

طراحی و شبیه‌سازی شتاب‌دهنده داینامی‌ترون ۸۰۰ کیلو ولتی با نرم افزار CST

سیدعبدالمهدی آقایان^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 شتاب‌گرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

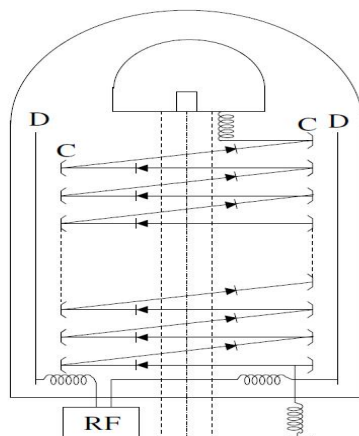
استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک با انرژی متوسط در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دلیل این امر بازدهی بالا و قیمت مناسب این نوع شتاب‌دهنده‌ها نسبت به سایر شتاب‌دهنده‌ها است. در این مقاله، ابتدا کاربرد و اهمیت ساخت شتاب‌دهنده الکترواستاتیک با انرژی ۸۰۰ keV مطرح می‌گردد. در ادامه طراحی و شبیه‌سازی جفت‌شدگی خازنی شتاب‌دهنده داینامی‌ترون و همچنین شبیه‌سازی باریکه الکترونی به وسیله نرم‌افزار CST STUDIO SUITE ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، جفت‌شدگی خازنی، لوله شتاب‌دهی، نرم افزار CST STUDIO SUITE

۱. مقدمه

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

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



شکل ۱. شمایی از یک مولد داینامیترتون [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 یافته 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 داینامیترتون را نشان می‌دهد که در آن الکترودهای C و D مطابق با شکل ۱ مشخص شده‌اند. در شکل ۳- الف مدار معادل کل مولد داینامیترتون 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

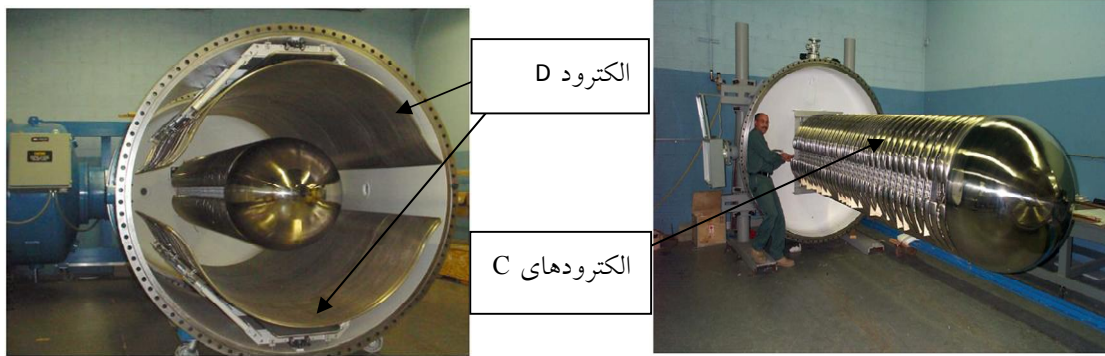
بر اساس مدار معادل یک طبقه از مولد داینامیترتون که در شکل ۳- ب نشان داده شده است، داریم:

