

## طراحی و ساخت سیستم اندازه‌گیری و تنظیم بسامدی کاواک‌های شتاب‌دهنده خطی الکترون موج رونده

ساسان احمدیان نمین<sup>۱</sup>، فرشاد قاسمی<sup>۲</sup>، فریدون عباسی دوانی<sup>۳</sup>، محمد لامعی رشتی<sup>۱</sup>،

مهیار شیرشکن<sup>۱</sup> و مهدی بهرامی<sup>۱</sup>

۱. پژوهشکده ذرات و شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی
۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
۳. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی

### چکیده

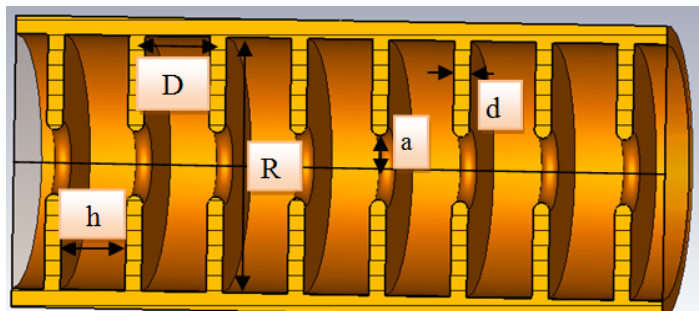
هدف اصلی در طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون با بسامد رادیویی دستیابی به باریکه‌های الکترونی با کیفیت مطلوب‌تر، توان و انرژی بالاتر با صرف توان بسامد رادیویی کمتر است. راه رسیدن به این هدف انجام تحقیقات در زمینه طراحی، ساخت، اندازه‌گیری و تنظیم بسامدی کاواک شتاب‌دهنده‌ها می‌باشد. دانش‌های بنیادی اولین تلاش ایران برای ساخت شتاب‌دهنده‌های بسامد رادیویی است. در این مقاله، پس از بررسی مختصر روش ساخت، اندازه‌گیری و تنظیم بسامدی یک ساختار دوره‌ای بارگذاری شده با قرص (دیسک) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج قبل و بعد از تنظیم بسامدی به همراه جزئیات طراحی و راه اندازی سیستم مورد استفاده برای اندازه‌گیری اختلالی پروفایل میدان الکترومغناطیسی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ساختار بارگذاری شده با قرص، امپدانس ثابت، کاواک شتاب‌دهنده، سیستم جابه‌جا کننده جسم مختل کننده، روش اختلالی اسلاتر، تنظیم بسامدی

### ۱. مقدمه

لامپ مورد نظر برای استفاده در این پروژه یک کلاسترون ساخت ایران است که طول پالس‌های حاصل از آن می‌تواند بین ۴ تا ۱۰ میکرو ثانیه با نرخ پالس بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ هرتز تغییر کند. از این شتاب‌دهنده می‌توان علاوه بر کاربردهای پزشکی و سیستم‌های بازرسی محموله برای انجام تحقیقات فیزیک باریکه‌های ذرات و بررسی ویژگی‌های الکترومغناطیسی

پژوهشگاه دانش‌های بنیادی اولین تلاش ایران برای ساخت این نوع شتاب‌دهنده‌های بسامد رادیویی است. این شتاب‌دهنده از نوع موج رونده می‌باشد. طراحی به گونه‌ای است تا با استفاده از توان ورودی ۲/۵ مگاوات، باریکه الکترونی ۱۰ میلی‌آمپر را در طول ۱/۵ متر تا انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت شتاب داد.



شکل ۱. پارامترهای مورد استفاده در طراحی و بهینه سازی کاواک شتاب‌دهنده موج رونده.

تشکیل دهنده کاواک شتاب‌دهنده ( $R$ )، طول سلول‌ها ( $D$ )، ضخامت شبکه جدا کننده سلول‌های مجاور که در واقع ضخامت دیواره مسی بین آنها است ( $d$ ) و نهایتاً حفره میانی قرص‌ها ( $a$ ) که باریکه الکترونی از آن عبور می‌کند و جفت شدگی الکتریکی بین سلول‌های مجاور نیز از طریق آن است [۳ و ۴].

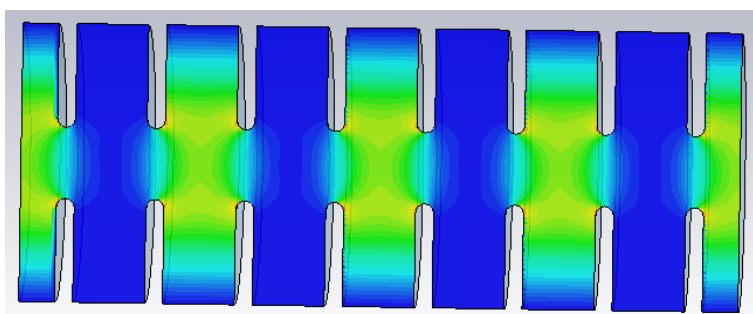
برای انجام محاسبات از روابط مراجع [۵، ۶ و ۷] استفاده شده است. پس از انجام محاسبات و به دست آوردن پارامترهای اولیه طراحی، ضخامت دیواره قرص بین سلول‌های مجاور کاواک برای افزایش ضریب کیفیت و امپدانس شنت تا مقادیر مورد نظر و کاهش میزان ولتاژ بیشینه سطحی برای جلوگیری از خطر شکست الکتریکی تا زیر مقدار دو برابر متوسط میدان شتاب‌دهی روی محور کاواک بهینه شد. در انجام محاسبات مربوط به طراحی کاواک شتاب‌دهنده‌ها، بررسی تغییرات بسامد تشدید بر حسب تغییرات شرایط محیطی و تفاوت بسامد تشدید کاواک در هنگام تنظیم کردن بسامدی با شرایط کارکرد در خلأ اهمیت دارد. در بسامد تشدید  $3020$  که شعاع کاواک در آن  $3/8$  cm است، مقدار تغییر بسامد با تغییر شعاع به دلیل تغییرات دمایی  $80$  kHz/ $\mu\text{m}$  به دست می‌آید. تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای  $26$  درجه اتاق صورت گرفته است. در عمل کاواک شتاب‌دهنده در شرایط خلأ کار خواهد کرد. بنابراین با توجه به این شرایط تصحیح بسامد تشدید شرایط معمولی نسبت به شرایط خلأ باید منظور گردد. با توجه به نسبت ضریب شکست خلأ به هوای معمولی و بسامد تشدید  $3020$  مگاهرتزی در شرایط خلأ، کاواک شتاب‌دهنده باید در بسامد  $3019/115$

