

طراحی و شبیه سازی شتاب دهنده داینامی ترون ۸۰۰ کیلو ولتی با نرم افزار CST

سید عبدالمهدی آقاییان^۱، حمیدرضا مرادی^۱، حامد نوری^۱، امیرحسین میردامادی^۱،

محمد لامعی رشتی^۲، حسین خلفی^۲ و فرشاد قاسمی^۱

۱. پژوهشکده فیزیک و شتاب گر ها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

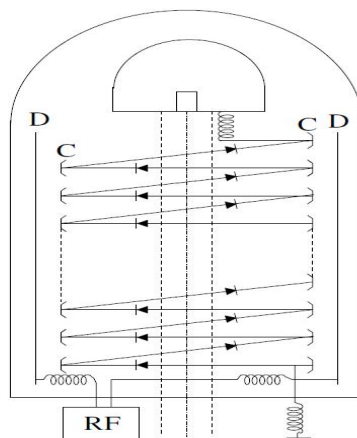
استفاده از شتاب دهنده های الکترواستاتیک با انرژی متوسط در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دلیل این امر بازدهی بالا و قیمت مناسب این نوع شتاب دهنده ها نسبت به سایر شتاب دهنده ها است. در این مقاله، ابتدا کاربرد و اهمیت ساخت شتاب دهنده الکترواستاتیک با انرژی ۸۰۰ keV مطرح می گردد. در ادامه طراحی و شبیه سازی جفت شدگی خازنی شتاب دهنده داینامی ترون و همچنین شبیه سازی باریکه الکترونی به وسیله نرم افزار CST STUDIO SUITE ارائه می شود.

واژه های کلیدی: شتاب دهنده الکترواستاتیک، جفت شدگی خازنی، لوله شتاب دهی، نرم افزار CST STUDIO SUITE

۱. مقدمه

شتاب دهنده های انرژی بالا، از جمله رودوترون و سیکلوترون، در کشور موجود هستند و تکنولوژی ساخت آن ها نیز بومی شده است. اما حجم بزرگ و هزینه بالای ساخت این نوع شتاب دهنده ها، کاربرد آن ها را در صنایع کوچک ناممکن می کند. به همین جهت ساخت و تولید شتاب دهنده های انرژی متوسط، با حجم و هزینه کمتر، ضروری به نظر می رسد. از طرفی عامل مهم دیگر در کاربرد صنعتی شتاب دهنده ها، میزان مصرف انرژی و بازده آن ها است. شتاب دهنده های الکترواستاتیک نسبت به سایر شتاب دهنده ها با توان یکسان، بازدهی بسیار بیشتری دارند. به عنوان مثال بازده یک

امروزه شتاب دهنده های الکترواستاتیک در محدوده های مختلف انرژی با کاربردهای متفاوت در جهان وجود دارد. استفاده صنایع مختلف در دنیا از شتاب دهنده های الکترواستاتیک روز به روز در حال افزایش است. تصویربرداری صنعتی، پرتو دهی محصولات پلیمری، استریل کردن تجهیزات پزشکی، افزایش ماندگاری مواد غذایی، دفع آفات محصولات کشاورزی، پرتو دهی پسماندهای صنعتی و بیمارستانی و همچنین تبدیل گازهای سمی به کودهای شیمیایی از جمله کاربردهای صنعتی شتاب دهنده الکترواستاتیک است [۱].



شکل ۱. شمایی از یک مولد داینامیترون [۲].

طبقات یکسوکننده است. افت ولتاژ (ΔU) و ریپل ولتاژ (δU) پایین به دلیل فرکانس بالا از مشخصه‌های این مولد است [۱-۳]. در این شتاب‌دهنده‌ها به خاطر ظرفیت خازنی پایین، انرژی ذخیره شده در ستون افزایش کم بوده و در نتیجه ایمنی سیستم افزایش می‌یابد [۴]. ولتاژ مولد از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$U = \frac{nU_0}{k}, \quad (1)$$

در این رابطه n تعداد طبقات، U_0 دامنه ولتاژ متناوب ورودی و k بیانگر ضریب جفت‌شدگی و مقدار U_0 معمولاً از مرتبه ۵۰-۳۰۰ کیلو ولت می‌باشد.

شکل ۲ مولد داینامیترون را نشان می‌دهد که در آن الکترودهای C و D مطابق با شکل ۱ مشخص شده‌اند. در شکل ۳- الف مدار معادل کل مولد داینامیترون و در شکل ۳- ب مدار معادل یک طبقه از آن آمده که در آن C_{se} مدل کننده خاصیت خازنی بین الکترودهای راه‌انداز و الکترودهای متصل کننده بوده که به وسیله جفت‌شدگی خازنی ولتاژ به طبقات یکسوساز منتقل می‌شود [۵-۷].

