



طراحی و ساخت ابزار اندازه‌گیری ولتاژ (GVM) برای شتاب‌دهنده داینامی‌ترون ۱/۵ مگا‌ولت

زهرا صادقچه^۱، احسان ابراهیمی بسابی^{۱*}، محمد صالحی^۲، مهیار شیرشکن^۲ و فرشاد قاسمی^۲

۱. دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

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

پست الکترونیکی: e.brahim@shahroodut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶)

چکیده

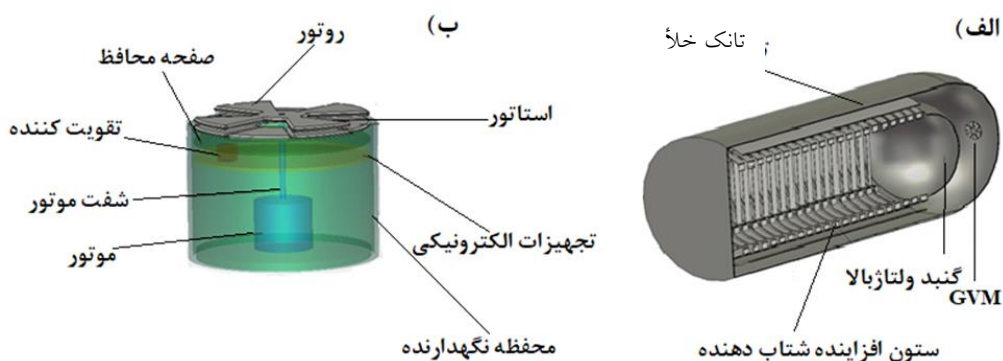
امروزه به دلیل افزایش روز افزون کاربرد شتاب‌دهنده‌های ذرات در حوزه‌های مختلف، ساخت شتاب‌دهنده‌ها توسعه یافته است. در این شتاب‌دهنده‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری که کمیت‌های مهم و پرکاربرد را اندازه‌گیری می‌کنند، اهمیت زیادی دارند. به واسطه نقش ولتاژ الکتریکی در شتاب‌دهی ذرات، اندازه‌گیری دقیق ولتاژ الکتریکی هر لحظه در شتاب‌دهنده‌ها ضروری است. در این پژوهش، طراحی، ساخت و آزمون یک ابزار سنجش غیرمخرب ولتاژ الکتریکی به نام جنریتینگ ولتمتر یا به اختصار (GVM) انجام شده است. این ابزار از اصل تغییرات ظرفیت خازنی برای اندازه‌گیری ولتاژ استفاده می‌کند. همچنین اثر پارامترهای مختلف نظیر تعداد پره‌های روتور، ضخامت و قطر استاتور بر عملکرد این ابزار بررسی شده و در نهایت یک GVM مطلوب برای استفاده در شتاب‌دهنده الکترواستاتیکی داینامی‌ترون در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انتخاب شده است.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده داینامی‌ترون، ولتاژ بالا، جنریتینگ ولتمتر، CST STUDIO SUITE 2015

۱. مقدمه

جریان تولیدی مولد داینامی‌ترون کوچک است، نمی‌توان از روش‌های متعارفی مانند اتصال ولت‌متر با مقاومت بزرگ، برای اندازه‌گیری ولتاژ روی گنبد استفاده کرد. اندازه‌گیری ولتاژ بالا به روش‌های مختلفی انجام می‌شود، به عنوان مثال در روش سری بستن مقاومت‌ها به یکدیگر، مقداری از جریان در درون مقاومت‌های سری شده تبدیل به گرما می‌شود. تنها در یکی از روش‌های اندازه‌گیری است که با اتلاف بسیار ناچیز جریان می‌توان بار انباشته شده روی گنبد ولتاژ بالا را اندازه‌گیری کرد.

شتاب‌دهنده داینامی‌ترون به عنوان یک شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، شامل بخش‌های اصلی ستون افزایشنده، لوله شتاب‌دهی، انتقال باریکه و حفاظ است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های انتقال باریکه، سامانه اندازه‌گیری ولتاژ شتاب‌دهنده است. در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک برای کاهش افت و خیز ولتاژ خروجی از یک خازن بزرگ ذخیره بار یا گنبد ولتاژ بالا در انتهای ستون افزایشنده ولتاژ استفاده می‌شود. به دلیل این‌که



شکل ۱. (الف) محل قرارگیری GVM در شتاب دهنده و (ب) طرحواره کلی GVM.

در این پژوهش ابتدا به معرفی این ابزار و سپس به طراحی و ساخت یک GVM و مدرج کردن آن برای شتاب دهنده داینامیترون ۱/۵ مگاولتی پرداخته می شود [۱-۳].