شتاب‌دهنده‌های خطی نیز استفاده کرد. با توجه به مطالعات صورت گرفته و عدم دسترسی به کوره‌های لحیم‌کاری سخت<sup>۱</sup> با ابعاد مناسب در زمان ساخت کاواک‌های این شتاب‌دهنده، برای ساخت سریع‌تر و کم هزینه‌تر، دو روش ساخت بر مبنای قرص و حلقه مجزا به همراه استفاده از فشار بالای پیچ‌های متری و روش منقبض کردن با ازت مایع و جا زدن قرص‌ها در داخل یک موجبر استوانه‌ای به کار گرفته شد. روش قرص و حلقه مجزا اولین بار برای ساخت شتاب‌دهنده خطی موج رونده در استنفورد در پروژه مارک ۱ و روش روش منقبض کردن با ازت مایع و جا زدن در پروژه‌های مارک ۲ و ۳ با موفقیت مورد استفاده قرار گرفتند [۱ و ۲]. با توجه به تجهیزات ماشینکاری قابل برنامه ریزی با دقت‌های بسیار بالا و امکان پرداخت کاری‌های بسیار با کیفیت‌تر و همچنین دسترسی به نرم‌افزارها و کامپیوترهای قوی‌تر و دقیق‌تر در مقایسه با زمان انجام پروژه مارک در استنفورد تلاش شد تا نمونه‌هایی با ویژگی‌های بهتر از تجربه استنفورد با این روش برای پروژه شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی ساخته شود. در این مقاله به بررسی ملاحظات ساخت اولین ساختار دوره‌ای بارگذاری شده به روش روش منقبض کردن با ازت مایع و جا زدن پرداخته شده و روش اندازه‌گیری و تنظیم بسامدی آن به همراه طراحی سیستم اندازه‌گیری پروفایل میدان الکترومغناطیسی ارائه شده است.

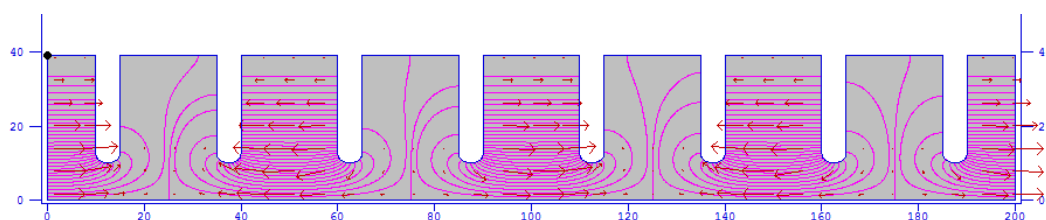
## ۲. طراحی و ساخت

در ساختارهای موج رونده امپدانس ثابت، فرایند طراحی برای بهینه‌سازی ۴ پارامتر هندسی که در شکل ۱ نشان داده شده است، صورت می‌گیرد. این پارامترها عبارتند از شعاع سلول‌های

۱. Brazing



شکل ۲. شبیه‌سازی پروفایل میدان  $\pi/2$  در نرم‌افزار CST MWS.



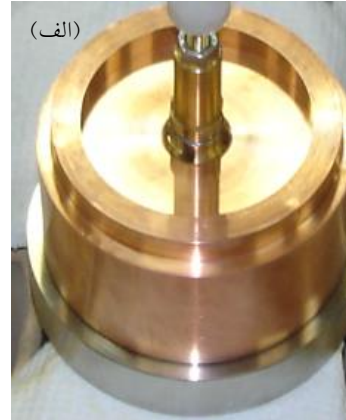
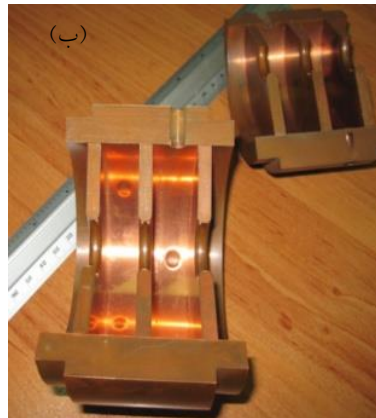
شکل ۳. شبیه‌سازی پروفایل میدان الکتریکی مد  $\pi/2$  در نرم‌افزار سوپرفیش.

