



طراحی و ساخت شتابگر خطی موج رونده الکترون در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

شاهین صنایع حجری^۱، مهیار شیرشکن^۱، حامد شاکر^۱، فرشاد قاسمی^۲، ساسان احمدیان نمین^۱،
میترا انصاری^۳، مهدی بهرامی^۱، هادی بهنامیان^۱، سعید حقطلب^۱، محمدرضا خلوتی^۱، عصمت درویش^۱،
حسین دلسیم هاشمی^۴، هادی سلامتی^۵، محمد صالحی^۲، فریدون عباسی دوانی^۶، سمیرا کسایی^۱،
سیامک ناظمی^۶، سعادت ورناصری^۷، معصومه یارمحمدی سطری^۲ و محمد لامعی رشتی^۱

۱. پژوهشکده ذرات و شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیاد، تهران

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

۳. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

۴. دسی، گروه فیزیک ماشین، هامبورگ، آلمان

۵. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۶. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۷. ای‌اس‌اس، بلبائو، اسپانیا

پست الکترونیکی: mlamehi@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۸/۲۹)

چکیده

در این مقاله کلیه مراحل مختلف طراحی و ساخت یک شتابگر خطی بسامد رادیویی موج رونده، به اجمال نوشته شده است. اجزاء اصلی این شتاب‌دهنده عبارتند از تغنگ الکترونی، پیش‌خوشه‌ساز، خوشه‌ساز، کاواک اصلی شتاب‌دهی، مجموعه تولید و انتقال توان بالای بسامد رادیویی، آهن‌رباهای هدایت و کانونی‌کننده، مجموعه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کنترل و پایش شتاب‌دهنده و بالاخره مجموعه تشخیص و اندازه‌گیری مشخصات باریکه. کلیه این اجزاء اصلی و همچنین قسمت‌های متعدد دیگر، با تکیه بر فناوری داخل کشور طراحی و ساخته شدند و برای کنترل کیفیت ساخت، اندازه‌گیری‌های مربوطه انجام شده است. حاصل کار، ساخت یک شتاب‌دهنده خطی موج رونده الکترون است با بیشینه انرژی $4/5 \text{ MeV}$ که کلیه پارامترهای آن قابل تنظیم و اندازه‌گیری هستند. این شتاب‌دهنده، در ایران، ابزاری منحصر به فرد است برای آموزش علم شتاب‌دهنده‌های ذرات و تحقیق و توسعه تجربی در زمینه شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون و فیزیک باریکه.

واژه‌های کلیدی: شتابگر خطی، کاواک، تغنگ الکترونی، بسامد رادیویی، کنترل شتابگر، مشخصات باریکه، حفاظ سازی

۱. مقدمه

طرح ساخت شتابگر خطی الکترون با حمایت معاون وقت وزارت علوم- تحقیقات و فناوری در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی در سال ۱۳۸۱ آغاز شد. هدف از اجرای این طرح، پایه‌گذاری دانش شتابگرها و توسعه زیرساخت‌های علمی و فنی لازم برای ساخت انواع شتابگرها در کشور بود. در همان زمان کاربردهای خاص این شتابگر خطی مانند تولید پرتو ایکس و گامای پرنرژی برای تصویربرداری‌های عمیق (استفاده در گمرک، تصویربرداری از ساختمان‌ها و تأسیسات فرسوده) و پرتودرمانی برای از بین بردن سلول‌های سرطانی مد نظر بود. در صورت افزایش انرژی این شتابگر خطی تا انرژی ۱۰۰-۱۵۰ مگاالکترون‌ولت، استفاده از آن در چشمه نور ایران به عنوان تزریق‌گر امکان‌پذیر می‌شد. دستیابی به برخی از فناوری‌های ساخت شتابگر، شناخت چالش‌ها و دشواری‌های این مسیر، از دیگر اهداف اجرای این طرح بود.

استفاده از اختلاف پتانسیل متناوب برای شتاب ذرات در سال ۱۹۲۴ توسط ایزینگ [۱] پیشنهاد شد. ویدروئه [۲] در سال ۱۹۲۸ نخستین شتاب‌دهنده خطی را برای شتاب یون‌های پتاسیم ساخت و نشان داد که شتاب‌دهی ذرات با پتانسیل متناوب امکان‌پذیر است. اسلوآن و لورنس [۳] در سال ۱۹۳۱ با استفاده از پیشنهاد ویدروئه، شتابگری واقعی ساختند و یون‌های جیوه را ابتدا به انرژی $1/5 \text{ MeV}$ و سپس در سال ۱۹۳۴ به انرژی $2/8 \text{ MeV}$ رساندند. تا جنگ جهانی دوم (۱۹۳۹-۱۹۴۵)، مولدهای قوی بسامد بالا وجود نداشت و شتابگرهای خطی الکترون یا یون‌های سبک مانند پروتون عملاً ناممکن می‌نمود. این نوع شتاب‌دهنده‌ها قادر به شتاب‌دهی الکترون نبودند زیرا طول شتاب‌دهنده، در بسامدهای قابل دسترس در آن زمان- در حدود ۱۰ مگاهرتز-، بسیار زیاد می‌شد. در جنگ جهانی دوم، مولدهای توان بالای بسامد رادیویی برای استفاده در رادار، تولید شدند و در نتیجه امکان ساخت شتابگرهای خطی الکترون فراهم شد. اولین شتابگر خطی با بسامد رادیویی الکترون پس از جنگ جهانی دوم در آمریکا و در دانشگاه استنفورد ساخته شد. ابتدا چو وهانسن نشان دادند که با افزودن دیسک‌های سوراخ‌دار به موجبر استوانه‌ای

می‌توان سرعت فاز امواج الکترومغناطیس را کاهش داد [۴]. سپس اسلیتر [۵] و گینزتون، هانسن و کندی [۶] شتاب‌دهنده خطی الکترون را طراحی کردند، بخش‌هایی از آن را ساختند و اندازه‌گیری کردند. بالاخره در سال ۱۹۵۴، مقاله اصلی و مهم مربوط به ساخت شتابگر خطی استنفورد موسوم به مارک ۳^۱ منتشر شد [۷]. از این تاریخ، صدها بلکه هزاران شتاب‌دهنده خطی الکترون با اهداف مختلف، از پژوهش‌های بنیادی تا کاربردهای صنعتی و پزشکی، ساخته شدند و مورد استفاده قرار گرفتند [۸] و با اطمینان می‌توان گفت که شتاب‌دهنده خطی، پرکاربردترین شتاب‌دهنده ذرات در جهان است.

مقاله سال ۱۹۵۴ دانشگاه استنفورد، اهمیت ویژه‌ای در کار پژوهشی ما داشت. این مقاله مفصل حاوی جزئیات فنی زیادی در مورد ساخت شتاب‌دهنده خطی است که معمولاً در مقالات جدید دیگر دیده نمی‌شود. این جزئیات برای ما که قصد ساخت شتاب‌دهنده خطی را داشتیم بسیار ذی‌قیمت بود. مرجع قدیمی دیگر بسیار ارزشمندی، کتاب مفصلی است به نام شتاب‌دهنده خطی [۹] ویراسته لاپوستول و سپتیه، که به دو بخش یکی درباره شتاب‌دهنده خطی یون (پروتون) و دیگری درباره شتاب‌دهنده خطی الکترون تقسیم شده است. مطالب این کتاب نیز همانند مقاله ساخت شتاب‌دهنده استنفورد، راهنمای ما در این کار پژوهشی بوده است.

هدف اصلی از طرح ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، دستیابی به دانش ساخت این گونه از شتاب‌دهنده‌های ذرات، شناسایی و توسعه قابلیت‌های داخل کشور در این راستا بوده است. اگر بخواهیم فرایند شتاب‌دهی در شتاب‌دهنده خطی الکترون با موج رونده را به اجمال شرح دهیم، باید بگوییم که در کاواک شتاب‌دهنده، موج الکترومغناطیسی منتشر می‌شود که سرعت فاز آن با سرعت حرکت الکترون‌ها برابر است. الکترون‌ها در حال حرکت، مرتباً تحت اثر میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی قرار دارند و انرژی آنها مرتباً افزایش می‌یابد. انرژی نهایی الکترون به میدان الکتریکی داخل کاواک و بنابراین با توان الکترومغناطیسی

تزریقی به داخل کاواک بستگی دارد. پس اولین چالش مهم در مسیر ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون، دسترسی به مولد پرتوان موج الکترومغناطیسی است. پرتوان‌ترین مولد امواج الکترومغناطیس قابل دسترسی در کشور، یک لامپ کلاسترون باند S پهن باند (از ۳/۱ الی ۹/۲ GHz) با توان قله ۲ MW بود. شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه حول این مولد طراحی و ساخته شد. چالش مهم دیگر طراحی و ساخت کاواک‌ها (خوشه‌ساز- کاواک‌های اصلی و تزویجگرها)^۱ بود. در کنار این دوچالش اصلی، چالش‌های دیگر مانند تفنگ الکترونی، مغناطیس‌های کانونی‌کننده، ابزارهای تشخیصی و... موجود بودند که می‌بایست یک به یک برطرف شوند. در این مقاله پس از معرفی اجزاء شتاب‌دهنده خطی، طراحی و ساخت هر یک از این اجزاء مطرح و در نهایت نتایج اندازه‌گیری‌ها ارائه می‌شوند.

۲. مراحل طراحی شتاب‌دهنده خطی الکترون

در شکل ۱ طرحواره‌ای از شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی را آورده‌ایم.

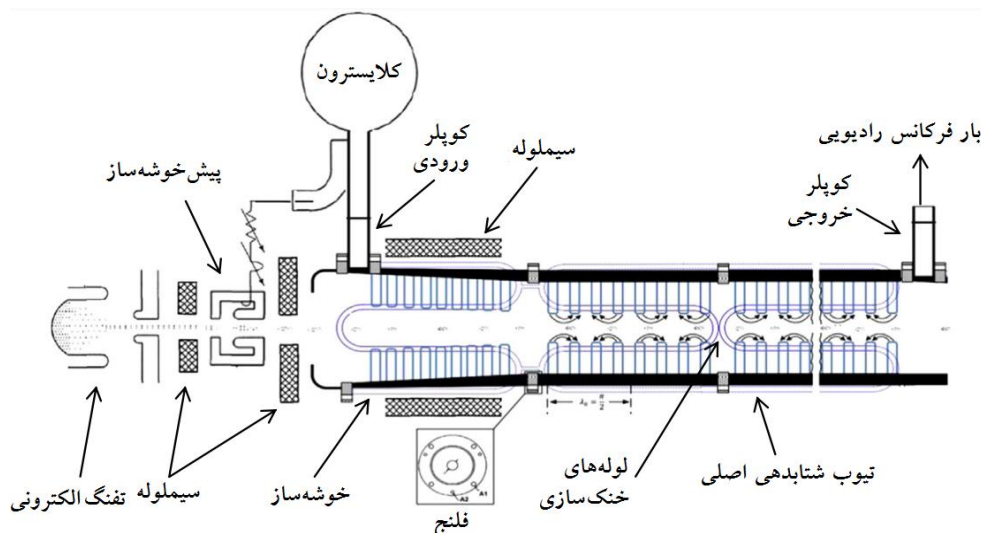
همان‌طور که در مقدمه گفته شد، در شتاب‌دهنده خطی الکترون و به‌طور عمومی‌تر، در هر شتاب‌دهنده، بسامد رادیویی ذرات، منبع تولید موج الکترومغناطیسی، اهمیت اساسی دارد. این منبع تغذیه، انرژی ذرات و توان بیشینه پرتو خروجی آن را تعیین می‌کند. هر چه این منبع قوی‌تر باشد، انرژی و توان پرتوی خروجی بیشتر خواهد بود. از آنجا که یکی از اهداف ساخت شتاب‌دهنده خطی، شناخت و استفاده از فناوری داخل کشور بود، برای مولد امواج از قوی‌ترین لامپ مولد امواج- با توان ۲ MW باند S- ساخت داخل کشور استفاده شد. این توان تولیدی، که باید در کاواک‌های شتاب‌دهنده تزریق شوند، معیار اصلی برای تعیین انرژی بیشینه شتاب‌دهنده و میدان الکتریکی داخل کاواک آن است. مرحله بعدی، انتخاب نوع کاواک اصلی و محاسبه ابعاد آن است. لازم است که دقت^۲ در ابعاد کاواک تعیین شود؛ زیرا فناوری ساخت و در نتیجه قیمت تمام‌شده

قطعات، تابعی از این کمیت‌ها است. پس از تعیین مشخصات و اندازه‌های کاواک اصلی که در آن الکترون‌ها دسته- دسته با سرعت تقریباً ثابت برابر سرعت نور حرکت می‌کنند، نوبت به طراحی خوشه‌ساز می‌رسد. خوشه‌ساز وظیفه دارد الکترون‌هایی که پیوسته از تفنگ خارج می‌شوند را دسته- دسته کند، سرعت الکترون‌ها را تقریباً به سرعت نور برساند و انرژی آنها را افزایش دهد. ساختار آن برخلاف کاواک اصلی که دارای ساختاری تناوبی با سلول‌های یکسان است، سلول‌هایی با اندازه‌های متفاوت دارد و طراحی آن بسیار پیچیده‌تر است. پس از طراحی خوشه‌ساز و کاواک اصلی، نوبت به طراحی تزویجگرهای ورودی و خروجی امواج الکترومغناطیسی به داخل کاواک می‌رسد. این تزویجگرها، موج الکترومغناطیسی عرضی را به موج طولی تبدیل می‌کنند. این قطعات دیگر تقارن استوانه‌ای ندارند و طراحی آنها بسیار پیچیده‌تر است. پس از طراحی کاواک‌های شتاب‌دهنده، باید میدان‌های مغناطیسی کانونی‌کننده را طراحی کرد. در اینجا، از سیملوله^۳ استفاده شده است. این میدان مغناطیسی در خوشه‌ساز و در خط انتقال باریکه از تفنگ الکترونی به خوشه‌ساز بسیار مهم است زیرا انرژی الکترون‌ها کوچک و تکانه عرضی الکترون‌ها نسبت به تکانه طولی آنها بزرگ است. میدان مغناطیسی موج الکترومغناطیس در محور خوشه‌ساز و کاواک صفر است. بنابراین لازم است که کانونی‌کردن الکترون‌ها توسط میدان مغناطیسی خارجی و مستقل از میدان الکترومغناطیسی انجام گیرد. از آنجا که تفنگ الکترونی پیش‌بینی شده برای شتاب‌دهنده خطی، تقریباً همان تفنگ الکترونی شتاب‌دهنده یزد بود و قطعاتی از تفنگ الکترونی را در اختیارمان قرار داده بودند، تفنگ الکترونی نیاز به طراحی خاصی نداشت. فقط مسیر ذرات و کانونی شدن الکترون‌ها، شبیه‌سازی شدند و مطمئن شدیم که از این تفنگ می‌توان برای شتاب‌دهنده خطی استفاده کرد. طراحی و ساخت منابع تغذیه این تفنگ و همچنین سیملوله برای کانونی کردن باریکه و جابه‌جا کننده‌ها و طراحی و ساخت سیم‌پیچ خنثی کننده میدان مغناطیسی

۱. Coupler

۲. Tolerance

۳. Solenoid



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره شتاب دهنده خطی پژوهشگاه دانش های بنیادی.

کنترل، ابتدا بر پایه نرم افزار اپیکس^۱ [۱۰] طراحی شد و سپس با استفاده از لَب ویو^۲ [۱۱] مجدداً طراحی و ساخته شد.

۳. اجزاء شتاب دهنده خطی الکترون

در شکل ۲ طرحی از اجزاء شتاب دهنده خطی الکترون را، در ارتباط با یکدیگر نشان داده ایم. قسمتی که با R نشان داده شده، بخش تولید و تقویت موج الکترومغناطیسی است. قسمتی که با I نشان داده شده، مربوط است به تفنگ الکترونی، منبع تغذیه ولتاژ بالای آن، ترانسفورماتورهای جداکننده، آهن رباهای کانونی کننده و تنظیم کننده موقعیت الکترون ها، پیش خوشه ساز و همچنین سیم پیچی برای خنثی کردن میدان مغناطیسی زمین. در قسمت A ، تزویج گر ها، کاواک خوشه ساز، کاواک اصلی شتاب دهنده و سیملوله هایی برای کانونی کردن باریکه قرار دارند. شتاب دهنده اصلی در این قسمت قرار دارد. در قسمت T دستگاه های تشخیصی مانند فنجان فاراده برای اندازه گیری جریان باریکه، بیناب نمای مغناطیسی برای اندازه گیری تکانه (انرژی) الکترون های خروجی و پراکندگی انرژی آن، بیناب نمای سوسوزن برای اندازه گیری بیناب فوتون های گسیلی پس از برخورد باریکه الکترون با هدفی فلزی قرار دارد. قسمت

زمینه فعالیت های مربوط به تفنگ الکترونی بودند که انجام گرفتند. طراحی و ساخت کاواک پیش خوشه ساز، که طراحی آن مستقل از بقیه ساختار شتاب دهنده است، برای بهبود کیفیت خوشه سازی نیز انجام گرفت.

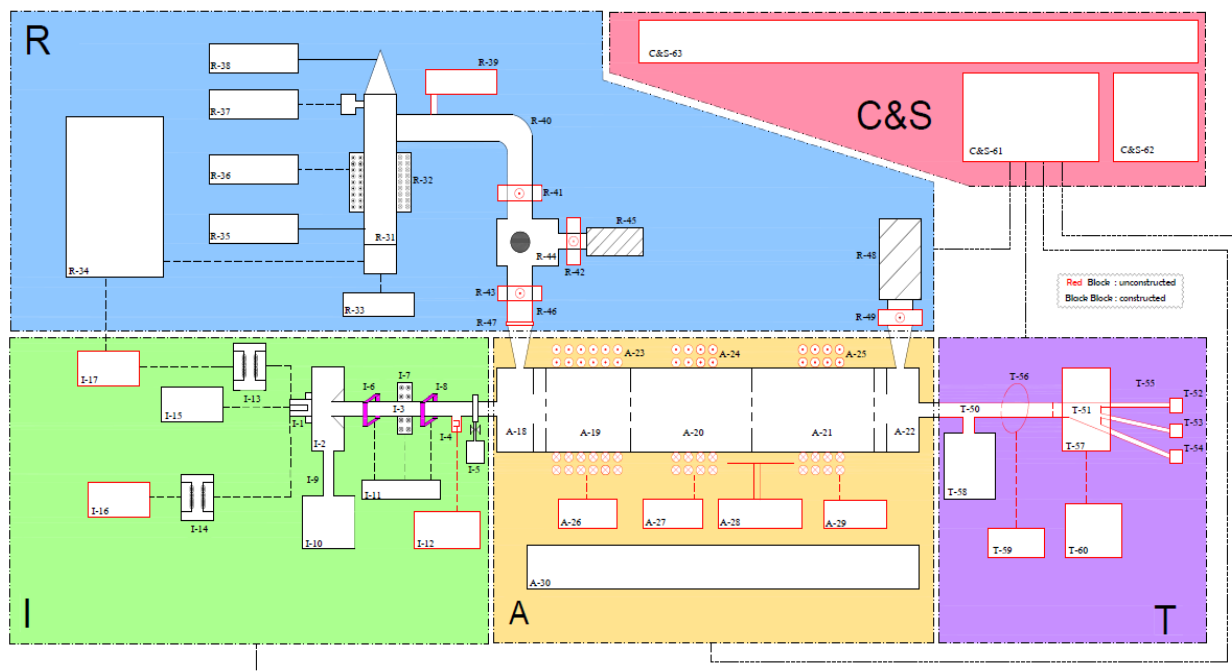
برای اندازه گیری مشخصات باریکه خروجی نیز ابزار تشخیصی طراحی و ساخته شد. فنجان فاراده برای اندازه گیری جریان باریکه، استفاده از آشکارساز سوسوزن برای اندازه گیری انرژی و طیف انرژی پرتوهای ایکس ترمزی، صفحه نمایش سوسوزن برای اندازه گیری نیم رخ عرضی باریکه، طیف نگار مغناطیسی برای اندازه گیری انرژی و طیف انرژی الکترون های خروجی از شتاب دهنده، طراحی و ساخت یک سیملوله در خروجی شتاب دهنده و پیاده سازی چیدمان روبشی سیموله ای برای اندازه گیری گسیلندگی باریکه.

باریکه الکترون خروجی از شتاب دهنده، در برخورد با ماده، تابش الکترومغناطیسی می کند. باریکه الکترون که در فنجان فاراده و در برخورد با صفحه فلزی آن متوقف می شود، تابش ترمزی گسیل می کند. لازم است که میزان این تابش و توزیع آن محاسبه شود تا حفاظ لازم اطراف شتاب دهنده تعبیه شود. محاسبات این تابش ها و اندازه گیری آن نیز انجام گرفت که در این مقاله گزارش می شود.

سیستم کنترل شتاب دهنده نیز طراحی شد. این سیستم

۱. EPICS

۲. LabVIEW



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره شتاب‌دهنده خطی و اجزاء آن در ارتباط باهم.



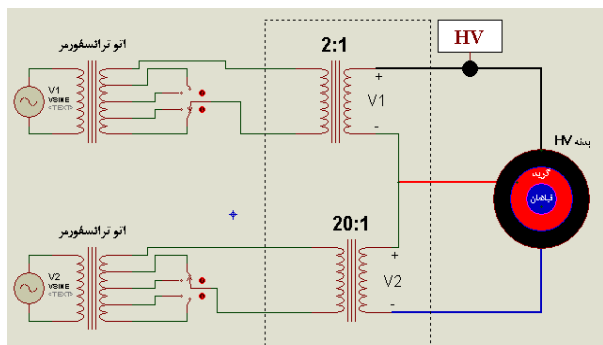
شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تفنگ الکترونی پس از نصب برای آزمون‌های اولیه.

