٢٧٥٤

٩٣٢٨٥

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک
گروه ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی و ساخت موتور الکترواستاتیکی دورانی

واحد اطلاعات و مدارک علمی
۱۳۸۷ /۲/ ۵

نگارنده
محمّد دادخواه تهرانی

با راهنمایی
دکتر یوسف حجّت

شهریور ۱۳۸۶

۹۲۲۰۵

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

آقای محمد دادخواه تهرانی پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان طراحی و ساخت موتور دور انی الکترو استاتیکی** در تاریخ ١٣٨٦/٦/١٤ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت وتولید پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر یوسف حجت	استادیار	
استاد ناظر	دکتر مجید محمدی مقدم	استادیار	
استاد ناظر	دکتر مصطفی محمدیان		
استاد ناظر	دکتر محسن بهرامی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر مجید محمدی مقدم	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاستهای پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عنوان‌های پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها/ رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و **استاد راهنما** و **نویسنده** مسئول مقاله باشند.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی به صورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود، باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و براساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسید و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

تقدیم به او که همواره در کوره راههای تاریک و سرد تنهایی و سردرگمی ، آغوش گرمش پذیرای دل‌تنگی‌هایم بوده است ...

و به او که لحظه لحظه‌های عمرم آذین‌بسته از خودگذشتگی‌های بی انتهای اوست...

تقدیم به مادرم

مهربان‌ترین فرشته دنیای کودکانه دیروز و نیروبخش‌ترین مفهوم دنیای امروز و فردای زندگی‌ام...

تشکر و قدر دانی

در اینجا لازم می‌دانم که از زحمات دکتر حجت که به عنوان استاد راهنما، من را در انجام هرچه بهتر این پروژه یاری کردند تشکر و قدردانی نمایم. بی شک بدون راهنمایی‌ها و حمایت‌های ایشان به سرانجام رسیدن این پروژه امکان‌پذیر نبود. همچنین از مساعدت‌ها و همکاری‌های مهندس مدبری‌فر، که در تمام مراحل انجام پروژه به من یاری رساندند، کمال تشکر را دارم.

بدیهی است که در راه انجام هر فعالیتی افراد زیادی همکاری می‌نمایند. ولی همواره نقش خانواده در این راه بسیار پررنگ است. بر خود واجب می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ مادرم در این سال‌ها تشکر کنم و به خاطر ناملایماتی که در این سالها به خاطر من متحمل شده است از او عذر خواهی نمایم. همچنین از خواهرها و برادرم که در به سرانجام رساندن این پروژه به من یاری رساندند، تشکر می‌کنم.

چکیده

موتورهای الکتریکی از پرکاربردترین و شناخته شده ترین قطعات صنعتی هستند. انواع گوناگونی از موتورهای الکتریکی شناخته شده اند که مهمترین آنها موتورهای الکتریکی معمولی DC و AC می‌باشند. با این وجود موتورهای جدیدتری نیز طراحی و ساخته شده اند که از آن جمله می‌توان به موتورهای پیزوالکتریکی اشاره کرد که چندی است به مرحله تجاری شدن نیز وارد شده است. یکی از جدیدترین نوع موتورهای الکتریکی که مورد توجه قرار گرفته اند موتورهای الکترواستاتیکی هستند. این موتورها نسبت به انواع دیگر موتورها دارای پیچیدگی و هزینه کمتری هستند و به راحتی تولید می‌شوند. مزیت اینگونه موتورها این است که با کوچک تر شدن ابعاد نتیجه کار بهتر می‌شود. در واقع به علت اینکه نیروها و بارهای این گونه موتورها از بعد میکرون هستند، در نتیجه هر چه ابعاد موتور کوچکتر شده و به ابعاد میکرون نزدیکتر شود، نتایج بهتری حاصل می‌شود.

