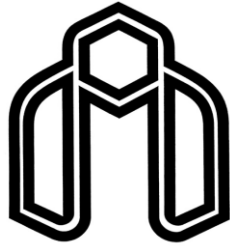


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

گروه فیزیک پلاسما و ذرات بنیادی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

عنوان پایان نامه ارشد

بررسی تجربی و مدلسازی کاربرد پلاسمای الکتریکی در جریان سنجی سیالات گازی

دانشجو: مصطفی قلعه خانی

اساتید راهنما:

دکتر سید ایمان حسینی

دکتر مجتبی هاشم زاده

شهریور ۱۴۰۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: فیزیک و مهندسی هسته ای

گروه: فیزیک پلاسما و ذرات بنیادی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مصطفی قلعه خانی

تحت عنوان: بررسی تجربی و مدلسازی کاربرد پلاسمای الکتریکی در جریان سنجی سیالات گازی

در تاریخ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه..... مورد پذیرش قرار گرفت

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

این پایان نامه را تقدیم می‌کنم به بزرگترین و ارزشمندترین سرمایه‌های زندگی ام

پدر و مادرم

به پاس یک عمر صبر و فداکاری

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار و راهنمایی اساتید، موفق به پایان این پژوهش شده‌ام وظیفه خود دانسته که نهایت قدردانی از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند را به عمل آورم.

در آغاز از اساتید بزرگ و دانشمند جناب دکتر سید ایمان حسینی و جناب دکتر مجتبی هاشمزاده که همواره با سعه صدر و گشاده‌رویی به عنوان استاد راهنما در کنار بنده حقیر بوده‌اند و در طول مدت انجام این پایان نامه مرا از راهنمایی‌های علمی و اخلاقی خویش بهره‌مند ساختند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از استاد وارسته جناب دکتر علی سررشته داری بخاطر مشاوره‌های ارزشمند ایشان در این حوزه و در سایر موضوعات علمی و اخلاقی، سپاسگزارم.

از دوستان گرانقدر؛ مهندس مهدی محمدی، مهندس مهدی فراشی، مهندس محمدرضا حسینی، مهندس معین منتظری، مهندس محمد رحیمیان و دکتر سروش آقائیان بواسطه کمک‌های بی دریغ مادی و معنوی ایشان در طول انجام این پروژه بسیار ممنونم و نهایت قدردانی خود را ابراز می‌نمایم.

نهایتاً مراتب سپاسگزاری خود را از خانواده عزیزم بخاطر همراهی و پشتیبانی در تمامی مراحل تحصیل اینجانب بیان می‌دارم.

تعهد نامه

اینجانب مصطفی قلعه خانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک پلاسما دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحت عنوان **بررسی تجربی و مدلسازی کاربرد پلاسمای الکتریکی در جریان سنجی سیالات گازی** تحت راهنمایی دکتر سید ایمان حسینی و دکتر مجتبی هاشم‌زاد متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده:

تخلیه الکتریکی و پلاسمای ناشی از آن می‌تواند به روش‌های مختلف به عنوان ابزاری برای سنجش سرعت هوا یا به طور کلی به عنوان سنسوری برای جریان سنجی به کار رود. بدین منظور یون‌های آزاد شده از یک تخلیه الکتریکی پالسی در مسیر جریان سیال رها شده و سوار بر سیال به حرکت خود ادامه می‌دهند تا در پائین دست ردیابی شوند که در این حالت با اندازه‌گیری زمان پرواز یون‌ها، سرعت سیال اندازه‌گیری می‌شود.

سه عنصر اصلی برای بررسی تجربی این پدیده عبارتند از یک تخلیه الکتریکی کرونا که به عنوان منبع یون عمل می‌کند، یک مدار الکترونیکی که نقش آشکار ساز را بر عهده دارد و نهایتاً یک جریان سیال آرام و پایدار و قابل کنترل که با استفاده از یک تونل باد دست‌ساز فراهم شده است. نتایج حاصل از آزمایشات، وجود تناسب بین سرعت سیال و زمان پرواز یون‌ها را نشان می‌دهد و فرض اصلی را تأیید می‌کند. با اینحال سرعت اندازه‌گیری شده، کسری از سرعت سیال است که علت این مساله با شبیه سازی روشن شده است. داده‌های حاصل از شبیه سازی نشان می‌دهند که با توجه به چیدمان به کار رفته و نصب منبع یون بر دیواره تونل باد، اثرات لایه مرزی سیال روی دیواره می‌تواند به نحوی حرکت یون‌ها را به تاخیر انداخته و مانع از همراهی یون‌های آزاد شده با سیال زمینه شود.

کلمات کلیدی: تخلیه کرونا، جریان سنج یونی، جریان الکتروهایدرودینامیکی

فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان

۱	۱- فصل اول: کاربرد پلاسمای الکتریکی در جریان سنجی.....
۲	۱-۱: تعریف مساله.....
۴	۱-۱-۱: انواع جریان سنج پلاسمایی.....
۵	۲-۱: مرور روند تاریخی.....
۱۱	۳-۱: اهمیت و ضرورت تحقیق.....
۱۲	۴-۱: جنبه‌های نوآوری.....
۱۲	۵-۱: روش شناسی.....
۱۵	۲- فصل دوم: آشنایی با انواع جریان سنج های پلاسمایی.....
۱۶	۱-۲: پارامترهای مهم در اندازه‌گیری جریان سیالات.....
۱۷	۲-۲: کاربرد پلاسمای الکتریکی در جریانسنجی سیالات گازی.....
۱۸	۱-۲-۲: اندازه‌گیری جریان سیال با بررسی پارامترهای تخلیه الکتریکی.....
۲۲	۲-۲-۲: اندازه‌گیری جریان سیال با ردیابی یون‌ها.....
۲۴	۳-۲-۲: سایر روش‌ها.....
۲۵	۳-۲: بررسی آشفستگی جریان.....
۲۷	۴-۲: انواع تخلیه به کار رفته در جریان‌سنج‌های یونی.....
۲۷	۱-۴-۲: رژیم‌های مختلف تخلیه الکتریکی.....
۲۹	۲-۴-۲: بررسی بیشتر تخلیه کرونا.....
۳۳	۳-۴-۲: خواص موثر پلاسمای در جریان‌سنج‌های یونی.....

- ۳۵ ۵-۲: آشکارسازها.
- ۳۸ ۶-۲: محدوده جریان هوا.
- ۳۹ ۷-۲: طول عمر عامل های باردار.
- ۳۹ ۸-۲: مدلسازی رایانه ای و معادلات استفاده شده.
- ۳- فصل سوم: روش های به کار رفته جهت بررسی عملکرد جریان سنج یونی ۴۳**
- ۴۴ ۱-۳: تونل باد.
- ۴۹ ۲-۳: آشکارساز.
- ۵۲ ۳-۳: منبع یون ها.
- ۵۵ ۴-۳: مولد ولتاژ بالا.
- ۵۶ ۵-۳: جمع آوری داده ها.
- ۵۶ ۶-۳: شبیه سازی.
- ۵۷ ۱-۳-۶: شبیه سازی تولید و انتشار یون ها توسط منبع یونی.
- ۶۱ ۲-۳-۶: شبیه سازی منبع یونی در جریان سیال.
- ۶۲ ۳-۳-۶: شبیه سازی حرکت بارها در میدان سیال.
- ۴- فصل چهارم: تشریح و بررسی نتایج ۶۳**
- ۶۴ ۱-۴: اندازه گیری سرعت سیال با استفاده از جریانسنج یونی.
- ۶۹ ۲-۴: نتایج شبیه سازی منبع یونی.
- ۷۲ ۲-۴: نتایج شبیه سازی منبع یونی در جریان هوا.
- ۷۵ ۳-۴: بررسی حرکت یون ها در لایه مرزی.

۴-۴: تصحیح و تطبیق داده‌ها..... ۷۷

۴-۵: تغییر شرایط مدل‌سازی و پیش بینی عملکرد جریان سنج یونی..... ۷۹

نتیجه گیری..... ۸۲

پیشنهادات..... ۸۳

پیوست‌ها

پیوست ۱: نقشه تونل باد..... ۸۴

پیوست ۲: نقشه ناحیه تست و منبع یونی..... ۸۵

پیوست ۳: مشخصات ترانزیستور 2n3819..... ۸۶

فهرست منابع..... ۸۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): یک بادسنج پروانه ای ۲
- شکل (۲-۱): برخورد جریان هوا به تخلیه الکتریکی ۳
- شکل (۳-۱): جریان سنج‌های پلاسمایی در شرایط مختلف ۱۲
- شکل (۱-۲): پروفیل سرعت در جریان توسعه یافته درون یک لوله ۱۷
- شکل (۲-۲): دسته بندی انواع جریان سنج‌های پلاسمایی ۱۷
- شکل (۳-۲): تغییرات اختلاف پتانسیل تخلیه روشن بر حسب سرعت سیال برخوردی ۱۸
- شکل (۴-۲): طرح الکترودهای استفاده شده توسط دوربین ۲۱
- شکل (۵-۲): یک الکتروود که به صورت عرضی در برابر سیال قرار می‌گیرد ۲۲
- شکل (۶-۲): طرحواره سیستم استفاده شده توسط یاماناکا و همکاران ۲۲
- شکل (۷-۲): فرآیند کلی در جریانسنج یونی ۲۳
- شکل (۸-۲) بلوک دیاگرام چیدمان به کار رفته توسط آسانو و هاگاشیاما ۲۳
- شکل (۹-۲): رابطه شکل تخلیه الکتریکی با سرعت سیال ۲۵
- شکل (۱۰-۲): شکل سیگنال دریافت شده در سیال آرام و آشفته ۲۶
- شکل (۱۱-۲): منحنی مشخصه ولتاژ - جریان در رژیم‌های مختلف تخلیه ۲۷
- شکل (۱۲-۲): تخلیه کرونا ۳۰
- شکل (۱۳-۲): ضریب یونیزاسیون موثر ۳۲
- شکل (۱۴-۲): یک آشکارساز که برای تشخیص یون‌ها به کار می‌رود ۳۷
- شکل (۱۵-۲): بخشی از مدار استفاده شده توسط لیلینفلد برای آشکار سازی یون‌ها ۳۷
- شکل (۱۶-۲): ساختار و نتایج مدلسازی توسط یو و همکاران ۴۰
- شکل (۱۷-۲): ساختار و نتایج مدلسازی توسط کارپتنه و همکاران ۴۰

- شکل (۱-۳): مدل رایانه‌ای تونل باد و اجزای آن ۴۴
- شکل (۲-۳): تونل باد ساخته شده جهت انجام آزمایشات ۴۵
- شکل (۳-۳): یک جسم درون ناحیه تست شماره ۱ تونل باد ۴۵
- شکل (۴-۳): ناحیه تست شماره ۲ و اجزای متصل به آن ۴۶
- شکل (۵-۳): نازل ورودی و فن ۴۶
- شکل (۶-۳): دو رژیم جریان در سیال ۴۷
- شکل (۷-۳): لایه مرزی روی یک دیواره ۴۷
- شکل (۸-۳ الف): توزیع سرعت و خطوط جریان در تونل باد ۴۸
- شکل (۸-۳ ب): نمای دقیق تر از توزیع پارامترها در تونل باد ۴۸
- شکل (۹-۳): تمامی مدارات ساخته شده برای آشکارسازی یون ها ۴۹
- شکل (۱۰-۳): مدار الکترونیکی طراحی شده برای آشکارسازی یون ها ۵۰
- شکل (۱۱-۳): مدار اصلاح شده به منظور شبیه سازی اثر یون های برخوردی به پراب ۵۱
- شکل (۱۲-۳): ولتاژ خروجی بر حسب شدت جریان ۵۱
- شکل (۱۳-۳): نقشه و نمونه ساخته شده از مولد یون ۵۲
- شکل (۱۴-۳): برخورد جریان یونی به جریان اصلی ۵۳
- شکل (۱۵-۳): سروو موتور و دریچه نصب شده بر روی مولد یون ۵۴
- شکل (۱۶-۳): نقشه جانمایی منبع یون و پراب دتکتور ۵۴
- شکل (۱۷-۳): اجزای به کار رفته در منبع ولتاژ بالا ۵۵
- شکل (۱۸-۳): تخلیه الکتریکی قوسی تولید شده از منبع ولتاژ بالا ۵۵
- شکل (۱۹-۳): کارت اسیلوسکوپ دو کانال ۵۶
- شکل (۲۰-۳): تخلیه کرونای مثبت و جریان یونی ناشی از آن ۵۹
- شکل (۲۱-۳): هندسه مساله و شرایط مرزی برای شبیه سازی ۶۰
- شکل (۲۲-۳): شرایط مرزی برای شبیه سازی منبع یونی در جریان سیال ۶۲

- شکل (۴-۱): نمونه‌ای از نمودار بدست آمده در فرآیند اندازه‌گیری..... ۶۴
- شکل (۴-۲): نمودارهای بدست آمده از آشکارساز در سرعت‌های مختلف جریان هوا..... ۶۶
- شکل (۴-۳): مقایسه سرعت هوای تونل باد و سرعت اندازه‌گیری شده..... ۶۷
- شکل (۴-۴): میدان سرعت ناشی از تخلیه الکتریکی کرونا در منبع یونی..... ۶۹
- شکل (۴-۵): پروفیل سرعت در خروجی منبع یون تقویت شده..... ۷۰
- شکل (۴-۶): توزیع پتانسیل الکتریکی و چگالی بار فضا..... ۷۰
- شکل (۴-۷): شبکه پیاده شده برای حل معادلات به صورت عددی..... ۷۱
- شکل (۴-۸): جریان هوای درون تونل باد در حضور منبع یون..... ۷۲
- شکل (۴-۹): نمای دقیق‌تری از جریان هوا در اطراف دهانه منبع یون..... ۷۲
- شکل (۴-۱۰): ردیابی حرکت ذرات باردار در میدان سیال..... ۷۴
- شکل (۴-۱۱): مقایسه داده‌های تجربی بدست آمده با نتایج حاصل از عبارت ۴-۸..... ۷۸
- شکل (۴-۱۲): جابجایی الکتروود مثبت درون منبع یون..... ۸۰
- شکل (۴-۱۳): توزیع سرعت در تونل باد در مدل‌های ۱ الی ۳..... ۸۱

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: محدوده فاصله آشکار ساز تا منبع تولید یون در مقالات مختلف..... ۳۶
- جدول ۲-۲: محدوده سرعت هوا در مقالات مختلف..... ۳۸
- جدول ۱-۳: خلاصه شرایط مرزی به کار رفته در مدل‌سازی..... ۶۱
- جدول ۱-۴: مقادیر زمان اندازه‌گیری شده در سرعت‌های مختلف..... ۷۷
- جدول ۲-۴: شرایط مدل‌سازی با منبع یون تقویت شده..... ۷۹

فصل اول:

کاربرد پلاسمای الکتریکی در جریان سنجی

۱-۱: تعریف مساله

در این پژوهش مد نظر است تا کاربرد پلاسمای حاصل از تخلیه الکتریکی در اندازه‌گیری سرعت شارش سیالات گازی مورد بررسی و امکانسنجی واقع شود. بدین منظور یک تخلیه الکتریکی در معرض جریان سیال واقع شده و تلاش می‌شود تا با بررسی اثر شارش سیال بر روی تخلیه، معیاری از سرعت سیال بدست آید.

در واقع کمیت اساسی در بررسی یک سیال در حال شارش، سرعت^۱ یا دبی^۲ آن است. برای اندازه‌گیری این پارامتر روش‌های مختلفی وجود دارد که تمامی آن‌ها مبتنی بر اندرکنش سیال با عنصر سنجشگر است. مثلاً در یک کنتور معمولی، چرخ پره دار تحت تاثیر واکنش سیال می‌چرخد و دبی را نشان می‌دهد و مشابهها در فلومتر التراسونیک سیال با تاثیر بر روی امواج درون دستگاه، وضعیت خود را به پردازشگر فلومتر اعلام می‌دارد. بر همین اساس، بر همکنش پلاسمای الکتریکی با سیال نیز می‌تواند به نحوی در راستای اندازه‌گیری سرعت یا دبی سیال مورد استفاده قرار گیرد که این مساله در گزارش پیش رو مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۱-۱): یک بادسنج پروانه‌ای که در آن برخورد باد باعث چرخش پروانه شده و سرعت آن اعلام می‌شود به طور کلی ابزارهای متنوعی برای سنجش سرعت یا دبی سیال وجود دارد. هرچند اصطلاحات مربوط به تجهیزات جریان سنجی کمی مبهم هستند اما معمولاً فلومتر^۳ به تمام تجهیزاتی گفته می‌شود

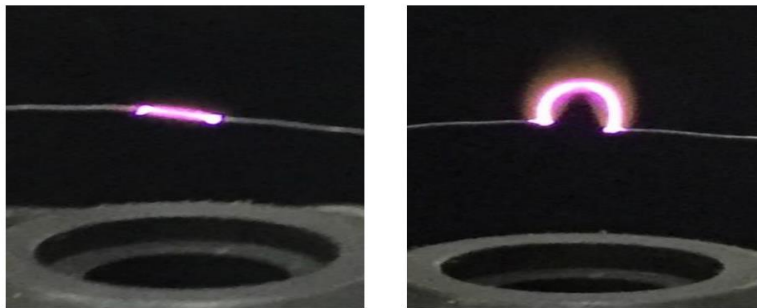
¹ Speed/Velocity

² Flow Rate

³ Flow meter

که دبی یا سرعت را به طور موضعی یا متوسط اندازه می‌گیرند در عوض سرعت سنج یا آنومتر^۱ به طور ویژه نام ابزاری است که سرعت سیال را به طور موضعی نشان می‌دهد در فارسی عموماً به دسته اول "جریان سنج" و به گروه دوم "سرعت سنج" گفته می‌شود و می‌توان گروه دوم را زیر مجموعه دسته اول به حساب آورد. آنومترهای متنوعی بر اساس اصول فیزیکی متفاوت وجود دارند که هر کدام برای اندازه‌گیری بازه مشخصی از سرعت در شرایط معین فشار و دما ساخته شده‌اند و بررسی انواع مختلف آن‌ها در این گزارش ممکن نیست و تنها انواع پرکاربرد مانند سرعت سنج سیم داغ^۲ یا لوله پیتوت^۳ به طور مختصر مورد اشاره قرار خواهند گرفت.

ایده استفاده از پلاسمای الکتریکی در جریان سنجی سابقه‌ای نزدیک به یکصد سال دارد و تحقیقات جامعی در مورد جنبه‌های مختلف آن انجام شده است. دلیل اصلی توجه به جریان‌سنج‌های پلاسمایی^۴ طی این سالها، بازه عملکرد گسترده آن‌ها، پاسخ فرکانسی^۵ بالا، تطبیق عالی با پارامترهای جانبی از قبیل دما و فشار و مقاومت در برابر آسیب‌های فیزیکی است هرچند ایراداتی متوجه این نوع از جریان سنج می‌باشد که در پژوهش‌های مختلف سعی در رفع آن‌ها شده و در ضمن متن به این موارد اشاره خواهد شد.



شکل (۱-۲): برخورد جریان هوا به تخلیه الکتریکی می‌تواند خواص آن را تغییر دهد که این تغییرات با شار سیال

برخوردی تناسب دارند [۱].

¹ anemometer

² Hot wire anemometer

³ Pitot tube

⁴ Plasma flow meter

⁵ Frequency response

۱-۱-۱: انواع جریان سنج پلاسمایی

جریان‌سنج‌های پلاسمایی انواع مختلفی دارند و می‌توان آن‌ها را از جنبه‌های مختلفی دسته‌بندی کرد. بر اساس اصول فیزیکی عملکردی و نحوه برهمکنش پلازما با جریان سیال و همچنین پارامترهای بنیادین انتخاب شده می‌توان آن‌ها بدین صورت دسته‌بندی نمود:

۱- جریان‌سنج‌های پلاسمایی مبتنی بر پارامترهای الکتریکی تخلیه: در این گونه از جریان‌سنج‌های پلاسمایی، یک تخلیه الکتریکی در معرض جریان سیال قرار می‌گیرد و برخورد سیال به آن موجب تغییر پارامترهای الکتریکی تخلیه همچون ولتاژ یا جریان می‌شود که با اندازه‌گیری تغییرات این پارامترها می‌تواند معیاری از سرعت سیال برخوردی بدست آورد. در حالت معمول تخلیه بین دو الکترود برقرار است اما حالت‌های پیشرفته‌تر این دسته شامل الکترودهای متعدد برای کنترل بهتر فرآیند و بهبود عملکرد تجهیز ساخته شده هستند. اولین جریان‌سنج‌های پلاسمایی ساخته شده از این دسته بوده‌اند. این دسته معمولاً به عنوان جریان سنج تخلیه الکتریکی^۱ شناخته می‌شود و گاهی بر اساس نوع تخلیه الکتریکی به کار رفته نامگذاری می‌شوند (مثل جریان سنج تخلیه روشن^۲).

۲- جریان‌سنج‌های مبتنی بر ردیابی یون‌ها^۳: در این جریان‌سنج‌ها، یک توده یون از طریق یک تخلیه پالسی^۴ در بالادست مسیر سیال آزاد می‌شود سپس این توده در پائین دست و در فاصله معین، بوسیله یک پراب^۵ آشکار سازی می‌شود. زمان بین آزاد سازی یون‌ها و آشکار سازی آن‌ها اندازه‌گیری شده و با تقسیم فاصله بر این زمان، سرعت بدست می‌آید. این دسته معمولاً تحت عنوان جریان سنج یونی^۶ شناخته می‌شوند و موضوع اصلی تمرکز این پایان نامه این نوع از جریان‌سنج‌ها می‌باشند.

¹ Discharge flow meter/anemometer

² Glow discharge anemometer

³ Ion tracing

⁴ Pulse discharge

⁵ Probe

⁶ Ion anemometer

۳- سایر انواع جریان سنج‌ها: انواع دیگری از جریان‌سنج‌های پلاسمایی وجود دارند که بر اساس جنبه‌های دیگری از فیزیک پلازما و تخلیه الکتریکی طراحی و ساخته شده‌اند و از آن جمله می‌توان به جریان‌سنج‌های مبتنی بر جمع‌آوری یون‌ها^۱ یا جریان‌سنج‌های مبتنی بر تغییر شکل تخلیه الکتریکی اشاره نمود

در این پایان‌نامه ضمن بررسی عملکرد جریان‌سنج‌های یونی، تلاش می‌گردد تا با انجام شبیه‌سازی رایانه‌ای، جنبه‌های جدید از کاربرد آن‌ها شناسایی شده و نقاط محوری برای بهبود عملکرد این دسته از جریان‌سنج‌ها شناسایی شود.

در بخش بعدی روند تاریخی طی شده در مسیر ساخت جریان‌سنج‌های پلاسمایی مرور خواهد شده که توضیحات ارائه شده در ضمن بررسی مقالات؛ جنبه‌های بیشتری از کیفیت و نحوه عملکرد انواع مختلف جریان‌سنج‌های پلاسمایی را روشن می‌سازد. بعلاوه در فصول بعدی مجدداً مرور دقیقتری بر جزئیات عملکرد انواع مختلف آن‌ها خواهد شد.

