همچنین در شکل ۸ مشخصه موج بازگشتی پورت طراحی شده، آمده است.



شکل ۷- ساختار پورت ورودی به همراه تیوب شتاب‌دهنده (الف) نمای از مقطع (ب) نمای از بالا



شکل ۸ - مشخصه موج بازگشتی پورت ورودی

## ۶- نتیجه گیری

طراحی الکترومغناطیسی یک شتاب دهنده‌ی خطی در باند X توسط نرم‌افزار سه بعدی CST انجام شد. همچنین حرکت و انرژی ذرات توسط نرم‌افزار MAGIC به صورت سه بعدی به نمایش درآمد. در این طرح سعی شده است روند طراحی دقیق و شبیه‌سازی ذرات به گونه‌ای انجام پذیرد تا بتوان ساخت آن را در آینده نزدیک انتظار کشید، البته باید توجه داشت آن چه تمام پارامترهای طراحی را متأثر خواهد کرد، مشخصات توانی منبع میکروویو است. بدین ترتیب اکنون جهت آغاز روند ساخت طرح ارائه شده، بحث در این گروه بر سر منبع میکروویو در دسترس است؛ و در صورت فراهم شدن منبعی با مشخصات پالس توانی متفاوت با آن چه در این مقاله مد نظر بود، ناگزیر روند طراحی از سر گرفته خواهد شد. فارغ از مشخصات توانی منبع میکروویو، آنچه مهم می‌نماید فراهم بودن تمامی زیرساخت‌های لازم برای تحقق بخشیدن به طراحی‌هایی است که کاملاً منطبق با محدودیت‌های فرآیندهای ساخت چنین ادواتی باشد.

مراجع

- [۱] S. M. HANNA, "APPLICATIONS OF X-BAND TECHNOLOGY IN MEDICAL ACCELERATORS", Proceedings of the ۱۹۹۹ Particle Accelerator Conference, New York, ۱۹۹۹
- [۲] M. L. Meurk et al., "The Mobetron: A New Concept for Intraoperative Radiotherapy", ۶th International IORT Symposium, San Francisco, CA (۱۹۹۶).
- [۳] S. G. Chenery et al., "The CyberKnife: Beta System Description and Initial Clinical Results", Journal of Radiosurgery, Vol. ۱, No. ۴, (۱۹۹۸).
- [۴] T. Wangler, "RF LINEAR ACCELERATORS", JOHN WILEY & SONS, New York, ۱۹۹۸