

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی و شبیه‌سازی سیستم اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی به
روش GVM برای یک شتاب‌دهنده الکترواستاتیک

نگارنده: زهرا صادقچه

اساتید راهنما:

دکتر احسان ابراهیمی بسابی

دکتر فرشاد قاسمی

استاد مشاور:

مهندس محمد صالحی

تاریخ: ۱۴۰۰/۰۲/۲۹

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

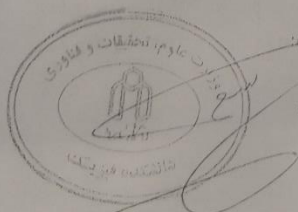
با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد، خانم زهرا صادقچه با شماره دانشجویی ۹۷۱۰۳۰۴ رشته فیزیک گرایش هسته ای تحت عنوان طراحی و شبیه سازی سیستم اندازه گیری پتانسیل الکتریکی به روش GVM برای یک شتاب دهنده الکترواستاتیک که در تاریخ ۹۹/۱۱/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸ ☐
 ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴ ☐
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
 نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر احسان ابراهیمی بسایی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر فرشاد قاسمی	استادیار	
۳- استاد مشاور	مهندسین محمد صالحی	محقق	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر ایمان حسینی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مسلم بیوهانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حسین توکلی عنبران	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به

حضرت ماه سید علی حسینی خامنه‌ای

و

شهید حاج قاسم سلیمانی و شهید محسن فخری زاده

لا یشکر الله من لا یشکر الناس

پروردگار را سپاسگزارم که بار دیگر به من فرصت آموختن داد. از پدر و مادر و خواهران بزرگوارم به خاطر زحماتی که در طول زندگی همواره برای پیروزی و شادکامی من به جان خریدند، تشکر می‌کنم.

از اساتید بزرگوارم جناب آقایان دکتر احسان ابراهیمی بسابی و دکتر فرشاد قاسمی برای تمام حمایت‌ها و زحمات بی‌دریغشان سپاسگزاری می‌کنم. از جناب آقای مهندس محمد صالحی که مشاور پایان‌نامه اینجانب را عهده‌دار بودند و در سایه توجهات ایشان و راهنمایی سودمندشان توانستم گامی در جهت علم و دانش بردارم کمال تشکر را دارم.

همچنین بر خود واجب می‌دانم از جناب آقای دکتر شاهین صنایع حجری و جناب مهندس مهیار شیرشکن به پاس زحمات بی‌دریغشان در طی انجام این تحقیق سپاسگزاری کنم. در نهایت از دوستان عزیزم خانم‌ها فاطمه افراسیابی و پریسا صداقت نیا که مطالب زیادی به من آموختند تشکر کرده و برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب زهرا صادقچه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان طراحی و شبیه‌سازی سیستم اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی به روش GVM برای یک شتابدهنده الکترواستاتیک تحت راهنمایی دکتر احسان ابراهیمی بسابی و دکتر فرشاد قاسمی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این پژوهش یکی از انواع روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ بالا به نام Generating Voltmeter (GVM) بررسی و بر مبنای این روش، ابزار مورد نظر طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. در شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار CST Studio Suite، اثر پارامترهایی نظیر تعداد، قطر و ضخامت پره‌های استاتور و روتور، فاصله استاتور با روتور و پایانه ولتاژ بالای شتاب‌دهنده و جنس استاتور و روتور بر عملکرد GVM تجزیه و تحلیل شده است. طراحی، ساخت و کالیبره کردن نمونه آزمایشی GVM از جمله مهمترین نتایج بدست آمده در این پایان نامه می باشد. در پایان نیز GVM نهایی برای نصب بر روی شتاب‌دهنده داینامیترون طراحی شده است.

کلید واژه: شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، شتاب‌دهنده داینامیترون، اندازه‌گیری ولتاژ، ابزار GVM

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

✓ صادقچه، زهرا؛ صالحی، محمد؛ ابراهیمی، احسان؛ قاسمی، فرشاد؛ ۱۳۹۸. طراحی پایه سامانه

اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی پایانه ولتاژبالا در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک، کنفرانس

فیزیک ایران، تبریز.

✓ صادقچه، زهرا؛ صالحی، محمد؛ ابراهیمی، احسان؛ قاسمی، فرشاد؛ ۱۳۹۸. طراحی مفهومی سیستم

اندازه‌گیری ولتاژ بالا از طریق اندازه‌گیری میدان، کنفرانس ملی شتابگرهای ذرات و کاربردهای آن،

تهران.

✓ صادقچه، زهرا؛ صالحی، محمد؛ ابراهیمی، احسان؛ قاسمی، فرشاد؛ ۱۳۹۸. طراحی مکانیکی

سیستم اندازه‌گیری ولتاژبالا بر اساس تغییرات ظرفیت خازنی، کنفرانس هسته‌ای، تهران.

فهرست مطالب

فصل اول

۱.....	مروری بر انواع شتاب‌دهنده‌ها
۲.....	۱-۱ مقدمه
۳.....	۲-۱ شتاب‌دهنده رادیوفرکانسی
۳.....	۱-۲-۱ خطی
۵.....	۲-۲-۱ سیکلوترون
۷.....	۳-۲-۱ سینکروترون
۸.....	۴-۲-۱ رودوترون
۹.....	۳-۱ شتاب‌دهنده القایی
۱۰.....	۱-۳-۱ بتاترون
۱۱.....	۴-۱ شتاب‌دهنده الکترواستاتیک
۱۱.....	۱-۴-۱ کوکرافت-والتون
۱۲.....	۲-۴-۱ وان دوگراف
۱۳.....	۳-۴-۱ پلترون
۱۵.....	۴-۴-۱ داینامیترون

۱۷..... ۵-۴-۱ شتاب‌دهنده ELV

۱۸..... ۵-۱ جمع بندی

فصل دوم

۱۹..... روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ بالا

۲۰..... ۱-۲ مقدمه

۲۰..... ۲-۲ گاف جرقه

۲۱..... ۱-۲-۱ گاف کروی

۲۵..... ۱-۱-۲-۲ اندازه‌گیری ولتاژ قله با روش گاف کروی

۲۷..... ۳-۲ ولت‌متر الکترواستاتیک

۲۸..... ۱-۳-۲ ولت‌متر الکترواستاتیک کلوین

۲۹..... ۴-۲ مقسم ولتاژ

۳۱..... ۱-۴-۲ اندازه‌گیری ولتاژ یک ترانسفورماتور توسط مقسم ولتاژ

۳۲..... ۵-۲ GVM

۳۴..... ۱-۵-۲ Electric Field Mill

۳۷..... ۲-۵-۲ مروری بر کارهای دیگران

۳۹..... ۳-۵-۲ استفاده از حسگر میدان الکتریکی در برزیل

۴۰..... ۶-۲ جمع بندی

فصل سوم

۴۱	 بررسی جزئی و شبیه‌سازی اجزاء GVM
۴۲	 ۱-۳ مقدمه
۴۳	 ۲-۳ طرح مسئله و صحت سنجی نرم افزار
۴۵	 ۳-۳ بررسی GVM موجود در شتاب‌دهنده واندوگراف
۵۰	 ۴-۳ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر عملکرد GVM
۵۱	 ۱-۴-۳ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقدار ظرفیت‌خازنی، بار القایی و دامنه جریان القایی
۵۲	 ۲-۴-۳ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر میانگین جریان القایی
۵۳	 ۳-۴-۳ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر توزیع میدان الکتریکی روی استاتور و روتور
۵۵	 ۵-۳ بررسی اثر افزایش قطر و ضخامت استاتور و روتور بر عملکرد GVM
۵۶	 ۶-۳ طراحی لبه‌های استاتور و روتور
۵۷	 ۱-۶-۳ الکتروود صفحه‌ای
۵۷	 ۲-۶-۳ الکتروود روگوسکی
۵۹	 ۳-۶-۳ الکتروود بروس
۶۰	 ۷-۳ بررسی فاصله بهینه استاتور و روتور
۶۲	 ۸-۳ فاصله بهینه پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده و GVM
۶۳	 ۹-۳ جنس روتور و استاتور

۱۰-۳ انتخاب موتور مناسب ۶۴

۱۱-۳ الکترونیک سیستم ۶۵

فصل چهارم

۶۹ بررسی نتایج و طراحی نمونه نهایی GVM

۱-۴ مقدمه ۷۰

۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر عملکرد GVM ۷۰

۱-۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقادیر ظرفیت خازنی، بار القایی و دامنه جریان

القایی ۷۰

۲-۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقدار میانگین جریان القایی ۷۲

۳-۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقدار میدان الکتریکی یک سنسور ۷۳

۳-۴ نتایج بررسی اثر افزایش قطر استاتور و روتور بر عملکرد GVM ۷۵

۱-۳-۴ نتایج بررسی اثر افزایش قطر استاتور و روتور بر مقادیر ظرفیت خازنی و بار القایی ۷۵

۲-۳-۴ نتایج تاثیر افزایش قطر استاتور بر مقادیر دامنه جریان القایی، میانگین جریان و میدان الکتریکی

..... ۷۶

۳-۳-۴ نتایج تاثیر افزایش ضخامت استاتور بر مقدار میدان الکتریکی ۷۸

۴-۴ نتایج بررسی اثر افزایش فاصله بین استاتور و روتور بر عملکرد GVM ۸۰

۱-۴-۴ نتایج بررسی اثر افزایش فاصله بین استاتور و روتور بر مقادیر ظرفیت خازنی و بار القایی ... ۸۰

۲-۴-۴	نتایج بررسی اثر افزایش فاصله بین استاتور و روتور بر مقادیر دامنه جریان القایی و میانگین
۸۱	جریان.....
۳-۴-۴	نتایج بررسی افزایش فاصله روتور و استاتور بر مقدار میدان الکتریکی یک سنسور.....
۵-۴	نتایج بررسی اثر افزایش فاصله پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده و GVM بر عملکرد سیستم.....
۶-۴	ساخت و آزمایش نمونه اولیه GVM.....
۷-۴	طراحی نمونه نهایی GVM برای شتاب‌دهنده مورد نظر.....
۹۹	جمع بندی:.....
۹۹	پیشنهادهات:.....
۱۰۰	فهرست مراجع.....

فهرست تصاویر

۴	شکل ۱-۱: نمودار کلی شتاب‌دهنده خطی.....
۵	شکل ۲-۱: نمایی از نحوه عملکرد شتاب‌دهنده خطی.....
۶	شکل ۳-۱: نمایی از عملکرد سیکلوترون.....
۷	شکل ۴-۱: نمایی از نیرو گریز از مرکز.....
۸	شکل ۵-۱: شتاب‌دهنده سینکروترون.....

- شکل ۱-۶: شتاب‌دهنده رودوترون..... ۹
- شکل ۱-۷: شتاب‌دهنده بتاترون..... ۱۰
- شکل ۱-۸: مولد کوکرافت - والتون..... ۱۲
- شکل ۱-۹: مولد وان دوگراف..... ۱۳
- شکل ۱-۱۰: مولد پلترون..... ۱۴
- شکل ۱-۱۲: نمودار کلی مولد داینامیترون..... ۱۵
- شکل ۱-۱۳: مولد داینامیترون..... ۱۶
- شکل ۱-۱۴: شتاب‌دهنده ELV..... ۱۷
- شکل ۲-۱ (الف) گاف کروی عمودی ب) کروی افقی..... ۲۲
- شکل ۲-۳ (الف) ترتیب قرارگیری کره‌ها ب) ترتیب آزمایش..... ۲۶
- شکل ۲-۴: نمایی از ولت‌متر الکترواستاتیک..... ۲۸
- شکل ۲-۵: ولت‌متر ساخته شده توسط کلوین..... ۲۹
- شکل ۲-۶: مدار کلی مقسم ولتاژ..... ۳۰
- شکل ۲-۷: مدار کلی مقسم ولتاژ با فرض ناچیز نبودن مقدار I_{load} ۳۰
- شکل ۲-۸: مقسم ولتاژ طراحی شده بروس..... ۳۱
- شکل ۲-۹: نمایی از اجزاء GVM..... ۳۲
- شکل ۲-۱۰: GVM طراحی شده با روتور مرتعش..... ۳۶
- شکل ۲-۱۱: GVM با روتور استوانه‌ای..... ۳۷

- شکل ۲-۱۲: الف) GVM طراحی شده ترامپ با روتور ۴ پره ، ب) GVM طراحی شده پولگا با روتور ۲ پره ، ج) نمونه ای از GVM ساخته شده شیمایکین با روتور ۸ پره ۳۸
- شکل ۲-۱۵: الف) طرحواره EFM ب) نمونه ساخته شده از EFM ۳۹
- شکل ۲-۱۶: نقاط مشخص شده توسط EFM که در آنها صاعقه رخ میدهد ۴۰
- شکل ۳-۱: خازن‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CST الف) خازن اولیه ب) افزایش مساحت صفحات خازن ۴۴
- شکل ۳-۲: خازن‌های ساخته شده الف) خازن اولیه ب) افزایش مساحت صفحات خازن ۴۴
- شکل ۳-۳: GVM با استاتور ۸ قطاعی استفاده شده در شتاب‌دهنده وان‌دوگراف ۴۶
- شکل ۳-۴: الف) نحوه قرار گیری GVM در مخزن شتاب‌دهنده ب) شماتیک کلی از GVM شبیه‌سازی شده ۴۷
- شکل ۳-۵: نحوه قرارگیری روتور بین هر یک از سنسورها و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده برای GVM با استاتور ۸ قطاعی ۴۷
- شکل ۳-۶: GVM شبیه‌سازی شده با تعداد پره‌های روتور (قطاع استاتور) متفاوت ۵۱
- شکل ۳-۷: توزیع میدان الکتریکی روی سطح استاتور ۵۴
- شکل ۳-۸: سطح تعیین شده برای محاسبه میدان در نرم‌افزار CST ۵۴
- شکل ۳-۹: GVM با قطرهای استاتور ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ سانتیمتر شبیه‌سازی شده در نرم افزار CST ۵۵
- شکل ۳-۱۰: توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور برحسب افزایش قطر استاتور ۵۵

شکل ۳-۱۱: استاتور با ضخامتهای ۳، ۴، ۶، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر به همراه توزیع میدان بر سطح استاتور

۵۶.....

شکل ۳-۱۲: الکتروود صفحه‌ای.....

شکل ۳-۱۳: الکتروود روگوسکی.....

شکل ۳-۱۴: الکتروود بروس.....

شکل ۳-۱۷: نحوه توزیع میدان بر سطح استاتور نسبت به فواصل مختلف بین استاتور و روتور.....

شکل ۳-۱۸: فاصله بین پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده و GVM.....

شکل ۳-۱۹: نمونه آزمایشی مدار الکترونیک.....

شکل ۴-۱: الف) روتور و استاتور طراحی شده در نرم افزار التیوم ب) روتور و استاتور چاپ شده بر روی

PCB.....

شکل ۴-۲: چیدمان آزمایش نمونه اولیه GVM.....

شکل ۴-۳: الف) شمای بیرونی ب) بخش اصلی شتاب‌دهنده داینامیترون.....

شکل ۴-۴: الف) طرح نهایی GVM، ب و ج) نحوه قرار گیری GVM مقابل پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده

داینامیترون.....

فهرست نمودارها

نمودار ۱-۲: تاثیر رطوبت هوا بر ولتاژ شکست	۲۴
نمودار ۱-۳: تغییرات ظرفیت خازنی نسبت به زاویه چرخش روتور برای GVM شبیه سازی شده با استاتور	
۸ قطاعی	۴۸
نمودار ۱-۴: الف) تغییرات ظرفیت خازنی ب) تغییرات بار القایی بر حسب تعداد قطاع های استاتور	۷۱
نمودار ۲-۴: تغییرات دامنه جریان بر حسب تعداد پره های روتور	۷۲
نمودار ۳-۴: نحوه تغییرات میانگین جریان بر حسب تعداد پره های روتور	۷۳
نمودار ۴-۴: نحوه تغییرات میدان الکتریکی بر حسب تعداد پره های روتور	۷۴
نمودار ۵-۴: الف) نحوه تغییرات ظرفیت خازنی ب) نحوه تغییرات بار القایی به ازای قطر استاتور	۷۶
نمودار ۶-۴: نحوه تغییرات الف) دامنه جریان القایی، ب) میانگین جریان، ج) میدان الکتریکی بر حسب	
افزایش قطر استاتور	۷۸
نمودار ۷-۴: تغییرات میدان الکتریکی بر حسب ضخامت استاتور	۷۹
نمودار ۸-۴: الف) نحوه تغییرات ظرفیت خازنی ب) نحوه تغییرات بار القایی به ازای فاصله ی بین روتور و	
استاتور	۸۱
نمودار ۹-۴: الف) تغییرات دامنه جریان ب) تغییرات میانگین جریان بر حسب افزایش فاصله بین روتور	
و استاتور	۸۲

نمودار ۴-۱۰: تغییرات میدان الکتریکی روی سطح یک سنسور برحسب افزایش فاصله روتور و استاتور

۸۳.....

نمودار ۴-۱۱: تغییرات الف) ظرفیت خازنی بیشینه، ب) ظرفیت خازنی کمینه محاسبه شده توسط نرم افزار

CST، ج) اختلاف ظرفیت خازنی بر حسب فاصله حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM ۸۵

نمودار ۴-۱۲: تغییرات الف) بار القایی، ب) دامنه جریان، ج) میانگین جریان بر حسب فاصله پایانه ولتاژ

بالا و GVM ۸۷

نمودار ۴-۱۳: تغییرات ولتاژ خوانده شده توسط GVM نسبت به ولتاژ وارد شده به صفحه ۹۰

نمودار ۴-۱۴: تغییرات ظرفیت خازنی دو سنسور A و B در یک دوره تناوب ۹۴

نمودار ۴-۱۵: الف) مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، ب) بار القایی بیشینه و اختلاف

بار القایی، ج) دامنه جریان و د) میانگین جریان را برحسب فاصله روتور و استاتور ۹۶

نمودار ۴-۱۶: الف) مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، ب) بار القایی بیشینه و اختلاف

بار القایی، ج) دامنه جریان و د) میانگین جریان را برحسب فاصله GVM و پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده

..... ۹۸

فهرست جداول

جدول ۲-۲: مقادیر استاندارد S و D ۲۳

جدول ۲-۳: رابطه K و چگالی δ ۲۴

جدول ۲-۴: مقایسه مقادیر ولتاژ اندازه‌گیری شده و ولتاژ استاندارد	۲۶
جدول ۳-۱: مقایسه مقادیر مختلف ظرفیت‌خازنی نمونه واقعی و شبیه‌سازی شده.....	۴۵
جدول ۳-۲: مقادیر زاویه پیشینه و ضریب A بر حسب تعداد قطاع‌های استاتور.....	۴۹
جدول ۳-۳: خواص فیزیکی فلزات نقره، مس، طلا و آلومینیوم و فولاد st۱۳۷ و فولاد ضد زنگ	۶۳
جدول ۴-۱: اثر افزایش تعداد قطاع‌های استاتور بر مقدار ظرفیت‌خازنی و بارالقایی	۷۱
جدول ۴-۲: تغییرات دامنه جریان بر حسب تعداد پره‌های روتور	۷۲
جدول ۴-۳: مقدار I_{av} به ازای تعداد پره‌های روتور	۷۳
جدول ۴-۴: مقادیر اختلاف ظرفیت‌خازنی و اختلاف بارالقایی به ازای قطرهای مختلف استاتور.....	۷۵
جدول ۴-۵: مقادیر دامنه جریان القایی، میانگین جریان و میدان الکتریکی بر حسب افزایش قطر استاتور	۷۷
جدول ۴-۶: مقادیر مختلف میدان الکتریکی بر حسب ضخامت استاتور	۷۹
جدول ۴-۷: مقادیر اختلاف ظرفیت‌خازنی و اختلاف بارالقایی به ازای فواصل مختلف روتور و استاتور	۸۰
جدول ۴-۸: مقادیر مختلف دامنه جریان القایی و میانگین جریان بر حسب افزایش فاصله روتور و استاتور	۸۲
جدول ۴-۹: مقدارهای مختلف ظرفیت‌خازنی بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM	۸۴
جدول ۴-۱۰: مقادیر مختلف بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM	۸۶
جدول ۴-۱۱: اطلاعات مکانیکی GVM اولیه	۸۸

جدول ۴-۱۲: مشخصات مکانیکی GVM نهایی ۹۳

جدول ۴-۱۳: مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، بار القایی بیشینه و اختلاف بار

القایی، دامنه جریان و میانگین جریان را برحسب فاصله روتور و استاتور ۹۵

جدول ۴-۱۴: مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، بار القایی بیشینه و اختلاف بار

القایی، دامنه جریان و میانگین جریان را برحسب فاصله GVM و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده ۹۷

فصل اول

مروری بر انواع شتاب‌دهنده‌ها

۱-۱ مقدمه

مسابقه برای ساخت شتاب‌دهنده‌ها از سال ۱۹۱۱ با پراکندگی ذرات آلفا به ورقه آلومینیومی توسط رادرفورد^۱ آغاز شد. سپس در سال ۱۹۱۹ رادرفورد ساختار هسته هیدروژن را توسط ذرات آلفا مطالعه نمود، همچنین او اظهار امیدواری کرد که با داشتن ذرات پرانرژی‌تر آلفا می‌توان هسته‌های بیشتری را مورد بررسی قرار داد. با توجه به این که همواره مطالعه‌ی ساختار اتم‌ها و هسته‌ها آرزوی فیزیک‌دان‌ها بوده است، در قرن بیستم ساخت شتاب‌دهنده‌ها توسعه یافت.

اساس کار شتاب‌دهنده‌ها بر مبنای برهمکنش بار الکتریکی با میدان‌های الکترومغناطیسی استاتیک و دینامیکی می‌باشد. با درک بهتر این برهمکنش‌ها انواع مختلفی از شتاب‌دهنده‌ها ساخته شده‌اند. شتاب‌دهنده‌ها بر اساس ساختارهای متفاوت علاوه بر مطالعه روی ساختار اتم‌ها و هسته‌ها دارای کاربردهای مختلفی نیز می‌باشند، از کاربردهای مهم شتاب‌دهنده‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

شتاب‌دهنده‌ها در علم پزشکی (پرتودرمانی، پرتوتشخیصی، تولید رادیو داروها، استریل کردن تجهیزات پزشکی و مواد غذایی)، در صنعت (تولید نیرو و تولید سوخت راکتور) و همچنین در علوم زمین، شیمی و مواد، فیزیک ماده چگال و زیست‌شناسی اتمی و مولکولی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شتاب‌دهنده‌ها از نظر سازوکار و عملکرد دارای انواع مختلفی نظیر الکترواستاتیکی (شامل کوکرافت- والتون^۲، واندروگراف^۳، پلترون^۴، ELV^۵، داینامیترون^۶)، رادیو فرکانسی (RF) (شتاب‌دهنده‌های خطی^۷ و

¹ Rutherford

² Cockcroft-Walton

³ Van De Geraaff

⁴ Pelletron

⁵ Electron transformer rectifier accelerator

⁶ Dynamitron

⁷ Linear

دایره‌ای که شامل سیکلوترون^۸، سینکروترون^۹، رودوترون^{۱۰}، القایی (بتاترون^{۱۱}) و شتاب‌دهنده‌های نسل جدید لیزر پلاسمایی می‌باشند، در ادامه به توضیح مختصر درباره چگونگی عملکرد هریک از آن‌ها می‌پردازیم [۱،۲].

۲-۱ شتاب‌دهنده رادیوفرکانسی

شتاب‌دهنده‌های رادیوفرکانسی بر مبنای استفاده از میدان RF عمل می‌کنند، شامل شتاب‌دهنده‌های خطی و دایره‌ای می‌باشد. در ادامه به توضیح مختصری در مورد عملکرد آنها پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱ خطی

شتاب‌دهنده خطی RF برای اولین بار توسط آقای ویدروئه^{۱۲} سال ۱۹۲۷ طراحی و آزمایش شد. این شتاب‌دهنده قادر بود با استفاده از ولتاژ یک کیلو ولت RF نوسانگر یک مگاهرتزی، باریکه یون پتاسیم را تا انرژی ۵۰ کیلو الکترون‌ولت شتاب دهد. اجزاء شتاب‌دهنده شامل لوله‌های رانش^{۱۳}، سیستم انتقال ذره^{۱۴}، نوسانگر ولتاژ RF^{۱۵}، سیستم خلاء^{۱۶} و سیستم خنک‌کننده^{۱۷} می‌باشد. شکل (۱-۱) نمودار کلی شتاب‌دهنده خطی را نمایش می‌دهد.

⁸ Cyclotron

⁹ Synchrotron

¹⁰ Rhodotron

¹¹ Betatron

¹² Widerhoe

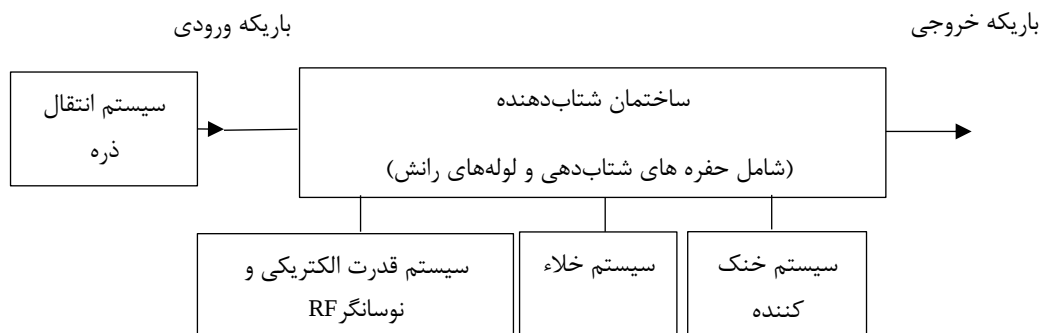
¹³ Drift tube

¹⁴ DC particle injector

¹⁵ RF power system

¹⁶ Vacuum system

¹⁷ Cooling system

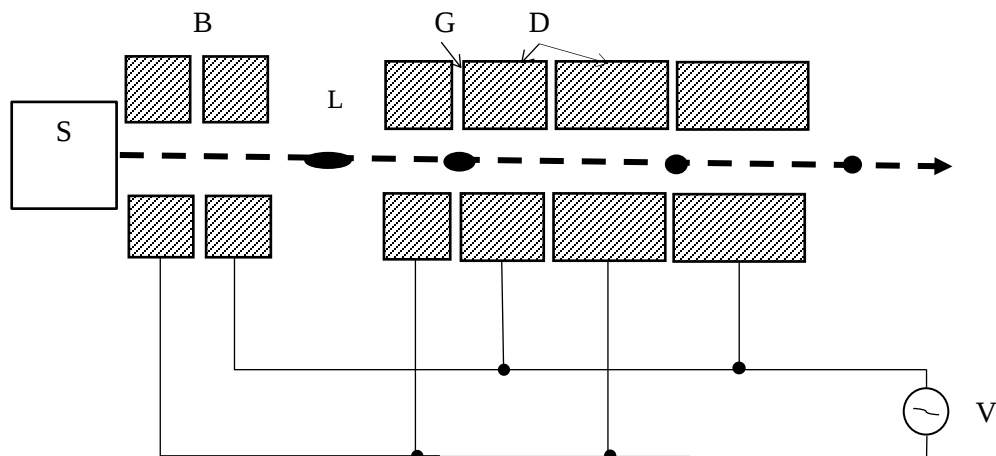


شکل ۱-۱: نمودار کلی شتاب‌دهنده خطی

شکل (۱-۲) نمایی از عملکرد شتاب‌دهنده خطی را نمایش می‌دهد. هر یک از لوله‌های رانش به منبع تغذیه ولتاژ RF متصل شده‌اند و قطب‌های آن بصورت متوالی تغییر می‌کند. به همین دلیل ذره در هر مرحله به سمت پتانسیل پایین‌تر شتاب می‌گیرد. ذرات داخل لوله‌های رانش تحت تاثیر میدان شتاب‌دهی قرار نمی‌گیرند. برای شتاب‌دادن ذرات در این نوع شتاب‌دهنده لازم است ذرات بصورت هم فاز یا به عبارتی بصورت دسته^{۱۸} وارد قسمت شتاب‌دهی شوند.

ذرات زمانی که در میدان شتاب‌دهی قرار می‌گیرند، دارای فازهای متفاوتی می‌باشد. برای مرحله هم فازی ذرات، یک نقطه مشخص از موج ولتاژ سینوسی را در نظر می‌گیرند. در این صورت ذرات سریع تحت تاثیر میدان شتاب‌دهی کوچکتر و ذرات کندتر تحت تاثیر میدان شتاب‌دهی بزرگتری قرار می‌گیرند. این عملکرد باعث متمرکز شدن فاز می‌شود. با توجه به این که در هر مرحله از شتاب‌دهی سرعت ذرات بیشتر می‌شود، طول لوله رانش نیز افزایش می‌یابد، تا هم‌فازی دقیق‌تر رخ دهد. بعد از برخورد اولین دسته ذرات به هدف دسته بعدی گسیل و شتاب‌گیری انجام می‌شود [۳].

¹⁸ bunch



شکل ۲-۱: نمایی از نحوه عملکرد شتاب‌دهنده خطی (چشمه ذرات، B مرحله اول هم‌فازی ذرات، G شکاف‌های بین لوله رانش که در آن نیروی الکتریکی برای شتاب‌دادن به ذرات اعمال می‌شود، L دسته ذرات هم‌فاز شده می‌باشند) [۳].

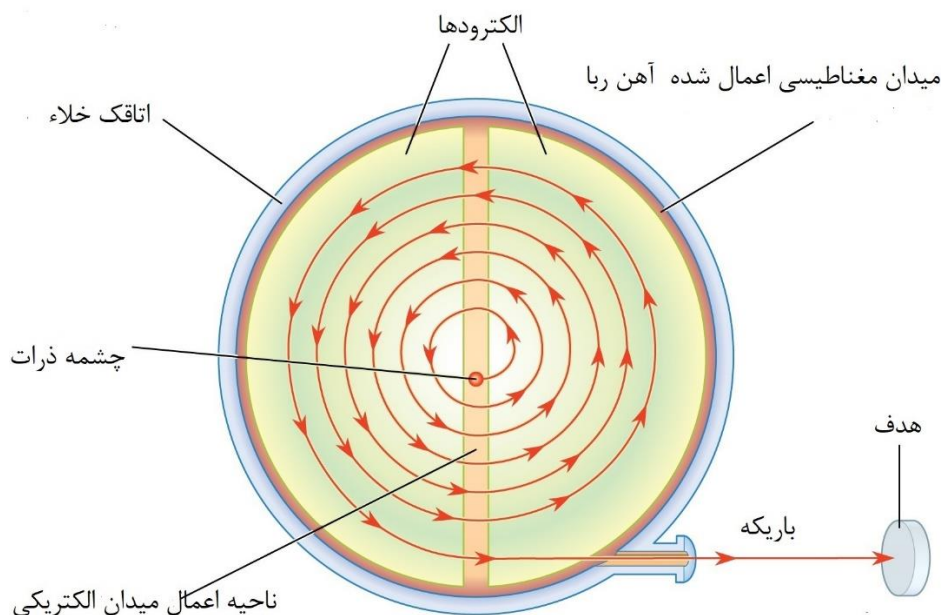
۲-۲-۱ سیکلوترون

سیکلوترون برای اولین بار توسط آقایان لارنس^{۱۹} و لیوینگستون^{۲۰} سال ۱۹۳۲ ساخته شد. در شکل (۳-۱) عملکرد سیکلوترون بطور واضح نمایش داده شده‌است. دراین شتاب‌دهنده از همان اصل شتاب مکرر ذرات توسط میدان الکتریکی نوسانی استفاده شده‌است. با این تفاوت که یک مسیر دورانی جایگزین مسیر خطی شده‌است، بدین صورت که دو الکتروود به شکل نیم‌دایره توخالی در یک محفظه خلاء به شیوه هم-صفحه^{۲۱} با لبه‌های قطر مجاور یکدیگر با هم متصل شده‌اند. برای ایجاد میدان مغناطیسی الکتروودها بین قطب‌های آهن‌ربا قرار می‌گیرند، همچنین برای ایجاد میدان الکتریکی نوسانی از یک نوسانگر الکتریکی فرکانس بالا بین الکتروودها استفاده می‌شود. به این ترتیب همواره یک اختلاف پتانسیل بین الکتروودها اعمال می‌شود و ذره در این ناحیه شتاب می‌گیرد.

^{۱۹} Lawrence

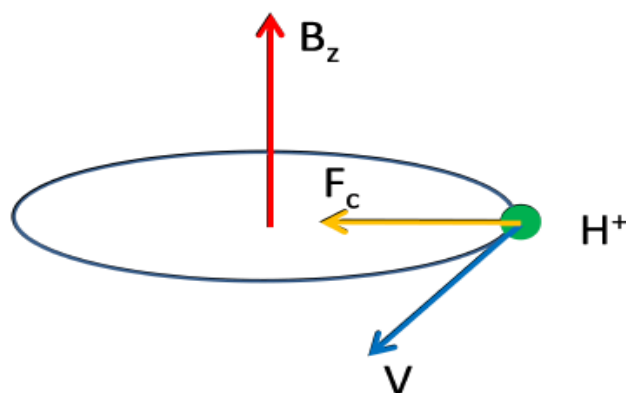
^{۲۰} Livingston

^{۲۱} Coplanar



شکل ۱-۳: نمایی از عملکرد سیکلوترون

چشمه معمولاً در لبه الکتروده قرار می‌گیرد، ذرات پس از تزریق شدن به داخل الکترودها به دلیل وجود میدان مغناطیسی همواره یک مسیر دایره‌ای را طی می‌کنند و در نهایت مجدداً بین الکترودها قرار می‌گیرند. اگر زمان صرف شده برای طی مسیر دایره‌ای توسط ذرات با نیم‌سیکل اول میدان نوسانگر الکتریکی برابر شود، پس از معکوس شدن میدان الکتریکی ذرات مجدداً شتاب می‌گیرند. هرچه سرعت ذرات بیشتر شود همواره مسیر طولانی‌تری را طی می‌کنند تا همزمانی دقیق‌تری رخ دهد. برای بدست آوردن سرعت زاویه‌ای ایجاد شده توسط سیکلوترون، یک ذره با بار q و جرم m که با سرعت ثابت v در یک مسیر دایره‌ای با شعاع r و میدان مغناطیسی B در حال حرکت است را در نظر بگیرید. با توجه به شکل (۱-۴) نیروی گریز از مرکز توسط نیروی لورنتس که روی ذره اعمال می‌شود، تامین می‌گردد.



شکل ۴-۱: نمایی از نیرو گریز از مرکز، H ذره، B میدان مغناطیسی، V سرعت ذره، F نیرو گریز از مرکز [۵].

بنابراین سرعت زاویه‌ای از روابط (۱-۱) و (۲-۱) بدست می‌آید.

$$\frac{mv^2}{r} = qVB \quad (1-1)$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad (2-1)$$

با توجه به رابطه (۲-۱) سرعت زاویه‌ای ذره ثابت و مستقل از شعاع حرکت ذره است، بنابراین می‌توان از

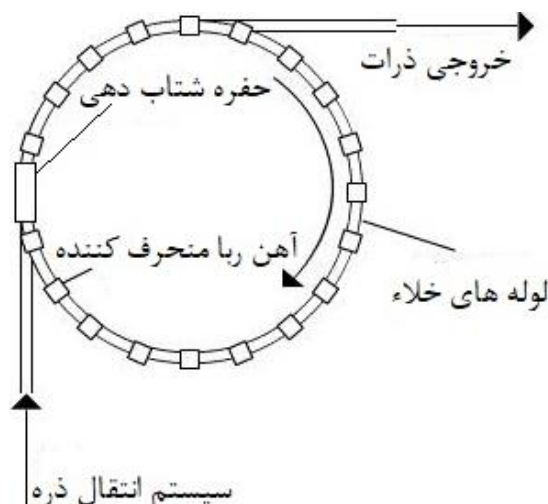
یک نوسانگر الکتریکی با فرکانس ثابت برای شتاب‌دادن به ذره استفاده نمود [۴،۵].