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

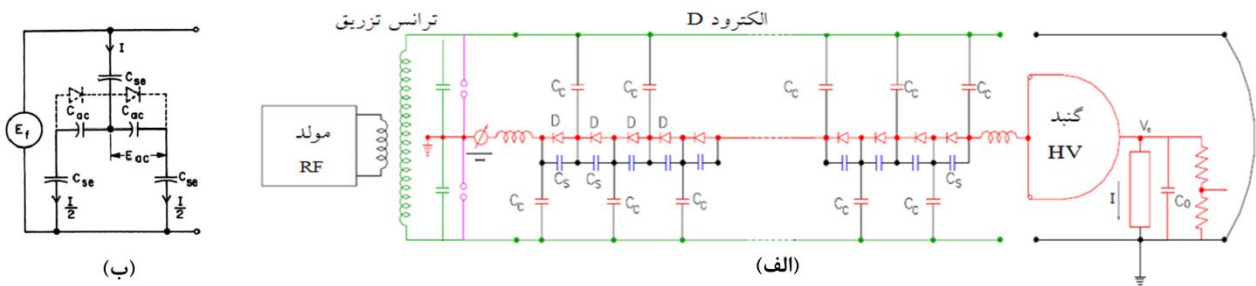
شتاب‌دهنده رودوترون با توان خروجی 100 kW کمتر از 50% است و این عدد برای شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک با همان توان خروجی نزدیک به 90% است. در میان شتاب‌دهنده‌های موجود، شتاب‌دهنده الکتروستاتیک 800 keV با توان خروجی 100 kW دارای محدوده انرژی و توان مناسب برای انجام فرایندهای صنعتی می‌باشد که می‌تواند با قیمتی مناسب در خدمت صنایع قرار گیرد.

اساس کار یک مولد داینامیترتون بر مبنای نوسان‌کننده‌های RF است. درون این مولد هیچ قطعه متحرکی وجود ندارد. داینامیترتون 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 داینامیترتون آورده شده است.

ولتاژ RF با محدوده فرکانسی 30 تا 300 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 الکترود D و الکترود 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 الکتروودهای RF و الکتروودهای متصل کننده را به هم نزدیک کرد. البته باید محدودیت امکان تخلیه الکتریکی نیز لحاظ شود. کل ستون افزاینده ولتاژ درون مخزن قرار می‌گیرد و داخل آن با فشار ۸ بار از گاز SF₆ پر می‌شود 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.

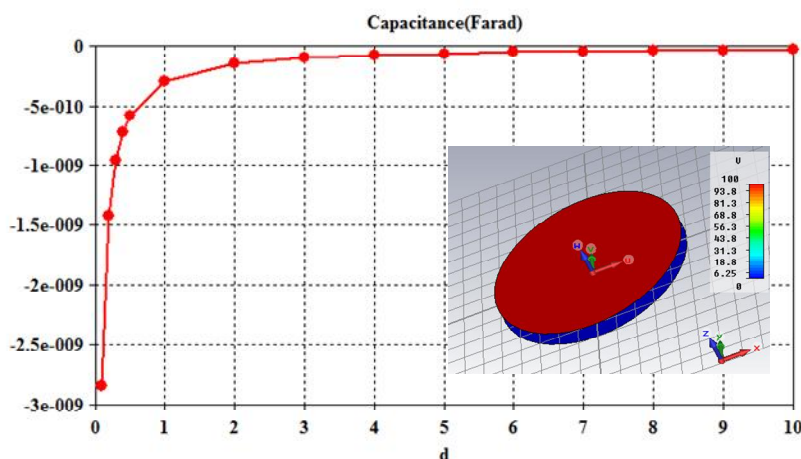
۱.۲ طراحی و شبیه‌سازی حلقه‌های کرونا و الکتروودهای راه‌انداز

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 الکتروودهای RF تشکیل می‌دهد، خازن جفت‌شدگی نام دارد و آن را با C_{se} نشان می‌دهند. دو کروناگردی که مخالف هم هستند نیز تشکیل خاصیت خازنی می‌دهند (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:

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

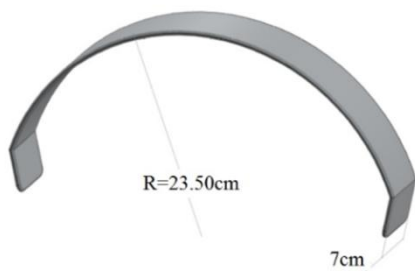
ولتاژ DC هر طبقه برابر قله E_{ac} در شرایط بی‌باری می‌باشد. مقدار K ، ضریب جفت‌شدگی، با توجه به فرمول $E = \frac{NV}{K}$ هر چقدر کمتر باشد بهتر است، زیرا با تعداد طبقات کمتری می‌توان به ولتاژ نهایی مولد رسید [۸ و ۹]. در این فرمول E ولتاژ نهایی مولد، V قله ولتاژ RF و N نشان دهنده تعداد طبقات است. از طرفی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