۴. تفنگ الکترونی

تفنگ الکترونی شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تقریباً همان تفنگ الکترونی شتاب‌دهنده رودوترون [۱۲-۱۴] یزد است که به طرح ساخت شتاب‌دهنده خطی اهدا شد. همراه این تفنگ الکترونی، ابتدا دو و بعداً چند کاتد مستعمل دیگر برای آزمون‌های اولیه نیز هدیه شد. شکل ۳ این تفنگ الکترونی را نشان می‌دهد. ولتاژ این تفنگ الکترونی در حدود ۴۵ kV و جریان آن حداکثر ۱۰ mA به صورت پیوسته است.

C&S مربوط به دستگاه‌های کنترل و ایمنی شتاب‌دهنده است. کمیت‌های مختلف مانند ولتاژ بالا در تفنگ الکترونی، توان لامپ، خلاء قسمت‌های مختلف، جریان آهن‌رباها و ... اندازه‌گیری و کنترل می‌شوند. می‌توان برخی از این کمیت‌ها از اطاق کنترل شتاب‌دهنده را تغییر داد و تنظیم کرد.

در این مقاله ترتیب ارائه طراحی و ساخت قطعات، مسیر حرکت الکترون در شتاب‌دهنده است. ابتدا به ارائه طراحی و ساخت قطعات قسمت I (شکل ۲) می‌پردازیم. در این قسمت تفنگ الکترونی، پیش‌خوشه‌ساز، خط انتقال باریکه از تفنگ به شتاب‌دهنده و آهن‌رباهای مربوط به انتقال باریکه را شرح می‌دهیم. برای توضیح طراحی و ساخت قسمت A (شکل ۲)، ابتدا به طراحی کاواک اصلی شتاب‌دهنده، سپس به فناوری ساخت و اندازه‌گیری‌های مربوط به کاواک اصلی، پس از آن به طراحی، ساخت و اندازه‌گیری‌های خوشه‌ساز و در پایان به طراحی ساخت و اندازه‌گیری‌های مربوط به تزویج‌گرها می‌پردازیم. شرح طراحی و ساخت منبع مولد توان بسامد رادیویی (قسمت R شکل ۲)، دستگاه‌های تشخیصی (قسمت T) و کنترل و ایمنی (قسمت C&S) به همین ترتیب گزارش می‌شود. در انتها، اندازه‌گیری‌های مشخصات باریکه خروجی را می‌آوریم.



مجموعه ترانس های ایزوله که در داخل محفظه روغن قرار می گیرند.

شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مدار ابتدایی تغذیه تفنگ الکترونی.

الکترومغناطیس در کاواکها است. این طول زمانی، در شتابدهنده خطی ساخته شده، قابل تنظیم و حداکثر $6\mu s$ است. این ساختار زمانی حداکثر ۲۶۶ بار در ثانیه تکرار می شود. داخل این ساختار زمانی، ذرات به صورت پیوسته خارج نمی شوند، و ریزساختاری با بسامد بسامد رادیویی یعنی 3 GHz دارند. باریکه خروجی از تفنگ گرمایونی و ورودی به شتابدهنده، باریکه ای پیوسته است. برای این که الکترون های ورودی به ساختار تلف نشوند و جریان خروجی از شتابدهنده افزایش یابد، از ساختارهایی به نام خوشه ساز استفاده می شود. نقش این ساختارها این است که با پیش انداختن ذراتی که دیر به کاواک های شتابدهی می رسند و عقب انداختن ذراتی که زودتر به کاواکها رسیده اند، همزمان رسیدن این الکترون ها به کاواکها را تضمین کنند. به این ترتیب الکترون ها با فاز مناسب بسامد رادیویی به کاواکها می رسند و شتاب می گیرند.

سازوکار خوشه سازی در پیش خوشه ساز به این صورت است که یک میدان الکتریکی طولی با بسامد رادیویی شتابدهنده در کاواک پیش خوشه ساز ایجاد می شود. این میدان الکتریکی، بر سرعت الکترون ها اثر می گذارد و بسته به این که الکترون ها در چه فازی از موج الکترومغناطیسی وارد پیش خوشه ساز شده اند، سرعت آنها افزایش یا کاهش می یابد. الکترون هایی که زودتر وارد شده اند کند می شوند و سرعت الکترون هایی که دیرتر وارد شده اند افزایش می یابد [۱۵-۱۶].

الکترون با انرژی eU وارد کاواک پیش خوشه ساز می شود.



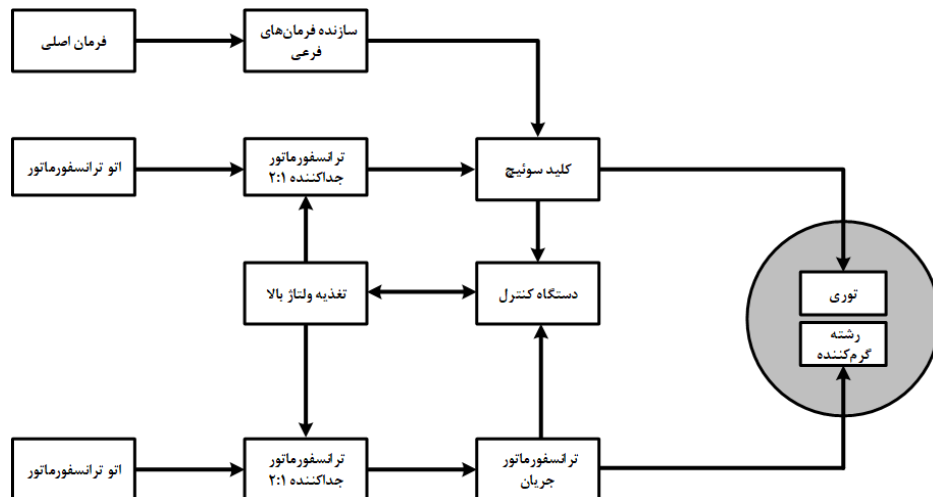
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کاتد (تصویر راست) و آند (تصویر چپ) تفنگ الکترونی.

خلاء داخل محفظه این تفنگ باید در حدود یا بهتر از 10^{-7} torr باشد که سعی کردیم در طول آزمایش ها در همین حدود باشد. شکل ۴ کاتد این تفنگ و آند آن را نشان می دهد. روی سطح کاتد، یک توری ظریف قرار دارد که به کمک آن می توان باریکه الکترون را قطع و وصل کرد. از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا برای تغذیه این تفنگ استفاده شد.

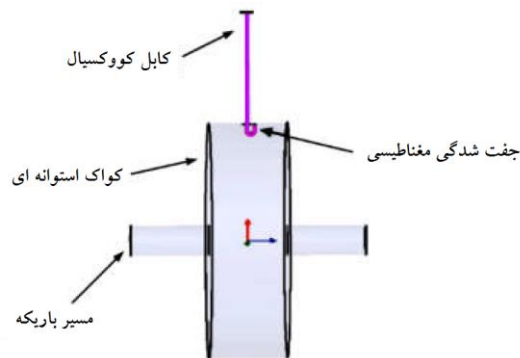
همچنین برای تغذیه فیلمان و توری این تفنگ از اتوترانسفورماتورهایی که با ترانس های جدا کننده از منبع تغذیه ولتاژ بالا مجزا شده بودند، استفاده شد. در ابتدا، از مدار تغذیه تفنگ (شکل ۴) استفاده شد. به این ترتیب، ولتاژ مناسب برای کنترل جریان تفنگ از طریق اعمال ولتاژ به توری به دست آمد. در مدار نهایی تغذیه توری تفنگ الکترونی، تپ تریگر مدولاتور لامپ کلاسترون، با تنظیم زمانی مناسب از طریق فیبر نوری به مداری که در ولتاژ بالا بود متصل و ولتاژ مناسب به توری تفنگ اعمال می شد (شکل ۵). به این ترتیب فقط در زمانی که موج الکترومغناطیسی در شتابدهنده منتشر می شد، باریکه الکترون هم به آن تزریق می شد. جزییات زمان بندی تریگرهایی که به قسمت های مختلف شتابدهنده اعمال شده اند، بعداً در این مقاله می آیند.

۵. پیش خوشه ساز

باریکه الکترون خروجی از شتابدهنده خطی، پیوسته نیست. باریکه خروجی دو ساختار زمانی دارد. یک ساختار زمانی بزرگ (بزرگ تپ یا ماکروتپ) مربوط به طول زمان تولید و انتشار موج



شکل ۶. طرح مدار تغذیه و کنترل تفنگ الکترونی.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره کواک پیش‌خوشه‌ساز.

موج ایستا است که توسط یک آنتن حلقه‌ای و با تزویج مغناطیسی تحریک می‌شود. محاسبات الکترومغناطیسی کواک و حلقه تزویج موج، با نرم‌افزار سی‌اس‌تی استودیو سوئیت^۱ [۱۷] انجام و شبیه‌سازی شد. شکل ۷ طرحواره این کواک را نشان می‌دهد و در جدول ۵ اندازه‌های این کواک را آورده‌ایم.

اندازه‌های بهینه حلقه تزویج موج الکترومغناطیس به داخل کواک، با دو روش مختلف محاسبه شدند و هر دو روش نتایج یکسانی به دست دادند که در جدول ۲ آورده‌ایم.

برای کاهش هزینه‌های ساخت، کواک از جنس آلومینیوم ساخته شد و از اورینگ‌هایی از جنس وایتون^۲ برای آب‌بندی

داخل کواک موجی ایستا با دامنه U_c ایجاد می‌کنیم. فرض کنیم که الکترونی با سرعت $\beta_0 v_0/c$ در لحظه t_1 با فاز φ_1 وارد کواک پیش‌خوشه‌ساز و با سرعت β خارج و پس از طی فاصله سوق D ، با فاز φ_2 وارد خوشه‌ساز شتاب‌دهنده می‌شود. انرژی این الکترون در خروج از پیش‌خوشه‌ساز برابر است با:

$$eU = e(U_c + U_c \sin \varphi_1)$$

اگر φ_0 فاز الکترون مرکزی - یعنی الکترونی که تحت اثر میدان صفر وارد کواک شده - در انتهای مسیر سوق و λ_0 طول موج بسامد رادیویی داخل کواک باشد، می‌توانیم بنویسیم:

$$\varphi_2 - \varphi_0 = \varphi_1 + \frac{2\pi D}{\beta_0 \gamma_0} (\beta / \beta_0 - 1)$$

پیش‌خوشه‌ساز شتاب‌دهنده خطی، کواکی شامل یک سلول

۱. CST Studio Suit

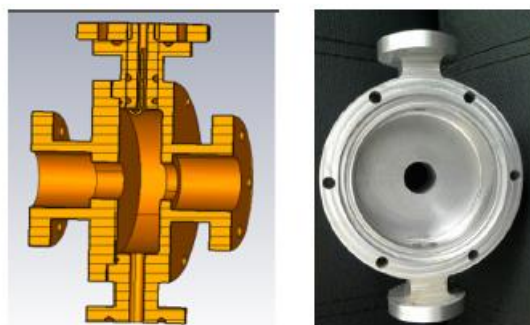
۲. Viton

جدول ۱. کمیت‌های ساختار پیش خوشه‌ساز.

کمیت‌های ساختار	بر حسب mm
شعاع خارجی کابل هم‌محور	۱/۱۵۱۲
شعاع داخلی کابل هم‌محور	۰/۵
طول کابل هم‌محور	۴۰
شعاع محفظه استوانه‌ای کاواک	۳۸/۸
طول محفظه استوانه‌ای	۲۰
شعاع لوله باریکه	۵
طول لوله باریکه	۲۰
ضریب ثابت دی‌الکتریکی داخل کابل	۱

جدول ۲. اندازه‌های حلقه تزویج.

اندازه‌ها	mm
طول حلقه در راستای محور کاواک	۰/۲
ارتفاع حلقه داخل کاواک	۲/۶۱
شعاع خمیدگی حلقه داخل کاواک	۰/۸۵



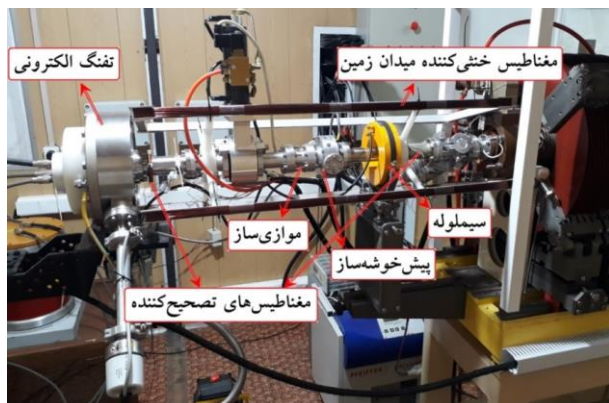
شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کاواک پیش‌خوشه‌ساز. سمت چپ نقشه مهندسی، وسط تصویر کاواک و سمت راست حلقه تزویج.

خلاً استفاده شد. یک قطعه درونی^۱ به همراه آنتن برای تزریق موج الکترومغناطیس به کار رفت. این قطعه را می‌توان حول محورش، جهت تنظیم بهترین تزویج آنتن و کاواک، چرخاند و این دوران با حفظ خلاً انجام می‌گیرد. شکل ۸، نقشه مهندسی این کاواک، محفظه آن و حلقه تزویج موج را نشان می‌دهد. پس از ساخت، پیش‌خوشه‌ساز با تحلیلگر برداری شبکه^۲ اندازه‌گیری و تزویج آنتن تنظیم شد. با توجه به این که کاواک

از آلومینیوم ساخته شده، ضریب کیفیت آن تقریباً برابر ۴۰۰۰ است. اثر این پیش‌خوشه‌ساز بر باریکه الکترون، با برنامه ASTRA شبیه‌سازی شد. این محاسبه نشان داد که گیراندازی الکترون‌ها از ۶۷٪، بدون استفاده از خوشه‌ساز به ۹۱٪ با استفاده از آن افزایش می‌یابد. کاواک دیگری دقیقاً با همین مشخصات برای اندازه‌گیری اثر خوشه‌سازی ساخته شد. باریکه خوشه شده در عبور از خوشه‌ساز دوم، موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌کند که با تحلیلگر طیف قابل اندازه‌گیری است. به این ترتیب کارایی پیش‌خوشه‌ساز آزمایش شد.

۱. Plunger

۲. Vector Network Analyzer



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) خط تزریق باریکه از تفنگ الکترونی تا خوشه ساز.



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) جابه جا کننده باریکه.

مغناطیسی زمین است و اثر میدان زمین را روی باریکه خنثی می‌کند. این دویچه را می‌توان حول محور شتاب‌دهنده دوران داد تا دقیقاً اثر هر دو مولفه میدان مغناطیسی زمین (مولفه شمالی - جنوبی و مولفه عمود بر آن) خنثی شود.

۷. کاواک اصلی شتاب‌دهنده

کاواک اصلی شتاب‌دهنده، موجبری استوانه‌ای است. در موجبر استوانه‌ای ساده، سرعت فاز موج الکترومغناطیس از سرعت نور بیشتر است؛ بنابراین استفاده از چنین موجبری برای شتاب‌دادن به ذرات ممکن نیست. برای کاهش سرعت فاز موج الکترومغناطیس، داخل موجبر استوانه‌ای صفحات^۴ سوراخ‌دار (دیسک) قرار می‌گیرد. به این ترتیب ساختاری تناوبی شکل می‌گیرد. طرح چنین ساختاری را در شکل ۱۱ نشان داده‌ایم. در

۶. خط تزریق باریکه الکترون از تفنگ تا خوشه‌ساز

شکل ۹ خط تزریق باریکه از تفنگ الکترونی تا خوشه ساز را نشان می‌دهد. طول این خط باریکه از کاتد تفنگ تا ورودی خوشه‌ساز تقریباً یک متر است. انرژی الکترون‌ها از تفنگ تا خوشه‌ساز، کوچک و در حدود ۳۵ keV است. هر میدان مغناطیسی به شدت بر این الکترون‌ها اثر می‌گذارد و مسیر آنها را تغییر می‌دهد. هرگونه تغییر در مسیر ذرات نسبت به مسیر محوری، کیفیت باریکه و در نتیجه کارایی شتاب‌دهنده را به شدت پایین می‌آورد. بنا بر این چند میدان مغناطیسی در مسیر ایجاد می‌شود تا کنترل لازم بر مسیر الکترون‌ها ایجاد شود.

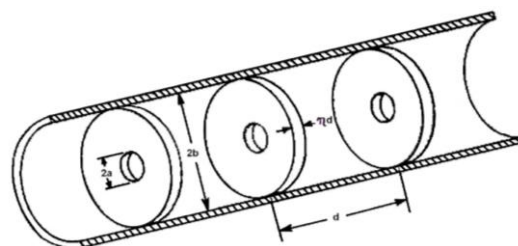
در ابتدا لازم است که محور گسیل الکترون‌ها در تفنگ، هم راستا با محور اصلی شتاب‌دهنده باشد. به این منظور، یک جابه‌جاکننده باریکه^۱ پس از تفنگ قرار داده شد (شکل ۱۰). پس از جابه‌جاکننده، یک شیر اتوماتیک^۲ جهت جداسازی تفنگ از بقیه شتاب‌دهنده قرار گرفته است تا در صورت لزوم خلأ تفنگ الکترونی و خلأ شتاب‌دهنده از یکدیگر جدا شوند. پس از شیر اتوماتیک و تقریباً در فاصله ۱۵ سانتی‌متری آن، روزنه‌ای به قطر ۳ میلی‌متر برای کاهش اندازه باریکه قرار دارد. به این ترتیب گسیلندگی باریکه کاهش می‌یابد و باریکه ورودی به شتاب‌دهنده موازی‌تر می‌شود. به این دلیل، این قسمت «موازی‌ساز» نامیده شده است. پس از آن، پیش‌خوشه‌ساز نصب شده، که شرح آن در بخش ۵ آمده است. پس از پیش‌خوشه‌ساز، یک سیملوله برای کانونی کردن باریکه قرار گرفته که به کمک آن باریکه ورودی به خوشه‌ساز متمرکز می‌شود. پس از این سیملوله، یک جابه‌جا کننده باریکه دیگر نیز قرار دارد. به منظور جبران میدان مغناطیسی زمین که می‌تواند حدود دو تا سه سانتی متر باریکه الکترون کم‌انرژی را منحرف کند، یک زوج پیچه^۳ هلمهولتز^۳ با مقطع مستطیلی بالا و پایین خط باریکه قرار گرفته است که روی محور خود، میدان مغناطیسی تقریباً یکنواختی به وجود می‌آورند که مساوی و در جهت مخالف میدان

۱. Steerer

۲. Automatic Gate Valve

۳. Helmholtz

۴. Disk



شکل ۱۱. طرح موجبر استوانه‌ای بارگذاری شده با دیسک.

انجام می‌دهد در حالی که منظور ما، طراحی و ساخت کاواک موج رونده بود. با این حال، با توجه به این که موج ایستا از برهم‌نهی دو موج رونده تشکیل می‌شود، می‌توان به آسانی مولفه‌های موج‌های رونده را از آن استخراج کرد. در ابتدای شبیه‌سازی، برای تسریع در محاسبه فقط ۴ سلول در نظر گرفته شد زیرا تعداد مدهای کاواک برابر تعداد سلول‌ها به علاوه یک است. ۴ سلول حداقل تعداد سلول‌هایی است که انتشار مد $\pi/2$ در آن میسر است. شکل ۱۲، میدان الکتریکی داخل این ۴ سلول را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، میدان الکتریکی روی محور نیم سلول اول، بزرگ و بیشینه و در سلول بعدی کوچک و تقریباً برابر صفر است و در سلول بعدی بزرگ و کمینه می‌شود. در سلول بعدی مجدداً میدان الکتریکی کوچک و تقریباً برابر صفر است و در نهایت در نیم سلول نهایی میدان الکتریکی بزرگ و بیشینه می‌شود. این تصویر میدان در یک لحظه است. این تصویر میدان در کاواک منتشر می‌شود و در هر ربع دوره تناوب به اندازه یک سلول جابه‌جا می‌شود.

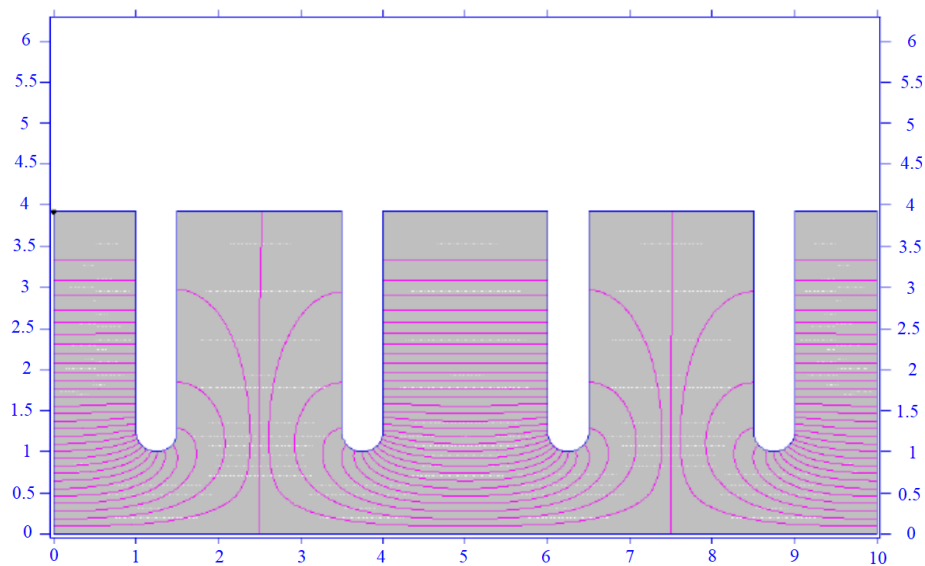
در شکل ۱۳ میدان محاسبه شده روی محور کاواک را نشان داده‌ایم. این تصویر یک لحظه از میدان است. این میدان در زمان منتشر می‌شود.