۱-۲: مرور روند تاریخی

اولین مقاله در خصوص سرعت سنجی با پلاسمای ناشی از تخلیه الکتریکی، توسط لیندوال^۲ در آمریکا و در سال ۱۹۳۴ منتشر شده است [۲]. وی در این مقاله یک تخلیه روشن را با ولتاژ یکسو بین دو الکتروده میله‌ای برقرار کرده است و این تخلیه را به طور عرضی^۳ در معرض جریان سیال قرار داده است و ولتاژ و جریان بین دو الکتروده را اندازه‌گیری و کنترل کرده است طبق نتایج لیندوال در یک جریان ثابت، شارش هرچه بیشتر سیال منجر به افزایش ولتاژ بین الکترودها می‌شود و به عبارتی سرعت سیال و ولتاژ الکترودها نسبت مستقیم دارند هرچند رابطه بین آن‌ها خطی نیست. فاکس^۴ به کمک یک

¹ Ion collecting

² Lindvall

³ Transversal

⁴ Fucks

گروه آلمانی و طی بازه چند ساله اقدام به بررسی مقاله و نتایج لیندوال کرده و با تشریح ایرادات و مشکلات موجود در آن، طرح لیندوال را کاربردی نمی‌داند [۳].

ایده لیندوال توسط یکی از شاگردانش به نام متلر^۱، و تحت نظر دکتر لیپمن^۲ و در قالب یک رساله دکترا پیگیری می‌شود [۴]. در پژوهش وی، پارامترهای الکتریکی یک تخلیه روشن یکسو در معرض جریان مافوق صوت بررسی شده و اثر فشار و دما روی آن نیز مطالعه می‌گردد و بخشی از نتایج مقاله لیندوال تایید می‌شود

این روند پژوهشی توسط مورگان^۳ و وربالوویچ^۴ و با همکاری رسمی متلر و لیپمن ادامه پیدا می‌کند. مورگان سابقا با فاکس همکاری داشته است و در این پژوهش بنا دارد با کمک سایرین اشکالات این تجهیز را رفع کند. گزارش کار این دو در سال ۱۹۵۰ منتشر می‌شود که در آن، در نتایج متلر در تخلیه یکسو بازتولید شده‌اند و در خصوص مرز پایداری تخلیه هم مطالعاتی صورت گرفته است [۵]. در ادامه این فرض مطرح شده که وجود تخلیه متناوب میزان تخریب الکترودها را کاهش می‌دهد و بعلاوه شاهد تخلیه پایدارتری خواهیم بود که در بررسی‌های آزمایشگاهی این فرض تأیید می‌شود.

ورنر^۵ نیز به طور مستقل در همین زمینه پژوهش‌های خود را پیگیری کرده و نتیجه مطالعات خود را در ۱۹۵۰ منتشر می‌کند [۶]. وی از تخلیه روشن یکسو استفاده کرده و منحنی مشخصه‌های ولتاژ- جریان را در سه سرعت مختلف بدست آورده است بعلاوه اثرات فشار، دما و رطوبت هم بررسی شده‌اند. ورنر با همکاری جرونیمه^۶ تحقیقات خود را ادامه می‌دهد و اثرات فشار را دقیق‌تر بررسی می‌کند [۷]. تحلیل ابعادی پدیده و بررسی شکل میدان از نقاط قوت و تمایز پژوهش‌های ورنر است. در بخش نهایی آشفستگی جریان سیال نیز مطالعه می‌شود.

¹ Mettler

² Liepmann

³ Morgan

⁴ Vrebalovich

⁵ werner

⁶ Geronime

تقریباً همزمان با انتشار گزارش متلر، دو ایده جدید طرح می‌شود. ابتدا لاولاک^۱ و واسیلوسکا^۲ در ۱۹۴۹ نتیجه پژوهش‌هایی بر روی نوعی از جریان سنج یونی را منتشر می‌کنند که در آن یک چشمه رادیواکتیو در مسیر سیال قرار گرفته و در اطراف آن دو سری الکتروود با اختلاف پتانسیل مشخص وجود دارد [۸]. مطابق انتظار پروتوهای آلفا منتشر شده از منبع رادیواکتیو باعث یونیزه شدن هوا می‌شوند که این یون‌ها در میدان بین دو الکتروود شتاب گرفته و از طریق الکتروود با پتانسیل صفر به زمین تخلیه می‌گردند. در این پژوهش رابطه بین جریان الکتریکی عبوری از الکتروود مذکور و سرعت شارش سیال بررسی شده و رابطه خطی و مستقیم بدست آمده است.

ایده دوم به طور مجزا در ۱۹۵۰ توسط ملن^۳ [۹] و مونیخویسن^۴ [۱۰] مطرح می‌شود. طرح اصلی اینگونه است: یک تخلیه الکتریکی در بالادست جریان سیال یون‌هایی را آزاد می‌کند که در پائین دست به وسیله یک یا دو آشکارساز شناسایی می‌شوند. فاصله زمانی بین رهاسازی یون‌ها و تشخیص آن‌ها بوسیله پراب اندازه‌گیری شده و با دانستن فاصله بین چشمه یون و دتکتور سرعت متوسط سیال اندازه‌گیری می‌شود. این طرح توسط بوید^۵ و همکاران [۱۱]؛ کونکل^۶ و تالبوت^۷ [۱۲] و همینطور کولی^۸ و استیور^۹ [۱۳] در همان سالها بررسی می‌شود.

به نوعی میتوان سالهای حوالی ۱۹۵۰ را دوره طلایی پژوهش بر روی جریان سنج پلاسمایی محسوب کرد. حمایت‌های دولتی به خصوص از طرف سازمان ناسا در تعدد پژوهش‌های مرتبط در این بازه زمانی بی تاثیر نبوده است. طرح‌هایی که بعد از این دوره ارائه شده‌اند به جای طرح ایده‌های کاملاً جدید، غالباً با ترکیب روش‌های مختلف سعی در رفع چالش‌های فنی و کاربردی پژوهش‌های قبل از خود دارند.

¹ Lovelock

² Vasilevska

³ Mellen

⁴ Munnikhuysen

⁵ Boyd

⁶ Kunkel

⁷ Talbot

⁸ Cooley

⁹ Stever

به عنوان یک مثال بارز، می‌توان به ایده مقایسه جریان به جای اندازه‌گیری آن اشاره نمود که ابتدا در سال ۱۹۶۵ توسط نایگارد^۱ مطرح شده است [۱۴]. وی در مقاله خود بعد از بررسی دقیق روند طی شده توسط پژوهشگران قبلی، روش جدید در اندازه‌گیری جریان تخلیه ارائه می‌دهد. در طرح نایگارد یک تخلیه الکتریکی وجود دارد که از یک آند شروع می‌شود و به طور مساوی بین دو کاتد توزیع می‌شود یک کاتد در بالادست و دیگری در پائین دست جریان قرار دارد. برقراری جریان سیال تساوی جریان بین این دو کاتد را بر هم می‌زند و اختلاف جریان با شارش سیال رابطه دارد. این متد بعداً در سال ۱۹۷۰ و ۱۹۸۷ توسط دوربین^۲ به کار گرفته شده است که در مقاله دوم با همراهی مکنزی^۳ اکثر نقایص این طرح برطرف شده و یک طرح نسبتاً کامل و دقیق برای جریانسنجی با این روش ارائه می‌شود [۱۵]. این روش نسبت به اندازه‌گیری جریان یا ولتاژ از یک جفت الکتروود، روش دقیق‌تری است و موجب حذف اثرات مربوط به خوردگی الکتروودها می‌گردد بعلاوه امکان تشخیص جهت شارش سیال با این روش وجود دارد.

در واقع هرچند تا قبل از ۱۹۶۰ بیشتر پژوهشگران به سمت استفاده از پارامترهای الکتریکی تخلیه سوق پیدا می‌کردند اما بعد از این تاریخ به تدریج اقبال به بررسی پارامترهای الکتریکی تخلیه کم‌رنگ شده و متدهای مبتنی بر ردیابی و جمع‌آوری یون‌ها بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. از این میان می‌توان به مقاله یاماناکا^۴ و همکاران در ۱۹۸۵ اشاره نمود [۱۶]. وی در این مقاله برجسته یک تخلیه روشن را در بخش مجزایی از مسیر شارش سیال تشکیل می‌دهد و یون‌های تولید شده در تخلیه مذکور از طریق یک صفحه توری به طور عرضی به داخل سیال پرتاب می‌شوند. در مقابل یک الکتروود^۴ قسمتی این یون‌ها را جمع‌آوری کرده و از روی جریان کل و اختلاف جریان بین قسمت‌های مختلف؛ سرعت و جهت شارش سیال در صفحه را تشخیص می‌دهد.

¹ Nygaard

² durbin

³ Mckinzie

⁴ yamanaka

استفاده از آرایه الکترودها، قبل از این در مقاله برات^۱ (۱۹۸۲) تشریح شده که از آن برای تشخیص جهت (در دو بعد) و همچنین اندازه‌گیری سرعت استفاده می‌شود [۱۷]. به طور مشابه‌هاگاشیاما^۲ و آسانو^۳ در سال ۱۹۹۰ نیز از یک آرایه قفس شکل استوانه‌ای برای تشخیص سرعت و جهت استفاده می‌کنند [۱۸].

همانطور که اشاره گردید از آنجا که در آن سالها بیشتر تیم‌های پژوهشی بر روی جریان‌سنج‌های پلاسمایی مبتنی بر ردیابی و جمع‌آوری یون‌ها متمرکز شده‌اند، لذا آسانو و هاگاشیاما به همراه سایر همکاران، کار بعدی خود را در سال ۱۹۹۴ بر روی یک جریان سنج یونی منتشر می‌کنند [۱۹]. کلایتن^۴ و وب^۵ نیز در سال ۱۹۶۴ تحقیقات خود را که بیشتر جنبه تحلیلی دارد بر روی جریان سنج یونی منتشر می‌کنند [۲۰]. در مقاله آن‌ها یک چشمه یون در بالادست و یک کولکتور در پائین دست واقع شده که یون‌های شناور در سیال را جمع‌آوری کرده و به زمین انتقال می‌دهد. با افزایش شارش سیال جریان کولکتور به زمین؛ افزایش می‌یابد. این مقاله سه سال بعد (۱۹۶۷) توسط هرپبار^۶ کامل تر می‌شود [۲۱].

مقاله لیلینفلد^۷ و همکاران در سال ۱۹۶۷ نیز ایده دنبال کردن یون‌ها را به نحوی متفاوت پیاده سازی می‌کند. در این مقاله یون‌ها بواسطه یک تخلیه در پراب بالادست تولید شده‌اند و در دکتور پائین دست جمع‌آوری شده‌اند و بر اساس فاصله ثابت بین یونساز و سرعت سیال محاسبه شده است [۲۲]. از این تجهیز در بالن هواشناسی استفاده شده که طبقات مختلف جو با تغییرات چگالی زیاد را تجربه می‌کند.

¹ Barat

² Hagashiyama

³ Asano

⁴ Clayton

⁵ Web

⁶ Hribar

⁷ Lilienfeld

سازمان ناسا همچون گذشته در این سالها نیز پیگیر پژوهش‌های جدید در حوزه جریان سنجی و سرعت سنجی است. بس^۱ و همکاران در گزارش خود به سازمان ناسا در ۱۹۷۱ مجدداً روش دنبال کردن یون‌ها را به طور سیستماتیک و دقیق‌تری بررسی و با روش‌های دیگر مقایسه می‌کنند هرچند در این گزارش نتایج دقیقی ارائه نمی‌شود [۲۳].

به تدریج کاربردهای ویژه روش‌های جریان سنجی پلاسمایی خود را نشان می‌دهند. اوهیگاشی^۲ و همکاران در مقالات سال ۱۹۶۸ و ۱۹۶۹ روی جریان سنجی با استفاده از گذار یون‌ها کار کرده‌اند و از آن در بررسی جریان هوا در موتور احتراق داخلی استفاده کرده‌اند؛ شرایطی که جریان سنج‌های معمول از عهده آن بر نمی‌آیند [۲۴، ۲۵].

گسترش اینترنت و دسترسی به مستندات باعث می‌شود تا در تمامی حوزه‌های علمی از ابتدای هزاره سوم میلادی شاهد رشد تصاعدی تحقیقات علمی باشیم اما در این حوزه این روند مشاهده نمی‌شود. به عبارتی تحقیقات انجام شده در این زمینه پس از سال ۲۰۰۰ بسیار کمتر از حد انتظار است. هرچند مواردی همچون جایگزینی کامل ترانزیستور به جای لامپ خلا، در مدارات الکترونیکی و معرفی رایانه‌های شخصی و گسترش محاسبات رایانه‌ای باعث شده تا همین مقالات اندک روند متفاوتی نسبت به پژوهش‌های قبل از قرن بیست و یکم داشته و مسیر متمایزی را نسبت به آن‌ها طی می‌کند. نکته دیگری که در مورد مقالات فوق‌الذکر قابل توجه است، اقبال مجدد به متد اولیه اندازه‌گیری جریان یا اختلاف جریان تخلیه است. با این تفاوت که ساختار شناسی تحلیلی پدیده بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و پارامترهای دخیل در موضوع نیز اندکی دستخوش تغییر شده‌اند. مثلاً اولانو و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۰۱، گاردینر و همکاران [۲۷] در ۲۰۰۸، چوآ و پاک [۲۸] در ۲۰۱۵، یو و همکاران [۲۹، ۱] در ۲۰۱۷ و بکوئین و همکاران [۳۰] در ۲۰۱۸ در مقالات خود تلاش می‌کنند تا علاوه بر بررسی آزمایشگاهی پدیده به این سوال پاسخ دهند که مواجهه یک تخلیه الکتریکی با جریان هوا را

¹ Bass

² Ohigashi

چطور می‌توان از منظر تحلیلی و با مدل‌های ریاضی بررسی نمود. در این مقالات تلاش می‌شود تا با تغییر پارامترهای تخلیه ایراداتی که در پژوهش‌های اولیه وجود داشته حذف یا کم‌رنگ شود که در فصل بعدی بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

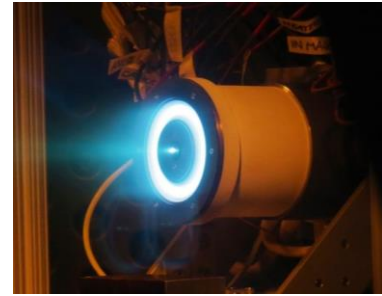
مدلسازی‌های رایانه‌ای دسته دیگری از پژوهش‌ها حول این موضوع را تشکیل می‌دهند. هرچند تنها یک مقاله به طور مشخص از منظر "جریان سنجی" به مدل سازی این پدیده پرداخته است با اینحال موضوع بر همکنش جریان هوا و پلاسمای الکتریکی در ضمن موضوعات مختلف دیگری مورد بررسی قرار گرفته است. برهمکنش تخلیه الکتریکی و جریان هوا در مواردی همچون مشعل‌های پلاسمایی؛ جت‌های پلاسمایی، پیشران‌های پلاسمایی و مواردی از این دست وجود داشته و نتایج شبیه سازی‌های انجام شده در این موضوعات می‌تواند در بررسی جریان‌سنج‌های پلاسمایی نیز به کار رود.

۳-۱: اهمیت و ضرورت تحقیق

سنجش سرعت سیال در شرایط ویژه، مثلاً در شرایطی که جریان سیال با تغییرات زیاد در چگالی همراه باشد (مثل موشک‌ها و سفینه‌های فضایی)، سیال آلوده به ذرات گرد و غبار یا دو فازی باشد (مثل دودکش‌های صنعتی)، شوک‌های ضربه‌ای وجود داشته باشد (مثل مجاری موتور خودرو) یا در مقیاس کوچک به تفکیک مکانی و فرکانس بالا نیاز باشد (مثل تونل باد) هر کدام نیازمند تجهیز ویژه و سرعت سنجی متناسب با خود است. انواع سرعت سنج‌های پلاسمایی می‌توانند یک یا چندین مورد از موارد ذکر شده فوق و شرایط ویژه دیگر را نیز پوشش دهند لذا موضوع مناسبی برای بررسی و پژوهش به شمار می‌روند. با اینحال نبود محصول تجاری در این حوزه از یکسو و مرور کلی مطالعات قبلی از سوی دیگر، تفرق محدوده متغیرهای مورد بررسی، عدم انسجام کافی در نتایج و نبود یک تصویر واضح در این حوزه را نشان می‌دهد.

لذا واضح است برای طراحی یک ابزار کاربردی، هنوز جنبه‌های مختلفی از این موضوع باید بررسی شود. در این پایان نامه به بررسی جنبه‌های مختلف جریان سنج پلاسمایی پرداخته خواهد شد سپس

یک نوع خاص مورد آزمایش و شبیه سازی قرار گرفته و عملکرد آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. انتظار می رود با گسترش تحقیقات در این حوزه امکان توسعه صنعتی یک ابزار با دامنه کاری گسترده فراهم گردد به نحوی که بتواند حوزه عملکرد چند ابزار مجزا را به طور یکجا پوشش دهد.



شکل (۱-۳): جریان سنج های پلاسمایی می توانند در شرایط دشوار به ایفای نقش بپردازند

۴-۱: جنبه های نو آوری

فقدان مستندات داخلی در خصوص انجام تحقیقاتی در این حوزه نشان می دهد که این موضوع در سطح ملی یک موضوع نوآورانه بوده و انجام این پژوهش به نوعی، بومی سازی تکنولوژی محسوب می شود. همچنین در زمینه شبیه سازی رایانه ای نیز، این پژوهش پیشگام محسوب می گردد و برای اولین بار این پدیده به منظور امکانسنجی کاربرد در اندازه گیری جریان، مورد مدلسازی قرار می گیرد. اقدامات فوق در مجموع باعث شده تا در این گزارش جنبه های مختلفی از عملکرد جریان سنج های یونی در اندازه گیری شدت جریان سیالات گازی آشکار شود و نقاط ضعف و قوت، محدوده عملکرد و شرایط صحیح بهره برداری از آن شناسایی شود

۵-۱: روش شناسی

این پژوهش در دو فاز "بررسی تجربی" و "مدل سازی رایانه ای" انجام شده است. از آنجا که در بیش از پنجاه سال گذشته هیچ مقاله مروری در این حوزه نگاشته نشده است ابتدا سابقه موضوع با در نظر گرفتن تمامی پژوهش های مرتبط، از زمان طرح ایده اصلی تا حال حاضر به دقت استخراج شده و

جنبه‌های مختلف آن شامل متدهای پژوهشی مختلف و اشتراکات و اختلافات در نتایج به دقت مطالعه و دسته بندی شده است.

سپس با استناد به نتایج مطالعات پیشین و ارزیابی آن‌ها، روش اصلی که همان "جریان سنجی با ردیابی یون‌ها" باشد از بین روش‌های موجود انتخاب شده است. پارامترهای مناسب برای آزمایشات و شبیه سازی به نحوی انتخاب شده که ارتباط دهنده و قابل مقایسه با داده‌های مطالعات قبلی باشد. پس از تصمیم گیری در مورد کلیات پروسه آزمایشگاهی، ابتدا اقدام به طراحی و ساخت یک تونل باد شده است تا بتوان در آن یک جریان کنترل شده از هوا ایجاد کرده و آزمایشات را به طور کنترل شده روی جریان سنج یونی انجام داد. تجهیزات متصل به تونل باد شامل یک مولد یون و یک آشکارساز می‌باشند که جریان یون‌ها را ردیابی کرده و سرعت سیال درون تونل باد را اعلام می‌کنند. برای ساخت این دو بخش از اطلاعات موجود در مقالات قبلی نمونه‌های اولیه ساخته شده است و پس از آزمایشات مختلف و توسعه نمونه‌های متعدد یک مدل نهایی برای نصب در تونل باد انتخاب شده است.

در مرحله شبیه سازی با استفاده از نرم افزار COMSOL شرایطی مشابه آنچه در عمل پیاده شده است مورد مدل سازی رایانه‌ای واقع می‌شود تا اولاً جنبه‌های مختلف پدیده شناسایی شده و صحت داده‌های تجربی سنجیده شود ثانیاً بخش‌هایی از پدیده به طور دقیق‌تر مورد مطالعه قرار گیرد. این نرم افزار بطور اتوماتیک با شبکه بندی مساله و حل معادلات فیزیکی به صورت عددی، مقادیر پارامترهای مختلف سیستم را محاسبه می‌کند.

فصل دوم:

آشنایی با انواع جریان سنج‌های پلاسمایی

در این فصل، ابتدا مقدمه‌ای در خصوص کمیت‌های اصلی در بررسی جریان سیالات ارائه خواهد شد سپس روش‌های مختلف جریان سنجی با استفاده از تخلیه الکتریکی که تاکنون به کار رفته‌اند مرور خواهد شد. در ادامه پارامترهای موثر در انواع جریان‌سنج‌های پلاسمایی که تاکنون ساخته شده‌اند بررسی شده و در خصوص محدوده کمیت‌های موثر در این پدیده بحث خواهد شد. نهایتاً به موضوع شبیه‌سازی و روش‌های به کار رفته در آن پرداخته خواهد شد.

۱-۲: پارامترهای مهم در اندازه‌گیری جریان سیالات

ابتدا لازم است مروری گذرا داشته باشیم بر کمیت‌های مهم در توصیف جریان سیال. جریان یک سیال می‌تواند درون لوله یا کانال با مرز مشخص انجام شود که این نوع جریان اصطلاحاً جریان داخلی^۱ نامیده می‌شود. در عوض ممکن است سیال در یک میدان بدون مرز جاری باشد (که جریان هوای اتمسفریک یا همان باد، مثال بارز آن است) یا به نحوی اثر مرزها روی سیال محصور شده قابل چشم‌پوشی باشد (برای مثال در مورد قسمت میانی تونل باد این موضوع صدق می‌کند).

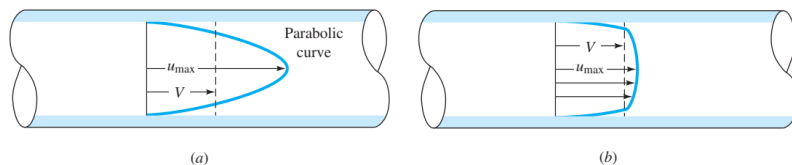
میدان سرعت که یک میدان برداری بوده و بیانگر بردار سرعت در هر نقطه از سیال است در جریان داخلی و بیرونی تفاوت بارز دارد. در جریان داخلی، میدان سرعت متأثر از حضور دیوارها است به نحوی که به طور معمول و تحت شرط عدم لغزش^۲، سرعت سیال روی دیوارها صفر بوده و در مرکز کانال یا لوله به مقدار حداکثر خود می‌رسد. پروفیل سرعت^۳ که همان میدان سرعت در مقطع معینی از کانال است در این حالت می‌تواند تابعیت خاصی از فاصله از دیوارها داشته یا شکلی نامعین داشته باشد. در عوض در جریان بیرونی به دلیل عدم حضور یا عدم تاثیر مرزها، میدان سرعت یکنواخت بوده و گرادیان^۴ آن تنها در نواحی اطراف اجسام شناور در سیال دیده می‌شود [۳۱].

¹ Internal flow

² No slip condition

³ Velocity profile

⁴ Gradient



شکل (۱-۲) پروفیل سرعت در جریان توسعه یافته درون یک لوله در حالت a: جریان لایه‌ای و b: جریان آشفته

دبی حاصل انتگرال برداری سرعت روی مقطع عبور سیال است. اندازه‌گیری سرعت یا دبی می‌تواند به طور کلی به منظور تعیین کمیت‌های ترمودینامیکی و تبیین حالت (استیت^۱) سیستم انجام شود. به طور کلی اندازه‌گیری شارش سیال (دبی یا سرعت) به کمک تجهیزاتی به نام جریان سنج یا فلومتر انجام می‌شود.

