

طراحی و ساخت نخستین شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترون ساخت ایران

علی محمد پورصالح، حسین خلفی، سعید حاصل طلب، مجتبی مرتضوی، سیدخلیل موسوی، فرشاد قاسمی،
کاظم جوکار، ابوالفضل جمهوری و محمد عاطفی

مجتمع پژوهشی یزد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

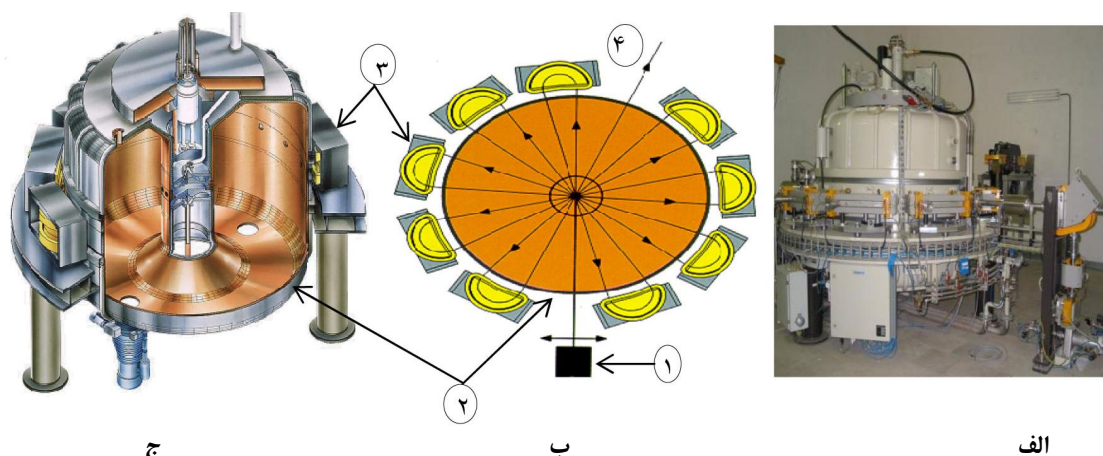
در این مقاله به معرفی مراحل انجام پروژه طراحی و ساخت شتاب‌دهنده الکترون با انرژی 10MeV و توان 100kW به عنوان اولین شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترون ساخت ایران خواهیم پرداخت. این شتاب‌دهنده بر اساس الگوبرداری یکی از قوی‌ترین شتاب‌دهنده‌های صنعتی جهان بنام شتاب‌دهنده رودترون طراحی و ساخته شده است. لیکن طراحی این شتاب‌دهنده به گونه‌ای است که با اتکا به صنایع داخلی و قطعات قابل دسترس در داخل کشور نسبت به بومی سازی آن اقدام شده است. و لذا هرچند که این شتاب‌دهنده دارای همان ساختار شتاب‌دهنده رودترون است ولی در طراحی و ساخت اجزای آن به ویژه مدارهای الکترونیکی تا حدودی متفاوت بوده و نتایج حاصل از تست و راه‌اندازی آن بسیار رضایت بخش است.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده صنعتی الکترون، باریکه الکترونی، شتاب‌دهنده رودترون، سیستم RF، تفنگ الکترونی