۳. روش اندازه گیری

بار ذخیره شده Q روی صفحات خازن توسط پتانسیل ثابت V از رابطه (۱) محاسبه می شود [۶].

$$Q(t) = C(t)V, \quad (1)$$

ساختار اصلی GVM که در شکل ۱ نشان داده شده، شامل یک الکتروود چرخان (روتور)، الکتروود ثابت (استاتور) و موتور با سرعت ثابت است. همواره بین الکتروود ثابت و پایانه شتاب دهنده، ظرفیت خازنی ایجاد می شود. با چرخش روتور، ظرفیت خازنی ایجاد شده بین استاتور و پایانه ولتاژ شتاب دهنده با زمان تغییر می کند. اگر ولتاژ V ثابت باشد، جریان القایی ایجاد شده از طریق رابطه (۲) نشان داده می شود:

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = V \frac{dC(t)}{dt}, \quad (2)$$

تابع تغییرات ظرفیت به صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می شود.

$$C(t) = C_0 + A \sin \omega t, \quad (\omega = n\omega'), \quad (3)$$

ω' و n به ترتیب سرعت چرخش و تعداد پره های روتور است و ضریب A با استفاده از شرایط مرزی مشخص می شود. سپس جریان القایی از رابطه (۴) به دست می آید.

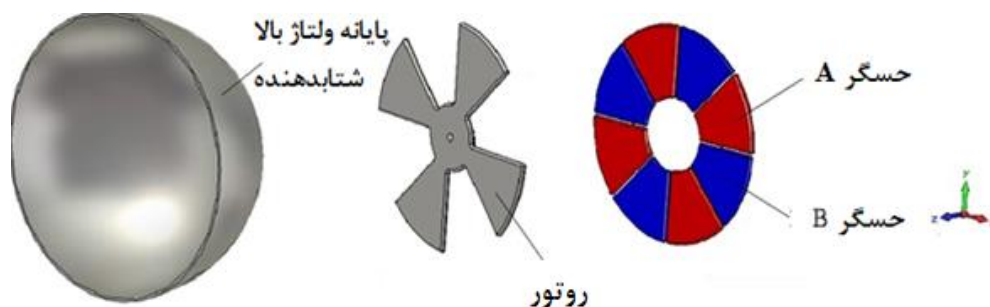
$$I(t) = VA\omega \cos \omega t, \quad (4)$$

در نهایت با مشخص شدن مقدار A ولتاژ پایانه مشخص می شود.

۲. روش عملکرد

برای اندازه گیری ولتاژ شتاب دهنده های الکترواستاتیکی از ابزاری به نام جنریتینگ ولتمتر^۱ استفاده می شود. مبنای این روش بر قانون القای فاراده استوار است. وقتی یک خازن مقابل یک منبع ولتاژ بالا قرار بگیرد، خازن شارژ می شود اما جریان شارش نمی شود، مگر این که بار تغییر کند. روتور متصل به موتور با چرخش زاویه ای بین استاتور و گنبد باعث ایجاد تغییرات خازنی بین استاتور و گنبد ولتاژ بالا می شود. روتور و استاتور هندسه مکمل هم دارند. استاتور به دو حسگر جدای A و B متصل است. در زمان و زاویه صفر، وقتی که حسگر A توسط روتور پوشانده می شود، دو حسگر A و B اختلاف فاز 180° درجه نسبت به هم دارند. زمانی که حسگر A یک تقویت کننده دیفرانسیلی سیگنال های این دو حسگر را از هم کم می کند، این عمل به طور مؤثری نوفه هایی را که از موتور DC و اختلالات ولتاژ بالا ایجاد می شوند، حذف می کند [۴ و ۵]. در شکل ۱ اجزای مورد استفاده در GVM و نیز مختصات قرارگیری آن در شتاب دهنده الکترواستاتیک نشان داده شده است.

۱. Generating Voltmeter



شکل ۲. GVM طراحی شده در نرم‌افزار CST.

$$A = \frac{(C_{max} - C_{min})}{\sin \frac{\pi}{4}} = \sqrt{2}(C_{max} - C_{min}), \quad (8)$$

$$V = \frac{i_m}{\omega A}, \quad (5)$$

۲.۴. محاسبه میانگین جریان

با تغییرات مقدار بار القایی هر حسگر، میانگین جریان از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, (\Delta t = t_1 - t_0), \quad (9)$$

t_0 زمانی که روتور کاملاً حسگر A را پوشانده است و t_1 زمانی که روتور به اندازه $\frac{\pi}{n}$ دوران می‌کند و حسگر A مقابل پایانه ولتاژ قرار می‌گیرد. زمان t_1 از رابطه (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\theta = \omega' t_1, (\theta = \frac{\pi}{n}), \quad (10)$$

$$\frac{\pi}{n} = \omega' t_1 \rightarrow t_1 = \frac{\pi}{n\omega}, \quad (11)$$

و مقدار میانگین جریان با رابطه (۱۲) نشان داده می‌شود.