۳-۲-۱ سینکروترون

حداکثر انرژی که ذرات باردار در سیکلوترون‌ها دریافت می‌کنند حدود چند صد مگا الکترون‌ولت است، برای بدست‌آوردن انرژی‌های بالاتر نیاز به استفاده از آهن‌رباهای بزرگتر برای ایجاد میدان مغناطیسی قوی‌تر می‌باشد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند. یک راه‌حل برای رسیدن ذرات با انرژی‌های بالاتر طراحی شتاب‌دهنده‌هایی است، که شعاع چرخش و فاز ذرات باردار در آن‌ها ثابت می‌باشد. شتاب‌دهنده سینکروترون اولین بار در سال ۱۹۴۹ توسط آقای کرن^{۲۲} طراحی شد. شکل (۵-۱) نمایی از این شتاب‌دهنده

²² Crane

را نشان می‌دهد. در سینکروترون برخلاف سیکلوترون‌ها از آهن‌رباهای کوچکتر در مسیر چرخش ذرات باردار استفاده می‌شود. ذرات ابتدا از طریق سیستم انتقال ذره وارد حفره شتاب‌دهی می‌شوند، سپس توسط آهن‌رباها منحرف شده و در یک شعاع ثابت شتاب می‌گیرند. برای ذرات نسبیتی مانند الکترون ذرات ابتدا توسط شتاب‌دهنده خطی و یا میکروترون انرژی حدود چند ده مگا الکترون‌ولت دریافت می‌کنند، سپس وارد سینکروترون می‌شوند و به انرژی‌های بالا دست پیدا می‌کنند [۲،۶].

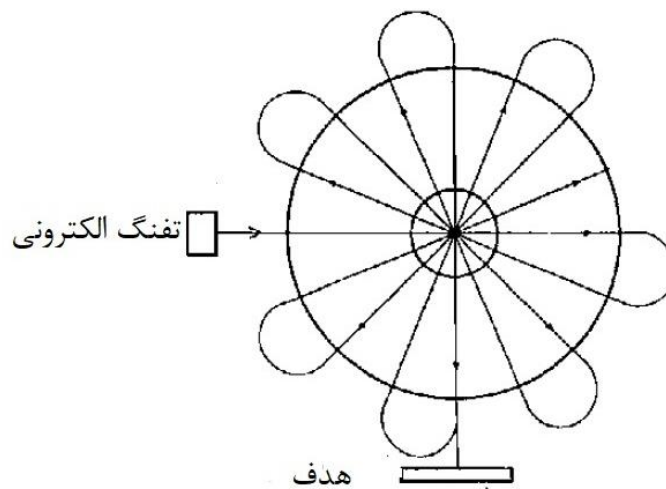


شکل ۱-۵: شتاب‌دهنده سینکروترون

۴-۲-۱ رودوترون

شتاب‌دهنده الکترونی رودوترون اولین بار توسط پاتیر^{۲۳} طراحی شد، این شتاب‌دهنده الکترونی دارای یک حفره هم محور شتاب‌دهی می‌باشد. با توجه به شکل (۱-۶) الکترون‌ها پس از وارد شدن به حفره شتاب‌دهی چندین بار از صفحه عبور می‌کنند، در هر بار عبور از حفره ذرات توسط آهن‌رباهای خم شده و دوباره به حفره شتاب‌دهی باز می‌گردند. مجدداً توسط میدان الکتریکی شعاعی شتاب می‌گیرند و این روند که تا رسیدن ذرات به انرژی بالاتر انجام می‌شود، ذرات همواره در مسیری مانند گل سرخ حرکت می‌کنند [۷،۸].

²³ Pottier



شکل ۱-۶: شتاب‌دهنده رودوترون [۷].

۳-۱ شتاب‌دهنده القایی

شتاب‌دهنده‌های القایی از نیروی الکتریکی ناشی از تغییر شار مغناطیسی با زمان برای شتاب‌دادن به ذرات استفاده می‌کنند. دارای انواعی نظیر شتاب‌دهنده خطی القایی^{۲۴} و سینکروترون القایی^{۲۵} و بتاترون می‌باشند. در ادامه برای آشنایی بیشتر فقط به بررسی شتاب‌دهنده بتاترون می‌پردازیم [۹].

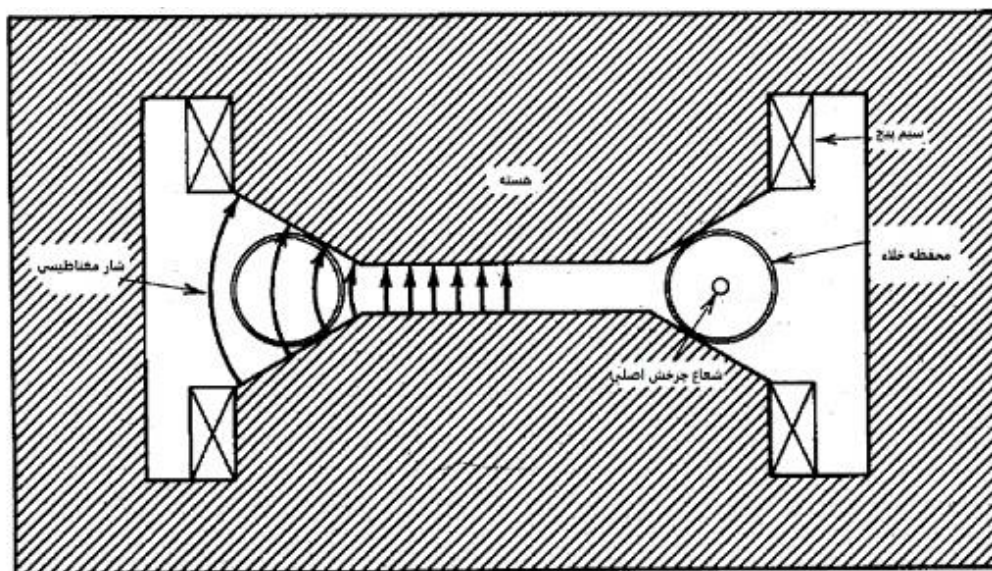
۱-۳-۱ بتاترون

بتاترون اولین شتاب‌دهنده دایره‌ای می‌باشد، که از نظر عملکرد با شتاب‌دهنده‌های دیگر متفاوت است. بتاترون فقط قادر به شتاب‌دادن الکترون‌ها می‌باشد. این شتاب‌دهنده الکترون‌ها را با استفاده از نیروی محرکه القایی ناشی از تغییرات شار مغناطیسی شتاب می‌دهد. در شکل (۷-۱) هندسه اصلی بتاترون نمایش داده شده‌است، محفظه‌های خلاء توسط هسته آهن‌ربای بزرگ احاطه شده‌اند. الکترون‌ها بعد از وارد شدن به

²⁴ Linear Induction Accelerator

²⁵ Induction Synchrotron

محفظه خلاء بدلیل وجود میدان مغناطیسی عمود بر مسیر حرکت آنها، در یک مسیر دایره ای می چرخند. با تغییرات شار مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم پیچ ها نسبت به زمان، نیرو محرکه القایی پیوسته به الکترون ها وارد شده، در نتیجه سبب شتاب الکترون ها می شود. هر چه شار افزایش یابد موجب افزایش شتاب الکترون ها می شود. افزایش میدان تا زمانی ادامه می یابد که شعاع حرکت ذره از محدوده میدان خارج نشود. بتاترون ها قادرند الکترون را تا محدوده انرژی ۲۰ مگا الکترون ولت شتاب دهند [۲، ۱۰].



شکل ۱-۷: شتاب دهنده بتاترون [۱۰].

۴-۱ شتاب دهنده الکترواستاتیکی

استفاده از شتاب دهنده های الکترواستاتیکی ساده ترین روش برای شتاب دادن ذرات می باشد. با قرار دادن ذرات در پتانسیل بالاتر می توان ذرات را شتاب داد، چرا که ذرات همواره به سوی پتانسیل کمتر حرکت می کنند، که منجر به کاهش انرژی پتانسیل و افزایش انرژی جنبشی می شود.

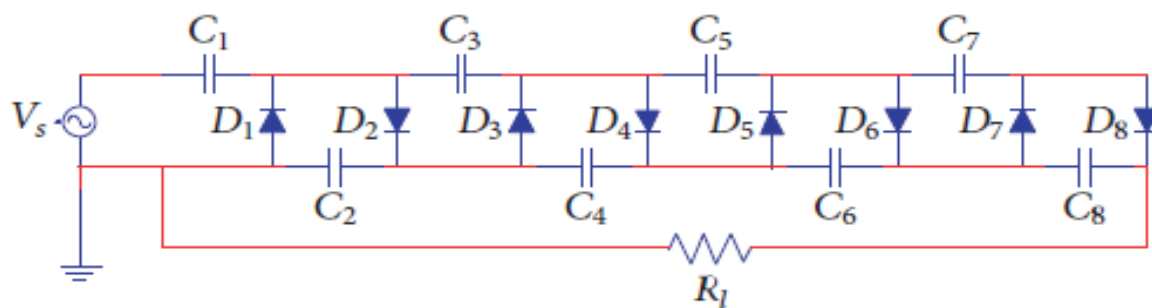
این نوع شتاب‌دهنده‌ها شامل دو قسمت اصلی مولد شتاب‌دهنده و لوله شتاب‌دهی می‌باشند، که لوله شتاب‌دهی دارای شیوه عملکرد مشخصی می‌باشد. در ادامه سازوکار هریک از مولدهای شتاب‌دهنده را بررسی می‌شود.

۱-۴-۱ کوکرافت-والتون

مولد کوکرافت - والتون یا چند برابر کننده ولتاژ، یک مدار الکتریکی است ولتاژ متناوب یا پالس‌های DC را به ولتاژ بالای DC تبدیل می‌کند. برای اولین بار در سال ۱۹۳۲ توسط آقایان کوکرافت و والتون ساخته شد. با توجه به مدار کوکرافت - والتون که در شکل (۱-۸) مشاهده می‌کنید، این شتاب‌دهنده متشکل از دیودها و خازن‌ها می‌باشد، که به صورت آبشاری به یکدیگر متصل شده‌اند. خازن‌ها با ظرفیت برابر در یک اتصال موازی با یک منبع تغذیه مشترک شارژ و سپس در حالت سری تخلیه می‌شوند. روش چند برابر کننده ولتاژ در این مدار به این گونه است که خازن C_1 در نیم سیکل منفی منبع تغذیه متناوب توسط D_1 یک شارژ شده و ولتاژی برابر V_{max} می‌گیرد و در نیم سیکل مثبت منبع از طریق D_2 خازن C_2 شارژ و ولتاژ خروجی آن بصورت $2V_{max}$ می‌شود، این روند تا آخرین مرحله از مدار ادامه می‌یابد. در نهایت ولتاژ خروجی با توجه به تعداد طبقات مولد (N) از رابطه (۱-۳) به دست می‌آید.

$$V_{out} = NV_{in} \quad (۱-۳)$$

با توجه به این که ولتاژ ورودی به مولد بصورت متناوب می‌باشد، دیودها مانع انتقال بار از روی صفحات می‌شوند. دیودها باید بگونه‌ای انتخاب شوند که کاملاً جریان را عبور دهند و همچنین خازن‌ها نیز باید ظرفیت خازنی بزرگی داشته باشند، تا توانایی ذخیره بار الکتریکی بیشتری داشته باشند [۱۱، ۱۲].



شکل ۱-۸: مولد کوکرافت - والتون [۱۲].

۱-۴-۲ وان دوگراف

وان دوگراف در دهه ۱۹۳۰ با استفاده از اصل الکتریسیته ساکن^{۲۶} موفق به ساخت یک مولدولتاژ شد. این مولد قادر است ولتاژ حدود ۵ مگا ولت تولید کند. مطابق شکل (۱-۹) ساختمان مولد وان دوگراف شامل یک پایانه کروی یا استوانه‌ای که روی پایه عایق قرار دارد، تسمه^{۲۷} متحرک (از جنس کتان خالص و یا ترکیبی از لاستیک است)، دو غلتک^{۲۸} فلزی و دو جاروبک^{۲۹} می‌باشد. تسمه در بین دو غلتک فلزی قرار گرفته‌است، غلتک پایینی به زمین مرتبط می‌باشد و موتور آن را می‌چرخاند و غلتک دوم در پایانه توسط تسمه به چرخش درمی‌آید. یک منبع تغذیه اختلاف پتانسیل حدود چند ده کیلو ولت را به جاروبک فلزی که در مجاورت و عرض تسمه قرار دارد از طریق قطب مثبت انتقال می‌دهد. قطب منفی منبع را به غلتک پایینی متصل می‌کنند. بدلیل اختلاف پتانسیل بالا به وسیله تخلیه الکتریکی بار از جاروبک به روی تسمه پاشیده می‌شود و سپس از طریق تسمه پایانه گسیل می‌شود. در پایانه میدان الکتریکی صفر و جاروبک بار را از تسمه گرفته و به سطح خارجی پایانه می‌دهد. جنس جاروبک‌ها معمولاً آلومینیوم می‌باشد. برای جلوگیری

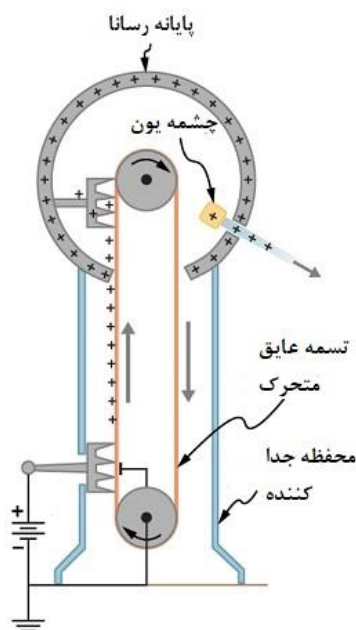
²⁶ static electricity

²⁷ Belt

²⁸ Pully

²⁹ Brush

از ایجاد جرقه^{۳۰} مولد را در محفظه گاز عایق پر فشار (مانند هگزا فلئورید گوگرد SF_6) در فشار ۱۰-۲۰ اتمسفر قرار می‌دهند [۱۳، ۱۴].



شکل ۱-۹: مولد وان دوگراف [۱۵].

۳-۴-۱ پلترون

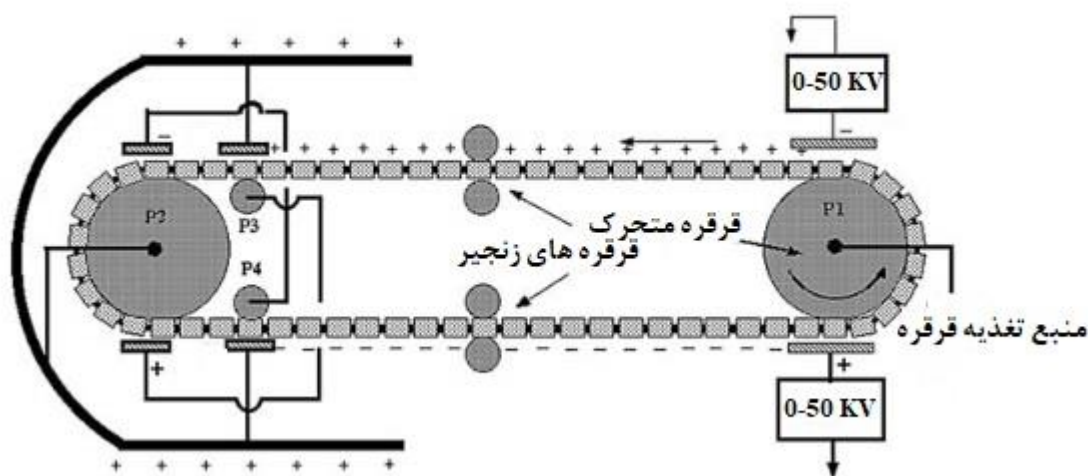
ساختمان مولد پلترون تا حدودی شبیه به وان دوگراف است، با این تفاوت که زنجیره گوی‌های فلزی جایگزین تسمه شده است. گوی‌های فلزی با سرعت بیشتری نسبت به تسمه حرکت می‌کنند و از طرفی سایش کمتری نسبت به تسمه دارند. اما استفاده از گوی‌های فلزی مشکلاتی نظیر ایجاد جرقه در هنگام چرخش در پایانه ولتاژ بالا و از دست دادن پتانسیل هستند. از این رو آقای هرب^{۳۲} (سال ۱۹۶۰) برای رفع این مشکلات، الکترودهای القاگر را در پایانه ولتاژ تعبیه کرد. شکل (۱-۱۰) نمایی از قرقره و سیستم

³⁰ Spark

³¹ Pellet

³² Herb

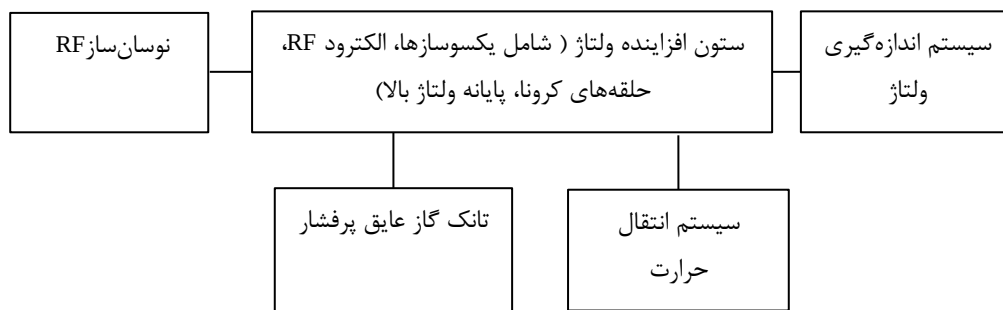
القای را نمایش می‌دهد. گوی‌های فلزی توسط عایق‌های نایلونی که با نوارهای ^{33}F فلزی (برای تماس الکتریکی گوی‌ها) پوشانده شده‌اند، متصل می‌شوند. بار مثبت توسط میدان الکتریکی منبع تغذیه‌ی اول به گوی‌ها القا می‌شود، سپس زنجیره بار را به پایانه ولتاژ انتقال می‌دهد. الکتروود القاگر ولتاژ هنگام عبور زنجیره مانع از افت ولتاژ و ایجاد جرقه بین گوی‌ها و قرقه می‌شود. بیشترین ولتاژ ایجاد شده توسط پلترون حدود ۳۰ مگا ولت می‌باشد [۱۶، ۱۷].



شکل ۱-۱۰: مولد پلترون [۱۸]

۴-۴-۱ داینامیترون

داینامیترون از اصل یکسوسازی و چند برابر کنندگی ولتاژ ورودی عمل می‌کند، این مولد شامل دو قسمت اصلی نوسازن ساز RF و ستون افزایشنده ولتاژ است، نمودار کلی این مولد در شکل (۱۲-۱) نمایش داده شده است.

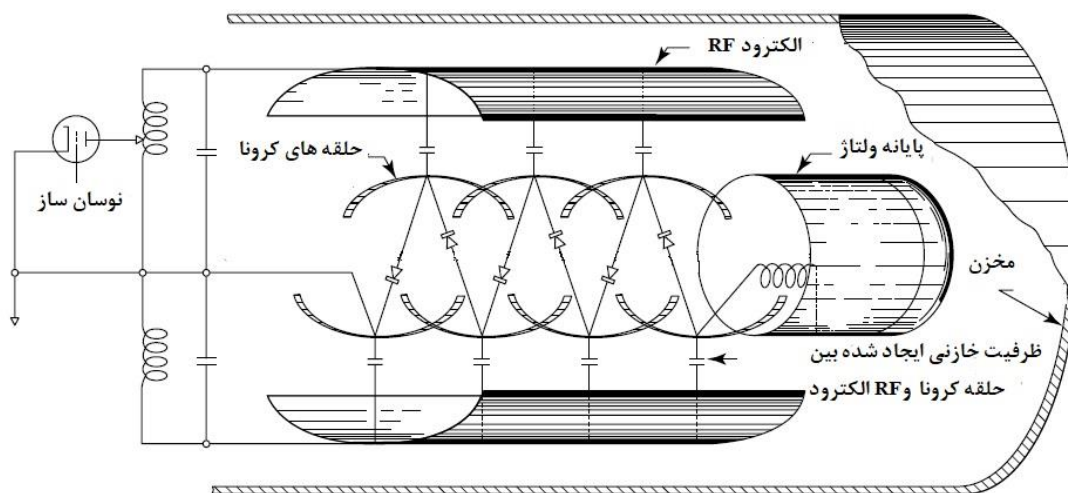


شکل ۱-۱۲: نمودار کلی مولد داینامیتر

نوسان ساز RF ورودی ستون افزایش ولتاژ را فراهم می کند، این نوسان ساز از برق شهر بصورت تک فاز یا سه فاز تغذیه می شود و ولتاژ خروجی متناوب با فرکانس ۲۰-۱۲۰ کیلوهرتز را تولید می کند. ستون افزایش ولتاژ شامل الکتروودهای RF به عنوان خازن مدار رزونانس LC^{۳۴} عمل می کند. طبقات یکسوساز بصورت موازی توسط الکتروودهای RF از نوسان ساز تغذیه می شوند، سپس بصورت سری قرار گرفته و ولتاژ متناوب ورودی را یکسو سازی کرده و به چند برابر دامنه ولتاژ تبدیل می کند. طبقات یکسوسازها توسط حلقه های- کرونا برای جلوگیری از ایجاد جرقه و احاطه شده اند. همواره گاز پر فشار SF₆ به داخل محفظه نگهدارنده مولد تزریق می شود تا از ایجاد پدیده کرونا^{۳۵} و جرقه جلوگیری کند، شکل (۱-۱۳) نحوه قرارگیری اجزاء ستون افزایش ولتاژ را نشان می دهد.

^{۳۳} مدار تشدید کننده

^{۳۵} تخلیه کرونا پدیده ای است که از تخلیه جزئی در هوا (یا هر سیال دیگر) در اثر یونیزاسیون محیطی ایجاد می شود



شکل ۱-۱۳: مولد داینامیترون، خازن‌های نمایش داده شده در شکل بیانگر ظرفیت خازنی ایجاد شده‌اند هیچ خازنی در مولد قرار نگرفته است [۱۴].

ولتاژ خروجی داینامیترون از طریق رابطه (۴-۱) محاسبه می‌شود.

$$V = N \frac{V_0}{K} \quad (۴-۱)$$

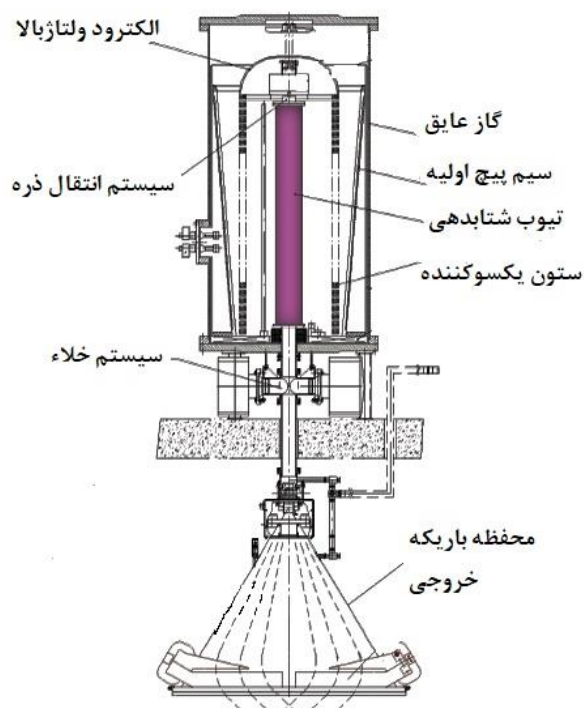
ضریب جفت شدگی با K ، تعداد طبقات یکسوساز با N ، ولتاژ ورودی به طبقات V_0 معرفی می‌شوند. علاوه بر ظرفیت خازنی ایجاد شده بین الکتروود RF و حلقه کرونا یک ظرفیت خازنی دیگر بین حلقه‌های کرونا ایجاد می‌شود، رابطه بین این دو ظرفیت با ضریب جفت شدگی با استفاده از رابطه (۵-۱) مشخص شده‌است.

$$K = 1 + 4 \frac{C_{ac}}{C_{se}} \quad (۵-۱)$$

ظرفیت خازنی بین الکتروود RF و حلقه کرونا با C_{se} ، ظرفیت خازنی بین حلقه‌های کرونا با C_{ac} مشخص شده‌اند. حداکثر ولتاژ ایجاد شده توسط داینامیترون ۴ مگاولت بوده‌است، از رابطه (۴-۱) می‌توان نتیجه گرفت، برای دستیابی به ولتاژ بیشتر باید ضریب جفت شدگی را کاهش داد. بدین منظور باید حلقه کرونا و الکتروودهای RF را حداقل امکان به یکدیگر نزدیک کرد تا C_{se} افزایش و C_{ac} کاهش یابد [۱۴، ۱۸] [۱۹، ۲۰].

۱-۴-۵ شتاب دهنده ELV

شتاب دهنده ELV سال ۱۹۷۱ توسط کشور روسیه ساخته شد. شکل (۱-۱۴) نمایی از ELV را نمایش می‌دهد، این مولد شامل ترانسفورماتور با سیم‌پیچ ثانویه و ستون‌های یکسوکننده می‌باشد. سیم‌پیچ اولیه یک شار مغناطیسی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز تولید می‌کند، که منجر به القای ولتاژ ۲۰ کیلوولتی در سیم‌پیچ ثانویه می‌شود. ولتاژ القا شده توسط یکسوکننده‌ها که بصورت سری به یکدیگر متصل‌اند، اصلاح و دو برابر می‌شود. سپس این ولتاژ اصلاح شده را به الکتروود ولتاژ بالا انتقال می‌دهند. در شتاب‌دهنده ELV چشمه یا سیستم انتقال ذره داخل الکتروود ولتاژ بالا قرار گرفته‌است و لوله شتاب‌دهی بین ستون‌های یکسوکننده قرار دارد، در انتهای لوله شتاب‌دهنده یک لنز مغناطیسی قرار دارد که موجب تسهیل و جلوگیری از اتلاف در انتقال پرتو از سیستم خلا و سیستم استخراج می‌شود. همانند دیگر شتاب‌دهنده‌ها این سیستم نیز داخل گاز عایق پرفشار SF_6 قرار می‌گیرد [۲۱، ۲۲، ۲۳].



شکل ۱-۱۴: شتاب‌دهنده ELV [۲۲].

۵-۱ جمع بندی

در این فصل ابتدا به معرفی شتاب‌دهنده و کاربردهای آن پرداخته شد، سپس انواع شتاب‌دهنده‌ها و ساختار آن‌ها با تمرکز بر شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک اندازه‌گیری ولتاژ تولید شده توسط مولد شتاب‌دهنده (به دلیل جریان تولیدی بسیار کم توسط این شتاب‌دهنده) اهمیت بسیاری دارد که در این راستا در فصل آینده ابتدا روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ بالا تشریح شده، سپس روشی برای اندازه‌گیری ولتاژ شتاب‌دهنده الکترواستاتیک موردنظر در این پایان‌نامه معرفی می‌شود.

فصل دوم

روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ بالا

۲-۱ مقدمه

کنترل و اندازه‌گیری ولتاژ علاوه بر شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و صنعتی برای ایمنی پرسنل و تجهیزات لازم است. از این رو روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ولتاژ وجود دارد که در ادامه برخی از این روش‌ها نظیر روش گاف جرقه^{۳۶}، ولت‌متر الکترواستاتیک^{۳۷}، مقسم ولتاژ^{۳۸} و GVM^{۳۹} مورد بررسی قرار می‌گیرند [۲۴].

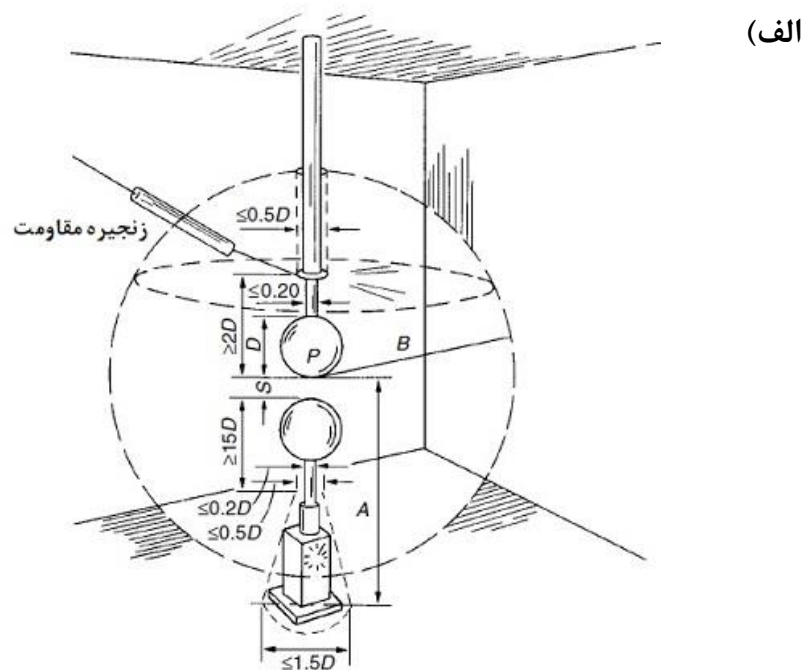
۲-۲ گاف جرقه

روش گاف جرقه یکی از قابل اعتمادترین روش اندازه‌گیری دامنه ولتاژ^{۴۰} می‌باشد. در این روش از اصل شکست ولتاژ^{۴۱} در گازها استفاده می‌شود. شکست ولتاژ مستقل از شکل موج است، از این رو گاف جرقه برای اندازه‌گیری انواع ولتاژها مناسب می‌باشد. از روش‌های مختلفی برای ایجاد گاف نظیر ایجاد فاصله بین دو کره، دو الکترود مسطح و یا دو میله استفاده می‌کنند. که هر کدام از روش‌ها به ترتیب به عنوان گاف کروی^{۴۲}، گاف الکترود^{۴۳}، گاف میله‌ای^{۴۴} شناخته می‌شوند. معمولاً از گاف کروی برای اندازه‌گیری دامنه ولتاژ مستقیم و متناوب استفاده می‌کنند که در ادامه به بررسی روش گاف کروی پرداخته می‌شود [۲۴].

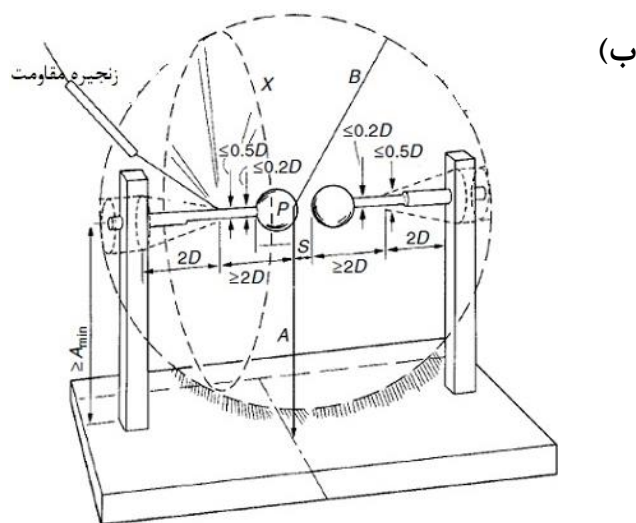
³⁶ Spark gap
³⁷ Electrostatic Voltmeter
³⁸ Voltage Divider
³⁹ Generating Voltmeter
⁴⁰ Peak Voltage
⁴¹ Voltage Break
⁴² Sphere gap
⁴³ Electrode gap
⁴⁴ Rod gap

۲-۲-۱ گاف کروی

آقای چاب^{۴۵} برای اولین بار در سال ۱۹۱۳ از روش گاف کروی برای اندازه‌گیری ولتاژ بالا استفاده نمود. ساختمان این ابزار اندازه‌گیری شامل دو کره فلزی معمولاً از جنس برنج، آلومینیوم و یا مس با قطرهای یکسان می‌باشد، کره‌ها مطابق شکل (۱-۲) به دو صورت عمودی و افقی با فاصله (S) در مجاور یکدیگر قرار داده شده‌اند.



⁴⁵ Chubb



شکل ۱-۲: الف) گاف کروی عمودی ب) کروی افقی و مقادیر مناسب اندازه پایه‌ها A فاصله نقطه جرقه زنی P تا صفحه زمین، B فاصله ایمن، D قطر کره‌ها می‌باشند [۲۵].

برای محدود کردن جریان وارد شده به کره‌ها، سیستم اندازه‌گیری از طریق مقاومت به منبع تغذیه متصل می‌شود. مقادیر مقاومت‌ها برای ولتاژ مستقیم بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلو اهم متغیر است. همچنین برای جلوگیری از ایجاد کرونا سطح کره‌ها کاملاً صاف و عاری از هر گونه گرد و غبار می‌باشد. مقادیر مجاز برای پارامترهای A و B در جدول (۱-۲) آورده شده است.

جدول ۱-۲: مقادیر مجاز برای پارامترهای A, B [۲۵].

بیشترین مقدار B	کمترین مقدار A	بیشترین مقدار A	قطر کره (cm)
۱۴S	۹D	۷D	۶/۲۵
۱۲S	۸D	۶D	۱۰-۱۵
۱۰S	۷D	۵D	۲۵
۸S	۶D	۴D	۵۰
۸S	۶D	۴D	۷۵
۷S	۵D	۳/۵D	۱۰۰
۶S	۴D	۳D	۱۵۰
۶S	۴D	۳D	۲۰۰

قطر و فاصله بین کره‌ها با توجه به محدوده ولتاژ شکست مشخص می‌شود، بعضی از مقادیر استاندارد قطر و فواصل بین کره‌ها در هوا در جدول (۲-۲) آورده شده‌است.

جدول ۲-۲: مقادیر استاندارد S و D [۲۵].

فاصله بین کره‌ها (mm)	ولتاژ قله (kV)		
	قطر کره (cm)		
	۶/۲۵	۱۲/۵	۲۵/۰
۵	۱۷/۲	۱۶/۸	
۱۰	۳۱/۹	۳۱/۷	
۱۵	۴۵/۵	۴۵/۵	
۲۰	۸۵/۵	۵۹/۰	
۲۵	۶۹/۵	۷۲/۵	۷۲/۵
۳۰	۷۹/۵	۸۵/۰	۸۶/۰
۳۵	۸۵/۵	۹۷/۰	۹۹/۰

همانگونه که در بالا ذکر شد، اعمال ولتاژ زیاد به یکی از کره‌ها منجر به شکست ولتاژ در فاصله بین دو کره خواهد شد. بنابراین با مشخص بودن مقادیر استاندارد قطر و فواصل بین کره‌ها در هوا (جدول (۲-۲)) ولتاژ مجهول از طریق رابطه (۱-۲) محاسبه می‌شود.

$$V = KV_0 \quad (1-2)$$

V_0 ولتاژ شکست هوا در شرایط استاندارد (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷۶۰ میلی‌متر جیوه) اندازه‌گیری شده‌است. K تابعی از چگالی هوا δ می‌باشد، چگالی هوا δ از رابطه (۲-۲) محاسبه می‌شود.