شکل در دیواره هر سلول تا مقدار حجم محاسبه شده، تغییر ۳ مگاهرتز را در بسامد تشدید نمونه به وجود آورد. تصویر نمونه ۴ سلولی ساخته و برش زده شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

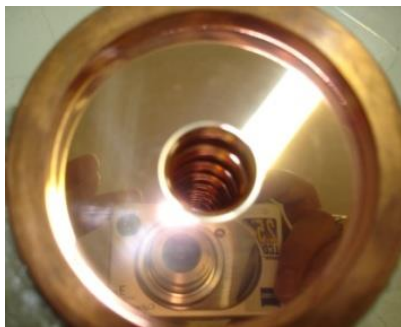
بررسی نمونه برش زده شده به ما امکان داد تا از انتخاب ابعاد سوراخ‌های تنظیم بسامدی و محل قرارگیری درست قرص‌ها بدون تغییر شکل دیواره با ضخامت مناسب اطمینان حاصل شود. بر اساس نتایج اندازه‌گیری حتی بدون پرداخت سطحی نمونه‌ها، ضریب کیفیتی برابر  $8500$  در بسامد کاری  $3018.5$  به دست آمد. با اعمال عملیات پرداخت سطحی و شستشوی دقیق نمونه و قرص‌ها، این مقدار تا میزان  $9400$  افزایش یافت که میزان بسیار مطلوبی برای ساخت کاواک‌های شتاب‌دهی نهایی بود. پس از موفقیت ساخت تیوب شتاب‌دهی ۴ سلولی با ۳ طول دوره‌ای به روش روش منقبض کردن با ازت مایع و جا زدن، ساخت یک نمونه با تعداد ۹ کاواک برای انجام اندازه‌گیری‌های بسامد رادیویی انجام گرفت. شکل ۵ کاواک ساخته شده ۸ دوره‌ای که ۹ سلول دارد را نشان می‌دهد. هدف از ساخت این نمونه ضمن تمرین فرایند ساخت طول‌های بلندتر تیوب‌های اصلی شتاب‌دهنده مورد نظر با این روش،

مگاهرتز تنظیم بسامدی گردد. همچنین با توجه به تفاوت ۹ درجه سلسیوس بین دمای کاری در نظر گرفته شده ۳۵ درجه برای تیوب شتاب‌دهنده با دمای محیط در حین اندازه‌گیری و تنظیم بسامدی، میزان  $453$  کیلوهرتز به مقدار فوق افزوده شده است. بنابراین، ساختار باید برای تشدید در بسامد  $3019.570$  مگاهرتز تنظیم بسامدی گردد. پس از انجام محاسبات تحلیلی برای تعیین مقدار تقریبی ابعاد، فرایند بهینه‌سازی برای رسیدن به ابعاد دقیق نهایی، با استفاده از نرم‌افزار سوپرفیش و CST انجام گرفت. در شکل ۲ و ۳ پروفایل میدان الکتریکی مد  $\pi/2$  در دو نرم‌افزار CST MWS و سوپرفیش نشان داده شده است.

در ابتدای به کارگیری روش انقباضی، ساخت نمونه‌ای با ۴ سلول که با جا زدن ۳ قرص ایجاد می‌شد صورت گرفت. در نمونه‌های بعدی پس از بررسی و تست‌های لازم، پیچ‌های تنظیم بسامدی که ضریب کیفیت را به میزان ۴۰۰ کاهش می‌دادند، با ۳ سوراخ بر روی دیواره کاواک و در وسط هر سلول با زاویه  $120$  درجه نسبت به هم جایگزین شدند، به گونه‌ای که ضخامت باقی مانده از کف سوراخ تا دیواره داخلی کاواک به میزان ۱ میلی‌متر بود تا بتوان با استفاده از فشار یک ساچمه و استفاده از پیچ‌های مخصوصی از طریق ایجاد تغییر



شکل ۴. (الف) ساختار ۴ سلولی ساخته شده با روش انقباضی (ب) ساختار ۴ سلولی برش زده شده با وایرکات.



شکل ۵. کاواک ۹ سلولی ساخته شده با استفاده از روش انقباضی.

همچنین بسامد هر یک از سلول‌های تشکیل دهنده ساختار را می‌توان با استفاده از پیستون‌های تغییر فرکانس بسامد رادیویی<sup>۱</sup> (پلاننژر) فرستنده و گیرنده انجام داد. در ادامه به بررسی روش اختلالی اسلاتر و اندازه‌گیری بسامد سلول‌ها با استفاده از پیستون‌های تغییر فرکانس بسامد رادیویی فرستنده و گیرنده که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است پرداخته شده است.

### ۱.۳. روش اختلالی اسلاتر

روش‌های اختلالی از مدت‌ها پیش برای اندازه‌گیری امواج الکترومغناطیسی در داخل دستگاه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گرفت. در سال ۱۹۵۲ مایر و اسلاتر [۱۱] روش اختلال بسامدی را برای اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی طولی در کاواک شتاب‌دهنده‌های خطی توسعه دادند. با استفاده از این

بررسی روش‌های اندازه‌گیری و تنظیم بسامدی ساختار بوده است.

### ۳. اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی و بسامد تشدید سلول‌ها

اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی برای مد بسامدی طراحی کاواک شتاب‌دهنده مورد نظر، یکی از اصلی‌ترین اقدامات لازم برای فرایند تنظیم بسامدی ساختار شتاب‌دهنده است. زیرا این پارامتر نشان دهنده بیشینه دامنه میدان در کاواک‌های شتاب‌دهی است که به کمک آن می‌توان احتمال ایجاد پدیده شکست الکتریکی را مشخص کرد. روش‌های متداول برای اندازه‌گیری دامنه میدان الکتریکی در کاواک شتاب‌دهنده‌ها عموماً بر مبنای استفاده از یک جسم مختل کننده و اندازه‌گیری تغییر فاز در بسامد تشدید مورد نظر و یا تغییر بسامد تشدید برای محاسبه با استفاده از روش اسلاتر و در روش غیر تشدید استیل با استفاده از پارامتر ضریب بازتاب  $S_{11}$  است [۸ و ۹ و ۱۰].