شکل ۱۴ ابعاد کاواک را نشان داده‌ایم. این ابعاد باید در برنامه شبیه‌سازی تنظیم شوند. از این ابعاد، طول هر سلول برابر یک چهارم طول موج انتخاب شده است (2.5 cm) و ضخامت صفحات هم برابر 0.5 cm انتخاب شده است. شعاع داخلی سلول و روزنه با توجه به بسامد مورد نظر تعیین شده‌اند. پس از تعیین اندازه سلول‌ها، لازم است که دقت لازم در ساخت نیز تعیین شود. دقت در هریک از ابعاد سلول‌ها اثر متفاوتی بر بسامد نوسانی دارد و لازم است که بسامد تک تک سلول‌ها تغییر آنچنانی نداشته باشد. ابعاد محاسبه شده در شبیه‌سازی را در جدول ۳ آورده‌ایم. دقت ابعاد که در جدول ۳ آمده‌است، مربوط به دقت ساخت و تراشکاری کاواک است. جزییات محاسبات و شرح مبسوط آن در مراجع [۱۹ و ۲۳] آمده است. برای محاسبه دقت‌های مورد نیاز در ساخت، می‌توان

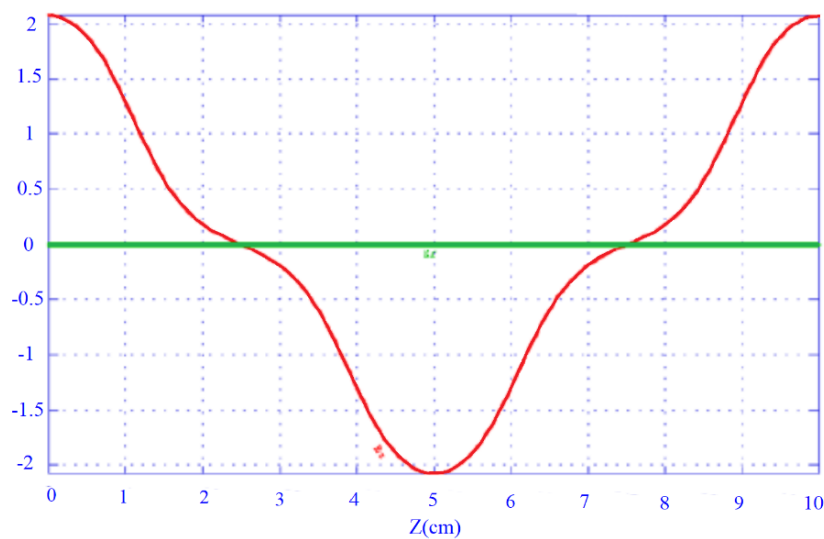
این ساختار، هر سلول یک کاواک مستقل است که از طریق روزنه وسط به سلول بعدی تزویج شده است. اندازه‌های این کاواک باید طوری محاسبه شود، که موج الکترومغناطیس با بسامد مورد نظر، در آن منتشر شود و شرایط تشدید در آن برقرار باشد [۱۸، ۱۹ و ۲۳]. در این کاواک، سرعت الکترون‌ها تقریباً ثابت و برابر سرعت نور است، بنا براین سلول‌های این کاواک همگی یکسان هستند و طراحی آن ساده‌تر از خوشه‌ساز است که سرعت الکترون‌ها مرتب در آن افزایش می‌یابد. از آنجا که منبع تولید امواج الکترومغناطیسی که تهیه شده بود، امواج را در باند S تولید می‌کرد، مانند بیشتر شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، طراحی موجبر در همین باند بسامدی انجام گرفت. بسامد مورد استفاده در شتاب‌دهنده ما برابر $f = 2997.9\text{ MHz}$ متناظر با طول موج $\lambda = 10\text{ cm}$ انتخاب شد. اندازه کمیت بعدی که می‌توان انتخاب کرد، طول سلول‌ها است (فاصله d در شکل ۱۱). این طول باید طوری انتخاب شود که طول موج برابر مضرب صحیحی از آن باشد. این مضرب صحیح ۳ یا ۴ انتخاب می‌شود؛ زیرا نشان داده شده که برای فرایند شتاب‌دهی بهینه، این طول باید مساوی $d = \lambda / 3.57$ باشد [۴]. با توجه به نکته بالا، در شتاب‌دهنده ما، این مضرب برابر ۴ انتخاب شده، یعنی که موج در هر سلول نسبت به سلول قبلی اختلاف فاز $\pi/2$ دارد.

پس از این انتخاب‌های اولیه، می‌توان به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی، به طراحی کاواک پرداخت. در مرحله اول از نرم‌افزار دوبعدی پواسون/ سوپرفیش^۱ استفاده شد و در مراحل بعد نرم‌افزارهای سه‌بعدی برای طراحی به کار رفت. نرم‌افزار پواسون/ سوپرفیش محاسبه را برای موج ایستا داخل کاواک

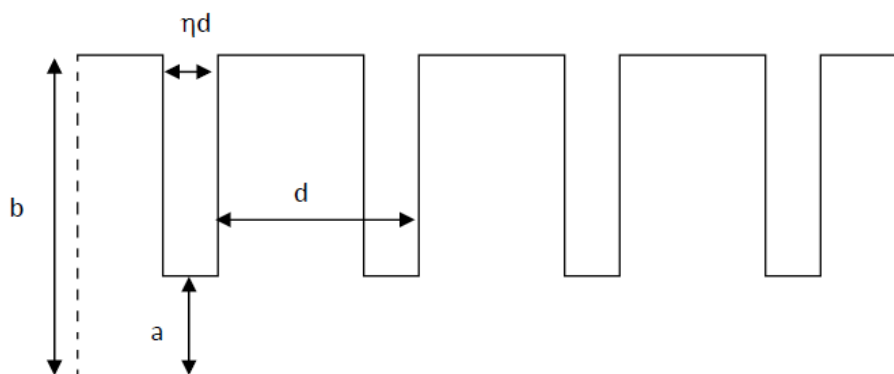
۱. Poisson/Superfish



شکل ۱۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) میدان الکتریکی داخل ۴ سلول کاواک در مد $\pi/2$.



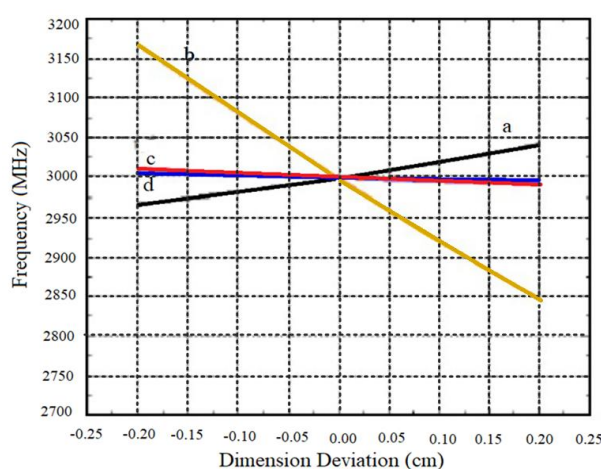
شکل ۱۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) میدان الکتریکی روی محور کاواک. به تغییرات میدان در طول سلول‌ها توجه کنید.



شکل ۱۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ابعاد سلول‌های کاواک اصلی شتاب‌دهنده.

جدول ۲. ابعاد کاواک اصلی شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی.

شرح کمیت	مقدار
شعاع داخلی دیسک‌ها a	1 ± 0.001 cm
شعاع داخلی موجبر b	3.925 ± 0.001 cm
فاصله دیسک‌ها d	2.5 ± 0.001 cm
ضخامت دیسک‌ها ηd	0.5 ± 0.001 cm
η	۰/۲
نسبت سرعت فاز به سرعت نور $\beta=v/c$	۱
بسامد تشدید f	۲۹۹۷/۹۲۵ MHz
ضریب کیفیت Q	۱۰۹۰۰
ضریب شایستگی r/Q	۲۵۴ Ohm
ضریب زمان عبور (Transit Time Factor)	۰/۸۸۵



شکل ۱۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اثر تغییرات ابعاد در بسامد تشدید.

بسامدی کوچک‌تر از $\Delta f/5$ باشد. از آنجا که، $Q \approx 10000$ و $f \approx 3000$ MHz است، مقدار تغییر بسامد قابل قبول برابر 60 kHz به دست می‌آید. با توجه به مقادیر بالا، کیفیت ساخت قابل دسترسی، در مورد بعضی از ابعاد، رضایت‌بخش نیست. لذا لازم است که پس از ساخت کامل، کاواک کوک شود و بسامد تشدید داخل تک تک سلول‌ها تنظیم شود. در بخش بعدی این مقاله، در این باره توضیح می‌دهیم.

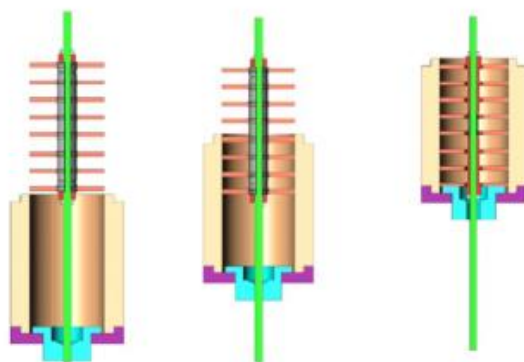
کمیت دیگری که باید محاسبه شود، سرعت گروه داخل کاواک است. زمان پر شدن کاواک از موج الکترومغناطیس به این سرعت بستگی دارد. برای محاسبه باید مقدار $d\omega/dk$ را محاسبه کرد که در این رابطه $\omega = 2\pi f$ و k عدد موج است. به این منظور، بسامد تشدید برای 5 مد نوسانی $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ و π محاسبه شدند و با پرزاش یک منحنی بسامد برحسب عدد موج و محاسبه

تغییرات بسامد تشدید را که تابعی از ابعاد کاواک است، برحسب تغییرات این ابعاد بسط داد:

$$f \approx f_0 + \alpha_a \Delta a + \alpha_b \Delta b + \alpha_d \Delta d + \alpha_{\eta d} \Delta(\eta d)$$

در این رابطه f بسامد تشدید کاواک برای ابعاد جدول ۳ و Δa و Δb و Δd و $\Delta(\eta d)$ تغییرات این ابعاد برحسب مقادیر جدول ۳ هستند. شکل ۱۵ اثر یک به یک تغییرات ابعاد را نشان می‌دهد [۲۴].

همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین تأثیر مربوط به شعاع کاواک است. مقادیر Δa ، Δb و Δd و $\Delta(\eta d)$ به ترتیب برابرند با $177/3$ ، $787/8$ ، $36/0$ و $53/2$ MHz/cm دقت‌های ساخت دست یافتنی به تغییرات بسامدی ± 180 ، ± 800 ، ± 40 و ± 55 kHz می‌انجامند. ضریب کیفیت کاواک $Q = \Delta f/f$ معیار تعیین دقت ساخت است. لازم است کاواک طوری ساخته شود که تغییر



شکل ۱۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) روش جاگذاری دیسک‌ها داخل کاواک.

برای اطمینان از توانایی ساخت کاواک با این روش، ابتدا محاسبات مکانیکی و تنش با نرم‌افزار ANSYS انجام گرفت [۲۵]. تنش‌ها، میزان انقباض پس از سرد شدن، و تغییر شکل دیسک و لوله کاواک پس از رسیدن به دمای محیط محاسبه شدند [۲۴]. قطر دیسک‌ها پس از انقباض در دمای ۱۹۵- درجه برابر $78/393 \text{ mm}$ است که از قطر داخلی لوله کاواک کوچک‌تر است که می‌توان آنها را داخل لوله قرار داد. سپس برای اطمینان بیشتر و آزمون روش جاگذاری دیسک‌ها، کاواکی با ۸ سلول ساخته شد. ابزار مخصوصی جهت جاگذاری دیسک‌ها در کاواک ساخته شد. شکل ۱۶ روش جاگذاری دیسک‌ها در کاواک ۸ سلولی را نشان می‌دهد.

پس از موفقیت در جاگذاری دیسک‌ها در کاواک ۸ سلولی، با همین روش جاگذاری دیسک‌ها در کاواک اصلی شتاب‌دهنده، شامل ۲۴ دیسک انجام گرفت. پس از شستشوی دیسک‌ها با آب مقطر و مایع صابون، فرایند چربی‌زدایی در بخار تتراکلرید کربن انجام گرفت. در شکل ۱۶ (سمت راست) دیسک‌ها و (سمت چپ) دیسک‌ها که در فاصله مناسب و دقیق از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این فاصله توسط ابزار ویژه‌ای که به این منظور ساخته شده ثابت شده است. شکل ۱۸ کاواک را پس از نصب دیسک‌ها نشان می‌دهد. جزییات بیشتر در مورد شیوه ساخت کاواک در مراجع [۱۹، ۲۴ و ۳۶] آمده است.

پس از ساخت کاواک لازم بود که بسامد تشدید هر سلول، تغییرات میدان الکتریکی در طول کاواک، اختلاف فاز هر سلول کاواک با سلول بعدی و سایر مشخصات الکترومغناطیسی کاواک ساخته شده اندازه‌گیری شود و در صورت وجود

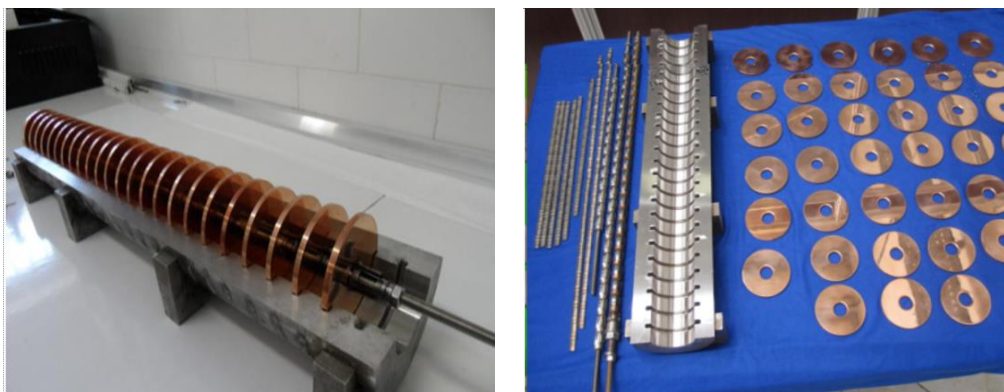
مشتق آن در مد $\pi/2$ سرعت گروه به دست آمد [۱۹]. سرعت گروه در کاواک ما برابر است با: $v_g/c = 0.114$.

۸. ساخت کاواک شتاب‌دهنده

ساخت کاواک شتاب‌دهنده یکی از چالش‌های اصلی در این پروژه بود. امروز روش متعارف ساخت کاواک، روش لحیم‌کاری^۱ است. اما به نظر می‌رسد که برای ساخت کاواک با این روش به مس بهترین کیفیت خالص بسیار رسانا و بدون اکسیژن^۲ نیاز است که ما در دسترس نداشتیم و از منابع داخلی قابل تامین نبود. بنا براین ناچار بودیم از روش‌های دیگر ساخت استفاده کنیم که با مس بهترین کیفیت بازار ایران سازگار باشد. روش‌های ساخت بسیار متنوع و متفاوتی برای ساخت کاواک وجود دارد که در مرجع [۹] به تعدادی از آنها اشاره شده است. پس از آزمون برخی از این روش‌ها، به این نتیجه رسیدیم که روشی که در شتاب‌دهنده استنفورد برای ساخت کاواک به کار رفته، مناسب‌ترین روش در دسترس است [۷]. در این روش بدنه استوانه‌ای کاواک جداگانه ساخته می‌شود و سپس دیسک‌ها که جداگانه ساخته شده و روی ابزار خاصی سوار شده‌اند، پس از سرد شدن در دمای ازت مایع و انقباض حرارتی، درون استوانه قرار می‌گیرند تا هم‌دم شوند. سپس ابزار نگهدارنده بیرون آورده می‌شود. این روش انقباض حرارتی نامیده می‌شود و روش شناخته شده‌ای برای ساخت برخی قطعات است.

۱. Brazing

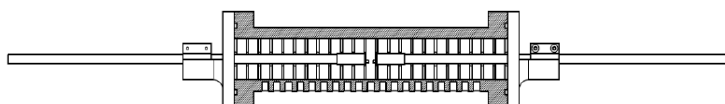
۲. OFHC, Oxygen Free High conductivity Copper



شکل ۱۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) دیسک‌ها و قطعات ابزار برای ثابت نگهداشتن آنها هنگام نصب در کاواک.



شکل ۱۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کاواک پس از نصب دیسک‌ها. به حفره‌هایی که روی بدنه کاواک برای تنظیم بسامد ایجاد شده توجه کنید.



شکل ۱۹. زائده‌های غوطه‌ور در کاواک. فقط یک سلول تحت تأثیر موج الکترومغناطیس قرار می‌گیرد.

الکترومغناطیس تحریک و پاسخ آن اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱۹). به این ترتیب بسامد تشدید سلول اندازه‌گیری می‌شود. از این روش برای تنظیم کاواک‌های شتاب‌دهنده SLAC استفاده شده بود [۷].

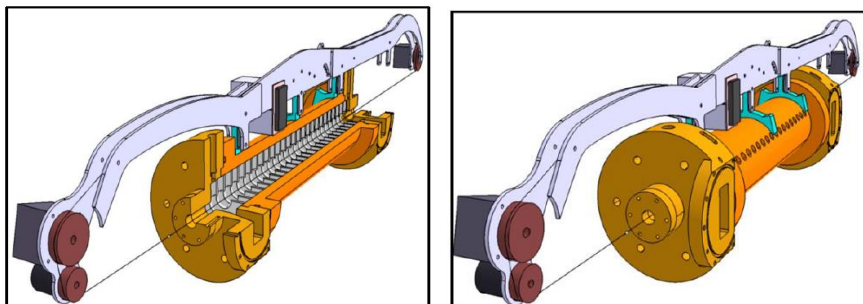
روش دیگر، روش اختلالی اسلیتر^۳ نامیده می‌شود. در این روش، جسم دی‌الکتریک کوچکی (معمولاً به شکل گوی یا استوانه کوچک) در محور استوانه و داخل یکی از سلول‌ها قرار می‌گیرد و تغییرات بسامد تشدید در مد مشخصی، برحسب موقعیت آن در طول کاواک، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود [۲۶].

اختلاف بین مقادیر طراحی و اندازه‌گیری شده، سلول‌ها به اصطلاح کوک^۱ می‌شوند تا به مقادیر طراحی نزدیک شویم. چنانچه تغییرات در سلولی اصلاً یا به اندازه کافی امکان‌پذیر نباشد، لازم است که شبیه‌سازی حرکت باریکه الکترون در کاواک انجام پذیرد تا اثر این تغییر در کارکرد شتاب‌دهنده پیش‌بینی و با اعمال تغییرات دیگر اصلاح شود. لازم به توضیح است که این اندازه‌گیری‌ها در توان کم امواج بسامد بسامد رادیویی انجام می‌شوند و به آزمون‌های سرد موسومند. به طور کلی، دو روش برای این اندازه‌گیری‌ها به کار می‌رود. در روش اول، با دو زائده غوطه‌ور^۲، فقط یک سلول با موج

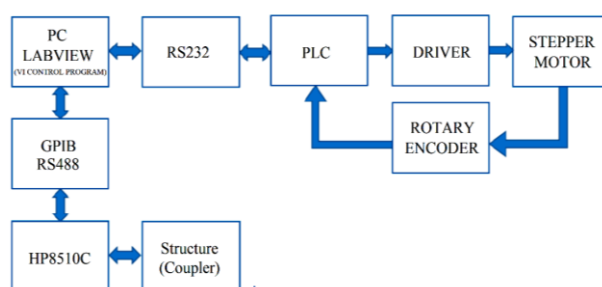
۱. Tune

۲. Plunger

۳. Slater



شکل ۲۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره دستگاه اندازه‌گیری میدان الکتریکی با مهره متحرک.



شکل ۲۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اجزای سیستم اندازه‌گیری.

الکتریکی را نشان می‌دهد.

در این دستگاه، مهره کوچکی (گوی یا استوانه) داخل کاواک حرکت می‌کند و میدان الکتریکی داخل کاواک را مختل می‌کند. اختلال حاصل از مهره در هر سلول، مشخص‌کننده وضعیت آن سلول در ساختار است. برای کنترل این سیستم از PLC^۴ و نرم افزار لب ویو^۵ استفاده شده است. همزمان با حرکت جسم و ضمن کنترل موقعیت و سرعت حرکت آن، لازم است اطلاعات لازم از دستگاه آنالیزور برداری شبکه خوانده و ذخیره شود. این کار از طریق درگاه GPIB انجام شده است. شکل ۲۱ از تباط اجزای مختلف این اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. برای توضیحات بیشتر به مرجع [۱۹] مراجعه شود.