۲. اصول طراحی

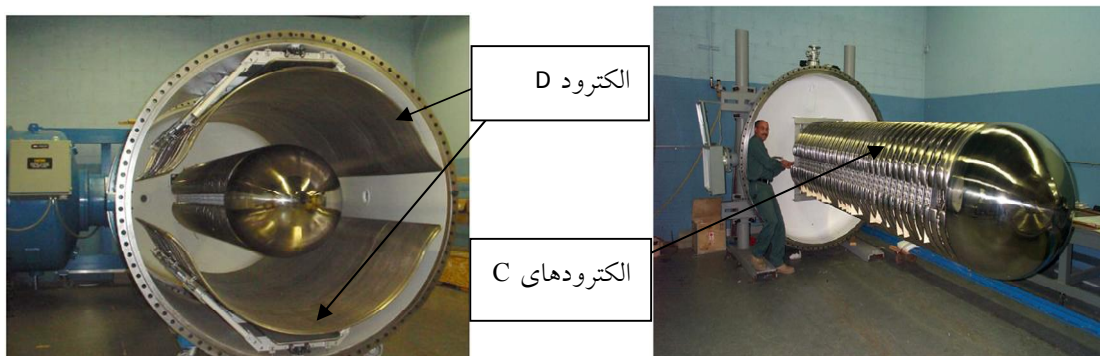
بر اساس مدار معادل یک طبقه از مولد داینامیترون که در شکل ۳- ب نشان داده شده است، داریم:

$$E_{ac} = \frac{E_f}{1 + \frac{C_{ac}}{C_{se}}}, \quad (2)$$

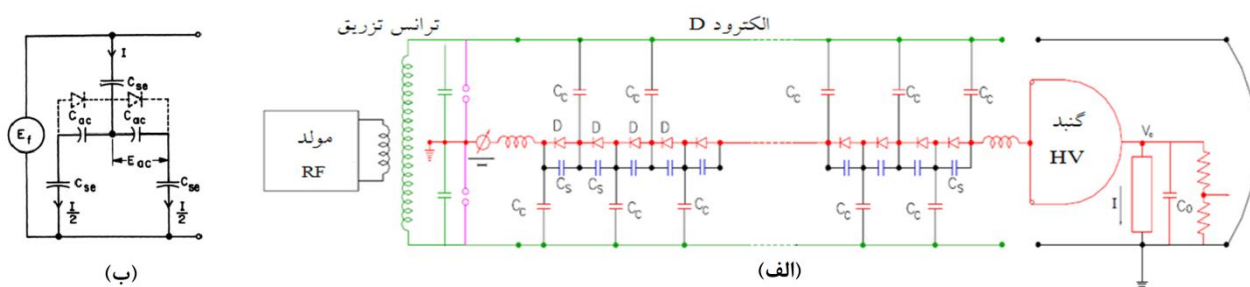
شتاب‌دهنده رودوترون با توان خروجی ۱۰۰kW کمتر از ۵۰٪ است و این عدد برای شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک با همان توان خروجی نزدیک به ۹۰٪ است. در میان شتاب‌دهنده‌های موجود، شتاب‌دهنده الکتروستاتیک ۸۰۰keV با توان خروجی ۱۰۰kW دارای محدوده انرژی و توان مناسب برای انجام فرایندهای صنعتی می‌باشد که می‌تواند با قیمتی مناسب در خدمت صنایع قرار گیرد.

اساس کار یک مولد داینامیترون بر مبنای نوسان‌کننده‌های RF است. درون این مولد هیچ قطعه متحرکی وجود ندارد. داینامیترون مولدی است که در آن هر یک از طبقات یکسوساز به صورت موازی تغذیه می‌شود و در نهایت از سری قرار گرفتن این طبقات، ولتاژ ترمینال ایجاد می‌شود. در شکل ۱ شمایی از یک مولد داینامیترون آورده شده است.

ولتاژ RF با محدوده فرکانسی ۳۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز با جفت‌شدگی خازنی به طبقات یکسوساز داده می‌شود و از مجموع ولتاژ تولیدی این طبقات که به صورت متوالی قرار دارند ولتاژ ترمینال ساخته می‌شود. شتاب‌دهنده‌های داینامیترونی هم برای شتابدهی به یون‌ها و هم برای الکترون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع شتاب‌دهنده می‌توان به توانایی تأمین جریان باریکه بالا، پایداری ولتاژ داخلی و راه‌اندازی آسان اشاره کرد. در شکل ۱، D بیانگر الکترودهای راه‌انداز و C نشانگر الکترودهای متصل کننده می‌باشد. در این روش از خاصیت خازنی بین الکترودهای D و الکترودهای C استفاده شده و ولتاژ بالای تولیدی متناسب با تعداد



شکل ۲. مولد داینامیترون ۵ مگا ولتی [۱].



شکل ۳. الف- مدار معادل کل مولد داینامیترون، ب- مدار معادل یک طبقه از آن.

باشد. برای حداکثر شدن مقدار خازن C_{se} باید تا آنجا که امکان دارد الکترودهای RF و الکترودهای متصل کننده را به هم نزدیک کرد. البته باید محدودیت امکان تخلیه الکتریکی نیز لحاظ شود. کل ستون افزاینده ولتاژ درون مخزن قرار می گیرد و داخل آن با فشار ۸ بار از گاز SF₆ پر می شود و میدان شکست الکتریکی در این فشار ۱۶ MV/m است که برای افزایش قابلیت اطمینان، میدان در ستون نباید از ۱۰ MV/m فراتر رود. از طرفی باید تا حد امکان ابعاد کل سیستم را کوچک در نظر بگیریم تا هزینه ساخت کمینه شود. در این مقاله سعی شد با لحاظ کردن تمام شرایط بالا و شبیه‌سازی‌های مکرر با نرم‌افزار CST حالت بهینه به گونه‌ای تعیین شود که تمام شرایط ذکر شده در بالا را داشته باشد.