در این پایان نامه، مراحل طراحی و ساخت یک موتور الکترواستاتیک دورانی با یاتاقان هوایی تشریح شده و پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این موتور، روتور دیسکی از جنس پلکسی گلاس، با قطر ۳۸ میلی متر و ضخامت یک میلیمتر می‌باشد و برای کم-کردن اصطکاک بین روتور و استاتور از یک یاتاقان هوایی ابتکاری استفاده شده است.

کلمات کلیدی: موتور الکترواستاتیک، میدان الکتریکی متحرک، القای الکترواستاتیکی، یاتاقان بادی، موتور سنکرون

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱- تاریخچه ۱

۱-۲- تعریف مسأله ۶

۱-۳- ترتیب ارائه مطالب ۶

فصل ۲ بررسی انواع موتورهای الکتریکی ۸

۲-۱- موتورهای الکتریکی ۹

۲-۲- موتورهای الکترومغناطیسی ۱۰

۲-۲-۱- انواع موتورهای الکترومغناطیسی ۱۲

۲-۲-۲- مزایا ۱۲

۲-۲-۳- معایب ۱۳

۲-۳- موتورهای پیزوالکتریکی ۱۴

۲-۳-۱- مزایا ۱۷

۲-۳-۲- معایب ۱۷

۲-۴- موتورهای الکترواستاتیک ۱۸

۲-۴-۱- موتورهای حرکت لبه ای ۱۹

۲-۴-۲- موتورهای حرکت از بالا ۲۰

۲-۴-۳- موتورهای هارمونیک ۲۱

۲-۴-۴- موتورهای خطی الکترواستاتیکی ۲۳

۲-۴-۵- مزایا ۲۳

۲-۴-۶- معایب ۲۵
۲-۴-۷- مشکلات ساخت ۲۶
فصل ۳ مفاهیم پایه و معادلات حاکم ۲۷
۳-۱- شبیه سازی توزیع پتانسیل الکتریکی و شدت میدان الکتریکی ۲۸
۳-۱-۱- تقریب های مرتبه اول ۳۰
۳-۱-۲- روش بار جانشین(تقریب چند بار خطی) ۳۵
۳-۱-۳- حل معادله لاپلاس ۴۰
۳-۱-۴- شبیه سازی توزیع پتانسیل و شدت میدان الکتریکی به روش المان محدود ۴۳
۳-۲- باردارکردن مواد عایق ۴۷
۳-۳- تولید گشتاور ۵۶
فصل ۴ طراحی و ساخت اجزا تشکیل دهنده موتور ۶۱
۴-۱- روتور ۶۲
۴-۲- استاتور ۶۳
۴-۳- یاتاقان هوایی ۶۶
۴-۴- بدنه نگهدارنده ۶۸
۴-۵- اسمبل کردن مجموعه موتور ۷۰
۴-۶- برنامه کنترل موتور ۷۱
۴-۶-۱- آشنایی کلی با نرم افزار *LabVIEW* و برنامه استفاده شده جهت تولید سیگنال ۷۲
۴-۶-۲- طراحی نرم افزار کنترل موتور ۷۳
۴-۷- مبدل دیجیتال به آنالوگ(**A/D**) ۷۵

۴-۸- تقویت کننده ها ۷۷
۴-۹- کمپرسور هوا و رگلاتور ۷۸
۴-۱۰- دوران سنج ۸۰
۴-۱۱- جریان سیگنال و هوای فشرده ۸۱
۴-۱۲- سیگنال های خروجی بدست آمده ۸۴
فصل ۵ آزمایشات و بررسی نتایج ۸۷
۵-۱- رابطه تجربی بین سرعت موتور و سرعت میدان ۸۸
۵-۲- روش تحریک روتور ۹۰
۵-۳- روشهای ایجاد نیروی گردشی روتور ۹۲
۵-۴- زمان شارژ اولیه ۹۳
۵-۵- شتاب ۹۵
۵-۶- تاثیر نویز و اغتشاشات بر عملکرد موتور ۹۶
۵-۷- چگونگی کنترل سرعت موتور ۹۷
۵-۸- کنترل گشتاور خروجی موتور ۹۸
۵-۹- تخمین گشتاور خروجی موتور ۹۸
۵-۱۰- مبنای طراحی ۱۰۰
فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۲
۶-۱- نتیجه گیری ۱۰۲
۶-۲- پیشنهادات ۱۰۴
فهرست منابع ۱۰۶