شکل ۲۲ دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد. در این شکل، خوشه‌ساز و تزویج‌گرها روی دستگاه سوار شده‌اند و اندازه‌گیری آنها انجام می‌شود.

شکل ۲۵ اختلاف بسامد تشدید سلول‌های کاواک اصلی شتابگر را با بسامد طراحی، پس از ساخت و قبل از کوک نشان

جزئیات محاسبات جابه‌جایی بسامد و ارتباط این جابه‌جایی با میدان الکتریکی و فاز موج در مراجع [۲۶ - ۳۰] آمده است. در سال ۲۰۱۲، ژیارو شی^۱ روش جدیدی برای اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف با دستگاه مهره متحرک^۲ پیشنهاد داد [۳۱] و [۳۲]. در این روش میزان بازگشت موج از جسم مختل‌کننده اندازه‌گیری می‌شود و بازگشت موج در هر سلول محاسبه و بسامد تشدید هر سلول و پیشروی فاز به دست می‌آید. روابط به تفصیل در مراجع فوق آمده است و در اینجا تکرار نمی‌شوند. از این روش آلسینی^۳ [۳۳] و همکاران برای کوک کردن کاواک باند C در مد $2\pi/3$ استفاده کردند ولی تاکنون گزارشی از استفاده از این روش برای کوک کاواک در مد $\pi/2$ مشاهده نکرده‌ایم.

برای اندازه‌گیری بسامد تشدید هر سلول و پیشروی فاز در آن، سیستم اندازه‌گیری مهره متحرک و الکترونیک آن ساخته شد. شکل ۲۰ طرحواره سیستم اندازه‌گیری نیم‌رخ میدان

۱. Jiaru Shi

۲. Bead pull measurement

۳. Alesini

۴. Programmable Logical Control

۵. LabView



شکل ۲۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) دستگاه اندازه گیری مهره متحرک.



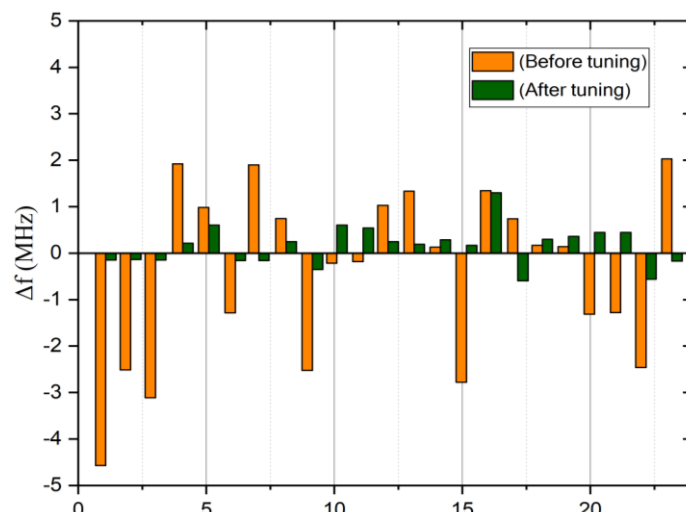
شکل ۲۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) برخی از ابزارهایی که برای ایجاد تغییر شکل در جدار داخلی سلول‌ها ساخته شدند.



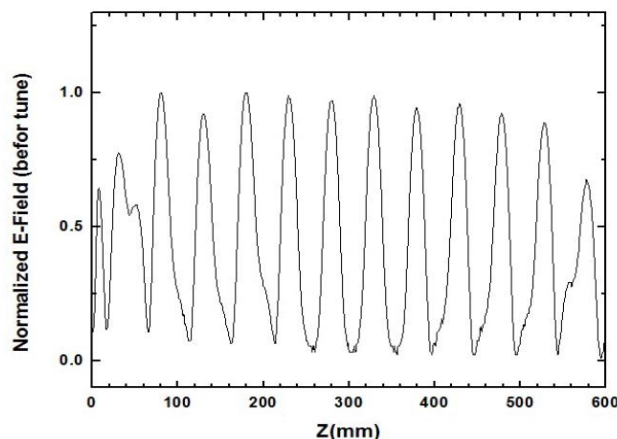
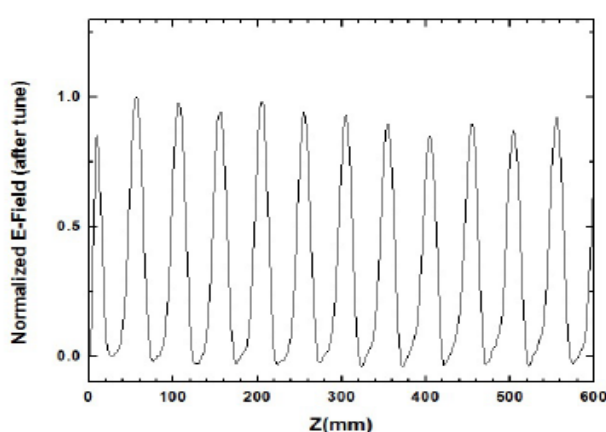
شکل ۲۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمونه‌ای از تغییر شکل جدار داخلی سلول.

داخل سلول کاهش و بسامد تشدید آن افزایش می‌یابد. شرایط آرمانی این است که بسامد تشدید سلول‌ها قبل از کوک، همگی کمی کمتر از بسامد طراحی باشند تا در اثر تغییر شکل جداره، به بسامد تشدید طراحی رسید. متأسفانه، همان طور که در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، بسامد تشدید برخی از سلول‌ها بیشتر از بسامد طراحی است و در این حالت کوک کردن بسامد این سلول‌ها ممکن نیست. با این حال،

می‌دهد. روی هر سلول و در وسط طول آن، سه (یا چهار حفره) روی جداره ایجاد شده طوری که در آن نقاط ضخامت مسی جداره تا ۲ تا ۳ میلی‌متر کاهش می‌یابد. با اعمال فشار در این نقاط به کمک ابزاری که به این منظور ساخته شده، (به شکل ۲۳ نگاه کنید)، تغییر شکلی در جداره داخلی هر سلول به وجود می‌آید و بسامد تشدید تغییر می‌کند. شکل ۲۴ این تغییر شکل را در یک مورد نشان می‌دهد. در اثر این تغییر شکل، حجم



شکل ۲۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اختلاف بسامد تشدید سلول‌ها قبل و بعد از کوک با بسامد طراحی.



شکل ۲۶. نیم‌رخ میدان طولی الکتریکی، (سمت راست) قبل از کوک و (سمت چپ) بعد از کوک. (محور افقی موقعیت مهره در طول کاواک را نشان می‌دهد).

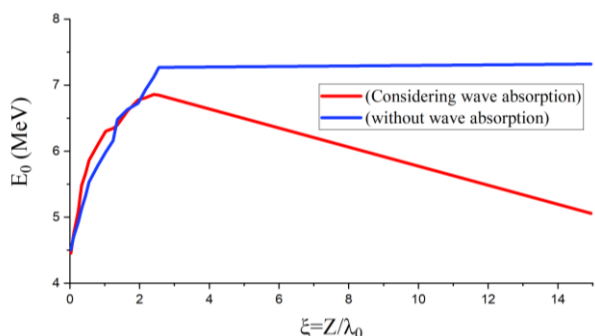
شکل ۲۶ نیم‌رخ میدان الکتریکی طولی در طول کاواک را، قبل و بعد از کوک نشان می‌دهد. مشخص است که پس از کوک سلول‌ها، ناهنجاری‌های میدان از بین رفته است و شکل میدان الکتریکی به آنچه که شبیه‌سازی پیش‌بینی کرده، نزدیک شده است.

۹. خوشه‌ساز^۱

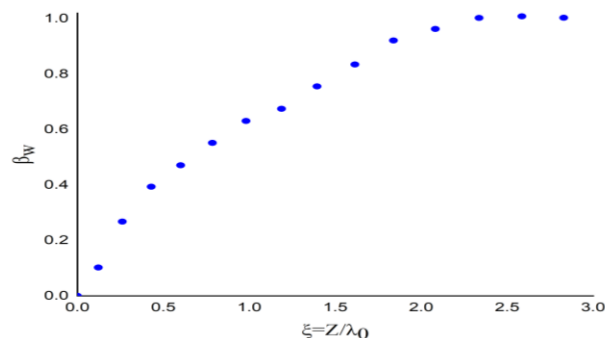
انرژی الکترون‌ها پس از خروج از تفنگ الکترونی، برابر ۳۵ keV و توزیع آن - بدون استفاده از پیش خوشه‌ساز - در زمان یکنواخت است. چنین الکترون‌هایی را نمی‌توان مستقیماً

تغییر بسامد و کوک کردن سلول‌ها در چند مرحله انجام گرفت. این شکل، اختلاف بسامدهای تشدید هر سلول قبل و بعد از کوک شدن را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، این اختلاف بسامد در اکثر سلول‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است. قبل از کوک، میانگین اختلاف بسامد $1/44 \text{ MHz}$ و انحراف معیار $1/86 \text{ MHz}$ بود که پس از کوک سلول‌ها به ترتیب به $0/5^\circ$ و $0/49 \text{ MHz}$ کاهش یافت. به همین ترتیب، میانگین پیشروی فاز و انحراف معیار آن که از کوک برابر ۸۵ و $15/9^\circ$ درجه بود، پس از کوک به ۸۸ و $6/5^\circ$ درجه کاهش یافت [۱۹]. با این مقادیر، شبیه‌سازی دینامیک باریکه نشان داد که عملکرد کاواک رضایت‌بخش است.

^۱. Buncher



شکل ۲۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) میدان الکتریکی در محور شتاب‌دهنده.



شکل ۲۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نسبت سرعت فاز به سرعت نور در طول خوشه‌ساز.

حرارتی)، ساخت این خوشه‌ساز به علت تغییر اندازه روزنه سلول‌ها دشوار به نظر می‌رسید. لذا طرح دیگری که ساده‌تر بود در نظر گرفته شد. در این طرح، طول خوشه‌ساز به حدود نصف کاهش یافت و شعاع روزنه صفحات هم ثابت گرفته شد.

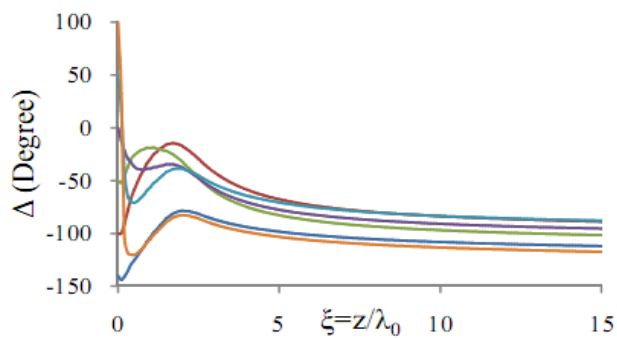
خوشه‌ساز مناسب برای شتاب‌دهنده خطی از نوع مورد نظر باید بیشترین بازه فاز ذرات ورودی را بپذیرد و ذرات خروجی کمترین بازه فاز را داشته باشند. نسبت این دو کمیت ضریب خوشه‌سازی نامیده می‌شود و باید بیشترین مقدار را داشته باشد. خوشه‌ساز ۱۵ سلول دارد. ۱۴ سلول میانی و دو نیم سلول در هر انتها [۳۷ و ۳۸]. سرعت فاز الکترون‌ها، در هر سلول افزایش می‌یابد تا در انتهای خوشه‌ساز به سرعت نور برسد (شکل ۲۷). دو و نیم سلول انتهایی، همان هندسه کاواک اصلی شتاب‌دهنده را دارند. سوراخ صفحه‌های سلول‌ها همگی برابر سوراخ مرکزی سلول‌های کاواک اصلی ($a=2 \text{ cm}$) و ضخامت صفحات در طول کل شتاب‌دهنده ثابت و برابر $\eta d = 0.5 \text{ cm}$ است.

روابط و جزییات محاسبات در مراجع فوق آمده است. میدان الکتریکی طولی در محور خوشه‌ساز و کاواک اصلی در شکل ۲۸ نشان داده شده است. شکل ۲۹ تغییرات فاز را در طول خوشه‌ساز نشان می‌دهد. در مرجع [۳۹]، نتایج شبیه‌سازی دینامیک باریکه در خوشه‌ساز آمده است (شکل ۳۰ و شکل ۳۱).

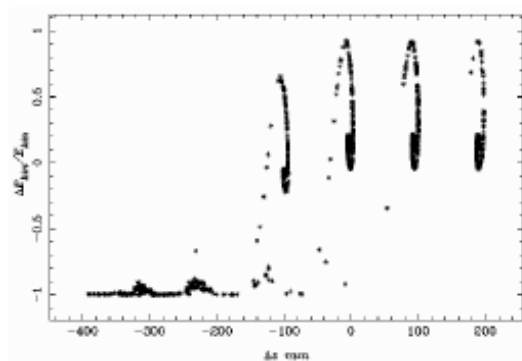
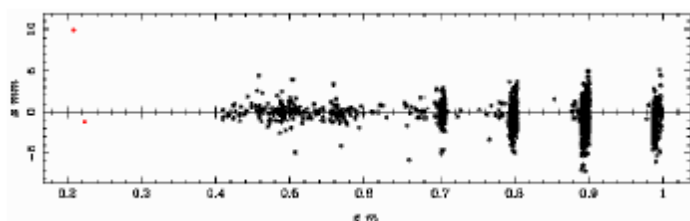
شکل ۳۲ نقشه خوشه‌ساز و ابعاد سلول‌ها را نشان می‌دهد. طبق این طراحی و نقشه، خوشه‌ساز به روش انقباض حرارتی، مطابق آنچه که در بخش ۷ آمده ساخته شد (شکل ۳۳ و شکل ۳۴). پس از ساخت، بسامد تشدید تک تک سلول‌ها با استفاده

در کاواک اصلی شتاب‌دهنده، شتاب داد. لازم است که در کاواک اصلی، سرعت الکترون‌ها تقریباً برابر سرعت انتشار امواج در کاواک یعنی سرعت نور باشند و به صورت تقریباً هم‌فاز وارد کاواک شوند تا بتوانند به اصطلاح روی موج سوار شوند و شتاب بگیرند. خوشه‌ساز که بین تفنگ الکترونی و کاواک اصلی قرار دارد، کاواکی است که نقشی سه‌گانه دارد. خوشه‌ساز وظیفه دارد که الکترون‌هایی را که به صورت یکنواخت وارد آن می‌شوند هم‌فاز و خوشه خوشه کند. سرعت الکترون‌های ورودی را در خروجی، تقریباً به سرعت نور برساند و بالاخره به آنان شتاب دهد. ساختار خوشه‌ساز شبیه به ساختار کاواک اصلی است، یعنی ساختار آن یک استوانه بارگذاری شده با صفحات سوراخدار همانند کاواک اصلی است. فقط فاصله صفحات به تدریج در آن تغییر می‌کند و برای حفظ بسامد تشدید، قطر سلول‌ها نیز تغییر می‌کند.

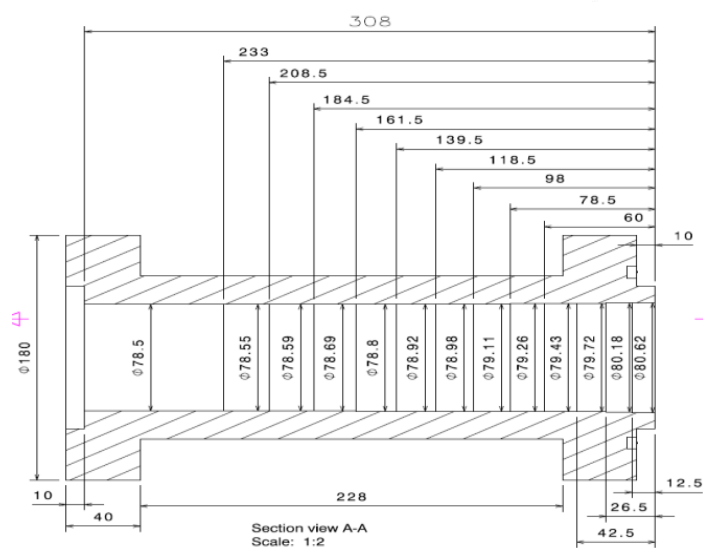
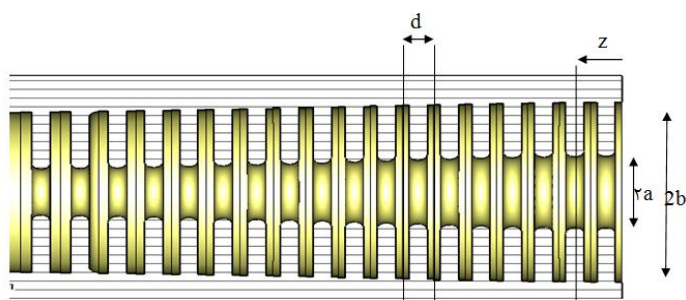
بر این اساس ابتدا خوشه‌سازی به طول 60 cm طراحی شد [۳۴ و ۳۵]. این خوشه‌ساز ۳۹ سلول دارد که طول آنها ابتدا تقریباً 0.5 cm و در انتها به $2/5 \text{ cm}$ (طول سلول‌های کاواک اصلی) می‌رسید. شعاع روزنه سلول‌ها هم متغیر بود و از 2 cm در ابتدا به 1 cm مطابق روزنه سلول‌های کاواک اصلی می‌رسید. این خوشه‌ساز شباهت زیادی به خوشه‌ساز طراحی SLAC [۷] داشت و قادر بود فاز ذرات ورودی را که به صورت یکنواخت وارد خوشه‌ساز می‌شدند (گستره فاز 360° درجه) به گستره فاز 50° درجه کاهش دهد. همچنین انرژی الکترون‌ها از 45 keV به 2 MeV می‌رسید. با توجه به روش ساخت انتخابی (انقباض



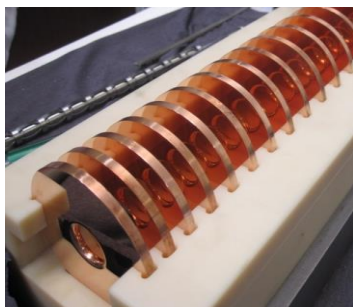
شکل ۲۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات فاز در طول کاواک.



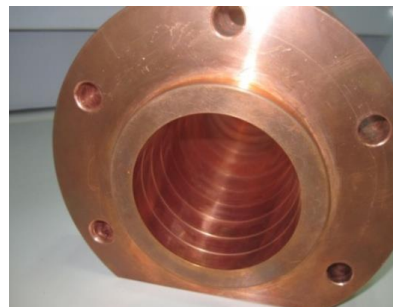
شکل ۳۰. فضای فاز طولی ذرات در خروجی از خوشه ساز. شکل ۳۱. خوشه‌ها در خروجی خوشه ساز.



شکل ۳۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نقشه (بالا) و اندازه‌های خوشه‌ساز پایین.

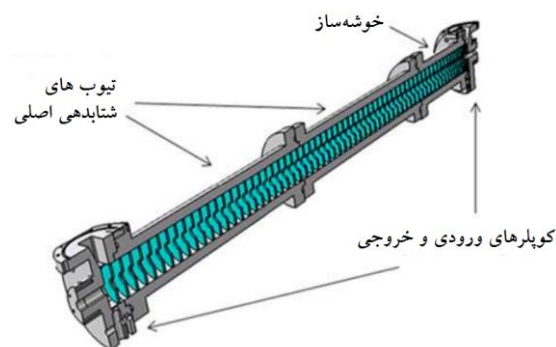


شکل ۳۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) صفحات روی پایه مخصوص با فاصله مشخص نصب شده‌اند.



شکل ۳۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) لوله کاواک خوشه‌ساز قبل از نصب صفحات (تغییر شعاع داخلی کاملاً مشخص است).

مولفه میدان الکتریکی طولی است. بنا براین، باید به کمک مبدل مد، میدان الکتریکی عرضی را به میدان الکتریکی طولی تبدیل کرد. تزویجگرها که در ورودی شتاب‌دهنده، پیش از خوشه‌ساز و در انتهای آن پس از کاواک‌ها نصب می‌شوند، چنین نقشی دارند. شکل ۳۵ محل نصب این تزویجگرها را در ابتدا و انتهای شتاب‌دهنده نشان می‌دهد.



شکل ۳۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) محل نصب تزویجگرهای شتاب‌دهنده خطی.