۲-۲: کاربرد پلاسمای الکتریکی در جریان سنجی سیالات گازی

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره گردید، پلاسمای الکتریکی می‌تواند در سنجش دبی یا سرعت سیالات به کار رود. با توجه به سابقه طولانی و گستردگی تحقیقات انجام شده در این خصوص، تنوع روش‌های ابداع شده در این حوزه بالا بوده و دسته بندی جریان‌سنج‌های ساخته شده با این روش اندکی دشوار است. با اینحال می‌توان به طور کلی جریان‌سنج‌های ساخته شده بر مبنای پلاسمای الکتریکی را به دو دسته کلی تقسیم نمود.

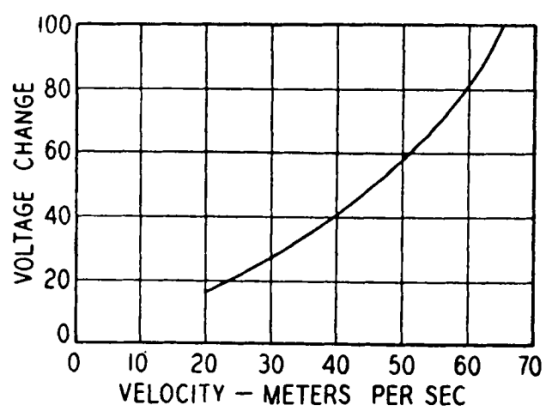


شکل (۲-۲): دسته بندی انواع جریان‌سنج‌های پلاسمایی

¹ State

۲-۱-۲: اندازه‌گیری جریان سیال با بررسی پارامترهای تخلیه الکتریکی

در این روش که پیشگام روش‌های معرفی شده در این حوزه می‌باشد، یک تخلیه الکتریکی در مسیر جریان سیال قرار گرفته و پارامترهای آن از قبیل ولتاژ، جریان الکتریکی و یا فرکانس مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تحقیقات نشان می‌دهد که اگر همه پارامترها ثابت بوده و تنها یک پارامتر وابسته (معمولا ولتاژ یا جریان) وجود داشته باشد، بین آن پارامتر و سرعت سیال برخوردی به تخلیه رابطه معنادار وجود خواهد داشت. در واقع اولین مقاله در خصوص سرعت سنجی با تخلیه الکتریکی نیز بر این مبنا است. یک نمودار کالیبراسیون نوعی در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. در این نمودار تخلیه الکتریکی با جریان ثابت به طور عرضی در معرض جریان هوا قرار گرفته و ولتاژ دو سر آن اندازه‌گیری شده است. همانطور که دیده می‌شود یک وابستگی مشخص و غیر خطی بین ولتاژ و سرعت سیال وجود دارد.



شکل (۲-۳): تغییرات اختلاف پتانسیل تخلیه روشن بر حسب سرعت سیال برخوردی

(فاصله الکترودها و شدت جریان ثابت است) [۲]

هنوز هم در خصوص شکل کلی تابع فوق تفاهم نظر وجود ندارد اما عموماً رابطه بین ولتاژ با سرعت سیال، مستقیم و رابطه بین جریان الکتریکی و سرعت سیال معکوس است. در سرعت‌های مافوق صوت این روند تغییر می‌کند رابطه ولتاژ و سرعت سیال معکوس می‌شود. این نشان می‌دهد که ممکن است تابع مد نظر در هر بازه از سرعت سیال شکل متفاوتی داشته باشد. به علاوه پارامترهای دیگر از جمله نوع تخلیه و شکل و جنس الکترودها و فشار هوا و... نیز می‌توانند اثر گذار باشند.

۱۲ پارامتر فیزیکی مختلف می‌توانند در این پدیده موثر باشند. با در نظر گرفتن فشار (یا چگالی به طور معادل در دمای ثابت) یک رابطه تجربی بین ولتاژ، فاصله الکترودها و قطر الکترودها با جریان عبوری از تخلیه بدین شکل است:

$$I = C \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^a (s)^b (V - V_0)^c \quad (1-2)$$

در این رابطه s فاصله بین الکترودها است و V و ρ به ترتیب ولتاژ و چگالی را نشان می‌دهد و سایر پارامترها (a, b, c, C)، ضرایب تجربی هستند

از رابطه فوق می‌توان این ایده را دریافت کرد که تخلیه می‌تواند به عنوان سنسور فشار هم استفاده شود هرچند تا سالها بعد این ایده به طور مجزا بررسی نمی‌گردد [۳۳, ۳۴].

به طور کلی به دلیل پیچیدگی فیزیک حاکم بر پدیده، تاکنون بررسی تحلیلی جامعی برای بدست آوردن رابطه‌ای جامع انجام نشده است. در تخلیه تاریک می‌توان و با فرض یکنواخت بودن میدان بین الکترودها می‌توان رابطه‌ای تحلیلی بین ولتاژ تخلیه و سرعت هوا ارائه نمود.

اما چون فرض یکنواختی میدان بین الکترودها در تخلیه روشن صادق نیست. نمی‌توان در تخلیه روشن چنین رابطه‌ای را ارائه نمود. در عوض می‌توان راجع به مکانیزهای کلی که بر تغییرات پارامترهای تخلیه موثرند اظهار نظر کرد. به طور کلی اثر شارش گاز روی تخلیه الکتریکی در سه مورد خلاصه می‌شود:

۱- تغییر فشار ناشی از سرعت سیال (طبق قانون برنولی) که باعث افزایش مسیر پویش آزاد شده

لذا ناحیه کاتدی بزرگ می‌شود و روی پارامترهای الکتریکی تخلیه تاثیرگذار است

۲- خنک شدن الکترودها بر اثر برخورد هوا

۳- نهایتاً پراکنده شدن یونها و حامل‌های بار بر اثر مومنتوم ناشی از برخورد مولکولهای جریان

که دو پارامتر اول زیاد موثر نیستند و نقش اصلی را پارامتر سوم بازی می‌کند.

چالش بزرگی در این روش وجود دارد و آن تخریب مداوم الکترودها ضمن برقراری تخلیه است. در واقع به دلیل فرآیند اسپاترینگ^۱ و همچنین گرم شدن الکترودها به طور موضعی، به مرور زمان سطح الکترودها تخریب شده و فاصله و مقاومت الکتریکی آنها در برابر جریان الکتریکی تغییر می‌کند به نحوی که این اثر یک پارامتر کنترل نشده را وارد داده‌های حاصل از آزمایشات می‌نماید.

به عبارتی اگر تخلیه‌ای داشته باشیم که در شرایط هوای ساکن و با جریان الکتریکی I_0 برقرار باشد پس از مواجهه با جریان گاز و طی مدت زمانی مشخص جهت انجام آزمایشات مجدداً به حالت اولیه و در هوای ساکن قرار گیرد، جریان الکتریکی عبوری از آن برابر با مقدار اولیه یعنی I_0 نخواهد بود و تغییر کرده است که این تغییر ناشی از خوردگی الکترودها طی آزمایش و در طول زمان برقراری تخلیه است. به دلیل شکل نمودار بدست آمده طی افزایش و کاهش جریان سیال، اصطلاحاً این پدیده هیستریزیس^۲ نامگذاری شده است. چون بناست این پدیده در نهایت جهت ساخت یک تجهیز اندازه‌گیری به کار رود، مطلوب است تا چنین اثراتی به طور کامل حذف گردند.

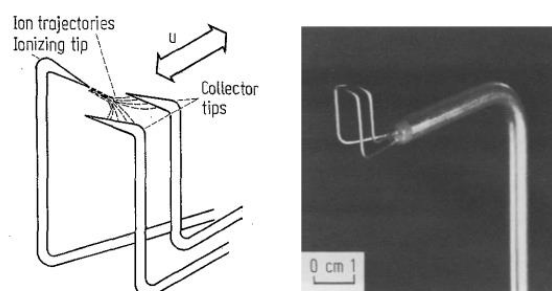
بررسی‌ها نشان می‌دهد که با پائین آوردن جریان تخلیه در حد میکرو آمپر و کوچک کردن ابعاد تخلیه می‌توان نرخ تخریب الکترودها را تا حد قابل قبولی کاهش داد. همچنین انتخاب شکل و جنس الکترودها مناسب ممکن است بتواند کمی در کنترل این اثر نقش داشته باشند در این راستا از مواد مختلفی همچون برنج، آهن، فولاد و نقره به عنوان الکترودها استفاده شده است [۲] که طبق آزمایشات پلاتین و تنگستن بهترین نتایج را نشان می‌دهند.

نایگارد در مقاله خود در ۱۹۶۵ ایده مقایسه جریان بین دو شاخه از تخلیه به جای اندازه‌گیری مقدار مطلق آن را مطرح می‌کند [۱۴]. در طرح نایگارد یک تخلیه الکتریکی یکسو وجود دارد که از یک آند شروع می‌شود و به طور مساوی بین دو کاتد توزیع می‌شود یک کاتد در بالادست و دیگری در پائین دست جریان قرار دارد. برقراری جریان سیال تساوی جریان بین آند و هر یک از این دو کاتد را بر هم

¹ Sputtering

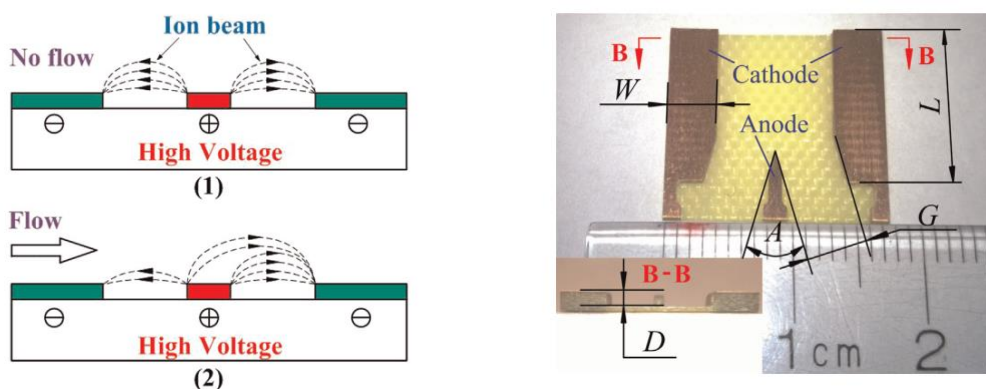
² Hysteresis

می‌زند نایگارد در آزمایشات خود نشان می‌دهد که اختلاف بین جریان این دو شاخه از تخلیه با شارش سیال رابطه دارد. در واقع با این روش اثرات مربوط به خوردگی الکترودها حذف می‌گردد چرا که خوردگی روی مقدار کلی جریان تاثیر می‌گذارد اما اختلاف دو شاخه جریان با یکدیگر همچنان تنها از شارش سیال اثر می‌پذیرد. در واقع هرچند در تحقیقات بعدی ایده‌های مختلفی در خصوص آرایش الکترونها و روش‌های تولید جریان الکتریکی ارائه می‌شوند اما اصل موضوع و ایده محوری همچنان مقایسه جریان بین شاخه‌های مختلف است. (شکل‌های ۲-۴ و ۲-۵)



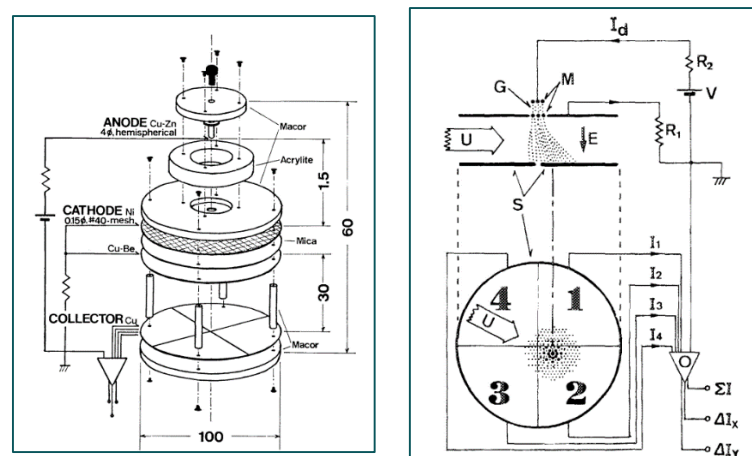
شکل (۲-۴): طرح الکترودهای استفاده شده توسط دوربین [۱۵] بر اساس ایده نایگارد

مزیت دیگر این روش، امکان تشخیص جهت شارش سیال است. در مقاله ارائه شده توسط برات به جای دو الکتروود جمع‌آوری کننده جریان، ۴ الکتروود وجود دارند که جریان از یک سیم در مرکز این ۴ الکتروود میله‌ای، در چهار سوی آن توزیع می‌شود [۱۷] بدین ترتیب با استفاده از مدارات مقایسه کننده جریان، نه تنها سرعت سیال قابل تشخیص است بلکه بردار جهت آن نیز قابل محاسبه خواهد بود. (شکل ۲-۶)



شکل (۲-۵): یک الکتروود که به صورت عرضی در برابر سیال قرار می‌گیرد و با مقایسه جریان کار می‌کند [۳۸]

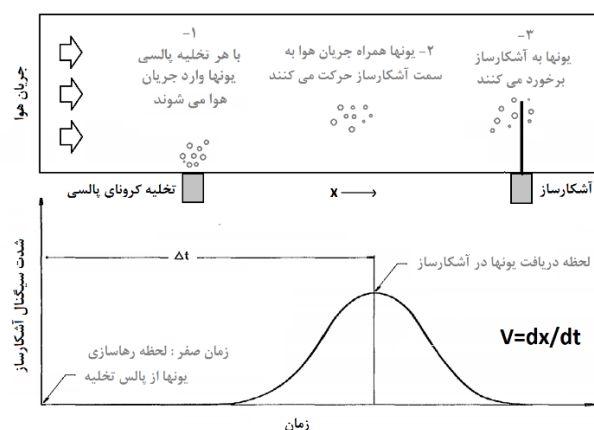
به طور کلی روش مقایسه جریان بین چند الکتروود، از روش‌های موفقیت آمیز محسوب می‌شود به نحوی که در مقاله ۱۹۷۷ کاپس به یک مدل تجاری ساخته شده بر مبنای این روش اشاره می‌گردد [۳۶] بدان معنا که این متد توانسته است از سد تجاری سازی عبور کند با اینحال پس از مدتی و به دلایل نامعلوم تولید جریان‌سنج‌های مبتنی بر این متد متوقف می‌گردد.



شکل (۲-۶): طرح سیستم استفاده شده توسط یاماناکا و همکاران [۱۶]

۲-۲-۲: اندازه‌گیری جریان سیال با ردیابی یونها

این روش رویکرد اصلی مد نظر در پایان نامه پیش رو می‌باشد و بدین صورت است: یک تخلیه الکتریکی در بالادست جریان سیال، یون‌هایی را آزاد می‌کند که در پائین دست به وسیله یک یا دو پراب دتکتور شناسایی می‌شوند. در حالت اول فاصله زمانی بین رهاسازی یونها و تشخیص آن‌ها بوسیله پراب اندازه‌گیری شده و با دانستن فاصله بین چشمه یون و دتکتور سرعت متوسط سیال اندازه‌گیری می‌شود. (شکل ۲-۶) اما در حالت دوم فاصله زمانی بین آشکارسازی توسط پراب اول و دوم دتکتور مبنای قرار می‌گیرد. این کار ثوابت زمانی ناشی از مدار الکترونیکی را حذف می‌کند همچنین می‌تواند در ترکیب با روش اول به کار رود و خطای اندازه‌گیری را کاهش دهد به این صورت که سرعت همزمان با متد اول و دوم اندازه‌گیری شده و متوسط آن اعلام شود.



شکل (۷-۲): فرآیند کلی در جریانسنج یونی

در واقع فیزیک حاکم بر این روش بسیار ساده است. اما در عمل چون مقدار عامل‌های باردار در سیال بسیار کم و جریان دریافتی از آن‌ها در محدوده نانو آمپر می‌باشد، ردیابی این جریان کم در سیال بسیار دشوار است و برای بررسی این نوع جریان‌سنج نیاز به طراحی مدارات پیچیده است. در روشی دیگر به جای اندازه‌گیری زمان پرواز یون‌ها از فرکانس استفاده می‌شود به این صورت که تخلیه‌ها به طور پالسی انجام می‌شود و شروع هر تخلیه بعدی پس از رسیدن یون‌های تخلیه قبلی به دکتور است لذا به جای اندازه‌گیری زمان، فرکانس توالی تخلیه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. اثر حضور پراب آشکار ساز در مسیر جریان نیز ممکن است به خطا در اندازه‌گیری سرعت سیال منجر شود. نوعی از پراب که به صورت القایی و با گذر یون‌ها از درون خود کار می‌کند می‌تواند این چالش را مرتفع سازد هرچند ساختار الکترونیکی پیچیده تری خواهد داشت [۱۹].

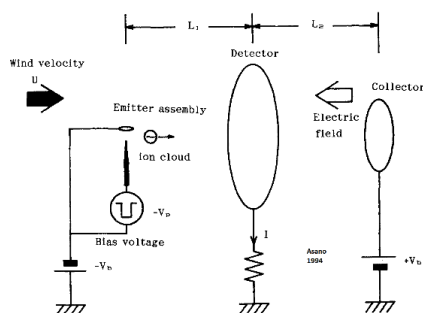


Fig. 1. Arrangement of probe electrodes of the anemometer and induced current flowing through the detector due to a travel of negative charge cloud.

شکل (۸-۲) بلوک دیاگرام چیدمان به کار رفته توسط آسانو و همکاران [۱۹]

۲-۲-۳: سایر روش‌ها

علاوه بر دو روش فوق، روش‌های دیگری نیز وجود دارند که در آن‌ها به نحوی پلاسمای ناشی از تخلیه الکتریکی برای اندازه‌گیری شدت جریان به کار می‌رود.

یک متد که ابتدا توسط لاولاک و واسیلوسکا در ۱۹۴۹ یک چشمه رادیواکتیو (یک گوی با روکش پلونیوم) را در مسیر سیال قرار داده و در اطراف آن دو سری الکتروود وجود دارد که یکی با ولتاژ ۱۰۰ ولت و دیگری متصل به زمین است. پروتوهای آلفا منتشر شده از منبع رادیواکتیو باعث یونیزه شدن هوا می‌شوند که این یون‌ها در میدان بین دو الکتروود شتاب گرفته و از طریق الکتروود با پتانسیل صفر به زمین تخلیه می‌گردند [۸]. در این پژوهش رابطه بین جریان الکتریکی عبوری از الکتروود مذکور و سرعت شارش سیال بررسی شده و رابطه خطی و مستقیم بدست آمده است. به عبارتی هرچه شدت جریان سیال بیشتر باشد یون‌های بیشتری در پائین دست جمع آوری می‌شوند. دلیل این امر کاهش زمان پرواز یون‌ها و در نتیجه کاهش زمان بازترکیب و خنثی سازی آن‌هاست.

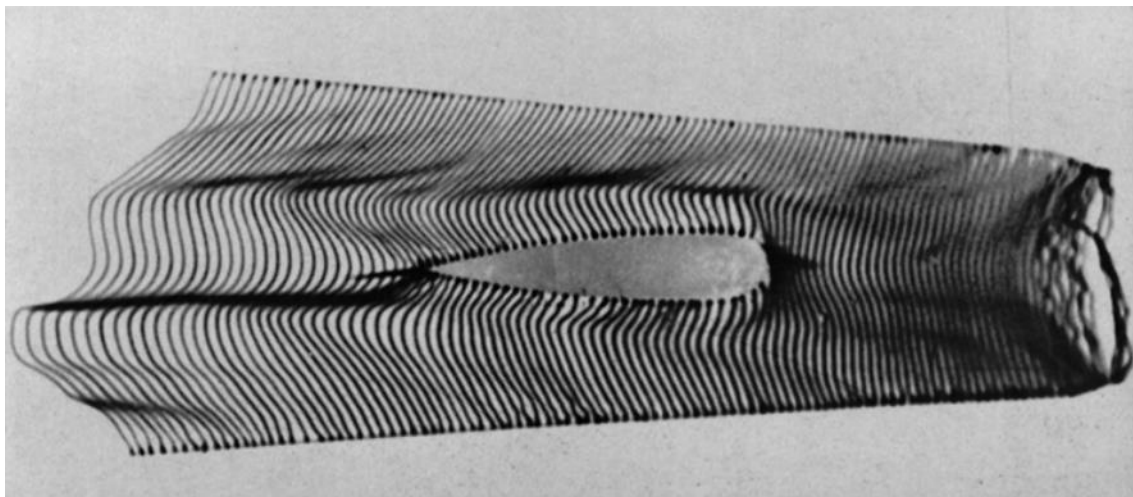
کلایتن^۱ و وب^۲ نیز در سال ۱۹۶۴ تحقیقات خود را که بیشتر جنبه تحلیلی دارد بر روی این نوع از جریان‌سنج منتشر می‌کنند [۲۰]. در مقاله آن‌ها یک چشمه یون در بالادست و یک کولکتور در پائین دست واقع شده که یون‌های شناور در سیال را جمع آوری کرده و به زمین انتقال می‌دهد. با افزایش شارش سیال جریان کولکتور به زمین؛ افزایش می‌یابد. این مقاله سه سال بعد (۱۹۶۷) توسط هریبار^۳ کامل تر می‌شود [۲۱]. این اثرات به طور ضمنی در مقالات دسته اول که سرعت سیال بر مبنای اختلاف جریان بین دو الکتروود اندازه‌گیری می‌شده است (بخش ۲-۳-۱) نیز مورد اشاره واقع شده بدین صورت که جمع جریان الکتروودها به سرعت سیال وابستگی نشان می‌دهد. بعلاوه در مقالات جونز که در آن‌ها نحوه انتشار یون‌ها نیز بررسی شده‌اند نیز مورد اشاره قرار گرفته اند [۴۰]. از سایر پژوهش‌های صورت گرفته بر روی این متد می‌توان به هاگاشیاما و آسانو در ۱۹۹۰ اشاره نمود [۱۸].

¹ Clayton

² Web

³ Hribar

متد دیگر در بررسی سیال با تخلیه الکتریکی، مشاهده و آنالیز شکل تخلیه است که می‌تواند در تعیین سرعت نقطه‌ای یا به طور کلی تر در تعیین میدان سرعت سیال در یک مقطع به کار رود. از اولین مقالات در این حوزه می‌توان به مقالات فرونگل^۱ ۱۹۶۲ و لهایه^۲ ۱۹۶۷ اشاره نمود [۴۱، ۴۲]. این روش در جریان‌های سوپرسونیک [۴۳] و حتی در جریان‌های هایپرسونیک با سرعت بیش از ۱۷ ماخ نیز با موفقیت مورد استفاده واقع شده است [۴۴]. حتی گزارش‌های متعددی در مورد استفاده از این متد در تونل باد برای تعیین میدان سیال و بررسی ناحیه گردابه پشت اجسام شناور توسط سازمان ناسا انجام شده است.