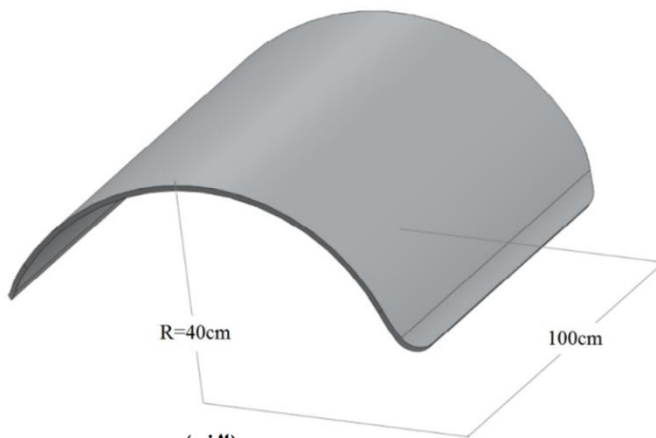
شکل ۴. نمودار تغییرات ظرفیت خازن تخت (فاراد) بر حسب فاصله بین صفحات (میلی متر)، شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CST.

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



(ب)

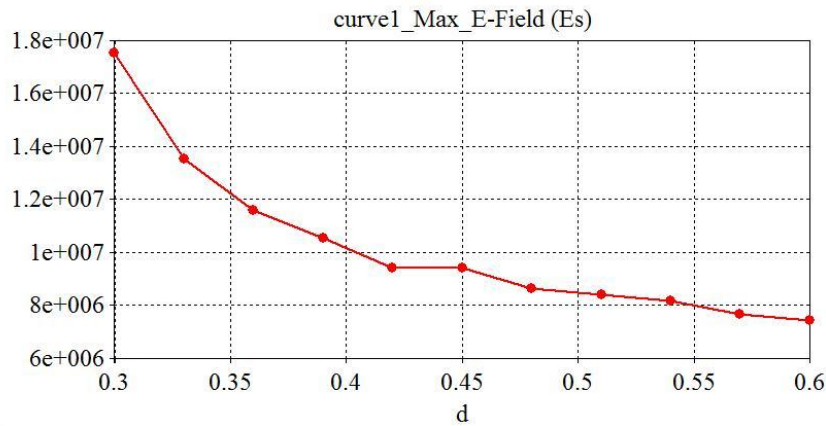


(الف)

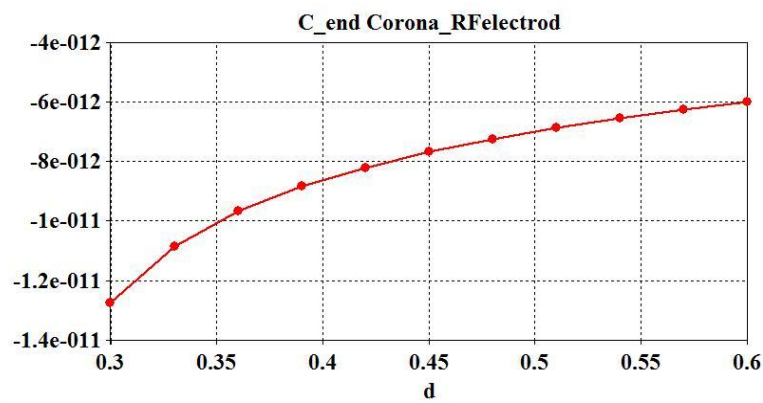
شکل ۵. ابعاد الکتروود RF ، (ب) ابعاد حلقه‌های کرنا.

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).