$$I_{av} = \frac{n\omega' (Q_{max} - Q_{min})}{\pi} \quad (12)$$

۳.۴. تعداد پره‌های بهینه برای روتور

جریان القایی با تغییر متناوب سطح مؤثر استاتور در میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. هر چه این تغییرات سطح سریع‌تر باشد مقدار جریان القایی بیشتر خواهد بود. با توجه به این که سرعت چرخش روتور ثابت و بسامد زاویه‌ای سیگنال جریان القایی برابر با $n\omega$ است، طبق رابطه (۴) مقدار دامنه جریان القایی با افزایش تعداد پره‌های روتور شکل ۴. ت افزایش

۴. شبیه‌سازی GVM بر مبنای روش المان محدود

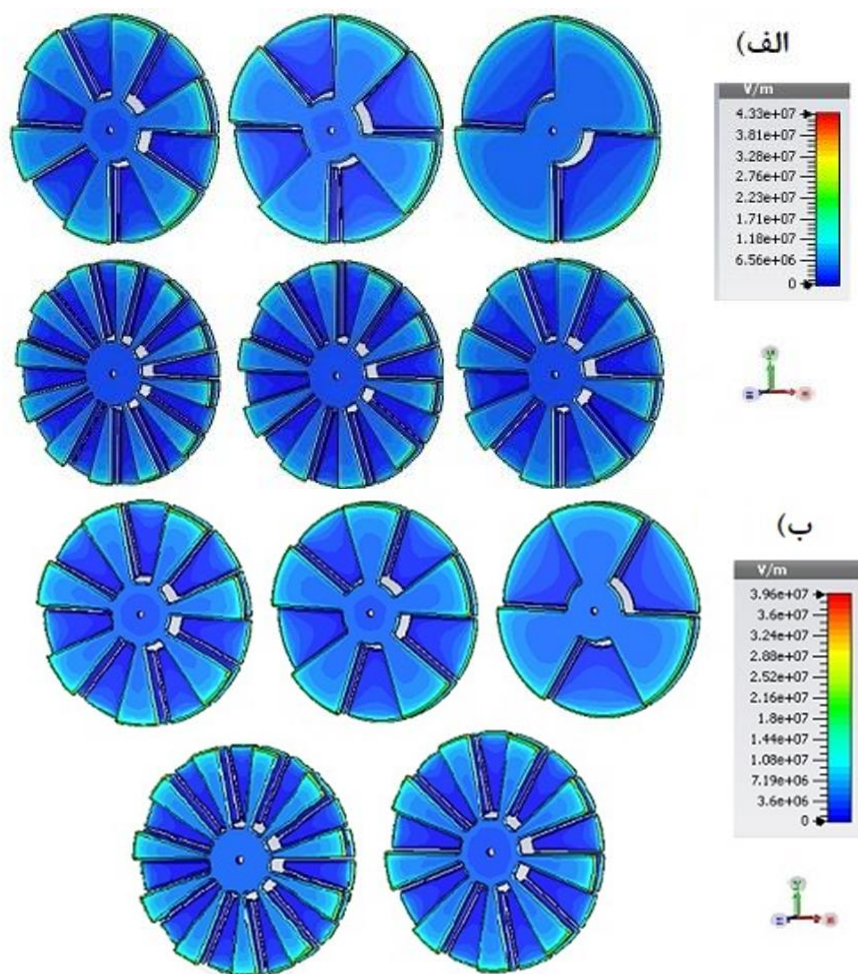
در طراحی GVM میدان الکتریکی بین روتور و استاتور یکنواخت فرض شده است، اما در عمل ممکن است تعداد پره‌ها، قطر، ضخامت و یا فاصله هریک از صفحات پروانه‌ای شکل (روتور و استاتور) بر نحوه توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور اثر بگذارد، در ادامه ابتدا مقدار ضریب A و جریان میانگین محاسبه و سپس تأثیر هر یک از پارامترها بر نحوه کار GVM بررسی می‌شود.

۱.۴. محاسبه ضریب A

طراحی GVM در نرم‌افزار CST STUDIO SUIT 2015 انجام شده است. شکل ۲ یک GVM طراحی شده در نرم‌افزار CST را نشان می‌دهد، استاتور آن شامل دو حسگر A و B و روتور آن دارای n پره است، که زاویه بین هریک از پره‌ها $\frac{\pi}{n}$ و شعاع خارجی آن R است. زمانی که روتور کاملاً سطح یک حسگر را پوشانده مقدار ظرفیت‌خازنی و بار کمینه می‌شود، اگر روتور به اندازه $\frac{\pi}{n}$ دوران کند و حسگر کاملاً در مقابل پایانه ولتاژ قرار گیرد بار القایی و ظرفیت‌خازنی بیشینه خواهد شد. محاسبه ضریب A برای یک روتور ۴ پره‌ای در ادامه آورده شده است.

$$C(t) = C_{min} = C_0, (\theta = \omega' t = 0), \quad (6)$$

$$C_{max} = C(\frac{\pi}{4}) = C_{min} + A \sin \frac{\pi}{4}, \quad (\theta = \omega' t = \frac{\pi}{4}), \quad (7)$$



شکل ۳. توزیع میدان الکتریکی روی سطح استاتور با (الف) قطعات زوج و (ب) قطعات فرد.