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{(273+t_0)}{(273+t)} \quad (2-2)$$

ρ_0 فشار استاندارد ۷۶۰ میلی‌متر جیوه، t_0 دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتی‌گراد، همچنین ρ و t فشار و

دمای محیط می‌باشند، در جدول (۳-۲) رابطه K و چگالی هوا δ نمایش داده شده است.

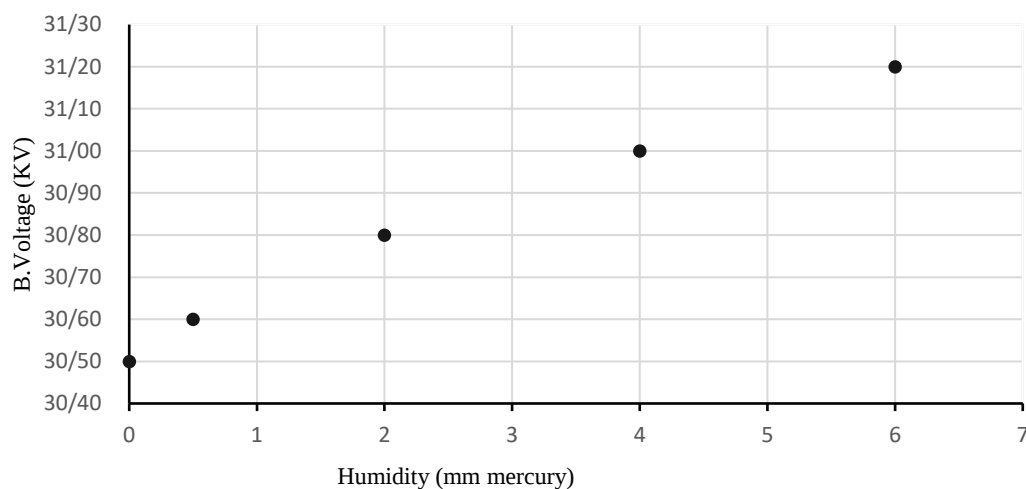
جدول ۳-۲: رابطه K و چگالی δ [۲۴].

δ	۰/۷۰	۰/۷۵	۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۹۰	۰/۹۵	۱	۱/۰۵	۱/۱۰
k	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۹۵	۱	۱/۰۵	۱/۰۹

افزایش رطوبت هوا باعث افزایش ولتاژ شکست می‌شود نمودار (۱-۲) تاثیر رطوبت هوا بر ولتاژ شکست

برای گاف کرووی با کره‌های به قطر ۲۵ سانتی‌متر که در فاصله ۱ سانتی‌متر مجاور یکدیگر قرار داده شده‌اند،

نمایش می‌دهد.



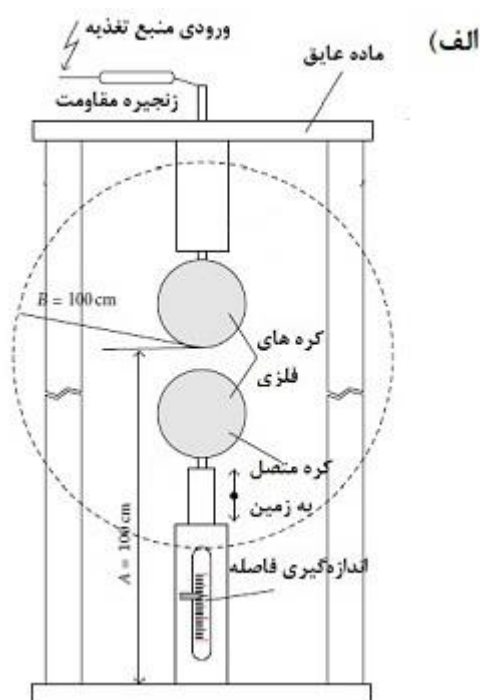
نمودار ۱-۲: تاثیر رطوبت هوا بر ولتاژ شکست [۲۴].

در نهایت با توجه به بررسی‌های انجام شده برای آشنایی بیشتر یک کاربرد از گاف کرووی معرفی می‌شود

[۲۴، ۲۵].

۲-۱-۱ اندازه‌گیری ولتاژ قله با روش گاف کروی

آقای آنگرو^{۴۶} در سال ۲۰۱۴ با استفاده از گاف کروی ولتاژ قله یک منبع تغذیه ۰-۱۸۰ کیلوولتی را اندازه‌گیری نمود. در شکل (۲-۳-الف) ترتیب قرارگیری کره‌ها و شکل (۲-۳-ب) ترتیب آزمایش نمایش داده شده‌است. در این آزمایش از گاف کروی عمودی استفاده شده و سیستم اندازه‌گیری توسط زنجیره مقاومت $100\text{K}\Omega$ به منبع تغذیه متصل شده‌است. فاصله بین کره‌ها (S) متغیر می‌باشد و توسط کره پایین که به یک موتور DC متصل است، تنظیم می‌شود. قطر کره‌ها (D) برابر ۱۵ cm، فاصله ایمن $B > 12S$ و حداکثر فاصله‌ی نقطه جرقه‌زنی تا سطح زمین برابر $AD < A < 6D$ می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها در فشار ۷۶۰/۵۶ mmHg، دمای 19°C و رطوبت $8/13\text{ gr/m}^3$ انجام شده‌است.





شکل ۲-۳ الف) ترتیب قرارگیری کره‌ها ب) ترتیب آزمایش [۲۶].

مقادیر ولتاژ اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاه و ولتاژ اندازه‌گیری شده در شرایط استاندارد (دمای 20°C و فشار 760 mmHg) در جدول (۲-۴) آورده شده است [۲۶].

جدول ۲-۴: مقایسه مقادیر ولتاژ اندازه‌گیری شده و ولتاژ استاندارد [۲۶].

ولتاژ استاندارد (KV)	ولتاژ اندازه‌گیری شده در آزمایش (KV)	فاصله (cm)
۳۱/۱۹	۳۱/۰۲	۱
۴۵/۶۴	۴۶/۵۳	۱/۵
۵۹/۳۸	۵۹/۲۲	۲
۷۳/۱۲	۷۱/۰۶	۲/۵
۸۶/۶	۸۳/۲۴	۳
۹۸/۷۰	۹۴/۹۷	۳/۵
۱۱۱/۳۳	۱۰۶/۱۰	۴
۱۲۳/۳۷	۱۱۹/۶۲	۴/۵
۱۳۴/۴۰	۱۳۱/۹۷	۵
۱۴۵/۴۴	۱۴۰/۷۹	۵/۵
۱۵۵/۴۷	۱۴۸/۸۹	۶

۳-۲ ولت‌متر الکترواستاتیک

سال ۱۸۸۰ آقای کلونین^{۴۷} طرحی از یک ولت‌متر بر مبنای قانون کولن^{۴۸} پیشنهاد کرد. این ولت‌متر دارای دو الکتروود موازی که با فاصله کمی از هم قرار گرفته‌اند، می‌باشد. یکی از الکتروودها متحرک می‌باشد و حرکت آن توسط فنر یا وزنه‌های مشخص کنترل می‌شود. با اعمال ولتاژ به الکتروود ثابت، در فضای بین دو الکتروود میدان الکتریکی ایجاد شده، سپس نیروی حاصل از میدان قادر به حرکت دادن یکی از الکتروودها می‌باشد. با استفاده از اندازه‌گیری نیروی ایجاد شده ناشی از میدان الکتریکی، ولتاژ مجهول از رابطه (۳-۲) محاسبه می‌شود.

$$|F| = \frac{\epsilon A E^2}{2} = \frac{\epsilon A V^2}{S^2} \quad (3-2)$$

S فاصله بین دو الکتروود، ϵ ضریب گذردهی^{۴۹} محیط می‌باشد. شکل (۴-۲) نمایی از ولت‌متر الکترواستاتیک را نمایش می‌دهد، این ولت‌متر شامل دو الکتروود ثابت (F) و متحرک (M) می‌باشد، که با فاصله کمی از یکدیگر قرار داده شده‌اند. الکتروود متحرک در بین دو صفحه محافظ^{۵۰} قرار داده شده و میزان نیروی وارد بر آن ناشی از ولتاژ اعمال شده به الکتروود ثابت توسط وزنه‌ها داخل کلاهک^{۵۱} (D) اندازه‌گیری می‌شود. برای متعادل سازی میدان الکتریکی بین الکتروودها از حلقه‌های محافظ^{۵۲} (H) استفاده می‌شود. ولت‌متر از طریق مقسم‌خازنی^{۵۳} به منبع ولتاژ متصل شده‌است.

⁴⁷ Kelvin

⁴⁸ Coulomb's law

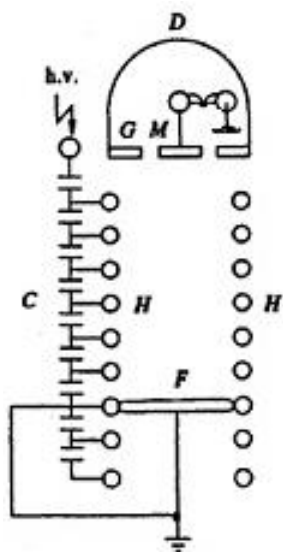
⁴⁹ permittivity

⁵⁰ Guard plate

⁵¹ Dome

⁵² Guard rings

⁵³ Capacitance divider



شکل ۲-۴: نمایی از ولت‌متر الکترواستاتیک [۲۴].

برای دستیابی به اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر می‌توان قطر الکترودها را افزایش و همچنین فاصله بین آن‌ها را کاهش داد. در کاهش فاصله باید محدودیت استرس^{۵۴} ناشی از ولتاژ را در نظر گرفت، که مقدار آن برای هوا 5 KV/m است. با استفاده از گازهای دیگر نظیر دی‌اکسید کربن، نیتروژن و یا SF_6 در فشار حدود 15 atm مقدار استرس ناشی از ولتاژ تا 100 KV/m افزایش می‌یابد. بدین صورت بیشینه ولتاژ قابل اندازه‌گیری توسط ولت‌متر الکترواستاتیک برابر 200 KV می‌باشد. در ادامه به بررسی اولین ولت‌متر ساخته شده توسط آقای کلون پرداخته می‌شود [۲۴، ۲۷].

۲-۳-۱ ولت‌متر الکترواستاتیک کلون

ولت‌متر ساخته شده توسط آقای کلون در شکل (۲-۵) نشان داده شده است، این ولت‌متر دارای دو صفحه فلزی است، که یکی از صفحات ثابت و دیگری متحرک می‌باشد. اساس عملکرد ولت‌متر الکترواستاتیک همانگونه که قبلاً مطرح شد بر مبنای استفاده از نیروی بین دو صفحه باردار می‌باشد. با اعمال ولتاژ به صفحه

⁵⁴ stress

ثابت، صفحه متحرک توسط صفحه ثابت جذب می‌شود. حرکت صفحه متحرک توسط نشانگر^{۵۵} و وزنه‌های کوچک که در پایین صفحه قرار داده شده‌اند کنترل می‌شود. با اندازه‌گیری مقدار نیروی اعمال شده به صفحه متحرک ولتاژ مجهول مشخص خواهد شد [۲۸].



شکل ۲-۵: ولتمتر ساخته شده توسط کلونین [۲۸].

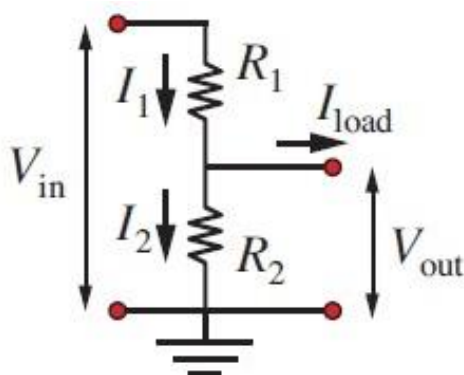
۲-۴ مقسم ولتاژ

مقسم ولتاژ یک روش ساده برای اندازه‌گیری ولتاژ می‌باشد. مقسم ولتاژ با استفاده از قانون‌های ولتاژ کیرشهف^{۵۶} و اهم^{۵۷} ولتاژهای بالا را تبدیل به ولتاژ قابل اندازه‌گیری می‌کند. شکل (۲-۶) مدار کلی مقسم ولتاژ را نمایش می‌دهد.

⁵⁵ Pointer

⁵⁶ Kirchoff's voltage law

⁵⁷ Ohm's law

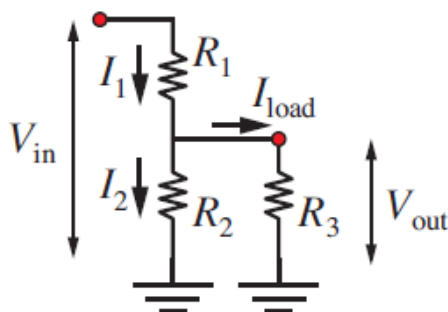


شکل ۶-۲: مدار کلی مقسم ولتاژ [۲۹].

مطابق شکل (۶-۲) این ابزار اندازه‌گیری شامل دو مقاومت کربنی می‌باشد که به صورت سری قرار گرفته‌اند. I_1 و I_2 جریان‌های عبوری از مقاومت‌های R_1 و R_2 ، جریان خروجی از مقسم ولتاژ می‌باشد. رابطه (۴-۲) ولتاژ خروجی را با فرض ناچیز بودن I_{load} ، بصورت تابعی از مقاومت‌ها و ولتاژ خروجی نمایش می‌دهد.

$$V_{in} = V_{out} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (۴-۲)$$

زمانی که مقدار I_{load} قابل صرف‌نظر کردن نباشد، یک مقاومت R_3 در خروجی قرار می‌گیرد، مدار کلی در شکل (۷-۲) نشان داده شده‌است. ولتاژ خروجی بصورت رابطه (۵-۲) محاسبه می‌شود.



شکل ۷-۲: مدار کلی مقسم ولتاژ با فرض ناچیز نبودن مقدار I_{load} [۲۹].

$$V_{in} = V_{out} \frac{R_1 \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) + R_2}{R_2} \quad (5-2)$$

مقسم ولتاژ برای اندازه‌گیری هر دو نوع ولتاژ AC و DC استفاده می‌شود [۲۹]. در ادامه مقسم ولتاژ استفاده شده برای اندازه‌گیری ولتاژ یک ترانسفورماتور^{۵۸} بررسی می‌شود.

۲-۴-۱ اندازه‌گیری ولتاژ یک ترانسفورماتور توسط مقسم ولتاژ

مقسم ولتاژ برای اندازه‌گیری ولتاژ ترانسفورماتور توسط آقای روزا^{۵۹} و همکارانش در سال ۲۰۰۳ طراحی شد. حداکثر ولتاژ ترانسفورماتور برابر ۷۰ KV می‌باشد، مقاومت‌های کربنی قادر به تحمل ولتاژ ۲ KV می‌باشند، به همین دلیل مقاومت‌های فلزی ($2\text{ M}\Omega$) با روکش پلاستیک فنولیک^{۶۰} جایگزین آن‌ها شده‌اند. قدرت تحمل این مقاومت‌ها در هوا ۵ KV و در روغن به ۲۰ KV نیز می‌رسد. برای ایجاد کرونا در اطراف مقاومت‌ها، کلیه اجزا توسط لاک گلیپتالیک^{۶۱} صیقل داده شده‌اند. مقسم ولتاژ داخل لوله به جنس PVC تا ۱ mm که با روغن ترانسفورماتور^{۶۲} (۲۰۰ G) پر شده‌است، قرار می‌گیرد. هوای داخل لوله به مدت ۲ ساعت تخلیه می‌شود و سپس مجموعه به گونه‌ای بسته می‌شود که هوا به داخل آن نفوذ نکند. مقسم ولتاژ طراحی شده در شکل (۲-۸) نمایش داده شده‌است [۳۰].



شکل ۲-۸: مقسم ولتاژ طراحی شده بروس، جنس درپوش‌ها پلاستیک آکلیریک^{۶۳} می‌باشد [۳۰].

⁵⁸ transformer

⁵⁹ Rosa

⁶⁰ Phenolic Plastic

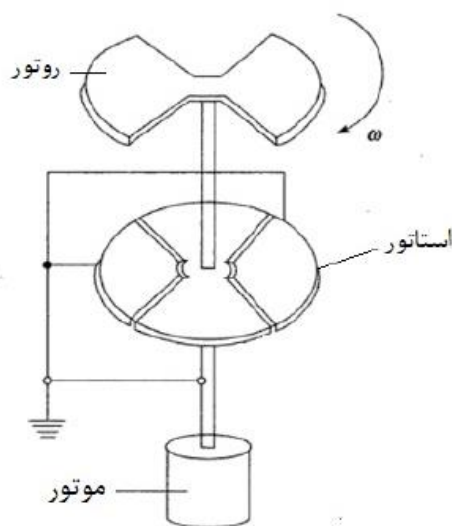
⁶¹ Varnish GliptaliC

⁶² transformer oil G 200

⁶³ Acrylic Plastic

GVM ۵-۲

در تمامی روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ بالا ذکر شده، سیستم اندازه‌گیری به منبع ولتاژ متصل می‌شوند، به همین دلیل همواره مقداری از جریان اتلاف می‌شود. در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک جریان تولید شده بسیار اندک است، بنابراین نمی‌توان برای اندازه‌گیری ولتاژ مقداری از جریان را هدر داد. از این رو برای اندازه‌گیری ولتاژ شتاب‌دهنده الکترواستاتیک از روشی استفاده می‌شود که سیستم اندازه‌گیری اتصال مستقیم با پایانه^{۶۴} ولتاژ بالا شتاب‌دهنده نداشته باشد. این روش بر مبنای تغییرات ظرفیت خازنی نسبت به زمان عمل می‌کند و بعنوان Generating Voltmeter شناخته می‌شود. مطابق شکل (۲-۹) این ابزار اندازه‌گیری شامل دو صفحه فلزی با هندسه پروانه‌ای می‌باشد، یکی از این صفحات ثابت (استاتور)^{۶۵} و صفحه دیگر توسط موتور بین استاتور و پایانه ولتاژ بالا دوران می‌کند و روتور^{۶۶} نام دارد.



شکل ۲-۹: نمایی از اجزاء GVM [۳۱].

^{۶۴} Dome

^{۶۵} Stator

^{۶۶} Rotor

همواره بین پایانه ولتاژ بالا و استاتور ظرفیت خازنی تشکیل می‌شود. با چرخش روتور بین استاتور و پایانه ولتاژ بالا ظرفیت خازنی و همچنین بار ذخیره شده روی استاتور با زمان تغییر می‌کند. بار ذخیره شده روی صفحات خازن از رابطه (۶-۲) محاسبه می‌شود.

$$Q(t) = C(t)V \quad (۶-۲)$$

با تغییرات بار نسبت به زمان یک جریان مطابق با رابطه (۷-۲) ایجاد می‌شود.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = \frac{dC(t)}{dt} V + \frac{dV}{dt} C(t) \quad (۷-۲)$$

چنانچه در حالت عملکرد پایدار شتاب‌دهنده ولتاژ ایجاد شده روی پایانه ثابت باشد، تغییرات ولتاژ نسبت به زمان صفر خواهد بود، بنابراین رابطه (۷-۲) به صورت رابطه (۸-۲) نوشته می‌شود.

$$I = \frac{dQ(t)}{dt} = V \frac{dC(t)}{dt} \quad (۸-۲)$$

اگر ظرفیت خازنی بصورت رابطه (۹-۲) تغییر کند، جریان از طریق رابطه (۱۰-۲) محاسبه می‌شود.

$$C(t) = C_0 + A \sin \omega t \quad (۹-۲)$$

$$I(t) = V \frac{dC}{dt} = V \omega A \cos \omega t \quad (\omega = \omega_n) \quad (۱۰-۲)$$

ω سرعت چرخش روتور و n تعداد پره‌های روتور می‌باشد، ضریب A با توجه به شرایط مرزی مشخص می‌شود. در فصل آینده در مورد شرایط مرزی و یافتن ضریب A صحبت خواهد شد. با اندازه‌گیری دامنه جریان ایجاد شده توسط تغییرات بار نسبت به زمان و مشخص بودن ω و ضریب A ، مقدار ولتاژ مجهول از رابطه (۱۱-۲) قابل محاسبه است [۲۴، ۳۱].

$$V = \frac{I_m}{\omega A} \quad (۱۱-۲)$$

در این روش به دلیل ثابت بودن فاصله GVM با پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده تاثیر فاصله و میدان الکتریکی بصورت واضح بیان نشده است. اما در ابزاری با هندسه مشابه مانند GVM اثر میدان الکتریکی بصورت واضح در اندازه‌گیری ولتاژ مشهود است که تحت عنوان Electric Field Mill شناخته می‌شود، چگونگی عملکرد آن در ادامه بررسی می‌شود.

۲-۵-۱ Electric Field Mill

در این ابزار مشابه با Generating Voltmeter از روتور و استاتور با هندسه پروانه‌ای استفاده شده است. با قرار گرفتن EFM در محیط طبق قانون گاوس بار (q) روی سطح استاتور القا می‌شود، بار القا شده از رابطه (۲-۱۲) محاسبه می‌شود.

$$q = \oint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (2-12)$$

حال اگر استاتور با سطح (A) و پتانسیل صفر در معرض میدان الکتریکی ثابت و یکنواخت (E) قرار بگیرد آنگاه رابطه (۲-۱۲) به شکل رابطه (۲-۱۳) نوشته می‌شود.

$$q = \epsilon EA \quad (2-13)$$

با چرخش روتور سطح موثر استاتور (A) و همچنین بار القایی (q) نسبت به زمان تغییر می‌کند، روابط (۲-۱۴) و (۲-۱۵) نحوه تغییرات سطح استاتور و بار القایی را نشان می‌دهد.

$$A = \frac{A_m}{\pi} \sin \omega t \quad (\omega = \omega_n) \quad (2-14)$$

و

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \epsilon E \frac{dA(t)}{dt} \quad (2-15)$$

رابطه (۱۶-۲) دامنه جریان را نشان می‌دهد، با اندازه‌گیری دامنه جریان (I_m) ناشی از تغییرات بار القایی و قرار دادن مقاومت در مسیر جریان ولتاژ مجهول از رابطه (۱۷-۲) محاسبه خواهد شد.

$$I_m = \varepsilon E A_m \frac{\omega}{\pi} \quad (۱۶-۲)$$

$$V = \frac{\omega}{\pi} \varepsilon A_m E R \quad (۱۷-۲)$$

باتوجه به رابطه (۱۷-۲) مشاهده می‌شود که ولتاژ بصورت مستقیم به سرعت چرخش روتور وابسته است، این وابستگی موجب ایجاد خطا در اندازه‌گیری می‌شود. برای کاهش وابستگی ولتاژ به سرعت چرخش روتور یک مدار RC جایگزین مقاومت می‌شود. بنابراین ولتاژ خروجی بصورت رابطه (۱۸-۲) قابل محاسبه است.

$$V = \frac{\omega}{\pi} \varepsilon A_m E R \cdot \tanh \frac{\pi}{2\omega RC} \quad (۱۸-۲)$$

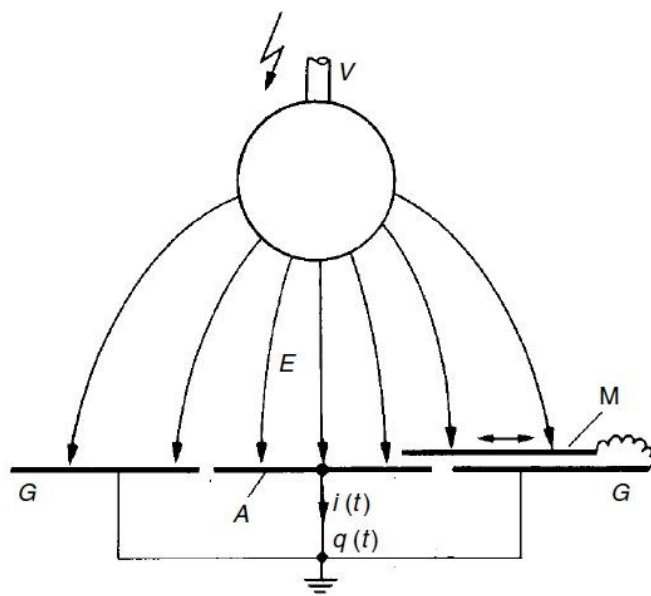
با انتخاب خازن و مقاومت مناسب مقدار ωRC به حدی افزایش می‌یابد که وابستگی ولتاژ به سرعت به حداقل می‌رسد، ولتاژ نهایی از رابطه (۱۹-۲) محاسبه خواهد شد [۳۲، ۳۳، ۳۴].

$$V_{RC} = \frac{\varepsilon E A_m}{2C} \quad (۱۹-۲)$$

از آنجایی که هدف این پایان‌نامه اندازه‌گیری ولتاژ شتابدهنده الکتروستاتیک بر مبنای روش GVM می‌باشد، بنابراین ابتدا مروری بر GVM‌های ساخته شده می‌شود و در نهایت برای آشنایی بیشتر با عملکرد EFM یک نمونه از کاربرد آن معرفی خواهد شد.

۲-۵-۲ مروری بر کارهای دیگران

اولین GVM توسط آقای ویلسون^{۶۷} در سال ۱۹۲۰ طراحی شد، مطابق شکل (۲-۱۰) در این GVM برای ایجاد خازن متغیر از یک صفحه متحرک (M) که بصورت افقی ارتعاش می‌نمود، استفاده شد. استاتور یا صفحه ثابت (A) بین دو صفحه محافظ (G) قرار داده شده‌است. با ارتعاش صفحه M بصورت افقی ظرفیت-خازنی ایجاد شده بین پایانه ولتاژ و صفحه A، همچنین بار ذخیره شده روی صفحه A با زمان تغییر می‌کند. با مشخص بودن تابع تغییرات ظرفیت‌خازنی با زمان و فرض ثابت بودن ولتاژ مطابق با رابطه (۲-۸)، جریان ایجاد شده و سپس ولتاژ مجهول توسط GVM محاسبه خواهد شد [۲۵].



شکل ۲-۱۰: GVM طراحی شده با روتور مرتعش [۲۵].

در سال ۱۹۳۲ آقای کرک پاتریس^{۶۸} از GVM با صفحات دوار برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل V بین دو کره فلزی A و B استفاده نمود، شکل (۲-۱۱) GVM طراحی شده توسط آقای پاتریس را نمایش می‌دهد.

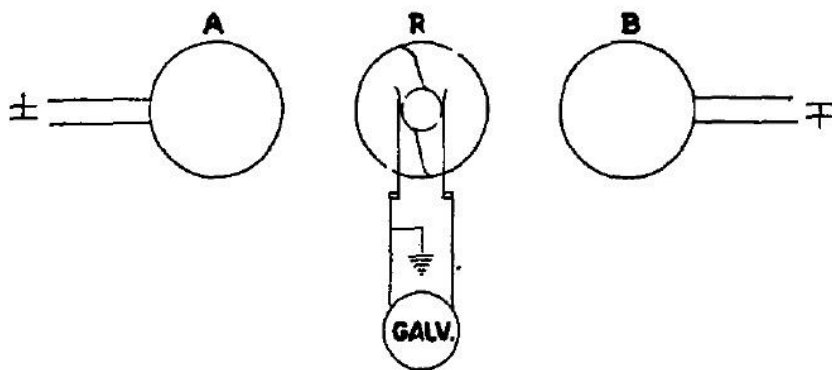
⁶⁷ Wilson

⁶⁸ Kirkpatrick

شکل (۱۱-۲) روتور متشکل از یک صفحه فلزی استوانه‌ای شکل است که به صورت طولی به دو قسمت تقسیم شده و روی یک دیسک عایق قرار داده شده است. GVM بین دو کره تعبیه شده و همواره بین یک نیم استوانه با کره مجاور آن ظرفیت‌خازنی ایجاد می‌شود، با چرخش دیسک توسط موتور با سرعت ω ، ظرفیت‌خازنی متغیر با زمان ایجاد خواهد شد و طبق رابطه (۷-۲) بار ذخیره شده نیز با زمان تغییر می‌کند. جریان ناشی از تغییرات بار نسبت به زمان در این نوع GVM از رابطه (۱۲-۲) محاسبه می‌شود.

$$I = 2CV\omega \quad (۲۰-۲)$$

جریان ایجادشده توسط گالوانومتر اندازه‌گیری شده و با مشخص بودن ظرفیت‌خازنی C و سرعت موتور ω ولتاژ مجهول محاسبه خواهد شد [۳۲].



شکل ۱۱-۲: GVM با روتور استوانه‌ای [۳۵].

طراحی GVM با استاتور و روتور پروانه‌ای از سال ۱۹۴۰ توسط آقای ترامپ^{۶۹} و همکاران با استفاده از روتور ۴ پره آغاز شد، سپس آقایان پولگا^{۷۰}، دحپانی^{۷۱}، شیمایکین^{۷۲} و راجتا^{۷۳} به ترتیب در سال‌های ۱۹۶۹،

⁶⁹ Trump

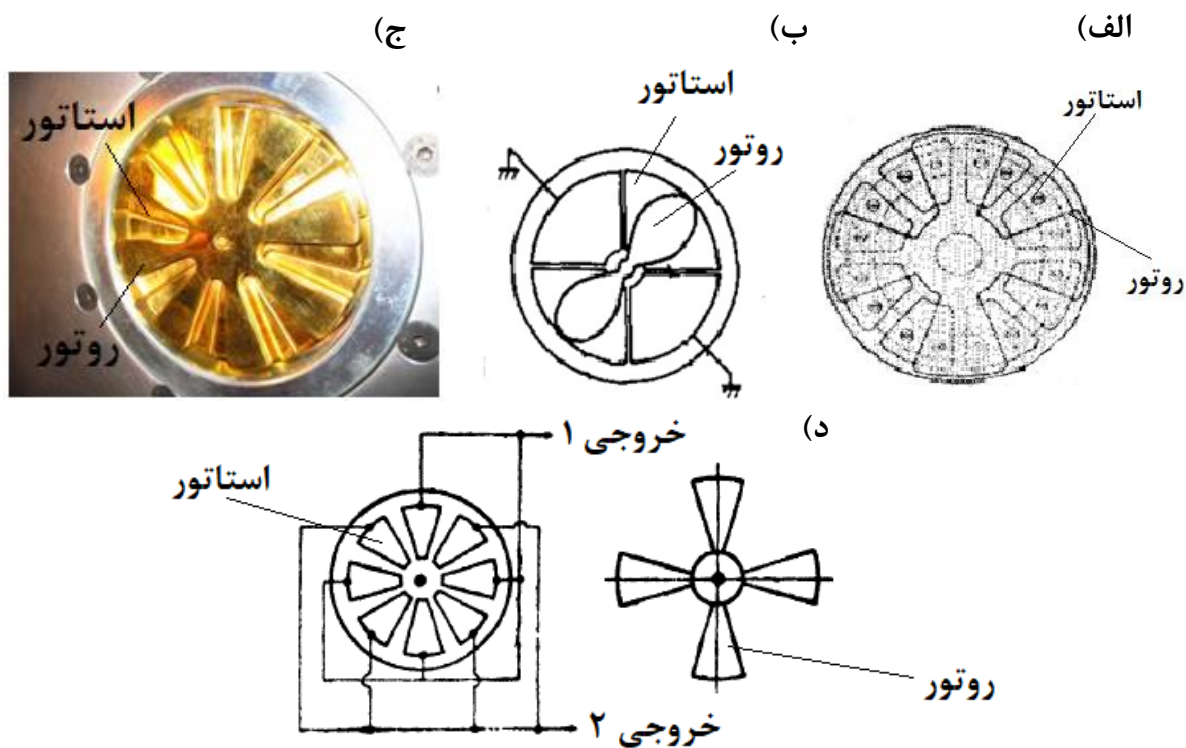
⁷⁰ Polga

⁷¹ Dhandapani

⁷² Shemyakin

⁷³ Rajta

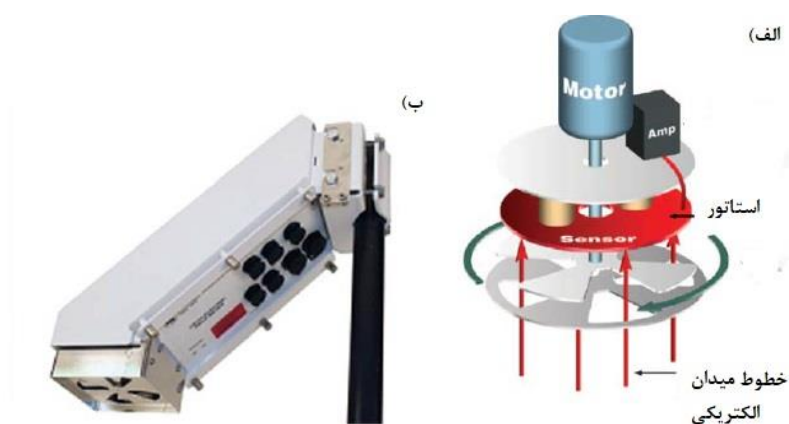
۱۹۹۰، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸ از GVM با روتورهای ۲ و ۸ پره‌ای استفاده نمودند. GVM های طراحی شده در شکل (۱۲-۲) نمایش داده شده‌است. مطابق شکل (۱۲-۲) با چرخش روتور بین استاتور و پایانه ولتاژ ظرفیت خازنی متغیر با زمان ایجاد می‌شود. همانگونه که پیش از این توضیح داده‌شد، با مشخص بودن تغییرات ظرفیت خازنی و استفاده از روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) ولتاژ مجهول قابل دستیابی است [۳۶-۴۰].



شکل ۱۲-۲: الف) GVM طراحی شده ترامپ با روتور ۴ پره [۳۶]، ب) GVM طراحی شده پولگا با روتور ۲ پره [۳۷]، ج) نمونه ای از GVM ساخته شده شیمایکین با روتور ۸ پره [۳۸]، د) GVM طراحی شده دحپانی با روتور ۴ پره [۳۹].

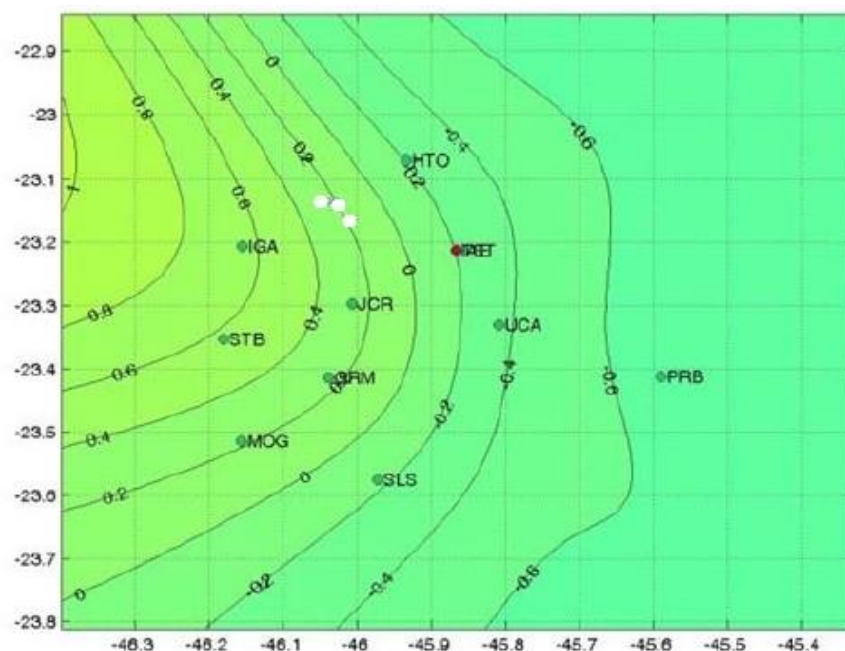
۲-۵-۳ استفاده از حسگر میدان الکتریکی در برزیل

در سال ۲۰۱۴ تیم آقای مجینا^{۷۴} در برزیل از دستگاه EFM مدل CS110 برای شناسایی مناطقی که در آن‌ها صاعقه رخ می‌داد، استفاده نمودند. ۱۱ سنسور EFM برای شناسایی مناطق استفاده شده بود به نحوی که این سنسورها از طریق اتصال با شبکه اینترنتی محلی با یکدیگر ارتباط داشتند. شکل (۲-۱۵) طرحواره و نمونه واقعی ساخته شده EFM را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۵: الف) طرحواره EFM ب) نمونه ساخته شده از EFM [۴۱].

