

## شبه سازی و ساخت اولین ستون شتابگر الکترواستاتیکی ۲۰۰kV در ایران

پیوند طاهرپرور<sup>۱\*</sup>، جواد رحیقی<sup>۲</sup>، مرتضی جعفرزاده<sup>۲</sup>، حسین قدس<sup>۲</sup>

۱- رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده علوم هسته ای

**چکیده:** در این مقاله، شبه سازی و ساخت ستون یک شتابگر الکترواستاتیکی برای تولید باریکه‌های پروتون و دوترون با انرژی ۲۰۰keV ارائه شده است این ستون شامل ۱۵ الکتروود فلزی به اشکال‌های گوناگون، شامل سه عدسی استوانه‌ای برای استخراج، کانونی، و خنک کردن باریکه، و یک کانال شتابگر با ۱۱ عدسی‌های دهانه‌ای است. که عملکرد آنها بطور کلی استخراج باریکه و موازی کردن پوش باریکه در راستای محور ستون است. الکتروودها از جنس آلومینیوم بوده که توسط چسب هایی بر پایه اپوکسی به عایق‌های سرامیکی متصل شده اند. آزمایش‌های انجام شده با استفاده از یک چشمه یونی RF نشان دادند که این ستون قادر است جریانی حدود  $50 \mu A$  را با انرژی ۲۰۰keV به هدف بتاباند.

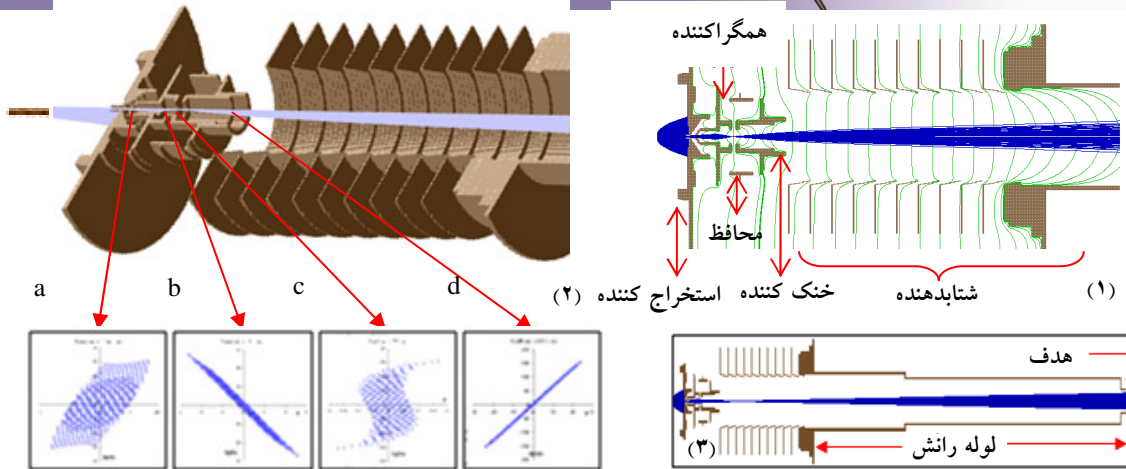
**کلمات کلیدی:** ستون شتابگر الکترواستاتیکی، عدسی الکترواستاتیکی، SIMION

## مقدمه

طراحی و ساخت سیستم های شتابگر از دهه سی میلادی تا به اکنون ادامه داشته است و روز به روز بر توسعه و پیشرفت در زمینه طراحی، ساخت و استفاده از شتابگرها در کاربردهای مختلف افزوده می گردد، بگونه ای که امروزه استفاده از شتابگرها، نقش مهمی در زمینه تحقیقات هسته ای، پزشکی، متالورژی، صنعتی، علوم پایه و ... دارد [۱،۲]. و ساخت آن تنها در تعداد معدودی از کشورها صورت می پذیرد.