۱. Plunger

فرض  $\mu_r = 1$  به صورت رابطه (۲) ساده می‌شود.

$$\frac{\Delta\omega_s}{\omega_s} = -\frac{3\Delta V}{4U} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon_s E^2 \quad (2)$$

در این رابطه که جابه‌جایی نسبی بسامد در اثر عبور جسم مختل کننده را نشان می‌دهد،  $E$  دامنه میدان الکتریکی،  $H$  دامنه میدان مغناطیسی،  $\epsilon_r$  ضریب گذردهی نسبی جسم مختل کننده،  $\epsilon_s$  ضریب گذردهی خلأ،  $\mu_s$  نفوذ پذیری نسبی جسم مختل کننده،  $\mu_0$  نفوذ پذیری خلأ و  $U$  انرژی ذخیره شده در کاواک است.

۲.۳. پلانزهای باز تنظیم کننده و اندازه‌گیری بسامد سلول‌ها

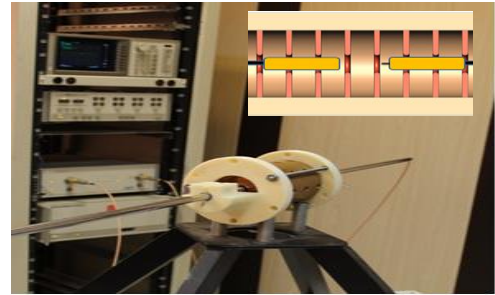
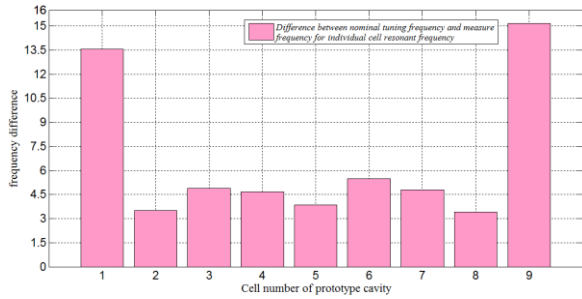
بسامد طراحی شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی مد  $\pi/2$ ، یعنی همان بسامد یک تک کاواک، می‌باشد. بنابراین بسامد تک تک کاواک‌ها به تنهایی نیز باید همان بسامد مد  $\pi/2$  باشد [۱۲]. با اندازه‌گیری این بسامدها می‌توان پی برد که کدام یک از کاواک‌ها تفاوت بیشتری با طراحی دارند و در نتیجه به تنظیم بسامدی بیشتر نیازمندند. در این روش با استفاده از دو پیستون تغییر فرکانس بسامد رادیویی ساخته شده، مابقی سلول‌های سازنده کاواک شتاب‌دهی را غیر از موردی که می‌خواهیم بسامد تشدید آن را اندازه بگیریم از تشدید خارج کرده و بدین ترتیب امکان اندازه‌گیری دقیق بسامد تشدید و ضریب کیفیت برای هر سلول فراهم می‌شود. با استفاده از همین روش می‌توان پس از انجام اندازه‌گیری‌های اولیه، شروع به تنظیم کردن تک تک کاواک‌ها کرد. تنظیم دقیق مکان این پیستون‌های تغییر فرکانس بسامد رادیویی برای حداقل کردن اثر خود آنها و آنتن متصل به آنها بر بسامد کاواک مقوله‌ای بسیار مهم است. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، برای اندازه‌گیری نمونه ۹ سلولی از دو انتهای آن پیستون‌های تغییر فرکانس بسامد رادیویی که در سر یکی از آنها آنتن تحریک کننده قرار گرفته است متصل گردیده و تک تک سلول‌های نمونه ۹ سلولی اندازه‌گیری شده‌اند.

شکل ۷ اختلاف بسامدی تک تک سلول‌های کاواک را با بسامد طراحی که با استفاده از پیستون‌های تغییر فرکانس بسامد

روش، ایجاد اختلال در بسامد تشدید یک تشدید کننده الکترومغناطیسی به وسیله یک جسم دی‌الکتریک یا رسانا برای یافتن پروفایل میدان الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری توزیع میدان الکتریکی محوری با استفاده از روش اختلالی اسلاتر، یک جسم مختل کننده را توسط یک نخ به کمک سیستمی مناسب با گام‌هایی مشخص روی محور کاواک یا تیوب شتاب‌دهی جابه‌جا می‌کنند. در هر مرحله تغییر بسامد تشدید را برای یک مد مشخص که با تحلیل گر فرکانسی شبکه تحریک می‌شود نسبت به حالت بدون اختلال اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند. برای یک کاواک در حالت تشدید، انرژی ذخیره شده در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با هم برابرند. با وارد کردن یک جسم مختل کننده کوچک و تغییر در شرایط مرزی یک مد مشخص در کاواک، تعادل انرژی میانگین ذخیره شده در میدان الکتریکی و مغناطیسی تشدید کننده بسته به مکان جسم مختل کننده به هم می‌خورد. در این حالت بسامد کاواک تشدید کننده برای به تعادل رساندن ذخیره انرژی میان دو میدان تغییر می‌یابد. با فرض کوچک بودن سرعت اختلال و استفاده از یک جسم مختل کننده مناسب که هم بتواند به میزان کافی اختلال ایجاد کند و هم اینکه توزیع میدان در کاواک تشدید کننده را به هم نزند، درصد تغییر بسامد تشدید متناسب با میدان الکتریکی و مغناطیسی خواهد بود. تغییر بسامد و میدان اندازه‌گیری شده تابعی از مکان قرارگیری جسم مختل کننده هستند. امروزه تئوری اختلالی اسلاتر مبنای اندازه‌گیری کاواک شتاب‌دهنده‌های خطی است. برای یک جسم مختل کننده کروی و با فرض اینکه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در حجم جسم مختل کننده ثابت باشند، تغییرات بسامد مطابق رابطه (۱) است.