بر طبق نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها توسط EFM نقاطی که در آن صاعقه‌های بیشتری رخ می‌دهد، در شکل (۲-۱۶) آورده شده‌است. مکان‌هایی که در آن صاعقه رخ داده، با نقاط سفید مشخص شده‌است [۴۱، ۴۲].



شکل ۲-۱۶: نقاط مشخص شده توسط EFM که در آن‌ها صاعقه رخ می‌دهد [۴۲].

۲-۶ جمع بندی

در این فصل ابتدا به معرفی روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ بالا پرداخته شد و سپس یک روش خاص به نام Generating Voltmeter برای اندازه‌گیری ولتاژ شتاب‌دهنده الکترواستاتیک انتخاب شد، مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر متصل نبودن GVM به پایانه ولتاژ شتاب‌دهنده و عدم اتلاف جریان در زمان اندازه‌گیری می‌باشد. در فصل آینده به نحوه طراحی این ابزار و بررسی اثر پارامترهایی نظیر تعداد پره‌های روتور، ضخامت استاتور، جنس روتور و استاتور، فاصله بین استاتور با روتور و پایانه ولتاژ بالا و الکترونیک سیستم پرداخته خواهد شد.

فصل سوم

بررسی جزئی و شبیه‌سازی اجزاء

GVM

۳-۱ مقدمه

در فصل دوم روش‌های ولتاژ بالا بررسی و روش Generating Voltmeter برای اندازه‌گیری ولتاژ شتاب‌دهنده الکترواستاتیک انتخاب شد. هدف پایان‌نامه طراحی، شبیه‌سازی و ساخت ابزار GVM می‌باشد. برای این منظور ابتدا با استفاده از نرم افزار CST Studio Suite اثر پارامترهایی نظیر تعداد، قطر و ضخامت پره‌های استاتور و روتور، فاصله استاتور با روتور و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده و جنس استاتور و روتور بر عملکرد GVM مورد بررسی قرار گرفته‌است. سپس نوع موتور و الکترونیک سیستم بررسی شده‌است. این فصل به طراحی و شبیه‌سازی مراحل فوق می‌پردازد.

۳-۲ معرفی نرم‌افزار CST Studio Suite

CST نرم‌افزار پرکاربرد شبیه‌سازی در حوزه شتاب‌دهنده‌ها و برق می‌باشد، اولین نسخه آن در سال ۱۹۹۲ توسط آقای ویلاند^{۷۵} در کشور آلمان ساخته شد. CST بر گرفته Computer Simulation Technology، یک نرم‌افزار قدرتمند در شبیه‌سازی میدان‌های الکترومغناطیسی در ساختارهای سه بعدی است و شامل هفت ماژول است که توانایی شبیه‌سازی در زمینه‌های مختلفی نظیر الکترواستاتیک، مگنتواستاتیک، فرکانس پایین و فرکانس بالا را دارد. روش محاسباتی استفاده شده در نرم افزار CST Studio Suit 2015، روش آلمان محدود^{۷۶} می‌باشد، این روش در مسائلی نظیر تحلیل سازه‌ها، انتقال حرارت، دینامیک سیالات، انتقال جرم و پتانسیل الکترومغناطیسی کاربرد دارد.

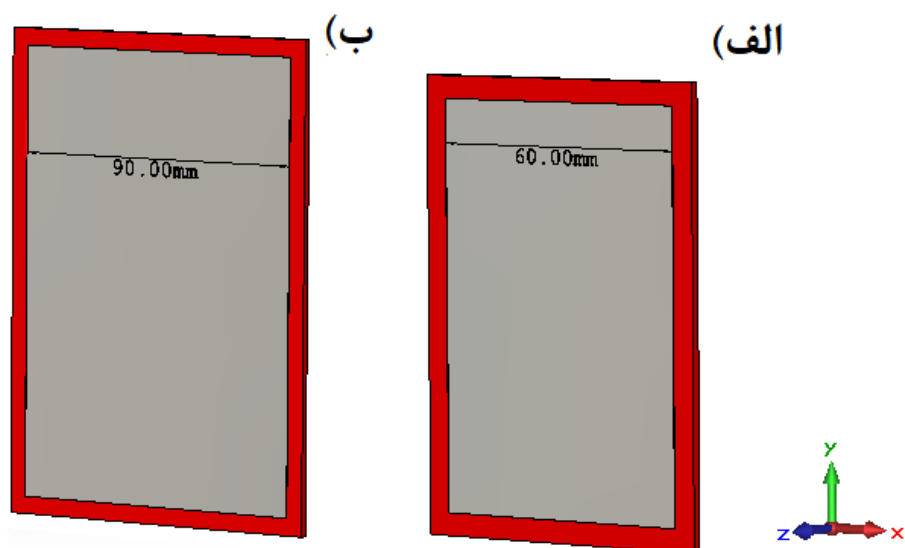
⁷⁵ Wieland

⁷⁶ finite element method

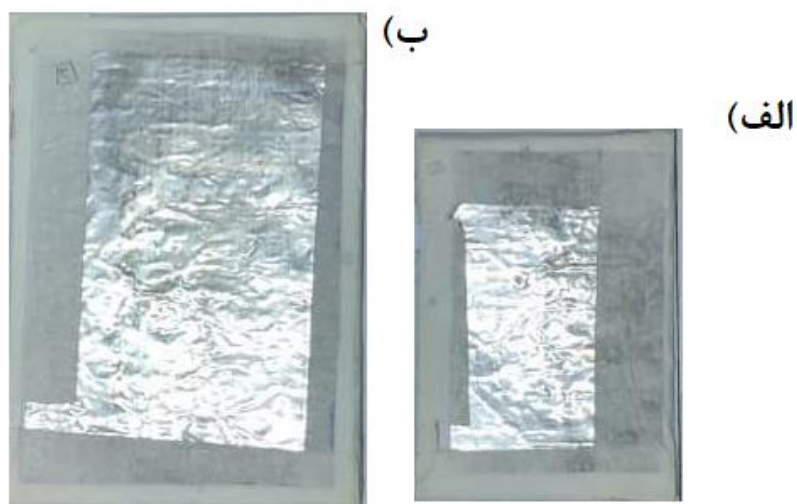
فرآیند کلی حل مسئله در روش المان محدود دارای دو مرحله است. در ابتدا، محدوده مسئله به مجموعه‌ای از محدوده‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود، که هر یک از این محدوده‌های کوچک بیانگر یک دستگاه معادلات مختص به هر یک از المان‌ها هستند. در ادامه، تمام این دستگاه‌ها به منظور انجام محاسبات نهایی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. این دستگاه معادلات کلی را می‌توان با استفاده از مقادیر اولیه مسئله اصلی حل کرد و نتایج عددی مربوط به آن را به دست آورد. به طور مثال برای محاسبه مساحت سطح ابتدا سطح مورد نظر را مش بندی می‌کند و بعد از طریق انتگرال روی سطح مساحت را محاسبه می‌کند [۴۳، ۴۴].

۳-۲ طرح مسئله و صحت سنجی نرم افزار

همانطور که در توضیحات بخش ۲-۵ آمده است، اساس عملکرد سیستم GVM بر تغییرات ظرفیت خازنی است. برای طراحی خازن مناسب از نرم‌افزار CST بهره می‌بریم. پیش از انجام مراحل طراحی لازم است از شبیه‌سازی‌ها صحت‌سنجی شوند. از این‌رو برای بررسی صحت انجام عملیات در نرم‌افزار CST چند خازن صفحه‌ای در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و همچنین نمونه واقعی آن‌ها نیز ساخته شده است. مقدار ظرفیت خازن‌های ساخته توسط LCR Meter اندازه‌گیری شد. خازن‌های طراحی و ساخته شده از جنس آلومینیوم و دی‌الکتریک بین صفحات خازن کاغذ (با ضریب دی‌الکتریک $2/31$) می‌باشد. در این صحت سنجی اثر افزایش مساحت صفحات خازن و همچنین افزایش فاصله بین صفحات خازن بر مقدار ظرفیت خازنی بررسی شده است، شکل (۱-۳) خازن‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CST و شکل (۲-۳) نمونه واقعی ساخته شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱: خازن‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CST (الف) خازن اولیه (ب) افزایش مساحت صفحات خازن.



شکل ۳-۲: خازن‌های ساخته شده (الف) خازن اولیه (ب) افزایش مساحت صفحات خازن.

جدول (۳-۱) مقادیر ظرفیت‌خازنی اندازه‌گیری شده توسط RLC Meter و نرم‌افزار را برای هریک از خازن‌ها نمایش می‌دهد.

جدول ۳-۱: مقایسه مقادیر ظرفیت خازنی نمونه واقعی و شبیه سازی شده

درصد اختلاف (%)	ظرفیت خازنی نمونه ساخته شده (pF)	ظرفیت خازنی شبیه- سازی (pF)	فاصله بین صفحات (cm)	مساحت صفحات خازن $(cm)^2$
۴	۶۳/۰	۵۹/۳	$\cong 0.2$	۵۴/۰
۰/۶	۱۲۴/۰	۱۲۳/۳	$\cong 0.2$	۱۱۷/۰

با توجه به جدول (۳-۱) و مقایسه مقادیر ظرفیت خازنی بدست آمده از طریق شبیه سازی و اندازه گیری ظرفیت نمونه واقعی مشاهده شد که با افزایش مساحت صفحات خازن، ظرفیت خازنی افزایش یافت و میزان اختلاف نتایج در چنین هندسه ساده ای کمتر از ۵ درصد بدست آمده است. همانگونه که مشاهده می شود میزان اختلاف در مقادیر بزرگتر ظرفیت خازنی کمتر خواهد بود. بنابراین نرم افزار CST از صحت قابل قبولی در انجام عملیات برخوردار است.

۳-۳ بررسی GVM موجود در شتاب دهنده وان دوگراف

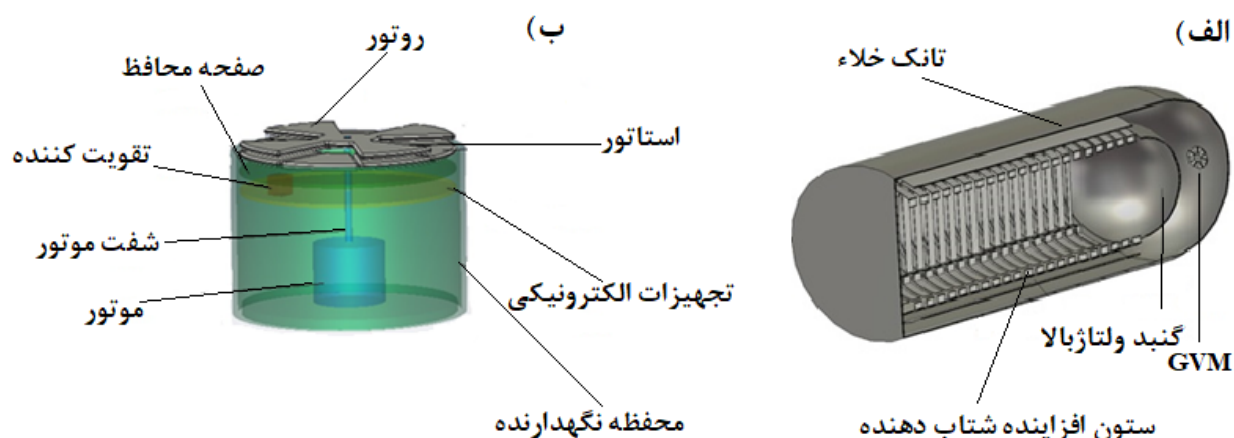
در ادامه یک GVM واقعی که در شتاب دهنده وان دوگراف تهران تعبیه شده و مورد استفاده قرار می گیرد، به عنوان مبنا برای طراحی ها قرار گرفته است. GVM مورد نظر یک نمونه ساخته شده در آمریکا بوده که از همان ابتدا در حال اندازه گیری انرژی شتاب دهنده وان دوگراف تهران است. در ابتدا شبیه سازی ها با ابعاد کاملاً منطبق با GVM مذکور انجام گرفت. پس از آن با تغییر پارامترهای مختلف (و ثابت گرفتن سایر پارامترها در هر تغییر) بررسی های تکمیلی برای درک صحیح نحوه عملکرد GVM انجام شد. مطابق آنچه که در فصل گذشته بیان شد، GVM از دو قسمت اصلی استاتور و روتور تشکیل شده است، که استاتور شامل دو سنسور A و B با اختلاف فاز ۱۸۰ می باشد. شکل (۳-۳) GVM استفاده شده در شتاب دهنده وان دوگراف

سازمان انرژی اتمی را نمایش می‌دهد. این GVM شامل استاتور ۸ قطاع^{۷۷} و روتور ۴ پره‌ای با قطر خارجی ۱۲ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد و روتور در فاصله ۵ میلی‌متری استاتور قرار گرفته‌است. قطاع‌های استاتور بصورت یک در میان به یکدیگر متصل شده‌اند و دو سنسور A و B را تشکیل می‌دهند. GVM مقابل پایانه ولتاژ شتاب‌دهنده به قطر ۷۰ سانتی‌متر و ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت قرار داده شده‌است.



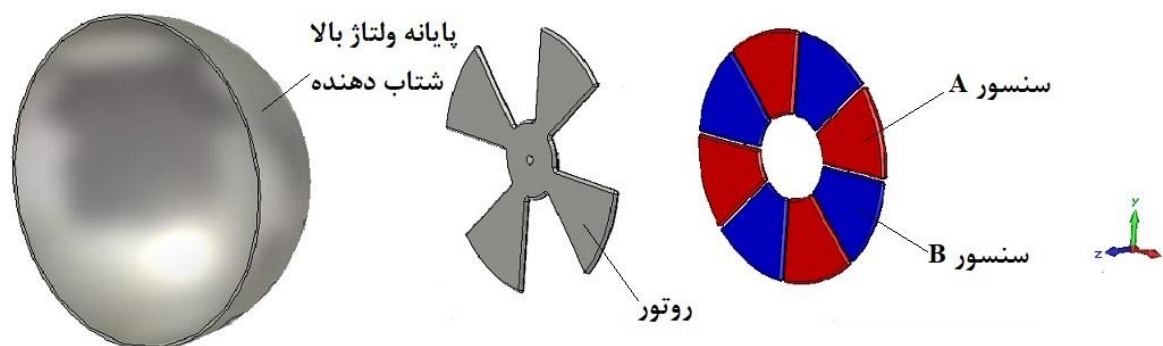
شکل ۳-۳: GVM با استاتور ۸ قطاعی استفاده شده در شتاب‌دهنده وان‌دوگراف

شکل (۳-۴) نمای کلی GVM شبیه‌سازی شده در نرم افزار CST و نحوه قرارگیری GVM در مخزن شتاب‌دهنده را نمایش می‌دهد، مطابق شکل (۳-۴-الف) با چرخش روتور بین استاتور و پایانه ولتاژ بالا ظرفیت‌خازنی بین هریک از سنسورها و پایانه ولتاژ با زمان تغییر می‌کند. با تغییرات ظرفیت‌خازنی نسبت به زمان بار القایی روی سطح استاتور نیز متغیر با زمان خواهد بود. مطابق رابطه (۲-۷) تغییرات بار القایی منجر به ایجاد جریان القایی می‌شود که در نهایت از رابطه (۲-۱۰) قابل دستیابی است.



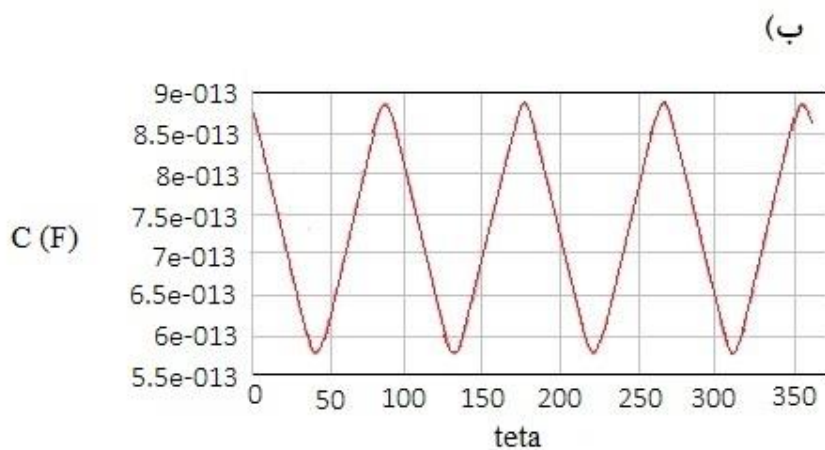
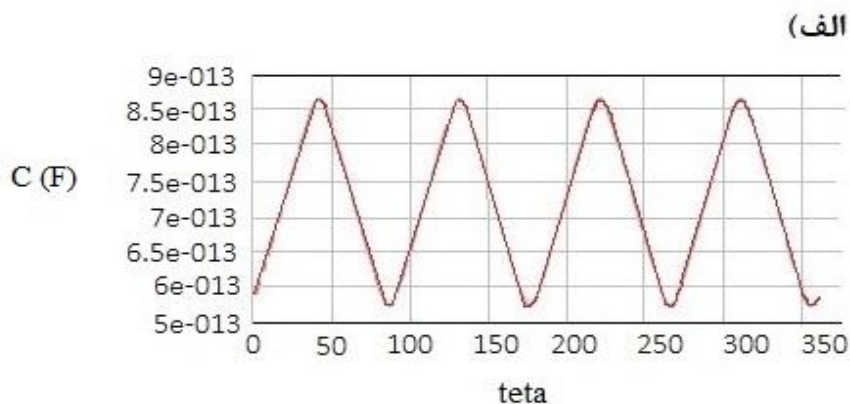
شکل ۳-۴: الف) نحوه قرار گیری GVM در مخزن شتاب‌دهنده (ب) نمای کلی از GVM شبیه‌سازی شده

ضریب A در رابطه (۲-۱۰) با استفاده از شرایط مرزی محاسبه می‌شود، برای اعمال شرایط مرزی نکاتی که باید مورد توجه قرار گیرد تعداد قطاع‌های استاتور و چگونگی قرار گیری روتور مقابل هر یک از سنسورها می‌باشد. یک نمونه از نحوه قرارگیری روتور بین هر یک از سنسورها و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده برای GVM با استاتور ۸ قطاعی در شکل (۳-۵) نمایش داده شده‌است. در این پایان‌نامه GVM با استاتورهای ۴ تا ۲۴ قطاعی مورد بررسی قرار می‌گیرند. از این‌رو برای آشنایی از نحوه اعمال شرایط مرزی ضریب A برای GVM با استاتور ۸ قطاعی محاسبه می‌شود.



شکل ۳-۵: نحوه قرارگیری روتور بین هر یک از سنسورها و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده برای GVM با استاتور ۸ قطاعی

طبق رابطه (۹-۲) ظرفیت خازنی به صورت سینوسی با زمان تغییر می کند، بنابراین زمانی ($t=0$) که روتور مشابه شکل (۵-۳) کاملاً مقابل یکی از سنسورها قرار می گیرد، ظرفیت خازنی بین سنسور و پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده کمینه می شود و زمانی که روتور به اندازه ۴۵ درجه بچرخد ظرفیت خازنی به مقدار بیشینه خود خواهد رسید. نمودار (۱-۳) نحوه تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب زاویه چرخش روتور برای دو سنسور A و B را نمایش می دهد.



نمودار ۱-۳: تغییرات ظرفیت خازنی نسبت به زاویه چرخش روتور برای GVM شبیه سازی شده با استاتور ۸ قطاعی

الف) سنسور A، ب) سنسور B.

با داشتن مقدار بیشینه و کمینه ظرفیت‌خازنی و همچنین یافتن زاویه‌ای که در آن مقدار ظرفیت‌خازنی بیشینه می‌شود ضریب A قابل دستیابی است. روابط (۱-۳) تا (۳-۳) نحوه محاسبات را نشان می‌دهد.

$$C(t) = C_{\min} = C_0 \quad (\theta = \omega t = 0) \quad (1-3)$$

$$C_{\max} = C\left(\frac{\pi}{4}\right) = C_{\min} + A \sin \frac{\pi}{4} \quad (\theta = \omega t = \frac{\pi}{4}) \quad (2-3)$$

$$A = \frac{(C_{\max} - C_{\min})}{\sin \frac{\pi}{4}} = \sqrt{2} (C_{\max} - C_{\min}) \quad (3-3)$$

برای یافتن زاویه بیشینه^{۷۸} هریک از GVM با قطاع‌های استاتور متفاوت می‌توان از رابطه (۴-۳) استفاده نمود، در نهایت می‌توان مشابه رابطه (۳-۳) ضریب A را برای هریک از GVM با قطاع‌های استاتور متفاوت محاسبه کرد. جدول (۲-۳) مقادیر زاویه بیشینه و ضریب A را برحسب تعداد قطاع‌های استاتور (m) نشان می‌دهد.

$$\theta = \frac{2\pi}{m} = \frac{\pi}{n} \quad (4-3)$$

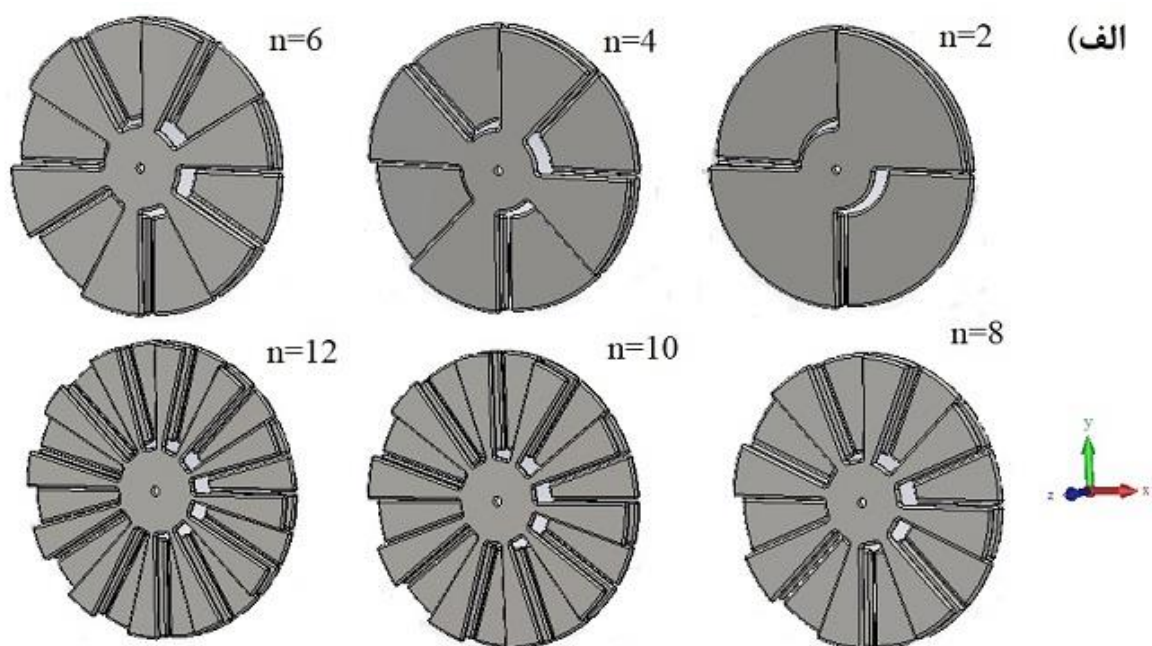
جدول ۲-۳: مقادیر زاویه بیشینه و ضریب A بر حسب تعداد قطاع‌های استاتور

تعداد قطاع استاتور (m)	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
زاویه بیشینه (درجه)	۹۰/۰	۶۰/۰	۴۵/۰	۳۶/۰	۳۰/۰	۲۵/۷۱	۲۲/۵	۲۰/۰	۱۸/۰	۱۶/۳۶	۱۵/۰
ضریب A ($\times 10^{-13} F$)	۳/۷۵	۳/۷۰	۳/۹۵	۴/۰۴	۴/۱۶	۴/۲	۴/۱۵	۴/۲۶	۴/۲۷	۴/۰۱	۴/۳۲

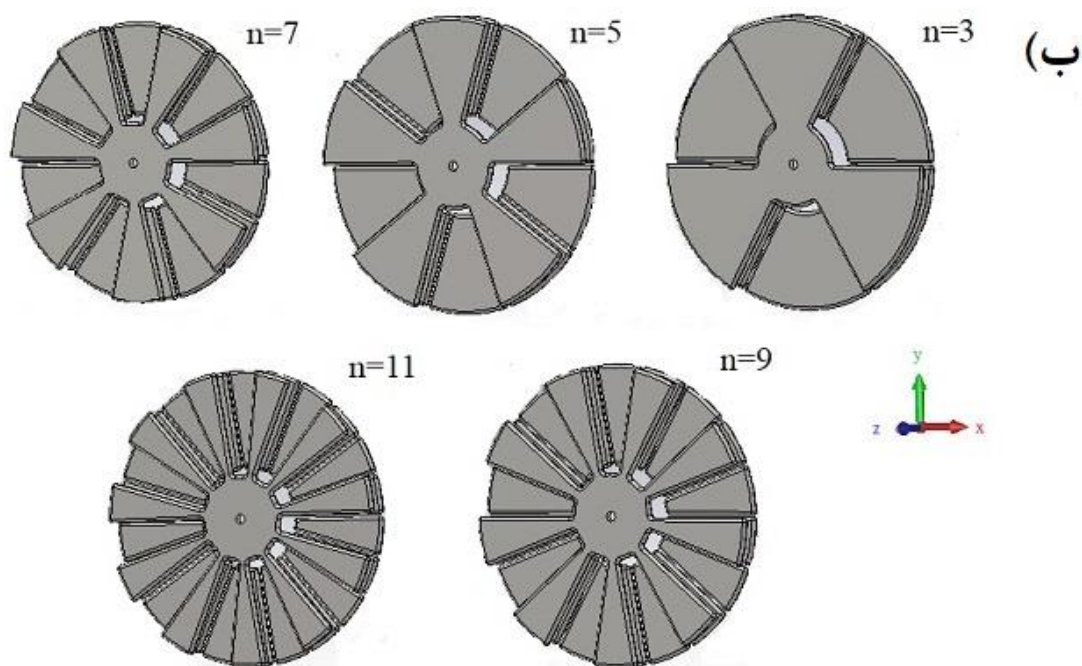
^{۷۸} زاویه‌ای که در آن مقدار ظرفیت‌خازنی بیشینه می‌شود.

۳-۴ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر عملکرد GVM

در این قسمت مقصود یافتن تعداد قطاع مناسب برای استاتور (تعداد پره مناسب برای روتور)^{۷۹} و بررسی تاثیر افزایش تعداد آن بر مقدار ظرفیت خازنی، بارالقایی و همچنین جریان‌های بیشینه و میانگین می‌باشد، از این رو مطابق شکل (۳-۶) استاتور و روتورهایی با هندسه متفاوت در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده‌است.



⁷⁹ $m=2n$



شکل ۳-۶: GVM شبیه‌سازی شده با تعداد پره‌های روتور (قطاع استاتور) متفاوت (الف) روتور با تعداد پره‌های زوج (ب) روتور با تعداد پره‌های فرد، n تعداد پره‌های روتور می‌باشد.

۳-۴-۱ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقدار ظرفیت خازنی، بار

القایی و دامنه جریان القایی

با توجه به شکل (۳-۶) افزایش قطاع‌های استاتور موجب کاهش سطح موثر استاتور می‌شود، بنابراین ظرفیت خازنی و همچنین بار القایی کاهش خواهد یافت. با کاهش ظرفیت خازنی و بار القایی انتظار می‌رود که مقدار دامنه جریان القایی نیز کاهش یابد، اما مطابق با رابطه‌های (۲-۱۰) و (۳-۳) دامنه جریان القایی علاوه بر اختلاف ظرفیت خازنی ($\Delta C = C_{\max} - C_{\min}$) به تعداد پره‌های روتور (n)، ولتاژ خروجی شتاب‌دهنده (V) و همچنین به سرعت چرخش روتور (ω) وابسته می‌باشد، سرعت چرخش روتور معمولاً ۱۵۰۰، ۱۸۰۰،

۳۰۰۰، ۳۶۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته می‌شود، (در اینجا ولتاژ خروجی شتاب‌دهنده برابر با ولتاژ وان-دوگراف مقدار ۵۰۰ کیلو ولت و سرعت چرخش روتور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه فرض شده‌است). از این‌رو تاثیر اختلاف ظرفیت‌خازنی بر مقدار دامنه جریان القایی کاهش می‌یابد، در نهایت هر چه تعداد پره‌های روتور افزایش یابد موجب افزایش دامنه جریان القایی خواهد شد. مقادیر هریک از پارامترهای ظرفیت‌خازنی، بار القایی و دامنه جریان القایی و نمودار تغییرات آن‌ها در فصل ۴ آورده شده‌است.

۳-۴-۲ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر میانگین جریان القایی

برای یافتن دقیق‌تر اثر افزایش پره‌ها بر عملکرد GVM باید میانگین جریان القایی خروجی هر یک از GVM‌ها و همچنین توزیع میدان الکتریکی روی سطح استاتور مورد بررسی قرار گیرند.

میانگین جریان همواره از رابطه (۳-۵) محاسبه می‌شود.

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (\Delta t = t_1 - t_0) \quad (3-5)$$

t_0 زمانی که روتور کاملاً سنسور A را پوشانده است و t_1 زمانی که روتور به اندازه $\frac{\pi}{n}$ دوران می‌کند و سنسور A مقابل میدان الکتریکی ناشی از پایانه ولتاژ شتاب‌دهنده قرار می‌گیرد. زمان t_1 از طریق رابطه‌های (۳-۶) و (۳-۷) قابل محاسبه است.

$$\theta = \omega t_1 \quad \left(\theta = \frac{\pi}{n}\right) \quad (3-6)$$

$$\frac{\pi}{n} = \omega t_1 \rightarrow t_1 = \frac{\pi}{n\omega} \quad (3-7)$$

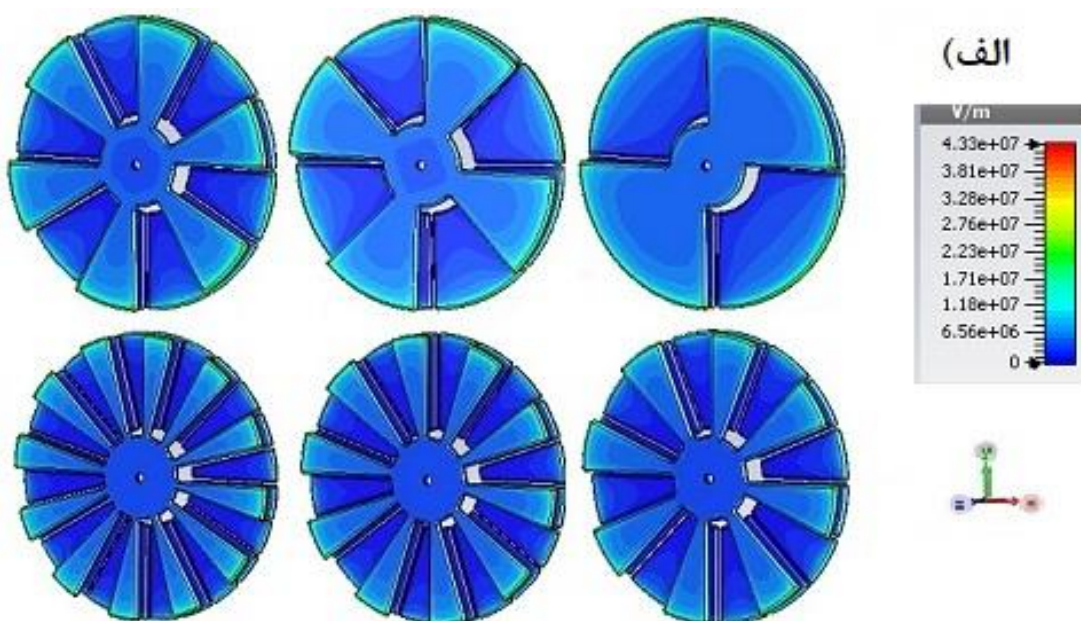
ω سرعت چرخش روتور می‌باشد. در نهایت با استفاده از مقادیر ΔQ و t_1 میانگین جریان القایی از رابطه (۳-۸) محاسبه می‌شود، مقدار و چگونگی تغییرات جریان میانگین به ازای تعداد پره‌های مختلف روتور در فصل بعدی نشان داده شده‌است.

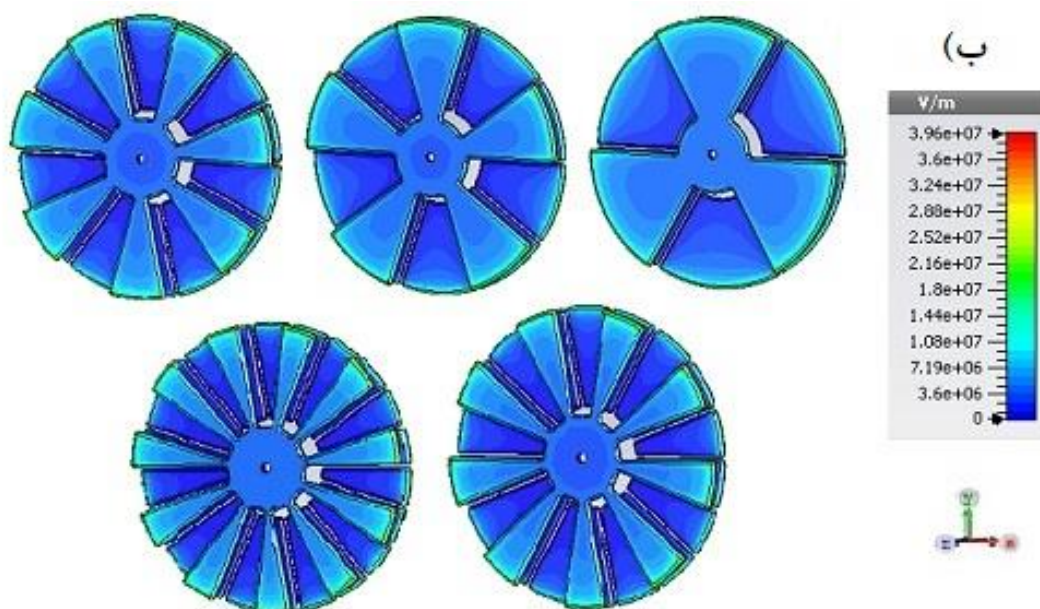
$$I_{av} = \frac{n\omega(Q_{max}-Q_{min})}{\pi} \quad (3-8)$$

۳-۴-۳ بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر توزیع میدان الکتریکی

روی استاتور و روتور

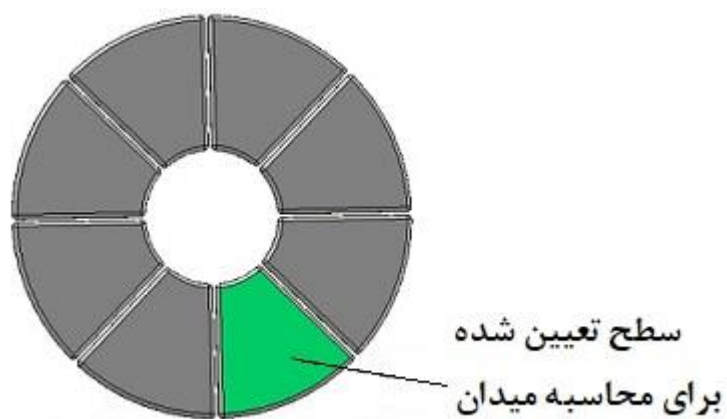
همانگونه که در شکل (۳-۶) نشان داده شده است با افزایش تعداد قطاع های استاتور سطح موثر کاهش و تعداد لبه ها افزایش می یابد. از آنجایی که میدان الکتریکی تمایل به متمرکز شدن در لبه ها را دارد، بنابراین میدان الکتریکی در سطح استاتور کاهش می یابد، شکل (۳-۷) توزیع میدان الکتریکی روی سطح استاتور هر یک از GVM ها را نمایش می دهد.