به منظور ساخت ستون مذکور، از نرم افزارهای SIMION7.0 [۳]، Virtual Device [۴] و Toolkit [۳] در طراحی الکتروودها، شبه‌سازی میدان های الکتریکی و طرح خطوط هم پتانسیل الکتروودهای ستون شتابگر استفاده شد تا در نهایت به کمک نتایج حاصل از هندسه های شبه سازی به انتخاب مناسب ترین هندسه از دیدگاه کیفیت باریکه و همچنین هزینه ساخت اقدام شود. قسمت‌های مهم ستون شتابگر الکترواستاتیکی ۲۰۰کیلوولت، شامل ستون شتابگر و چشمه یون را می توان در تصاویر شکل ۱ مشاهده نمود.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، ستون شتابگر ساخته شده دارای ۱۵ الکتروود فلزی از جنس آلومینیوم بوده است که توسط ۱۴ استوانه سرامیکی (به عنوان عایق) از یکدیگر جدا شده‌اند. در این سیستم، ولتاژ ۲۰۰kV بین الکتروودها بطور مساوی تقسیم شده، که میدان یکنواختی را برای شتاب ذرات باردار فراهم می‌کند. عملکرد کلی الکتروودهای فلزی به صورتی است که با ایجاد یک پتانسیل متقارن محور، باریکه‌ای پیرامون تولید نموده و با هدایت این باریکه به سمت هدف بر نیروی امیتانس غلبه نمایند.



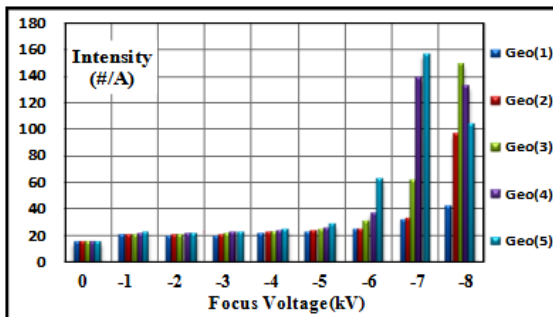
شکل ۱: (۱) نمایش اجزای داخلی ستون شتابگر  $200\text{ kV}$  و نام الکترودها، حرکت باریکه و نقش خطوط هم پتانسیل در داخل ستون، (۲) برش سه-بعدي ستون شتابگر و حرکت باریکه در آن به همراه امیتانس باریکه در نقاط متفاوتی در داخل ستون، (۳) نمای کامل ستون (شبیه سازی توسط SIMION 7.0 و Virtual Device)

در اشکال ۳ حرکت سه بعدی باریکه در ستون، خطوط هم پتانسیل و نیز امیتانس باریکه در نقاط متفاوتی از آن به تصویر کشیده شده است. با توجه به خطوط هم پتانسیل در شکل ۱-۱ و شکل پوش باریکه و امیتانس آن (شکل ۱-۲ و ۳)، می توان گفت در این ستون، باریکه خارج شده از چشمه یونی توسط الکترودها استخراج کننده به صورت واگرا (شکل ۱-۲-a) وارد ستون شتابگر می شود، این الکترودها، وظیفه استخراج، تشکیل باریکه و کانونی کردن آن را دارد و قطر دهانه ورودی آن تعیین کننده میزان پذیرش و پیرامحوری باریکه است. سپس باریکه توسط الکترودها همگراکننده به کمک خطوط هم پتانسیل ناشی از الکترودها دوم (شکل قیف مانند) و همچنین عدسی الکترواستاتیک شکل گرفته از الکترودها دوم و چهارم جدا از نیروی محوری، نیرویی شعاعی را تجربه نموده و کانونی می شود (شکل ۱-۲-b و c). برای جلوگیری از تاثیر میدان های الکترواستاتیک خارجی در فاصله میان الکترودها دوم و چهارم، از الکترودها محافظ استفاده می شود و نقشی در اپتیک باریکه ندارد [۵]. ذرات پس از نقطه کانونی، واگرایی زیادی دارند (شکل ۱-۲-d) که برای جلوگیری از آن و هدایت باریکه، از الکترودها چهارم و تعامل آن با اولین الکترودها شتابدهنده برای اعمال نیروی شعاعی استفاده می شود. پس از ایجاد باریکه ای تقریباً خطی، با استفاده از الکترودهای شتابدهنده دارای دهانه مخروطی [۶، ۲] و ایجاد میدان یکنواخت، ذرات باریکه شتاب داده شده و به انرژی مطلوب می رسند و از طریق لوله رانش (باریکه) به هدف برخورد مینمایند. ایجاد شکست های الکتریکی محدودیتی است که در انتخاب فاصله الکترودها وجود دارد. تحقیقات انجام شده بر پایه نتایج تجربی، با معادله  $d[\text{mm}] = 1.4 \times 10^{-2} V_0^{3/2} [\text{kV}]$  مطابقت خوبی را نشان می دهد. اما رخداد این پدیده بسیار پیچیده بوده و به عوامل مختلفی وابسته است [۶، ۷].