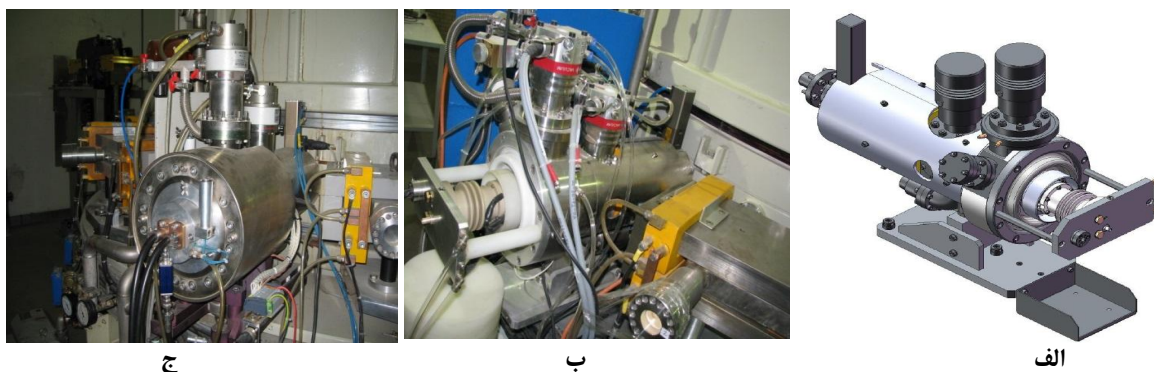
۱. مقدمه

تحت تاثیر میدان الکتریکی با کسب انرژی 1MeV از کاواک یا محفظه شتاب خارج شده و توسط آهن رباهای خم کننده جهت شتاب مجدد، وارد محفظه شتاب می‌گردند. پس از ده مرحله رفت و برگشت در داخل محفظه شتاب در نهایت یک باریکه الکترون با انرژی 10MeV تولید می‌شود. شتاب‌دهنده رودترون دارای مدل‌های مختلفی است که متداولترین آنها مدل $TT200$ می‌باشد [۱ و ۲]. این شتاب‌دهنده کاربردهای گسترده‌ای در علوم و صنایع مختلف دارد [۳]. شکل ۱ تصویری از نحوه

ایده اولیه طراحی و ساخت شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترون بر اساس ساختار شتاب‌دهنده رودترون مد نظر قرار گرفت و بر این اساس پروژه طراحی و ساخت شتاب‌دهنده الکترون با انرژی 10MeV و توان 100kW تعریف و به تصویب رسید. شتاب‌دهنده رودترون یک شتاب‌دهنده الکترون با حداکثر قدرت و انرژی در محدوده صنعتی می‌باشد و محصول شرکت IBA بلژیک است. در این شتاب‌دهنده ذرات الکترون



شکل ۱. الف) شتاب‌دهنده رودترون TT200، ب) مسیر عبور باریکه، ج) برشی از شتاب‌دهنده رودترون اجزا: ۱-تفنگ الکترونی، ۲-محفظه شتاب، ۳-مگنت خم کننده، ۴-باریکه الکترونی



شکل ۲. الف) طرح کلی بدنه، ب) تفنگ الکترونی ساخته شده، ج) تفنگ الکترونی شتاب‌دهنده رودترون.

دسترس در داخل کشور به صورت کاملاً بومی نسبت به ساخت شتاب‌دهنده اقدام نمود. این شتاب‌دهنده دارای اجزا و قطعات زیادی است که برخی از قسمت‌های اصلی آن شامل تفنگ الکترونی، سیستم مولد فرکانس رادیویی یا سیستم RF، آهن ربا‌های خم کننده و خطوط انتقال باریکه می‌باشد که در ذیل به روند طراحی و ساخت آن می‌پردازیم. اولین قسمت این شتاب‌دهنده که مورد تحلیل، شبیه سازی و طراحی قرار گرفت. تفنگ الکترونی بود که باتوجه به در نظر گرفتن تمامی تمهیدات لازم طراحی و ساخته شده است. این تفنگ الکترونی ساختاری ترمیونی دارد و تا حدودی از نظر مدارهای الکترونیکی با تفنگ الکترونی مورد استفاده در شتاب‌دهنده TT200 متفاوت است و بر اساس امکانات داخلی طراحی و ساخته شده است. شرح کلی روند طراحی و ساخت این قسمت در مراجع [۴] آمده است. در شکل ۲ الف، تصویری از طرح بدنه تفنگ الکترونی و در شکل ۲ ب، تفنگ الکترونی

چرخش و مسیر عبور باریکه الکترونی و برشی از این شتاب‌دهنده و همچنین دستگاه شتاب‌دهنده رودترون TT200 در حال کار در مجتمع پژوهشی کاربرد پرتوهای یزد را نشان می‌دهد.

۲. روش کار

با توجه به اینکه شتاب‌دهنده رودترون به عنوان الگوی اولیه طرح، انتخاب شده است لذا قسمت‌های اصلی این شتاب‌دهنده می‌بایست مورد تحلیل و بررسی دقیق قرار گرفته و براساس محاسبات و طراحی جدید صورت گرفته نسبت به ساخت این شتاب‌دهنده اقدام گردد. این امر با تکیه بر تجارب چندین ساله و شناسایی دقیق شتاب‌دهنده رودترون TT200 موجود در مجتمع پژوهشی کاربرد پرتوهای یزد صورت گرفته است. همچنین با توجه به شرایط فعلی کشور از لحاظ تحریم و تهیه برخی قطعات خاص طراحی به گونه‌ای انجام شد که بتوان با اتکا به صنایع داخلی و قطعات قابل



شکل ۳. الف) طرح کلی مگنت، ب) نمونه‌ای از مگنت ساخته شده، ج) مگنت شتاب‌دهنده TT200.