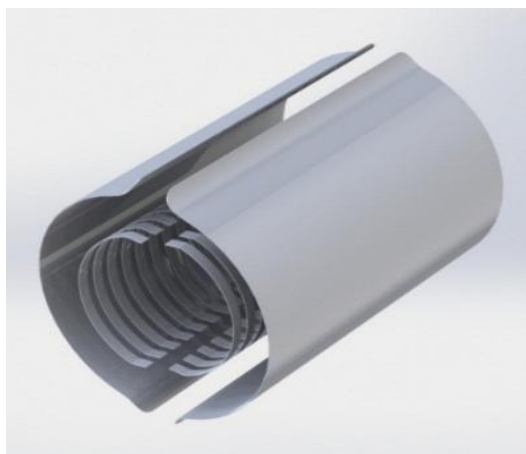
شکل ۷. نمودار ظرفیت خازن C_{se} (فاراد) برحسب فاصله الکتروود RF از مرکز (متر).

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.

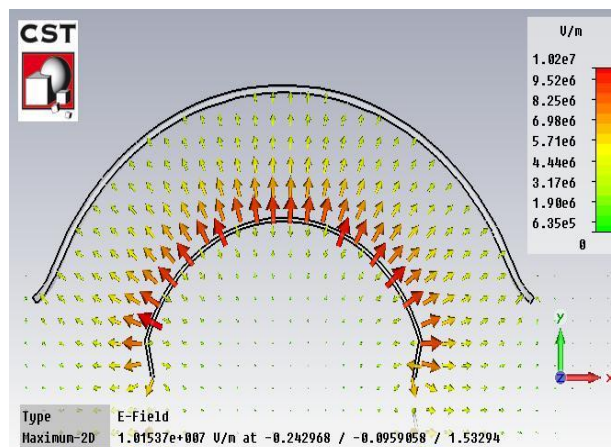
در شکل ۸ نمایش میدان الکتریکی به شکل برداری بین آخرین حلقه کرونا و الکتروود RF آورده شده است و مشخص است میدان بیشینه در حدود 10 MV/m است.

واقعیت به منظور اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. در شکل ۴ نمودار تغییرات ظرفیت خازن تخت بر حسب فاصله بین صفحات، شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CST آورده شده است. در جدول ۱ مقادیر نظری و شبیه‌سازی ظرفیت خازن تخت آورده شده و همان‌طور که مشخص است با کاهش فاصله بین صفحات، مقدار شبیه‌سازی شده به مقدار نظری نزدیک می‌شود که پیش‌بینی فوق را تأیید می‌کند.

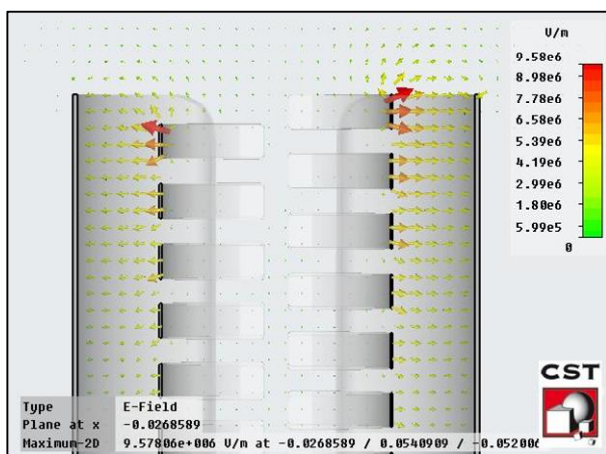
از آنجایی که در فضای بین حلقه‌های کرونا اجزای مختلفی نظیر: محفظه شتابدهی، مقاومت‌های مقسم ولتاژ و ماژول‌های دیودی ولتاژ بالا قرار می‌گیرند و با توجه به اینکه قطر محفظه شتابدهی حدود 25 سانتیمتر می‌باشد، کمترین مقدار ممکن برای قطر کرونا، 47 سانتی‌متر است. با تغییر فاصله بین الکتروودهای RF و حلقه‌های کرونا، میدان