## شبیه سازی ستون شتابگر و نتایج:

با توجه به مواردی از قبیل دستیابی به کیفیت باریکه و جریان بیشتر و همچنین طول ستون و هزینه ساخت، ۵ هندسه توسط کدهای SIMION و I Device ۲۰۵ سازی شد. در هندسه های طراحی شده بدلیل استفاده از چشمه یون RF، شکل و تعداد الکترودهای استخراج کننده و همگرا کننده مشابه می باشد و میزان تحمل ولتاژ پایدار نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به ایجاد پله های پتانسیل یکسان، شتابگرهایی با پایه نتایج شبیه سازی، هزینه ساخت و دیگر موارد اثر گذار بر میزان طول ستون، به ساخت مناسب ترین هندسه اقدام شود. در تمامی هندسه ها ولتاژ ۲۰۰kV به استخراج کننده اعمال شده و اختلاف پتانسیل یکسان به هر یک از الکترودهای مجاور، بگونه ای اعمال می شود که الکترودهای در پتانسیل ۰ قرار گیرد.

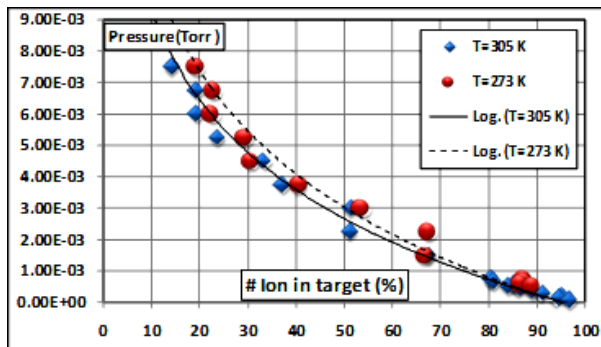
در شکل ۲ می توان نمودار شدت باریکه در هدف به ازای مقادیر متفاوت ولتاژ همگراکننده را مشاهده نمود. نمودار نشان می دهد که در بازه مجاز اختلاف پتانسیل الکترودهای کانونی کننده نسبت به الکترودهای اول (۰ تا ۱۰kV-)، شدت باریکه در هدف، از هندسه ۱ تا ۵ افزایش می یابد، بنابراین شدت باریکه در هندسه های ۴ و ۵ (بخصوص در اختلاف پتانسیل های بالا) به ترتیب بیشترین مقدار را دارند. که این امر برتری هندسه هایی با تعداد الکترودهای بیشتر را نشان می دهد.



شکل ۲: تغییر در تعداد شدت باریکه فرودی بر هدف در ازای مقادیر ولتاژهای متفاوت الکترودهای همگرا کننده در هندسه های مختلف (هندسه ۱ تا ۵) (نتایج شبیه سازی ها، توسط SIMION 7.0)