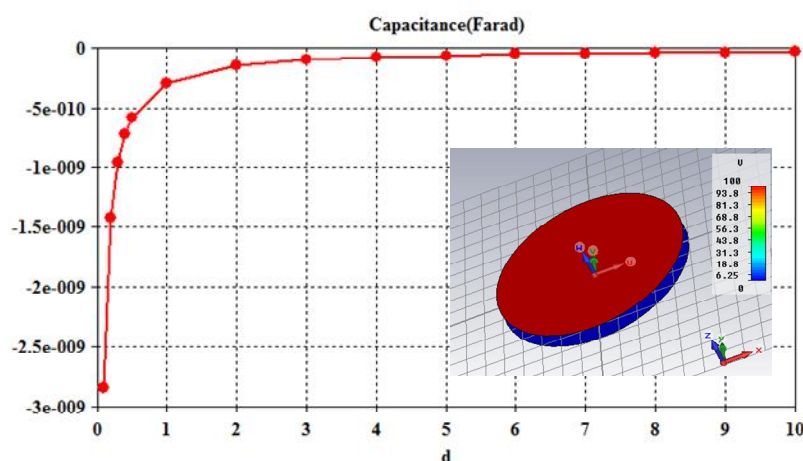
۱.۲ طراحی و شبیه‌سازی حلقه‌های کرونا و الکترودهای راه‌انداز

ظرفیت خازن‌های C_{ac} و C_{se} به کمک شبیه‌سازی نرم‌افزار CST

که در آن E_f و E_{ac} به ترتیب ولتاژ دوسر خازن C_{ac} و ولتاژ ورودی‌اند. خاصیت خازنی که هر حلقه کرونا با الکترودهای RF تشکیل می دهد، خازن جفت‌شدگی نام دارد و آن را با (C_{se}) نشان می‌دهند. دو کروناگردی که مخالف هم هستند نیز تشکیل خاصیت خازنی می دهند (C_{ac}) که این خازن در مدل مداری موازی با دیود است. اگر ضریب جفت‌شدگی را به صورت $K = 1 + \frac{C_{ac}}{C_{se}}$ تعریف کنیم آنگاه:

$$E_{ac} = \frac{E_f}{K} \quad (3)$$

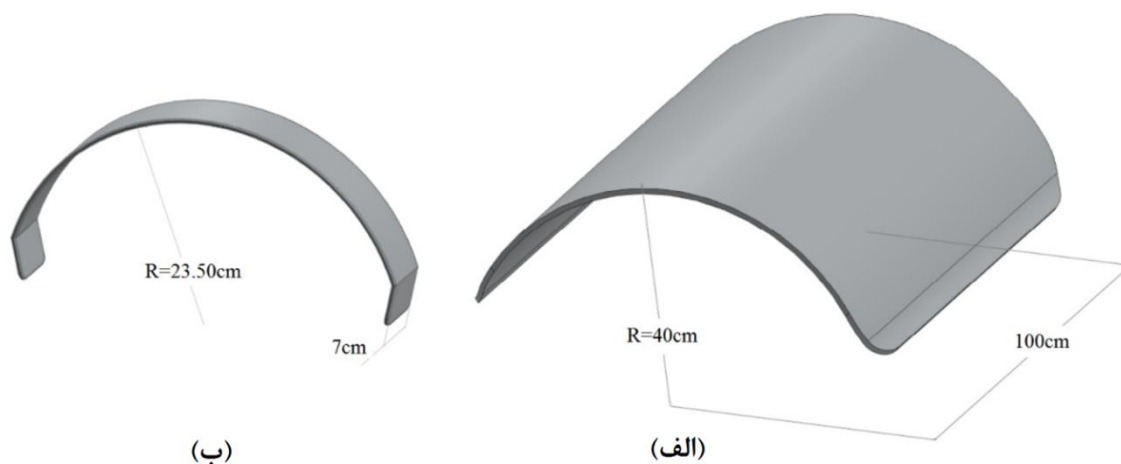
ولتاژ DC هر طبقه برابر قله E_{ac} در شرایط بی‌باری می‌باشد. مقدار K ، ضریب جفت‌شدگی، با توجه به فرمول $E = \frac{NV}{K}$ هر چقدر کمتر باشد بهتر است، زیرا با تعداد طبقات کمتری می‌توان به ولتاژ نهایی مولد رسید [۸ و ۹]. در این فرمول E ولتاژ نهایی مولد، V قله ولتاژ RF و N نشان دهنده تعداد طبقات است. از طرفی با توجه به فرمول K ، برای کمینه شدن مقدار K لازم است مقدار خازن C_{se} حداکثر و مقدار خازن C_{ac} حداقل



شکل ۴. نمودار تغییرات ظرفیت خازن تخت (فاراد) بر حسب فاصله بین صفحات (میلی‌متر)، شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CST.

جدول ۱. مقادیر نظری و شبیه‌سازی ظرفیت خازن تخت.