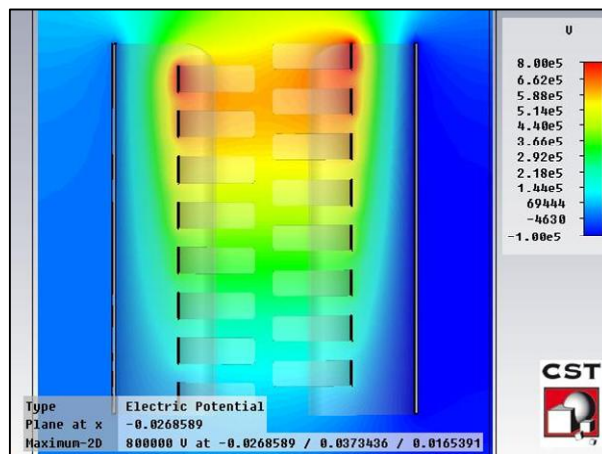
شکل ۹. شمای کلی سیستم شبیه‌سازی شده با نرم افزار CST.



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



(ب)



(الف)

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

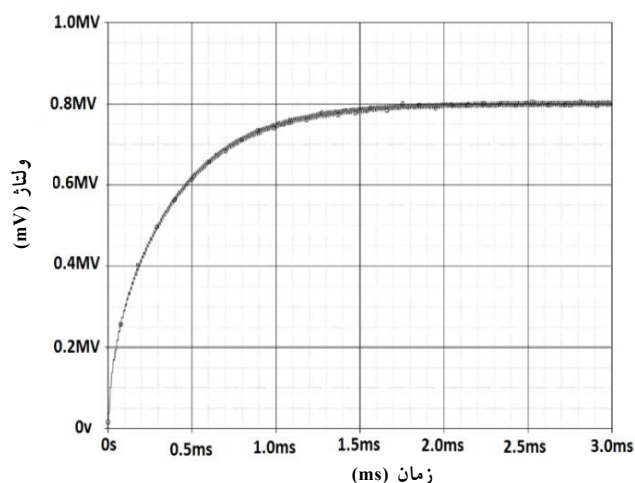
۳. طراحی یک منبع تغذیه ۸۰۰ کیلو ولتی

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 $K = 1 + \frac{C_{ac}}{C_{se}}$ مقدار K برابر ۲ می‌شود.

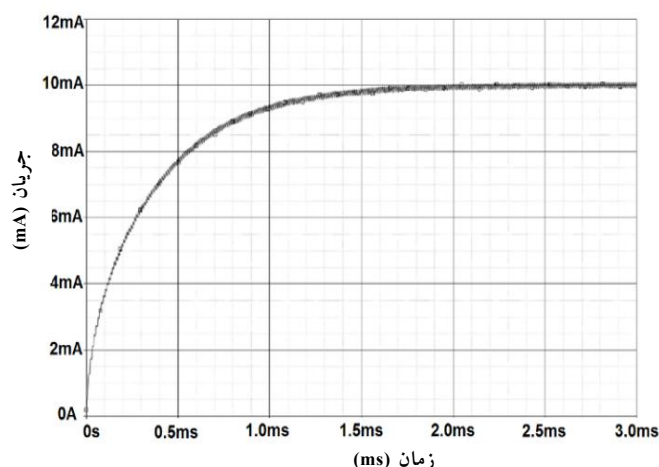
با توجه به رابطه $E = \frac{NV}{K}$ ، که E ولتاژ نهایی مولد و V قله ولتاژ RF می‌باشد، مقدار N که نشان دهنده تعداد طبقات است به دست می‌آید. در این فرمول با لحاظ کردن $E=800\text{ kV}$ ، $V=100\text{ kV}$ و $K=2$ مقدار $N=16$ به دست می‌آید. در نتیجه نیاز به

۱۶ عدد مجموعه یکسوکنده 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 یکسوکنده، 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 80 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