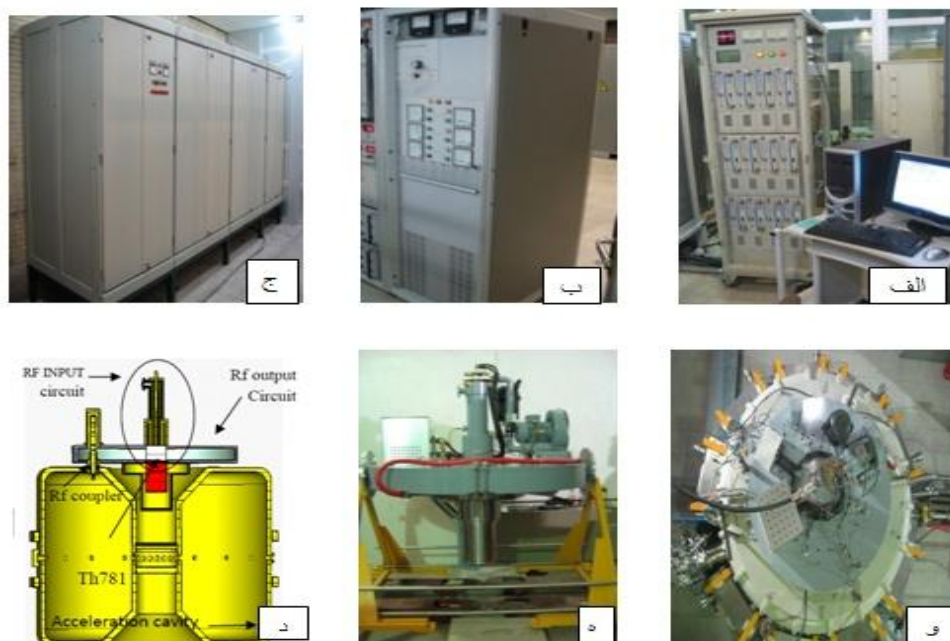
تقویت کننده 10 kW و در نهایت وارد تقویت کننده 200 kW می‌شود و توسط یک کوپلر به کاواک یا محفظه شتاب متصل می‌شود. همچنین جهت پایداری میدان داخل محفظه شتاب از فیدبک‌های لازم بین محفظه شتاب و LLRF استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه LLRF شتاب‌دهنده رودترون دیجیتالی بوده و از قطعات خاص غیر قابل دسترس در کشور تشکیل شده است، طراحی LLRF جدید بر مبنای قطعات موجود داخل کشور و به صورت آنالوگ صورت گرفته است که نتایج حاصل از به کارگیری آن نیز بسیار رضایت بخش می‌باشد. مشکل دیگر تهیه قطعات تقویت کننده 10 kW بود. این تقویت کننده در شتاب‌دهنده موجود از نوع لامپی می‌باشد و از تیوب تترود TH341 استفاده نموده است، لذا با استفاده از ایده‌ای نو جهت استفاده از تقویت کننده ترانزیستوری در این سطح توان نسبت به طراحی و ساخت این قسمت اقدام شد که به نوبه خود دستاوردی بزرگ محسوب می‌شود که شرح مراحل طراحی و ساخت آن در مرجع [۶] آمده است. در شکل ۴ الف، تقویت کننده ترانزیستوری ساخته شده جهت شتاب‌دهنده مورد نظر و شکل ۴ ب نمایی از تقویت کننده 10 kW لامپی مورد استفاده در شتاب‌دهنده رودترون TT200 نشان داده شده است. تقویت کننده نهایی وظیفه تقویت سیگنال‌های دریافتی پیوسته باند VHF تا سطح 200 kW را دارد و از یک تیوب تترود مدل THV81 تشکیل شده که مطابق شکل ۴ د، در یک محفظه رزونانس خاص قرار گرفته و توسط یک کوپلر به کاواک متصل می‌گردد. محفظه قرارگیری تیوب از اجزای حساس زیادی