فهرست اشکال

شکل (۱ - ۱) دستگاه ساخته شده توسط فرانکلین ۲

شکل (۱ - ۲) نمونه ای از دستگاههای الکترواستاتیک ۳

شکل (۱ - ۳) موتور الکترواستاتیکی پیشنهادی *bollee [6]* ۴

شکل (۱ - ۴) موتور دورانی ساخته شده توسط *Higuchi* و همکارانش*[18]* ۵

شکل (۲ - ۱) نمونه ای از موتور الکترواستاتیک ۱۰

شکل (۲ - ۲) نمونه ای از موتور الکترومغناطیسی*[25]* ۱۱

شکل (۲ - ۳) نمونه ای از میکروموتور الکترومغناطیس *[25]* ۱۳

شکل (۲ - ۴) مبنای کار موتورهای با موج متحرک [۴] ۱۵

شکل (۲ - ۵) سیستم حرکتی موتور با حرکت کرمی شکل [۴] ۱۶

شکل (۲ - ۶) اساس کار موتورهای اصطکاکی [۴] ۱۶

شکل (۲ - ۷) نیروی حاصل از قانون کولن*[17]* ۱۹

شکل (۲ - ۸) نمونه ای از موتور الکترواستاتیکی مدل حرکت از بالا*[25]* ۲۱

شکل (۲ - ۹) نمونه ای از موتور الکترواستاتیکی مدل هامونیک*[17]* ۲۲

شکل (۲ - ۱۰) نمونه هایی از موتورهای خطی الکترواستاتیکی*[17]* ۲۳

شکل (۲ - ۱۱) ولتاژ جرقه نسبت به فاصله بین الکترودها*[21]* ۲۴

شکل (۳ - ۱) یک سری الکترودهای استوانه ای موازی که یک ولتاژ سه فاز به آنها اعمال شده است ۲۹

شکل (۳ - ۲) ترتیب بارهای خطی استفاده شده برای تقریب میدان در حال گذر غیر یکسان*[20]* ۳۱

شکل (۳ - ۳) تقریب میدان غیر یکنواخت در حال گذر بوسیله بارهای خطی جانشین*[20]* ۳۶

شکل (۳ - ۴) تغییرات چگالی بار خطی $q_1 - q_5$ بارهای خطی جانشین مستقر شده داخل فاز u الکترود در طول یک سیکل*[20]* ۳۹

شکل (۳ - ۵) توزیع پتانسیل بالای سطح الکتریک پانل برای یک موج سینوسی در *t=0* (*V=500v*، *P=0.4mm*) ۴۱

شکل (۳ - ۶) نمای شماتیک لبه الکترودهای ۶ فاز که نشان دهنده گام موج ولتاژ در *(Va) ωπ=0* و $2/6$ سیکل بعدی*(Vc)* و جمع پتانسیل های ۶ فاز است*[20]* ۴۲

شکل (۳ - ۷) نمای غیر یکنواختی پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در سطح مقطع الکتریک پانل با گام الکترودهای ۰/۴ میلی متر در دو فضا با ضریب گذردهی های متفاوت در زمان $\omega t = 0$ ۴۴

شکل (۳ - ۸) نمای غیر یکنواختی پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در سطح مقطع الکتریک پانل با گام الکترودهای ۰/۴ میلی متر در دو فضا با ضریب گذردهی های متفاوت در زمان $\omega t = 2\pi/3$ ۴۵

شکل (۳ - ۹) کاهش نمایی در پتانسیل الکتریکی در جهت عمودی از روی یک الکترود نمونه ۴۵

شکل (۳ - ۱۰) مجموع پتانسیل ها در فاصله ۰/۴ میلیمتری بالای الکترودها و جهت حرکت آنها در دو فاصله زمانی $\omega t = 0$ (چپ) و $\omega t = 2\pi/3$ (راست) ۴۶