شکل ۳-۷: توزیع میدان الکتریکی روی سطح استاتور با الف) قطاع‌های زوج، ب) قطاع‌های فرد.

مقدار میدان الکتریکی روی سطح هر یک از قطاع‌ها را می‌توان با مشخص نمودن سطح مورد نظر مانند شکل (۳-۸) در نرم افزار CST محاسبه نمود، نتایج محاسبات میدان در فصل آینده آورده شده‌است.



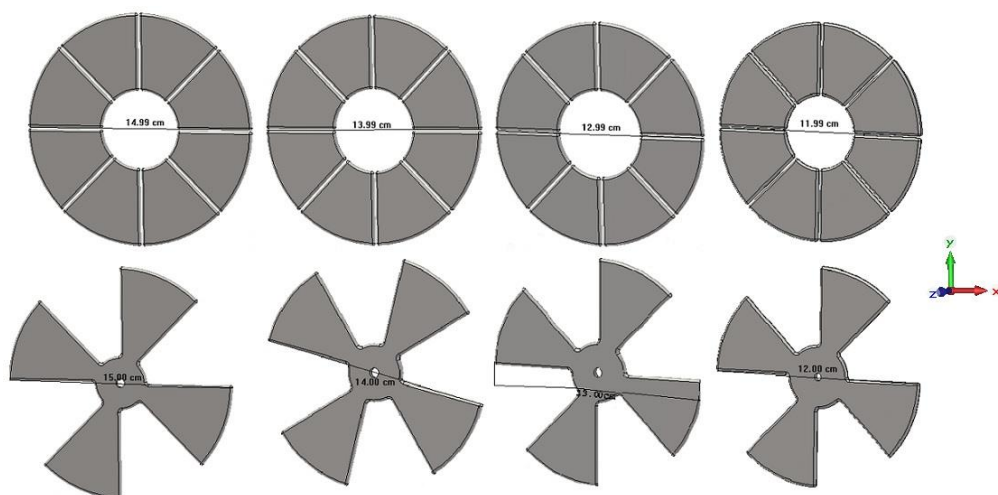
شکل ۳-۸: سطح تعیین شده برای محاسبه میدان در نرم‌افزار CST

۳-۵ بررسی اثر افزایش قطر و ضخامت استاتور و روتور بر عملکرد

GVM

هدف این بخش یافتن قطر مناسب برای روتور و استاتور می‌باشد، از این رو چهار GVM با قطرهای استاتور

۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ سانتی‌متر در نرم افزار CST مانند شکل (۳-۹) شبیه‌سازی شده‌است.

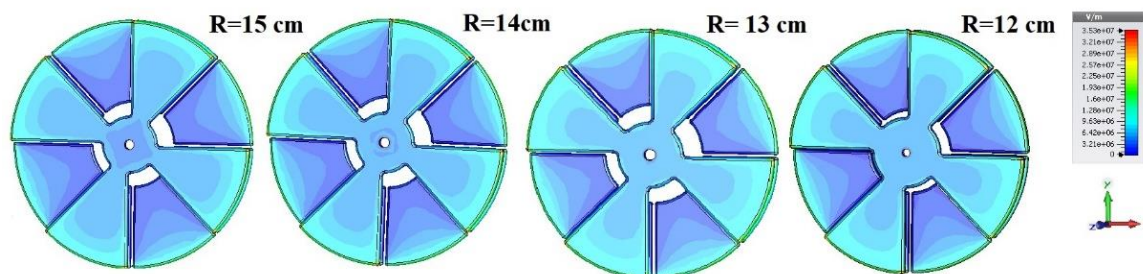


شکل ۳-۹: GVM با قطرهای استاتور ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ سانتی‌متر شبیه‌سازی شده در نرم افزار CST

شکل (۳-۱۰) توزیع میدان الکتریکی را نمایش می‌دهد، همانگونه که مشاهده می‌کنید با افزایش مساحت

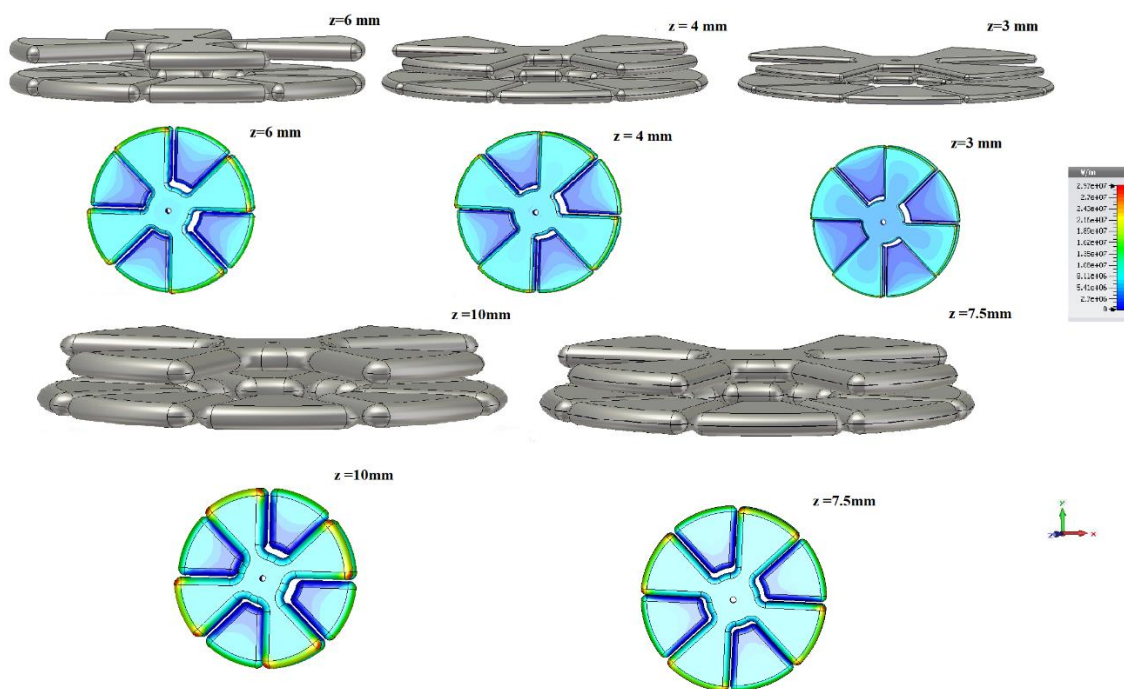
استاتور توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور افزایش می‌یابد. مقدار میدان الکتریکی و همچنین مقادیر

سایر پارامترها در فصل چهارم آورده شده‌است.



شکل ۳-۱۰: توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور بر حسب افزایش قطر استاتور

افزایش ضخامت جهت کاهش اثر لبه و بهبود توزیع میدان بر سطح استاتور انجام می‌شود. شکل (۱۱-۳) استاتور با ضخامت‌های ۳، ۴، ۶، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر به همراه توزیع میدان بر سطح استاتور را نمایش می‌دهد. نتیجه افزایش ضخامت بر مقدار میدان الکتریکی نیز در فصل بعد گزارش شده‌است.



شکل ۱۱-۳: استاتور با ضخامت‌های ۳، ۴، ۶، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر به همراه توزیع میدان بر سطح استاتور

۳-۶ طراحی لبه‌های استاتور و روتور

در طراحی لبه‌های روتور نکته‌ای که باید در نظر گرفته شود نحوه توزیع میدان یکنواخت از لبه‌های روتور بر سطح استاتور می‌باشد. آقای هریسون طی یک مقاله سه نوع الکتروود نظیر صفحه‌ای^{۸۰}، روگوسکی^{۸۱} و بروس^{۸۲} را مورد بررسی قرار داد و دریافت که الکتروود صفحه‌ای قادر به ایجاد میدان یکنواخت نمی‌باشد.

^{۸۰} Plane profile

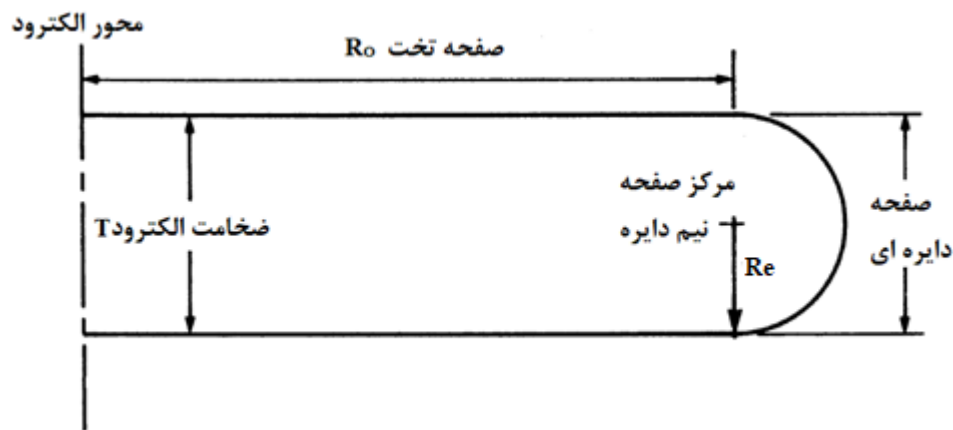
^{۸۱} Rogowski profile

^{۸۲} Bruce profile

چگونگی شیوه محاسبه و یافتن روابط و نتایج بدست آمده خارج از اهداف این پایان نامه می باشد، بنابراین فقط به معرفی هریک از الکترودها بسنده می کنیم.

۳-۶-۱ الکتروده صفحه ای

الکتروده طراحی شده با این منحنی شامل یک صفحه تخت و یک صفحه نیم دایره به شعاع های به ترتیب R_o و R_e تشکیل شده است. شکل (۳-۱۲) یک الکتروده صفحه ای را نمایش می دهد.



شکل ۳-۱۲: الکتروده صفحه ای [۴۵].

در این منحنی طول کل الکتروده R و ضخامت الکتروده T به ترتیب از روابط (۳-۹) و (۳-۱۰) محاسبه می شود.

$$R = R_o + R_e \quad (۳-۹)$$

$$T = 2R_e \quad (۳-۱۰)$$

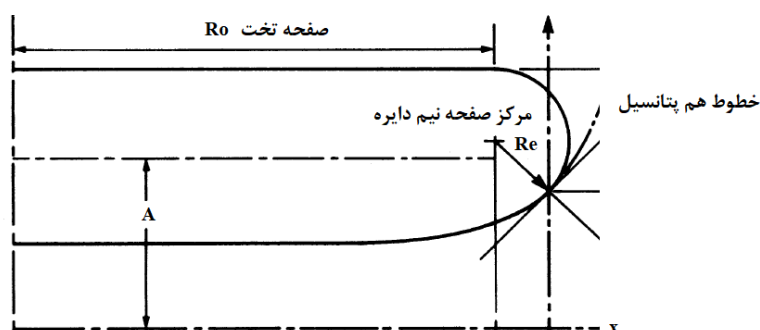
۳-۶-۲ الکترو د روگوسکی

در الکترو د روگوسکی مرکز قسمت دایره‌ای الکترو د با توجه به مختصات که در رابطه (۱۱-۳) آورده شده است مشخص می‌شود.

$$x = \frac{A}{\pi} (\varphi + e^{\varphi} \cos \psi)$$

$$y = \frac{A}{\pi} (\psi + e^{\psi} \sin \psi) \quad (۱۱-۳)$$

در رابطه بالا A فاصله مشخصی از محور الکترو د تا سطحی که میدان بر آن اندازه‌گیری می‌شود، ψ زاویه خطوط هم‌پتانسیل با الکترو د که معمولاً $\frac{\pi}{2}$ در نظر گرفته می‌شود و φ زاویه خطوط نیرو می‌باشند. شکل (۱۳-۳) این الکترو د را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱۳: الکترو د روگوسکی [۴۵].

شعاع قسمت دایره‌ای از رابطه (۱۲-۳) و طول کل الکترو د مطابق با رابطه (۱۰-۳) و ضخامت الکترو د از طریق رابطه (۱۳-۳) محاسبه می‌شوند.

$$R_e = \frac{A}{\pi} \frac{1 + \cos \psi}{\sin \psi} \sqrt{2(1 + \cos \psi)} \quad (۱۲-۳)$$

$$T = \frac{A}{\pi} \frac{1 + \cos \psi}{\sin \psi} [1 + \cos \psi + \sqrt{2(1 + \cos \psi)}] + \frac{a}{\pi} \sin \psi \quad (۱۳-۳)$$

ضریب a معمولاً ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۳-۶-۳ الکتروود بروس

الکتروود بروس شامل سه قسمت خطی، سینوسی و دایره‌ای می‌باشد. شکل (۱۴-۳) این الکتروود را نمایش می‌دهد. مرکز صفحه دایره‌ای الکتروود بروس نیز با مختصات رابطه (۱۴-۳) مشخص می‌شود.

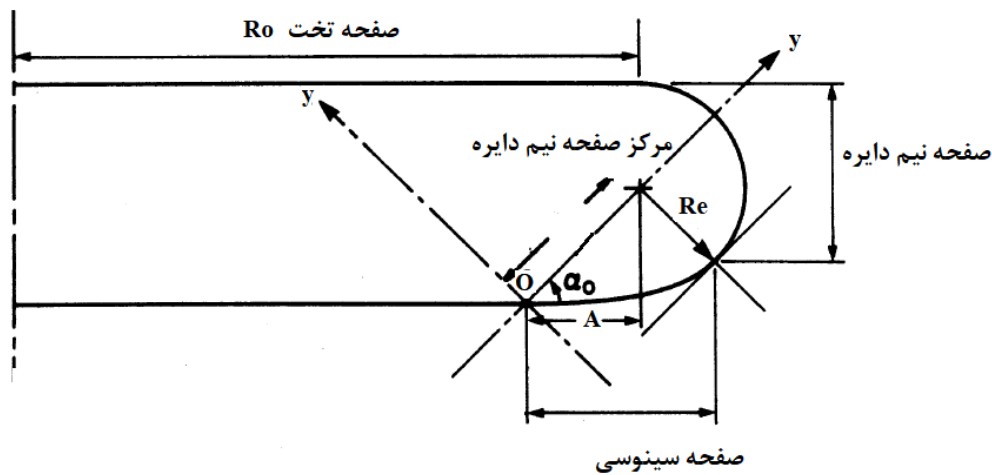
$$y = -R_e \sin\left(\frac{x}{x_0} \frac{\pi}{2}\right)$$

$$x_0 = \frac{A}{\cos \alpha_0} \quad (14-3)$$

α_0 زاویه مشخصه قسمت سینوسی می‌باشد که مقادیر آن در مرجع [۴۵] آورده شده‌است. شعاع قسمت دایره‌ای R_e و ضخامت T از رابطه (۱۵-۳) محاسبه می‌شود [۴۵].

$$R_e = \frac{2}{\pi} x_0 \tan \alpha_0$$

$$T = A \tan \alpha_0 + R_e \quad (15-3)$$



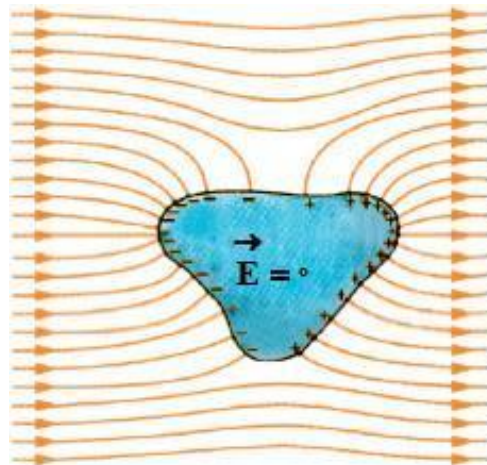
شکل ۱۴-۳: الکتروود بروس [۴۵].

با توجه به مطالب فوق منحنی روگوسکی به عنوان منحنی مناسب جهت طراحی لبه‌های روتور و استاتور انتخاب شد. از منحنی بروس به دلیل ساختار پیچیده آن استفاده نشده‌است.

۷-۳ بررسی فاصله بهینه استاتور و روتور

در این بخش هدف یافتن فاصله مناسب بین روتور و استاتور می‌باشد، همانگونه که قبلاً گفته شد روتور از جنس فلز می‌باشد. بنابراین ابتدا حضور جسم رسانا در میدان الکتریکی را بررسی نموده و سپس به یافتن فاصله بهینه بین روتور و استاتور پرداخته می‌شود.

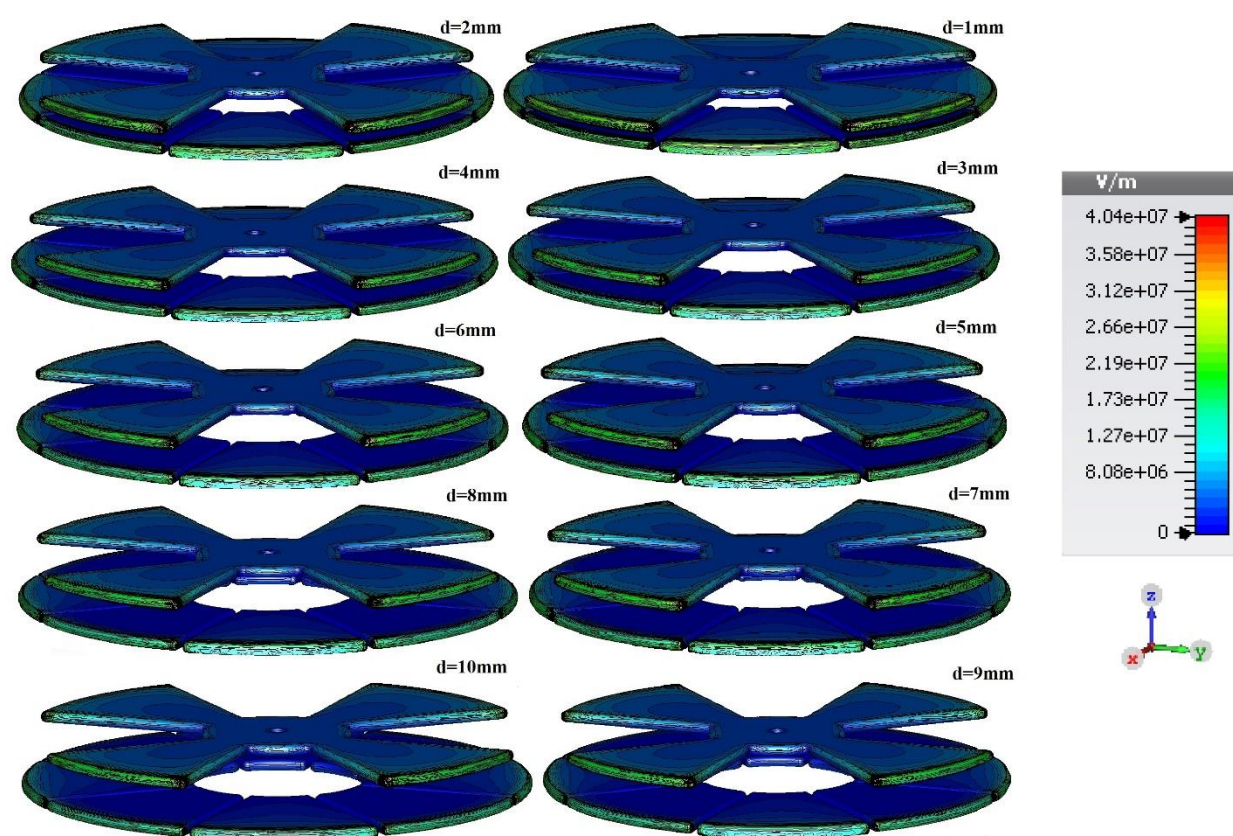
زمانی که یک رسانای بدون بار با هندسه نامنظم مانند شکل (۳-۱۵) در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، الکترون‌های آزاد جسم به سرعت به سوی یک رویه جسم می‌رود و در رویه دیگر دچار کمبود الکترونی می‌شود. این توزیع بار بگونه‌ای انجام می‌شود که میدان الکتریکی خلاف جهت میدان الکتریکی اولیه در داخل رسانا ایجاد شود، تا میدان کل در داخل رسانا^{۸۳} صفر شود. میدان خروجی جسم نیز برابر با میدان ایجاد شده توسط چگالی بارهای روی هریک از سطح‌ها به‌اضافه میدان اولیه است [۴۳].



شکل ۳-۱۵: یک جسم رسانا در میدان الکتریکی قرار داده شده‌است، بارها بصورتی قرار می‌گیرند تا میدانی درون جسم رسانا ایجاد کند که میدان اولیه را خنثی کرده و میدان کل داخل رسانا صفر شود [۴۶].

^{۸۳} میدان الکتریکی در داخل رسانا زمانی که چاه یا چشمه‌ای داخل رسانا وجود نداشته باشد، صفر است.

در اینجا جسم رسانا همان روتور است که در میدان الکتریکی پایانه ولتاژ بالای شتاب‌دهنده قرار گرفته است، GVM با استاتور ۸ قطاعی در نرم افزار CST شبیه‌سازی شده و روتور در فواصل مختلف ۱ تا ۱۰ میلی‌متر نسبت به استاتور قرار داده شده و چگونگی توزیع میدان بر سطح استاتور مورد بررسی قرار گرفته است، شکل (۳-۱۶) توزیع میدان روی سطح استاتور را در فواصل مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۷: 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 می‌دهد.

با توجه به شکل (۳-۱۷) هرچه فاصله روتور از استاتور بیشتر می‌شود توزیع میدان روی سطح استاتور کاهش یافته و در لبه‌ها افزایش می‌یابد، پس اثر لبه تحت تاثیر فاصله استاتور و روتور می‌باشد. بنابراین

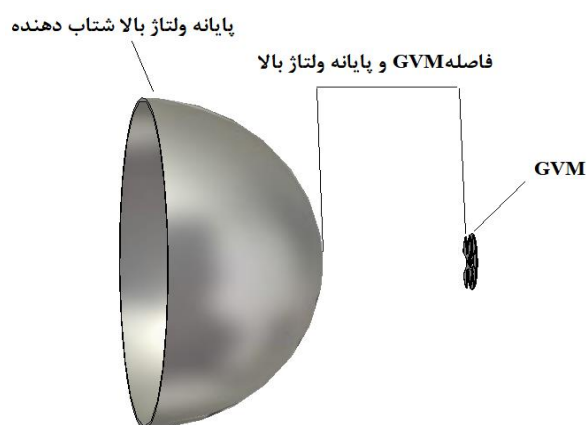
افزایش فاصله موجب افزایش اثر لبه خواهد شد. سایر نتایج تاثیر افزایش فاصله بر پارامترهای دیگر نظیر ظرفیت خازنی بیشینه، اختلاف ظرفیت خازنی و بار القایی بیشینه، اختلاف بار القایی، دامنه جریان القایی، میانگین جریان و در نهایت بر مقدار میدان الکتریکی در فصل بعد گزارش شده است.

۳-۸ فاصله بهینه پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده و GVM

یافتن فاصله مناسب بین پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده و GVM مقصود این بخش می باشد. از این رو مطابق شکل (۳-۱۸) پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده از فاصله ۱ تا ۳۵ سانتی متری GVM قرار گرفته است، می دانیم طبق رابطه معروف ظرفیت خازن ها رابطه (۳-۱۶) ظرفیت خازنی با فاصله نسبت عکس دارند. بنابراین با افزایش فاصله ظرفیت خازنی کاهش می یابد، تغییرات ظرفیت خازنی بیشینه و کمینه بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده از GVM توسط نرم افزار CST محاسبه شده است که نتایج آن در فصل بعد آورده خواهد شد.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (۳-۱۶)$$

طبق رابطه های (۲-۱۰) و (۳-۳) دامنه جریان القایی نیز با افزایش فاصله پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده و GVM کاهش می یابد. از آنجایی که بار القا شده با فاصله نسبت عکس دارد، بنابراین بار القا شده روی سطح استاتور و میانگین جریان نیز با افزایش فاصله پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده و GVM کاهش می یابد. نتایج محاسبات هریک از این پارامترها و نمودار تغییرات آنها در فصل آینده آورده خواهد شد.



شکل ۳-۱۸: فاصله بین پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده و GVM

۳-۹ جنس روتور و استاتور

همانگونه که توضیح داده شد استاتور باید دارای حساسیت بالایی باشد، بنابراین برای ساخت آن باید از فلزی با هدایت الکتریکی بالایی استفاده کرد. فلز طلا، نقره، مس، برنج، آلومینیوم، فولاد $st137$ ^{۸۴} و فولاد ضد زنگ^{۸۵} مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خواص فیزیکی مورد نیاز هر یک از این فلزات در جدول (۳-۳) دسته‌بندی شده‌است.

جدول ۳-۳: خواص فیزیکی فلزات نقره، مس، طلا، آلومینیوم، فولاد $st137$ و فولاد ضد زنگ

فلز	قابلیت شکل پذیری	نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	سختی فلز	مقاومت ویژه در $20^{\circ}C$ ($\mu\Omega.m$)
نقره	زیاد	۹۶۱	نرم	۰/۰۱۵۹
مس	متوسط	۱۰۸۳	سخت	۰/۰۱۶۸
طلا	زیاد	۱۰۶۴/۱۸	نرم	۰/۰۲۴۴
آلومینیوم	کم	۶۶۰	نرم	۰/۰۲۸۲
برنج	بسیار زیاد	۹۰۰-۹۴۰	بسیار سخت	۰/۰۸
فولاد $st137$	بسیار زیاد	۱۴۰۰-۱۴۵۰	سخت	۰/۱۵
فولاد ضد زنگ	زیاد	۱۳۹۰-۱۴۴۰	سخت	۰/۷۵

^{۸۴} فولاد کم کربن و شامل منگنز و سیلیسیوم نیز می‌باشد.

^{۸۵} فولاد ضد زنگ تشکیل شده از آهن و کروم است.

با توجه به جدول (۳-۳) بهترین فلز برای ساخت استاتور و روتور مس می‌باشد، اما فلز مس خالص قابلیت شکل پذیری و مقاومت در برابر خوردگی نامطلوبی دارد از این رو برای استفاده ما مناسب نیستند بنابراین از آلیاژ برنج که استحکام و شکل پذیری بیشتری نسبت به مس خالص دارد استفاده می‌شود [۴۷،۴۸،۴۹].

۳-۱۰ انتخاب موتور مناسب

یکی از موارد مهم در انتخاب موتور الکتریکی جهت استفاده در GVM تونایی کنترل سرعت آن می‌باشد، از این رو سه موتور سنکرون^{۸۶}، براش^{۸۷} و براشلس^{۸۸} پیشنهاد می‌شود. در جدول (۳-۴) هر یک از موتورهای بصورت کیفی مقایسه و در نهایت موتور مناسب معرفی می‌شود [۵۰].

جدول ۳-۴: مقایسه کیفی هریک از موتورهای سنکرون، براش و براشلس

موتور	نوع موتور	بازدهی	توان	طول عمر	گستره سرعت	روش راه‌اندازی	روش کنترل
سنکرون	AC	بالا	متوسط	متوسط	محدود	نیاز به یک جریان ۷ برابر نامی دارد	برای سرعت ثابت نیاز به کنترل کننده نیست
براش	DC	متوسط	متوسط	کوتاه	محدود	منبع تغذیه DC	برای ثابت نیاز به کنترل کننده نیست
براشلس	DC	بسیار بالا	بالا	طولانی	وسیع	منبع تغذیه DC	کنترل کننده مخصوص

همانگونه که در جدول (۳-۴) آورده شد، برای راه‌اندازی موتور سنکرون نیاز به یک منبع جریان جداگانه می‌باشد. از این رو با توجه به پارامترهای مقایسه گستره سرعت و طول عمر نسبت به دو موتور دیگر استفاده از این موتور برای GVM مناسب نمی‌باشد.

⁸⁶ Synchronous

⁸⁷ Brush

⁸⁸ Brushless

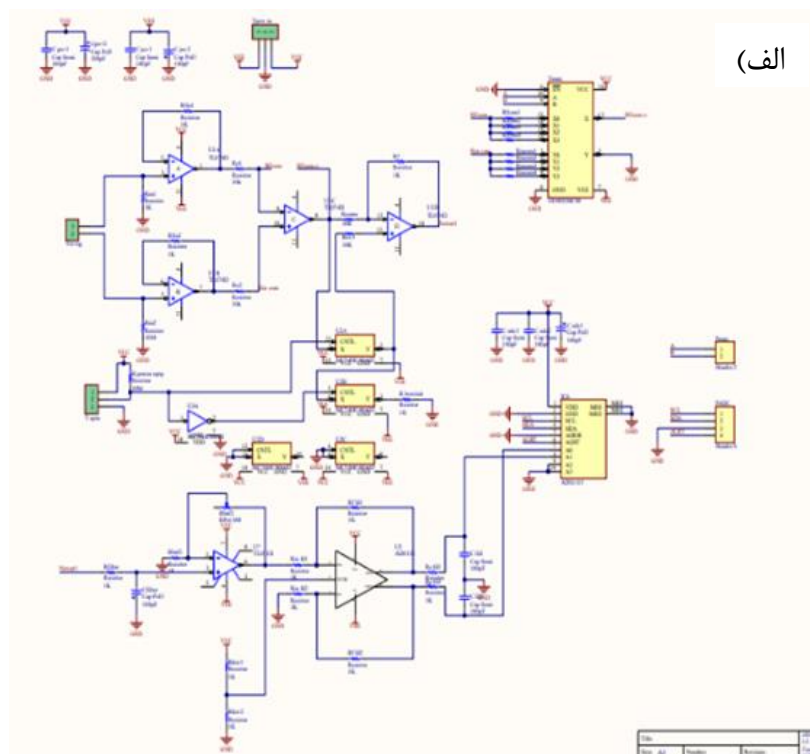
موتور براش با توجه به طول عمر کوتاه به دلیل ایجاد اصطکاک جاروبک‌ها و کموتاتور^{۸۹} و گستره محدود سرعت، استفاده از این موتور در مدت زمان طولانی مناسب نمی‌باشد، پس برای چرخاندن روتور GVM از موتور براشلس به دلیل عدم وجود جاروبک‌ها و نداشتن محدودیت زمانی استفاده می‌شود. اما در این پایان-نامه به علت راه‌اندازی و کنترل مشکل موتور براشلس برای آزمایش‌های اولیه GVM از این موتور براش استفاده شده‌است.

۳-۱۱ الکترونیک سیستم

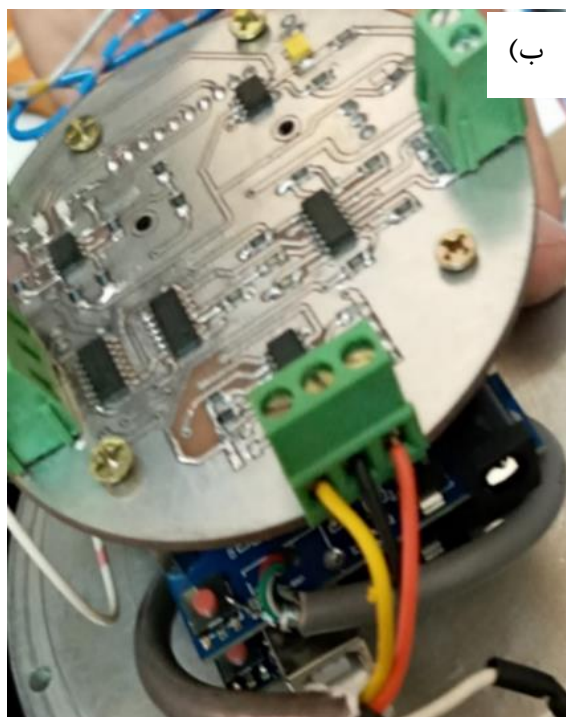
از مهمترین قسمت های طراحی GVM می توان به قسمت الکترونیک آن اشاره کرد. این بخش با همکاری تیم گروه پژوهشی شتابگرهای ذرات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی انجام گرفت که در ادامه جزئیات بیشتری از آن ارائه می‌شود. شکل (۳-۱۹) نمونه آزمایشی مدار الکترونیک طراحی و ساخته شده‌ی GVM را نشان می‌دهد. سیگنال‌های AC گرفته شده از صفحات سنسورهای A و B حتی با اسیلوسکوپ های عادی غیر قابل رویت هستند. از این رو مدار جریان به ولتاژ آن باید از حساسیت بالایی برخوردار باشد. از آنجایی که سیگنال‌های خروجی از صفحات سنسور همواره دارای نویزهایی می‌باشند، بنابراین طراحی ورودی مدار بر پایه تفاضل دو سیگنال از هم در نظر گرفته شده است. به این صورت که سیگنال های هم فاز و هم دامنه روی صفحات سنسور که غالباً نویز هستند در ورودی قسمت الکترونیک حذف و سپس تقویت می شوند. برای پی بردن به جهت میدان اندازه گیری نیاز به یک آشکار ساز فاز است. توسط آشکارساز فاز موج ورودی به صفحات سنسور و مکان پره با هم مقایسه شده و با توجه به فاز سیگنال مقایسه شده به سمت مثبت یا منفی یکسو می شود. سپس سیگنال بدست آمده را از یک فیلتر پایین گذر عبور داده تا به توان سیگنال آنالوگ را به دیجیتال تبدیل کرد. مبدل آنالوگ به دیجیتال بکار برده شده ۱۶

⁸⁹ Commutator

بیت است. که یک بیت آن علامت و ۱۵ بیت آن تبدیل بدست آمده از ولتاژ آنالوگ می باشد. در این مبدل ۱۴ بیت آن موثر است. می توان خطای این سیستم را به دقت قسمت آنالوگ به دیجیتال آن نسبت داد که با بالاتر بردن تعداد و دقت بیت می توان به خطای کمتری در این سیستم رسید. برای راه اندازی و گرفتن دیتا از ADC و انتقال آن به کامپیوتر از آردوینو^{۹۰} استفاده شده و گیرنده داده و رابط گرافیکی آن توسط نرم افزار LabView صورت گرفته است.