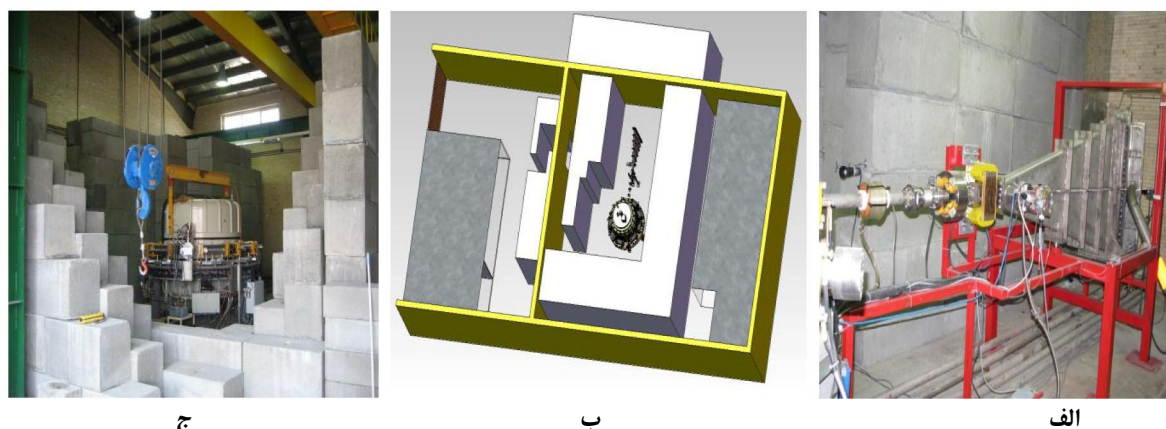
ساخته شده پس از نصب بر روی شتاب‌دهنده و در شکل ۲ ج، تفنگ الکترونی مورد استفاده در شتاب‌دهنده رودترون TT200 نشان داده شده است.

با توجه به حساسیت آهن رباهای خم کننده، طراحی و ساخت این قسمت با دقت بسیار بالا صورت گرفته است. طراحی ابعادی این آهن ربا کاملاً می‌بایست متناسب با طول موج رزونانس کاواک باشد تا همزمانی بین چرخش باریکه الکترونی و میدان RF داخل کاواک حفظ شود، لذا دقت در طراحی ابعادی نحوه چرخش باریکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی هسته‌های این آهن ربا باید از موادی ساخته شود که ضمن ایجاد میدان ثابت دارای حداقل پسماند مغناطیسی باشد.

جهت تهیه مواد مناسب جهت ساخت هسته، پس از مطالعه و آنالیز مواد قابل استفاده جهت داشتن کمترین پسماند، این مواد به صورت پودر تهیه و پس از ریخته‌گری با دقت بسیار بالایی ماشینکاری گردید. در این آهن ربا چهار سیم پیچ مطابق شکل ۳ وظیفه ایجاد میدان مغناطیسی را به عهده دارند. آهن رباهای ساخته شده نسبت به آهن رباهای شتاب‌دهنده TT200 از نظر وجود پسماند مغناطیسی هسته برتری دارد. جزئیات طراحی و ساخت، آنالیز مواد و مزیت این آهن رباها در مرجع [۵] آمده است. سیستم RF از مهمترین قسمت‌های این شتاب‌دهنده است که شامل اجزای بسیار پیچیده‌ای می‌باشد. در این سیستم سیگنال اولیه موج پیوسته با فرکانس 107 MHz در قسمتی به نام LLRF تولید و سپس توسط یک تقویت کننده 100 وات ترانزیستوری تقویت و جهت تقویت مجدد به یک طبقه



شکل ۴. الف) تقویت کننده ۱۰kW ترانزیستوری ساخته شده، ب) تقویت کننده لامپی رودترون TT۲۰۰، ج) منبع تغذیه آند مدولاتور THVA ساخته شده، د) طرح کلی کاواک و نحوه کوپل RF به آن، ه) محفظه THVA ساخته شده، و) محفظه THVA نصب شده بر روی شتاب‌دهنده.



شکل ۵. الف) خط انتقال باریکه، ب) طرح کلی حفاظ بیولوژیکی، ج) تصویری از چیدمان بلوک‌های سیمانی.