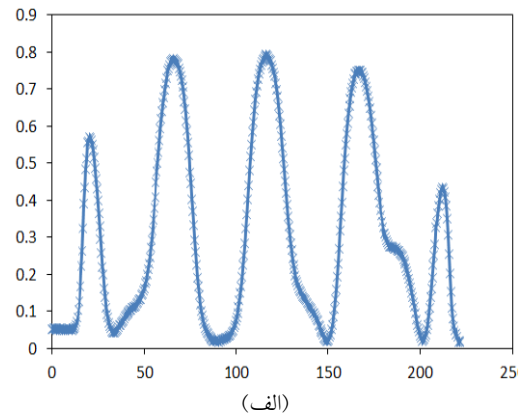
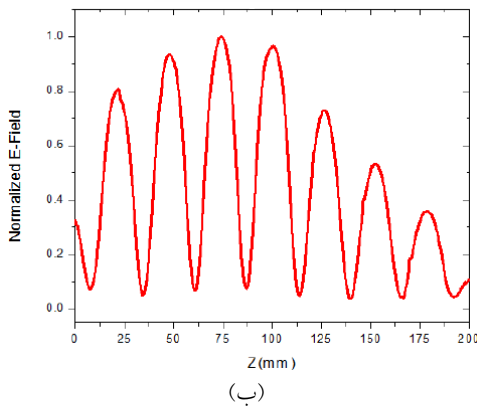
$$\frac{\Delta\omega_s}{\omega_s} = -\frac{3\Delta V}{4U} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon_s E^2 + \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \epsilon_s E^2 + \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \mu_0 H^2 \right) \quad (1)$$

برای یک جسم مختل کننده دی‌الکتریک و روی محور کاواک (برای مد  $TM_{10}$ ) که مد کارکرد همه شتاب‌دهنده‌های خطی است [۱۲] (میدان مغناطیسی نداریم، در نتیجه رابطه (۱) با

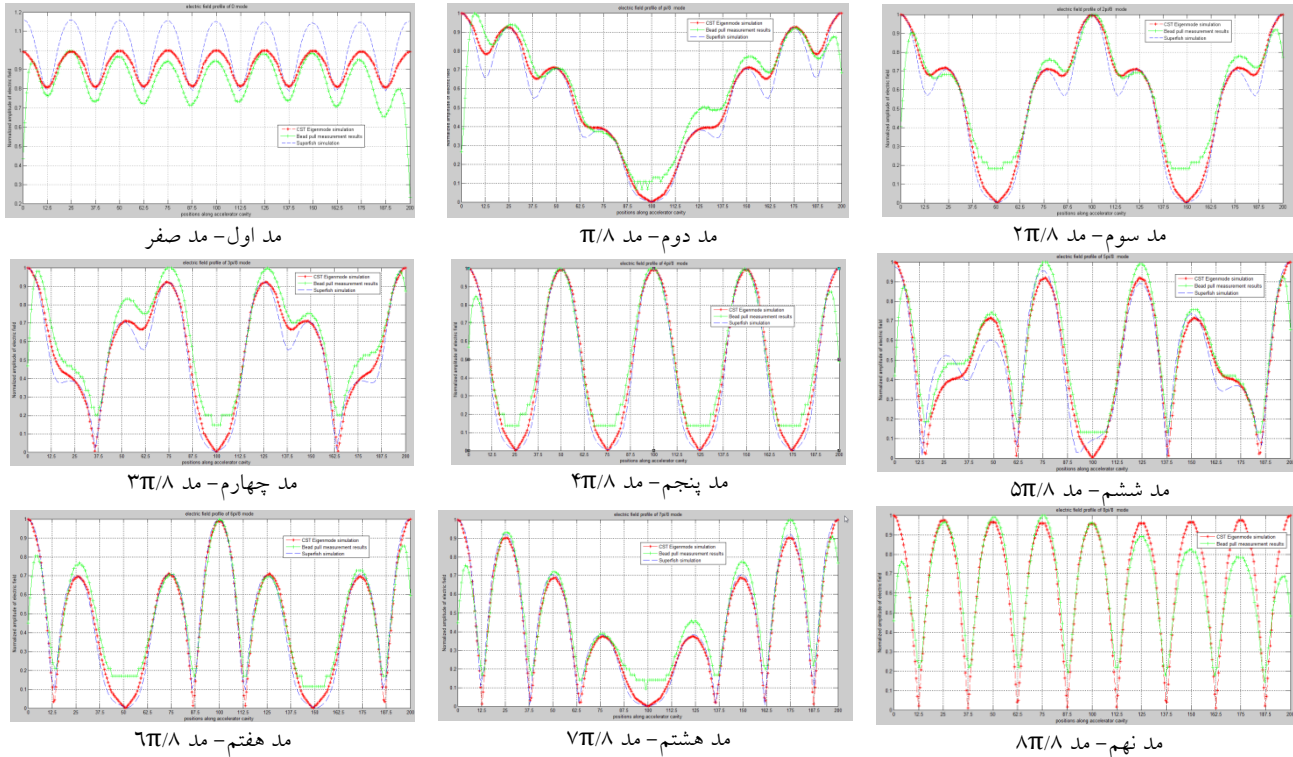


شکل ۷. تفاوت بسامد طراحی و بسامد اندازه‌گیری شده تک تک سلول‌های ساختار.