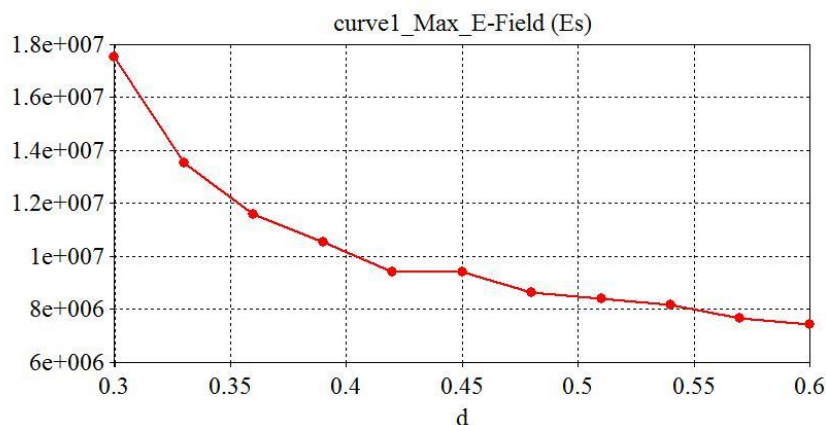
درصد اختلاف	ظرفیت شبیه‌سازی (pF)	ظرفیت نظری (pF)	فاصله صفحات خازن (mm)
۱۳٫۳۹	۳۲٫۰۹	۲۷٫۷۹	۱۰
۱۱٫۴۶	۵۲٫۳۱	۴۶٫۳۱	۶
۶٫۹۲	۱۴۹٫۲۷	۱۳۸٫۹	۲
۴٫۴۱	۵۸۱٫۴	۵۵۵٫۸	۰٫۵
۲٫۹۵	۲۸۶۳	۲۷۷۸٫۹	۰٫۱



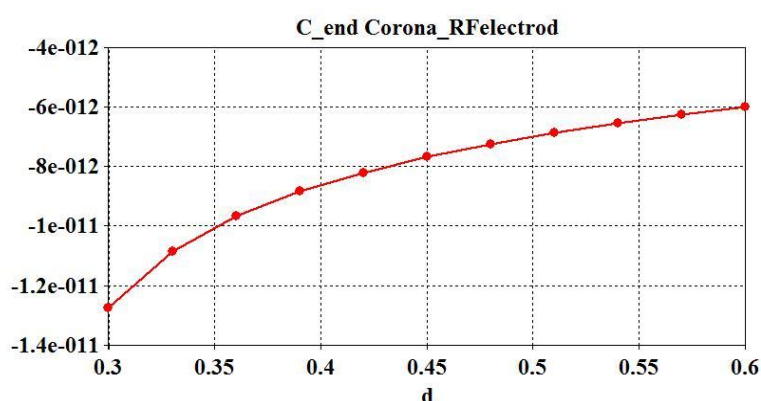
شکل ۵. الف) ابعاد الکترومغناطیسی (RF)، ب) ابعاد حلقه‌های کرنا.

این رابطه از اثرات لبه‌ها صرف نظر می‌شود، ظرفیت محاسبه شده از ظرفیت واقعی کمتر است که با افزایش نسبت A/d سهم اثرات لبه‌ها کاهش یافته و مقدار محاسبه شده به ظرفیت واقعی نزدیک می‌شود که از این

به دست آمد که قبل از آن تلاش شد به منظور اعتبار سنجی، خازن تخت دایره‌ای شبیه‌سازی شود و ظرفیت به دست آمده با رابطه نظری مقایسه شود. طبق رابطه نظری ظرفیت خازن تخت از رابطه $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ محاسبه می‌شود. از آنجایی که در



شکل ۶. نمودار میدان الکتریکی بین کرونا و الکتروود RF (ولت بر متر) برحسب فاصله الکتروود RF از مرکز (متر).



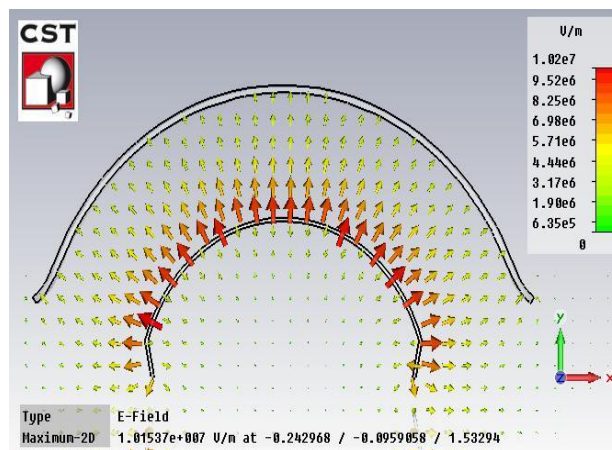
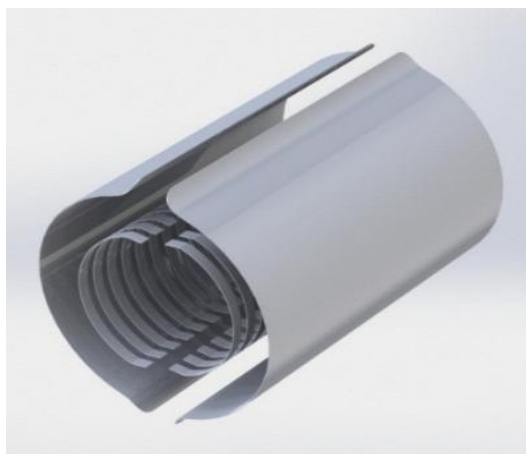
شکل ۷. نمودار ظرفیت خازن C_{se} (فاراد) برحسب فاصله الکتروود RF از مرکز (متر).