شکل (۲-۹): شکل تخلیه الکتریکی می‌تواند بیانگر سرعت سیال باشد [۴۱]

خطوط مشکی، تخلیه‌های قوسی متوالی هستند

۲-۳: بررسی آشفته‌گی جریان

یکی از ویژگی‌های مهم در جریان‌سنج‌ها، پاسخ فرکانسی یا همان توانایی در واکنش به نوسانات زمانی جریان می‌باشد. این کمیت برای تمامی ابزارهای اندازه‌گیری و حتی گوش انسان نیز تعریف می‌شود. در هات و ایر که یک ابزار پرکاربرد در بررسی سیالات است این کمیت به طور معمول در محدوده ۵ الی ۷ کیلوهرتز است [۴۵] در حالی که فرکانس نوسانات در یک جریان سیال کاملاً آشفته می‌تواند از مرتبه ۵۰ کیلوهرتز باشد [۴۶]

¹ Frungel

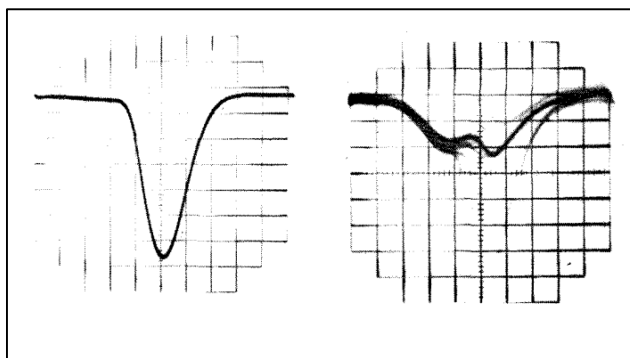
² Lahaye

در بسیاری از تحقیقات مرتبط با جریان‌سنج‌های تخلیه الکتریکی تلاش شده تا پاسخ فرکانسی ابزار بدست آمده قابل مقایسه یا حتی بهتر از ابزار جریانسنجی متداولی مثل هات وایر باشد. حتی در اولین مقاله این حوزه لیندوال اشاره می‌کند که استفاده از این تجهیز می‌تواند پاسخ فرکانسی بهتری از هات وایر ارائه دهد هرچند که نتایج لیندوال تائید نمی‌شود اما اصل این فرض بعداً توسط دیگران بررسی و تائید می‌شود [۳۲، ۳۳].

در عوض در جریان‌سنج‌های یونی نمی‌توان انتظار پاسخ فرکانسی بالا داشت چرا که زمان لازم برای ردیابی یا جمع‌آوری یون‌ها در جریان‌سنج‌های یونی در بهترین حالت در محدوده میلی ثانیه بوده و حداکثر پاسخ فرکانسی قابل حصول کمتر از یک کیلوهرتز خواهد بود.

در عوض شکل سیگنال دریافتی از دتکتور می‌تواند معیاری از آشفتگی سیال ارائه دهد. مدل‌ها نشان می‌دهند که در سیال آرام انتشار یون‌ها به صورت کروی و سیگنال دریافتی شکل گوسی خواهد داشت اما در سیال آشفته انتشار یون‌ها در برخورد با مراکز آشفتگی دچار بهم ریختگی شده و توزیع آن‌ها از حالت یکنواخت خارج می‌شود. این تفاوت در سیگنال دریافتی توسط دتکتور (چه به صورت القایی و چه به صورت برخوردی) قابل تمایز است.

لیلینفلد در مقاله خود به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد که سیگنال دریافتی توسط دتکتور در حالتی که جریان سیال لایه‌ای باشد به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سیال آشفته تفاوت دارد (شکل ۲-۱۱). اما تاکنون یک تحلیل سیستماتیک برای یافتن ارتباط بین شکل سیگنال مذبور و وضعیت آشفتگی در سیال ارائه نشده است.



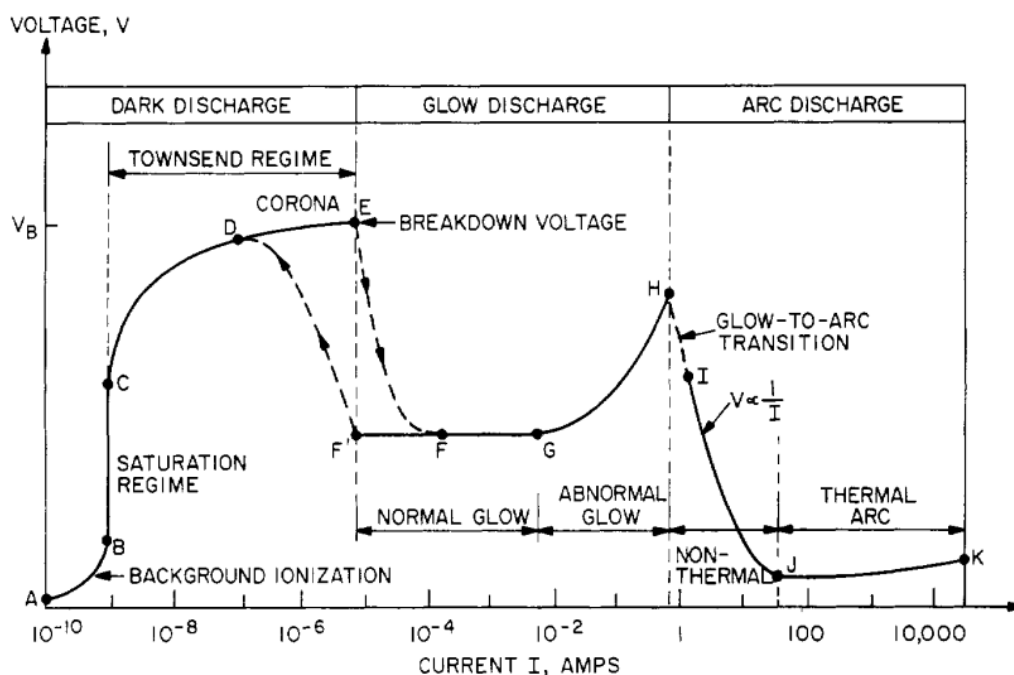
شکل (۲-۱۰): شکل سیگنال دریافت شده در سیال آرام (چپ) و آشفته (راست) [۲۲]

۲-۴: انواع تخلیه الکتریکی به کار رفته در جریان سنج‌های یونی

همانطور که گفته شد در جریان‌سنج‌های تخلیه الکتریکی (دسته اول) یک تخلیه الکتریکی به طور مستقیم در معرض سیال قرار داده می‌شود. این تخلیه می‌تواند از نوع قوسی یا تخلیه روشن یا انواع دیگر تخلیه باشد در عوض در جریان‌سنج‌های یونی معمولاً از تخلیه کرونا استفاده شده است. بدین شکل که تخلیه در ناحیه مجزایی از دکتور قرار دارد و عامل‌های باردار آزاد شده از تخلیه بوسیله جریان هوا به سمت دکتور حرکت می‌کنند.

۲-۴-۱: رژیم‌های مختلف تخلیه الکتریکی

برای بررسی دلیل انتخاب هر یک از انواع تخلیه الکتریکی در آزمایش‌های بررسی شده قبلی، لازم است ابتدا مروری داشته باشیم بر انواع تخلیه الکتریکی. طبق نمودار زیر اگر دو الکتروود در فاصله و فشار معینی از یکدیگر واقع شده باشند با افزایش ولتاژ بین الکتروودها شاهد رژیم‌های مختلف تخلیه الکتریکی خواهیم بود که در ادامه هر یک بررسی خواهند شد.



شکل (۲-۱۱): منحنی مشخصه ولتاژ - جریان در رژیم‌های مختلف تخلیه [۴۷]

- **یونیزاسیون پس زمینه (ناحیه A تا B):** در ولتاژ بسیار کم الکترون‌های آزاد ایجاد شده در گاز که به خاطر برخورد تابش زمینه (تابش کیهانی و تابش ناشی از مواد رادیواکتیو در محیط) ایجاد شده‌اند در میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و حداکثر جریان B را ایجاد می‌کنند. این ولتاژ کم موجب تولید الکترون‌های آزاد جدید نمی‌شود.
- **رژیم توزند (ناحیه B تا E):** اگر ولتاژ را تا مقدار C افزایش دهیم جریان هیچ تغییری نمی‌کند و برابر با حداکثر جریان ناشی از یونیزاسیون پس زمینه خواهد بود اما از مقدار $V(C)$ به بعد برخوردهای بین الکترون‌های آزاد شتاب گرفته در میدان و ذرات گاز، به تولید الکترون‌های ثانویه کمک کرده و یونیزاسیون رخ دهد. در ناحیه D تا E که به ناحیه کرونا معروف است ولتاژ در نقاط نوک تیز به اندازه‌ای است که منجر به ایجاد تخلیه در اطراف خود می‌شود (ناحیه کرونا در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت)
- **تخلیه تابان (ناحیه E الی H):** از نقطه E که شکست الکتریکی و پدیده بهمن الکترونی به طور کامل در تمام گاز و بین دو الکتروود رخ می‌دهد تا نقطه H شاهد انتشار نور از تخلیه و وجود یک کانال روشن بین دو الکتروود هستیم لذا این ناحیه به "تخلیه تابان" شهرت دارد. بروز شکست الکتریکی در نقطه E با افت ولتاژ همراه است به نحوی که اختلاف پتانسیل دو سر تخلیه به طور خود به خود روی مقدار $V(f)$ قرار خواهد گرفت. از نقطه F تا G تعداد حامل‌های بار به دلیل افزایش سطح مقطع و قطر کانال پلاسما بین دو الکتروود کم کم زیاد می‌شود لذا جریان نیز رشد خواهد داشت تا جایی که تمام سطح مقطع پوشیده شود. این این نقطه تا نقطه H برای افزایش جریان باید به سیستم انرژی بدهیم به عبارتی ولتاژ را افزایش دهیم.
- **تخلیه قوسی (ناحیه I تا K):** با بالا رفتن شدت جریان الکتروودها از خود الکترون ساطع می‌کنند که این موضوع منجر به تولید حامل‌های بار جدید و افزایش جریان می‌شود.

مشخصه بارز قوس الکتریکی افت ولتاژ پائین و شدت جریان بالا است و تخلیه الکتریکی در یک کانال قوسی شکل روشن برقرار است.

در جریان‌سنج‌های تخلیه الکتریکی مواجهه تخلیه با جریان سیال به نحوی منجر به تغییر خواص تخلیه می‌گردد. از این رو انواع مختلف تخلیه شامل تخلیه تاریک، تخلیه روشن و تخلیه قوسی هر کدام در این نوع از جریان‌سنج‌ها به کار رفته‌اند. به عنوان یک اصل کلی، در ولتاژ ثابت برخورد جریان هوا باعث کاهش مشارکت حامل‌های بار در انتقال جریان می‌شود لذا شدت جریان الکتریکی با برخورد جریان هوا کاهش می‌یابد. اما در جریان‌های مافوق صوت این اصل صدق نمی‌کند

در جریان‌سنج‌های یونی قضیه به طور کلی متفاوت است. در این جریان‌سنج‌های لازم است یون‌هایی در مسیر سیال ردیابی یا جمع‌آوری شوند. در هر یک از انواع تخلیه الکتریکی ذکر شده در قسمت قبلی؛ در ناحیه تخلیه شاهد حضور الکترون‌ها، یون‌های مثبت و یون‌های منفی هستیم و باید به نحوی گونه باردار مد نظر خود را از ناحیه تخلیه بیرون بکشیم و با جریان سیال همراه کنیم. این کار در مورد تخلیه کرونا کمی ساده‌تر انجام می‌شود لذا این نوع از تخلیه بیشتر در جریان‌سنج‌های یونی استفاده شده است

۲-۴-۲: بررسی بیشتر تخلیه کرونا

تخلیه کرونا در شرایطی شکل می‌گیرد که شدت میدان الکتریکی در اطراف یک الکتروود به حدی باشد که باعث ایجاد فروشکست الکتریکی در محیط اطراف شود. لذا معمولاً این پدیده در اطراف الکتروودهای نوک تیز که شدت میدان در آنجا بالاست، مشاهده می‌شود. با بروز تخلیه کرونا شاهد نشت بار و برقراری جریان الکتریکی از الکتروود به محیط اطراف آن خواهیم بود. حسب ولتاژ اعمالی به الکتروود تخلیه (نسبت به زمین) کرونا می‌تواند مثبت یا منفی باشد. فرآیندهای دخیل در کروناهای مثبت و منفی متمایزند.



شکل (۲-۱۲): تخلیه کرونا به شکل هاله روشنی در اطراف خطوط فشار قوی انتقال برق قابل مشاهده است

منبع تصویر: Nitromethane

تخلیه کرونا معمولاً به صورت هاله روشنی به رنگ بنفش در اطراف الکتروود مشاهده می‌شود. این هاله می‌تواند شکل جاروب مانند یا حالتی شبیه به یک غلاف روشن داشته باشد که سطح الکتروود را می‌پوشاند. همانطور که مشخص است این نوع تخلیه الکتریکی حول یک الکتروود منفرد برقرار است و برخلاف انواع دیگر تخلیه (تخلیه قوسی و روشن و...) الزاماً تمام ناحیه فیما بین دو الکتروود را در بر نمی‌گیرد لذا تخلیه تک قطبی هم نامیده می‌شود. از لحاظ ترمودینامیکی تخلیه کرونا یک تخلیه غیرتعادلی محسوب می‌شود [۴۸].

فرآیند تشکیل یک تخلیه کرونای مثبت بدین ترتیب است: اگر در ناحیه اطراف الکتروود، الکتروون‌هایی بواسطه عوامل محیطی (برخورد پرتوهای کیهانی یا پرتوهای یونیزان ناشی از مواد رادیواکتیو در محیط و یا اثرات فتوالکتریکی) از قید یک اتم خنثی آزاد شوند؛ این الکتروودهای اولیه می‌توانند در میدان شدید اطراف الکتروود فوق شتاب گرفته و با برخورد به اتم‌های خنثی الکتروون‌های بیشتری آزاد کنند. لازم است شدت میدان به اندازه‌ای باشد که الکتروودهای ثانویه آزاد شده به صورت تصاعدی افزایش یابند که به این فرآیند "بهمن الکترونی" گفته می‌شود. یون‌های تولید شده نیز در

میدان اطراف الکتروود شتاب گرفته و از آن دور می‌شوند. با باز ترکیب بخشی از الکترون‌ها و یون‌ها شاهد انتشار فوتون و دیده شدن درخشش کم رنگی اطراف الکتروود مثبت خواهیم بود.

لازم به ذکر است که در تخلیه کرونا، بهمن الکترونی تنها در اطراف الکتروود مثبت برقرار است و تا الکتروود دوم (زمین) ادامه نمی‌یابد. برای بررسی کیفی این پدیده می‌توانیم از ضریب اول تاووزند استفاده کنیم. این ضریب با علامت α نمایش داده می‌شود و بیان کننده تعداد الکترون‌های تولید شده توسط یک الکترون و در واحد طول در جهت میدان الکتریکی می‌باشد به عبارتی می‌توان تغییرات تعداد الکترون‌ها در واحد طول را با در نظر گرفتن ضریب اول تاووزند بدین صورت بیان نمود

$$\frac{dn}{dx} = \alpha n(x) \quad (2-2)$$

که در آن n نشان دهنده چگالی الکترون‌ها می‌باشد. جواب این معادله با فرض شرط اولیه به

$$\text{شکل } n(x)|_{x=0} = n_0 \text{ برابر مقدار زیر خواهد بود}$$

$$n(x) = n_0 e^{\alpha x} \quad (3-2)$$

از آنجا که الکترون‌ها می‌توانند در تشکیل یون‌های منفی نقش داشته باشند لازم است ضریب

موثر یونیزاسیون به این صورت تعریف شود

$$\alpha' = \alpha - \eta \quad (4-2)$$

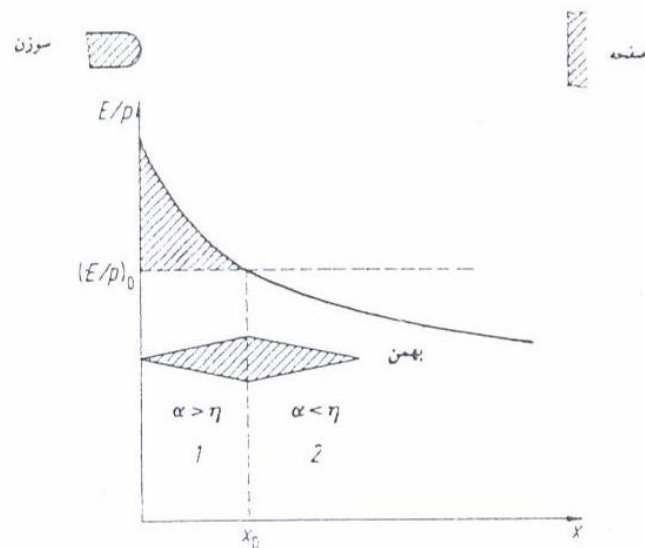
که می‌توان تمامی اثرات ناشی از عدم مشارکت الکترون‌ها در بهمن الکترونی را در مقدار η لحاظ

نمود. در این صورت رابطه ۳-۲ بدین شکل باز آرایی می‌شود.

$$n(x) = n_0 e^{\alpha' x} = n_0 e^{(\alpha - \eta)x} \quad (5-2)$$

مقدار α و η و به طور کلی مقدار ضریب موثر یونیزاسیون به شدت میدان الکتریکی وابسته است.

لذا در نواحی اطراف الکتروود نوک تیز که شدت میدان الکتریکی بالاست مقدار α' بزرگتر از صفر بوده و شاهد فرآیند بهمن الکترونی می‌باشیم اما با دور شدن از آن مقدار ضریب موثر یونیزاسیون کاهش یافته و بهمن الکترونی از بین می‌رود و چگالی الکترون‌ها کاهش می‌یابد.



شکل (۲-۱۳): ضریب یونیزاسیون موثر و اثر آن بر بهمن الکترونی در میدان غیر یکنواخت: در قسمت ۱ بهمن الکترونی رشد می‌کند و در قسمت ۲ از بین می‌رود [۴۹]

یون‌های تولید شده ضمن دور شدن از الکتروود مثبت بخشی از مومنتوم خود را به اتم‌های خنثی منتقل می‌کنند. جریان کلی ایجاد شده در سیال در این حالت اصطلاحاً جریان الکتروهیدرودینامیکی نامیده می‌شود که در قسمت‌های بعدی بیشتر به آن پرداخته خواهد شد. در جریان‌سنج‌های یونی یون‌های تولید شده در تخلیه کرونا به ذرات سیال برخورد کرده و به همراه آن‌ها در مسیر جریان حرکت خواهند کرد که با اندازه‌گیری زمان پرواز آن‌ها از لحظه آزاد سازی تا لحظه آشکار سازی؛ سرعت سیال اندازه‌گیری خواهد شد. با توجه به تعداد کل یون‌های تولید شده در تخلیه کرونا و در نظر گرفتن سهمی از یون‌ها که با سیال به پائین دست حرکت می‌کنند، محدوده جریان الکتریکی کل در پائین دست تخلیه بسیار کوچک و از مرتبه نانو آمپر خواهد بود.

آنگونه که اشاره گردید، در جریان‌سنج‌های یونی باید تخلیه بصورت پالسی باشد تا بتوان زمان پرواز یک توده مشخص از یون‌ها را اندازه گرفت. با بررسی کلی مقالات اشاره شده در بخش ۲-۲-۲، طول پالس تخلیه بین ۱۰ الی ۱۰۰ میکروثانیه مقدار مناسبی برای تولید یک تخلیه و آزاد سازی توده یون می‌باشد.

۲-۴-۳: خواص موثر پلاسما در جریان سنج‌های یونی:

خواصی از پلاسمای حاصل از تخلیه الکتریکی هستند که در بررسی عملکرد جریان‌سنج‌های یونی موثرند و در این بخش مورد بررسی قرار خواهند گرفت. اما لازم است ابتدا نگاهی به تعاریف مهم در پلاسما داشته باشیم

اصطلاح پلاسما به طور معمول به گازی اطلاق می‌شود که تمام یا بخشی از اتم‌ها یا مولکول‌های آن الکترون از دست داده‌اند و به اصطلاح یونیزه شده‌اند. فرآیند یونیزاسیون می‌تواند بواسطه حرکات گرمایی و برخوردهای ناشی از آن رخ دهد. در این حالت درجه یونیزاسیون (نسبت تعداد ذرات باردار به ذرات خنثی) را می‌توان به کمک معادله ساها مشخص کرد [۵۰]:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/KT} \quad (۲-۶)$$

که در آن n_n و n_i به ترتیب چگالی (تعداد بر متر مکعب) اتم‌های خنثی و یونیزه هستند. T دمای گاز بر حسب کلوین را مشخص می‌کند و K ثابت بولتزمن است. نهایتاً U_i انرژی یونیزاسیون گاز را نشان می‌دهد یعنی چه مقدار انرژی برای کندن بیرونی ترین الکترون لازم است، برای نیتروژن که ۷۸ درصد هوا را تشکیل می‌دهد برابر ۱۴,۵ الکترون ولت می‌باشد.

معادله ساها نشان می‌دهد که ایجاد پلاسما به طریق گرمایی روش موثری نبوده و سهم یون‌های تولید شده در این حالت بسیار کم است. در عوض در تخلیه الکتریکی درجه یونیزاسیون بسیار بالاتر می‌باشد لذا به طور معمول برای ایجاد پلاسما از تخلیه الکتریکی استفاده می‌شود.

در یک پلاسمای ضعیف یونیزه درجه یونیزاسیون بین 10^{-6} تا 10^{-3} است و در پلاسمای بسیار ضعیف یونیزه این مقدار بین 10^{-8} تا 10^{-6} قرار دارد. همانطور که گفته شد در جریان‌سنج‌های یونی، ابر پلاسمای در حال حرکت در مسیر سیال مقدار جریان بسیار کم در حد نانوآمپر دارد و با توجه به مقالات و نتیجه شبیه‌سازی، در این حالت درجه یونیزاسیون در مرتبه 10^{-12} تا 10^{-9} می‌باشد. لذا با

توجه به تعداد بسیار کم ذرات باردار در مقایسه با ذرات خنثی انتظار داریم برخوردهای بین ذرات باردار بسیار کمتر از برخورد بین ذرات باردار با ذرات خنثی زمینه باشد.

اگر قانون دوم نیوتن را برای یک ذره باردار تحت برخورد بنویسیم:

$$m \frac{DV}{Dt} = qE - mv_m V \quad (۶-۲)$$

که در آن v_m فرکانس متوسط برخوردها است. به عبارتی تغییرات مومنتوم ذره حاصل نیروی ناشی از میدان الکتریکی و انتقال مومنتوم ناشی از برخوردها است. اگر این معادله را برای V حل کنیم خواهیم داشت

$$V(t) = \left(\frac{qE}{mv_m} \right) [1 - \exp(-v_m t)] + V_0 \exp(-v_m t) \quad (۷-۲)$$

اگر عبارت فوق را در $t \rightarrow \infty$ بررسی کنیم خواهیم داشت

$$V_{steady} = \frac{qE}{mv_m} = V_d \quad (۸-۲)$$

به سرعت بدست آمده "سرعت سوق" گفته می‌شود و معادل سرعت متوسطی است که حامل‌های بار در حالت پایدار در میدان الکتریکی با این سرعت تحت میدان حرکت می‌کنند. سرعت سوق مبنای پارامتر مهم دیگری است به نام موبیلیتی (μ) و بدین صورت تعریف می‌شود

$$V_d = \mu E \quad \text{الف - (۹-۲)}$$

$$\mu = \frac{q}{mv_m} \quad \text{ب - (۹-۲)}$$

موبیلیتی همانطور که از نام آن مشخص است میزان تحرک بارها در میدان الکتریکی را نشان می‌دهد و طبعا به فرکانس متوسط برخورد بستگی دارد. به طور معمول یونها چون سنگین هستند در مقایسه با الکترون‌ها موبیلیتی بسیار کمتری دارند. یونها مثبت و منفی نیز در این پارامتر متفاوتند. موبیلیتی در میدان‌های شدید به فرکانس میدان الکتریکی بستگی دارد. فرکانس متوسط برخورد که در مخرج موبیلیتی ظاهر شده است به چگالی، سرعت و سطح مقطع برخورد بستگی دارد.