شکل ۶. اندازه‌گیری بسامد تشدید و ضریب کیفیت با پیستون‌های تغییر فرکانس بسامد رادیویی باز تنظیم کننده.

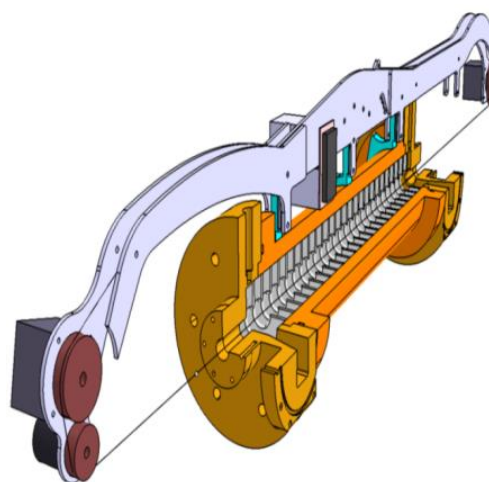


شکل ۸. پروفایل میدان الکتریکی محوری قبل از تنظیم بسامدی برای مدهای (الف)  $\pi/2$  و (ب)  $\pi$ .



شکل ۹. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری اختلالی اسلاتر، شبیه‌سازی در نرم افزارهای CST و سوپرفیش برای کلیه مدهای تشدید ساختار مورد نظر بعد از تنظیم بسامدی آن.

اطلاعات از تحلیل‌گر فرکانسی شبکه، میدان اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که اشاره شد برای کنترل موتور پله‌ای، ذخیره اطلاعات از تحلیل‌گر فرکانسی شبکه و رصد داده‌ها در محیط لب و یو<sup>۱</sup> برنامه نویسی و کنترل این سیستم از طریق PLC مدل LS انجام می‌شود. این نرم‌افزار وظیفه حرکت دادن موتور و ذخیره اطلاعات را انجام می‌دهد. سیستم ساخته شده قادر است تا جسم مختل کننده را با سرعت‌های مختلف و با گام‌های بسیار دقیق در طول کاواک‌های شتاب‌دهی جابه‌جا کند. این دستگاه برای جابه‌جا کردن جسم با دقت ۰/۱ میلی‌متر، طراحی شده است. نخ نایلونی انتخاب شده با قطر ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد که در مقابل نیروی کششی ۱ نیوتونی وارد شده به آن به ازای هر متر طول، ۰/۱ میلی‌متر به طول آن اضافه می‌شود. همچنین طول کل سیستم برای پوشش دو یا سه تیوب قابلیت تغییر دارد. طول‌هایی مشخص برای کوتاه کردن طول نخ نایلونی و در نتیجه بالا بردن دقت در اندازه‌گیری تیوب‌های شتاب‌دهی کوچک‌تر مانند خوشه‌ساز است. حلقه ایجاد شده توسط نخ نایلونی به طول دو برابر سیستم می‌باشد و در هر بار استفاده باید تعویض شود. کشش نخ نایلونی به وسیله بازوی تعبیه شده روی ساختار به اندازه دلخواه تنظیم و سپس بازو در موقعیت انتخاب شده قفل می‌شود. نخ نایلونی در طول مسیر حرکت خود به وسیله قرقره‌هایی که دارای اصطکاک بسیار کمی هستند، هدایت می‌شود. نکته مهم طراحی این سیستم، دقت در کشش وارد شده به نخ نایلونی در لحظه حرکت در هر جابه‌جایی و تغییر جهت حرکت می‌باشد. به همین دلیل در این طرح از دو موتور پله‌ای هم‌سنگ در دو جهت حرکت (بالا و پایین) استفاده شده است. مدل موتور پله‌ای مورد استفاده در این پروژه A1۶K-M۵۶۹ است که در حالت تمام پله ۰/۷۲ درجه و در حالت نیم پله ۰/۳۶ درجه دقت دارد. برای اندازه‌گیری دقیق مقدار جابه‌جایی، از یک حسگر شمارنده (اینکدر)<sup>۲</sup> استفاده شده است. این شمارنده از نوع ۱۰۲۴ بیتی بوده و در هر دور گردش محور حسگر، ۱۰۲۴ پالس به مدار



شکل ۱۰. سیستم طراحی شده برای کشش گوی.

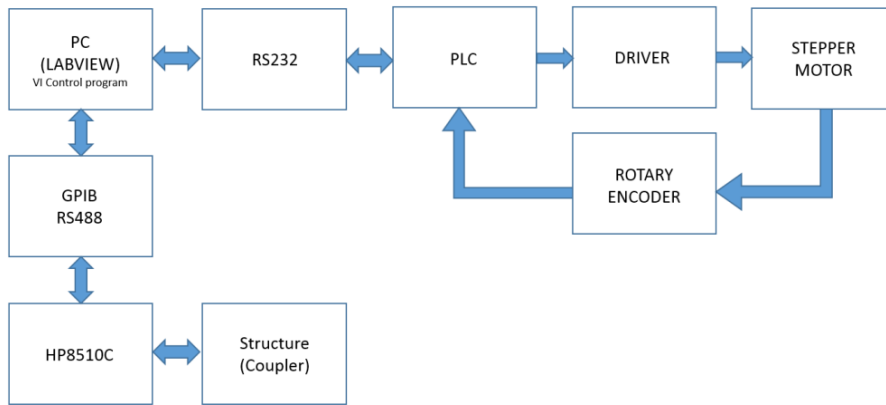
رادیویی اندازه‌گیری شده است نشان می‌دهد. پروفایل میدان الکتریکی قبل از تنظیم بسامدی نمونه ساخته شده برای دو مد  $\pi$  و  $\pi/2$  در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند. همچنین، پروفایل میدان الکتریکی حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای سوپرفیش و CST به همراه نتایج حاصل از اندازه‌گیری اختلالی اسلاتر برای کلیه مدهای تشدید ساختار پس از انجام تنظیم بسامدی در شکل ۹ نشان داده شده است.