الکتریکی و ظرفیت خازنی ایجاد شده بین آن‌ها به کمک نرم افزار CST محاسبه و فاصله مناسب به دست آمد. در شکل ۶ روند تغییر میدان الکتریکی بر حسب فاصله الکتروود RF از مرکز نشان داده شده است. بر طبق این نمودار، در فاصله ۰/۴ متر، میدان 10 MV/m می‌باشد که میدان مطلوب است. قطر الکتروودهای RF نیز بر این اساس 80 سانتیمتر لحاظ شد که در شکل ۵ آورده شده است. شکل ۷ اندازه خازن C_{se} بر حسب فاصله الکتروود RF از مرکز را نشان می‌دهد که در فاصله ۰/۴ متر، اندازه این خازن حدود $8/5$ پیکوفاراد می‌باشد. مقدار خازن C_{ac} نیز حدود 2 پیکوفاراد به دست آمد.

در شکل ۸ نمایش میدان الکتریکی به شکل برداری بین آخرین حلقه کرونا و الکتروود RF آورده شده است و مشخص است میدان بیشینه در حدود 10 MV/m است.

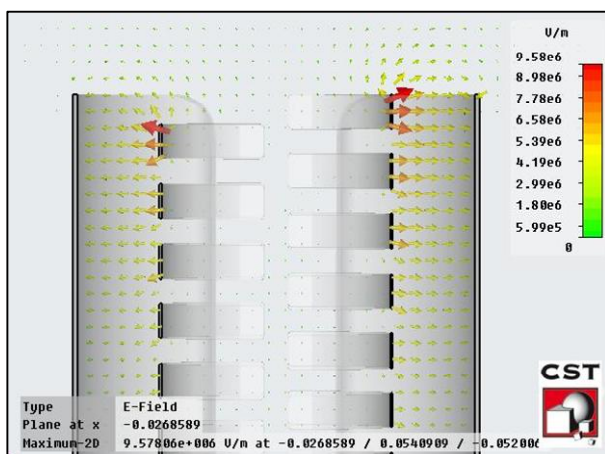
واقعیت به منظور اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی استفاده شد. در شکل ۴ نمودار تغییرات ظرفیت خازن تخت بر حسب فاصله بین صفحات، شبیه سازی شده در نرم افزار CST آورده شده است. در جدول ۱ مقادیر نظری و شبیه سازی ظرفیت خازن تخت آورده شده و همان طور که مشخص است با کاهش فاصله بین صفحات، مقدار شبیه سازی شده به مقدار نظری نزدیک می‌شود که پیش بینی فوق را تأیید می‌کند.

از آنجایی که در فضای بین حلقه های کرونا اجزای مختلفی نظیر: محفظه شتابدهی، مقاومت های مقسم ولتاژ و ماژول های دیودی ولتاژ بالا قرار می گیرند و با توجه به اینکه قطر محفظه شتابدهی حدود 25 سانتیمتر می باشد، کمترین مقدار ممکن برای قطر کرونا، 47 سانتی متر است. با تغییر فاصله بین الکتروودهای RF و حلقه های کرونا، میدان

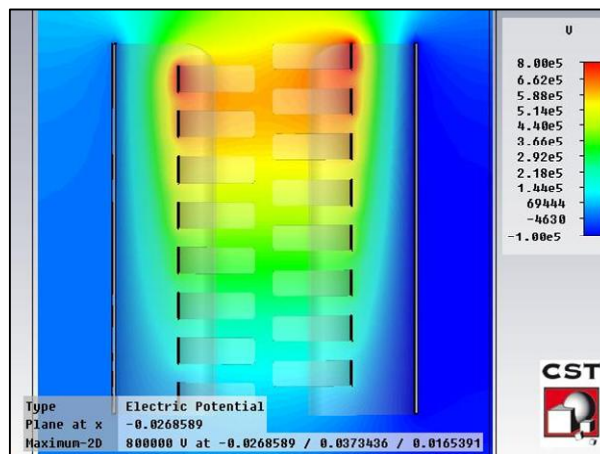


شکل ۸. نمایش برداری میدان الکتریکی بین آخرین حلقه کرونا و الکتروود RF.

شکل ۹. شمای کلی سیستم شبیه‌سازی شده با نرم افزار CST.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. الف) نمایش ولتاژ روی ستون، ب) میدان الکتریکی در طول ستون.