یکی دیگر از پارامترهای تعیین کننده در بررسی یک پلاسما؛ میزان تعادلی بودن آن است. در یک پلاسما ممکن است انرژی به طور یکسان بین گونه‌ها توزیع نشده باشد بدین صورت که الکترون‌ها از میدان سهم بیشتری از انرژی دریافت کرده باشند و دمای الکترون‌ها (بواسطه انرژی جنبشی بیشتر) از دمای یون‌ها و اتم‌های خنثی بالاتر باشد. به عبارتی در این پلاسما غیر تعادلی دما که معیاری از انرژی جنبشی است در مورد الکترون‌ها و یون‌ها متفاوت است که به این نوع پلاسما پلاسما سرد نیز گفته می‌شود. در پلاسما سرد به طور کلی می‌توانیم از حرکت حرارتی یون‌ها صرف نظر کنیم. پلاسما یونسفر و پلاسما درون یک لامپ مهتابی نمونه‌هایی از پلاسما سرد هستند. پلاسما ناشی از تخلیه کرونا در اتمسفر نیز یک پلاسما غیر تعادلی سرد محسوب می‌شود.

در عوض در پلاسما داغ یا پلاسما حرارتی، تعادل ترمودینامیکی وجود دارد که می‌تواند ناشی از بالا بودن فرکانس برخورد بین الکترون‌ها و یون‌ها باشد. تخلیه قوسی با جریان بالا مثالی از پلاسما حرارتی است.

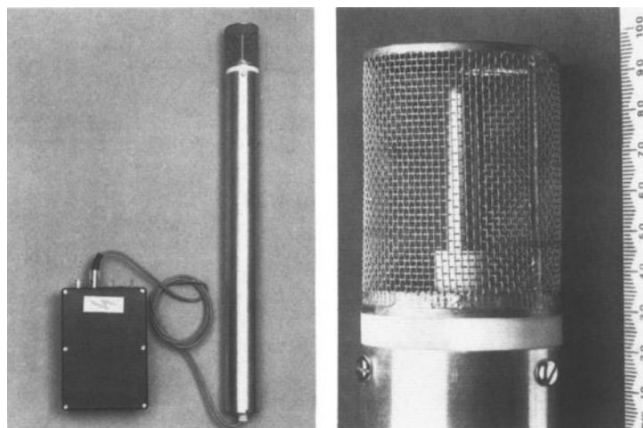
۲-۵: آشکارسازها

همانطور که قبلا اشاره گردید اندازه‌گیری سرعت می‌تواند به کمک یک یا دو آشکار ساز انجام شود. در حالتی که یک آشکار ساز موجود باشد زمان بین رها سازی یون‌ها تا دریافت سیگنال در آشکارساز اندازه‌گیری شده و با تقسیم فاصله بین چشمه یون تا آشکار ساز، بر این زمان سرعت سیال محاسبه می‌شود. در حالت دوم، دو آشکار ساز با فاصله معین وجود دارند که سیگنال یون‌ها با یک فاصله زمانی روی آن‌ها ظاهر می‌شود و بر مبنای فاصله بین دو آشکار ساز و فاصله زمانی سیگنال دریافتی سرعت بدست می‌آید. روش دوم می‌تواند دقیق‌تر باشد چون مدت اول را نیز در خود به همراه دارد و می‌تواند همزمان سرعت را از دو طریق اندازه‌گیری کرده و بدین ترتیب خطای احتمالی را شناسایی کند. جدول زیر به طور دقیق‌تر محدوده فاصله آشکارساز از یکدیگر یا از منبع یون در تحقیقات انجام شده را در مقالات مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲: محدوده فاصله آشکار ساز تا منبع تولید یون در مقالات مختلف

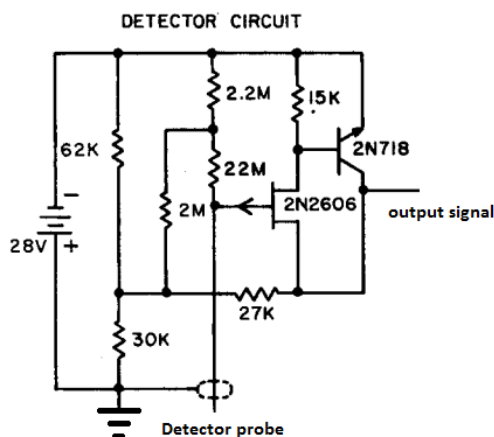
مرجع	فاصله آشکار ساز اول	فاصله آشکار ساز دوم
کولی و استیور [۱۳]	۱۲,۹ میلیمتر ۲۵,۹ میلیمتر ۵۱,۳ میلیمتر	
بوید و همکاران [۱۱]	۴ و ۶ و ۸ اینچ	یک اینچ از الکتروود اول
کونکل و تالبوت [۱۲]	۱ الی ۶ اینچ	
لایلینفلد و همکاران [۲۲]	۱۰ سانتی متر	
بس و همکاران [۲۳]	۰,۵ الی ۶ اینچ (داده‌ها در فاصله ۰,۵ الی ۲ اینچ گزارش شده اند)	
باریول و همکاران [۵۱]	۸ میلیمتر	۲ میلیمتر از الکتروود اول
آسانو و همکاران [۱۹]	۲۰ میلیمتر	

شکل کلی آشکار ساز به صورت یک آنتن یا پراب فلزی است که به یک مدار الکترونیکی متصل شده است. این آشکارسازها به دو صورت القائی و برخوردی هستند. در آشکارسازهای القائی، عبور بارها از نزدیک دتکتور موجب القای یک بار الکتریکی در دتکتور شده و بار القاء شده وارد مدارات الکترونیکی می‌شود. اما در دتکتورهای برخوردی یک پراب مستقیماً در مسیر بارهای موجود در سیال قرار می‌گیرد و بدین طریق وارد مدار الکترونیکی می‌شوند. در آشکار سازهای برخوردی پراب غالباً توسط یک توری با پتانسیل صفر پوشانده می‌شود و یک پتانسیل تحت عنوان پتانسیل بایاس بین توری و پراب قرار داده می‌شود. این ترکیب چند مزیت دارد: اولاً مانع از نفوذ میدان ناشی از تخلیه الکتریکی یا سایر میدان‌های الکترومغناطیسی مزاحم (همچون میدان ناشی از برق شهر) به پراب می‌شود و به اصطلاح آن را پوشش می‌دهد. از سوی دیگر با انتخاب جهت پتانسیل می‌تواند نسبت به بارهای ورودی به صورت انتخابی عمل کند و مانع از ورود بارهای با علامت نامطلوب و برخورد آن‌ها به پراب شود، نهایتاً این پتانسیل خود مانع از تجمع بار بر روی پراب است و باعث می‌شود تا برخورد بارها به ایجاد میدان الکترواستاتیک منجر نشود در عوض یک جریان الکتریکی ایجاد شود.



شکل (۲-۱۴): یک آشکارساز که برای تشخیص یون‌ها به کار می‌رود. [۵۲]

مقدار بار القائی یا برخوردی بسیار اندک و از مرتبه نانوآمپر است لذا باید مدار الکترونیکی متصل به پراب امپدانس بسیار بالایی داشته باشد. تقویت کننده‌های عملیاتی یا به اصطلاح اپ امپ‌ها و ترانزیستورهای اثر میدان و همینطور گیت‌های الکترونیکی که با ترکیب این دو عنصر ساخته شده‌اند به طور معمولی امپدانس بسیار بالا دارند و نسبت به عبور جریان اندک واکنش نشان می‌دهند. بورهم و همکاران در مقاله خود (۱۹۸۵) یک پراب کامل به همراه مدار الکترونیکی بر اساس اپ امپ ارائه می‌دهند که برای سنجش یون‌ها در هوا طراحی شده است و می‌تواند به ازای هر ۰,۲ نانو آمپر یک ولت خروجی دهد. (شکل ۲-۱۵) لیلینفلد نیز در مقاله خود یک مدار بر مبنای ترانزیستورهای فت ترسیم می‌کند که امپدانس ورودی آن در مرتبه ۲۰ مگا اهم است و می‌تواند جریان نانوآمپر را شناسایی کند.



شکل (۲-۱۵): بخشی از مدار استفاده شده توسط لیلینفلد برای آشکارسازی یون‌ها [۲۲]

در برخی گزارش‌های قدیمی‌تر از لامپ خلا استفاده شده. نوع خاصی از دتکتور القائی توسط آسانو و همکاران ارائه شده است (شکل ۲-۱۶). در این دتکتور یک حلقه کل مسیر سیال را در بر گرفته و عبور جریان از درون این حلقه باعث القای یک نیرو محرکه در آن می‌شود سپس این ولتاژ از طریق یک اپ امپ تقویت و شناسایی می‌شود [۱۹].

۲-۶: محدوده جریان هوا

محدوده جریان هوای به کار رفته در این روش بسیار گسترده است که از نقاط قوت این متد به شمار می‌رود. در واقع این روش از جریان‌های بسیار آرام در محدوده ۱ متر بر ثانیه تا جریان‌های بسیار سریع در مقیاس چند ماخ به کار رفته است. جدول زیر به طور مقایسه‌ای این کمیت را در مورد پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۲-۲): محدوده سرعت هوا در مقالات مختلف

مرجع	حداقل سرعت (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)
کولی و استیور [۱۳]	۰	۵۲۷ (معادل ۱,۵ ماخ)
بوید و همکاران [۱۱]	۱۰۳ (معادل ۰,۳ ماخ)	۱۳۰۰ (معادل ۳,۸ ماخ)
کونکل و تالبوت [۱۲]	۰	۶۸۶ (معادل ۲ ماخ)
لیلینفلد و همکاران [۲۲]	۵	۵۰
اوهیگاشی و همکاران [۲۵]	۰	۶۰
بس و همکاران [۲۳]	۰	۰,۵
باریول و همکاران [۵۱]	۰	۱۳۵
آسانو و همکاران [۱۹]	۰	۱۲

تلاش شده است تا در تحقیقات مختلف اثر فشار، دما و رطوبت نیز بر روی این پدیده مشاهده شود اما نشانه‌ای از اثر گذاری این پارامترها در نتایج مشاهده نشده است به عبارتی جریان سنج یونی می‌تواند به طور مستقل از تغییرات پارامترهای مذکور کار کند که از نقاط قوت دیگر در این زمینه به شمار می‌رود. در عوض جریان سنج تخلیه الکتریکی به این پارامترها حساس است.

۲-۷: طول عمر عامل‌های باردار

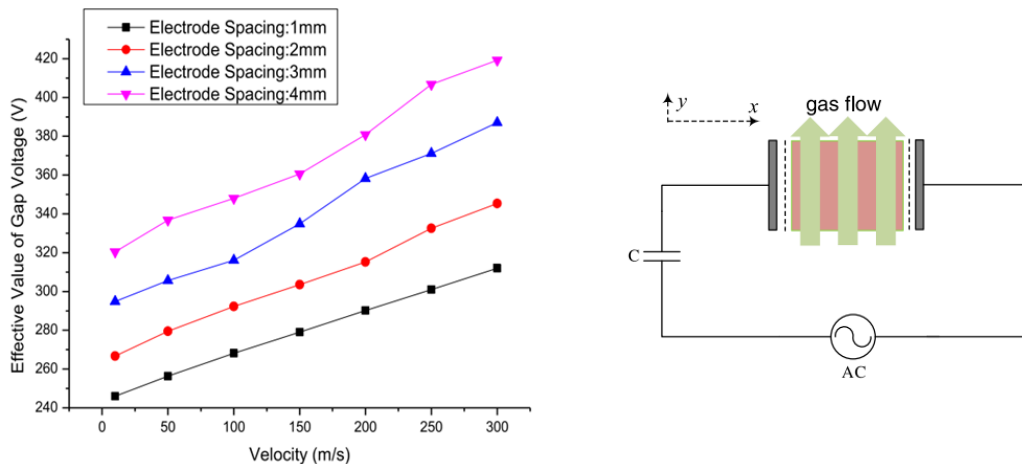
در مقالاتی که به طور مستقیم حول این موضوع نوشته شده‌اند هیچ اشاره‌ای به طول عمر عامل‌های باردار نشده است به عبارتی این سوال که آیا یون‌ها پس از خروج از ناحیه تخلیه و پس از همراهی با جریان سیال به اندازه کافی دوام دارند یا خیر؟ پاسخ داده نشده است. در عوض از آنجا که همواره سیگنال حضور یون‌ها در آشکارساز حتی در فواصل بسیار دور (۱۵ متر) مشاهده شده است [۵۲] جواب سوال فوق مثبت فرض شده. در عوض تحقیقات دیگری مجزا از این موضوع به بررسی طول عمر یون‌ها در اتمسفر می‌پردازند. طبق نتایج این تحقیقات یون‌ها تنها در ناحیه تخلیه، در معرض بازترکیب سریع با الکترون‌ها هستند و زمانی که از ناحیه تخلیه فاصله می‌گیرند طول عمری بسیار بالا از مرتبه چند دقیقه دارند [۵۳-۵۸].

۲-۸: مدل سازی رایانه‌ای و معادلات استفاده شده

تعداد پژوهش‌هایی که به طور مستقیم در مدلسازی پدیده‌های ذکر شده (شامل برهمکنش بین جریان هوا و تخلیه الکتریکی یا انتشار عامل‌های باردار در جریان گاز) کاربرد آن را به عنوان یک جریان سنج مد نظر داشته‌اند انگشت شمار است. با اینحال فیزیک مرتبط با این پدیده در حاشیه موضوعات پژوهشی دیگر به کرات مورد بررسی قرار گرفته است که در این پایان نامه هر دو گروه مورد اشاره و ارجاع قرار خواهند گرفت.

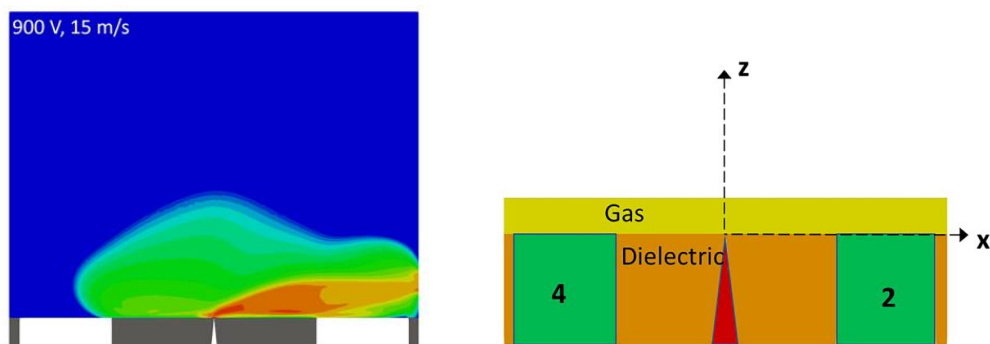
در مقاله یو و همکاران [۵۹] به طور مستقیم برخورد جریان هوا به تخلیه الکتریکی به منظور بررسی کاربرد پدیده مذکور در جریان‌سنجی بررسی شده است. در این مقاله برخورد یک تخلیه روشن متناوب سینوسی با فرکانس متغیر با جریان هوا تا سرعت ۳۰۰ متر بر ثانیه. بوسیله متد PIC و بر مبنای کد پلاسمایی xpdp2 مورد شبیه سازی قرار گرفته است و تغییر پارامترهای مختلف پلازما از جمله چگالی یون‌ها و الکترون‌ها در سرعت‌های مختلف مشاهده شده است. نتیجه اصلی که به آن اشاره

شده تغییر ولتاژ دو سر تخلیه در سرعت‌های مختلف است که در توافق با نتایج آزمایشگاهی قبلی است. بعلاوه اثر متغیرهای دیگر مثل فاصله الکترودها و فرکانس تخلیه در تغییرات ولتاژ بررسی شده است.



شکل (۲-۱۶): ساختار مساله و نتایج مدلسازی انجام شده توسط یو و همکاران [۵۸]

مقاله یو و همکاران توسط گروه دیگری مورد استناد قرار می‌گیرد [۶۰] با این تفاوت که در آن برانگیختگی پلاسما به کمک امواج میکروویو انجام می‌شود. در این طرح از اندازه‌گیری اختلاف جریان بین الکترودها (مطابق آنچه در قبل توضیح داده شد) استفاده شده است. (شکل زیر)



شکل (۲-۱۷): ژئومتری و نتایج حاصل از مدلسازی جریانسنج پلاسمایی توسط کارپتنه و همکاران [۶۰]

مقاله دیگری در خصوص شبیه سازی با در نظر گرفتن این کاربرد خاص وجود ندارد اما همانطور که اشاره گردید، برهمکنش بین پلاسمای الکتریکی و جریان هوا برای کاربردهای دیگر به دفعات مورد بررسی قرار گرفته است.

از آن جمله می‌توان به مقالات انجام شده در خصوص مدلسازی مشعل پلاسمایی^۱ [۶۱] و گلایدینگ آرک^۲ [۶۲] اشاره کرد. بعلاوه در بررسی عملکرد پیشران‌های پلاسمایی^۳ [۶۳-۶۵] و کنترل لایه مرزی به وسیله پلاسمای الکتریکی نیز مدلسازی‌های متعدد انجام شده است [۶۶-۷۰].

به طور کلی مساله برهمکنش هوا با پلاسمای الکتریکی با درنظر گرفتن دیدگاه سیالی و به کمک حل همزمان معادلات سیالی شامل معادلات: ماکسول، مومنتوم، پیوستگی و معادله حالت قابل انجام است و در حالتی که نیروهای مغناطیسی قابل صرفنظر باشند به دستگاه معادلات ساده تری تقلیل خواهد یافت که می‌تواند جریان الکتروهیدرودینامیکی در سیال را توصیف کند [۷۱, ۷۲].

¹ Plasma torch

² Gliding arc

³ plasma propulsion engine

فصل سوم:

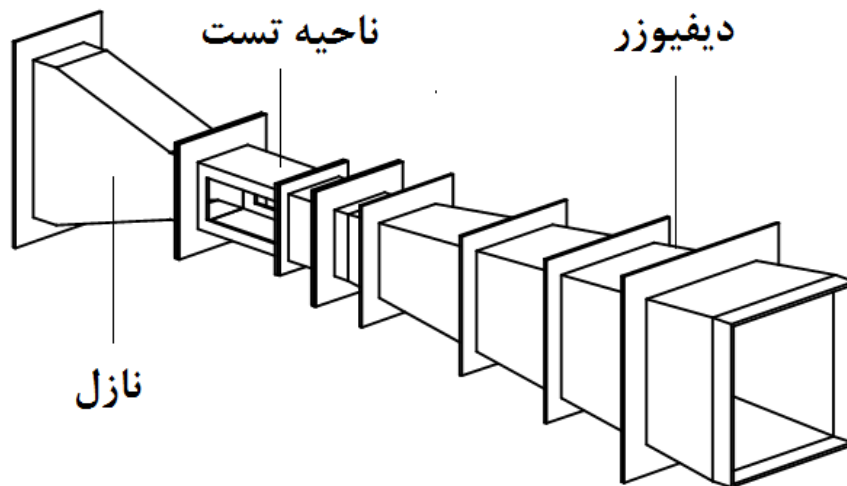
روش‌های به کار رفته جهت

بررسی عملکرد جریان سنج یونی

همانطور که اشاره گردید این پژوهش شامل دو بخش تجربی و مدلسازی رایانه‌ای می‌باشد که در این فصل روش‌های به کار رفته در بخش‌های مذکور، به تفکیک تشریح می‌گردد.

۱-۳: تونل باد

بناست تا در روند تجربی، یک نمونه از جریان‌سنج‌های یونی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گیرد، لذا قبل از هر چیز باید یک جریان یکنواخت و قابل کنترل از هوا فراهم شود. بدین منظور یک تونل باد طراحی شده است.



شکل (۱-۳): مدل سه بعدی تونل باد و اجزای آن

این تونل باد شامل سه بخش اصلی: نازل، ناحیه تست^۱ و دیفیوزر^۲ می‌باشد که انتظار داریم جریان در ناحیه میانی یا همان ناحیه تست به طور لایه ای^۳ و کاملاً یکنواخت باشد و سرعت آن در همه مقطع (به جز ناحیه بسیار کم ضخامتی در نزدیک دیواره‌ها) یکسان باشد. پس از انجام محاسبات اولیه [۷۳، ۷۴] و برای حصول اطمینان از کارکرد صحیح تونل باد، جریان هوا در آن بوسیله نرم افزار کامسول شبیه سازی شده است. (نقشه دقیق تونل باد در پیوست شماره ۱ ارائه شده است)

¹ Test section

² Diffuser

³ Laminar

نهایتاً نمونه نهایی مطابق شکل ساخته شده است. نازل ورودی و دیفیوز با استفاده از مقوا^۱ و بخش تست با استفاده از فوم ماکت سازی ساخته شده‌اند. این بخش‌ها با استفاده از گیره به یکدیگر متصل می‌شوند. به عبارتی این تونل باد به نحوی طراحی شده تا اجزای آن به طور ماژولار^۲ و قابل تعویض باشند.



شکل (۳-۲): تونل باد ساخته شده جهت انجام آزمایشات

دو ناحیه تست برای این تونل باد طراحی و ساخته شده است. هر دوی آن‌ها مقطع یکسان ۱۰ سانت در ۱۰ سانتی متر دارند اما طول یکی برابر ۲۰ و دیگری برابر ۲۶ سانتی متر است. ناحیه تست شماره ۱ با طول ۲۰ سانتی متر جهت بررسی شکل جریان سیال است (در تصویر فوق ناحیه تست شماره ۱ قرار داده شده است) و یک سمت آن با شیشه پوشانده شده تا الگوی جریان قابل مشاهده باشد بعلاوه در سقف آن نیز چراغ ال ای دی تعبیه شده تا مسیر دود را مشخص کند. (یک جریان دود از بیرون به داخل تونل هدایت می‌شود تا خطوط جریان درون ناحیه تست با استفاده از مسیر دود مشخص شود)

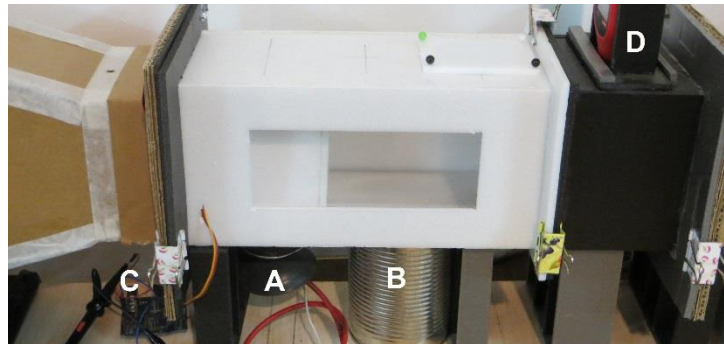


شکل (۳-۳): یک جسم درون ناحیه تست شماره ۱ تونل باد قرار داده شده و شکل جریان هوای اطراف آن با استفاده از دود مشخص می‌شود.