با توجه به نمودار فوق و دیگر نتایج حاصل از شبیه سازی در مرجع ۶، اگر به مزایای یاد شده برای طول کمتر ستون شتابگر توجه محض داشته باشیم، ستون هایی با تعداد الکترودهای کمتر (به دلیل طول کلی کمتر)، مناسبتر می باشند (هندسه ۱ با کمترین طول). اما اگر طول ستون مهم نبوده و دستیابی به یک باریکه با بهترین کیفیت، به عنوان هدف مطرح باشد، استفاده از پله پتانسیل کمتر و طول ستون بیشتر مناسب است. اما با در نظر گرفتن محدودیت طولی، باید هندسه ای را انتخاب کرد که حد تعادلی را در بین شرایط یاد شده داشته باشد. به این سبب، هندسه ۴ به عنوان هندسه ایده آل برای برپایی ستون ۲۰۰kV انتخاب شد. افزایش طول سیستم، به سبب تاثیر افزایش برخورد ذرات باریکه با گاز باقی مانده در ستون، به عنوان یک عامل مهم دیگر محسوب می شود که شبیه سازی این امر، به کمک کد SIMION Toolkit، انجام گشت. نتایج شبیه سازی ها (شکل ۳) برای هندسه ۱۵ الکترودهای نشان داد، اگرچه در محدوده فشار  $10^{-3}$  Torr (برای دو دمای  $30^{\circ}$  و  $0^{\circ}$ ) تعداد ذرات فرودی بر هدف به شدت تابع فشار است، اما در خلا های بهتر (بالا تر از  $10^{-5}$  Torr) که

عملاً سیستم در آن کار می کند، بیش از ۹۵ درصد یون های استخراجی از چشمه یون بدون برهمکنش الاستیک با مولکول های باقیمانده گاز در محیط، طول ستون را طی نموده و به هدف اصابت می نمایند که این امر نگرانی ناشی از دست دادن باریکه به سبب افزایش طول را برطرف می نماید.



شکل ۳: درصد تعداد ذرات برخوردی به هدف در فشارهای مختلف و در دماهای ۲۷۳ و ۳۰۵ درجه کلوین، نقاط صلب نتایج حاصل از شبیه سازی ها را نشان می دهد (نتایج شبیه سازی های SIMION 7.0 و SIMION Toolkit)

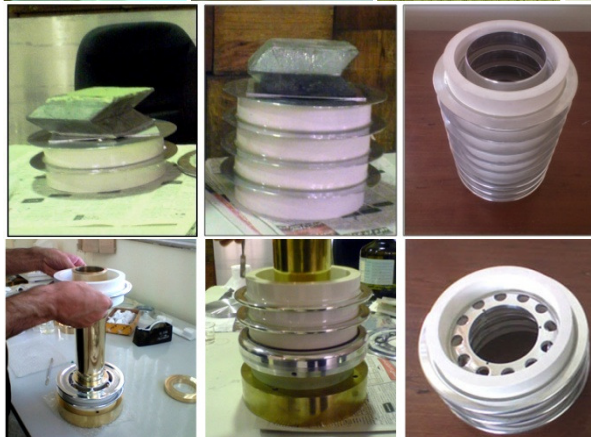
### ساخت ستون شتابگر ۲۰۰keV

برای انتخاب مواد مورد استفاده در ساخت الکترودها و عایق ها از تجربه موفق ساخت ستون ۱۵۰kV استفاده شد [۸] و البته شرایط جدید اعمال شده به قطعات برای بررسی میزان توانایی آنها مورد بررسی کامل قرار گرفت. الکترودی برای ساخت ستون مورد توجه است که توان ایجاد اختلاف پتانسیل های بالا را در فاصله های کم داشته و همچنین دارای کمترین تابش میدان الکتریکی، میکروشارژ و گازگسیلی باشد. از بین تمامی فلزات، Ti، S.S، Al دارای خواص فوق می باشند [۶]. که با توجه به تمامی موارد و در نظر گرفتن میزان هزینه تمام شده، از Al، S.S در ساخت الکترودها استفاده شد. متداول ترین مواد مورد استفاده در ساخت عایق های ستون شتابگر، شیشه های بوروسیلیکاتی و سرامیک ها محسوب می شوند [۶،۸،۹]. به دلیل بیشتر بودن تنش برشی و ثابت دی الکتریک سرامیک نسبت به شیشه، معمولاً آنها انتخاب اول در ستون هایی با اختلاف پتانسیل زیاد محسوب می شوند. از آنجائیکه توانایی ساخت انواع مختلفی از سرامیک ها در کشور موجود است، برای ساخت ستون شتابدهنده، از سرامیک به عنوان عایق استفاده شد. برای بهینه نمودن عایقها، سرامیک ها به صورت لعابدار تولید گردید. انتخاب چسب از مسایل بسیار حساس در اتصال الکترودها و قطعات سرامیکی است. چسب مورد استفاده باید دارای خاصیت های ویژه ای همچون مقاوم در برابر شوک الکتریکی، گاز گسیلی و تولید یون های ثانویه کم و ... باشد [۸]. در ساخت ستون شتابگر معمولاً برای اتصال سرامیک به الکتروود فلزی از رزین های PVA و اپوکسی استفاده می شود. برای هم محور کردن الکترودها در حین اتصال و چسباندن، از Fixture (طراحی شده در گروه فیزیک نوترون) استفاده شد. ضخامت بهینه در چسبکاری اپوکسی بسته به نوع چسب تغییر می کند [۸،۹]. پس از آماده سازی سطوح و تهیه چسب، اتصال قطعات در چهار مرحله انجام گرفت. ابتدا الکترودهای شتابگر (شکل ۴ و ۵) و نگهدارنده های ۳ الکتروود اول (شکل ۶) بطور جداگانه به هم متصل شدند. پس از اطمینان از سالم بودن اتصالات این دو قسمت نیز به