#### ۴. طراحی و ساخت دستگاه دقیق اندازه‌گیری اختلالی اسلاتر

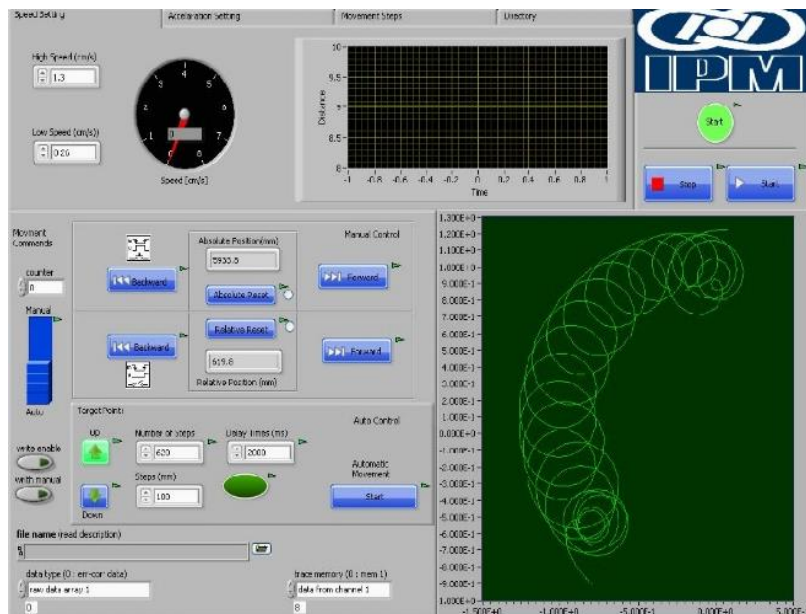
برای انجام اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی در کاواک شتاب‌دهنده‌های خطی نیاز به ساخت یک سیستم اندازه‌گیری خودکار جابه‌جا کننده جسم مختل کننده در داخل ساختار شتاب‌دهنده است. بخش مکانیکی طراحی شده سیستم اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی (سیستم کشش گوی) سوار بر تیوب شتاب‌دهی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. وظیفه این سیستم انتقال جسم کوچک کروی یا سوزنی به عنوان مختل کننده با کنترل بر روی سرعت حرکت و مکان دقیق آن است. در این سیستم، نخ‌کی که مهره یا جسم فلزی مختل کننده به آن متصل شده، روی موتور پله‌ای قرار می‌گیرد (سیستمی شبیه قرقره). با حرکت جسم در درون ساختار، به وسیله اخذ

۱. Labview

۲. Encoder



شکل ۱۱. بلوک دیاگرامی از سیستم کشش گویی.



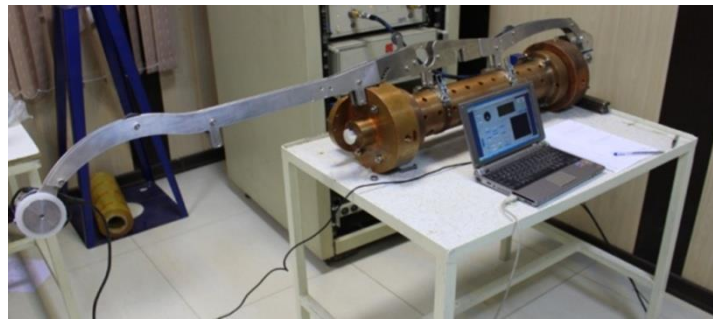
شکل ۱۲. پنل کنترل سیستم کشش گویی.

اجرای ارتباطی دیگر مانند LAN بوده، ضمن اینکه ساختار اجرایی ارتباطی RS488 از سرعت بیشتری در حجم کم داده برخوردار بوده و برای کم کردن زمان اندازه‌گیری بسیار مناسب‌تر است. شکل ۱۱ ارتباط بخش‌های مختلف سیستم طراحی شده را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ نمایی از قسمت کنترل سیستم اندازه‌گیری اختلالی نشان داده شده است. برنامه به دو صورت خودکار و دستی قابل اجرا بوده و هر قسمت تنظیمات مختص به خود را دارد. در شکل ۱۳ سیستم اندازه‌گیری اختلالی در حالت نصب و کار بر روی یکی از کاواک‌های شتاب‌دهنده نشان داده شده است.

کنترل الکترونیکی ارسال می‌کند. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خطی نخ نایلونی با دقت ۰/۱ میلی‌متر، از یک پولی با قطر ۳۲/۳۹۵ میلی‌متر که دارای دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر می‌باشد، استفاده شده است.

همزمان با حرکت جسم و ضمن کنترل موقعیت و سرعت حرکت آن، اطلاعات لازم از دستگاه تحلیل‌گر فرکانسی شبکه خوانده شده و ذخیره می‌گردد. با تهیه یک کارت GPIB و اتصال آن به کامپیوتر فرایند صورت پذیرفته است. علت استفاده از کارت GPIB برای ارتباط کامپیوتر و تحلیل‌گر فرکانسی شبکه، قدیمی بودن تحلیل‌گر فرکانسی شبکه و نداشتن ساختار





شکل ۱۳. سیستم اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی با روش اختلالی اسلاتر.