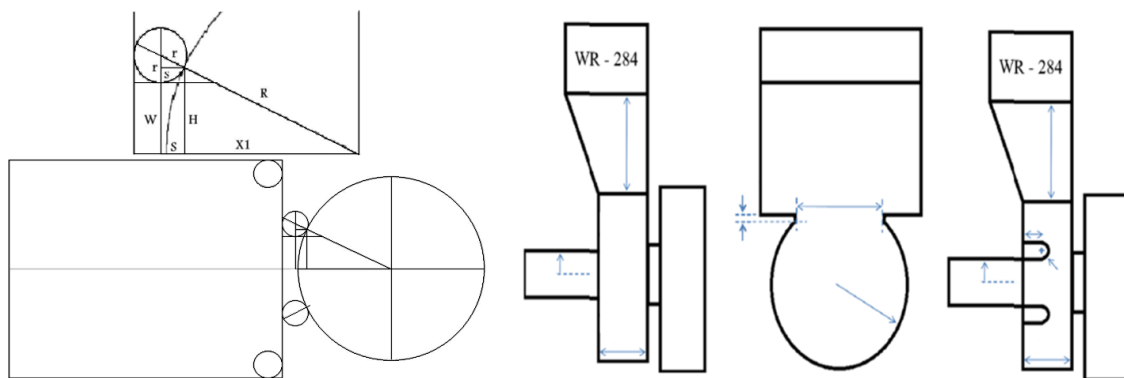
طراحی تزویجگر، پس از طراحی لوله اصلی شتاب‌دهنده و خوشه‌ساز انجام می‌شود. در واقع تزویجگرها، همان کاواک‌های ابتدایی و انتهایی شتاب‌دهنده هستند که روزه‌ای (دریچه تطبیق) در آنها ایجاد شده که موج ورودی از موجبر اصلی وارد آن و موج خروجی از آن خارج شود [۱۶-۱۷]. دریچه ورودی و خروجی نباید لبه‌های تیز داشته باشند تا موج بازگشتی کاهش یابد و تخلیه در توان بالا نیز به وجود نیاید. دریچه تطبیق دو پارامتر اصلی دارد: ضخامت دریچه و مقدار بازشدگی دریچه. این پارامترها طوری تنظیم می‌شوند که توان انتقالی بیشینه و شدت میدان الکتریکی کمینه باشد. طراحی و ساخت تزویجگرها پس از ساخت لوله اصلی و خوشه‌ساز انجام گرفت و از روش انقباض حرارتی برای ساخت آنها استفاده شده است.

طراحی تزویجگر ورودی پیچیده‌تر و دشوارتر از تزویجگر خروجی است. چون طول اولین کاواک خوشه‌ساز بسیار کوتاه و در حدود ۸ میلی‌متر است و ساخت تزویجگری با این کاواک کوچک مشکل به نظر می‌رسید، طول کاواک را افزایش دادیم و برای حفظ سرعت فاز در آن، دماغه‌ای به آن اضافه شد. شکل ۳۶ طرحواره تزویجگرها و پارامترهایی که برای طراحی استفاده شده را نشان می‌دهد.

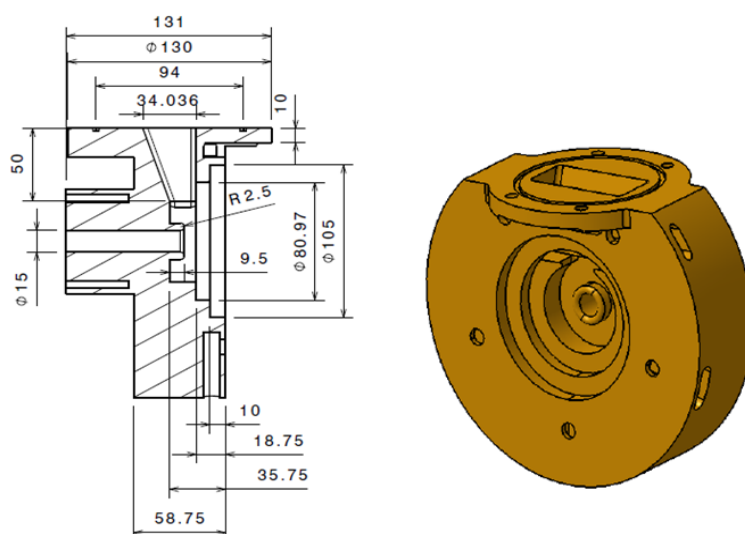
از روش ایزار غوطه‌ور اندازه‌گیری شد. میانگین بسامد سلول‌های خوشه‌ساز با طراحی $1/39 \text{ Mhz}$ و انحراف معیار آن $3/34 \text{ Mhz}$ بود. چون طول سلول‌های اولیه خوشه‌ساز کوتاه هستند، تعبیه سوراخ برای تنظیم بسامد روی آن دشوار بود. بنا بر این پس از شبیه‌سازی تصمیم براین شد که از خوشه‌ساز بدون تنظیم بسامد استفاده شود.

۱۰. تزویجگرها

در شتاب‌دهنده خطی موج رونده الکترون، موج الکترومغناطیس وارد ساختار شتاب‌دهنده می‌شود و پس از انتشار در کاواک‌های شتاب‌دهنده از آن خارج می‌شود. موج الکترومغناطیس تولیدی توسط لامپ کلاسترون، در موجبری مستطیلی تزریق می‌شود و به شتاب‌دهنده انتقال می‌یابد و در انتها باید از آن خارج شود. موج داخل موجبر، موجی با مولفه میدان الکتریکی عرضی است. آنچه در شتاب‌دهنده خطی به آن نیاز است، موجی با



شکل ۳۶. طرحواره تزویجگرها. سمت راست: مقطع تزویجگر، دوم سمت راست: نمای از روبرو، سوم سمت راست: مقطع تزویجگر خروجی. سمت چپ: پارامترهای مهم طراحی.

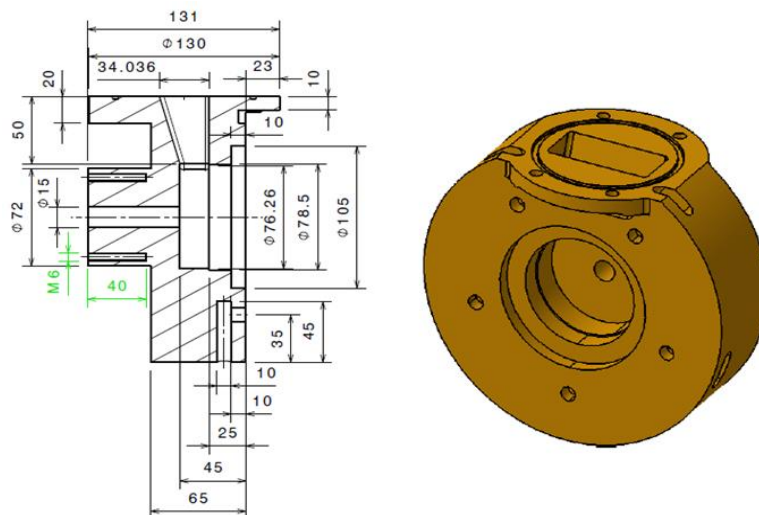


شکل ۳۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نقشه تزویجگر ورودی برای ساخت. به دماغه داخل توجه کنید. اندازه‌ها برحسب mm.

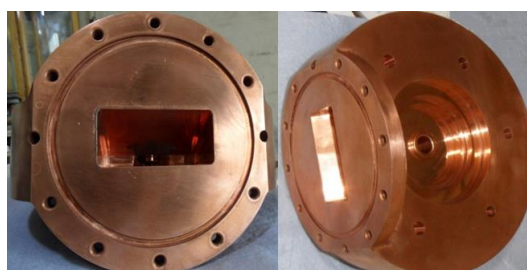
۳۸ ابعاد و طراحی کامل تزویجگرها را نشان می‌دهند. تزویجگرها پس از طراحی، طبق نقشه به طور دقیق ساخته شدند و با همان روش انقباض حرارتی، دیسک داخلی آنها جازده شدند. در شکل ۳۹، این تزویجگرها قبل از قراردادن دیسک‌ها مشاهده می‌شوند.

پس از جاگذاری دیسک‌ها، لازم است که تزویجگرها در بسامد درست کوک و اختلاف فاز آنها با کاواک بعدی اندازه‌گیری و تنظیم شوند. برای کوک کردن کاواک‌ها، برآمدگی کوچکی در سطح داخلی کاواک به وجود می‌آوریم و به این ترتیب بسامد تشدید کاواک افزایش می‌یابد. این کار چون برگشت ناپذیراست، باید با احتیاط و در چند مرحله انجام شود.

تزویجگرها تقارن استوانه‌ای دارند. بنا براین، به منظور ساده‌سازی و تسریع در محاسبات، برای طراحی، ابتدا از حفرة ورودی موج به تزویجگر صرف‌نظر شد و به کمک برنامه شبیه‌سازی سوپرفیش [۱۸] که برنامه‌ای ۲ بعدی است (تقارن استوانه‌ای)، ابعاد تزویجگر و میدان‌های الکتریکی (و مغناطیسی) داخل آن تعیین شدند. طول کاواک تزویجگر ورودی طوری انتخاب شد که میدان متوسط اعمال شده به الکترون‌ها مشابه کاواک اول خوشه‌ساز باشد. سپس از برنامه‌های شبیه‌سازی سه‌بعدی HFSS [۱۹] و CST [۲۰] برای طراحی کامل آن استفاده شد. روش طراحی و تعیین اندازه‌ها در مراجع [۱۶] و [۱۷] مفصلاً تشریح شده است. شکل ۳۷ و شکل



شکل ۳۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نقشه تزویجگر خروجی برای ساخت. اندازه‌ها بر حسب mm.



شکل ۳۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تزویجگر پس از ساخت و قبل از جاگذاری دیسک‌ها.



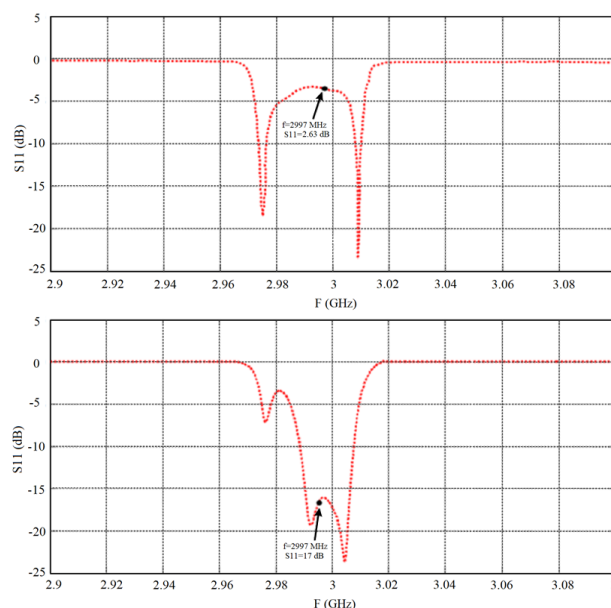
شکل ۴۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) حفره‌های روی بدنه تزویجگر و پیچ‌هایی برای ایجاد تغییر شکل در سطح داخلی کاواک.

۱۱. میدان مغناطیسی کانونی کننده

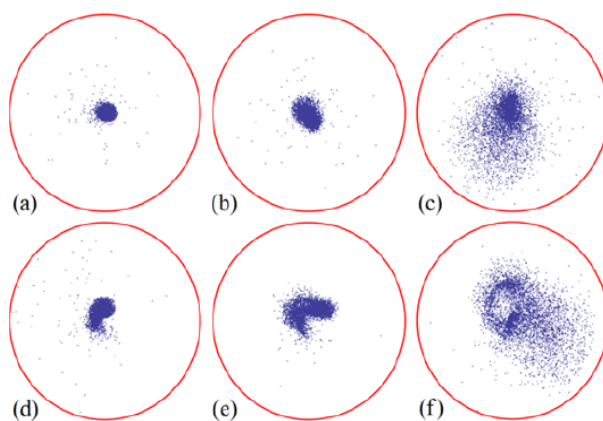
در شتاب‌دهنده خطی الکترون، مسیر مرکزی حرکت الکترون‌ها، محور کاواک‌ها است. میدان الکتریکی موجود روی این محور باعث شتابگیری الکترون‌ها می‌شود. میدان مغناطیسی روی این محور برابر صفر است و در نتیجه هیچ نیروی عرضی که الکترون‌ها را کانونی کند وجود ندارد. برای ایجاد چنین نیروی عرضی، از یک میدان مغناطیسی محوری استفاده می‌شود.

شکل ۴۰. بزار مخصوصی که به این منظور ساخته شده و نحوه این کار را نشان می‌دهد.

پس از کوک تزویجگرها، به کمک تحلیلگر برداری شبکه، ضریب S_{11} اندازه‌گیری شد. شکل ۴۱، این ضریب را، قبل از کوک و بعد از کوک، نشان داده‌ایم. مشخص است که تزویجگر می‌تواند موجی با بسامد ۲۹۹۷ MHz را با تضعیف قابل قبول به داخل خوشه‌ساز وارد کند.



شکل ۴۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ضریب S_{11} قبل (نمودار بالا) و بعد (نمودار پایین) از کوک تزویجگر. (پیکان بسامد کار را نشان می‌دهد).



شکل ۴۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع الکترون‌ها در خروجی شتاب‌دهنده. (ردیف بالا به ترتیب از چپ به راست: میدان مغناطیسی بهینه - ۲۰ درصد کمتر - ۴۰ درصد کمتر از میدان بهینه. ردیف پایین: اثر ۱ mm جابه‌جایی).

بر این اساس محاسبات مربوطه انجام گرفت و دینامیک باریکه شبیه‌سازی شد [۳۹ و ۴۰]. در این محاسبات میدان مغناطیسی در طول کل شتاب‌دهنده شامل خوشه ساز و دو کاواک پیشنهاد شده بود. محاسبات دینامیک باریکه نشان داد (شکل ۴۲) که وجود میدان مغناطیسی بر اندازه باریکه در خروجی شتاب‌دهنده کاملاً مؤثر است. علاوه بر این، هر گونه جابه‌جایی محور مغناطیسی سیملوله‌ها نسبت به محور کاواک‌ها کیفیت باریکه را کاهش می‌دهد. در شکل اثر جابه‌جایی ۱ mm در محور میدان مغناطیسی کاملاً مشخص است. در فاصله‌ای که در کار سفارش سیملوله‌ها

معمولاً دور کاواک خوشه‌ساز و (شتاب‌دهنده) سیملوله‌هایی قرار می‌دهند که الکترون‌ها را کانونی می‌کند. اثر این سیملوله‌ها در خوشه‌ساز که الکترون‌ها کم انرژی هستند، بیشتر است. هر چه انرژی الکترون‌ها بیشتر شود، اثر میدان مغناطیسی محوری کمتر می‌شود. در شتاب‌دهنده‌های انرژی بالای الکترون، برای کانونی شدن معمولاً از آهن‌رباهای چهار قطبی مغناطیسی استفاده می‌شود. در شتاب‌دهنده خطی ما هم از سیملوله برای تولید میدان مغناطیسی استفاده شد. ابتدا تصمیم بر این بود که از سیملوله‌هایی با تعداد دور بالا و جریان پایین - در حدود چند آمپر - استفاده شود.



شکل ۴۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) لامپ توپاسترون مدل ۳۷K.

قادر است با توان ورودی 2 kW ، توان خروجی $2/5\text{ MW}$ داشته باشد. این لامپ پهنای باند 200 MHz از 2900 تا 3100 MHz دارد که می‌تواند 277 V تپ با عرض $7\text{ }\mu\text{sec}$ تولید کند. لازم به توضیح است که چنین پهنای باندی در کاربرد ما ضروری نیست اما این تنها محصول صاشیراز بود که به کار ما می‌آمد. شکل ۴۳ این لامپ را نشان می‌دهد.

برای تولید چنین توانی، لازم است که تپی با ولتاژ 120 kV و جریان 70 A به این لامپ اعمال شود. عرض تپ حداکثر در حدود $10\text{ }\mu\text{s}$ با قابلیت تکرار حداکثر 277 بار در ثانیه است. مدولاتور چنین تپی را تأمین می‌کند. به این منظور در یک ذخیره‌کننده، در توان پایین انرژی الکتریکی ذخیره می‌شود و سپس در یک بازه زمانی کوتاه تخلیه می‌شود. شکل ۴۴ مجموعه تولید توان بالای شتاب‌دهنده خطی الکترون پژوهشگاه دانش‌های بنیادی را نشان می‌دهد. این مدولاتور، علاوه بر تأمین تپ پرتوان، تغذیه بقیه اجزاء کلاسترون را هم برعهده دارد. تغذیه فیلمان کاتد لامپ، تغذیه ولتاژ بالای پمپ یونی کلاسترون و همچنین تغذیه سیملوله کانونی‌کننده باریکه الکترون داخل کلاسترون توسط مدارهای جانبی در مدولاتور انجام می‌گیرد. برای خنک کردن لامپ و سیملوله، سیستم خنک‌کننده‌ای نصب شده که دمای لامپ را کمتر از 40 درجه نگه می‌دارد. برای انتقال موج الکترومغناطیس به

بودیم، تعدادی سیملوله از طرف پژوهشکده علوم و فنون هسته‌ای در اختیارمان قرار گرفت. این سیملوله‌ها مربوط به یک دستگاه اسقاطی بود. این سیملوله‌ها تعداد دور کمی داشتند ولی می‌توانستند با آب خنک شوند و جریان چند صد آمپر را تحمل کنند. تعدادی از این سیملوله‌ها روی خوشه‌ساز نصب شدند و برای تنظیم آن‌ها، پایه‌ای طراحی شد که قابلیت جابه‌جایی ظریف سیملوله‌ها و تنظیم آن را داشت. جریان عبوری از این سیملوله‌ها در آزمون‌های شتاب‌دهنده در حدود 200 A بود. شکل ۴۳ این سیملوله‌ها که روی خوشه ساز نصب هستند را نشان می‌دهد.

۱۲. مولد بسامد رادیویی

مولد رادیو بسامد یکی از قسمت‌های مهم شتاب‌دهنده خطی است زیرا تأمین‌کننده میدان الکترومغناطیس داخل کاواک شتاب‌دهنده است و نقش اساسی در شتاب‌دهی الکترون‌ها ایفا می‌کند. تولید میدان الکتریکی قوی نیازمند توان رادیو بسامدی بالا در حدود چند مگاوات است. ابتدا تپ‌هایی با پهنای کم - در حدود چند میکروثانیه - تولید می‌شوند و سپس توسط لامپ میکروموج توان بالا مانند کلاسترون تقویت می‌شوند. هر لامپ میکروموج، برای تولید موج توان بالا نیاز به منبع تغذیه‌ای دارد که تپ‌هایی با ولتاژ و جریان بالا تولید کند. این منبع تغذیه مدولاتور نامیده می‌شود. در نتیجه قسمت اصلی مولد، لامپ تقویت‌کننده کلاسترون و مدولاتور آن است. البته لامپ دیگری هم در برخی از شتاب‌دهنده‌های خطی کاربردی (مصارف پزشکی و صنعتی) به نام مگتترون استفاده می‌شوند که برخلاف کلاسترون که تقویت‌کننده است، نوسان ساز هستند و نیازی به ورودی میکروموج ندارند. مطالعه جامعی در مورد مولدهای رادیو بسامد توان بالا در ابتدای طراحی شتاب‌دهنده خطی انجام گرفت که در دنباله کار از آن استفاده شد [۴۱]. با توجه به فلسفه اصلی طراحی و ساخت شتاب‌دهنده خطی با تکیه بر امکانات داخل کشور، از تولیدات صنایع الکترونیک شیراز استفاده شد و یک لامپ پرتوان توپاسترون^۱ برای تولید بسامد رادیویی خریداری شد. این لامپ

۱. Twistron



شکل ۴۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مجموعه تولید توان بالای بسامد رادیویی شتاب‌دهنده خطی (کابینت‌های سمت راست مدولاتور، لامپ به رنگ قرمز، سیملوله کانونی کننده به رنگ آبی و موجرها کاملاً مشخص‌اند).

تفنگ الکترونی، دومی در ورودی کاواک شتاب‌دهنده، سومی در خروجی کاواک و بالاخره آخرین پمپ روی اسپکترومتر اندازه‌گیر تکانه انرژی الکترون نصب شده‌اند. هر یک از این پمپ‌ها پمپ مکانیکی خود را نیز دارند. دو والو نیوماتیک، شتاب‌دهنده را از خط باریکه تزریق الکترون و ابزار تشخیصی جدا می‌کند. روی تفنگ الکترونی، شتاب‌دهنده و طیف سنج، خلا سنج‌هایی نصب شده‌اند که خلأ را اندازه‌گیری می‌کنند. میزان خلأ در کل مسیر در محدوده چند 10^{-7} torr است.

۱۴. تریگر^۴

برای راه اندازی مدولاتور و ایجاد تپ الکتریکی پرتوانی که به کلاستر عمل می‌شود تا موج الکترومغناطیسی تولید شود، تپی به عنوان تریگر عمل می‌کند که بسامد آن از یک تا ۲۷۷ هرتز قابل تنظیم است. از این تپ مادر، چندین تپ دیگر برای راه اندازی مولد رادیو بسامد، توری تفنگ الکترونی و ابزار تشخیصی تولید می‌شود. فاصله زمانی این تپ‌های ثانویه تا تپ مادر و عرض زمانی آنها به طور مستقل برای هر تپ ثانویه قابل تنظیم است. این تپ‌های ثانویه عبارتند از:

الف- تپ اعمالی به درایور: موج رادیو بسامد خروجی از درایور با توان حداکثر 2 kW در زمانی که کلاستر آماده کار است و

شتاب‌دهنده، مجموعه موجبری نصب شده که در شکل مشخص است. داخل این موجرها هوای خشک و فشرده جریان دارد تا از تخلیه الکتریکی احتمالی پیشگیری شود. به منظور جلوگیری از آسیب احتمالی به لامپ مولد رادیو بسامد، توان خروجی از لامپ و توان بازگشتی از کاواک شتاب‌دهنده اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری در قطعه مخصوصی از مجموعه موجبری به نام تزویجگر جهت دار^۱ انجام می‌شود. توان بازگشتی در قطعه مخصوصی که سیرکولاتور^۲ نامیده می‌شود جذب و میرا می‌شود. در انتهای شتاب‌دهنده، موج رونده نیز جذب و میرا می‌شود. برای حفظ خلأ در کاواک شتاب‌دهنده و جدا کردن آن از هوای فشرده داخل موجرها، دو پنجره سرامیکی در ورودی و خروجی شتاب‌دهنده نصب شده است که این قسمت‌ها را از نظر خلأ از یکدیگر جدا می‌کند. لازم به ذکر است که این پنجره‌های سرامیکی طراحی شدند و در مجموعه صابیراز ساخته شدند.