¹ Cardboard

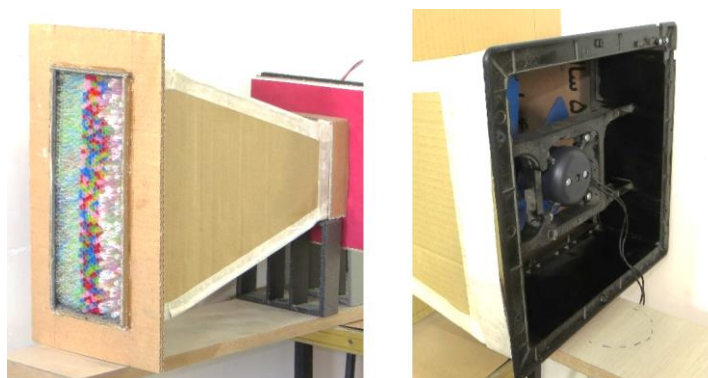
² Modular

ناحیه تست شماره ۲ برای انجام تست‌های مربوط به جریان‌سنج یونی و اندازه‌گیری سرعت ساخته شده است به عبارتی منبع یون و آشکار ساز بر روی این قطعه نصب می‌شوند.



شکل (۳-۴): ناحیه تست شماره ۲ و اجزای متصل به آن
A: منبع یون - B: دتکتور - C: مدار کنترل کننده سروو موتور - D: سرعت سنج پروانه‌ای

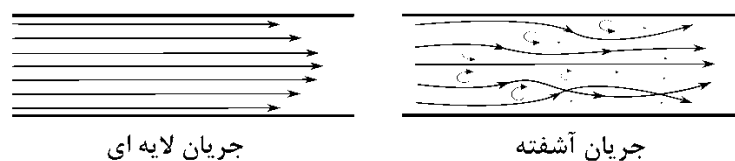
یک بخش کوچک در امتداد ناحیه تست وجود دارد که در این قسمت بادسنج پروانه‌ای نصب شده است و سرعت جریان هوای درون تونل را اندازه‌گیری می‌کند. این باد سنج از برند UNI-T مدل mini anemometer ut363 می‌باشد که توان تفکیک^۱ آن برابر ۰٫۱ متر بر ثانیه و دقت^۲ آن برابر ۵ درصد می‌باشد. این باد سنج می‌تواند تا سرعت ۳۰ متر بر ثانیه را اندازه‌گیری نماید. نهایتاً در انتهای تونل باد یک فن تعبیه شده که وظیفه برقراری جریان هوا را بر عهده دارد این فن می‌تواند تا سرعت ۳ متر بر ثانیه را فراهم کند و سرعت دوران آن بوسیله یک دیمر قابل کنترل است.



شکل (۳-۵): نازل ورودی (چپ) و فن (راست)

¹ resolution
² Accuracy

در شارش سیالات دو رژیم بارز جریان وجود دارد: رژیم آشفته و رژیم آرام یا لایه‌ای. در جریان لایه‌ای همانطور که از نام آن مشخص است لایه‌های سیال به طور موازی در امتداد یکدیگر حرکت می‌کنند و با یکدیگر مخلوط نمی‌شوند در این جریان مسیر سیال دارای انحنای ملایم است و مولکولهای سیال در طول مسیر حرکت خود همواره در داخل لایه اولیه باقی می‌مانند. اما در جریان آشفته شاهد آمیختگی و برخورد دائمی توده‌های سیال به یکدیگر هستیم.



شکل (۳-۶): دو رژیم جریان در سیال

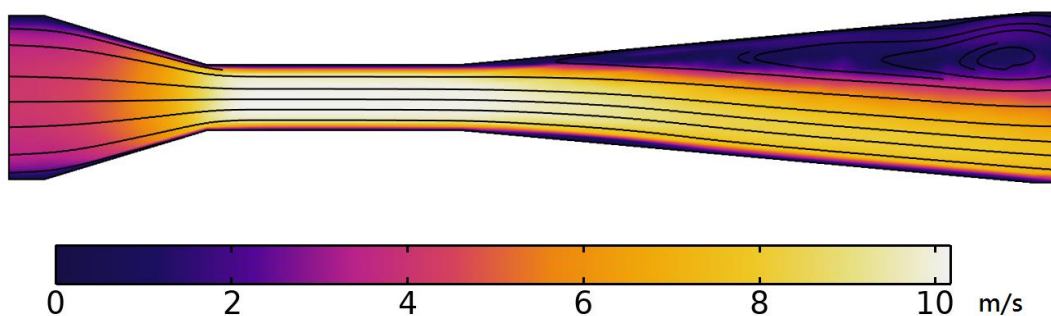
رژیم لایه‌ای و آشفته هم در جریان داخلی (جریان درون لوله‌ها و کانال‌ها) و هم در جریان خارجی (مثل جریان روی اجسام غوطه‌ور و در حال حرکت در سیال) مشاهده می‌شود. در جریان خارجی برخورد سیال به دیواره موجب تشکیل یک لایه مرزی می‌شود که سیال در طول لایه مرزی به تدریج از حالت لایه‌ای به حالت آشفته تبدیل می‌شود.



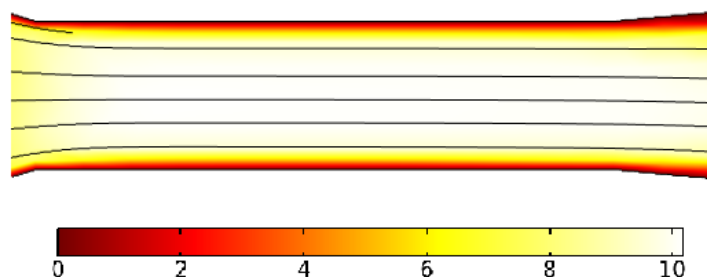
شکل (۳-۷): لایه مرزی روی یک دیواره

در واقع لایه مرزی ناحیه‌ای است که سیال اثر حضور دیواره را به واسطه تنش برشی اعمال شده از آن احساس می‌کند. پروفیل سرعت در لایه مرزی با جریان آزاد زمینه متفاوت است و ضخامت و رژیم سیال در راستای توسعه لایه مرزی قابل محاسبه است.

در این تونل باد جریان هوا بوسیله فن به درون تونل کشیده شده و ابتدا از نازل عبور می‌کند. ورودی نازل با استفاده از تعداد زیادی نی‌های کوتاه (با طول تقریباً ۷ سانتی متر) پوشانده شده است. (شکل ۳-۵) به طور معمول نازل با استفاده از یکسری لوله‌های ریز یا صفحات مشبک یا اشکال لانه زنبوری پوشانده می‌شود تا نوسانات هوا در ضمن عبور از این بخش تضعیف شده و اثرات لزجت غالب شوند و سیال هنگام ورود به درون تونل حالت لایه‌ای داشته باشد. این لایه‌ها در امتداد گلوگاه نازل به یکدیگر نزدیک شده و به طور موازی وارد بخش میانی تونل باد (ناحیه میانی) می‌شوند. شبیه سازی زیر ضخامت لایه مرزی و پروفیل سرعت را در تونل باد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. جریان در ناحیه تست یکنواخت و لایه‌ای است.



شکل (۳-۸-الف): توزیع سرعت و خطوط جریان در تونل باد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه (سرعت در ناحیه تست)

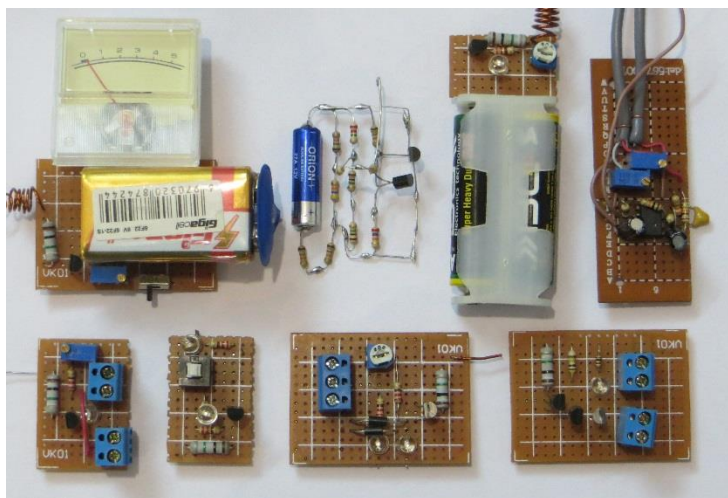


شکل (۳-۸-ب): نمای دقیق‌تر از توزیع سرعت و خطوط جریان و ضخامت لایه مرزی در تونل باد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه (سرعت در ناحیه تست)

۲-۳: آشکار ساز

همانطور که در فصل دوم اشاره گردید جریان حاصل از یون‌ها بسیار کم و در محدوده نانو آمپر می‌باشد. برای آشکار سازی این شدت جریان کم که توسط یون‌های در حال حرکت در هوا ایجاد شده است باید به نحوی یک الکتروود را در مسیر آن‌ها قرار داده و به صورت برخوردی یا القائی (توضیح در فصل قبل) آن‌ها را آشکار سازی نمود. در اصل الزامی به اندازه‌گیری مقدار دقیق جریان نمی‌باشد و صرفاً حضور یا عدم حضور جریان یون‌ها می‌تواند کفایت کند.

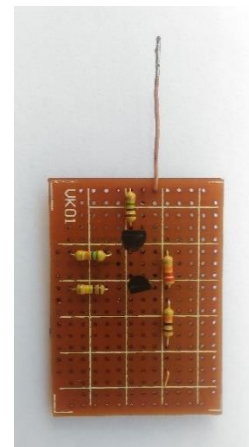
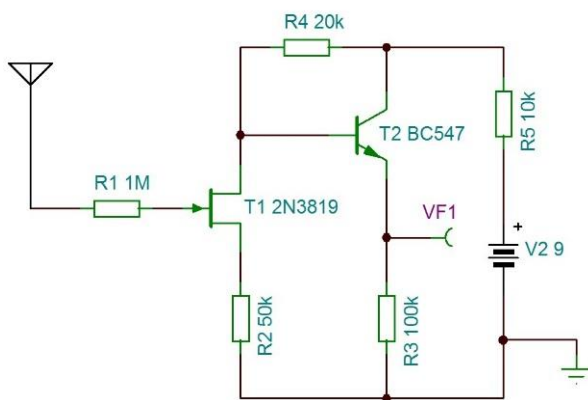
برای آشکار سازی یون‌ها مدارات مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به مدارات ارائه شده در مقالات اشاره نمود با اینحال از آن‌ها جواب قابل قبولی بدست نیامده است. شکل زیر تمامی مدارات اولیه‌ای که به منظور آشکار سازی جریان ساخته شده‌اند را نشان می‌دهد. به طور کلی ابزار استاندارد در تقویت جریان سابقاً لامپ خلا و در حال حاضر ترانزیستور می‌باشد. تقویت کننده‌های عملیاتی یا به اصطلاح اپ‌امپ که با استفاده از ترانزیستورها ساخته شده‌اند می‌توانند عملیات تقویت و آشکار سازی جریان را به طور دقیق‌تر و با بهره بهتر و نویز کمتری انجام دهند اما استفاده از آن‌ها نیازمند دانش و مهارت بالاتری است. همچنین گیت‌های منطقی^۱ نیز امکان تشخیص جریان در محدوده نانوآمپر را دارا می‌باشند.



شکل (۳-۹): تمامی مدارات ساخته شده برای آشکار سازی یون‌ها

¹ Logical gate

پس از انجام آزمون‌های مختلف و تلاش در راستای آشکار سازی یون‌ها به شیوه‌های برخوردی و القائی، یک مدار الکترونیکی بر اساس ساختار ارائه شده توسط لیلینفلد [۲۲] طراحی و ساخته شده است که بهترین نتایج را ارائه داده است. در این مدار ابتدا جریان حاصل از برخورد یون‌ها به یک پراب فلزی توسط پایه گیت^۱ یک ترانزیستور فت^۲ دریافت می‌شود. در شماتیک مدار، پراب گیرنده به صورت یک آنتن در سمت چپ نشان داده شده است. تصویر سمت راست نمونه ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۰): مدار الکترونیکی طراحی و ساخته شده برای آشکار سازی یون‌ها (مدار با باطری راه اندازی می‌شود)

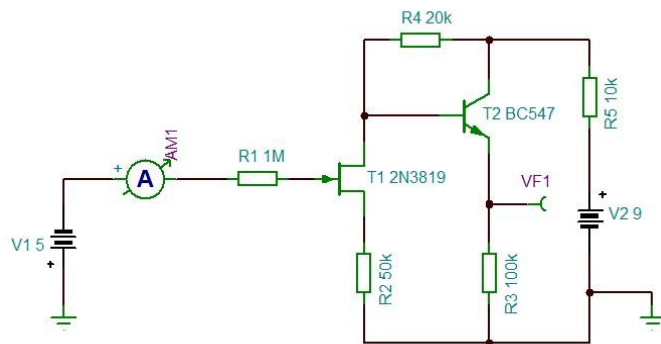
ترانزیستورهای اثر میدان، بوسیله میدان الکتریکی کار می‌کنند لذا می‌توانند بدون نیاز به جریان زیاد عمل کنند؛ بعلاوه امپدانس ورودی بسیار بالایی دارند. ترانزیستور انتخاب شده مدل 2n3819 می‌باشد (T1) که نمونه پرکاربردی از ترانزیستورهای فت است. در مرحله بعدی جریان تولید شده توسط این ترانزیستور که در محدود میکرو آمپر است بوسیله یک ترانزیستور (T2) اتصال دو قطبی^۳ (بی جی تی) مدل BC547 تقویت شده و وارد محدوده میلی آمپر می‌شود. بواسطه اینکه اسیلوسکوپ ولتاژ را اندازه‌گیری می‌کند این جریان از یک مقاومت عبور داده می‌شود و ولتاژ دو سر مقاومت به منزله معیار مستقیمی از جریان بوسیله یک اسیلوسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. با جمع بندی موارد ذکر شده می‌توان گفت که این ولتاژ با جریان اولیه برخوردی به پراب متناسب است.

¹ Gate

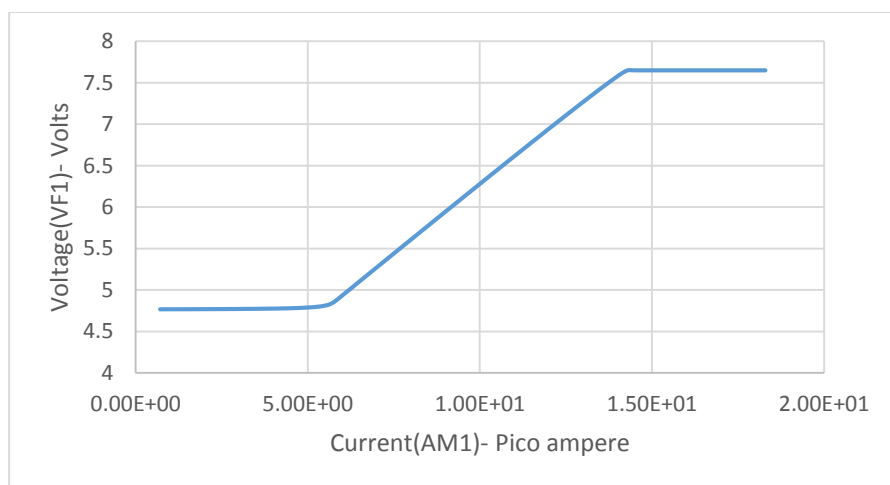
² Field effect transistor

³ Bipolar junction transistor (BJT)

با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی مدارات الکترونیکی می توان این تناسب را به طور دقیق بررسی کرد و محدوده عملکرد و حساسیت مدار الکترونیکی طراحی شده را بدست آورد. بدین منظور از نرم افزار TINA™ محصول شرکت تگزاس اینسترومنتز^۱ استفاده شده است. شکل زیر مدل مدار درون نرم افزار مذکور را نشان می دهد یک باتری نماینده میدان ناشی از یون های موجود در سیال است و به پایه گیت ترانزیستور فت متصل شده است.



شکل (۳-۱۱): مدار اصلاح شده به منظور شبیه سازی اثر یون های برخوردی به پراب جریان سنج AM1 جریان ورودی به این پایه را نشان می دهد. خروجی مدار نیز VF1 است. نمودار زیر VF1 را بر حسب AM1 نشان می دهد.



شکل (۳-۱۲): ولتاژ خروجی بر حسب شدت جریان

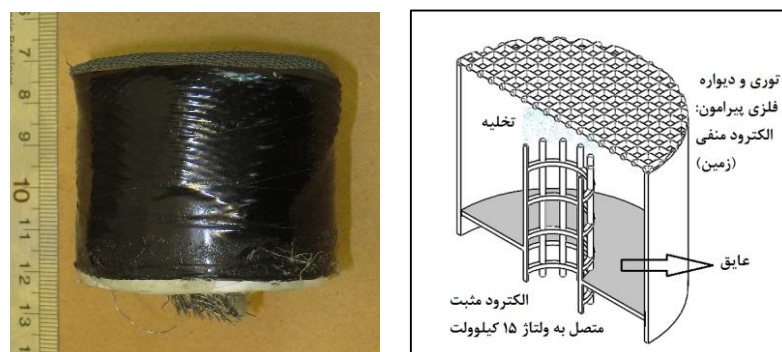
¹ Texas instruments

همانطور که دیده می‌شود با عبور حداکثر جریان ۱۵ پیکوآمپر مدار اشباع می‌شود و ولتاژ خروجی به حدود ۷,۵ ولت می‌رسد. اگر جریان کمتر از ۵ پیکوآمپر رد شود مدار به حالت Idle می‌رود و ولتاژ خروجی روی مقدار ثابتی حوالی ۴,۵ ولت قرار می‌گیرد. در بازه مابین این دو مقدار نیز ولتاژ به طور خطی متناسب با جریان است.

با توجه به اینکه این مدار بسیار حساس است لازم است برای محافظت نسبت به نویزهای الکترومغناطیسی محیطی و میدان ناشی از برق شهری، در یک محفظه فلزی قرار گیرد و تنها پرآب از محفظه بیرون باشد. لذا همانطور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است مدار در یک قوطی فلزی که با حرف B مشخص شده است قرار گرفته و آنتن آن به اندازه ۱۵ میلیمتر وارد تونل باد شده است.

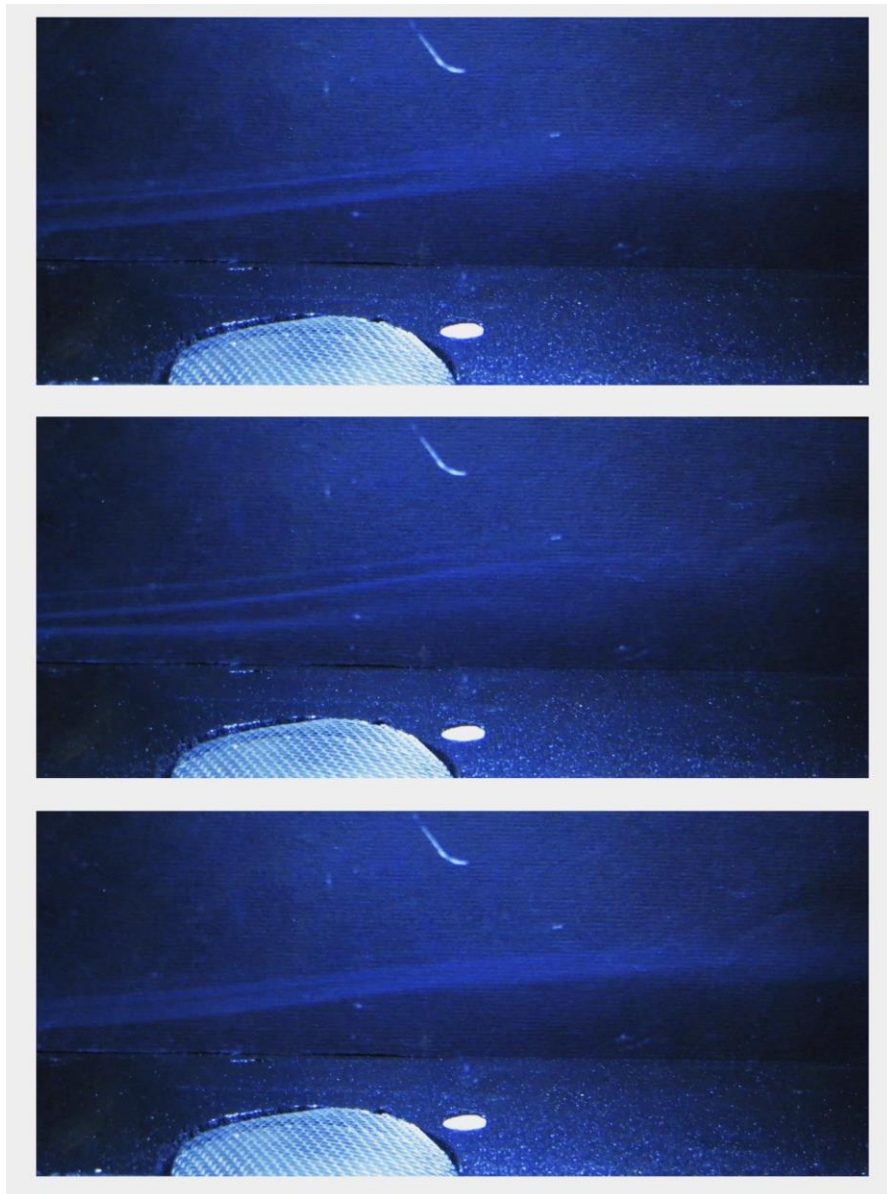
۳-۳: منبع یون‌ها

یون‌ها بوسیله یک تخلیه الکتریکی کرونا تولید می‌شوند. مولد یون در اصل یک استوانه فلزی است که یک سمت آن با توری و سمت دیگر آن با عایق پوشانده شده است. الکتروود مرکزی از وسط عایق تا تقریباً یک سانتی متر قبل از توری وارد استوانه شده و تخلیه بین این الکتروود و توری شکل می‌گیرد. پتانسیل الکتروود مثبت و توری در پتانسیل صفر است و یون‌های مثبت تولید شده در ناحیه کرونا به سمت توری شتاب گرفته و درصدی از آن‌ها از توری عبور می‌کنند. شکل زیر نقشه و نمونه ساخته شده از منبع یون را نشان می‌دهد. (نقشه با ابعاد دقیق در پیوست)



شکل (۳-۱۳) نقشه (راست) و نمونه ساخته شده (چپ) از مولد یون

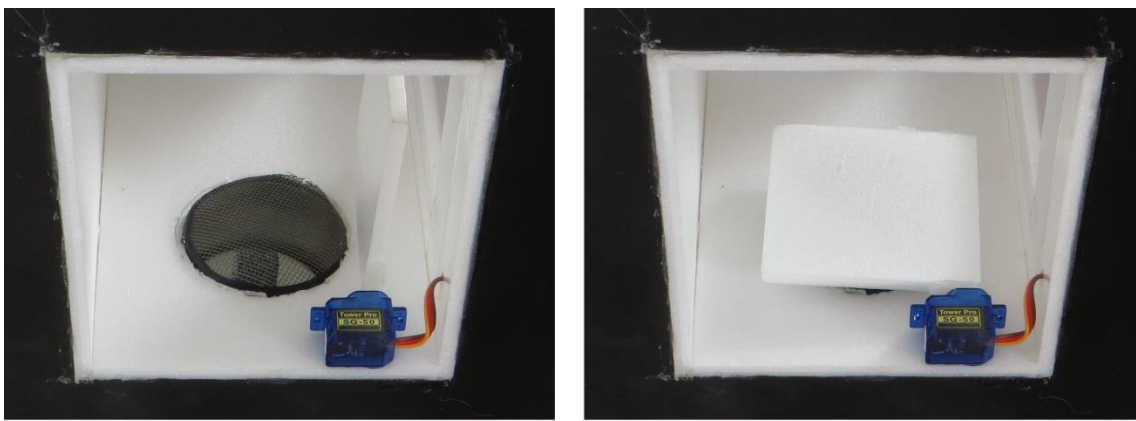
در واقع این ساختار بسیار مشابه ساختار پیشران‌های پلاسمائی^۱ است. لذا انتظار داریم جریان یون‌های خروجی از این مولد یون یک جریان هوای جزئی ایجاد نماید که این جریان هوا در تونل باد به خوبی قابل تشخیص است.