## ۵. نتایج

پاشیدگی با تحلیل گر فرکانسی شبکه، ۸ مد مختلف قابل اندازه‌گیری بود. این به دلیل همپوشانی دو مد اول بود که از طریق شبیه سازی با نرم‌افزار CST ارزیابی و در عمل نیز مشاهده گردید. پس از انجام عملیات تنظیم بسامدی ساختار، تعداد ۹ مد مطابق با پیش بینی محاسباتی مشاهده شد. پروفایل مدهای مختلف توسط سیستم اندازه‌گیری کشش گوی مشخص گردید و با نتایج شبیه سازی به کمک دو نرم‌افزار CST و سوپرفیش مقایسه گردید. نتایج حاصل به خوبی بر هم منطبق بوده و در عمل می‌توان با استفاده از دو پلانر تنظیم بسامدی ساختارهای نهایی مورد استفاده در شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی را انجام داد. در پژوهش صورت گرفته مشخص گردید که در حین فرایند تنظیم بسامدی ساختار باید تمام ملاحظات محیطی و شرایط عملکردی در خلأ و در هوا مورد توجه قرار گرفته و محاسبات مربوط به آنها نیز انجام شد. یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش اطمینان از ابعاد روزنه‌های فشار بر دیواره به منظور ایجاد تغییر شکل و تنظیم بسامدی و روش انتخابی بود که بدون هیچگونه پارگی دیواره در محل قرارگیری ساچمه‌ها در داخل سوراخ‌های تنظیم، می‌توان روادارایی (تفاوت‌های فرکانسی) در حدود ۱۲ مگاهرتز را در بسامد تشدید تصحیح نمود.

پس از طراحی ساختار، نمونه‌های مختلفی با دو روش مختلف ساخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش روش منقبض کردن با ازت مایع و جا زدن، روشی مناسب و قابل توسعه برای ساخت شتاب‌دهنده‌های خطی در ایران است. بررسی تغییرات ضریب کیفیت ساختار بر حسب روش ساخت و فرایندهای مختلف اعمالی بر روی ساختار برای نهایی شدن روش ساخت صورت گرفت و مناسب‌ترین آنها که روش منقبض کردن با ازت مایع و جا زدن ساختار بود انتخاب شد. با استفاده از روش روش منقبض کردن با ازت مایع و جا زدن می‌توان به ضریب کیفیت ۱۰۰۰۰ دست یافت که مقداری مناسب است. در حین فرایند ساخت این نمونه، طراحی و ساخت سیستم اندازه‌گیری کشش گوی نیز صورت گرفت که اولین تجربه از نوع خود در این حوزه تحقیقاتی در ایران است. این سیستم قابلیت تغییر طول برای استفاده با طول‌های مختلفی از کاواک‌های شتاب‌دهی را دارد. روش‌های مختلف اندازه‌گیری پروفایل میدان الکتریکی و بسامد تشدید سلول‌های کاواک شتاب‌دهنده بررسی شد و پس از اندازه‌گیری، از صحت نتایج و محاسبات صورت گرفته اطمینان به عمل آمد. این روش‌ها در مرحله اندازه‌گیری و تنظیم بسامدی ساختارهای نهایی مورد استفاده قرار گرفته است. قبل از تنظیم کردن بسامدی ساختار، در مراحل اندازه‌گیری منحنی

## مراجع

2. M Chodorow, E L Ginzton, W W Hansen, R L Kyhl, R B Neal, and W K H Panofsky, Stanford

1. R F Post and N S Shiren, *Review of Scientific Instruments*, 26 (2) (1955) 205.

7. W Fang, Q Gu, D Tong, and Z Zhao, Design optimization of a C-band traveling-wave accelerating structure for a compact X-ray Free Electron Laser facility. *Chinese Science Bulletin*, 56 (32) (2011) 3420.
8. L C Maier Jr, and J C Slater, *Journal of Applied Physics*, 23(1), (1952) 78.
9. C W Steele, *IEEE Transactions on*, 14(2), (1966) 70.
10. S Ghosh, S Seth, A Mandal, and S S Som, Bead-pull measurement using phase-shift technique in multi-cell elliptical cavity. In Conf. Proc. 110904, IPAC-2011-MOPC088, (2011) 280.
11. L C Maier Jr, and J C Slater, *Journal of Applied Physics*, 23 (1), (1952) 68.
12. W J Gallagher, "Measurement techniques for periodic structures," Microwave Lab., Stanford Univ., Stanford, CA, Rep. 767, (1960).  
High-Energy Linear Electron Accelerator (Mark III). *Review of Scientific Instruments*, 26 (2), (1955) 134.
3. J Gao, *Analytical approach and scaling laws in the design of disk-loaded travelling wave accelerating structures*. Paris-11 Univ., 91-Orsay (France). Lab. de l'Accelérateur Lineaire (1993).
4. T P Wangler, "RF Linear accelerators", John Wiley & Sons (2008).
5. W Fang, D Tong, Q Gu, and Z Zhao, Design and experimental study of a C-band traveling-wave accelerating structure. *Chinese Science Bulletin*, 56 (1), (2011) 18.
6. G A Loew, R H Miller, R A Early, and K L Bane, *Computer calculations of traveling-wave periodic structure properties*. Stanford Univ., CA (USA) (1979).