۱۳. خلأ شتاب‌دهنده

برای تأمین خلأ شتاب‌دهنده، از ۴ پمپ خلأ توربو مولکولار، ساخت شرکت فایفر^۳ استفاده می‌شود. یکی از این پمپ‌ها روی

۱. Directional coupler

۲. Circulator

۳. Pfeiffer

۴. Trigger

تپ پرتوان مدولاتور تولید شده است.

ب- تپ اعمالی به مدولاتور

ج- تپ اعمالی به توری تفنگ الکترونی. الکترون‌ها فقط در زمان اعمال این تپ می‌توانند از تفنگ خارج شوند و به شتاب‌دهنده وارد شوند.

د- تپ اعمالی به آشکارساز سوسوزن. فقط در این بازه زمانی است که آشکارساز سوسوزن می‌تواند فوتون‌های ایکس حاصل از برخورد باریکه خروجی به هدف را آشکار کند. این ترفند باعث می‌شود که زمینه آشکارساز به شدت کاهش یابد.

۱۵. کنترل شتاب‌دهنده

در شتاب‌دهنده خطی الکترون، پارامترها و کمیت‌های فراوانی وجود دارند که باید اندازه‌گیری و تنظیم شوند. چنین کاری به آسانی بدون سیستم کنترلی که بتواند این پارامترها را اندازه‌گیری و در صورت بروز مقادیر پیش‌بینی نشده یا خطا، شتاب‌دهنده را متوقف کند، تقریباً غیر ممکن است. اپراتور شتاب‌دهنده، باید بتواند هر لحظه مقادیر این پارامترها را روی مونیتر مشاهده کند و بتواند تصمیمات مقتضی را در صورت بروز مشکلات اتخاذ کند. با توجه به این نکات سیستم کنترل شتاب‌دهنده خطی طراحی و ساخته شد. همانطور که در مقدمه این نوشتار آمده، ابتدا کنترل شتاب‌دهنده با استفاده از نرم‌افزار اپیکس^۱ [۱۰] طراحی و کار ساخت آن آغاز شد [۴۲]. اما بعداً به دلیل سادگی و تسلط بیشتر، تصمیم گرفته شد که طراحی در محیط لب و یو [۱۱] انجام شود. در نتیجه کنترل شتاب‌دهنده بر این اساس ساخته و از آن بهره‌برداری شد [۴۳]. برای طراحی سیستم کنترلی کارآمد، علاوه بر دانش فنی سیستم‌های کنترل، آشنایی با فیزیک شتاب‌دهنده و شناخت کافی از ویژگی‌های تجهیزات به کار رفته و نقش آنها در عملکرد شتاب‌دهنده ضروری است. قسمت‌هایی که پایش و کنترل آنها ضروری است عبارتند از:

تجهیزات خلأ که خلأ مناسب و پایدار مورد نیاز شتاب‌دهنده و اجزاء آن را تأمین کند. مثلاً در تفنگ الکترونی خلأ ناکافی باعث کوتاهی عمر کاتد و شکست الکتریکی می‌شود یا خلأ ناکافی در

کاواک‌های شتاب‌دهنده باعث افزایش آهنگ مولتی‌پاکتینگ و تخلیه‌های ناخواسته می‌شود یا در سیستم تشخیصی برای مشاهده نور حاصل از سوسوزن، یک پنجره شیشه‌ای عبور نور را ممکن می‌کند و شکسته شدن این شیشه لطمات فراوانی به سیستم‌های شتاب‌دهی و تشخیصی وارد می‌کند. دو والو، سه قسمت در شتاب‌دهنده را از یکدیگر جدا می‌کنند: بخش تزریق باریکه (شامل تفنگ الکترونی و خط انتقال)، کاواک‌های شتاب‌دهنده و بخش اندازه‌گیری و ابزارهای تشخیصی باریکه. سیستم کنترل، باز و بسته شدن این والوها را کنترل می‌کند و در صورت بروز اشکال، والوها را می‌بندد و شتاب‌دهنده را خاموش می‌کند. همچنین سه خلأ سنج نیز خلأ تفنگ الکترونی، کاواک شتاب‌دهنده و سیستم تشخیصی را اندازه می‌گیرند، به سیستم کنترل متصل هستند که براساس مقادیر خلأ عمل می‌کنند.

تفنگ الکترونی: پارامترهای مختلف تفنگ الکترونی هم حساسیت زیادی دارند. پایش و کنترل ولتاژ بین آند و کاتد به منظور ایمنی و حفاظت از منبع تغذیه ولتاژ بالا و نیز جریان فیلمان برای کنترل جریان باریکه و حفاظت از کاتد ضروری است. همچنین اینترلاک‌های مناسب روی منبع تغذیه ولتاژ بالا برای قطع باریکه الکترون در مواقع اضطراری قرار گرفته است. چشمه امواج الکترومغناطیسی پرتوان: پایش توان ورودی و بازگشتی از کاواک‌ها و کنترل توان ورودی امواج بسامد رادیویی و امکان قطع توان در شرایط اضطراری، در سیستم کنترل پیش‌بینی شده است. هماهنگی بین کنترل خلأ و توان بسامد رادیویی به ویژه هنگام رساندن شتاب‌دهنده به شرایط کاری^۲ بسیار مهم است.

ابزارهای تشخیصی باریکه: پارامترهای مختلفی نظیر شدت جریان، طیف انرژی، نیم‌رخ عرضی و گسیلندگی اندازه‌گیری می‌شود. در این ابزارهای تشخیصی، مغناطیس‌های دوقطبی و سیملوله، صفحه نمایش سوسوزن و سیستم اپتیکی شامل دوربین سی‌سی‌دی و عدسی‌های مربوطه وجود دارند. تنظیم پارامترهای مغناطیسی و تحلیل تصویر باریکه بر عهده سیستم کنترل است.

مغناطیس‌های مختلف: جریان در این مغناطیس‌ها توسط ترانسفورماتورهای جریان پایش و از طریق منبع تغذیه کنترل می‌شوند.

۲. Conditioning

۱. Epics

جدول ۴. تجهیزات و پارامترهایی که توسط پی‌ال‌سی پایش یا کنترل می‌شوند.

توضیحات	تجهیزات یا پارامترها
تغییر دما به جابجایی فرکانس کاواک‌ها می‌انجامد	حسگرهای دما
اندازه‌گیری جریان فیلمان کاتد	ترانسفورماتورهای جریان
پایش ولتاژ بین آند و کاتد در تفنگ	کاوه اندازه‌گیری ولتاژ بالا
بسته یا بازبودن مسیر الکترون	شیرهای خلاء
روشن یا خاموش کردن پمپ	پمپ‌های خلاء
پایش فشار داخل محفظه - خاموش و روشن کردن خلاء سنج	خلاء سنج
باز شدن درب اطاق، شتاب‌دهنده را به طور خودکار خاموش می‌کند	درب اطاق شتاب‌دهنده
پایش و کنترل جریان سیملوله‌های کانونی‌کننده	جریان در سیملوله‌ها
تنظیم ولتاژ اعمالی بین آند و کاتد	منبع تغذیه ولتاژ بالا
فرمان قطع و وصل شدن مسیر تریگر	کنترل توان رادیوفرکانس ورودی

است. برخی از دستگاه‌های اندازه‌گیری مانند اندازه‌گیر و کنترل کننده خلا سنج‌ها پروتکل ارتباطی سریال دارند که برای اتصال به شبکه از سرور سریال استفاده شده‌است. اندازه‌گیری و پایش توان بسامد رادیویی توسط تحلیلگر طیف^۳ انجام می‌شود و انتقال داده‌ها و تنظیم پارامترهای آن در بستر شبکه انجام می‌شود. انتقال داده از دوربین سی‌سی‌دی توسط پروتکل ارتباطی گیگ ای ویژن^۴ انجام می‌شود و پردازش تصویر در نرم‌افزارهای لب ویو صورت می‌گیرد. شکل ۴۵ میز کنترل و صفحه‌های نمایش رایانه را نشان می‌دهد.

۱۶. ابزارهای تشخیصی

ابزارهای تشخیص باریکه^۵ از مؤلفه‌های اصلی هر شتابگر هستند. این سیستم‌های اندازه‌گیری به مثابه اندام‌های حسی برای مشاهده پارامترهای مختلف باریکه به منظور ارزیابی نحوه کارکرد شتابگر هستند. اندازه‌گیری پارامترهای باریکه نقشی کلیدی در راه اندازی و همچنین عملکرد پایدار شتابگر دارد و به بیان معروف «عملکرد یک شتابگر حداکثر به خوبی سیستم‌های تشخیصی آن است» [۴۵]. مطالعه روی فیزیک شتابگرها و دینامیک باریکه به صورت تجربی به عنوان یکی از اهداف اصلی پروژه شتابگر خطی دنبال شده است. این هدف بدون در

سیستم کنترل بر بستر شبکه پیاده‌سازی شده است. پروتکل شبکه باید توانایی انتقال و مدیریت انبوهی از داده‌ها را با سرعت بالا داشته باشد. به همین منظور از پروتکل شبکه بر پایه Ethernet/ip استفاده شده که از ویژگی‌های آن به پیاده‌سازی و اداره کردن آسان و توسعه پذیری، می‌توان اشاره کرد.

پی ال سی^۱ کنترل کننده‌ای برنامه پذیر از خانواده کامپیوترها است که عمدتاً برای مقاصد صنعتی به کار می‌رود [۴۴]. این ابزار ارتباطی ورودی‌های دیجیتال یا آنالوگ را گرفته و به سیگنال‌های صفر و یک قابل پردازش برای CPU تبدیل می‌کند. بر اساس برنامه‌ای که در حافظه‌اش نوشته شده، خروجی‌های لازم را به صورت سیگنال‌های منطقی به خروجی می‌فرستد. این سیگنال‌ها به صورت دیجیتال یا پس از تبدیل به سیگنال آنالوگ به تجهیزات ارسال می‌شوند. قطعات و تجهیزات زیادی برای پایش یا کنترل به پی‌ال‌سی متصل هستند که برخی از آنها در در جدول ۴ آورده شده‌اند.

ارتباط پی‌ال‌سی با کارخواه^۲ توسط آی‌پی‌سی که نرم‌افزاری استاندارد است، انجام می‌شود که امکان ارتباط بین سخت‌افزارهای صنعتی مانند پی‌ال‌سی و برنامه‌های تحت ویندوز مانند لب ویو را فراهم می‌کند. جزئیات بیشتری از سیستم کنترل در مرجع [۴۳] آمده

۳. Spectrum Analyzer

۴. GigE Vision

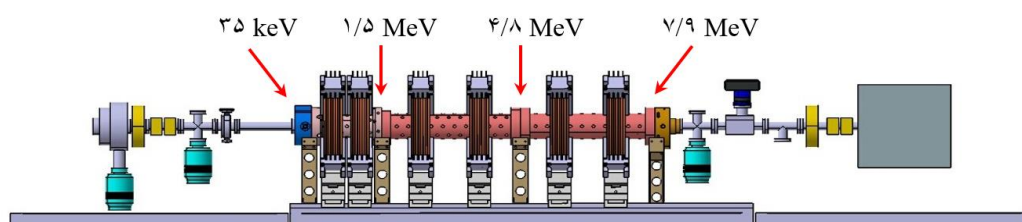
۵. Beam diagnostics instrumentation

۱. Programmable Logic Control

۲. Client



شکل ۴۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) میز کنترل (پایین سمت چپ) صفحه نمایش شتاب‌دهنده و اتصالات آن (بالا سمت راست)، صفحه نمایش خلا‌ها و توان بسامد رادیویی (بالا سمت چپ) و باریکه و نیم‌رخ آن (پایین سمت راست).

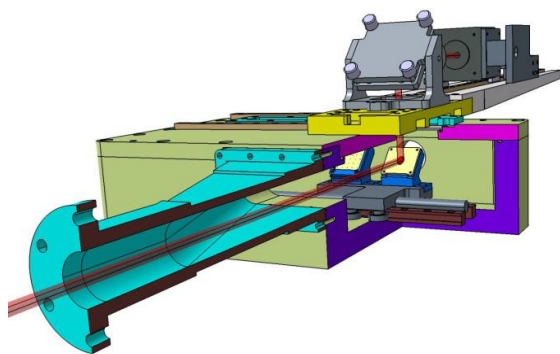


شکل ۴۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) چیدمان شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی. فاز ۱ باریکه بعد از خوشه‌ساز - فاز ۲ باریکه پس از خوشه‌ساز و یک کاواک (شرایط فعلی) - فاز ۳ باریکه پس از خوشه‌ساز و ۲ کاواک (آینده).

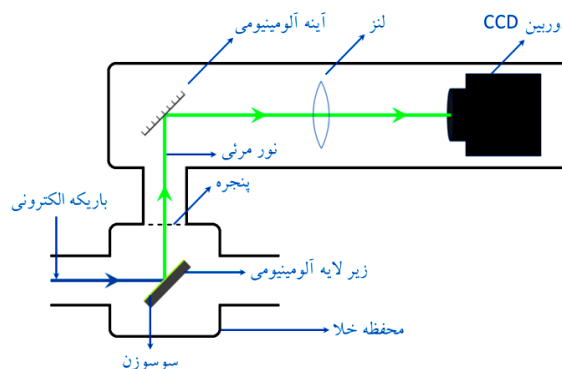
کمیت‌های نیم‌رخ عرضی، طیف انرژی، جریان و کمیت‌های عرضی نظیر مکان، ابعاد، گسیلندگی و واگرایی مدنظر بوده است. با توجه به ضرورت اندازه‌گیری باریکه در فازهای مختلف راه-اندازی، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم‌های تشخیصی مورد نیاز، امکان اندازه‌گیری در گستره وسیعی از انرژی خواهد بود. به بیان دیگر سیستم‌های اندازه‌گیری طراحی شده باید تفکیک‌پذیری^۱ خود را از چند ده کیلو الکترون ولت تا هشت مگاالکترون ولت حفظ کنند. به این منظور ابزارهای تشخیصی زیر در آزمایشگاه شتابگر خطی طراحی و ساخته شد. جزئیات طراحی این تجهیزات در [۴۶ و ۴۷] به تفصیل آورده شده است.

اختیار داشتن ابزارهای تشخیصی مناسب دست یافتنی نخواهد بود. با توجه به پیچیدگی‌های شتابگر خطی، راه اندازی آن به صورت تدریجی و در سه فاز پیش‌بینی شد. به این صورت که در هر فاز یکی از سه تیوب موج‌رونده (خوشه‌ساز و دو ساختار شتاب‌دهی) به شتابگر اضافه شده و عملکرد ماشین مورد ارزیابی قرار گیرد. چنین شیوه‌ای برای راه اندازی با ایجاد شناختی صحیح‌تر از عملکرد هر یک از مؤلفه‌های ماشین منجر به درک عمیق‌تری از فیزیک شتابگر خواهد شد. شکل ۴۶ چیدمان شتابگر خطی و انرژی مورد انتظار در هر فاز را به ازای توان بسامد رادیویی ورودی ۲ MW نشان می‌دهد. به منظور به دست آوردن حداکثر اطلاعات از باریکه، طراحی و ساخت مجموعه‌ای از ابزارهای تشخیصی با هدف اندازه‌گیری

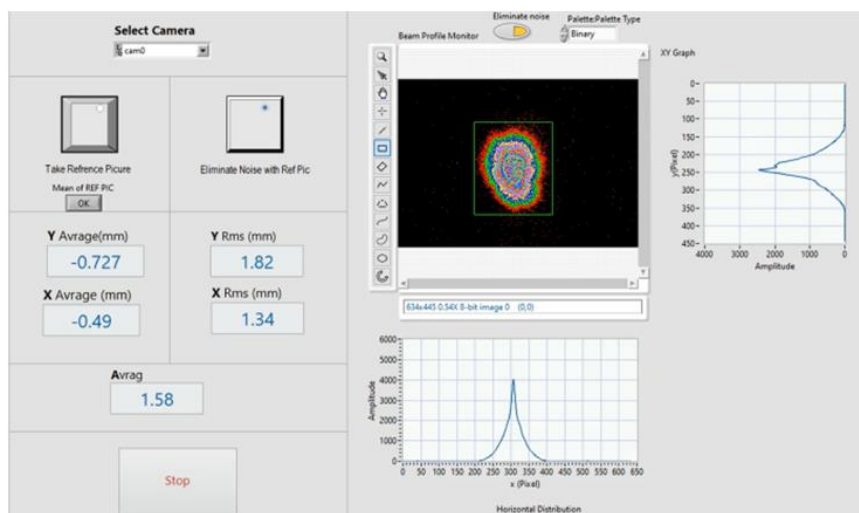
۱. Resolution



شکل ۴۸. نقشه مکانیکی سیستم خوانش نیم‌رخ باریکه.



شکل ۴۷. طرحواره سیستم خوانش نیم‌رخ باریکه.



شکل ۴۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نرم افزار پردازش تصویر (چپ)، سوسون (راست بالا) و نمونه ای از نیم‌رخ اندازه‌گیری شده.

داشتن نیم‌رخ عرضی، مکان و ابعاد باریکه به طور مستقیم قابل خوانش خواهند بود.

۱۸. سیستم روبش سیملوله‌ای^۳

گسیلندگی معیاری کمی از کیفیت باریکه است. در یک باریکه آرمانی، با ذرات کاملاً هم‌جهت، گسیلندگی صفر است. در یک باریکه واقعی، تکانه ذرات با راستای حرکت زاویه‌ای تصادفی می‌سازد. هرچه این زاویه تصادفی به طور متوسط بزرگ‌تر باشد گسیلندگی بزرگ‌تر و کیفیت باریکه کمتر خواهد بود. گسیلندگی عرضی در راستای افقی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_x = \sqrt{x^2 x'^2 - x x x'^2}$$

کمیت مشابهی نیز در راستای عمودی قابل تعریف است. در

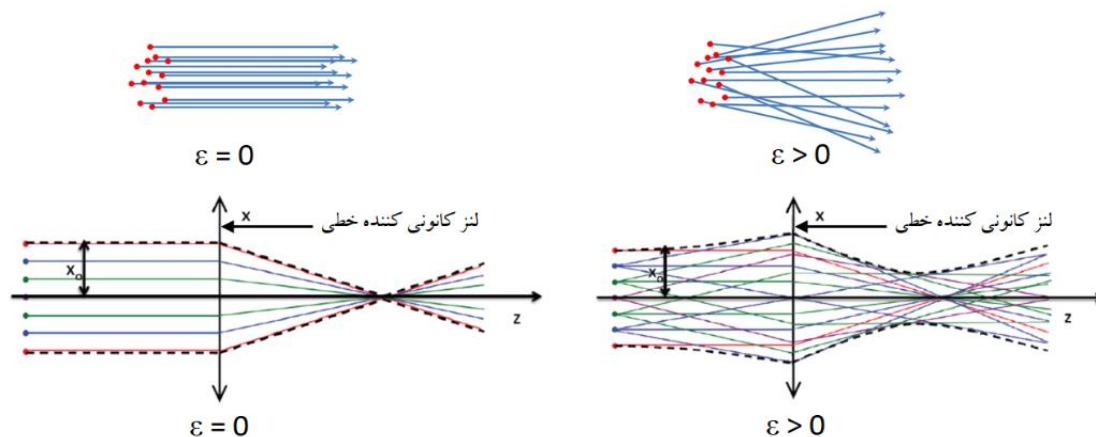
۱۷. سیستم خوانش نیم‌رخ باریکه^۱

مطابق شکل ۴۷ (طرحواره) و شکل ۴۸ (نقشه مکانیکی) این سیستم شامل صفحه نمایش سوسون^۲ YAG:Ce متحرک با ابعاد ۲/۵ cm × ۳ cm و ضخامت ۳۰ μm، سیستم اپتیکی (دوربین CCD، آینه آلومینیومی و عدسی) برای تصویربرداری از نیم‌رخ باریکه و نرم افزار پردازش تصویر (شکل ۴۹) است. چنین سیستمی نیم‌رخ دو بعدی باریکه را با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری می‌کند. مطالعات بسیار گسترده‌ای به منظور دستیابی به قدرت تفکیک بالا برای اندازه‌گیری نیم‌رخ انجام شده است. در نهایت سیستم حاضر قادر به اندازه‌گیری نیم‌رخ با قدرت تفکیک ۲۰ μm در بیشترین بزرگنمایی خود است. با در اختیار

۱. Beam profile monitor

۲. Scintillator view screen

۳. Sol-scan



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مفهوم گسیلندگی (بالا) و تأثیر گسیلندگی روی ابعاد عرض باریکه (پایین).

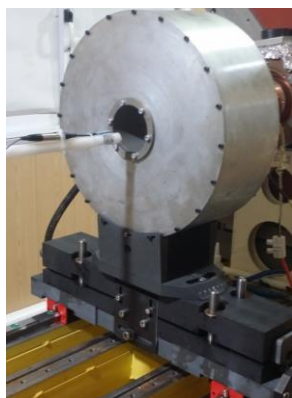
۱۹. فنجان فاراده

برای اندازه‌گیری جریان از فنجان فاراده استفاده می‌شود. همچنین به کمک زیرلایه آلومینومی سوسوزن نیز می‌توان جریان باریکه را همزمان با خوانش نیم‌رخ اندازه گرفت. در فنجان فاراده باریکه الکترونی متوقف شده و سیگنال حاصل برای اندازه‌گیری جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترون‌های ثانویه و نیز پس‌پراکنده عوامل ایجادکننده خطا در اندازه‌گیری جریان هستند. اما هر دو عامل منجر به خوانش مقدار کوچک‌تری برای جریان در مقایسه با مقدار واقعی هستند. به بیان دیگر مقدار واقعی جریان قطعاً بزرگ‌تر از جریان اندازه‌گیری شده است. شکل ۵۳ نمونه‌ای از جریان خوانده شده را نشان می‌دهد.