شکل (۳-۱۴): حرکت رو به بالای جریان اصلی و محو شدگی دود ناشی از گردابه‌های جزئی پس از برخورد جریان یونی به جریان اصلی، در این تصاویر مشاهده می‌شود.

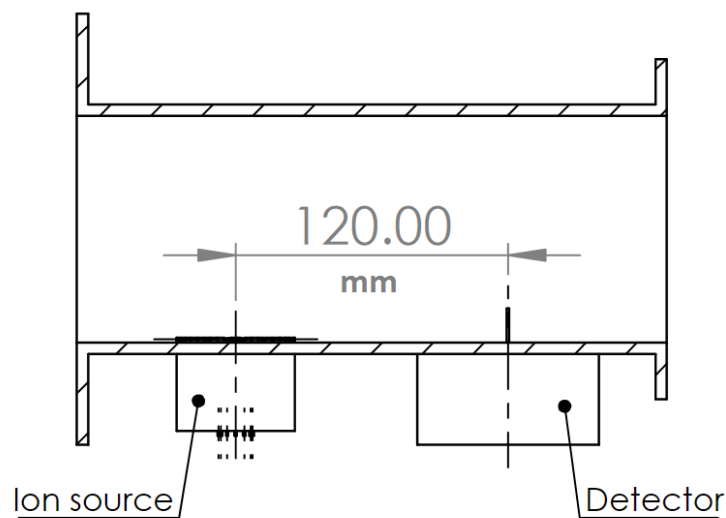
¹ Plasma thruster
² vortex

در اصل باید مولد و جریان یون‌های آن را به صورت الکترونیکی قطع و وصل کرد با اینحال چون در تست‌های انجام شده این فرآیند قطع و وصل موجب ایجاد نویز الکترومغناطیسی شده و سیگنال نامطلوبی روی گیرنده ایجاد می‌کند که آن را به حالت اشباع می‌برد لذا از یک دریچه مکانیکی برای قطع و وصل جریان یون‌ها استفاده شده است این دریچه بوسیله یک موتور سروو باز و بسته می‌شود و فرآیند باز و بسته شدن این موتور توسط یک میکرو کنترلر مدیریت می‌شود.



شکل (۳-۱۵) سروو موتور و دریچه نصب شده بر روی مولد یون در دو حالت باز و بسته

قطر منبع یون ۵۲ میلی متر و فاصله مرکز منبع یون‌ها تا پراب دتکتور ۱۲ سانتی متر است که در نقشه زیر نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۶): نقشه جانمایی منبع یون و پراب دتکتور در ناحیه تست شماره ۲ تونل باد

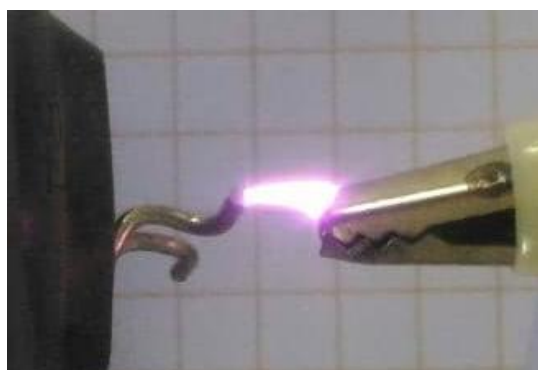
۳-۴: مولد ولتاژ بالا

تخلیه الکتریکی با استفاده از یک منبع ولتاژ بالا تولید می‌شود. این منبع شامل دو قسمت تغذیه سوئیچینگ و ترانسفورماتور افزایشدهنده است. قسمت تغذیه سوئیچینگ در اصل بخشی از یک منبع تغذیه کامپیوتر (پاور) است که بوسیله آن یک پالس مربعی با فرکانس ۳۰ کیلوهرتز و دامنه ۷۰ ولت و پهنای پالس ۵۰ درصد تولید می‌شود. در مرحله بعدی این پالس وارد یک ترانسفورماتور افزایشدهنده شده و ولتاژ آن تا ۱۵ کیلو ولت افزایش می‌یابد. (این ولتاژ توسط پراب مخصوص اندازه‌گیری شده است)

این ترانسفورماتور افزایشدهنده مدل FSV20A001 در اصل در تلویزیون‌های قدیمی به منظور تامین ولتاژ لازم برای علمکرد لامپ تصویر به کار می‌رفته است و به دلیل مدار خاص متصل به آن به ترانس فلای بک^۱ شهرت دارد. ولتاژ خروجی از این منبع بوسیله دیودهای تعبیه شده درون آن یکسو سازی می‌شود. لذا پلاریته الکترودها در هنگام تخلیه ثابت و مثبت است.



شکل (۳-۱۷): اجزای به کار رفته در منبع ولتاژ بالا



شکل (۳-۱۸): تخلیه الکتریکی قوسی تولید شده از منبع ولتاژ بالا

¹ Fly back transformer

۳-۵: جمع آوری داده‌ها

یک کارت اسیلوسکوپ متصل به رایانه، با فرکانس نمونه برداری ۱۰۰ مگاهرتز خروجی مدار الکترونیکی را اندازه می‌گیرد. این اسیلوسکوپ دارای دو کانال است که کانال اول به مدار آشکار ساز و کانال دوم به فرمان سروو موتور (دریچه قرار داده شده روی منبع یون‌ها) متصل است و هرگاه سروو اقدام به باز کردن درب منبع یون نماید داده‌های کانال یک (مدار آشکار ساز) ثبت می‌شوند.



شکل (۳-۱۹): کارت اسیلوسکوپ دو کانال مدل Hantek: 6022BE

۳-۶: شبیه سازی

همانطور که اشاره شد برای شبیه سازی از نرم افزار کامسول استفاده شده است این نرم افزار می‌تواند به طور اتوماتیک معادلات حاکم بر سیستم را به صورت دیفرانسیلی روی شبکه اعمالی بر روی مساله حل نموده و جواب را به صورت گرافیکی ارائه دهد. بخش کوچکی از شبیه سازی مربوط به حل معادلات سیالی برای تونل باد بوده است که در بخش قبلی نتایج آن اشاره گردید و جزو چالش‌های اصلی پروژه نمی‌باشد. محور اصلی شبیه سازی حول دو مساله خواهد بود: شبیه سازی مولد یون‌ها و بررسی حرکت یون‌های آزاد شده در مسیر سیال. ابتدا این دو مساله به تفکیک از یکدیگر بررسی خواهند شد سپس در قالب یک مدل بهم پیوسته شبیه سازی خواهد شد.

۳-۶-۱: شبیه سازی تولید و انتشار یون ها توسط منبع یونی

همانطور که در بخش ۳-۳ اشاره گردید یون ها بوسیله یک تخلیه کرونای مثبت تولید می شوند. یون های تولید شده به سمت الکتروود با پتانسیل صفر (زمین) حرکت می کنند و با مولکولهای خنثی نیز برخورد می کنند که بر اثر این برخوردها و انتقال تکانه از مولکولهای یونیزه با ذرات خنثی، یک جریان هوا به سمت الکتروود زمین شکل می گیرد. به این جریان اصطلاحاً جریان الکتروهایدرودینامیکی^۱ گفته می شود.

هدف از این فاز مدل سازی بررسی جریان سیال تولید شده ناشی از تخلیه کرونا است. بدین منظور از بخش تخلیه کرونا، زیر مجموعه ماژول پلاسمای نرم افزار کامسول استفاده می گردد. پدیده های فیزیکی دخیل در این مساله به این ترتیب انتخاب شده اند: جریان لایه ای سیال، اثرات الکترواستاتیک (زیر مجموعه تخلیه کرونا) و فرآیند انتقال بارها (زیر مجموعه تخلیه کرونا)

در این حالت با یک دستگاه معادلات بهم پیوسته غیر خطی مواجه هستیم که از معادلات زیر تشکیل شده است

۱- معادلات ناویر استوکس^۲ و پیوستگی جرم: این معادلات برای حل جریان پایدار^۳ تراکم ناپذیر^۴ سیال به کار می روند. معادله ناویر استوکس در اصل از اعمال معادله تکانه بر روی یک المان دیفرانسیلی سیال بدست آمده است.

$$\rho_{air} \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \rho \nabla \varphi \quad (1-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2-3)$$

در این معادلات \mathbf{u} بردار سرعت سیال و ρ_{air} چگالی آن است و p فشار را نشان می دهد μ

نیز ویسکوزیته دینامیک هوا می باشد که در دمای اتاق برابر $18,37 \mu Pa \cdot s$ است.

¹ ElectroHydroDynamic flow (EHD)

² Navier Stokes equation

³ Steady State

⁴ Incompressible

نیروی حجمی که به هر جز از سیال حاوی بار بر اثر پتانسیل الکتریکی φ اعمال می‌شود با $\rho \nabla \varphi$ نشان داده شده است. و در آن چگالی بار فضا را نشان می‌دهد.

۲- معادلات پواسون، پیوستگی بار و رابطه بین میدان و پتانسیل: این معادلات به ترتیب برای تعیین پتانسیل الکتریکی بر حسب چگالی بار و بقای بار الکتریکی به کار می‌روند معادله آخر نیز رابطه بین میدان و پتانسیل الکتریکی را بیان می‌کند

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3-3)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (4-3)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (5-3)$$

که در آن J چگالی جریان است و با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$J = \mu_E E \rho + u \rho - D \nabla \rho \quad (6-3)$$

موبیلیتی^۱ یون‌ها با μ_E مشخص شده است و D ضریب پخش^۲ آن‌ها را نشان می‌دهد به عبارتی در این معادله اثرات رسانش^۳، همرفت^۴ و پخش در چگالی جریان مشخص شده است. بر اساس مقالات مقدار μ_E در بازه 1×10^{-4} الی 2.2×10^{-4} می‌باشد [۶۵, ۷۲, ۷۵-۷۸] که در این مدلسازی برابر $1.8 \times 10^{-4} \frac{m^2}{V.s}$ در نظر گرفته شده است. برای ضریب دیفیوژن مقادیر متفاوتی گزارش شده است [۵۶, ۷۶, ۷۷, ۷۹] که در اینجا معادل $5.3 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$ در نظر گرفته شده است.

با اعمال شرایط مرزی و حل این دستگاه معادلات و می‌توان جریان الکتروهایدرودینامیکی را مشخص نمود با اینحال در اعمال شرایط مرزی نکاتی وجود که ذکر خواهد شد.

¹ Mobility

² Diffusion coefficient

³ Conduction

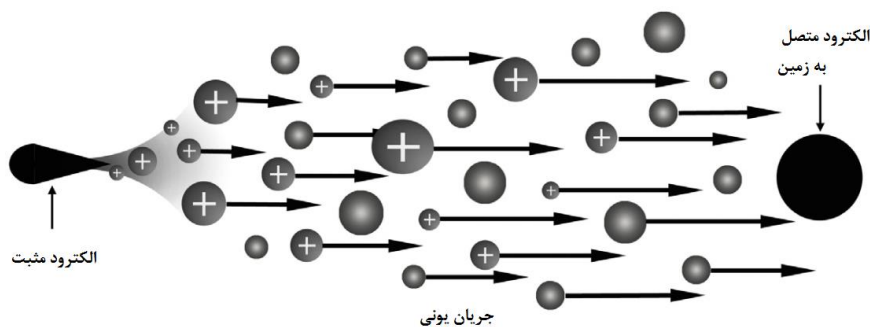
⁴ Convection

در یک کرونای مثبت، شاهد یک گرادبان شدید میدان در نزدیکی الکتروود مثبت هستیم که این میدان به تولید و شتاب گرفتن یون‌های مثبت منجر می‌شود. می‌توان با در نظر گرفتن فرآیندهای شیمی‌آیی و فیزیکی در گاز عامل کرونا و در نظر گرفتن گونه‌های مختلف تولید عامل‌های باردار و استفاده از معادلات لازم، چگالی یون‌ها و الکترون‌ها را تعیین کرده و چگالی بار فضا را مشخص نمود. با اینحال راه حل دیگری که وجود دارد استفاده از رابطه تجربی پیک^۱ برای کرونای مثبت در هوا است [۸۰]. این رابطه کاربرد و شدت میدان الکتریکی در سطح الکتروود مثبت را برای کرونا در هوا در فشار و دمای استاندارد، تعیین می‌کند.

$$E_e = E_0(1 + 2.62 \times 10^{-2} / \sqrt{R_e}) \quad (۷-۳)$$

که در آن R_e شعاع الکتروود کرونا (بر حسب متر) و $E_0 = 3.31 \times 10^6$ ولت بر متر و معادل مقاومت الکتریکی هوا در برابر فروشکست است.

در تخلیه کرونا می‌توان ناحیه فیما بین الکتروود مثبت و الکتروود متصل به زمین را به دو ناحیه تفکیک کرد: ناحیه یونیزاسیون و ناحیه سوق: ناحیه یونیزاسیون در نزدیکی الکتروود واقع شده است که در آن فرآیند یونیزاسیون اتفاق می‌افتد و همه گونه‌ها شامل یون‌های مثبت و منفی و الکترون‌ها در آن حضور دارند.

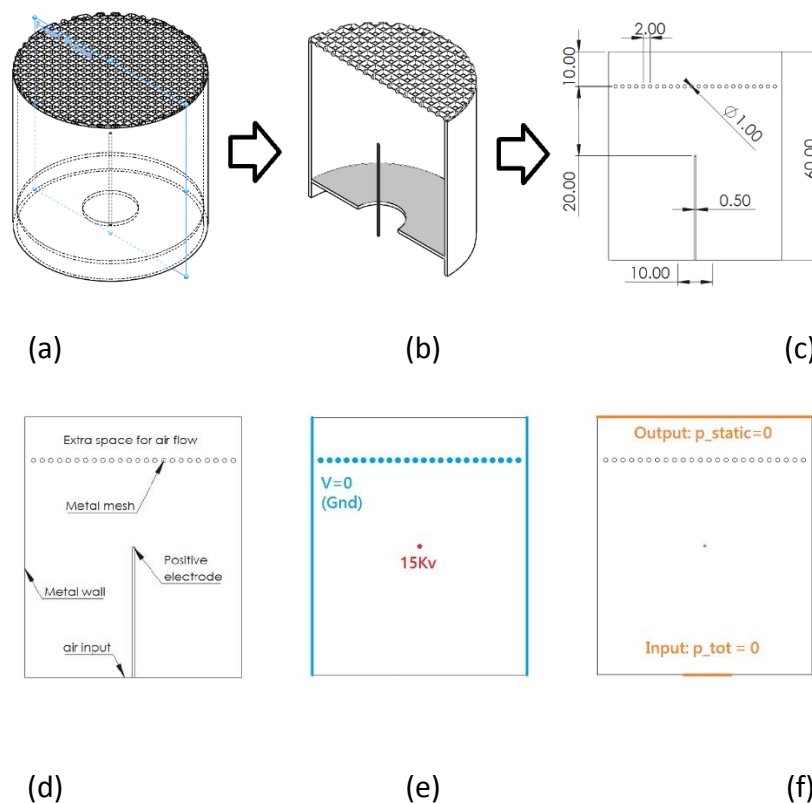


شکل (۳-۲۰): تخلیه کرونای مثبت و جریان یونی ناشی از آن

¹ Peek's Empirical formula

در ناحیه سوق که بعد از ناحیه اول واقع شده تنها شامل یون‌های مثبت هستیم که بواسطه میدان الکتریکی از ناحیه یونیزاسیون بیرون کشیده شده‌اند. اگر شعاع الکتروود کرونا از فاصله بین آن و الکتروود متصل به زمین خیلی کوچکتر باشد شدت میدان بر روی سطح الکتروود را می‌توان از رابطه پیک (رابطه ۳-۷) بدست آورد

با توجه به مسائل ذکر شده می‌توان مدلسازی منبع یون را به طور کامل انجام داد. در این مدلسازی ژئومتری مساله کمی با ساختار پیاده شده در عمل تفاوت دارد (این تفاوت به خاطر ساده سازی شکل و کاهش بار محاسباتی است) اما بعداً می‌بینیم که این اختلاف در کلیت نتیجه بدست آمده بی تاثیر است. شکل (۳-۲۱) هندسه پیاده شده و شرایط مرزی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲۱): هندسه مساله و شرایط مرزی برای شبیه سازی جریان یونی در مولد کرونایی
 (a): مدل سه بعدی ساده شده از منبع یون (b): مقطع برش دو بعدی (c): ابعاد در مقطع دو بعدی
 (d): نامگذاری ابعاد در مقطع دو بعدی (e): شرایط مرزی الکتریکی (f): شرایط مرزی سیالی

همانطور که در شکل بالا دیده می‌شود در مدل نهایی الکتروود مثبت به صورت یک نقطه ساده سازی شده همچنین فضایی به اندازه ۱ سانتی متر در بالای توری در نظر گرفته شده و به هندسه مساله اضافه شده تا جریان یونی خروجی از منبع یون را بتوان در این ناحیه مورد بررسی قرار داد.

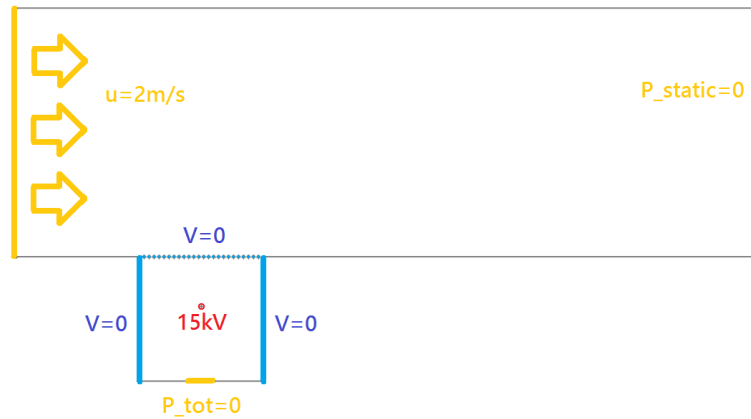
جدول (۳-۱): خلاصه شرایط مرزی به کار رفته در مدلسازی

موقعیت	شرط مرزی
شرایط مرزی الکتریکی	
الکتروود مرکزی	ولتاژ مثبت ۱۵ کیلوولت
توری فوقانی و دیواره‌ها	صفر ولت (متصل به زمین)
شرایط مرزی سیالی	
خروجی هوا	فشار استاتیکی صفر
ورودی هوا	فشار کل صفر

۳-۶-۲: شبیه سازی منبع یونی در جریان سیال:

پس از شبیه سازی منبع یونی، اثر جریان سیال روی آن بررسی می‌گردد. باید دید برهمکنش جریان سیال و جریان یونی حاصل از تخلیه کرونا بر روی یکدیگر چه تاثیری در انتقال یون‌ها در سیال خواهد داشت. فیزیک درگیر در مساله مشابه حالت قبل خواهد بود و شرایط مرزی برای منبع یونی نیز مطابق قبل است و تنها منبع یون از سمت پائین به جریان اصلی تونل باد متصل شده است. الکتروود مثبت از یک میله به یک نقطه ساده شده و سایر شرایط مرزی مشابه شکل (۳-۲۱) لحاظ شده است. یک جریان هوا با سرعت ۲ متر بر ثانیه از سمت چپ وارد می‌شود.

مستطیل بزرگ سطح مقطع تونل باد را نشان می‌دهد و مربع چسبیده به آن نماینده منبع یونی است. مشابه آزمایشات تجربی، منبع یون به نحوی قرار گرفته است که توری دهانه آن با دیواره پائینی تونل باد مماس باشد. تمامی سطوح به جز دیواره منبع یون و توری فلزی، عایق در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۳-۲۲): شرایط مرزی برای شبیه سازی منبع یونی در جریان سیال
(در تشابه با شکل و جدول قبل)

۳-۶-۳: شبیه سازی حرکت بارها در میدان سیال:

پس از آنکه اثرات توام جریان یونی و جریان سیال بررسی شد لازم است بدانیم یک ذره باردار نمونه در میدان حاصل به چه ترتیب حرکت می کند. این شبیه سازی به منظور بررسی این پدیده و تعیین رفتار جریان سنج صورت می گیرد. بر خلاف دو شبیه سازی فوق که جواب حالت پایدار اهمیت دارد در این شبیه سازی با یک مساله وابسته به زمان مواجه هستیم. تعدادی ذره نمونه باردار در مسیر سیال و از خروجی منبع یون تا محل آشکار ساز ردیابی می شوند تا با بررسی حرکت آنها این نکته بررسی شود که می توان از این پدیده به منظور جریانسنجی استفاده نمود یا خیر.

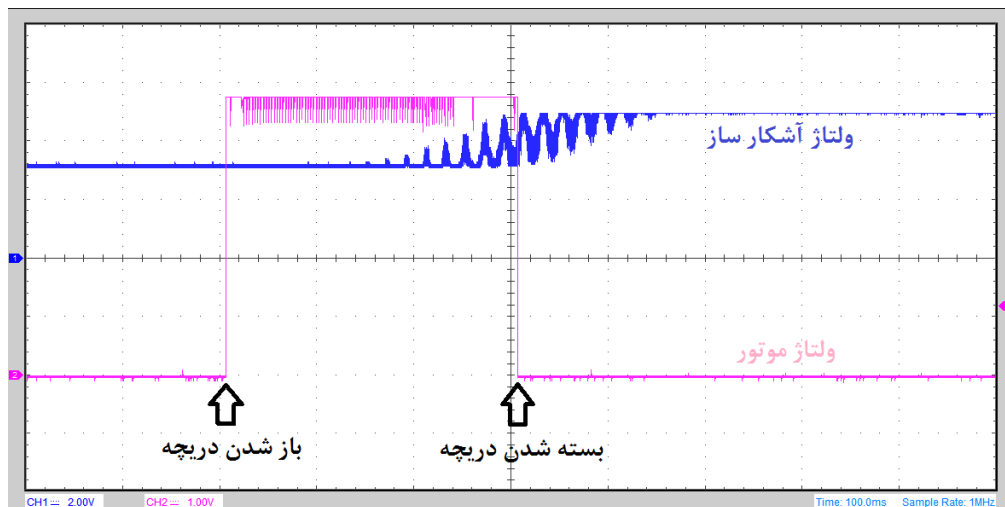
فصل چہارم:

تشریح و بررسی نتائج

همانطور که در فصل‌های قبلی اشاره گردید در بخش تجربی این پژوهش، یک جریان سنج یونی ساخته و درون تونل باد نصب شده است. در این فصل بناست تا عملکرد این جریان سنج مورد بررسی قرار گیرد بعلاوه نتایج حاصل از شبیه سازی رایانه‌ای جریان سنج یونی در این فصل تشریح خواهند شد.