کاهش می‌یابد. بنابراین لزوماً با افزایش تعداد پره‌های روتور عملکرد GVM بهتر نخواهد شد.

۴.۴. قطر و ضخامت استاتور

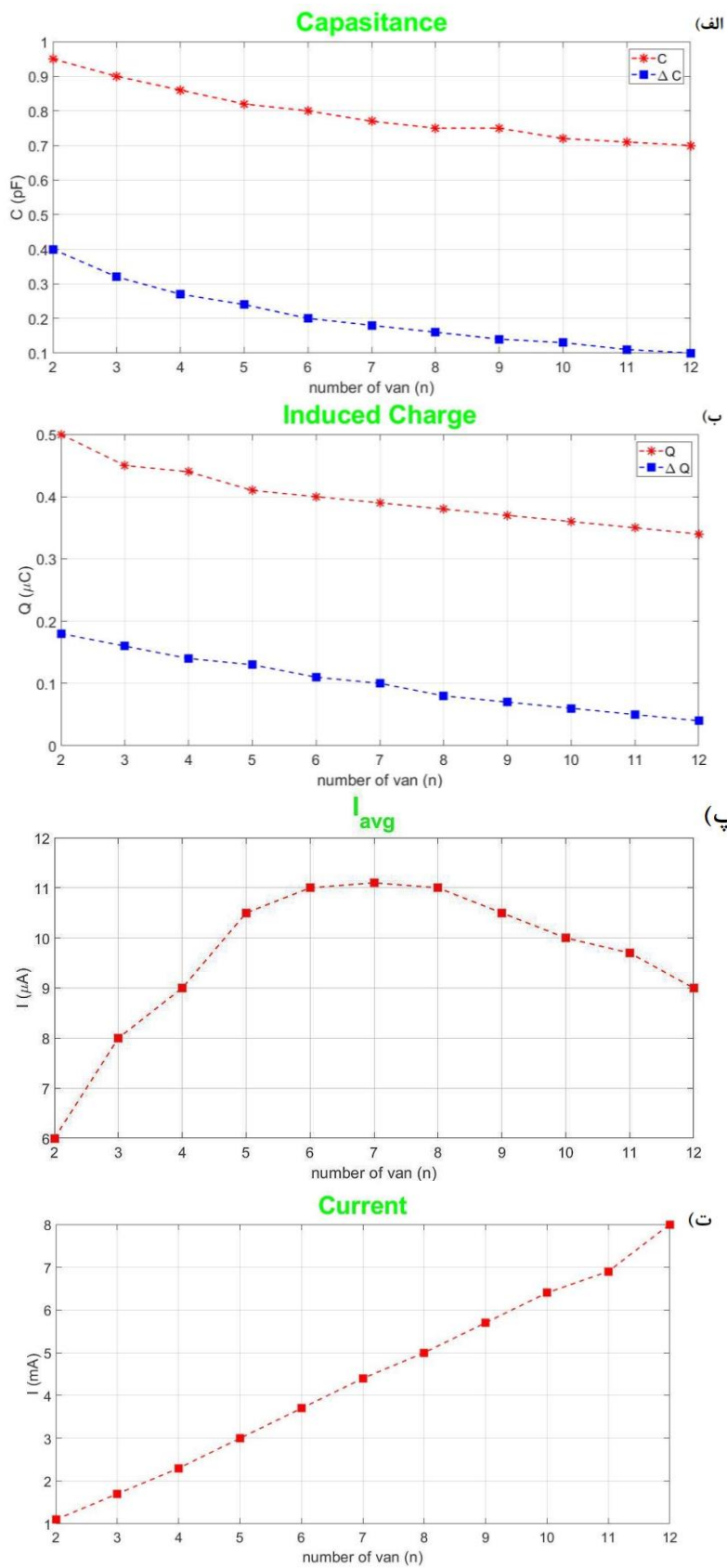
توزیع میدان الکتریکی با مساحت سطح مؤثر رابطه مستقیم دارد، بنابراین با افزایش قطر استاتور، توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور بهتر و یکنواخت‌تر خواهد شد. با افزایش توزیع میدان الکتریکی روی سطح استاتور، مقدار بار الکتریکی و جریان ناشی از آن نیز بیشتر می‌شود. شکل ۵. استاتور را نشان می‌دهد.