یکدیگر متصل شده ( شکل ۷-۱) و سپس فلنجهای ابتدا و انتهای ستون نیز بر روی آن نصب و چسبانده شدند (شکل ۷-۳).



شکل ۴: مراحل اتصال و چسبکاری الکترو و سرامیک



شکل ۵: مراحل اتصال و چسبکاری الکتروها به سرامیک و درنهایت اتصال کامل ۱۱ الکترو شتابدهنده

شکل ۶: مراحل اتصال نگهدارندههای ۳ الکترو اول به کمک Fixture

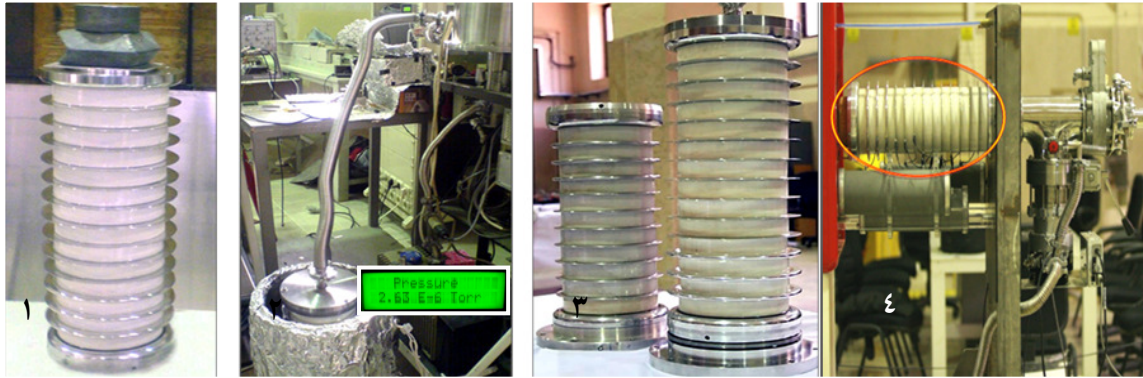
پس از موفقیت در این مرحله، الکتروهای داخلی نیز در جای خود نصب شده و سیستم جهت

outgas به مدت ۳ روز تحت دمای ۸۰ درجه سانتیگراد (به کمک یک پمپ دیفیوژن مدل E04 ساخت شرکت Edwards با قدرت پمپکنندگی حدود  $600 \text{ L/min}$ ) تحت خلا قرار گرفت (شکل ۷-۲)، تا اعمال حرارت و تحت فشار خلا قرار گرفتن در داخل ستون منجر به خروج گازهای سطحی موجود در سطوح گردد. پس از سه روز سیستم به خلا  $2/6 \times 10^{-6} \text{ Torr}$  رسید، که مهر تائیدی بر عدم نشتی در آن بود. پس از آزمایشات مربوط به خلا، ستون در جایگاه مخصوص خود شامل چشمه یون، منبع ولتاژ زیاد، پمپهای خلا و .. که تمامی آنها به صورت کامل در گروه فیزیک پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای طراحی شد، قرار گرفت.