⁹⁰ Arduino



شکل ۳-۱۹: نمونه آزمایشی مدار الکترونیک الف) طراحی و ب) ساخته شده GVM

فصل چهارم

بررسی نتایج و طراحی نمونه نهایی GVM

۱-۴ مقدمه

در این فصل نتایج شبیه‌سازی GVM مورد بررسی قرار گرفته‌است، سپس یک نمونه آزمایشی از GVM ساخته و با استفاده از آن ولتاژ یک صفحه متصل به ولتاژ بالا اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت طرح نهایی GVM برای نصب بر روی شتاب‌دهنده داینامی‌ترون معرفی خواهد شد.

۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر عملکرد

GVM

این بخش، شامل نتایج شبیه‌سازی GVM با استاتورهای متفاوت می‌باشد. همانگونه که در شکل (۳-۶) بخش ۳-۴ نشان داده شده‌است، استاتور با قطاع‌های مختلف در نرم‌افزار CST طراحی و اثر افزایش تعداد قطاع بر مقدار ظرفیت‌خازنی بیشینه، اختلاف ظرفیت‌خازنی، بار القایی بیشینه، اختلاف بار القایی، دامنه جریان، میانگین جریان القایی و در آخر میدان الکتریکی بررسی شده‌است. در ادامه هر یک از نتایج نتایج نشان داده شده‌است.

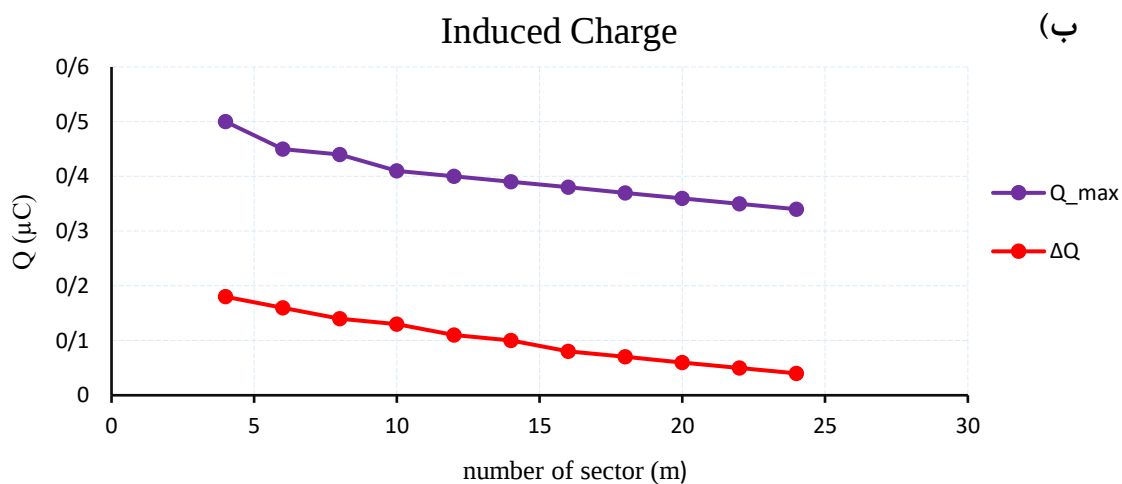
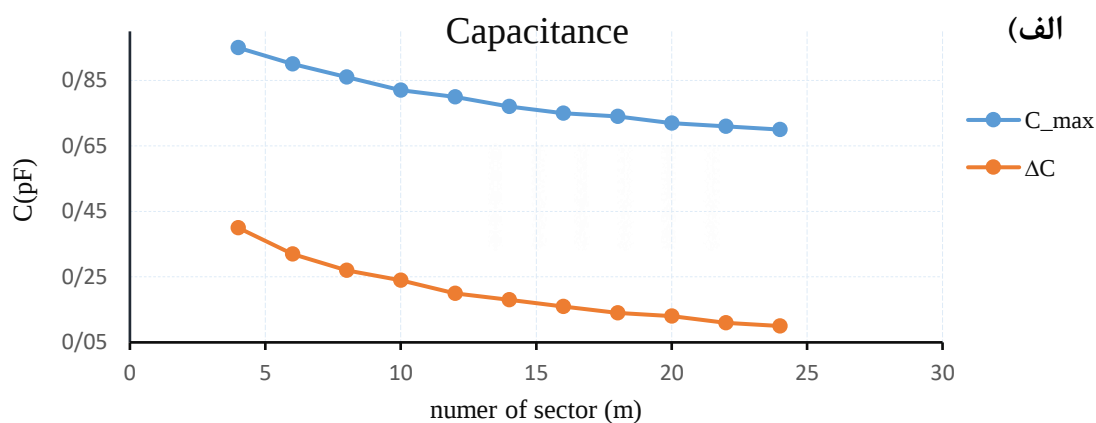
۱-۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقادیر ظرفیت-

خازنی، بار القایی و دامنه جریان القایی

جدول (۴-۱) نتایج تاثیر افزایش تعداد قطاع‌های استاتور بر مقدار ظرفیت‌خازنی بیشینه، اختلاف ظرفیت‌خازنی و همچنین بار القایی بیشینه، اختلاف بار القایی و نمودار (۴-۱) نحوه تغییرات آن‌ها را برحسب پره‌های روتور نمایش می‌دهد.

جدول ۴-۱: اثر افزایش تعداد قطعات‌های استاتور بر مقدار ظرفیت خازنی و بار القایی

تعداد قطعات‌های استاتور m	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
ظرفیت‌خازنی بیشینه (pF)	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۸۶	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۷۰
اختلاف ظرفیت‌خازنی (pF)	۰/۴۰	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۰
بار القایی بیشینه (μC)	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۴
اختلاف بار القایی (μC)	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴

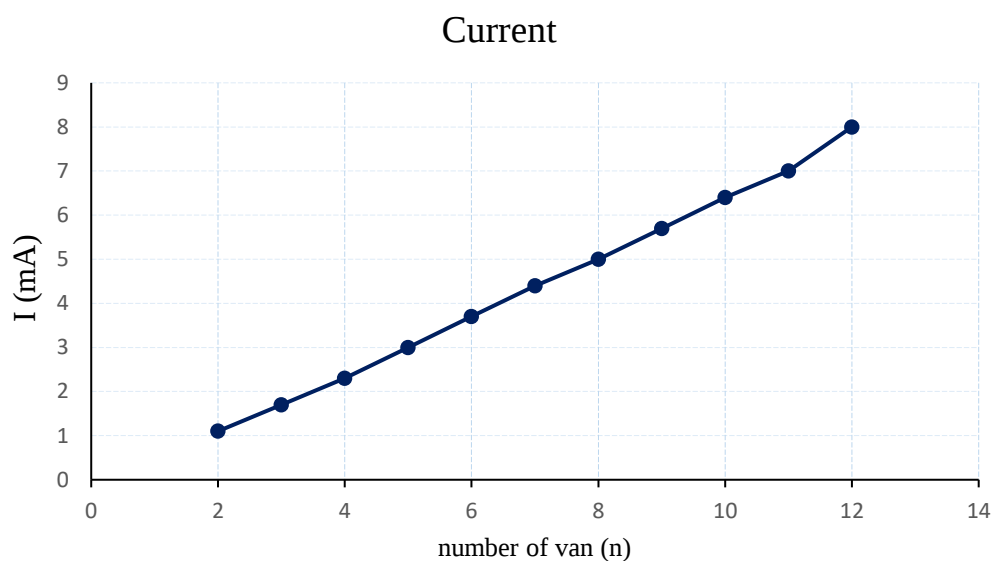


نمودار ۴-۱: الف) تغییرات ظرفیت‌خازنی ب) تغییرات بار القایی برحسب تعداد قطاع‌های استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

جدول (۲-۴) و نمودار (۲-۴) تغییرات دامنه جریان را بر حسب تعداد پره‌های روتور نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴: تغییرات دامنه جریان بر حسب تعداد پره‌های روتور

پره‌های روتور (n)	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
دامنه جریان (mA)	۱/۱۰	۱/۷۰	۲/۳۰	۳/۰۰	۳/۷۰	۴/۴۰	۵/۰۰	۵/۷۰	۶/۴۰	۶/۶۰	۸/۰۰



نمودار ۲-۴: تغییرات دامنه جریان بر حسب تعداد پره‌های روتور (خطوط برای هدایت چشم است).

۲-۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقدار میانگین

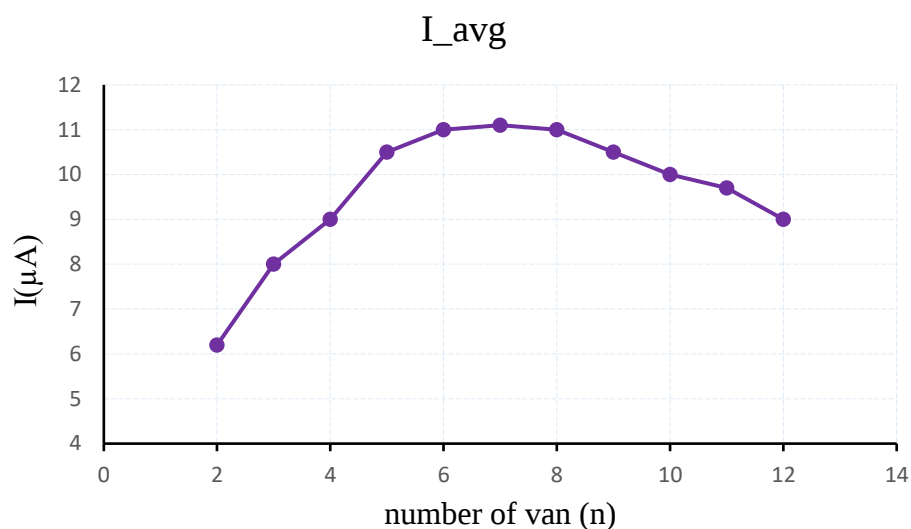
جریان القایی

در جدول (۳-۴) نتایج مربوط به تاثیر افزایش تعداد قطاع استاتور بر میانگین جریان و نحوه تغییرات

میانگین جریان القایی بر حسب تعداد پره‌های روتور در نمودار (۳-۴) آورده شده‌است.

جدول ۳-۴: مقدار I_{av} به ازای تعداد پره‌های روتور

تعداد پره‌های روتور n	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میانگین جریان (μA)	۶/۲۰	۸/۰۰	۹/۰۰	۱۰/۵۰	۱۱/۰۰	۱۱/۱	۱۱/۰۰	۱۰/۵	۱۰/۰۰	۹/۷	۹/۰۰

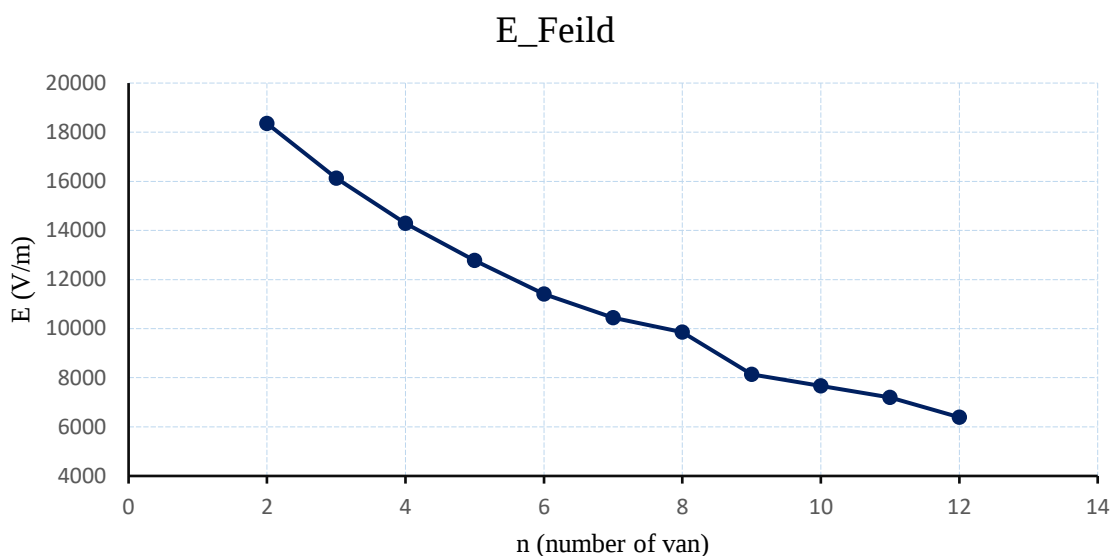


نمودار ۳-۴: نحوه تغییرات میانگین جریان بر حسب تعداد پره‌های روتور (خطوط برای هدایت چشم است).

۳-۲-۴ نتایج بررسی اثر افزایش تعداد قطاع استاتور بر مقدار میدان

الکتریکی یک سنسور

در نمودار (۴-۴) نحوه تغییرات میدان الکتریکی بر حسب تعداد پره‌های روتور را نمایش می‌دهد.



نمودار ۴-۴: نحوه تغییرات میدان الکتریکی بر حسب تعداد پره‌های روتور (خطوط برای هدایت چشم است).

بر طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، با افزایش تعداد قطاع‌های استاتور (تعداد پره‌های روتور) مقدار ظرفیت‌خازنی بیشینه، اختلاف ظرفیت‌خازنی و همچنین بار القایی بیشینه، اختلاف بار القایی و میدان الکتریکی کاهش می‌یابد، اما دامنه جریان القایی به علت وابستگی مستقیم به پره‌های روتور (مطابق با رابطه (۱۰-۲)) و با فرض ثابت بودن ولتاژ و سرعت چرخش روتور) به صورت چشمگیر افزایش می‌یابد. پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفت میانگین جریان بود که با افزایش قطاع استاتور GVM، تا استاتور ۱۴ قطاعی افزایش می‌یابد سپس به تدریج به دلیل کاهش سطح موثر استاتور در GVM با تعداد قطاع‌های بیشتر میانگین جریان نیز کاهش می‌یابد.

بنابراین با توجه به نتایج حاصل شبیه‌سازی با نرم افزار CST، GVM با استاتور ۸ تا ۱۴ قطاعی (روتور ۴ تا ۷ پره‌ای) دارای عملکرد بهتر و حساسیت بالاتری می‌باشد.

۳-۴ نتایج بررسی اثر افزایش قطر استاتور و روتور بر عملکرد

GVM

این بخش شامل نتایج بررسی اثر افزایش قطر استاتور بر مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت-خازنی، بارالقایی بیشینه و اختلاف بار القایی، دامنه جریان القایی، میانگین جریان و در نهایت میدان الکتریکی و انتخاب قطر مناسب برای استاتور و روتور می‌باشد.

۱-۳-۴ نتایج بررسی اثر افزایش قطر استاتور و روتور بر مقادیر ظرفیت-

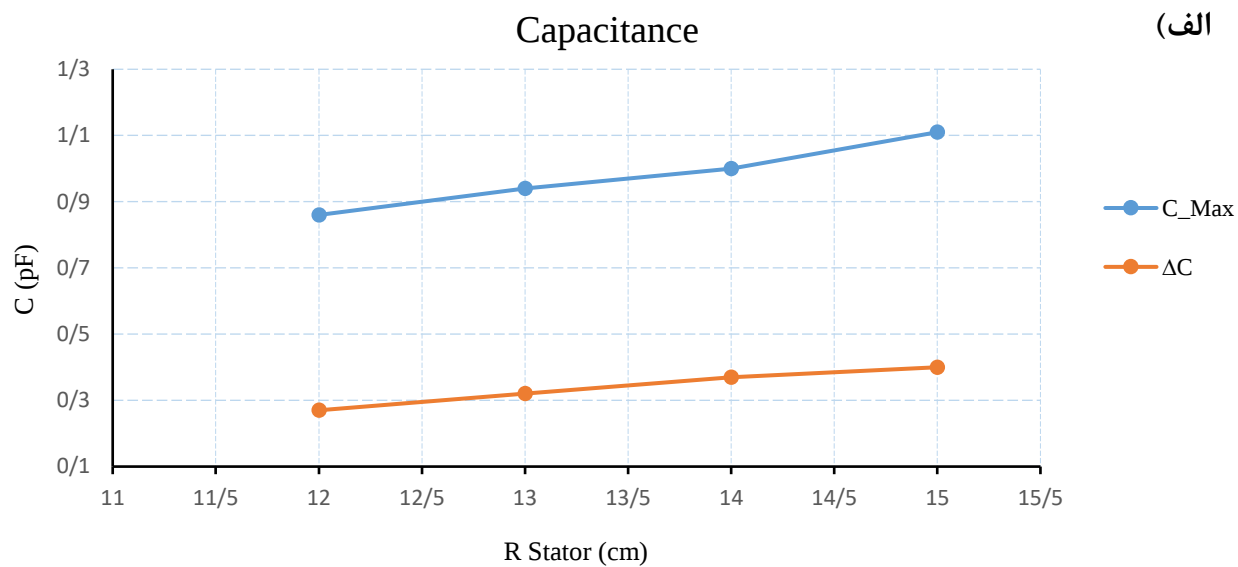
خازنی و بار القایی

مقدارهای مختلف ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، بار القایی بیشینه و اختلاف بار القایی به همراه نحوه تغییرات آنها به ترتیب در جدول (۴-۴) و نمودار (۴-۵) آورده شده‌است.

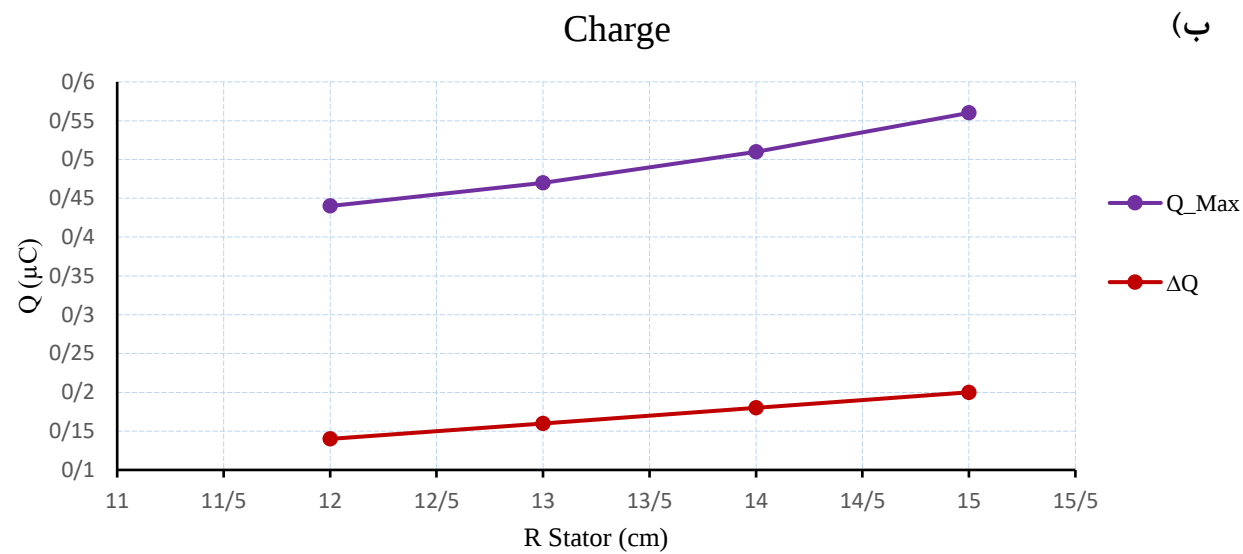
جدول ۴-۴: مقادیر اختلاف ظرفیت خازنی و اختلاف بارالقایی به ازای قطرهای مختلف استاتور

اختلاف بار القایی (μC)	بار القایی بیشینه (μC)	اختلاف ظرفیت خازنی (pF)	ظرفیت خازنی بیشینه (pF)	قطر استاتور R (cm)
۰/۱۴	۰/۴۴	۰/۲۷	۰/۸۶	۱۲
۰/۱۶	۰/۵۰	۰/۳۲	۰/۹۴	۱۳
۰/۱۸	۰/۵۲	۰/۳۷	۱/۰۰	۱۴
۰/۲۰	۰/۵۶	۰/۴۰	۱/۱۱	۱۵

(الف)



(ب)



نمودار ۴-۵: الف) نحوه تغییرات ظرفیت خازنی ب) نحوه تغییرات بار القایی به ازای قطر استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

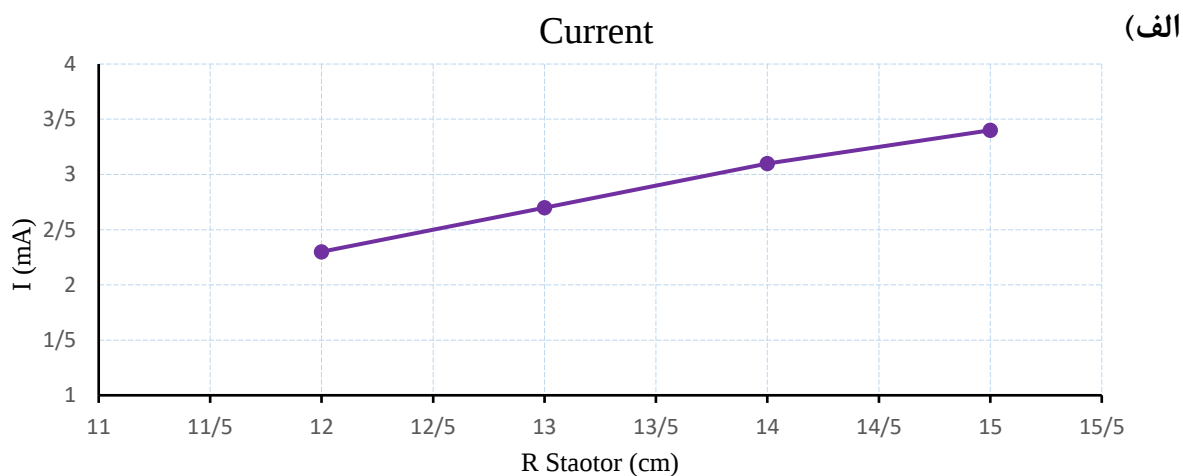
۴-۳-۲ نتایج تاثیر افزایش قطر استاتور بر مقادیر دامنه جریان القایی،

میانگین جریان و میدان الکتریکی

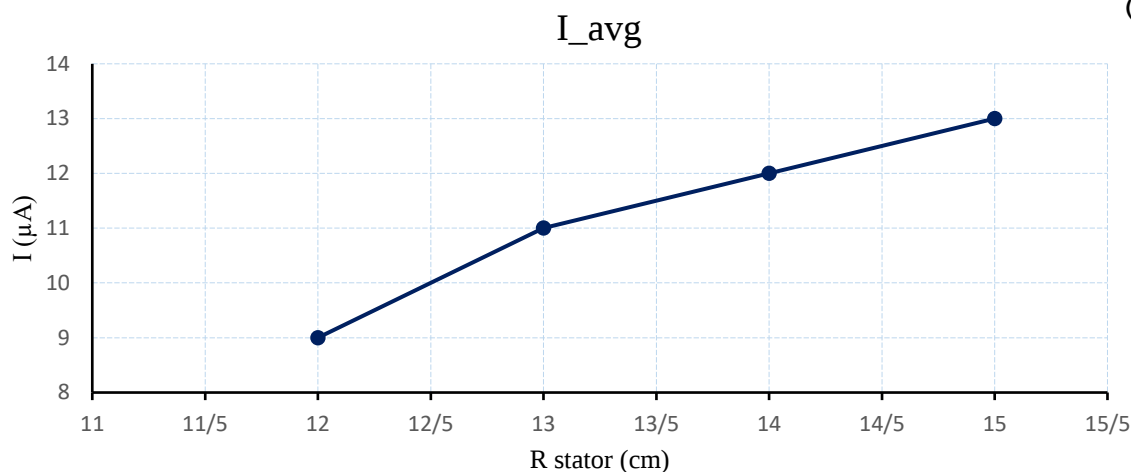
جدول (۴-۵) و نمودار (۴-۶) مقادیر و نحوه تغییرات دامنه جریان القایی، میانگین جریان و میدان الکتریکی را نمایش می دهد.

جدول ۴-۵: مقادیر دامنه جریان القایی، میانگین جریان و میدان الکتریکی بر حسب افزایش قطر استاتور

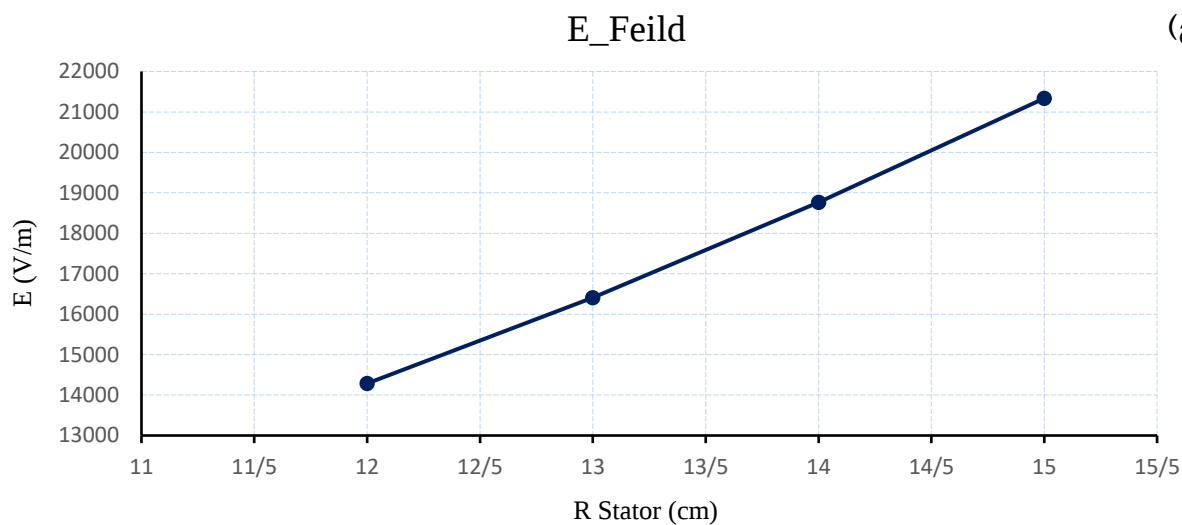
میدان الکتریکی (V/m)	میانگین جریان القایی (μA)	دامنه جریان القایی (mA)	قطر استاتور R (cm)
۱۴۲۸۷	۹/۰	۲/۳۰	۱۲
۱۶۴۰۸	۱۱/۰	۲/۷۰	۱۳
۱۸۷۶۶	۱۲/۰	۳/۱۰	۱۴
۲۱۳۳۵	۱۳/۰	۳/۳	۱۵



(ب)



(ج)



نمودار ۴-۶: نحوه تغییرات الف) دامنه جریان القایی، ب) میانگین جریان، ج) میدان الکتریکی بر حسب افزایش قطر استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

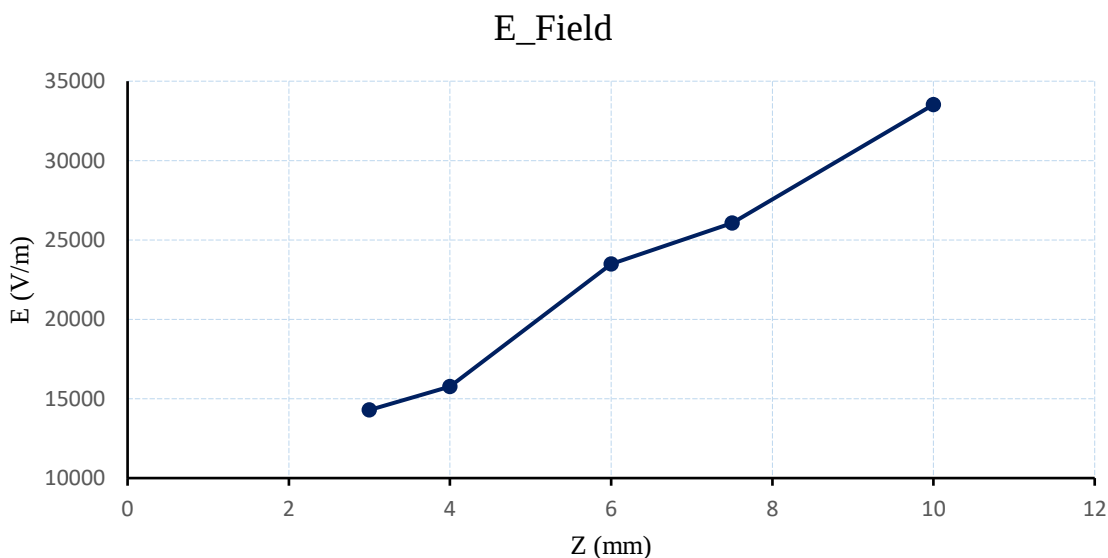
مطابق با نتایج بالا افزایش قطر استاتور موجب افزایش دامنه و میانگین جریان القایی می شود. اما از آن جایی که هندسه روتور کاملاً مشابه با استاتور است بنابراین قطر روتور نیز افزایش می یابد. با توجه به ضخامت روتور و جنس آن افزایش قطر روتور موجب ایجاد اثر وزن و کاهش سرعت موتور می شود، پس افزایش زیاد قطر استاتور و روتور برای GVM مناسب نمی باشد. بهترین قطر GVM ۱۲ تا ۱۴ سانتی متر می باشد.

۳-۳-۴ نتایج تاثیر افزایش ضخامت استاتور بر مقدار میدان الکتریکی

جهت کاهش اثر لبه و افزایش توزیع میدان الکتریکی بر سطح استاتور ضخامت استاتور افزایش یافته است، جدول (۴-۶) و نمودار (۴-۷) مقادیر و نحوه تغییرات میدان الکتریکی بر حسب افزایش ضخامت استاتور را نمایش می‌دهند.

جدول ۴-۶: مقادیر مختلف میدان الکتریکی بر حسب ضخامت استاتور

ضخامت استاتور (mm)	میدان الکتریکی (V/m)
۳	۱۴۲۸۷
۴	۱۵۷۶۹
۶	۲۳۴۸۱
۷/۵	۲۶۰۶۲
۱۰	۳۳۵۲۶



نمودار ۴-۷: تغییرات میدان الکتریکی بر حسب ضخامت استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

از نمودار بالا مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت استاتور باعث افزایش توزیع میدان الکتریکی در سطح استاتور می‌شود، اما مانند قسمت قبل باید به افزایش اثر وزن نیز توجه داشت.

۴-۴ نتایج بررسی اثر افزایش فاصله بین استاتور و روتور بر عملکرد

GVM

در این قسمت نتایج اثر افزایش فاصله بین روتور و استاتور بر قطر استاتور بر مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، بارالقایی بیشینه و اختلاف بارالقایی، دامنه جریان القایی، میانگین جریان و در نهایت میدان الکتریکی بررسی و سپس فاصله بهینه روتور و استاتور معرفی خواهد شد.

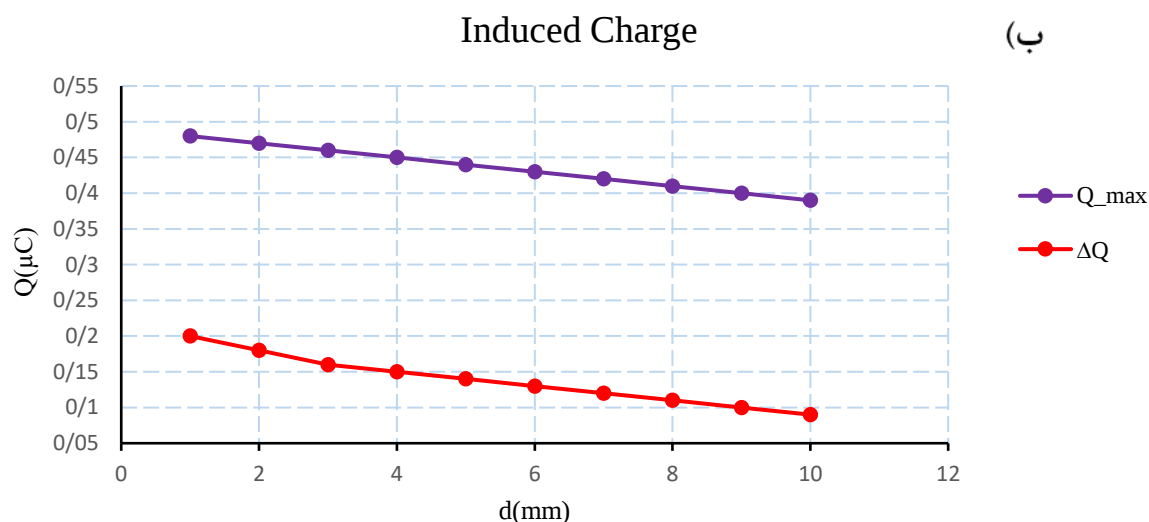
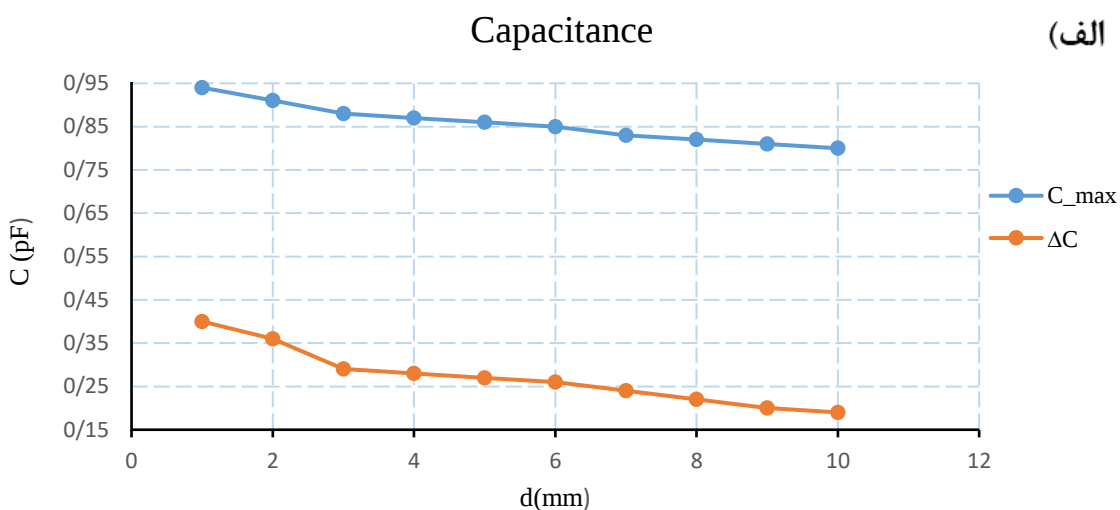
۴-۴-۱ نتایج بررسی اثر افزایش فاصله بین استاتور و روتور بر مقادیر

ظرفیت خازنی و بارالقایی

مقادیر و نحوه تغییرات ظرفیت خازنی بیشینه، اختلاف ظرفیت خازنی و بارالقایی بیشینه، اختلاف بارالقایی به ازای فواصل مختلف روتور و استاتور به ترتیب در جدول (۴-۷) و نمودار (۴-۸) آورده شده است.