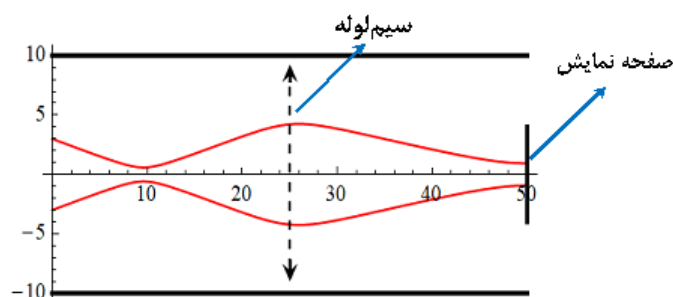
۲۰. طیف‌سنج مغناطیسی

برای اندازه‌گیری طیف انرژی از طیف‌سنج مغناطیسی استفاده شده است. در این روش نیم‌رخ باریکه خم شده توسط میدان حاصل از یک دوقطبی مغناطیسی با کیفیت میدان بالا ($\sim 10^{-4}$) خوانده می‌شود. ذرات با انرژی بیشتر در یک میدان مغناطیسی یکسان کمتر از ذرات کم انرژی خم می‌شوند. این امر مطابق شکل ۵۴ منجر به پهن شدگی نیم‌رخ ذرات در راستای افقی (خمش ذرات) می‌شود. با روشن شدن دوقطبی مغناطیسی باریکه در راستای افقی جابه‌جا خواهد شد. برای خواندن نیم‌رخ

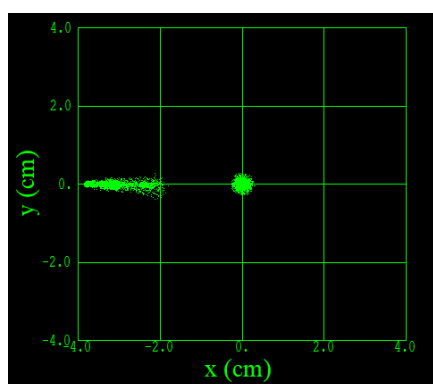
رابطه فوق x مکان ذره و x' زاویه ذرات با راستای حرکت باریکه است. مفهوم گسیلندگی به خصوص در مواردی که باریکه با ابعاد عرضی کوچک مد نظر است اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. مطابق شکل ۵۰ هر چه گسیلندگی بزرگ‌تر باشد امکان دستیابی به باریکه‌ای با ابعاد عرضی کوچک‌تر دشوارتر خواهد بود. از آنجایی که بسیاری از کاربردها ابعاد عرضی کوچک برای باریکه ضروری است توجه به مفهوم گسیلندگی و امکان اندازه‌گیری آن از اهمیت قابل توجهی برخوردار خواهد بود. کمیت دیگری که حاوی اطلاعات ارزشمندی از باریکه می‌باشد واگرایی آن است. این کمیت به صورت مشتق اول اندازه عرضی باریکه، $a = \sqrt{x^2}$ ، نسبت به مختصه مکان در راستای حرکت باریکه، z تعریف می‌شود و می‌توان نشان داد: $\frac{da}{dz} = \frac{xx'}{a}$. از آنجایی که نیم‌رخ (پروفایل) باریکه تنها حاوی اطلاعاتی از مکان ذرات است (نه زاویه)، گسیلندگی و نیز واگرایی به طور مستقیم از روی نیم‌رخ قابل محاسبه نیستند. اما، استفاده از یک جزء کانونی کننده پیش از صفحه نمایش نیم‌رخ و اندازه‌گیری ابعاد باریکه به ازای شدت‌های مختلف کانونی‌سازی (حول نقطه کانونی)، امکان اندازه‌گیری غیر مستقیم گسیلندگی و نیز واگرایی را فراهم می‌سازد. اگر جزء کانونی‌کننده سیملوله باشد این روش اندازه‌گیری را روبش سیملوله‌ای می‌نامند [۴۸]. چیدمان روبش سیملوله‌ای و نیز سیملوله ساخته شده به این منظور در شکل ۵۱ و شکل ۵۲ به نمایش گذاشته شده است.



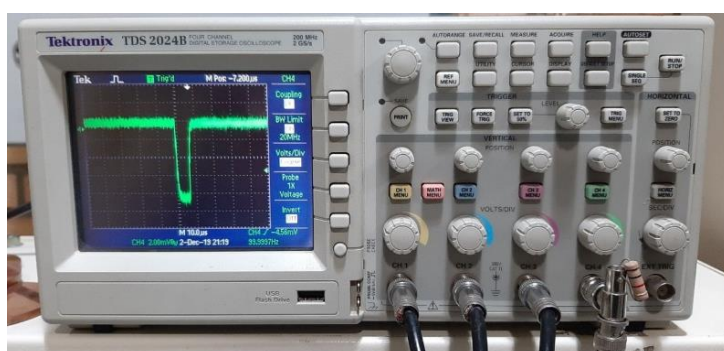
شکل ۵۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سیملوله ساخته شده برای سیستم روبش سیملوله‌ای به همراه پایه با ۴ درجه آزادی.



شکل ۵۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) چیدمان روبش سیملوله.



شکل ۵۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شبیه سازی نیم‌رخ عرضی باریکه قبل و بعد از روشن شدن دو قطبی مغناطیسی.



شکل ۵۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمونه ای از جریان خوانده شده توسط فنجان فاراده (مربوط به خروجی تفنگ الکترونی).

قطبی مغناطیسی ساخته شده برای این منظور در شکل ۵۵ به نمایش گذاشته شده است. مطالعات گسترده‌ای برای برآورد و نیز بهبود قدرت تفکیک این طیف‌سنج انجام شده است [۴۷]. مهم‌ترین عامل محدود کننده قدرت تفکیک در چنین سیستمی حرکت بتاترونی ذرات حول مدار آرمانی است. سیستم حاضر قادر به اندازه‌گیری پهنای انرژی با دقت ۱۰ درصد و انرژی متوسط باریکه با دقت ۵ درصد است.

شکل ۵۶ در انتهای شتابگر نصب شده و بر روی باریکه خروجی اندازه‌گیری انجام می‌دهد. دقت اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف در جدول ۵ آمده است.

۲۱. طیف سنج پرتو ایکس

از یک آشکارساز سوسوزن یدور سدیم همراه تحلیلگر چند

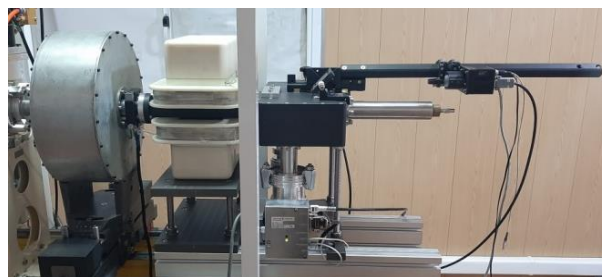


شکل ۵۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) دو قطبی مغناطیسی سیستم طیف سنجی مغناطیسی.

صفحه نمایش نیز در خلأ جابه‌جا شده در مقابل باریکه قرار می‌گیرد. از میزان جابه‌جایی باریکه و نیز میزان پهن‌شدگی نیم‌رخ به ترتیب انرژی و پهنای آن قابل اندازه‌گیری است. دو

الکترونی انجام گرفت. در این اندازه‌گیری مشخص شد که میدان مغناطیسی زمین روی باریکه کم انرژی الکترون تأثیر زیادی دارد و آن را بیش از یک سانتی‌متر منحرف می‌کند. به منظور حذف اثر میدان مغناطیسی زمین، پیچ هلمهولتز طراحی، ساخته و روی خط باریکه نصب شد. توضیح بیشتر این موضوع در بخش ۶ (خط باریکه از تفنگ تا خوشه‌ساز) آمده است.

ب- در مرحله بعد، پس از نصب خوشه‌ساز، اندازه‌گیری روی باریکه انجام گرفت. از آنجایی که هنوز طیف نگار مغناطیسی آماده نشده بود، و جریان باریکه خروجی از تفنگ الکترونی با کاتد مستعملی که تا آن زمان استفاده می‌شد بسیار کوچک بود، فقط اندازه‌گیری تابش ترمزی باریکه پس از برخورد با صفحه فلزی انتهای فنجان فاراده قابل اندازه‌گیری بود. با توجه به زمینه آشکارساز سوسوزن یدور سدیم، تولید پرتوهای ایکس ترمزی فقط در زمان گسیل الکترون‌ها از شتاب‌دهنده- که برابر سه میکروثانیه تنظیم شده بود- لازم بود که مجموعه داده‌گیری بس کانالی آشکارساز فقط در زمان گسیل الکترون‌ها داده‌گیری کند و در بقیه زمان‌ها، ورود تپ‌ها به آن ممنوع باشد. به این منظور فرمان مناسبی به تحلیلگر بس کاناله ارسال می‌شد. با توجه به آنچه که در بخش ۱۳ راجع به طیف‌سنج پرتو ایکس آمد، به ازای هر تپ باریکه، تحلیلگر بس کاناله فقط یک تپ را تحلیل می‌کند. بنا براین برای جلوگیری از همپوشانی تپ‌ها، لازم است که فاصله آشکارساز تا شتاب‌دهنده طوری تنظیم شود که همپوشانی اتفاق نیفتد. به این ترتیب طیف فوتون‌ها اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری در تاریخ ۲۶ آذرماه ۱۳۹۶ انجام گرفت و برای اولین بار باریکه الکترون در شتاب‌دهنده خطی ساخته‌شده در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی شتاب گرفت و آشکار شد. راه‌اندازی خوشه‌ساز از اهمیت قابل توجهی برخوردار بود. عملکرد صحیح این بخش به معنای اثبات تجربی مفهوم خوشه‌سازی و شتاب‌دهی بسامد رادیویی برای اولین بار در کشور بود. پس از این موفقیت پروژه شتابگر خطی به عنوان دستاورد ملی جهت رونمایی در روز ملی فناوری هسته‌ای انتخاب و آزمایشگاه شتابگر خطی به صورت نمادین توسط ریاست محترم جمهوری افتتاح شد. شکل ۵۷ وضع شتاب‌دهنده خطی در این تاریخ را نشان می‌دهد.



شکل ۵۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مجموعه ابزار تشخیصی باریکه.

جدول ۵. دقت اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف.

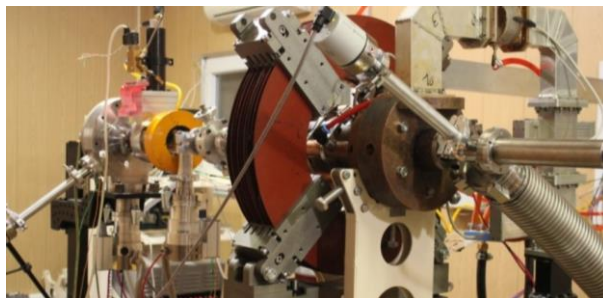
کمیت	دقت
نیم‌رخ عرضی	$20 \mu\text{m}$
ابعاد عرضی	$20 \mu\text{m}$
مکان عرضی	$40 \mu\text{m}$
گسیلندگی و واگرایی	۱۰ درصد
انرژی متوسط	۵ درصد
پهنای انرژی	۱۰ درصد

کاناله برای اندازه‌گیری طیف انرژی نیز استفاده شد. الکترون‌ها در برخورد به فنجان فاراده تابش ترمزی می‌کنند و بیشینه انرژی این تابش ترمزی برابر بیشینه انرژی الکترون‌ها است. به این طریق می‌توان انرژی الکترون‌ها را تعیین کرد. با توجه به زمان تفکیک تپ‌ها در آشکارساز سوسوزن، در هر تپ شتاب‌دهنده به عرض ۶ میکروثانیه، آشکارساز فقط قادر است یک فوتون ایکس را شمارش کند. لذا باید فاصله آشکارساز تا فنجان فاراده و زاویه فضایی آن را طوری تنظیم کرد که همپوشانی در آشکارساز اتفاق نیفتد. برای کاهش تابش زمینه، سیستم اندازه‌گیری فقط در زمان وجود تپ الکترون شمارش می‌کند و در بقیه زمان ورودی آن بسته است. از این آشکارساز، برای اندازه‌گیری طیف فوتون‌ها در فاز اول راه‌اندازی شتاب‌دهنده (مطالعه باریکه پس از خوشه‌ساز) استفاده شد.

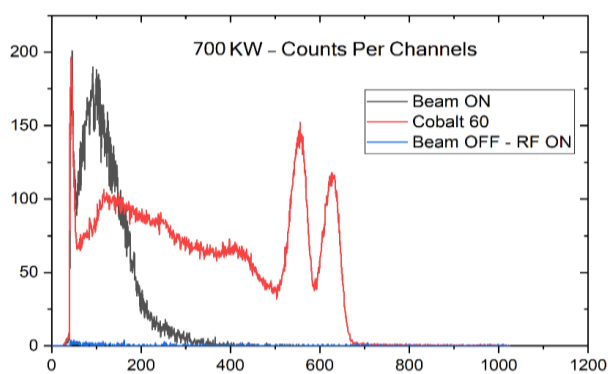
۲۲. نتایج اندازه‌گیری

اندازه‌گیری‌های باریکه در سه مرحله انجام گرفت.

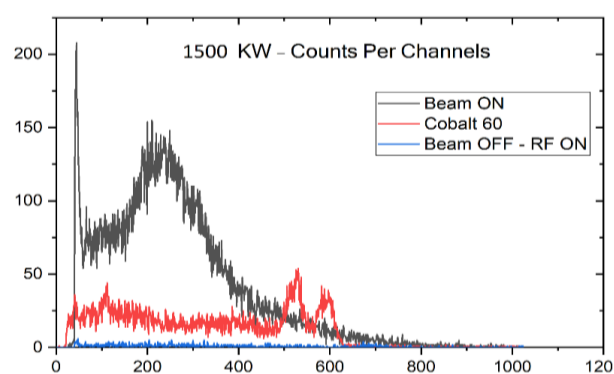
الف- در مرحله اول اندازه‌گیری روی باریکه خروجی از تفنگ



شکل ۵۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شتاب‌دهنده خطی در مرحله دوم.



شکل ۵۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف تابش ترمزی در توان ۷۰۰ کیلو وات (آبی - خاکستری). طیف کبالت ۶۰ (قرمز) و زمینه بدون باریکه (آبی).



شکل ۵۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف تابش ترمزی (آبی - خاکستری) در توان ۱۵۰۰ کیلو وات. طیف کبالت ۶۰ (قرمز) و زمینه بدون باریکه (آبی).

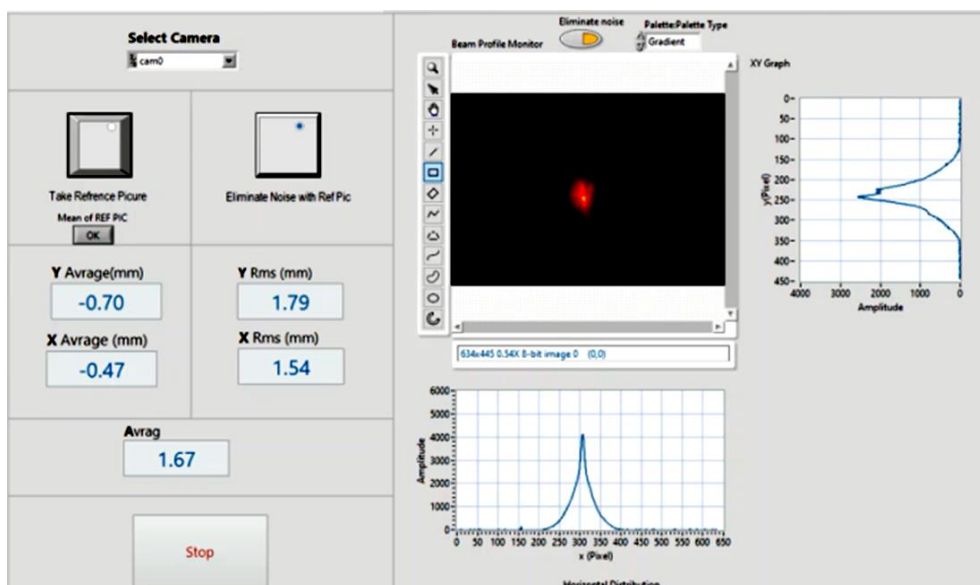
شکل ۵۸ طیف پرتو ایکس تابش ترمزی باریکه الکترون را نشان می‌دهد. برای مقایسه، طیف انرژی چشمه کبالت هم روی همان نمودار، نشان داده شده است. بیشینه انرژی طیف، نشان‌دهنده انرژی الکترون‌های باریکه است. چنانچه توان امواج بسامد رادیویی کاهش یابد، انرژی الکترون‌ها و در نتیجه انرژی بیشینه پرتو ایکس ترمزی هم کاهش می‌یابد. شکل ۵۹ این مطلب را نشان می‌دهد.

شکل ۶۱ نمونه از تپ اندازه‌گیری شده از فنجان فاراده توسط اسیلوسکوپ، برای باریکه خروجی پس از اولین کاواک شتاب‌دهی را نشان می‌دهد. در این مورد فنجان فاراده از طریق یک مقاومت یک کیلو اهمی به زمین متصل شده و ولتاژ دو سر مقاومت خوانده می‌شود. ارتفاع تپ عدد ۳۰۰ میلی‌ولت را نشان می‌دهد که متناظر با جریان ۳۰۰ میکرو آمپر یا ۰/۳ میلی آمپر است.

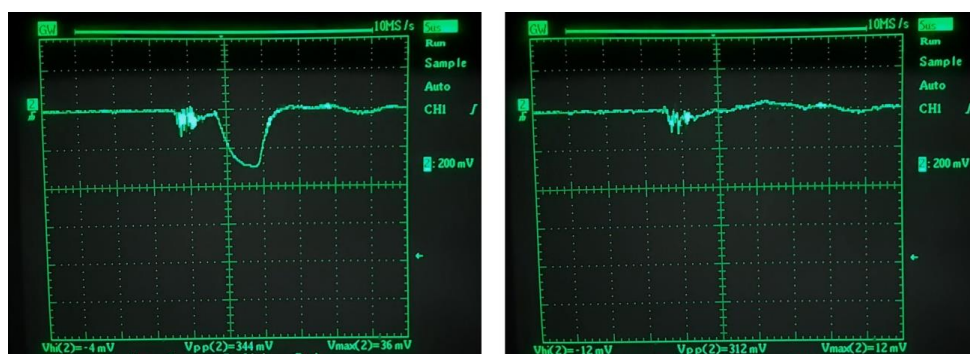
برای طیف‌سنجی انرژی، لازم است صفحه نمایش سوسوزن در راستای افقی جابه‌جا و دوقطبی مغناطیسی روشن شود. شکل ۶۲ نیم‌رخ باریکه خروجی از اولین کاواک شتاب‌دهی پس

شکل ۵۸ طیف پرتو ایکس تابش ترمزی باریکه الکترون را نشان می‌دهد. برای مقایسه، طیف انرژی چشمه کبالت هم روی همان نمودار، نشان داده شده است. بیشینه انرژی طیف، نشان‌دهنده انرژی الکترون‌های باریکه است. چنانچه توان امواج بسامد رادیویی کاهش یابد، انرژی الکترون‌ها و در نتیجه انرژی بیشینه پرتو ایکس ترمزی هم کاهش می‌یابد. شکل ۵۹ این مطلب را نشان می‌دهد.

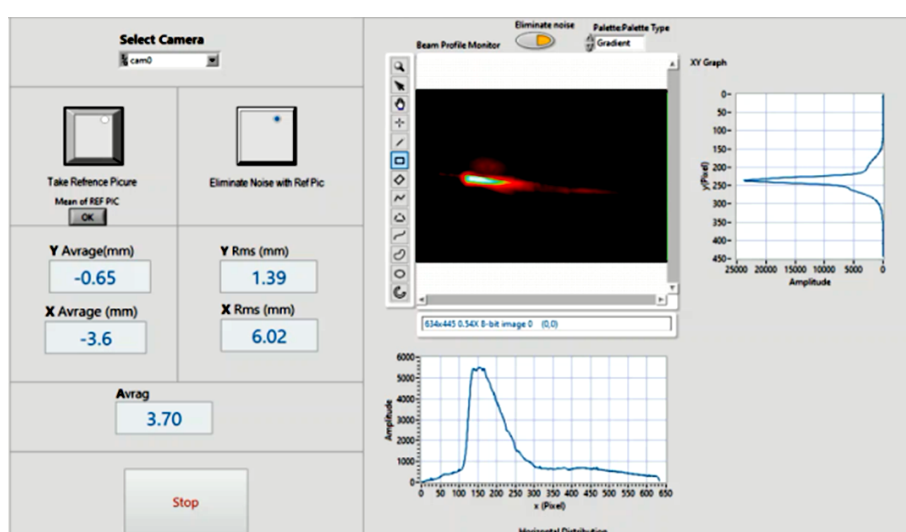
ج- پس از نصب یک کاواک اصلی شتاب‌دهنده و دستگاه‌های تشخیصی، اندازه‌گیری روی باریکه خروجی از شتاب‌دهنده انجام گرفت. شکل ۶۰ نمونه‌ای از نیم‌رخ اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. توزیع‌های افقی و عمودی ذرات در نرم افزار پرداز تصویر قابل مشاهده است. ابعاد عرضی باریکه (rms) در این مورد ۱/۵۴ و ۱/۷۹ میلی‌متر به ترتیب در راستاهای افقی و عمودی است. همچنین مکان عرضی باریکه نیز در این مورد در راستاهای افقی و عمودی به ترتیب برابر



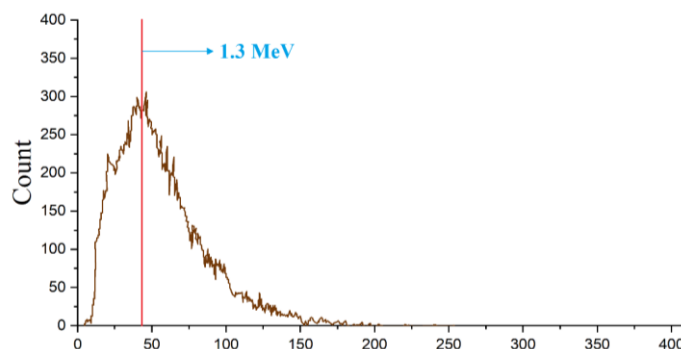
شکل ۶۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمونه‌ای از نیم‌رخ اندازه‌گیری شده پس از اولین کاواک شتاب‌دهی در انرژی 4 MeV.