شکل (۳ - ۱۱) مدلهای مواد در مقیاس ماکروسکوپی *a*)ماده غیر قطبی *b*)ماده قطبی[۲] ۵۱

شکل (۳ - ۱۲) جسم عایق در معرض میدان الکتریکی E_a *a*) کل بار *b*) بار خالص[۲] ۵۳

شکل (۳ - ۱۳) منحنی القا و تخلیه بار بر روی شیشه*[19]* ۵۷

شکل (۳ - ۱۴) *a*) چیدمان بارها بر اثر میدان الکتریی *b*) نیروی به وجود آمده در اثر جابجایی الکترودها ۵۸

شکل (۴ - ۱) تصویر روتور مورد استفاده ۶۳

شکل (۴ - ۲) تصویر شماتیک از الکترودها و ولتاژهای مورد استفاده ۶۴

شکل (۴ - ۳) بورد استفاده شده در موتور ۶۵

شکل (۴ - ۴) محفظه ساخته شده برای یاتاقان هوایی ۶۷

شکل (۴ - ۵) طرح *CAD* بدنه طراحی شده در نرم افزار *Inventor* ۶۸

شکل (۴ - ۶) بدنه مورد استفاده برای موتور ۶۹

شکل (۴ - ۷) تصویر شماتیک موتور طراحی شده ۷۰

شکل (۴ - ۸) مجموعه ساخته شده برای آزمایشات ۷۱

شکل (۴ - ۹) دیاگرام سیم کشی و المان های مورد استفاده در فایل تولید سیگنال ۷۳

شکل (۴ - ۱۰) نمایی از برنامه کنترل موتور ۷۵

شکل (۴ - ۱۱) نمایی از کارت *A/D* و ترمینال آن ۷۶

شکل (۴ - ۱۲) تصویر دستگاههای تقویت کننده و اسیلوسکوپ ۷۸

شکل (۴ - ۱۳) تصویر کمپرسور هوای استفاده شده ۷۹

شکل (۴ - ۱۴) رگلاتور مورد استفاده در آزمایشات ۷۹

شکل (۴ - ۱۵) تصویر دوران سنج استفاده شده ۸۱

شکل (۴ - ۱۶) .بلوک دیاگرام جریان سیگنال از کامپیوتر تا *HVA* ۸۲

شکل (۴ - ۱۷) جریان سیگنال بین المانهای سیستم طراحی شده ۸۲

شکل (۴ - ۱۸) دیاگرام جریان سیگنال و هوا ۸۳

شکل (۴ - ۱۹) مجموعه آزمایشگاهی آماده شده برای آزمایشات ۸۴

شکل (۴ - ۲۰) پروفیل سیگنال سینوسی با بزرگی دامنه ۷۰۰ ولت در فرکانس ۱ هرتز ۸۵

شکل (۴ - ۲۱) پروفیل سیگنال دندانه اره ای با بزرگی دامنه ۷۰۰ ولت در فرکانس ۱ هرتز ۸۵

شکل (۴ - ۲۲) پروفیل سیگنال معکوس دندانه اره ای با بزرگی دامنه ۷۰۰ ولت در فرکانس ۱ هرتز ۸۶

شکل (۴ - ۲۳) پروفیل سیگنال مربعی با بزرگی دامنه ۷۰۰ ولت در فرکانس ۱ هرتز ۸۶

شکل (۵ - ۱) نمودار سرعت دوران روتور نسبت به فرکانس سیگنال اعمالی ۸۹

شکل (۵ - ۲) نمودار حداکثر سرعت دورانی در ولتاژهای مختلف برای دو نوع سیگنال ۹۱

شکل (۵ - ۳) نمودار نشان دهنده پارامتر حداکثر سرعت دورانی ۹۲

شکل (۵ - ۴) نمودار حداکثر سرعت دورانی در ولتاژهای مختلف برای دو حالت مختلف ۹۳

شکل (۵ - ۵) نمودار حداکثر سرعت دورانی برای زمانهای شارژ مختلف ۹۴

شکل (۵ - ۶) نمودار حداکثر سرعت دوران بر حسب شتاب حرکت ۹۶

فهرست جداول

جدول (۳ - ۱) ماکزیمم درصدخطای ε_{max} درهرسطح الکترود زمانی که سری های ابتدایی ۲۴ تایی در مورد *b/d=1* استفاده می شوند*[20]* ۳۸