نشان می‌دهد. جهت خروج باریکه از شتاب‌دهنده و هدایت آن به سمت هدف مورد نظر جهت پرتودهی از یک خط انتقال باریکه مطابق شکل ۵ الف، استفاده شده است. این خط انتقال بر خلاف شتاب‌دهنده TT۲۰۰ که به صورت عمودی است با توجه به فضای ساختمانی به صورت افقی طراحی شده است و قادر به روبش باریکه الکترونی به طول ۱m می‌باشد. در این خط انتقال آهن ربای چهار قطبی برای همگرایی باریکه، تجهیزات اندازه‌گیری باریکه خروجی، آهن ربای روبش جهت جاروب باریکه در محدوده قابل تنظیم

تشکیل شده است که دقت در ساخت آن در این سطح از توان و پایداری فرکانسی و همچنین رعایت تطبیق امپدانس بین طبقات، بسیار مهم است که مراحل طراحی و ساخت آن در مرجع [۷] آمده است. تصویری از محفظه قرارگیری تیوب THVA ساخته شده را در شکل ۴ ه و همچنین قسمتی از مدولاتور ساخته شده این تیوب که تغذیه آند در این تیوب را به عهده دارد را در شکل ۴ ج می‌توان مشاهده کرد. شکل ۴ و، تصویری از محفظه قرارگیری و همچنین نحوه نصب آن بر روی کاواک شتاب‌دهنده ساخته شده را



شکل ۶. شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترون ساخته شده و بخشی از اتاق کنترل این شتاب‌دهنده.

را تحت نظارت و کنترل هوشمند قرار داده و اپراتور شتاب‌دهنده به راحتی و با اطمینان آن را مورد استفاده قرار دهد. شکل ۶ تصویری از اولین شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترون ساخت ایران و همچنین بخشی از اتاق کنترل این شتاب‌دهنده را نشان می‌دهد.

۳. نتایج

چنانچه اشاره شد هر کدام از اجزای مختلف شتاب‌دهنده قبل از ساخت توسط نرم افزارهای مختلف کاربردی نظیر ADS, ANSYS, SUPERFISH, CST و HFSS شبیه سازی شده و همچنین قبل از به کارگیری در شتاب‌دهنده به صورت مجزا مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفته‌اند که نتایج حاصل از آن نیز بسیار رضایت بخش بوده است. لیکن با توجه به گستردگی مطالب، ارائه نتایج حاصل از تک تک قسمت‌های مختلف این شتاب‌دهنده در این مقاله امکان پذیر نیست و لذا در اینجا تنها به برخی از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در خصوص باریکه خروجی از این شتاب‌دهنده می‌پردازیم. در ابتدا جهت تست و تنظیم مسیر عبور باریکه الکترونی در این شتاب‌دهنده با قطع تغذیه هر آهن‌ربای خم کننده سطح مقطع باریکه خروجی آن را توسط لومینسانس و ایجاد نور مرئی مورد تست قرار دادیم که در شکل ۷ الف، نمونه‌ای از این آزمون را مشاهده می‌شود. همچنین در خروجی خط انتقال نیز توسط آهن‌ربای روبش خط باریکه‌ای مطابق شکل ۷ ب، ایجاد می‌شود که در حقیقت خروجی نهایی شتاب‌دهنده، جهت پرتودهی محصولات مختلف می‌باشد. سطح انرژی خروجی نهایی این شتاب‌دهنده نیز باروش استاندارد

بین ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی متر به کارگیری شده است. جهت حفاظت در مقابل پرتوهای یونساز و غیریونساز ناشی از شتاب‌دهنده و با توجه فضای ساختمانی محدود در اختیار و بر اساس محاسبات صورت گرفته یک حفاظ بیولوژیکی مطابق شکل ۵ ب، طراحی شده که در شکل ۵ ج، بخشی از چیدمان بلوک‌های سیمانی جهت ساخت حفاظ موقت نشان داده شده است.