شکل ۶۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سیگنال اندازه‌گیری شده از فوجان فاراده توسط اسیلوسکوپ در حالت خاموش بودن باریکه (راست) و با باریکه روشن (چپ). این سیگنال مربوط به باریکه خروجی از اولین کاواک شتاب‌دهی با انرژی 4 MeV است.



شکل ۶۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر نیم‌رخ باریکه خم شده. در تقریب مرتبه اول، توزیع افقی ذرات معرف توزیع انرژی خواهد بود.



شکل ۶۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف پرتو x حاصل از تابش ترمزی برخورد باریکه با هدف آلومینیومی.

باریکه با هدف آلومینیومی را نشان می‌دهد. نقطه انتهایی این طیف معیاری از بیشینه انرژی الکترون‌ها در باریکه است. خط قرمز عمودی در این شکل مربوط به قله دوم در طیف کبالت ۶۰ است که برای درجه بندی استفاده شده است.

در حال حاضر، اندازه‌گیری‌های تکمیلی بر روی باریکه خروجی از تیوب شتاب‌دهی اول در حال انجام است. هدف این اندازه‌گیری‌ها در اختیار داشتن مجموعه‌ای کامل از پارامترهای باریکه و همچنین تنظیم پارامترهای مؤلفه‌های مختلف شتابگر (به ویژه مگنت‌ها) به منظور بهبود حداکثری کیفیت باریکه است. همچنین تیم پروژه در حال تدارک برای تصویر برداری به کمک پرتو x حاصل از شتابگر و نیز امکان سنجی برای راه اندازی چیدمان تولید تابش تراهرتز با عبور دادن باریکه شتابگر خطی از آندولاتور موجود در طرح چشمه نور ایران است.

۲۳. حفاظت در برابر پرتو

باریکه الکترون پر انرژی حاصل از شتاب‌دهنده خطی، در برخورد با ماده، جذب ماده می‌شود و در آن یونش ایجاد می‌کند. همچنین این الکترون‌ها در برخورد با ماده انرژی از دست می‌دهند، کند می‌شوند و در نتیجه تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کنند. از این تابش ترمزی، برای رادیوگرافی‌های صنعتی یا برای معالجه بیماری‌های بدخیم نیز استفاده می‌شود. در پروژه طراحی و ساخت شتاب‌دهنده خطی، استفاده از تابش ترمزی الکترون‌ها لایق در مرحله اول مد نظر نبوده است. ولی با توجه

از خم شدن توسط دو قطبی را نشان می‌دهد. باریکه هفت سانتی‌متر روی صفحه نمایش جابه‌جا شده است. با حل معادله دیفرانسیل حرکت ذرات در میدان مغناطیسی دوقطبی (نیروی لورنتس) می‌توان نشان داد:

$$\sin \alpha = \frac{e}{p} \int B dz ,$$

که در آن α زاویه خم، e بار الکترون، p تکانه الکترون، B میدان دو قطبی مغناطیسی و z راستای حرکت باریکه است. زاویه خم با در اختیار داشتن جابه‌جایی صفحه نمایش و نیز فاصله آن از مرکز دوقطبی قابل محاسبه است. انتگرال میدان نیز با اندازه‌گیری نیم‌رخ میدان در راستای z برای جریان‌های مختلف سیم‌پیچ دوقطبی محاسبه شده است. به این ترتیب انرژی ذره‌ای که به وسط صفحه نمایش سوسوزن برخورد می‌کند برای مورد شکل ۶۲، $3/8 \text{ MeV}$ خواهد بود. انرژی متناظر با قله توزیع برابر $4/2 \text{ MeV}$ و بیشینه انرژی ذرات برابر $4/6 \text{ MeV}$ است. لازم به ذکر است انرژی‌های اندازه‌گیری شده به ازای توان بسامد رادیویی $1/5$ مگاوات بوده است. همچنین پهنای نسبی انرژی برابر است با:

$$\frac{\Delta E_{rms}}{E_{av}} = \frac{x_{rms}}{x_{av}}$$

که در آن ΔE_{rms} پهنای انرژی، E_{av} انرژی متوسط، x_{rms} پهنای افقی باریکه خم شده و x_{av} میزان جابه‌جایی صفحه نمایش است. برای مورد شکل ۶۲ با جایگذاری مقادیر، پهنای انرژی حدود $0/3 \text{ MeV}$ خواهد بود.

شکل ۶۳ طیف پرتو x حاصل از تابش ترمزی برخورد



شکل ۶۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) دیوار آجر بتنی در حال ساخت اطراف کانکس. این دیوار در سه طرف کانکس تا سقف تکمیل شد.

300 mSv بود. در فاصله یک متری از هدف و در راستای محور شتاب‌دهنده دز برابر 20 mSv بود. شدت دز در نقاط دیگر، با توزیع دز تابش ترمزی کاملاً سازگار بود. میزان دز در اطاق کنترل در حد زمینه اندازه‌گیری شد. لازم است که اندازه‌گیری‌های تکمیلی نیز انجام گیرد که برنامه‌ریزی شده‌اند.

۲۴. مشخصات شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های

بنیادی

در جدول‌های زیر، فهرست بخش‌های شتاب‌دهنده (جدول ۶) و مشخصات این شتاب‌دهنده و باریکه الکترون (جدول ۷) آن را آورده ایم. چیدمان فعلی شتابگر خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی در شکل ۶۵ به نمایش گذاشته شده است.

۲۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک شتاب‌دهنده خطی بسامدبا بسامد رادیویی الکترون کاملاً طراحی و با تکیه بر فناوری داخل کشور ساخته شد. در طول انجام کار، دانش طراحی کاواک‌های شتاب‌دهنده خطی، محاسبات دینامیک طولی و عرضی باریکه به دست آمد و چالش‌های فراوان این پژوهش چند رشته‌ای و پیچیده بر طرف شد. تعداد قابل توجهی از جوانان با جنبه‌های مختلف طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌ها آشنا شدند و این شاخه علمی، به پیشرفتی بنیادی و اساسی در کشور رسید.

اکنون می‌توان آزمایشگاه شتابگر خطی را از دو جهت آزمایشگاهی منحصر به فرد در کشور دانست: بومی کردن دانش

به قابلیت تولید پرتو ایکس به مقدار زیاد، مسئله حفاظت در برابر این پرتوها از ابتدای کار مورد توجه قرار گرفت. تابش ترمزی چنین شتاب‌دهنده‌ای با انرژی 10 MeV و جریان 10 mA ، عرض تپ $6 \mu\text{s}$ و بسامد تکرار 250 Hz محاسبه شد [۴۹]. در ابتدا قرار بود که ساختمان خاصی برای این شتاب‌دهنده با دیواره‌های بتنی مناسب ساخته شود، ولی به دلیل کمبود بودجه و برخی مشکلات دیگر، تصمیم گرفته شد که شتاب‌دهنده در یک کانکس که در اختیارمان قرار گرفته بود نصب شود. تصمیم گرفته شد که حفاظی ساده متشکل از آجرهای بتنی به ضخامت 20 سانتی‌متر دور این کانکس قرار گیرد و شدت باریکه محدود شود طوری که بیرون حفاظ، میزان پرتوها کمتر از دوز مجاز باشد. شکل ۶۴، این دیوار آجر بتنی در حال ساخت اطراف کانکس را نشان می‌دهد. در پشت کانکس (راست پایین) از کیسه‌های شنی برای حفاظ استفاده شد.

پس از اتمام ساخت شتاب‌دهنده در مرحله سوم، دزسنجی پرتوهای ایکس آن به کمک دزسنج‌های TLD اندازه‌گیری شد. این دزسنج‌ها و قرائت آنها توسط امور حفاظت در برابر اشعه سازمان انرژی اتمی ایران، سخاوتمندانه انجام گرفت. 30 دزسنج TLD در نقاط مختلف کانکس و خارج آن و اطاق کنترل شتاب‌دهنده نصب شدند. به مدت یک ساعت باریکه‌ای با شدت 3 mA و با انرژی بیشینه به هدفی که در انتهای فنجان فاراده قرار داشت تابیده شد. برای کاهش خطا، در هر نقطه دو تا سه عدد دزسنج نصب شد و مقدار میانگین آن در نظر گرفته شد. در نزدیک‌ترین نقطه به هدف، دز در حدود

جدول ۶. فهرست بخش‌های شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی در حال حاضر.

نام مولفه	وظیفه	ساخت
لامپ کلاسترون با توان نامی ۲ MW	تقویت توان بسامد رادیویی	داخل کشور
مدولاتور لامپ کلاسترون با توان نامی ۵/۵ MW	تولید تپ‌های توان بالا با ولتاژ ۱۱۰ kV و جریان A ۵۰ به صورت تپی برای تغذیه کلاسترون	داخل کشور
مجموعه موجبری شامل موجبرها، تزویجگرهای جهتی، سیرکولاتور و بار تفنگ الکترونی	انتقال توان بسامد رادیویی از مولد تا شتابگر	داخل کشور
تیوب‌های موج‌رونده	تولید باریکه الکترونی با انرژی ۳۵ keV	داخل کشور (به جز کاتد ساخت IBA)
تزریق‌گر شامل تفنگ الکترونی، پیچه هلمهولتز، سلونوید کانونی‌کننده، پیش‌خوشه‌ساز	یک تیوب خوشه‌سازی و یک تیوب شتاب‌دهی باریکه الکترونی	داخل کشور
مغناطیس‌های کانونی‌کننده	رساندن باریکه به پارامترهای مناسب جهت تزریق به تیوب‌های موج‌رونده	داخل کشور
ابزارهای تشخیصی شامل فنجان فاراده، صفحه نمایش سوسوزن، چیدمان اسکن سلونویدی و طیف سنج مغناطیسی و طیف سنجی پرتو x	کنترل دینامیک عرضی باریکه	داخل کشور
سیستم کنترل (سخت افزار) شامل PLC، Switch N-port	اندازه‌گیری جریان، نیم‌رخ، مکان، ابعاد، گسیلندگی، واگرایی و طیف انرژی باریکه الکترونی و طیف پرتو x حاصل از تابش ترمزی	داخل کشور
سیستم کنترل (نرم افزار) بر پایه لب و یو تجهیزات خلا شامل پمپ، نرم گنج و شیر	پایش و کنترل پارامترهای شتابگر	خارج کشور (MOXA, زمینس)
	پایش و کنترل پارامترهای شتابگر	داخل کشور
	تامین خلأ مورد نیاز	خارج کشور (Pfeiffer)

جدول ۷. مشخصات شتاب‌دهنده خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی و باریکه الکترونی آن.

نام کمیت	مقدار	ابزار اندازه‌گیری
بیشینه توان بسامد رادیویی	۱/۵ MW	تحلیلگر طیف
بیشینه عرض تپ بسامد رادیویی	۶ μs	آشکارساز پوش و تحلیلگر طیف
بیشینه نرخ تکرار تپ خلأ	۲۷۷ Hz	اسیلوسکوپ
گرادیان انرژی در تیوب شتاب‌دهی با توان ورودی ۲/۵ MW	۱۰-۷ mbar	خلأ سنج Pfeiffer
بیشینه انرژی ذرات در توان ۱/۵ MW	۷ MV/m	طیف سنج مغناطیسی (ساخت داخل)
پهنای انرژی (rms)	۴/۵ MeV	طیف سنج مغناطیسی (ساخت داخل)
جریان باریکه	۰/۳ MeV	طیف سنج مغناطیسی (ساخت داخل)
کمترین ابعاد باریکه (rms)	۰/۲ mA	فنجان فاراده (ساخت داخل)
گسیلندگی	۱ mm	صفحه نمایشی سوسوزن
قابلیت افزایش انرژی با افزایش هر تیوب شتاب‌دهی در توان ۲/۵ MW	۲۵ mm-mrad	چیدمان اسکن سلونویدی (ساخت داخل)
قابلیت افزایش جریان باریکه	۴/۲ MeV	طیف سنج مغناطیسی
	۱۰ mA	فنجان فاراده

تشکر و قدردانی

این پژوهش طولانی بدون پشتیبانی افراد و سازمان‌های مختلف امکانپذیر نمی‌بود. در اینجا لازم می‌دانم از معاون وقت وزیر علوم دکتر رضا منصوری که بودجه اولیه این طرح را در اختیارمان قرار دادند، از دکتر محمد جواد لاریجانی رئیس پژوهشگاه دانش‌های

و فناوری ساخت شتابگرهای خطی به عنوان پرکاربردترین شتابگرها در دنیا و در اختیار داشتن باریکه الکترون ۴ MeV با پارامترهای قابل اندازه‌گیری و تحت کنترل و امکان استفاده از این باریکه برای آزمایش‌های جذابی که امکان آن تا کنون در کشور فراهم نبوده است.



شکل ۶۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) چیدمان فعلی شتابگر خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

بردیم. بدون این کمک‌ها بی‌شک این پروژه موفق نمی‌شد. دانشجویان و همکاران متعددی در این پروژه همکاری کردند و تعداد زیادی پایان‌نامه کارشناسی ارشد و دکترا حاصل این همکاری بود. آنان خود صاحبان معنوی این طرح هستند و امیدوارم که از موفقیت آن برخوردار باشند. با این که اکنون آنها، در آزمایشگاه‌های دیگری به عنوان پژوهشگر یا فناور شتابگرهای ذرات مشغول کار هستند و جایشان برای استمرار این پژوهش در مجموعه پژوهشگاه دانش‌های بنیادی خالی است، امیدوارم که تجربه طراحی و ساخت این شتابگر خطی به پیشرفت علمی و فنی آنان یاری دهد.

بنیادی و همچنین روسای سابق و فعلی پژوهشکده ذرات و شتابگرها که با سخاوتمندی پذیرای این طرح در مجموعه خود بودند و بخش مهمی از بودجه آن را تأمین کردند، از آقای دکتر فریدون عباسی دوانی رئیس وقت سازمان انرژی اتمی ایران و دکتر علی اکبر صالحی رئیس سازمان انرژی اتمی ایران که مدولاتور لامپ کلاسترون و کاتدهای تفنگ الکترونی را به طرح اهدا کردند تشکر کنم. در طول اجرای این طرح از همیاری و همکاری شهرک علمی تحقیقاتی اصفهان، دانشکده فناوری اطلاعات و دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی هسته‌ای دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده فیزیک و شتاب‌دهنده‌های پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، بهره‌فراوان

مراجع

1. G Ising and Arkiv för Matematik, *Astronomi och Fysik* **18** (1924) 1.
2. R Wideröe, *Journal of Archiv für Elektrotechnik*, **21** (1928) 387.
3. D H Sloan and E O Lawrence, *Phys. Rev.* **38** (1931) 2021.
4. E L Chu and W W Hansen, *Journal of Applied Physics* **18** (1947) 996 and E L Chu and W W Hansen, *Journal of Applied Physics* **20** (1949) 280.
5. J C Slater, *Rev. of Modern Physics* **20** (1948) 473.
6. E L Ginzton, W W Hansen, and W R Kennedy, *Review of Scientific Instruments* **19** (1948) 89.
7. M Chodorow, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **26** (1955) 134.
8. M Lamehi Rashti, et al., *Iranian Journal of Physics Research*, **15**, 2 (2015) 119 (Persian).
9. M Pierre Lapostolle and L Albert Septier, “*Linear Accelerators*”, North-Holland Publ. Comp. Amsterdam (1970).
10. EPICS, Experimental Physics and Industrial Control System. <https://epics.anl.gov>
11. LabVIEW. <https://www.ni.com>
12. J Pottier, *NIM B*, 40/41 (pt.2), (1989) 943.
13. D Defrise, M Abs, F Genin, and Y Jongen, *Rad. Phys. And Chem.* **46** (part1), (1995) 473.

- (2010), Tsukuba, Japan, MOPO22.
33. D Alesini, A Citterio, G Compogiani, L Ficcadenti, M Migliorati, A Mostacci, I Palumbo, S Persichelli, R Zennaro, *JINST* **8** (2013) 10010.
 34. F Ghasemi, *MS Thesis*, Shahid Beheshti University, Nuclear Engineering Faculty 2010 (Persian).
 35. F Ghasemi, *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology* **54** (2010) 1 (Persian).
 36. F Ghasemi, *et al.*, *Iranian Journal of Physics Research*, **15**, 2 (2015) 215 (Persian).
 37. S H Shaker and F Ghasemi, *Proceeding of IPAC* (2011), MOPC009.
 38. F Ghasemi, F Abbasi Davani, S Ahmadiannamini, M Shafiee, M Lamahi Rashti and H Shaker, *Proceeding of IPAC* (2012) WEPPD063.
 39. S Haghtalab, *MS thesis*, Shahid Beheshti University, Nuclear engineering faculty 2015 (Persian).
 40. Sh Sanaye Hajari, S Haghtalab, H Shaker, and M Dayyani Kelisani., *Proceeding of IPAC* (2017), THPVA009.
 41. M Golpayrgani, *Ms thesis*, Shahid Beheshti University, Nuclear Engineering Faculty 2015 (Persian).
 42. S Haghtalab, F Ghasemi, M Lamahi, S Ahmadiannamin, and F Abbasi Davani, *Proceeding of IPAC* (2017), TUPAB042.
 43. M Shirshekan, *et al.*, *4th Particle Accelerator Iranian National Conferences*, KH.N.T University, 2018, (Persian).
 44. M R Maher, "comprehensive guide line of step7 PLC", Gheddis Book publishing, 2018, (Persian).
 45. H Koziol., CAS lectures, Loutraki, Greece, (2000).
 46. S Sanaye Hajari *et al.*, *Proceedings, 29th Linear Accelerator Conference, LINAC* (2018), Beijing, China.
 47. S Kasaei, Sh Sanaye Hajari, M Bahrami, and H Shaker, *Journal of instrumentation*, **13** (2018) 06021.
 48. M Hachmann, Diploma thesis, Hamburg University, (2012).
 49. M Yarmohammadi Satri, M Lamahi Rachti, S H Shaker, and F Ghasemi, *Proceeding of IPAC* (2017), Copenhagen Denmark.
 14. A M Poursaleh, *et al.*, *Iranian Journal of Physics Research*, **15**, 2 (2015) 137 (Persian).
 15. S Zarei, F Abbasi, F Ghasemi, S Ahmadiannamini, and S H Shaker, *Proceedings of IPAC2012*, New Orleans, Louisiana, USA, TUPPR050
 16. S Ahmadiannamin, S Hamed Shaker, M Lamahi Rachti, M Bahrami, M Shirshekan, and M R Khalvati, *Proceedings of IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, TUPAB045.
 17. CST Studio, <https://www.3ds.com/>.
 18. F Ghasemi, F Abbasi Davani M Lamahi Rashti, H Shaker, and S Ahmadiannamin, *NIM A* **772** (2015) 52.
 19. F Ghasemi, *PhD thesis*, Shahid Beheshti University, Nuclear Engineering Faculty 2015 (Persian).
 20. Poisson/Superfish, Los Alamos Accelerator Code Group, LA-UR-87-115, 1987.
 21. CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software, (<http://www.cst.com>)
 22. Ansoft high frequency structure simulation code, (<http://www.ansoft.com/hfss>).
 23. S Nazemi, *MS thesis*, Shahid Beheshti University, Nuclear Engineering Faculty 2009 (Persian).
 24. F Ghasemi and F Abbasi Davani, *JINST* **10** (2015)
 25. SAS Inc., ANSYS, trademark, <http://www.ansys.com/>.
 26. L C and J C Slater, *Journal of Applied Physics* **23** (1952) 68.
 27. L F Chen, *et al.*, "Microwave Electronics", John Wiley & Sons (2004).
 28. A Labanc, Report No. DESY-TESLA-2008-01 (2008).
 29. R G Carter, *Microwave Theory and Technics, IEEE Transaction* **49** (2001) 918.
 30. T K Mandi, H K Pandey, S Basak, A Bandyopadhyay. and A Chakrabarti, *Proceedings of the DAE-BRNS Indian particle accelerator conference* (2009).
 31. J Shi, A Grudiev, and W Wensch, *NIM A* **7fv04**, (2013) 14.
 32. J Shi, A Grudiev, A Olyunin, W Wensch, *Proceeding of Linear Accelerator Conference LINAC*