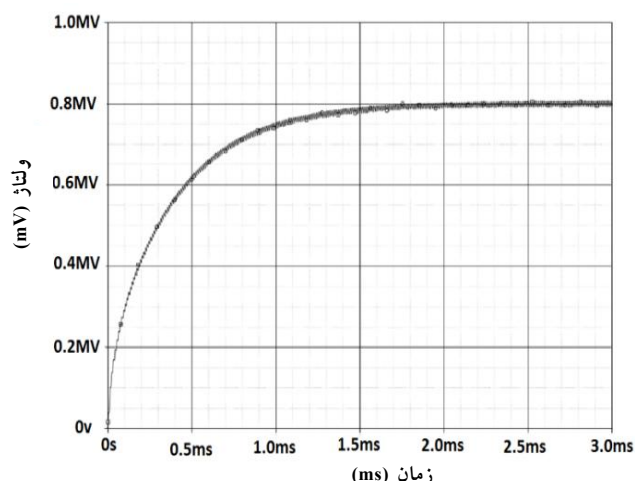
۳. طراحی یک منبع تغذیه ۸۰۰ کیلو ولتی

پس از مشخص شدن مقادیر خازن‌های $C_{se}=8\text{ pF}$ و $C_{ac}=2\text{ pF}$ با نرم افزار CST، برای طراحی یک منبع تغذیه ۸۰۰ کیلو ولتی جریان مستقیم که از یک منبع RF با مشخصات ولتاژ ۱۰۰ کیلو ولت و فرکانس ۵۰ کیلو هرتز برای درایو الکتروودهای RF استفاده می‌کند، با توجه به فرمول $K=1+\frac{4C_{ac}}{C_{se}}$ مقدار K برابر ۲ می‌شود.

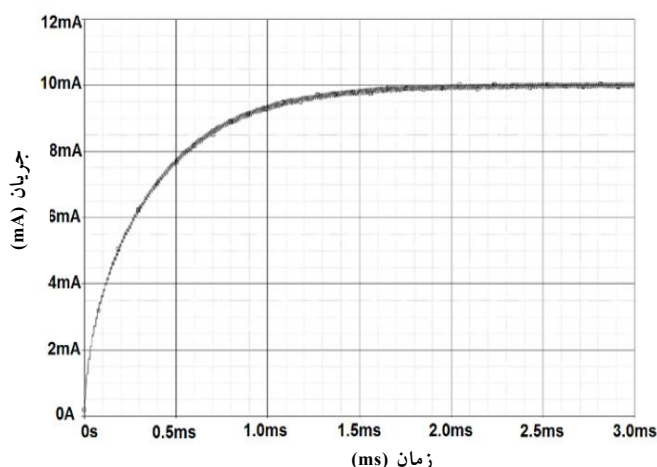
با توجه به رابطه $E=\frac{NV}{K}$ ، که E ولتاژ نهایی مولد و V قله ولتاژ RF می‌باشد، مقدار N که نشان دهنده تعداد طبقات است به دست می‌آید. در این فرمول با لحاظ کردن $E=800\text{ kV}$ ، $V=100\text{ kV}$ و $K=2$ مقدار $N=16$ به دست می‌آید. در نتیجه نیاز به

۱۶ عدد مجموعه یکسوکننده داریم که بتوانند ولتاژ معکوس ۵۰ کیلو ولت و جریان ۳۵۰ میلی‌آمپر را تحمل کنند و از خانواده دیودهای فرکانس بالا باشند. با استفاده از دیودی با مشخصات ولتاژ ۸ کیلو ولت و جریان ۳۵۰ میلی‌آمپر، هر کدام از مجموعه‌های یکسوکننده، تقریباً شامل ۷ عدد از این دیودها خواهند بود. با توجه به تعداد طبقات، نیاز به ۱۷ عدد کرونا گارد یا الکتروودهای متصل کننده می‌باشد که در شکل ۹ شمای کلی سیستم آورده شده است.

شکل ۱۰- الف) روند افزایش ولتاژ در طول ستون و ۱۰- ب) بردار میدان الکتریکی در طول ستون را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰- الف) پتانسیل با گام ۵۰ کیلو ولت از



شکل ۱۲. ولتاژ خروجی مولد داینامی‌ترون شبیه‌سازی شده در نرم افزار Orcad.



شکل ۱۱. جریان خروجی مولد داینامی‌ترون شبیه‌سازی شده در نرم افزار Orcad.

الکتروستاتیک به دست آمد و می‌تواند جهت طراحی ستون شتاب‌دهنده 800 kV ، مورد استفاده قرار گیرد. الکترودهای استخراج کننده ستون 200 kV جهت دستیابی به جریان‌های بالا بهینه‌سازی و در طرح نهایی از آن‌ها استفاده شد. همچنین با شبیه‌سازی‌های مکرر، قطر و فاصله الکترودهای شتاب‌دهنده و اندوگراف برای ستون جدید بهینه‌سازی شد. شکل ۱۳ طراحی ابتدایی ستون شتاب‌دهنده 800 kV را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است، الکترودهای شماره ۱، ۲ و ۳ در نقش استخراج کننده باریکه هستند. پتانسیل کاتد در تفنگ الکترونی 800 kV - و پتانسیل الکترودهای شماره ۱ و ۲ که به هم اتصال الکتریکی دارند، 790 kV - انتخاب شد. پتانسیل الکترودهای ۲ و ۳ متغییر است که به وسیله آن‌ها می‌توان قطر باریکه را در انتهای ستون تغییر داد. الکترودهای شماره ۴ به بعد در نقش ستون شتاب‌دهی هستند که تعداد آن‌ها ۳۸ عدد است. پتانسیل الکترودهای شماره ۴، 760 kV - است و پتانسیل بقیه الکترودها با گام 20 kV افزایش یافته تا در نهایت پتانسیل الکترودهای آخر صفر می‌شود. پس از ستون شتاب‌دهی نیز لوله رانش قرار دارد که محل اتصال سیستم خلا و نصب سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترلی باریکه است. شکل ۱۵ مسیر