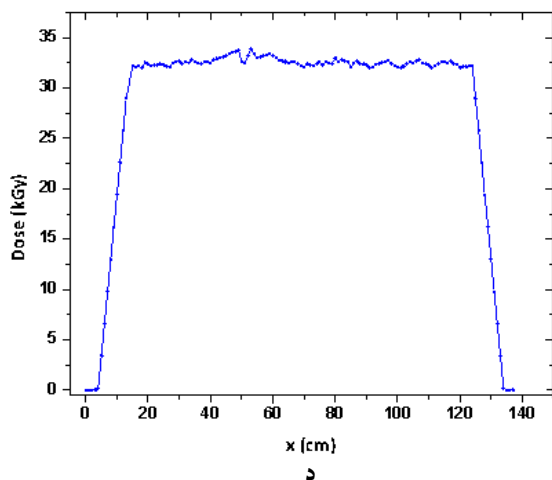
این شتاب‌دهنده دارای اجزای دیگری نیز است که به اختصار به آنها اشاره می‌کنیم. سیستم خنک سازی این شتاب‌دهنده متشکل از دو سیکل خنک سازی توسط آب معمولی و آب بدون یون می‌باشد و عملیات تبادل حرارتی توسط یک چیلر خنک کننده ۱۵۰ تن صورت می‌گیرد. مهمترین بحث خنک سازی مربوط به آنالیز حرارتی محفظه شتاب می‌باشد که نتایج حاصل این تحقیق در مرجع [۸] آمده است. برق اصلی این شتاب‌دهنده با توان ۴۰۰ کیلو وات نیز از طریق یک پست فشار قوی ۲۴kV تأمین که از طریق یک ترانس کاهنده ۶۰۰KVA به ولتاژ ۳۸۰ ولت مورد نیاز تبدیل می‌گردد و از طریق تابلوهای توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم خلاء نیز که در قسمت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز از طریق هفت عدد پمپ خلا با ظرفیت‌های مختلف خلاهای از 10^{-7} mbar تا 10^{-11} mbar را تأمین می‌کند. در این سیستم نیز کلیه قطعات مورد نیاز به جز پمپ‌های خلا در داخل کشور طراحی و ساخته شده است. سیستم کنترلی این شتاب‌دهنده نسبت به شتاب‌دهنده TT۲۰۰ موجود کامل تر بوده و بردهای حفاظتی و کنترلی و همچنین نرم افزار سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که با دقت بالا بتوان کلیه قسمت‌ها



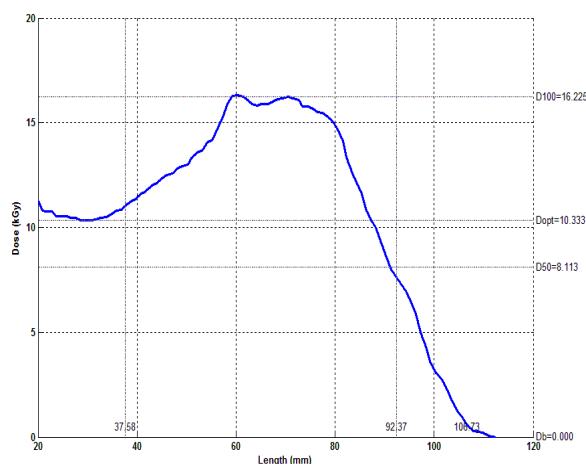
ب



الف



د



ج

شکل ۷. الف) باریکه خروجی از یک مگنت، ب) خط باریکه ظاهر شده در خروجی شتاب‌دهنده، ج) نمودار دز عمق و تایید انرژی 10MeV ، د) نمودار توزیع دز در خروجی با طول اسکن ۱ متر.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف مورد تایید تمامی تیم‌های کارشناسی، بر توانایی ساخت شتاب‌دهنده‌های پر قدرت صنعتی در داخل کشور صحنه گذاشت. این شتاب‌دهنده طی مراسمی با دستور ریاست محترم جمهوری و ریاست سازمان انرژی اتمی در روز ملی فن آوری هسته‌ای به بهره برداری رسید. شتاب‌دهنده ساخته شده هرچند از نظر ساختار همان شتاب‌دهنده رودترون است لیکن از برخی لحاظ متفاوت می‌باشد. به طور مثال: مدارهای الکترونیکی و کنترلی تفنگ الکترونی در این شتاب‌دهنده با ساختاری ساده‌تر ساخته شده است. آهن رباهای خم کننده به دلیل پس ماند مغناطیسی بسیار کم کارکردی به مراتب بهتر از آهن رباهای خم کننده شتاب‌دهنده رودترون $TT200$ دارند، در سیستم RF به

اندازگیری دز عمق و با استفاده گوه و فیلم دزیمتری مورد آزمون قرار گرفته که نمودار حاصل از این اندازه‌گیری در شکل ۷ ج نشان داده شده است. این نتیجه دقیقاً مطابق نتایج اندازه‌گیری متداول انجام شده در شتاب‌دهنده رودترون $TT200$ می‌باشد و دستیابی به انرژی 10MeV در خروجی این شتاب‌دهنده را تایید می‌کند. شکل ۷ د، توزیع دز در باریکه خروجی با طول روبش 100 سانتیمتر را نشان می‌دهد.