جدول ۴-۷: مقادیر اختلاف ظرفیت خازنی و اختلاف بارالقایی به ازای فواصل مختلف روتور و استاتور

فاصله روتور و استاتور d (mm)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ظرفیت خازنی بیشینه (pF)	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۰
اختلاف ظرفیت خازنی (pF)	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۶۰	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۱۹
بار القایی بیشینه (μC)	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۳۹
اختلاف بارالقایی (μC)	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۹



نمودار ۴-۸: الف) نحوه تغییرات ظرفیت خازنی ب) نحوه تغییرات بار القایی به ازای فاصله‌ی بین روتور و استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

۴-۴-۲ نتایج بررسی اثر افزایش فاصله بین استاتور و روتور بر مقادیر دامنه

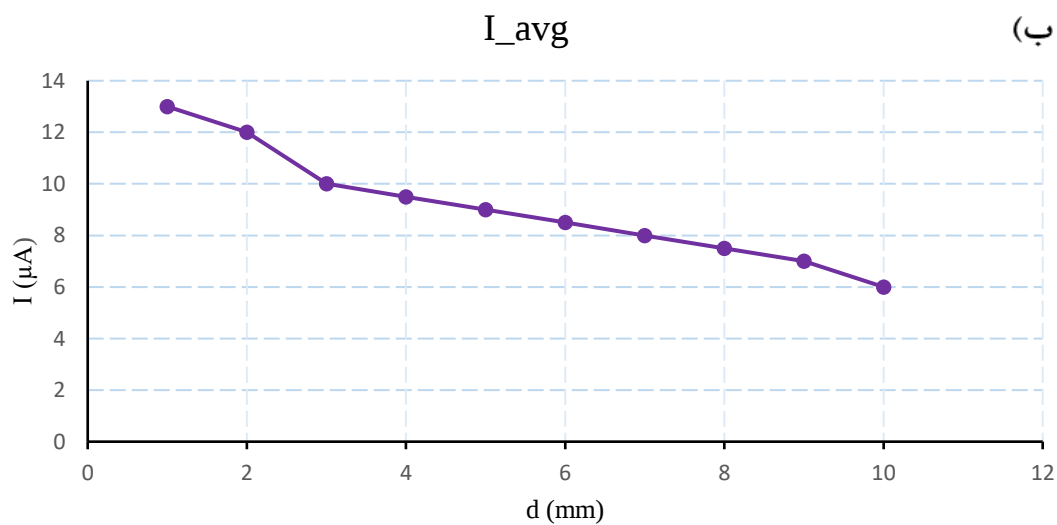
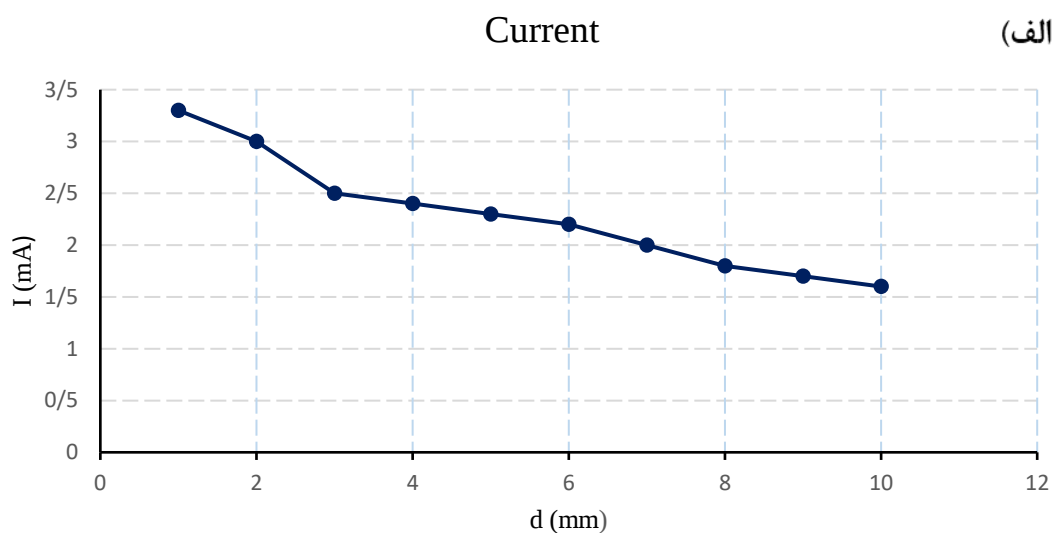
جریان القایی و میانگین جریان

مقادیر مختلف دامنه جریان القایی و میانگین جریان در جدول (۴-۸) و نحوه تغییرات آنها بر حسب

افزایش فاصله روتور و استاتور در نمودار (۴-۹) آورده شده است.

جدول ۴-۸: مقادیر مختلف دامنه جریان القایی و میانگین جریان بر حسب افزایش فاصله روتور و استاتور

فاصله روتور و استاتور d (mm)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
دامنه جریان القایی (mA)	۳/۳۰	۳/۰۰	۲/۵۰	۲/۴۰	۲/۳۰	۲/۲۰	۲/۰۰	۱/۸۰	۱/۷۰	۱/۶۰
میانگین جریان القایی (μA)	۱۳	۱۲	۱۰	۹/۵	۹	۸/۵	۸	۷/۵	۷	۶

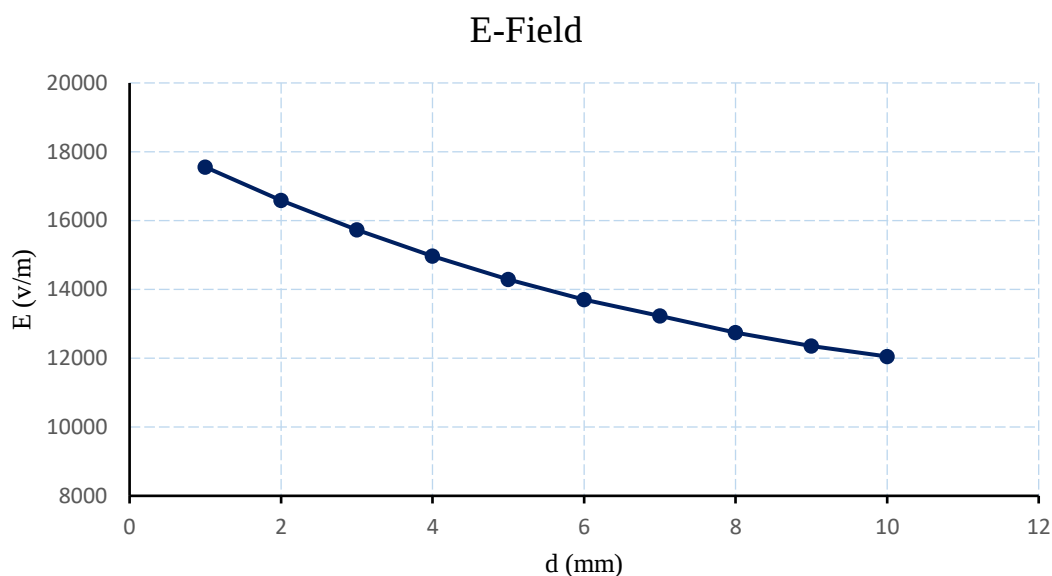


نمودار ۴-۹: الف) تغییرات دامنه جریان ب) تغییرات میانگین جریان بر حسب افزایش فاصله بین روتور و استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

۴-۳ نتایج بررسی افزایش فاصله روتور و استاتور بر مقدار میدان

الکتریکی یک سنسور

تغییرات مقدار میدان الکتریکی یک سنسور بر حسب افزایش فاصله روتور و استاتور در نمودار (۴-۱۰) نشان داده شده است.



نمودار ۴-۱۰: تغییرات میدان الکتریکی روی سطح یک سنسور بر حسب افزایش فاصله روتور و استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

با توجه به نتایج بدست آمده هر چه روتور به استاتور نزدیکتر باشد منجر به عملکرد بهتر GVM خواهد شد، اما در عمل این ممکن نیست زیرا با نزدیک شدن روتور به استاتور احتمال برخورد این دو حین چرخش روتور وجود دارد و موجب آسیب دیدن سیستم می شود. بنابراین بهترین فاصله برای روتور و استاتور ۲ تا ۴ میلی متر می باشد.

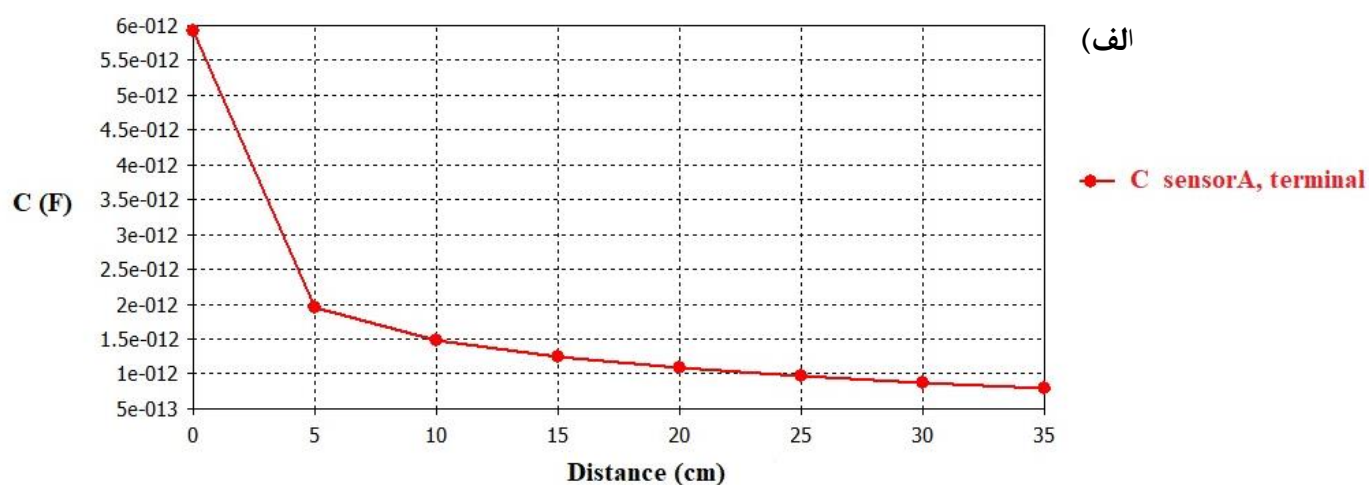
۴-۵ نتایج بررسی اثر افزایش فاصله پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده و

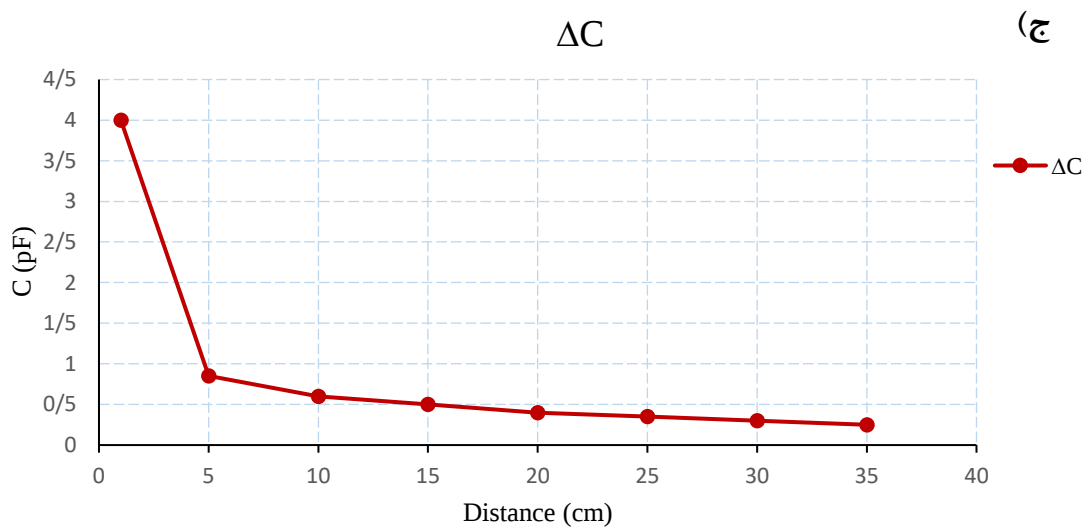
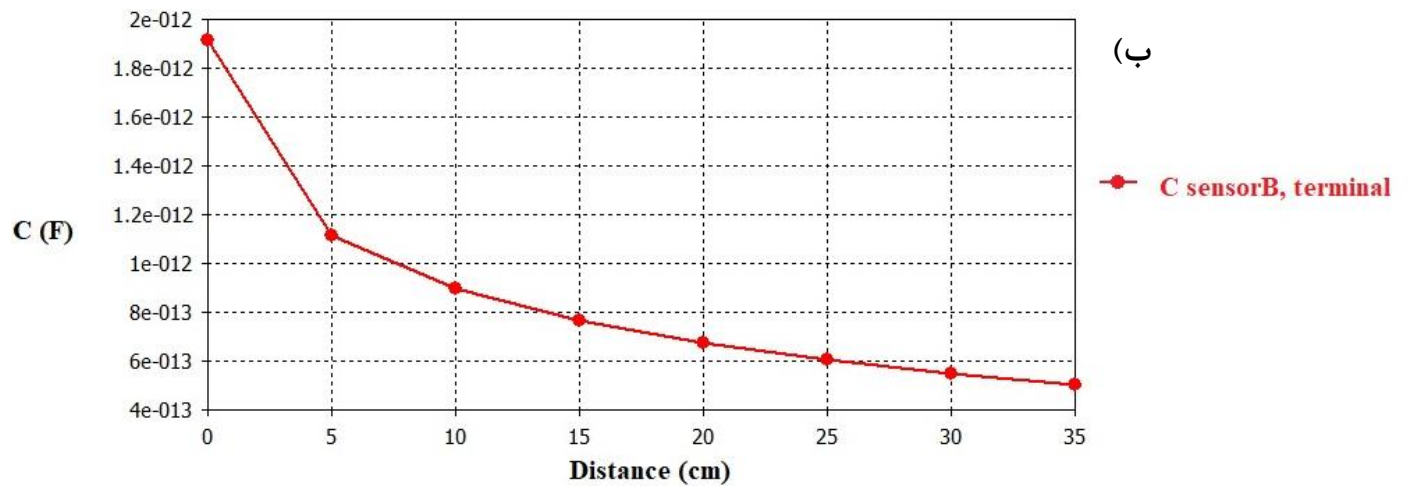
GVM بر عملکرد سیستم

در جدول (۹-۴) و نمودار (۱۱-۴) مقدارهای مختلف ظرفیت‌خازنی و تغییرات آن بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM نشان داده شده‌است.

جدول ۹-۴: مقدارهای مختلف ظرفیت‌خازنی بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM

فاصله GVM و پایانه ولتاژ شتاب‌دهنده (cm)	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵
ظرفیت‌خازنی بیشینه (pF)	۵/۹۱	۱/۹۵	۱/۵۵	۱/۲۵	۱/۱۰	۱/۰۰	۰/۹	۰/۸
ظرفیت‌خازنی کمینه (pF)	۱/۹۱	۱/۱۱	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۵۵
اختلاف ظرفیت‌خازنی (pF)	۴/۰۰	۰/۸۵	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۲۵





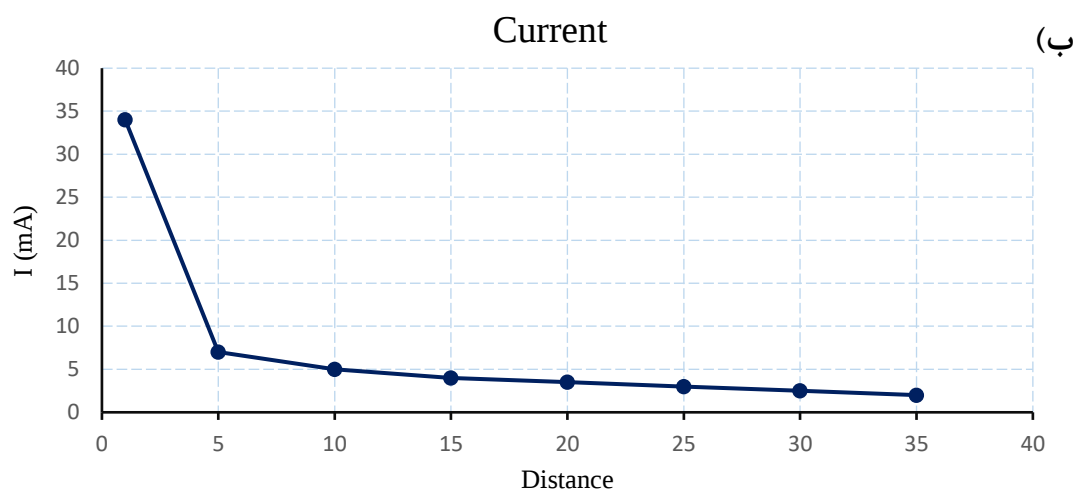
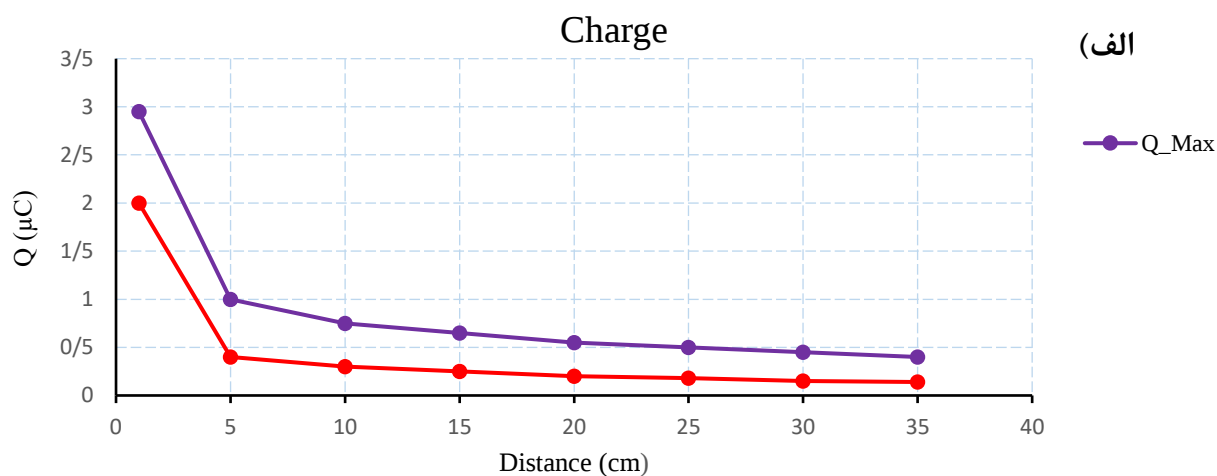
نمودار ۴-۱۱: تغییرات الف) ظرفیت خازنی بیشینه، ب) ظرفیت خازنی کمینه محاسبه شده توسط نرم افزار CST، ج) اختلاف ظرفیت خازنی بر حسب فاصله حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM (خطوط برای هدایت چشم است).

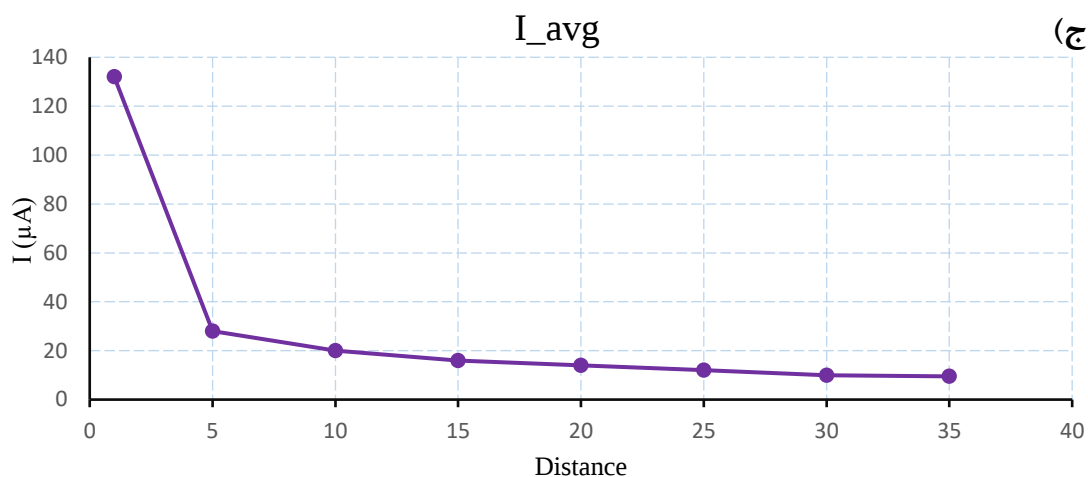
مقادیر مختلف و تغییرات بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و

GVM به ترتیب در جدول (۴-۱۰) و نمودار (۴-۱۲) آورده شده است.

جدول ۴-۱۰: مقادیر مختلف بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM

فاصله GVM و پایانه ولتاژ شتاب‌دهنده (cm)	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵
بار القایی بیشینه (μC)	۲/۹۵	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴۰
اختلاف بار القایی (μC)	۲/۰۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۲۰۰	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۴۰
دامنه جریان القایی (mA)	۳۴/۰	۷/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۳/۵۰	۳/۰۰	۲/۵۰	۲/۰۰
میانگین جریان القایی (μA)	۱۳۲	۲۸/۰	۲۰/۰	۱۶/۰	۱۴/۰	۱۲/۰	۱۰/۰۰	۹/۵





نمودار ۴-۱۲: تغییرات الف) بار القایی، ب) دامنه جریان، ج) میانگین جریان بر حسب فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM (خطوط برای هدایت چشم است.)

همانگونه که در نتایج بالا مشاهده می‌شود، هر چه پایانه ولتاژ بالا به GVM نزدیکتر باشد. سیستم عملکرد بهتری خواهد داشت. اما به دلیل زیاد بودن ولتاژ شتاب‌دهنده و جلوگیری از ایجاد پدیده کرونا باید فاصله پایانه ولتاژ بالا و GVM افزایش یابد. با توجه به گاز درون تانک شتاب‌دهنده که در شتاب‌دهنده مورد نظر که ترکیب CO_2 و N_2 با نسبت ۸۰ به ۲۰ است. ولتاژ شکست گاز به ازای هر ۳ کیلوولت تقریباً برابر ۱ میلی‌متر در فشار ۱ اتمسفر می‌باشد، فاصله بهینه پایانه ولتاژ بالا و GVM برابر ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد (ولتاژ شکست با توجه به هندسه رسانا و چگالی گاز قابل تغییر است با توجه به عدم تاثیر در فاصله بیشتر از این مقدار، فاصله بزرگتر از ۳۰ سانتی‌متر می‌تواند بر اساس سایر ملاحظات انجام گیرد [۵۱، ۵۲].

^{۹۱} ثابت گذردهی گازهای CO_2 و N_2 به ترتیب برابر است با ۱/۰۰۰۵۴ و ۱/۰۰۰۹۲ و همچنین این مقادیر با افزایش فشار گاز تغییر چشمگیری ندارد. بنابراین با توجه به نزدیک بودن این مقادیر با ضریب گذردهی هوا (۱/۰۰۰۵۳) در شبیه‌سازی‌ها محیط هوا در نظر گرفته شده است.

۴-۶ ساخت و آزمایش نمونه اولیه GVM

در ادامه بر اساس طراحی‌های انجام گرفته یک نمونه اولیه از GVM با همکاری تیم گروه پژوهشی شتابگرهای ذرات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی، ساخته شد و مورد آزمایش انجام گرفت. ابعاد GVM نمونه اولیه در جدول (۴-۱۱) آمده‌است.

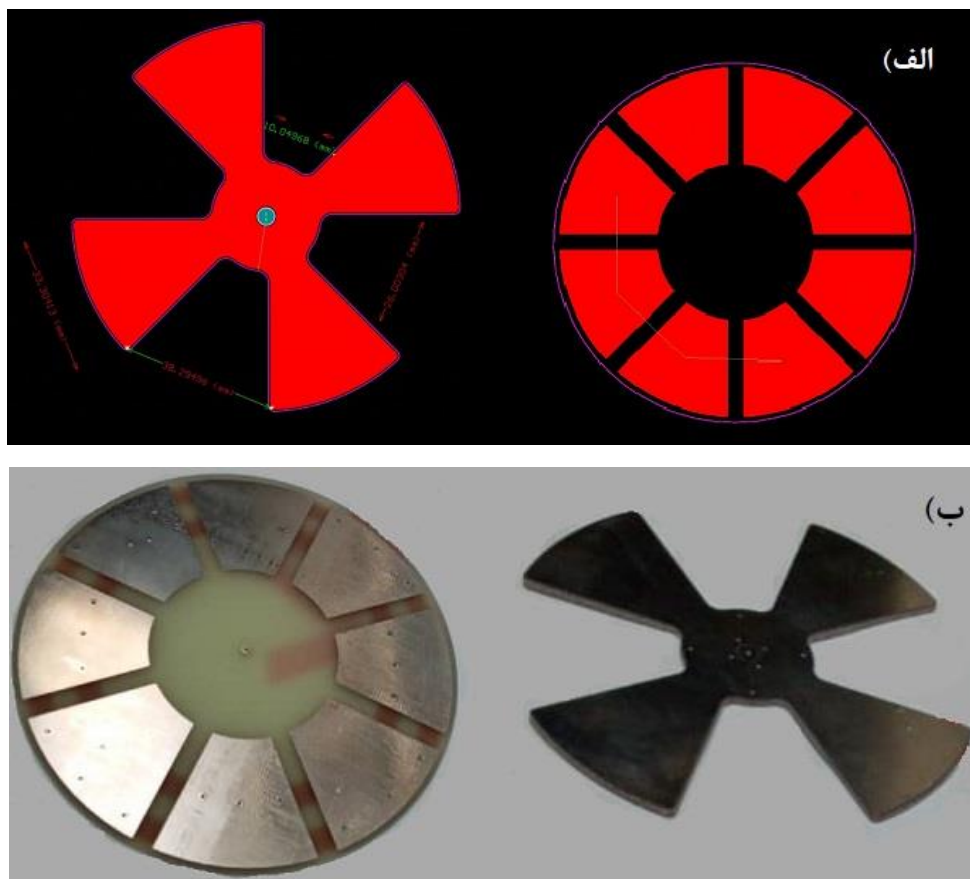
جدول ۴-۱۱: اطلاعات مکانیکی GVM اولیه

فاصله GVM با صفحه	تعداد قطاع‌های	جنس استاتور	فاصله استاتور و	ضخامت استاتور و	قطر استاتور و
ولتاژ بالا (cm)	استاتور	و روتور	روتور (mm)	روتور (mm)	روتور (cm)
۹	۸	مس	۵	۳	۹

به منظور ساخت GVM اولیه آن را در نرم‌افزار آلتیوم^{۹۲} طراحی کرده و سپس بر روی PCB^{۹۳} (صفحه مدار چاپی، که شامل لایه‌ای از مس که بر روی فایبر گلس قرار گرفته‌است می‌باشد) چاپ شده است. شکل (۴-۱) الف) استاتور و روتور طراحی شده در نرم افزار آلتیوم، ب) استاتور و روتور ساخته شده را نمایش می‌دهد.

^{۹۲} Altium Designer

^{۹۳} Printed Circuit Board

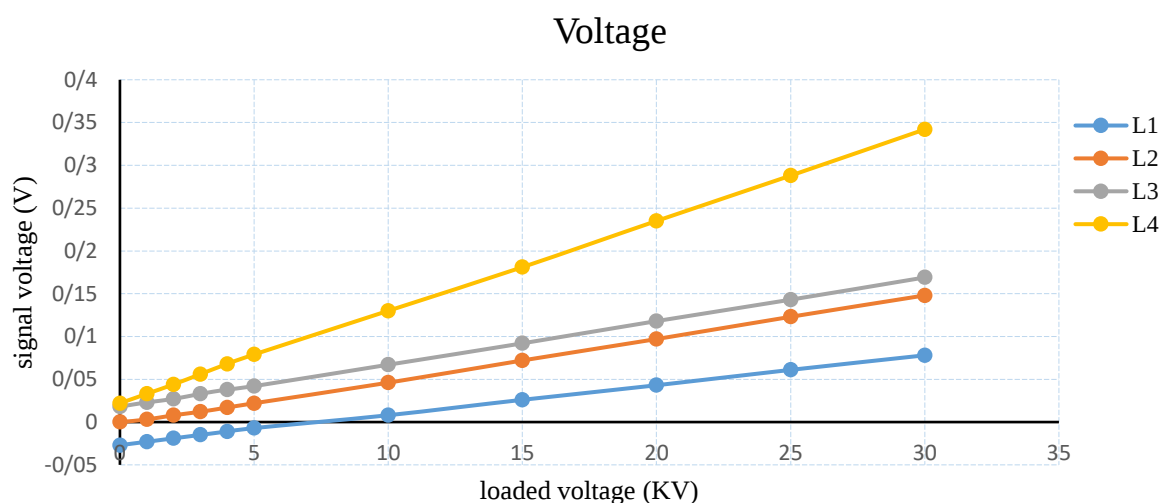


شکل ۴-۱: الف) روتور و استاتور طراحی شده در نرم افزار اتیوم ب) روتور و استاتور چاپ شده بر روی PCB

برای بررسی سیگنال خروجی از GVM دستگاه در چیدمان آزمایش شکل (۴-۲) قرار گرفته است. روتور توسط موتور DC با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه چرخانده می شود، با تشکیل یک خازن بین الکتروود سنسور دستگاه و صفحه فلزی که روی آن ولتاژ اعمال شده است، عملکرد GVM بررسی می شود. به همین منظور با تغییر ولتاژ اعمال شده به صفحه فلزی، ولتاژ خوانده شده توسط مدار GVM، با استفاده از ولت متر اندازه گیری شد. نحوه تغییرات ولتاژ اندازه گیری شده نسبت به ولتاژ وارد شده به صفحه در چهار فاصله مختلف GVM با صفحه، در نمودار (۴-۱۳) آورده شده است.



شکل ۴-۲: چیدمان آزمایش نمونه اولیه GVM

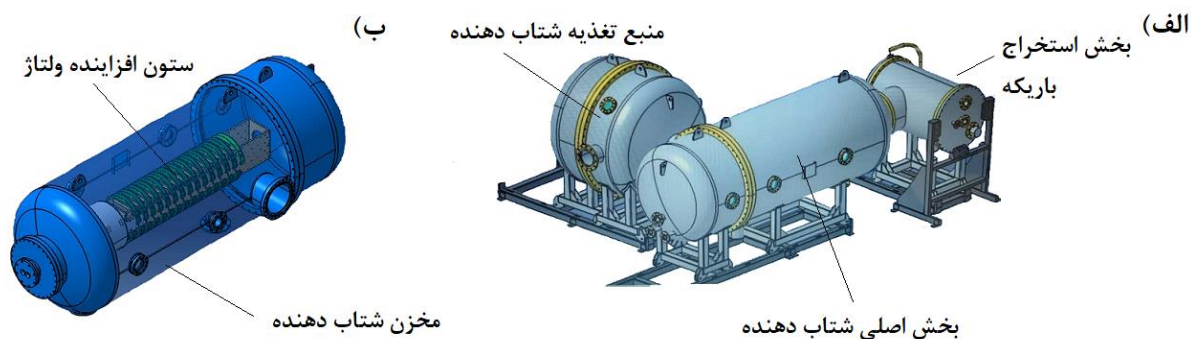


نمودار ۴-۱۳: تغییرات ولتاژ خوانده شده توسط GVM نسبت به ولتاژ وارد شده به صفحه (خطوط برای هدایت چشم است).
 با توجه به نمودار (۴-۱۳) ^{۹۴} تغییرات ولتاژ خوانده شده توسط GVM نسبت به ولتاژ وارد شده به صفحه
 بصورت خطی می باشد. بر اساس این نمودار خطی می توان دستگاه GVM را کالیبره ^{۹۵} نمود.

^{۹۴} منفی بودن بعضی از مقادیر در نمودار (۴-۱۳) به این علت است که ولتاژ ورودی به دستگاه منفی می باشد، همانگونه که مشاهده می کنید دستگاه به مقادیر منفی ولتاژ نیز حساس می باشد.
^{۹۵} لازم به ذکر است هیچ نمونه ساخته شده از GVM در ایران گزارش نشده است، و تنها نمونه موجود در ایران فقط در وان دوگراف تهران می باشد.
 هر ابزار مختص به همان سیستم کالیبره می شود، از این رو نمی توان آزمایش های مقایسه ای برای دو GVM انجام داد.

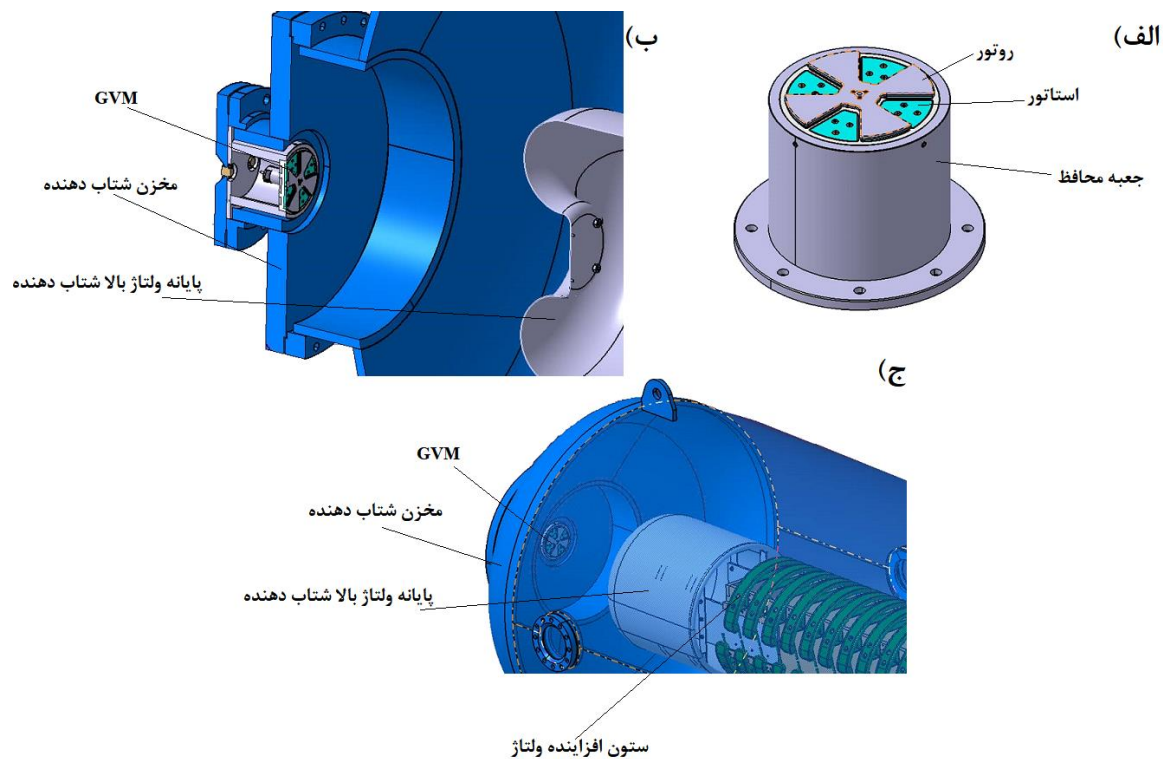
۴-۷ طراحی نمونه نهایی GVM برای شتاب‌دهنده مورد نظر

در استفاده از شتاب‌دهنده‌های ذرات باید توجه بسیاری به استانداردهای حفاظت در برابر پرتو داشت. امروزه شتاب‌دهنده‌های الکترونی با انرژی متوسط جهت اصلاح پلیمرها، استرلیزاسیون محصولات و تجهیزات پزشکی و بهداشتی، پرتودهی مواد غذایی و افزایش مدت ماندگاری، پرتودهی در صنایع کشاورزی و بسیاری از کاربردهای دیگر در صنعت به کار گرفته می‌شوند. با توجه به کاربردهای ذکر شده و کمبود سیستم های پرتودهی در کشور و نیاز روزافزون کشور به سامانه‌های پرتودهی، ساخت یک شتاب‌دهنده الکترونی با انرژی متوسط مورد توجه قرار گرفته و در این راستا طی چندسال اخیر به ساخت شتاب‌دهنده داینامیترون با انرژی ۱۵۰۰ کیلو الکترون ولت و توان ۲۵ کیلو وات پرداخته شده است. شکل (۴-۳) نمای کلی شتاب‌دهنده داینامیترون که شامل بخش‌های مختلفی مانند ستون افزایشنده، تیوب شتابدهی، بخش انتقال باریکه و حفاظ می‌باشد، را نمایش می‌دهد. بخش انتقال باریکه، خود از قسمت‌های متفاوتی شامل سیستم اندازه‌گیری ولتاژ، مغناطیس اسکن‌کننده، مغناطیس متمرکزکننده، پمپ خلأ، هورن، سیستم خنک‌کننده و متوقف‌کننده باریکه می‌باشد. در این شتاب‌دهنده باریکه الکترونی شتاب گرفته در انتهای مسیر وارد یک مغناطیس جاروب‌کننده می‌شود، که این مگنت باریکه را با فرکانسی مشخص در راستای افقی جاروب می‌کند. در نهایت باریکه الکترونی جاروب شده از پنجره خروجی هورن عبور کرده و به هدف در حال حرکت یا متوقف‌کننده باریکه برخورد می‌کند. هدف این پایان‌نامه طراحی سیستم اندازه‌گیری ولتاژ مناسب با هندسه شتاب‌دهنده بود که در ادامه طرح نهایی سیستم اندازه‌گیری ولتاژ GVM معرفی می‌شود.