همچنین با افزایش ضخامت اثر لبه، کاهش و توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور بهبود می‌یابد. برای بررسی تأثیر

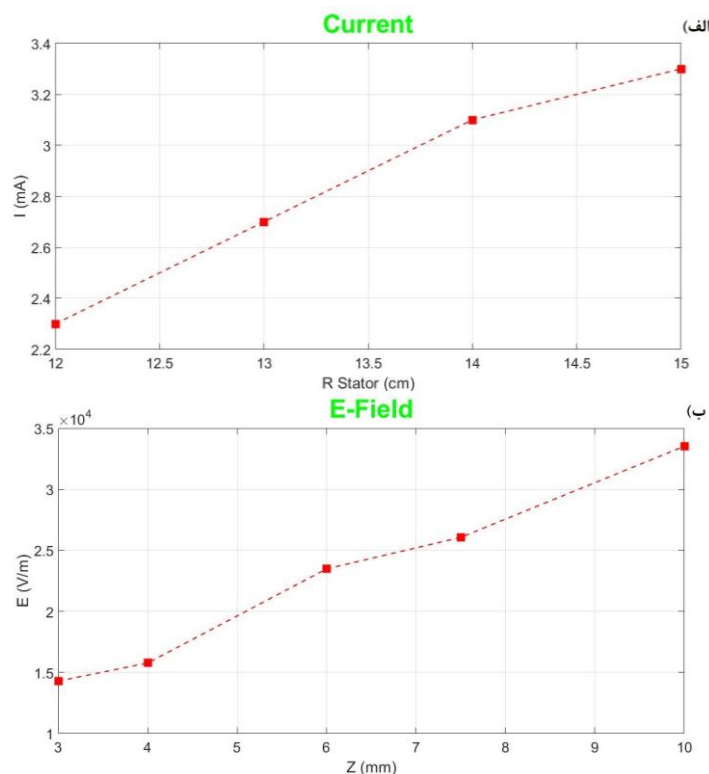
می‌یابد. شکل ۳ توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور با روتور یک تا ۱۲ پره‌ای را نشان می‌دهد.

پس از شبیه‌سازی GVM با تعداد پره‌های روتور مختلف برای شتاب‌دهنده و اندوگراف ۵۰۰ کیلو الکترون‌ولتی در نرم‌افزار CST، نتایج تغییرات ظرفیت خازنی، بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان I_{av} بر حسب تعداد پره‌های روتور در شکل ۴ آورده شده‌است.

طبق شکل ۳ و شکل ۴. الف و ب با افزایش تعداد پره‌های روتور، سطح مؤثر استاتور کاهش و اثر لبه افزایش پیدا می‌کند. همچنین توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور و مقدار ظرفیت خازنی و بار القایی به دلیل کاهش سطح مؤثر استاتور کاهش می‌یابد. شکل ۴. پ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پره‌های روتور تا ۷ پره مقدار I_{av} افزایش می‌یابد و سپس



شکل ۴. (الف) تغییرات ظرفیت خازنی، (ب) تغییرات بار القایی، (پ) میانگین جریان و (ت) دامنه جریان.



شکل ۵. (الف) تغییرات دامنه جریان برحسب قطر و (ب) تغییرات میدان الکتریکی بر حسب ضخامت استاتور.

افزایش یابد. اما در عمل این امر امکان پذیر نیست؛ زیرا با نزدیک شدن روتور به استاتور احتمال برخورد این دو حین چرخش روتور وجود دارد و موجب آسیب دیدن دستگاه می شود.

۵. ساخت نمونه اولیه

شکل ۷ GVM اولیه را که بر روی صفحه PCB توسط نرم افزار آلتیوم^۱ طراحی و چاپ شده است نمایش می دهد. برای بررسی سیگنال خروجی GVM، ابزار را در چیدمان آزمایش شکل ۸ قرار داده ایم. روتور با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه توسط موتور DC چرخانده می شود و فاصله بین روتور و استاتور ۵ میلی متر و فاصله صفحه ولتاژ بالا با روتور ۹ سانتی متر در نظر گرفته شده است.

با تشکیل ظرفیت خازنی بین استاتور و صفحه فلزی بالای GVM که ولتاژ اعمال شده است، دستگاه بررسی می شود. در شکل ۹، نحوه تغییرات ولتاژ اندازه گیری توسط GVM در فاصله های متفاوت دیده می شود. همانطور که در شکل ۹