جدول (۳ - ۲) مکانیزم های ایجاد قطبی شدگی در عایقها[۲] ۴۹

جدول (۳ - ۳) ضریب گذردهی نسبی مواد عایق[۱] ۵۶

فهرست علائم اختصاری

نشانه	توضیحات	واحد
λ	گام الکترودها	m
σ	چگالی بار سطحی	C/m^2
v	سرعت	m/sec
ε_0	ضریب گذردهی نسبی	-
χ_e	پذیرندگی الکتریکی ماده عایق	-
ε_{max}	ماکزیمم انحراف	-
ε_s	ضریب گذردهی ساکن محیط	-
τ	گشتاور موتور	N.m
ω	سرعت زاویه ای	Rad/sec
d	فاصله بین دو سطح	m
D	چگالی شار الکتریکی	v/m
dp	گشتاور دو قطبی	C.m

نشانه	توضیحات	واحد
E	بزرگی میدان الکتریکی	v/m
f	فرکانس	Hz
F_N	نیروی کولن	N
f_v	فرکانس سیگنال اعمالی	Hz
I	جریان	A
l_i	جابجایی بارها در امتداد برداری	m
N	تعداد فازها	-
N_e	تعداد الکترون در واحد حجم	$(m^3)^{-1}$
n_r	تعداد الکترودها	-
p	فاصله بین الکترودها	m
P	بردار قطبی شدگی الکتریکی	C/m^2
P_c	توان مصرفی موتور	N.m/s
P_e	توان خروجی موتور	N.m/s

نشانه	توضیحات	واحد
q	چگالی بار خطی	C/m
Q	بار الکتریکی کل	C
R	شعاع نقاط چک	m
R_0	شعاع دوایر تخصیصی	m
R_E	سرعت دوران روتور	rpm
S	سطح خازنی در قانون کولن	m^2
t	زمان	sec
u	چگالی بار	C/m^2
U	پتانسیل فاز متناسب یک نقطه	v
V	پتانسیل	v
x	مختصات در راستای x	m
y	مختصات در راستای y	m
z	مختصات در راستای z	m

فصل ۱ مقدمه

یکی از جدیدترین نوع موتورهای الکتریکی که مورد توجه قرار گرفته‌اند موتورهای الکترواستاتیکی هستند. این موتورها نسبت به انواع دیگر موتورها دارای پیچیدگی و هزینه کمتری هستند و به راحتی تولید می‌شوند. مزیت اینگونه موتورها این است که با کوچک تر شدن ابعاد نتیجه کار بهتر می‌شود. از این رو امروزه کاربردهای زیادی برای این این گونه موتورها در زمینه-های مختلف و به خصوص در علوم میکرو و نانو پیش‌بینی می‌شود.