شکل ۴-۳: الف) نمای بیرونی ب) بخش اصلی شتاب‌دهنده داینامیتر

مطابق با آنچه که از بررسی‌ها بدست آمد افزایش قطاع استاتور موجب افزایش دامنه جریان القایی می‌شود، همچنین میتوان با افزایش قطر استاتور و روتور دامنه جریان القایی و میانگین جریان را نیز افزایش داد. بنابراین استفاده از روش افزایش قطر برای افزایش جریان‌های القایی از نظر هندسی ساده‌تر می‌باشد. همچنین برای افزایش توزیع میدان در سطح استاتور می‌توان ضخامت استاتور و میزان خمیدگی لبه‌ها را افزایش داد. در بخش (۴-۳) مشاهده شد که هر چه روتور به استاتور نزدیکتر باشد میزان جریان‌های القایی نیز افزایش می‌یابد و در نهایت با توجه به گاز مخزن شتاب‌دهنده داینامیتر که گاز N_2CO_2 می‌باشد، فاصله پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده نسبت به ضریب شکست ولتاژ تنظیم می‌شود. با توجه به همه این پارامترها GVM نهایی مانند شکل (۴-۴) طراحی شده‌است. جدول (۴-۱۲) مشخصات مکانیکی سیستم را نمایش می‌دهد.

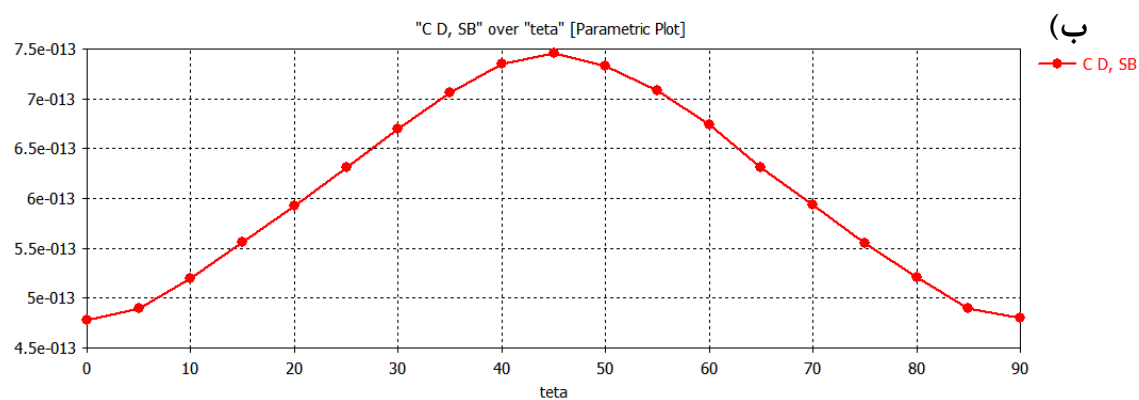
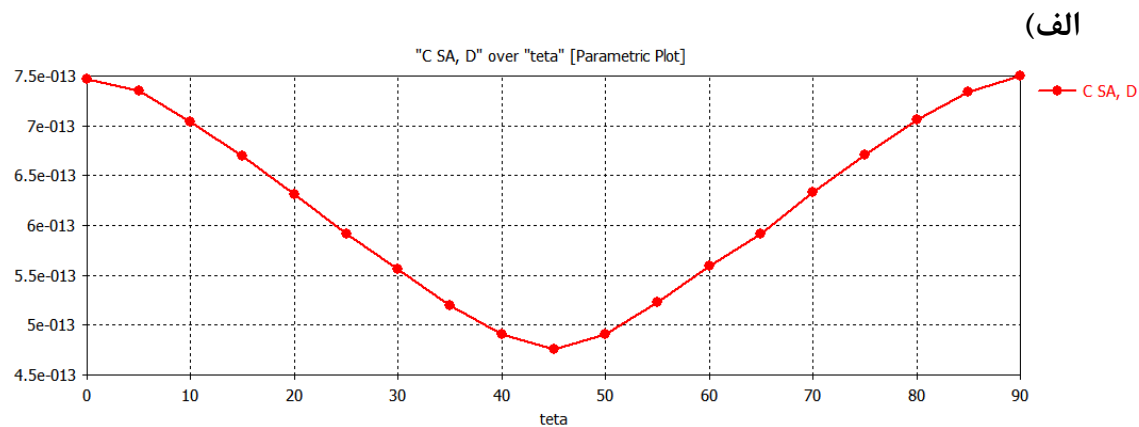


شکل ۴-۴: (الف) طرح نهایی GVM، (ب و ج) نحوه قرار گیری GVM مقابل پایانه ولتاژ بالا شتاب دهنده داینامیترون

جدول ۴-۱۲: 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

نحوه تغییرات ظرفیت خازنی دو سنسور A و B، GVM نهایی بر حسب زاویه روتور برای یک دوره تناوب در نمودار (۴-۱۴) و اثر پارامترهای فاصله روتور و استاتور، همچنین فاصله GVM با پایانه ولتاژ بالا (با فرض سرعت روتور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ولتاژ شتاب دهنده ۵۰۰ کیلوولت) در ادامه آورده شده است.

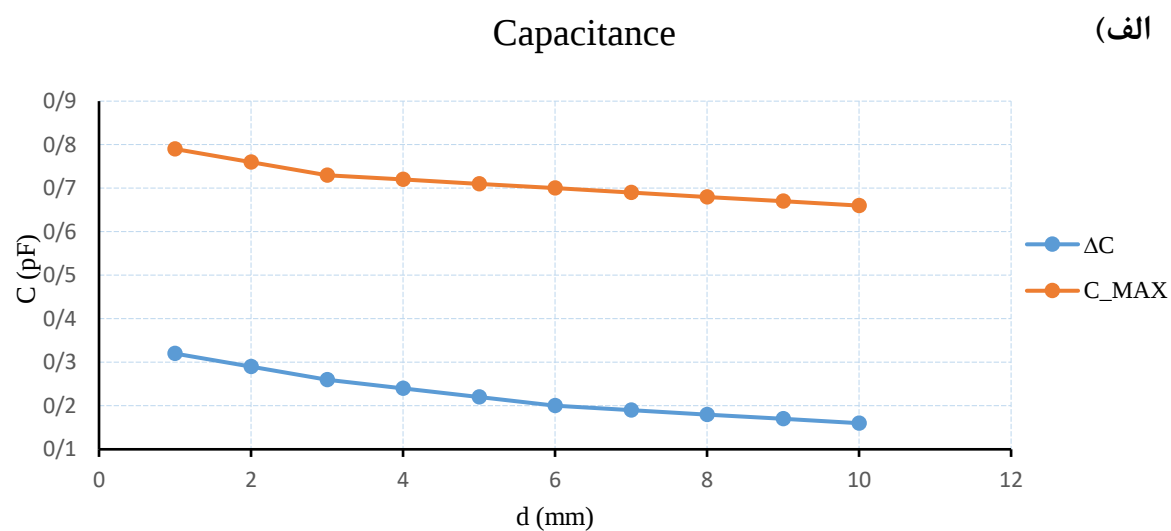


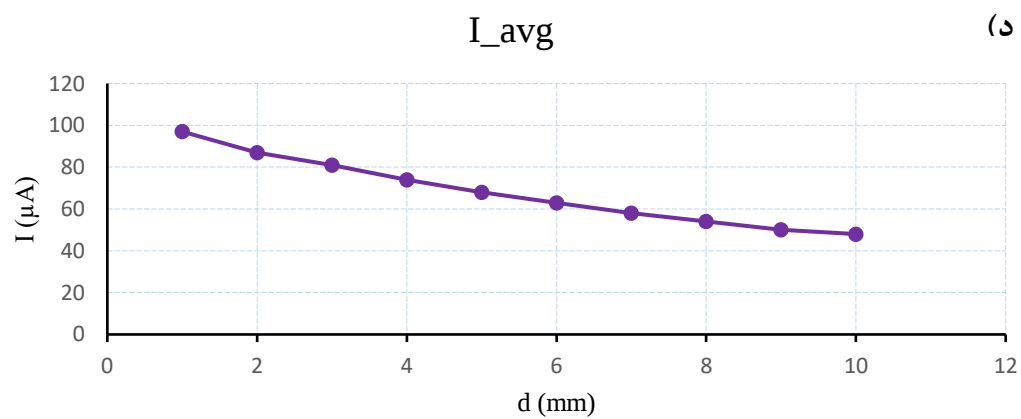
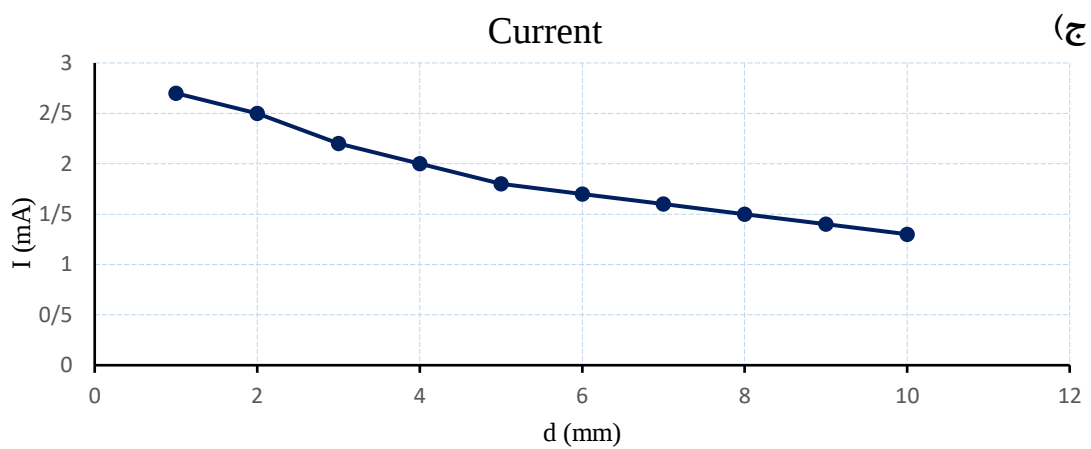
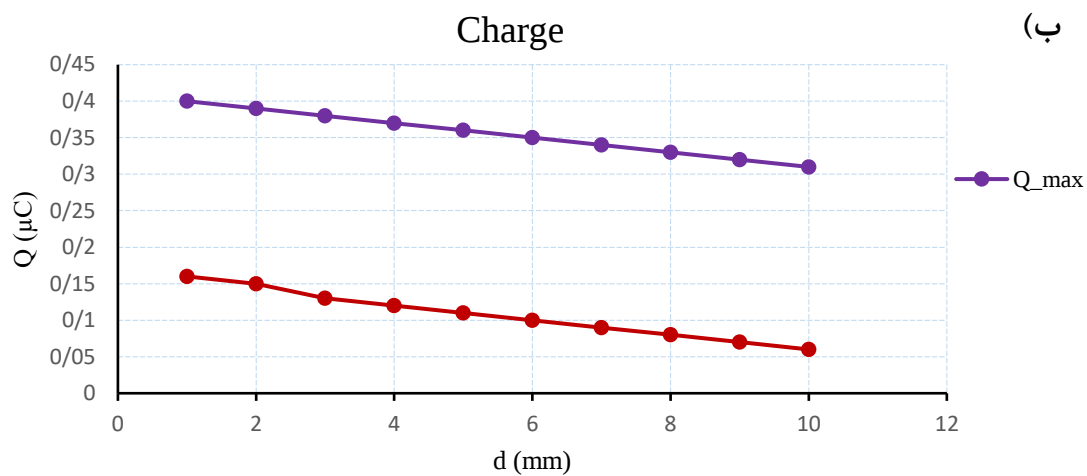
نمودار ۴-۱۴: تغییرات ظرفیت خازنی (الف) سنسور A و (ب) سنسور B در یک دوره تناوب (خطوط برای هدایت چشم است).

در جدول (۴-۱۳) و نمودار (۴-۱۵) مقادیر و نحوه تغییرات ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، بار القایی بیشینه و اختلاف بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان را برحسب فاصله روتور و استاتور را نمایش می‌دهد.

جدول ۴-۱۳: مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، بار القایی بیشینه و اختلاف بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان را برحسب فاصله روتور و استاتور

d (mm)	ظرفیت خازنی بیشینه (pF)	اختلاف ظرفیت- خازنی (pF)	بار القایی بیشینه (μC)	اختلاف بار القایی (μC)	دامنه جریان القایی (mA)	میانگین جریان القایی (μA)
۱	۰/۷۹	۰/۳۲	۰/۴۰	۰/۱۶	۲/۷	۱۱
۲	۰/۷۶	۰/۳۰	۰/۳۹	۰/۱۵	۲/۵	۱۰
۳	۰/۷۳	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۱۳	۲/۲	۸/۵
۴	۰/۷۲	۰/۲۴	۰/۳۷	۰/۱۲	۲/۰	۸
۵	۰/۷۱	۰/۲۲	۰/۳۶۰	۰/۱۱	۱/۹	۷
۶	۰/۷۰	۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۱۰	۱/۷	۶/۵
۷	۰/۶۹	۰/۱۹	۰/۳۴	۰/۰۹	۱/۶	۶
۸	۰/۶۸	۰/۱۸	۰/۳۳	۰/۰۸	۱/۵	۵
۹	۰/۶۷	۰/۱۷	۰/۳۲	۰/۰۷	۱/۴	۴/۵
۱۰	۰/۶۶	۰/۱۶	۰/۳۱	۰/۰۶	۱/۳	۴



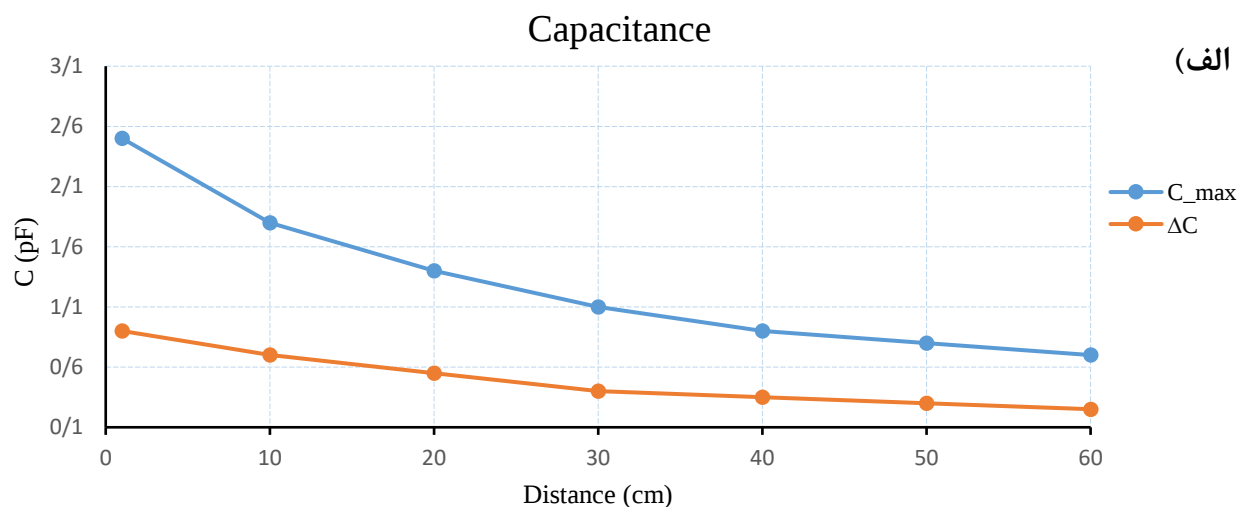


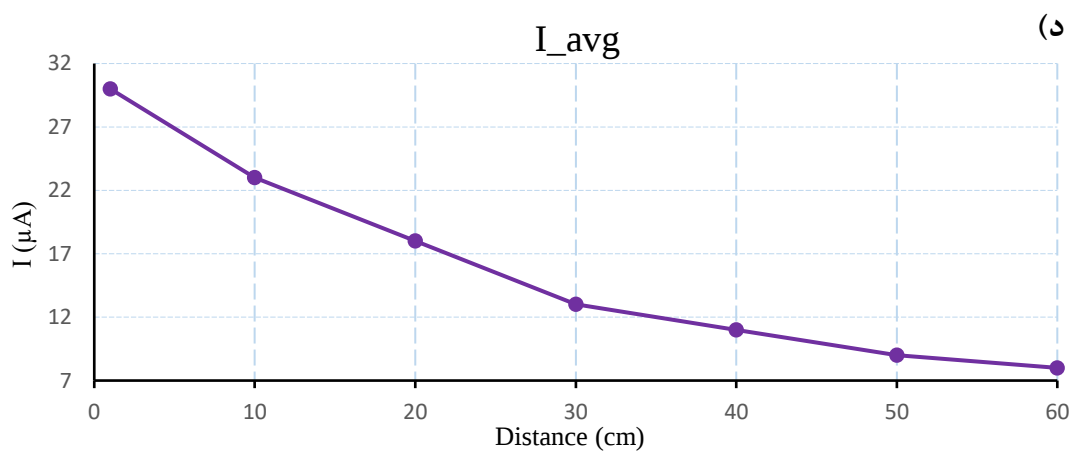
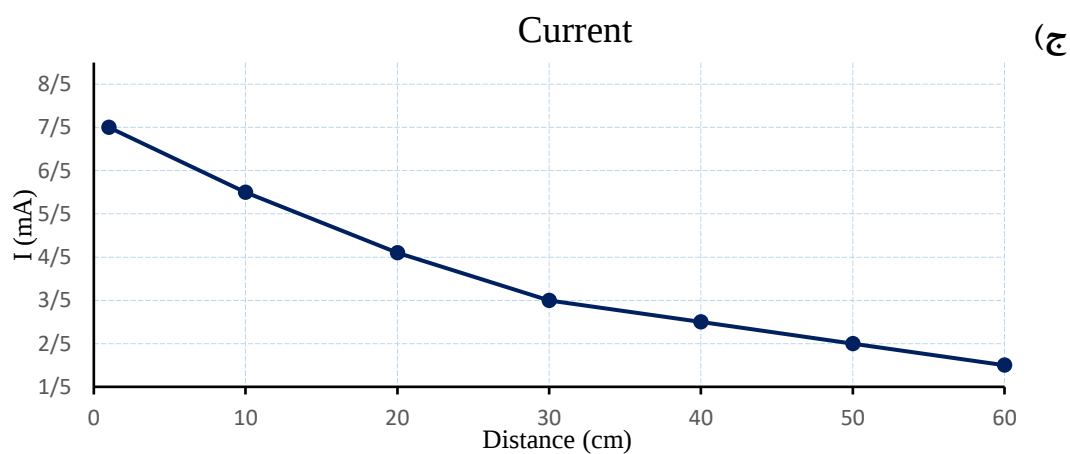
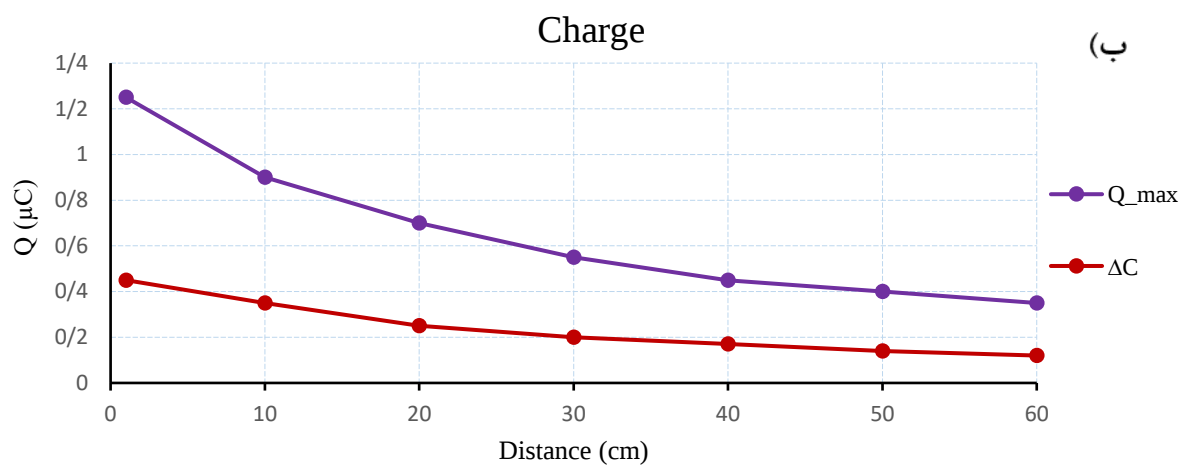
نمودار ۴-۱۵: الف) مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، ب) بار القایی بیشینه و اختلاف بار القایی، ج) دامنه جریان و د) میانگین جریان را برحسب فاصله روتور و استاتور (خطوط برای هدایت چشم است).

با توجه به نتایج بالا فاصله مناسب بین استاتور و روتور ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. در ادامه فاصله مناسب و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده معرفی می‌شود. جدول (۴-۱۴) و نمودار (۴-۱۶) مقادیر و نحوه تغییرات ظرفیت‌خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت‌خازنی، بار القایی بیشینه و اختلاف بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان را برحسب فاصله روتور و استاتور را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۴: مقادیر ظرفیت‌خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت‌خازنی، بار القایی بیشینه و اختلاف بار القایی، دامنه جریان و میانگین جریان را برحسب فاصله GVM و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده

D (cm)	ظرفیت خازنی بیشینه (pF)	اختلاف ظرفیت- خازنی (pF)	بار القایی بیشینه (μC)	اختلاف بار القایی (μC)	دامنه جریان القایی (mA)	میانگین جریان القایی (μA)
۱	۲/۵۰	۰/۹۰	۱/۲۵	۰/۴۵	۷/۵۰	۳۰
۱۰	۱/۸۰	۰/۷۰	۰/۹۰	۰/۳۵	۶	۲۳
۲۰	۱/۴۰	۰/۵۵	۰/۷۰	۰/۳۰	۴/۶۰	۲۰
۳۰	۱/۱۰	۰/۴۰	۰/۵۵	۰/۲۰	۳/۵۰	۱۳
۴۰	۰/۹۰	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۱۷	۳	۱۱
۵۰	۰/۸۰	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۱۴	۲/۵۰	۹
۶۰	۰/۷۰	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۱۲	۲	۸





نمودار ۴-۱۶: الف) مقادیر ظرفیت خازنی بیشینه و اختلاف ظرفیت خازنی، ب) بار القایی بیشینه و اختلاف بار القایی، ج) دامنه جریان و د) میانگین جریان را برحسب فاصله GVM و پایانه ولتاژ بالا شتاب‌دهنده (خطوط برای هدایت چشم است).

با توجه به اینکه گاز درون شتاب‌دهنده N_2 و CO_2 با نسبت ۸۰ به ۲۰ و ولتاژ شکست آن که به ازای تقریباً هر ۳ کیلو ولت ۱ میلی‌متر در فشار ۱ اتمسفر می‌باشد، فاصله مناسب حدود ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد [۵۱]. همچنین باتوجه به عدم تاثیر چشمگیر فاصله از ۳۰ سانتی‌متر به بعد بر نتایج، بنابراین فاصله بین پایانه ولتاژ و GVM با توجه به سایر ملاحظات حدود ۵۸ سانتی‌متر انتخاب می‌شود.

جمع بندی:

یکی از مهمترین قسمت‌های شتاب‌دهنده الکترواستاتیک اندازه‌گیری ولتاژ اعمالی به الکترودها و به تبع آن اندازه‌گیری انرژی باریکه می‌باشد، از طرفی با توجه به اینکه جریان خروجی از شتاب‌دهنده الکترواستاتیک بسیار اندک می‌باشد، باید در سیستم اندازه‌گیری ولتاژ، جریانی اتلاف نشود. بنابراین از روش GVM برای اندازه‌گیری ولتاژ شتاب‌دهنده استفاده شده‌است. این سیستم شامل دو قسمت اصلی استاتور و روتور می‌باشد و بر اساس اندازه‌گیری ظرفیت‌خازنی عمل می‌کند. در این پایان‌نامه با بررسی پارامترهایی نظیر تعداد قطاع‌های استاتور، قطر استاتور، ضخامت استاتور، فاصله روتور و استاتور و فاصله بین GVM و پایانه ولتاژ، GVM مطلوب برای شتاب‌دهنده مورد نظر (داینامترون) انتخاب شد. همچنین برای بهتر شدن عملکرد آن در سایر بهره‌بردارها از پیشنهادهایی که در ادامه آورده شده‌است می‌توان استفاده نمود.

پیشنهادهات:

۱. استفاده از GVM با استاتور ۱۰ قطاعی، جهت افزایش جریان القایی.
۲. استفاده از موتور براشلس بجای براش جهت کنترل سرعت چرخش روتور.
۳. افزایش مساحت استاتور جهت افزایش ظرفیت‌خازنی و بار القایی.

فهرست مراجع

- [1] Lee, S.Y., 2018. *Accelerator physics*. World scientific publishing.
- [2] Wiedemann, H., 2007. *Particle accelerator physics*. Vol. 314. Berlin: Springer.
- [3] Wangler, T.P., 2008. *RF Linear accelerators*. John Wiley & Sons.
- [4] Lawrence, E.O. and Livingston, M.S., 1932. The production of high speed light ions without the use of high voltages. *Physical Review*, 40(1), p.19.
- [5] Zarembo, S. and Kleeven, W., 2018. Cyclotrons: Magnetic Design and Beam Dynamics. *ArXiv preprint arXiv: 1804.08961*.
- [6] McMillan, E.M., 1945. The synchrotron—a proposed high energy particle accelerator. *Physical Review*, 68(5-6), p.143.
- [7] Bassaler, J.M., Capdevila, J.M., Gal, O., Lainé, F., Nguyen, A., Nicolai, J.P. and Umiastowski, K., 1992. Rhodotron: an accelerator for industrial irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 68(1-4), pp.92-95.
- [8] Pottier, J., 1989. A new type of RF electron accelerator: The Rhodotron. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 40, pp.943-945.
- [9] Takayama, K. and Briggs, R.J. eds., 2010. *Induction accelerators*. Springer Science & Business Media.
- [10] Humphries, S., 2013. *Principles of charged particle acceleration*. Courier Corporation.
- [11] Waghmare, N.M. and Argelwar, R.P., 2015. High voltage generation by using Cockcroft-Walton multiplier. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 4(2), pp.256-259.

- [12] Ruzbehani, M., 2017. A Comparative Study of Symmetrical Cockcroft-Walton Voltage Multipliers. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017.
- [13] Pathak, A., Lendo, K., Kumar, P., Tiwari, Sh., Sonune, R., 2017. Van De Graaff Generator for High Voltage DC Source and its Applications. *IJAREEIE*, 6(3), pp.1240-1245
- [14] Stock, R., 2009. *Encyclopedia of applied high energy and particle physics*. WILEY-VCH.
- [15] Esch, D., 2019. Derivecop of University Physics Volume2.
- [16] Herb, R.G., 1974. Pelletron accelerators for very high voltage. *Nuclear Instruments and Methods*, 122, pp.267-276.
- [17] Hinterberger, F., 2006. Electrostatic accelerators.
- [18] Hellborg, R., 2005. *Electrostatic accelerators*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [۱۹] آقایان، ع؛ مرادی، ح؛ ۱۳۹۴. طراحی و شبیه سازی شتابدهنده داینامیترن ۸۰۰ کیلوولتی با نرم افزار CST، پژوهش فیزیک ایران، شماره ۲.
- [20] Hildrerd Blewett, M, 1967. Charactellstics of Typical accelerators, *Rev. Nucl. Sci*, 427-468
- [21] Salimov, R.A., Cherepkov, V.G., Golubenko, J.I., Krainov, G.S., Korabelnikov, B.M., Kuznetsov, S.A., Kuksanov, N.K., Malinin, A.B., Nemytov, P.I., Petrov, S.E. and Prudnikov, V.V., 2000. DC high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 57(3-6), pp.661-665.
- [22] Korchagin, A., 2018. ELV Accelerators Are a Tool for Innovation. In *RuPAC-2018 Russian Particle Accelerator Conference NRC KI-IHEP PROTVINO* (pp. 261-263).
- [23] Bryazgin, A, et al, 2018. Industrial Electron Accelerator Developed at the Budker Institute of Nuclear Physics, physics- uspekhi, 6(6)
- [24] Naidu, M. S., 1995. *High Voltage Engineering* New York: McGraw-Hill.

- [25] Kuffel, E., 2000. *High Voltage Engineering*, Butterworth-Heinemann.
- [26] Ungureanu, C., 2014, Peak Voltage Measurements Using Standard Sphere Gap Method, *Hindawi*.
- [۲۷] کرباسچی، م، ۱۳۹۰، پایان‌نامه ارشد، طراحی و ساخت حسگر اندازه‌گیری ولتاژ قوی به روش الکترواپتیکی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی.
- [28] Lord Kelvin's electrostatic voltmeter, 1980, The Science Museum Group.
- [29] Recktenwald, G., 2012. Voltage Dividers and Potentiometers.
- [30] Rosa, E., 2003. High Voltage Resistive Dividers at Low Cost, ICECE.
- [۳۱] صادقیه ز، ۱۳۹۸. طراحی پایه سامانه اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی پایانه ولتاژ بالا در شتابدهنده‌های الکترواستاتیک، کنفرانس فیزیک ایران، ص ۹۹-۱۳۹۶، تبریز.
- [32] Tant, P., 2007. Design and Application of a Field Mill as a High-Voltage DC Meter, *IEEE*, 56(4).
- [33] Bateman, M.G, Stewart. M. F, et al., 2007. A Low-Noise, Microprocessor-Controlled, Internally Digitizing Rotating-Vane Electric Field Mill For Air Plat Forms, *Atmospheric And Oceanc Technology*, (24)
- [۳۴] صادقیه، ز؛ صالحی، م؛ ابراهیمی، ا؛ قاسمی، ف؛ ۱۳۹۸. طراحی مفهومی سیستم اندازه‌گیری ولتاژ بالا از طریق اندازه‌گیری میدان، کنفرانس ملی شتابگرهای ذرات و کاربردهای آن، تهران.
- [35] Kirkpatrick, P., 1932. A generating voltmeter for the measurement of high potentials. *Scientific Instruments*, 3(1), 1-8.
- [36] Trump, J.G., 1940. Generating Voltmeter for Pressure-Insulated High Voltage Sources, *AIP*, 11.

- [37] Polga, T., 1970. A Differential Generating Voltmeter, *Scientific Instruments*, 41, 1.
- [38] Shemyakin, A., Carlson, K., 2009. Stability of electron energy in the Fermilab Electron cooler, FERMILAB-Conf. Batavia, IL (United States).
- [39] Dhandapani, R., 1991. A Generating Voltmeter for the Measurement of the Terminal Voltage of the 2MV Tandem Accelerator, *India j. Phys*, 65A (5).
- [40] Rajta. I., 2018. Accelerator characterization of the New Ion Beam Facility at MTA Atomki in Debrecen, Hungary, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*.
- [41] Magina, F.C., 2016. Atmospheric Electric Field Sensors Network Integration in Brazil, *IEEE*, 14(7).
- [42] CS 110 Electric Field Meter Over View, Cambell Scientific.
- [۴۳] مستاجران، م؛ کاظمی، ف؛ حجازی، س؛ ۱۳۹۵. آموزش شبیه‌سازی ساختارهای الکترومغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار CST Studio Suite، انتشارات دانشگاه یزد، چاپ اول.
- [44] Electroma Genetic Simulation Solvers CST Studio Suite, Dassault Systemes, French Software Company, 1981.
- [45] Giao Trinh, N., 1980. Electronice Design for Testing in Uniform Field Gaps, *IEEE*.
- [46] Resnick, R, Halliday, D., 2002. Physics, Fifth Edition, Vol 2.
- [۴۷] حسنی نجف آبادی، ح؛ ۱۳۹۴. شناخت و خواص مواد، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، چاپ سوم.
- [۴۸] خلیج، غ؛ ریاحی، ا؛ ۱۳۹۲. شناخت فلزات، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، چاپ چهارم.
- [۴۹] پارسا، م؛ گل محله، ا؛ ۱۳۹۲. متالوژی عمومی و شناخت مواد صنعتی، چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، چاپ پنجم.

[۵۰] سلطان محمد، ب؛ سوایی، ا؛ ۱۳۹۸. دسته‌بندی، معرفی و مقایسه انواع موتورهای الکتریکی، مجله علمی ترویجی/انجمن مهندسان مکانیک/ایران، (۱۲۳).

[51] Meijer. S., 2006. Comparison of the Breakdown Strength of N₂, CO₂ and SF₆ using the Extended Up-and-Down Method, *IEEE*.

[52] Moriyoshi.T., 1993. Static Relative Permittivity of Carbon Dioxide and Nitrous Oxide up to 30MPa, *Verlagsgesellschaft mbH*, 97(4).

Abstract

In this study, one of the types of high voltage measurement methods called Generating Voltmeter (GVM) was investigated. Based on the mentioned method, the desired GVM was designed, simulated and constructed. The effect of parameters such as number of stators slots, material, diameter and thickness of stator and rotor blades, distance between stator and rotor surfaces, distance between stator and high voltage accelerator terminal surfaces, was investigated on operating conditions of the GVM using CST Studio Suite. Design, construction and calibration of a prototype GVM is one of the most important parts of the study. Finally, the desired GVM was designed for using in dynamitron.

Keywords: Electrostatic Accelerator, Dynamitron, Voltage Measurement, GVM Instrument.



**Faculty of Physics and Nuclear Engineering
MSc Thesis in Nuclear Physics**

**Design and Simulation of Electric Potential
Measurement System Using GVM Method for an
Electrostatic Accelerator**

By: Zahra Sadeghche

Supervisor:

Dr. Ehsan Ebrahimi Basabi

Dr. Farshad Ghasemi

Advisor:

Eng. Mohammad Salehi

February 2021