### نتایج تجربی

با افزایش ولتاژ به حدود  $200 \text{ kV}$ ، بدون حضور باریکه هیچگونه جرقه‌ای مشاهده نشد. با افزونی ولتاژ تا  $120 \text{ kV}$  و تنظیم پتانسیل استخراج‌کننده باریکه و کانونی‌کننده، پس از چندین مرحله آزمایش بیشترین شدت جریان بدست آمده از چشمه یونی  $420 \mu\text{A}$  و بیشترین جریان مشاهده شده بر روی هدف  $400 \mu\text{A}$  بود. در جدول ۱ جریان‌های بدست آمده همراه با شرایط خلاء مندرج است. تجربه نشان می‌دهد که هر چه کیفیت خلاء بهتر شود هدایت باریکه آسانتر و شدت جریان روی هدف افزایش می‌یابد. مشاهده شد که پس از هر مرحله آزمون ستون و تزریق باریکه، خلاء بهتر می‌شود و به همین دلیل در هر مرحله جریان بیشتری را می‌توان روی هدف اندازه‌گیری کرد. شرایط مطلوب کار ستون هنگامیست که جریان اندازه‌گیری شده بر روی هدف بیشترین و جریان‌های دیگر کمترین مقدار را داشته باشند. با توجه به جدول ۱، بدلیل برخورد باریکه با دیواره لوله رانش اندکی جریان بر روی آن خواهیم داشت که ممکن است در اثر برخورد ذرات باردار به

ذرات موجود در حجم لوله، امیتانس هندسی، اثرات لبه‌ای و یا ناهمخطی بودن لوله رانش و ستون باشد. با استفاده از یک میدان مغناطیسی در کانال رانش، می‌توان این واگرایی را کاهش داد.  
شکل ۷: (۱) اتصال تمامی الکترودهای شتاب‌دهنده و تحت فشار قرار دادن آنها، (۲) ستون ساخته شده قرار



گرفته در کوره و تحت خلاء جهت outgas و دستیابی به خلا  $10^{-6}$  Torr  $2/63 \times 10^{-6}$  ستون شتابگر ساخته شده (راست)، در کنار ستون ۱۵۰kV ساخت شرکت Multivolt (چپ) (۴) قرار گرفتن ستون در نگاه‌دارنده اصلی آن به منظور شتاب دادن باریکه و حصول نتایج مربوط به میزان جریان و انرژی باریکه بر روی هدف

جدول ۱- نتایج بدست آمده از آزمایش ستون شتابگر ساخته شده.

فشار درون ستون پس از ورود گاز دوتریوم (Torr)	جریان لوله باریکه ( $\mu A$ )	جریان هدف ( $\mu A$ )	جریان حلقه فوکوس ( $\mu A$ )	جریان چشمه یونی ( $\mu A$ )
$9 \times 10^{-5}$ (Torr)	۸۰	۳۱۰	—	۳۹۰
$2 \times 10^{-5}$ (Torr)	۱۵	۳۷۰	—	۳۸۵
$1/87 \times 10^{-5}$ (Torr)	۴۰	۳۸۰	—	۴۲۰
$1/39 \times 10^{-5}$ (Torr)	۲۰	۴۰۰	—	۴۲۰

## مراجع

- 1.R. Hellborg, Electrostatic accelerators, Springer, New York (2005).
- 2.S.Hamphries, principles of charged particle acceleration, John Wiley&Sons, NewYork,(1999)
- 3.David A. Dahl, SIMION 3D version 7.0 User's Manual (2000).
- 4.Koltsov, Virtual Device user's manual, Saint Petersburg, (2006).
- 5.R. D. Cook, D. W. O. Heddle, J. Phys. E: Sci. Instrum., 9, 279, (1976).
- 6.P. Taherparvar, Study, Design, Simulation and Construction of 200kV electrostatic accelerator tube, K.N.Toosi University, (2008).
- 7.Huashun Zhang, Ion Sources, Springer, New York (1999).
8. J. Rahighi, M. Sadati, et al., J. of Nuclear Sci. and Tech. No. 41, 2007
- 9.T. W. Aitken et al. Daresbury Laboratory Report DNPL/NSF/R5 (1973).