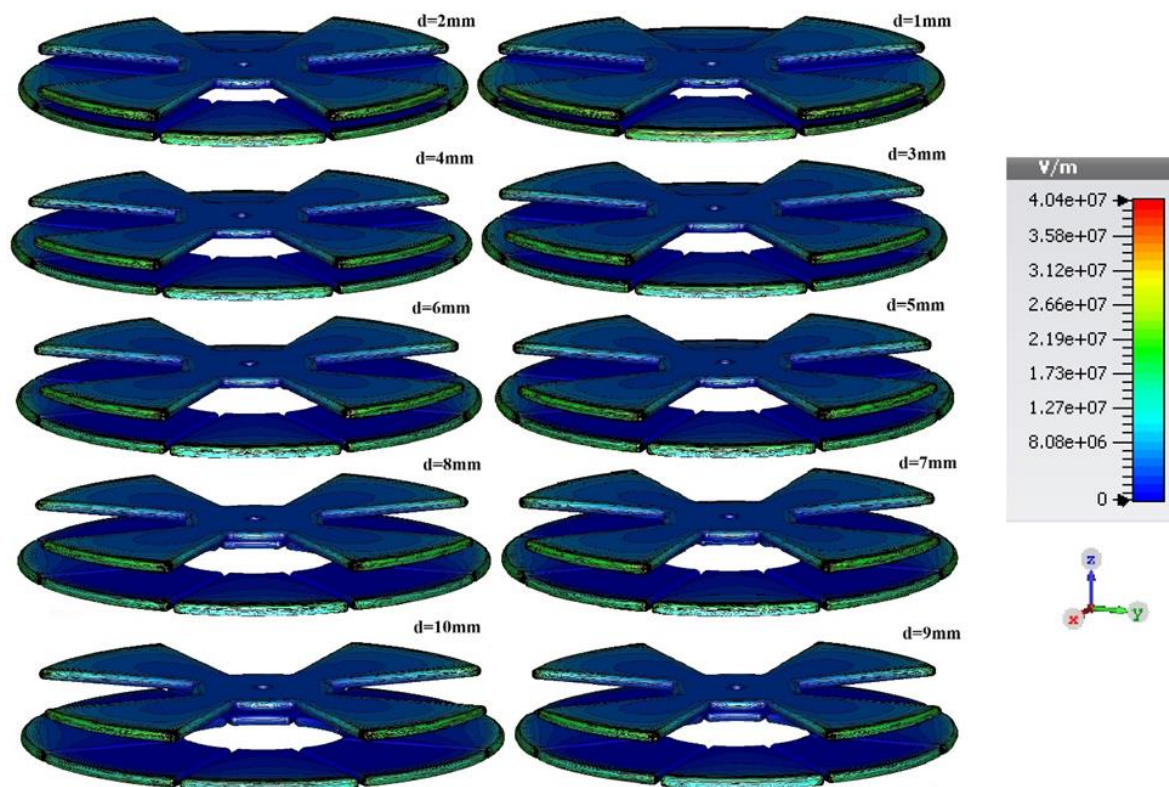
ضخامت استاتور بر توزیع میدان الکتریکی شبیه سازی های مربوط به آن برای ضخامت های ۳ تا ۱۰ میلی متر انجام شد که نتایج آن در شکل ۵. ب آورده شده است.

همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، افزایش قطر و ضخامت استاتور موجب افزایش دامنه جریان و توزیع میدان الکتریکی سطح استاتور می شود. اما از آنجایی که هندسه استاتور و روتور کاملاً مشابه با یکدیگرند و با توجه به این که جنس روتور و استاتور برنج است، افزایش ضخامت و قطر روتور موجب افزایش وزن آن خواهد شد، که در نهایت سرعت چرخش روتور کاهش می یابد. از این رو در افزایش قطر و ضخامت باید به این مسئله توجه کرد.

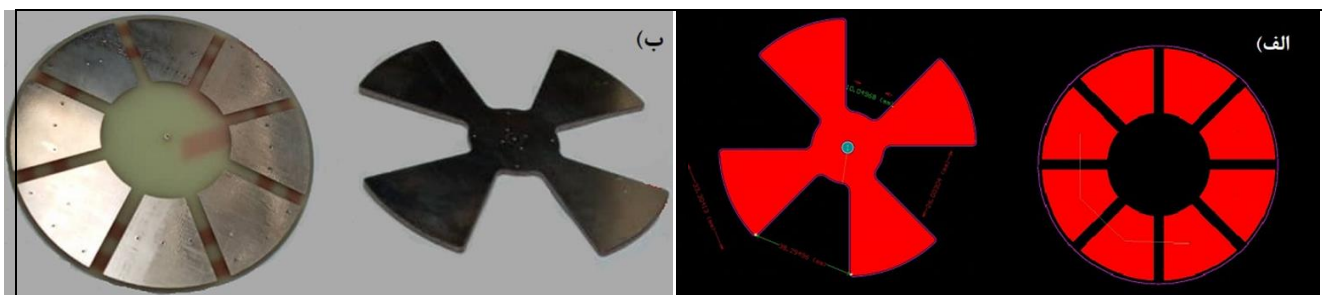
۵.۴. فاصله بهینه روتور و استاتور

شکل ۶ توزیع میدان الکتریکی روی سطح استاتور را در فواصل مختلف ۱ تا ۱۰ میلی متری روتور و استاتور نشان می دهد. همان گونه که در شکل نشان داده شده، اثر لبه تحت تأثیر فاصله است. بنابراین شکاف باید تا حد ممکن کوچک باشد تا حساسیت GVM

^۱. Altium



شکل ۶. نحوه توزیع میدان بر سطح استاتور نسبت به فواصل مختلف بین استاتور و روتور، d فاصله بین استاتور و روتور، خطوط مشکی رنگ خطوط میدان را نمایش می‌دهند.