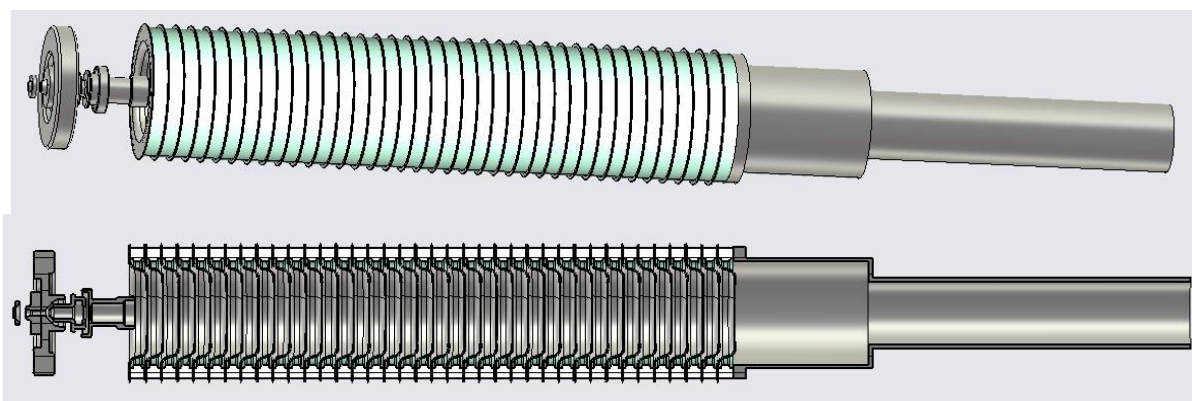
پایین ستون به سمت بالای ستون افزایش می‌یابد تا در نهایت روی حلقه کروم‌ای آخر، پتانسیل 800 kV کیلو ولت ایجاد می‌شود.

با توجه به مقادیر محاسبه شده با فرض ولتاژ ورودی با دامنه ولتاژ 100 kV و فرکانس 50 kHz هرترتز، 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.

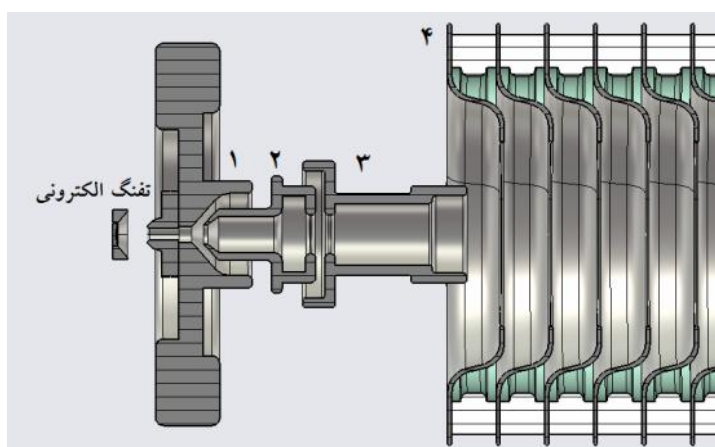
۴. شبیه‌سازی و طرح اولیه ستون شتاب‌دهنده

800 kV

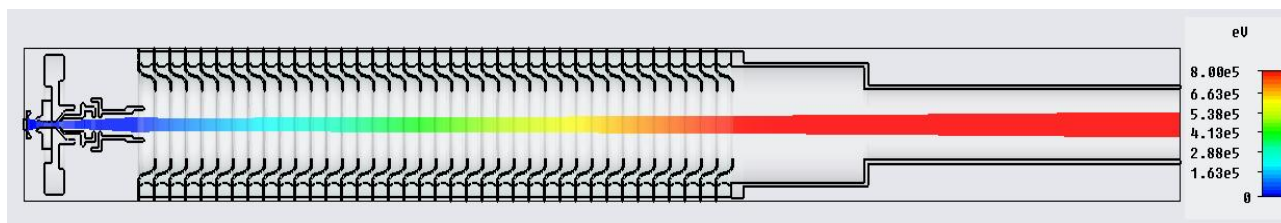
به منظور طراحی ستون شتاب‌دهنده 800 kV ، ابتدا ساختار شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک موجود در ایران به دقت مطالعه و بررسی شد. از آن جمله می‌توان به شتاب‌دهنده‌های 200 kV [۱۰] و واندوگراف اشاره کرد که با شبیه‌سازی آن‌ها اطلاعات مفیدی در زمینه کارکرد شتاب‌دهنده‌های



شکل ۱۳. طرح ابتدایی ستون شتاب‌دهنده ۸۰۰kV.