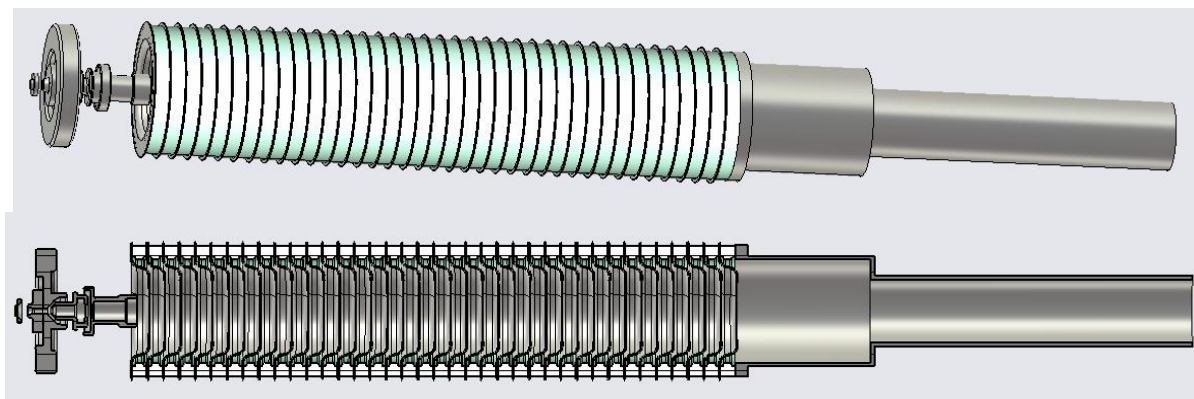
پایین ستون به سمت بالای ستون افزایش می‌یابد تا در نهایت روی حلقه کروئای آخر، پتانسیل 800 kV کیلو ولت ایجاد می‌شود.

با توجه به مقادیر محاسبه شده با فرض ولتاژ ورودی با دامنه ولتاژ 100 kV و فرکانس 50 kHz هرتز، با نرم افزار Orcad شبیه‌سازی مولد 800 kV کیلو ولتی انجام شد. مقدار بار اعمال شده در شبیه‌سازی، به گونه‌ای انتخاب شده که این مولد برای شتاب‌دهنده‌ای با جریان 10 mA میلی آمپر قابل استفاده باشد. در اینجا مقدار بار، مقاومت $80\text{ M}\Omega$ مگا اهمی است. جریان خروجی مولد داینامی‌ترون در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مولد داینامی‌ترون در جریان 10 mA میلی آمپر افت ولتاژی نشان نمی‌دهد.

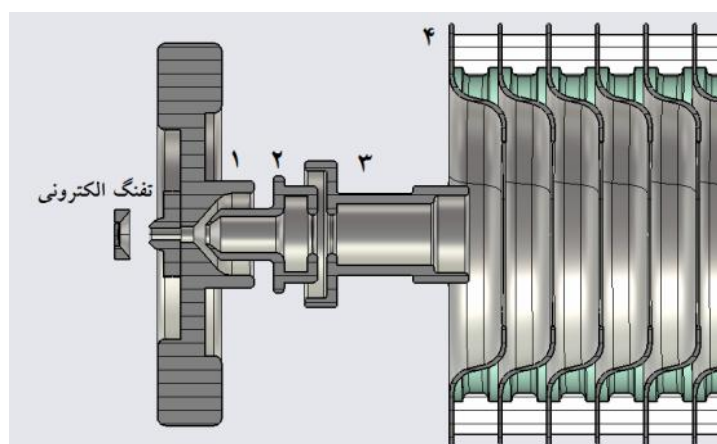
۴. شبیه‌سازی و طرح اولیه ستون شتاب‌دهنده

800 kV

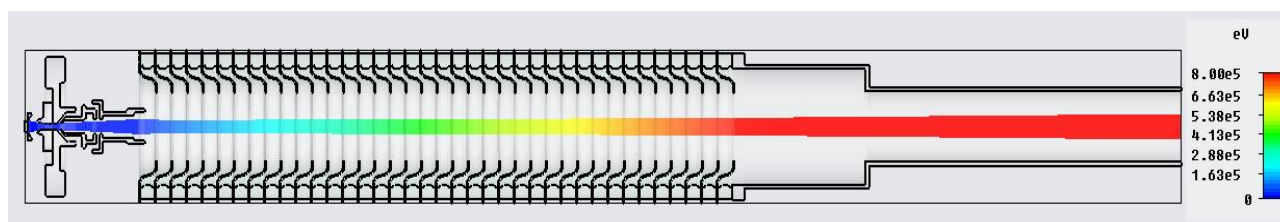
به منظور طراحی ستون شتاب‌دهنده 800 kV ، ابتدا ساختار شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک موجود در ایران به دقت مطالعه و بررسی شد. از آن جمله می‌توان به شتاب‌دهنده‌های 200 kV [۱۰] و واندوگراف اشاره کرد که با شبیه‌سازی آن‌ها اطلاعات مفیدی در زمینه کارکرد شتاب‌دهنده‌های



شکل ۱۳. طرح ابتدایی ستون شتاب‌دهنده 80 keV .



شکل ۱۴. الکترودهای استخراج کننده در ابتدای ستون شتاب‌دهی.