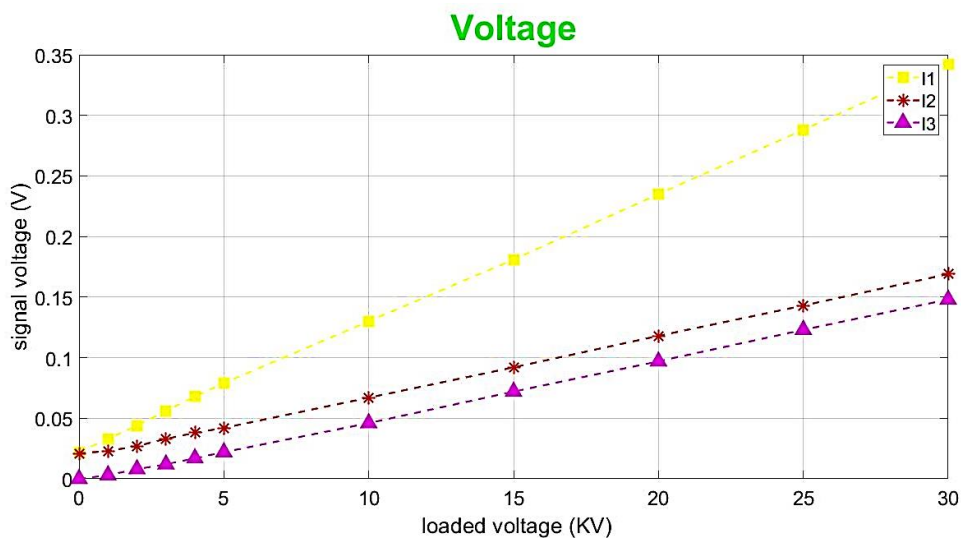
شکل ۷. (الف) روتور و استاتور طراحی شده در نرم افزار اتیوم و (ب) روتور و استاتور چاپ شده بر روی PCB.



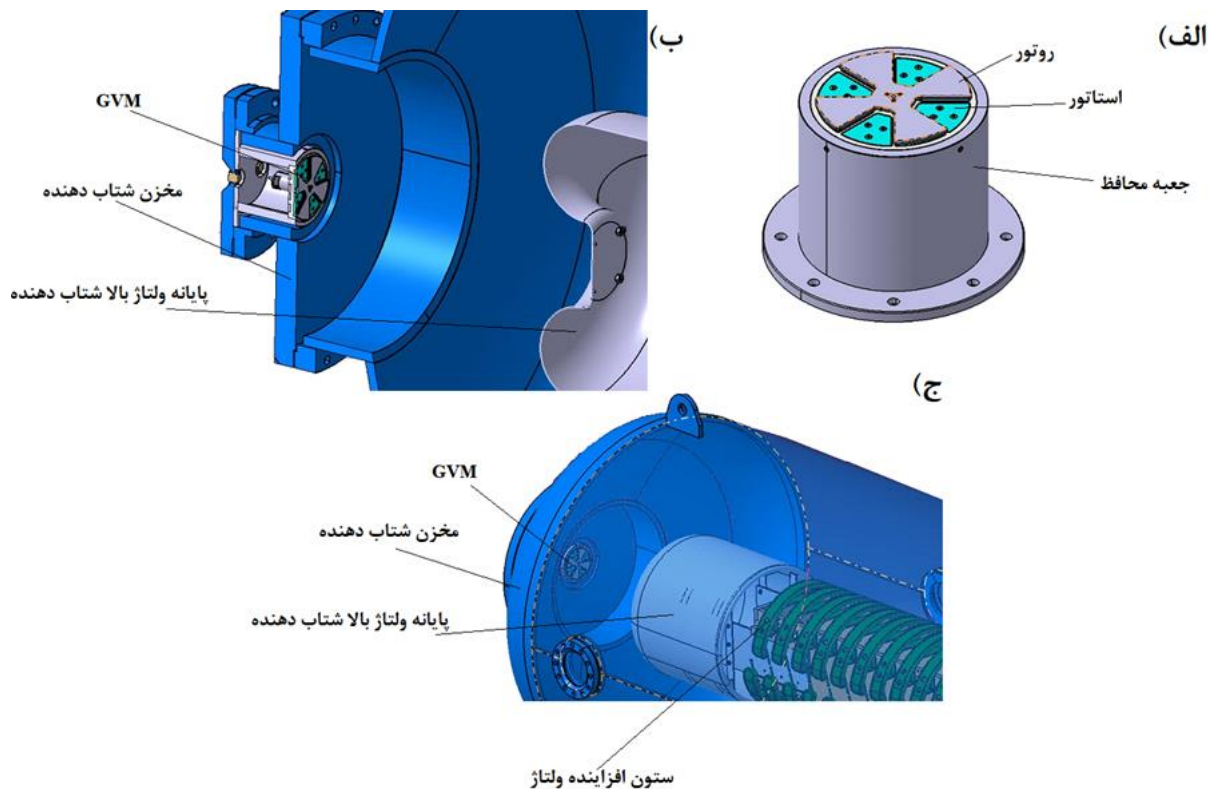
شکل ۸. چیدمان آزمایش نمونه اولیه GVM.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی GVM نهایی.