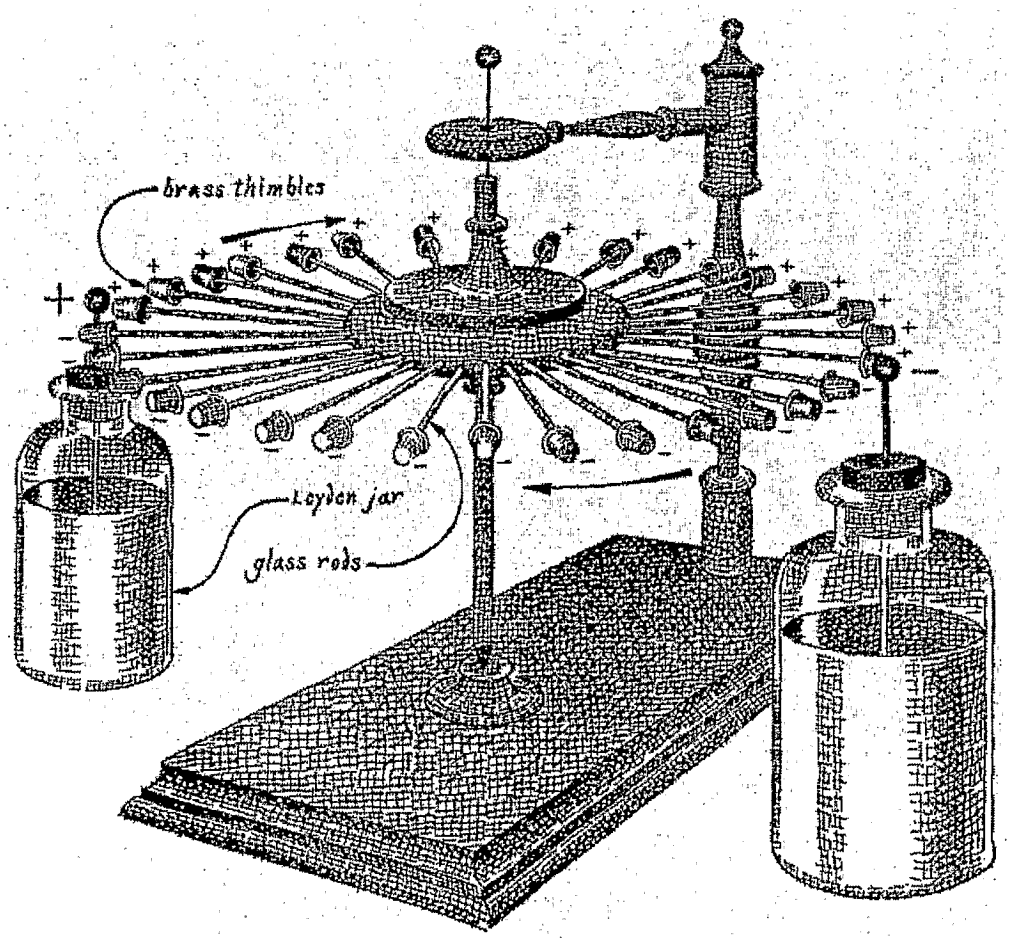
در این فصل ابتدا تاریخچه معرفی این موتورها به اختصار آورده می‌شود و سپس موارد بررسی شده در این پایان نامه معرفی و روش ارائه آن بیان می‌گردد.

۱-۱- تاریخچه

الکترواستاتیک که یک حوزه اصلی در رشته فیزیک است و به عنوان اثر پایه‌ای برای انتقال ذرات در این پروژه استفاده می‌شود، موضوع مطالعه، اثر متقابل بین اجسام بار دار شده به روش الکتریکی است. مطالعه این اثر یک تاریخ طولانی دارد. اولین بار در بیش از ۲۵۰۰ سال پیش تالس، فیلسوف معروف یونانی، یک تکه کهربا را با پارچه ای ابریشمی مالش داد و مشاهده کرد که

کهربا ذرات ریز را به خود جذب می‌کند. کارهای اولیه زیادی در این زمینه توسط Gilbert(1603)، Du Fay(1733) و Franklin(1752) انجام گردید.Lichtenberg(1760) تعریفی مشهور برای بارهای مثبت و منفی ارائه داد. Coulomb (1783)، پیشگام تحقیقات در الکتریسیته و مغناطیس، قانون کلمب را وضع کرد.Volta (1800) و نیز Faraday (1831) مشارکت قابل توجهی در توسعه این علوم داشتند.[۵]

ایده موتورهای الکترواستاتیکی ابتدا توسط بنیامین فرانکلین در قرن ۱۸ میلادی مطرح شد. او با طراحی دستگاهی توانست با باردار کردن مواد و استفاده از نیروی جذب بارهای مخالف و دفع بارهای موافق باعث ایجاد دوران شود. شکل (۱ - ۱) نمایی از دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱ - ۱) دستگاه ساخته شده توسط فرانکلین