همچنین علاوه بر نتایج ذکر شده، اندازه‌گیری‌های مختلف توسط گروه‌های دزیمتری و فیزیک بهداشت پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و همچنین گروه‌های کارشناسی از نظام ایمنی کشور همگی گواه بر صحت نتایج و دستیابی کشور به ساخت اولین شتاب‌دهنده پر قدرت الکترونی با مشخصات مندرج در جدول ۱ است.

جدول ۱. مشخصات فنی شتاب‌دهنده رودترون ساخته شده.

شتاب‌دهنده RF موج پیوسته شبیه شتاب‌دهنده رودترون	ساختار شتاب‌دهی
الکترون، ایکس (با استفاده از هدف)	پرتوهای تولیدی
$10 \text{ MeV} (\pm 25 \text{ keV})$	حداکثر انرژی باریکه خروجی
100 kW	حداکثر توان باریکه خروجی
0-10 mA	بازه جریان باریکه خروجی
300 kW	توان برق مصرفی جهت تولید حداکثر توان باریکه
شامل سه طبقه تقویت کننده ترانزیستوری و یک طبقه تیوب تترود مدل THV81 با توان 200 kW (CW)	سیستم RF
107.5 MHz	فرکانس کار
به صورت عمودی یا افقی	خروجی باریکه
30-100 cm	طول باریکه خروجی
3 m	قطر شتاب‌دهنده
2.5 m	ارتفاع
11 T	وزن دستگاه

سپاسگزاری

در پایان بر خود لازم می‌دانیم از کلیه عزیزانی که ما را در خلق این دستاورد بزرگ علمی در کشور یاری دادند به ویژه کلیه پرسنل خردوم مجتمع پژوهشی کاربرد پرتوهای یزد، معاونت توسعه کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، شرکت ساخت و توسعه شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آنها (تکنوسان) و همچنین از حمایت‌های بی دریغ ریاست محترم وقت سازمان انرژی اتمی صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

جای استفاده تقویت کننده 10 kW لامپی از تقویت ترانزیستوری با مزایای بهتر از قبیل: طول عمر بالاتر، بهره برداری و تعمیرات و نگهداری راحت‌تر، ایمنی بیشتر، استفاده شده است. سیستم کنترل نیز از نظر سخت افزاری و نرم افزاری ارتقاء یافته است، لذا این شتاب‌دهنده به عنوان اولین شتاب‌دهنده پر قدرت صنعتی ایران برای الکترون آماده ارائه خدمات بوده و بر اساس این الگو امیدوارم در آینده نزدیک شاهد تولید انبوه آن و گسترش صنعت شتاب‌دهنده‌ها در کشور باشیم.

مراجع

۴. علی محمد پورصالح، سعید حاصل طلب، محمدجواد موسوی، حسینعلی بابائی و مجتبی مرتضوی، هفدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، مجتمع سوخت هسته‌ای، اصفهان (۱۳۸۹).

1. J Pottier *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, **40** (1989) 943.
2. Y Jongen, M Abs, J M Capdevil, D Defrise, F Genin, and A Nguyen, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **89** (1994) 60.
3. Y jangen, M Abs, T Delvigne, F Genin, and A Ngyven. *Emerging Applications of Radiation*

۵. علی محمد پورصالح، سعید حاصل طلب، حسین خلفی، مجتبی مرتضوی و محمدعلی زعیمی، هیجدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، پژوهشکده کاربرد پرتوها، یزد (۱۳۹۰).
۶. علی محمد پورصالح، حسین خلفی، رضا افراز، محمد صادق ترمان، کاظم جوکار، نوزدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه فردوسی، مشهد (۱۳۹۱).
۷. علی محمد و رصالح، حسین خلفی، محمدرضا محمد، سعید حاصل طلب، مجتبی مرتضوی، نوزدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۱).
۸. احسان دهقان، حسین کاظمی نژاد، علی محمد پورصالح، مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۶۱ (۱۳۹۱) ۶۵.