فاصله GVM و پایانه ولتاژ بالا (cm)	فاصله استاتور و روتور (mm)	جنس استاتور و روتور	ضخامت روتور (mm)	ضخامت استاتور (mm)	قطر استاتور و روتور (cm)	تعداد قطاع استاتور
۵۸/۸	۳	برنج	۳	۴	۱۳	۸



شکل ۹. تغییرات ولتاژ خوانده شده توسط GVM نسبت به ولتاژ وارد شده به صفحه.



شکل ۱۰. (الف) طرح نهایی GVM، (ب) و (ج) نحوه قرار گیری GVM مقابل پایانه ولتاژ بالای شتاب دهنده داینامی ترون.

مشاهده می‌شود، تغییرات ولتاژ خوانده شده توسط GVM نسبت به ولتاژ اعمال شده به صفحه به صورت خطی است. بر اساس این کردار خطی می‌توان دستگاه GVM را مدرج کرد.

۶. طراحی نهایی GVM برای شتاب‌دهنده مورد نظر

در بررسی‌های تئوری که در قبل به آن اشاره شد و همچنین آزمایش‌های عملی اولیه انجام شده دریافتیم که علاوه بر افزایش تعداد قطاع استاتور، افزایش قطر نیز موجب افزایش دامنه جریان القایی و میانگین جریان می‌شود. همچنین برای افزایش توزیع میدان در سطح استاتور می‌توان ضخامت استاتور را افزایش داد و برای طراحی لبه‌ها از منحنی روگوسفکی استفاده کرد و در نهایت برای افزایش حساسیت در عملکرد GVM فاصله روتور و استاتور را کاهش داد. جدول ۱ مشخصات مکانیکی و شکل ۱۰ پیکربندی نهایی انتخاب شده برای محل قرارگیری GVM در روبروی گنبد ولتاژ بالای شتاب‌دهنده دینامیترتون را نشان می‌دهد [۷].

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به توسعه ساخت شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی، یکی از موارد پر اهمیت در ساخت این شتاب‌دهنده‌ها طراحی ابزاری برای اندازه‌گیری ولتاژ است. در طراحی باید به اهمیت جریان تولید شده و کم بودن مقدار آن توجه کرد که حین اندازه‌گیری ولتاژ، این جریان اتلاف نشود. بنابراین برای اندازه‌گیری ولتاژ از روش GVM استفاده می‌شود. در این مقاله به طراحی یک GVM برای شتاب‌دهنده دینامیترتون پرداخته شده است و تأثیرات پارامترهای مختلف نظیر تعداد پره‌های روتور، قطر و ضخامت استاتور و همچنین فاصله روتور و استاتور بر روی عملکرد GVM بررسی و نتایج آن گزارش شد. نتایج نشان می‌دهد افزایش تعداد پره‌های روتور، قطر و ضخامت استاتور و کاهش فاصله روتور و استاتور موجب عملکرد بهتر GVM می‌شود. در نهایت GVM مطلوب برای شتاب‌دهنده دینامیترتون معرفی شد. در ادامه قصد داریم به ساخت و مدرج کردن آن برای شتاب‌دهنده دینامیترتون بپردازیم.

مراجع

1. S Y Lee, "Accelerator physics", World scientific publishing (2018).
2. A M Aghayan, et al., *Iran. J. Phys. Res.* **15**, 2 (2015) 243 (Persian).
3. E Kuffel "High voltage engineering (Fundamentals)", Second edition Elsevier, (2000).
4. Y. Cui. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **65**,1 (2017) 608.
5. P Tant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **56**, 4 (2007) 1459.
6. Z Sadeghche, et al., "Basic design of the system for measuring the potential of the high voltage terminal in the electrostatic accelerator". 1396-1399. August 2019 (Persian).
7. Z Sadeghche, *MSc Thesis*, Nuclear Physics, Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology (2021) (Persian).