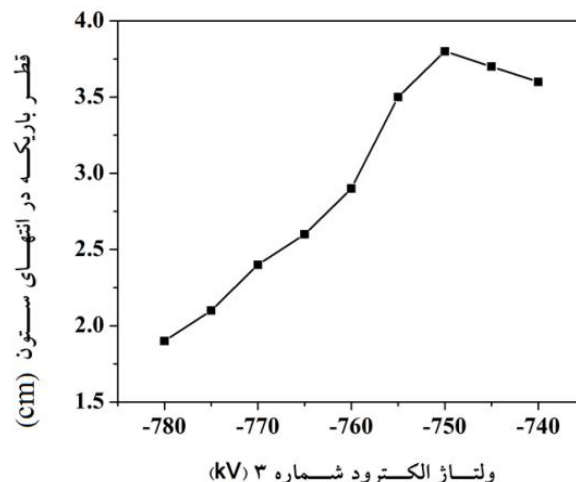
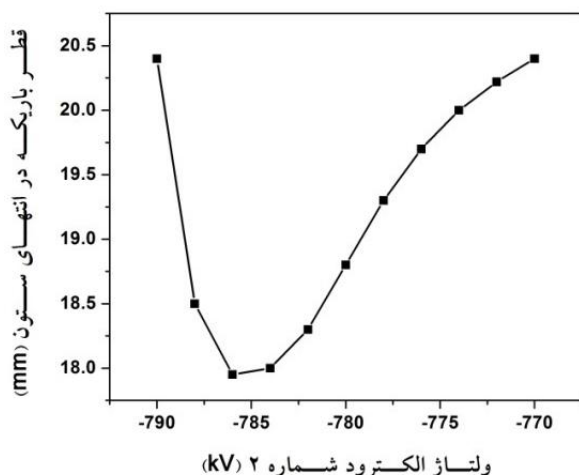


شکل ۱۵. مسیر حرکت ذرات در ستون شتاب‌دهنده 80 keV با در نظر گرفتن اثرات بار فضایی.

ولتاژ بهینه الکتروود ۳ مشخص شود که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. ولتاژ بهینه برای الکتروود ۳، -780 keV به دست آمد. سطح مقطع باریکه در انتهای لوله رانش در شکل ۱۷ نشان داده شده است و همان گونه که مشخص است، صرف نظر از پراکندگی کوچکی که وجود دارد، قطر باریکه در انتهای لوله رانش کمتر از 2 cm است که برای ورود به آهنربا اسکن کننده مناسب می‌باشد.

حرکت الکترون‌ها با در نظر گرفتن اثرات بار فضایی را نشان می‌دهد. الکترون‌ها با خروج از تفنگ الکترونی شتاب گرفته و در انتهای ستون انرژی 80 keV کسب می‌کنند.

به منظور کمینه کردن قطر باریکه در انتهای ستون، ابتدا ولتاژ الکتروود ۳ در مقدار -770 keV ثابت و ولتاژ الکتروود ۲ تغییر داده شد که ولتاژ بهینه آن -785 keV به دست آمد. در نهایت با ثابت کردن ولتاژ الکتروود ۲ در این مقدار، تلاش شد



شکل ۱۶. اثر ولتاژ الکترودهای ۲ و ۳ بر قطر باریکه در انتهای لوله رانش.

۵. نتیجه گیری

لازم محاسبه شد، که نتایج به دست آمده، با شبیه سازی های انجام شده با نرم افزار ORCAD نیز مطابقت دارد. هندسه مناسب الکترودهای استخراج کننده و ولتاژ آنها، جهت بهینه سازی قطر باریکه خروجی، با استفاده از شبیه سازی به دست آمد. در انتها، طرح مناسب ستون با ۳۸ الکترودهای شتاب دهی با پله پتانسیل ۲۰ kV پیشنهاد شد.

در این مقاله به طراحی و شبیه سازی جفت شدگی خازنی شتاب دهنده داینامی ترون پرداخته شد. با استفاده از نرم افزار CST مقدار $C_{ac}=2$ pF و بیشترین مقدار C_{se} با توجه به شکست الکتریکی، ۸ پیکو فاراد به دست آمد. با محاسبه ضریب جفت شدگی برای رسیدن به ولتاژ ۸۰۰ کیلو ولت، تعداد طبقات

مراجع

1. R Hellborg, "Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications", Springer (2005).
 2. E Cottureau, "DC Accelerators Technical Report", (2001).
 3. R Galloway, T Lisanti, and M Cleland, *Radiation Physics and Chemistry*, **71** (2004) 551.
 4. S R Ghodke, et al., *Asian Particle Accelerator Conference* (2007) THPMA094.
 5. P Hanley, M Cleland, C Mason, K Morganstern, and C Thompson, *Nuclear Science, IEEE Transactions*, **16** (1969) 90.
 6. R Banwari, et al., *Proceeding of Asian Particle Accelerator Conference*, (2007) THPMA039.
 7. F Hinterberger, *Proceedings of CERN Accelerator School, Small Accelerators*, Zeegse, The Netherlands, 24 May-2 June (2005) 95.
 8. J Kuffel, E Kuffel, and W Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamentals", Newnes (2000).
 9. C C Thompson and M R Cleland, *Nuclear Science, IEEE Transactions* **16**, 3 (1969) 124.
۱۰. سید مصطفی ساداتی، "مطالعه، طراحی و ساخت ستون شتاب دهنده الکترواستاتیکی ۲۰۰ کیلو ولت" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، شهریور (۱۳۸۶).