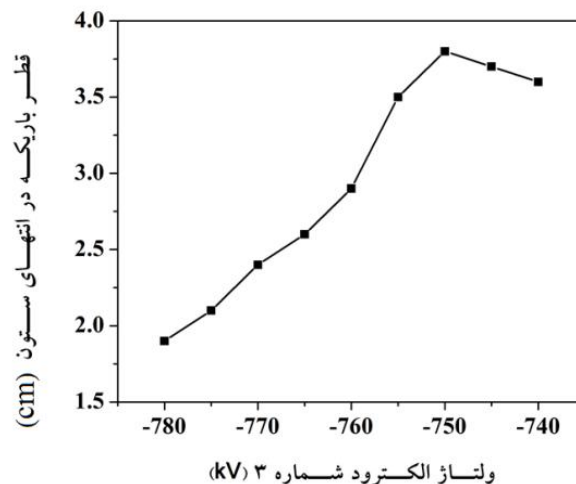
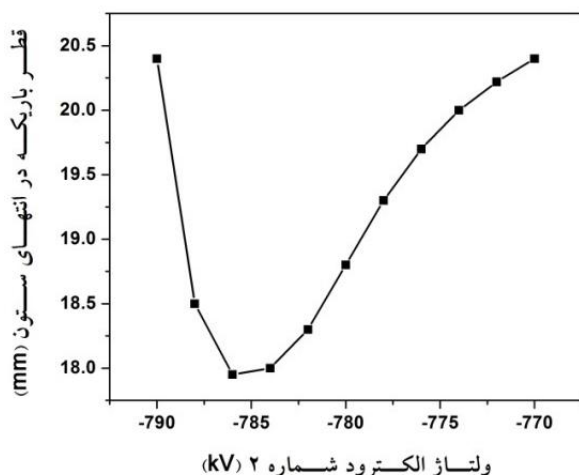
شکل ۱۴. الکترودهای استخراج کننده در ابتدای ستون شتاب‌دهی.



شکل ۱۵. مسیر حرکت ذرات در ستون شتاب‌دهنده ۸۰۰kV 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، ۷۸۰kV- 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 ۲cm 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 ۸۰۰keV کسب می‌کنند. به منظور کمینه کردن قطر باریکه در انتهای ستون، ابتدا ولتاژ الکتروود ۳ در مقدار ۷۷۰kV- ثابت و ولتاژ الکتروود ۲ تغییر داده شد که ولتاژ بهینه آن ۷۸۵ kV- به دست آمد. در نهایت با ثابت کردن ولتاژ الکتروود ۲ در این مقدار، تلاش شد



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

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی جفت‌شدگی خازنی شتاب‌دهنده داینامی‌ترون پرداخته شد. با استفاده از نرم افزار CST مقدار $C_{ac}=2$ pF و بیشترین مقدار C_{se} با توجه به شکست الکتريکی، ۸ پیکو فاراد به دست آمد. با محاسبه ضریب جفت‌شدگی برای رسیدن به ولتاژ ۸۰۰ کیلو ولت، تعداد طبقات

لازم محاسبه شد، که نتایج به دست آمده، با شبیه‌سازی‌های 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 شبیه‌سازی به دست آمد. در انتها، طرح مناسب ستون با ۳۸ الکترون شتاب‌دهی با پله پتانسیل ۲۰ kV پیشنهاد شد.

مراجع

1. R Hellborg, "Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications", Springer (2005).
2. E Cottreau, "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 شتاب‌دهنده الکترواستاتیکی ۲۰۰ کیلو ولت" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، شهریور (۱۳۸۶).