۴-۱: اندازه‌گیری سرعت سیال با استفاده از جریانسنج یونی

مطابق توضیحات فصل قبل، یک منبع یون در دیواره تونل باد تعبیه شده که در فاصله ثابتی از آن آشکار ساز قرار دارد. بناست تا یون‌های آزاد شده از منبع که بوسیله جریان به پائین دست حرکت می‌کنند با استفاده از این آشکار ساز شناسایی شود. روی منبع یون با استفاده از یک دریچه پوشانده شده است که این دریچه توسط یک موتور باز و بسته می‌شود. سیگنال باز شدن دریچه به اسیلوسکوپ فرمان ثبت داده‌ها رو می‌دهد. یک نمودار نوعی، مطابق شکل زیر می‌باشد.



شکل (۴-۱): نمونه‌ای از نمودار بدست آمده در فرآیند اندازه‌گیری سرعت با جریان سنج یونی و تفسیر آن

همانطور که در این شکل دیده می‌شود یک پالس مربعی (به رنگ صورتی) باز و بسته شدن دریچه را نشان می‌دهد. کمی بعد از باز شدن دریچه شاهد افزایش سطح سیگنال دتکتور (سیگنال آبی) می‌باشیم.

رنگ) هستیم. این بدان معناست که بعد از باز شدن دریچه یون‌ها به همراه جریان هوا به سمت دتکتور حرکت کرده و آشکار سازی شده‌اند.

به خاطر بررسی اثرات تداخل الکترومغناطیسی، منبع یون‌ها و سروو موتور به طور مستقل و بدون جریان هوا راه اندازی شده‌اند و اثری از وجود سیگنال در دتکتور مشاهده نشده است این بدان معناست که سیگنال دریافتی لزوماً تنها به دلیل برخورد یون‌ها بوده است. همینطور اثرات تداخلی احتمالی فن نیز بررسی شده که نتیجه منفی بوده است.

همانطور که در سیگنال دتکتور (سیگنال آبی رنگ شکل ۴-۱) مشاهده می‌شود یک ریز موج روی سیگنال سوار شده است که حاصل میدان ناشی از برق شهر می‌باشد. این ریز موج با استفاده از یک فیلتر فرکانسی به صورت نرم افزاری قابل حذف است.

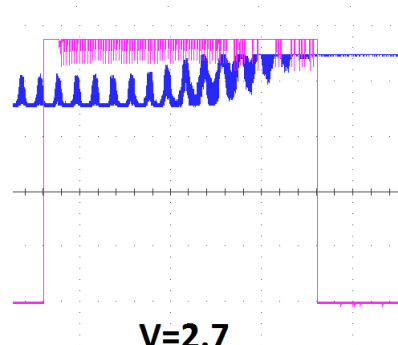
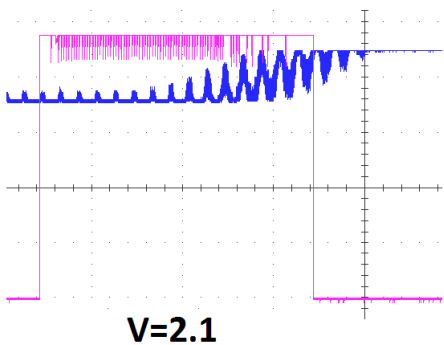
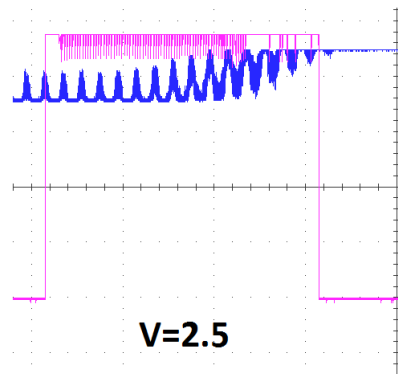
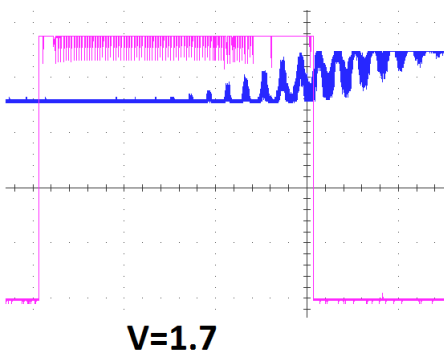
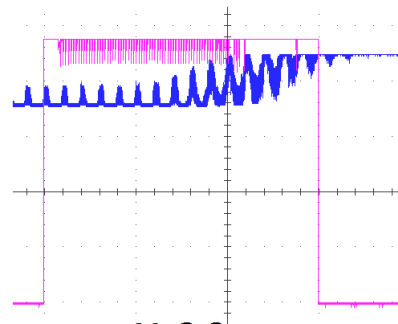
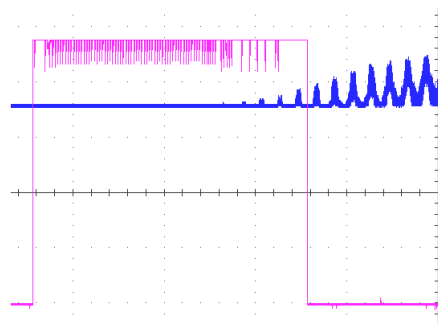
شکل صفحه بعد سیگنال‌های دریافتی را در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. اگر زمان صفر را برابر لحظه باز شدن دریچه (شروع پالس مربعی) در نظر بگیریم به وضوح مشاهده می‌شود که هرچه سرعت سیال بالاتر می‌رود سیگنال یون‌ها سریعتر به آشکار ساز می‌رسند. بخش اصلی فرضیه در این قسمت تأیید می‌شود به عبارتی یون‌ها همراه جریان هوا به پائین دست حرکت کرده و سرعت آن‌ها با سرعت سیال متناسب است. به عبارتی هرچه سرعت سیال بیشتر باشد، آشکار ساز زودتر اثر یون‌ها را دریافت می‌کند و هرچه سیال آرامتر حرکت کند این زمان کمتر خواهد بود.

اگر بخواهیم برای محاسبه سرعت از فرمول ساده جا بجایی در واحد زمان استفاده کنیم (رابطه ۴-۱) لازم است زمان پرواز یون‌ها از لحظه رهاسازی تا لحظه آشکاری سازی را از روی نمودار بدست آوریم. سپس فاصله بین منبع یون تا آشکار ساز (۱۲ سانتی متر) را بر این مقدار تقسیم کنیم که عدد بدست آمده سرعت جریان هوا خواهد بود و می‌تواند با سرعت اعلامی توسط جریان سنج مقایسه شود.

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0.12}{\Delta t} \quad (۴-۱)$$

همانطور که در فصل دوم اشاره شد یون‌ها پس از رها سازی در سیال لایه‌ای به طور همگن پراکنده می‌شوند و انتظار داریم سیگنال دریافتی از یون‌ها یک سیگنال گوسی باشد.

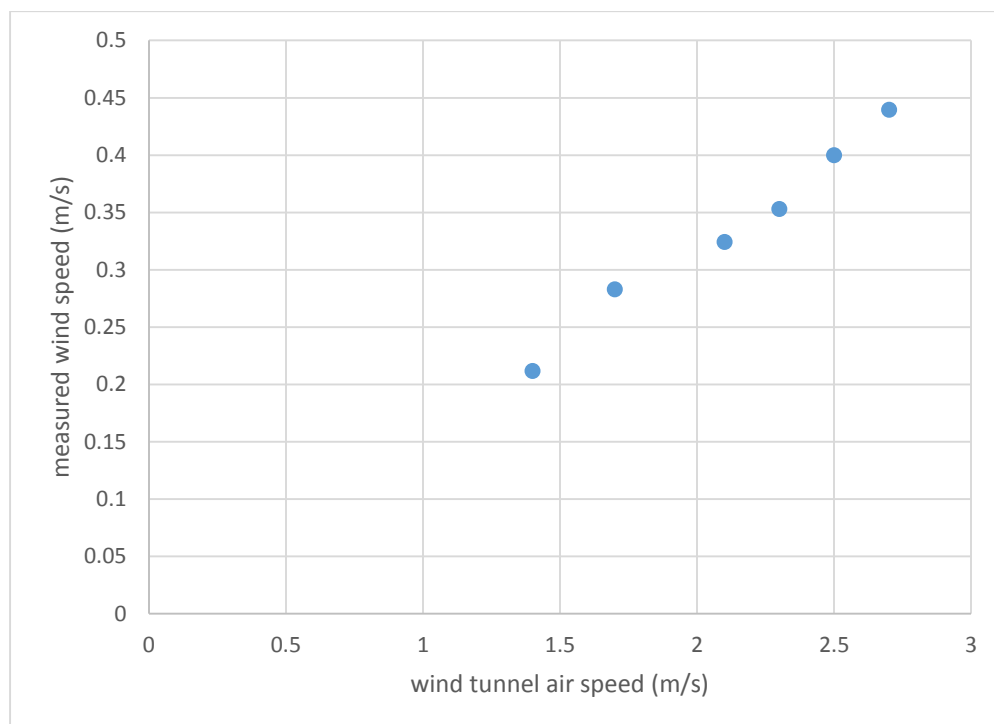
با اینحال به دلیل ظرفیت کم مدار الکترونیکی، در این آزمایشات نمیتوان شکل سیگنال کلی را تشخیص داد و مدار با برخورد اولین یونها اشباع می شود از اینرو به جای قله سیگنال گوسی، لحظه اشباع مدار منطبق با زمان دریافت اولین یونها مبنای محاسبات بعدی در نظر گرفته می شود.



شکل (۴-۲): نمودارهای بدست آمده از آشکارساز در سرعت های مختلف جریان هوا (اندازه گیری شده توسط بادسنج پروانه ای بر حسب متر بر ثانیه)

در بررسی نمودارهای شکل ۴-۲ توجه به دو نکته ضروری است. اولاً در سرعت‌های بیشتر از ۲ متر بر ثانیه شاهد وجود یک سیگنال به شکل بخشی از یک موج ۵۰ هرتزی، قبل از باز شدن دریچه هستیم که به نظر می‌رسد ناشی از یون‌هایی باشد که تحت تاثیر شدت جریان، از فاصله مابین دریچه و منبع یون وارد جریان هوا شده‌اند و سیگنال مختصری را ایجاد کرده‌اند. از این سیگنال می‌توانیم صرف نظر کنیم و معیار را همان لحظه اشباع شدن مدار (معادل با زمانی که دتکتور شدت جریانی بیش از ۱۵ پیکو آمپر دریافت کند) را در نظر می‌گیریم.

ثانیاً اگر از فرمول محاسبه سرعت بر مبنای فاصله ثابت بین آشکار ساز و چشمه یون استفاده کنیم اعداد بدست آمده بسیار پائین تر از مقدار سرعت اندازه‌گیری شده توسط جریانسنج پروانه‌ای درون تونل باد می‌باشند. نمودار زیر رابطه سرعت‌های بدست آمده از حرکت یون‌ها با سرعت واقعی را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود سرعت محاسبه شده کمتر از واقعی سیال است ولی با آن متناسب است.



شکل (۴-۳): مقایسه سرعت هوای تونل باد و سرعت اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج یونی

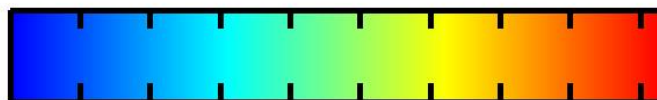
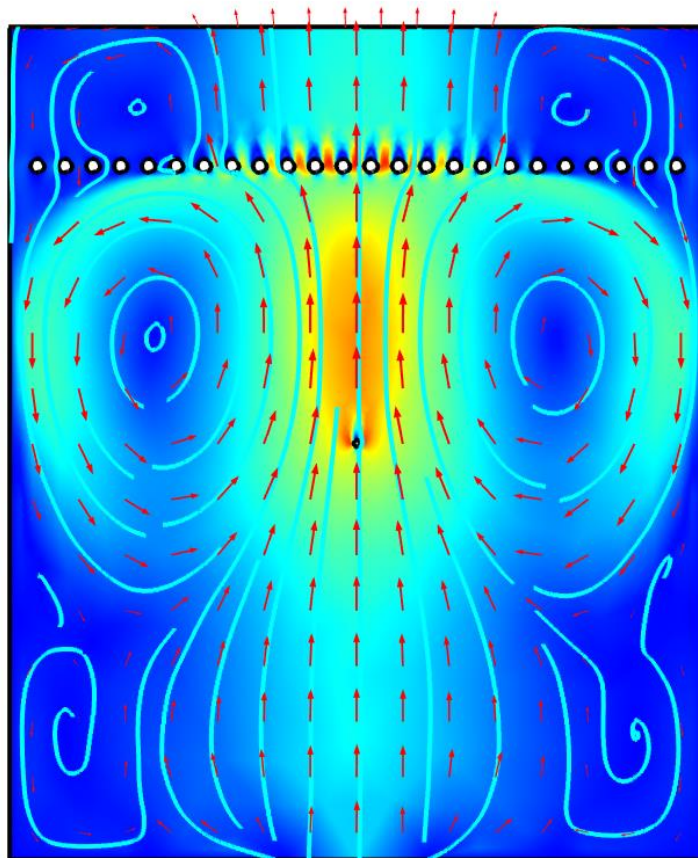
به عبارتی یون‌ها آهسته‌تر از جریان اصلی حرکت کرده‌اند و با سرعتی بسیار کمتر از سرعت سیال زمینه، فاصله بین منبع و آشکار ساز را پیموده‌اند. برای بررسی علت این پدیده لازم است ابتدا مکانیزم رها سازی یون‌ها را از دو منظر مورد بازنگری قرار دهیم. اولاً جریان یون‌ها از منبع یون با استفاده از یک دریچه قطع و وصل می‌شود که این دریچه یک ثابت زمانی بزرگ در حد ۳۰۰ میلی ثانیه دارد (برای باز شدن کامل) و این زمان به نوعی به زمان اندازه‌گیری شده توسط دتکتور اضافه می‌شود (چون لحظه صفر از زمان اعمال دستور باز شدن دریچه توسط میکرو کنترلر محاسبه شده است و نه از زمان واقعی باز شدن آن). پس لازم است برای اندازه‌گیری زمان واقعی پرواز یون‌ها، مقداری ثابت معادل با زمان لازم برای باز شدن دریچه و رها سازی یون‌ها، از زمان کلی اندازه‌گیری شده کسر شود. با اینحال اعمال تصحیح مذکور بازم برای تطبیق سرعت بدست آمده و سرعت واقعی کافی نخواهد بود.

در واقع دلیل اصلی اختلاف ایجاد شده در اندازه‌گیری سرعت، به دام افتادن یون‌ها در لایه مرزی تشکیل شده روی دیواره تونل باد می‌باشد. همانطور که در بخش ۲-۱ و انتهای بخش ۳-۱ توضیح داده شده است لایه مرزی ناحیه‌ای در مجاورت دیواره است که سرعت سیال در آن تحت تاثیر تنش برشی ناشی از دیواره کمتر از سرعت زمینه است.

در اینجا می‌توانیم فرض کنیم که بخشی از یون‌ها (که از دیواره به جریان اصلی تزریق شده اند) به جای ورود به جریان اصلی و همراهی با سیال زمینه، در لایه مرزی به دام افتاده‌اند و درون لایه مرزی به سمت پائین حرکت می‌کنند تا جایی که به آشکار ساز برسند. پراب آشکار ساز نیز از دیواره وارد تونل باد شده است و درون لایه مرزی قرار دارد. از آنجا که سرعت در لایه مرزی کمتر از سرعت سیال زمینه است لذا سرعت اندازه‌گیری شده بر مبنای ردیابی این دسته از یون‌ها، کمتر از سرعت سیال زمینه است و برابر با سرعت لایه‌ای مشخص از سیال درون لایه مرزی می‌باشد. این فرض در قسمت‌های بعدی با شبیه سازی و محاسبات تحلیلی تائید خواهد شد.

۲-۴: نتایج شبیه سازی منبع یونی

منبع تولید یون در بخش ۳-۳ معرفی شد و در بخش ۳-۶-۱ شرایط شبیه سازی آن تشریح گردید. در این قسمت نتیجه حاصل از شبیه سازی ارائه می گردد تصویر زیر میدان سرعت را درون منبع یون و در خروجی آن نشان می دهد. این میدان سرعت بر اثر نیروهای الکتروستاتیکی شکل گرفته است

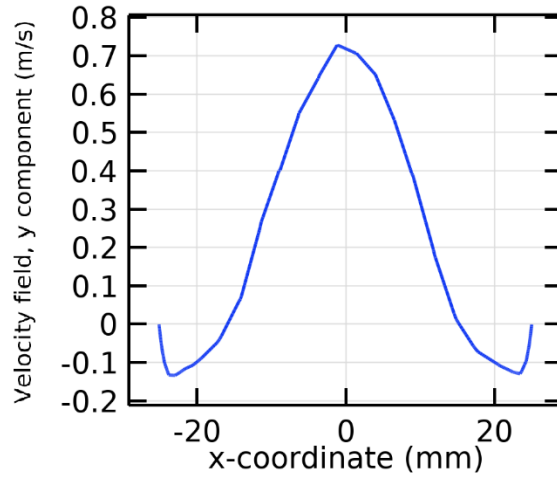


0 0 0 0 0 1 1 1 1 1
2 4 6 8 2 4 6 8

شکل (۴-۴): میدان سرعت ناشی از تخلیه الکتریکی کرونا در منبع یونی

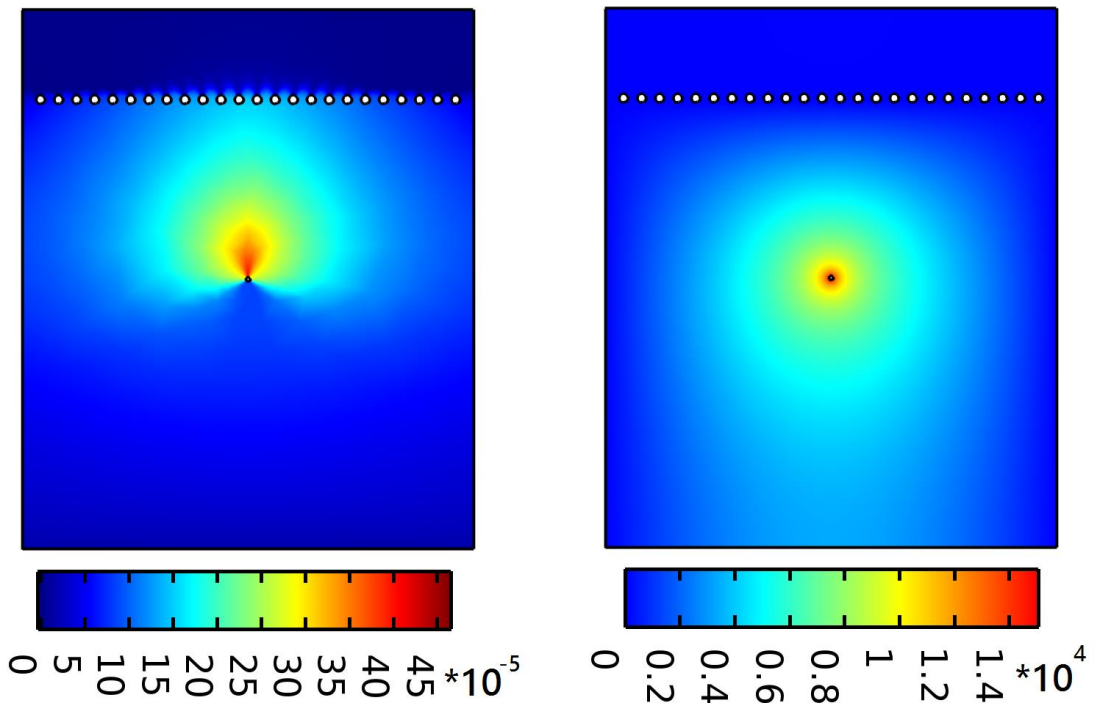
(بر حسب متر بر ثانیه)

همانطور که دیده می‌شود یک جریان رو به بالا توسط این منبع یون تولید شده است که پروفیل سرعت آن در خروجی (در فاصله ۵ میلی‌متر بالاتر از توری دهانه) بدین شکل می‌باشد.



شکل (۴-۵): پروفیل سرعت سیال در خروجی منبع یون (نقطه صفر روی محور تقارن استوانه قرار دارد)

توزیع پتانسیل الکتریکی و چگالی بار فضا نیز در تصاویر زیر نشان داده شده است:



شکل (۴-۶): توزیع پتانسیل الکتریکی بر حسب ولت (راست) و چگالی بار فضا بر حسب کولن بر متر مکعب (چپ)

همانطور که در شکل ۴-۴ و ۴-۵ دیده می‌شود پروفیل سرعت سیال در مرکز رو به بالا است اما در کناره‌های مولد یونی جهت حرکت سیال به سمت داخل کشیده می‌شود و به نوعی سیال به جای خروج از مولد یون به داخل آن کشیده می‌شود. این پدیده با فیلم برداری از جریان دود روی مولد یونی به طور تجربی مشاهده شده است.

متوسط سرعت در خروجی و دقیقا روی توری فلزی برابر ۰,۲۳۸۸۷ متر بر ثانیه و چگالی بار فضا ۳۰,۹۰۵ میکروکولن بر متر مکعب می‌باشد لذا جریان یونی خروجی از منبع یون با توجه به ابعاد آن تقریبا برابر ۱۵ نانو آمپر است که در تطابق با مقادیر گزارش شده مقالات قبلی می‌باشد:

$$Current = C \times V \times A = 15.65 \text{ nA}$$

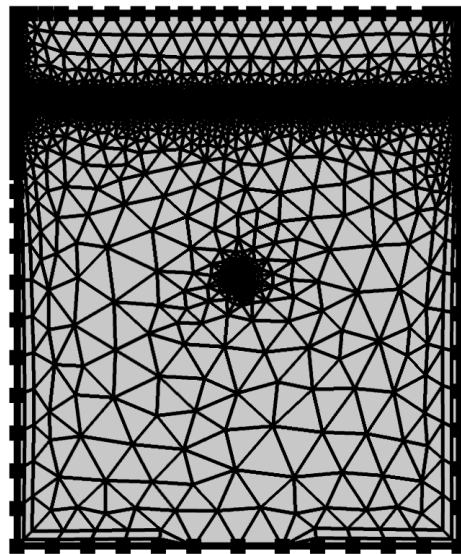
$$\bar{C} = 30.905 \times 10^{-6} \left(\frac{C}{m^3}\right)$$

$$\bar{V} = 0.23887 \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{52}{2} \times 10^{-3}\right)^2 = 2.12 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (۲-۴)$$

شکل زیر شبکه اعمال شده برای حل معادلات را نشان می‌دهد. این شبکه تقریبا با ۶۳۰۰

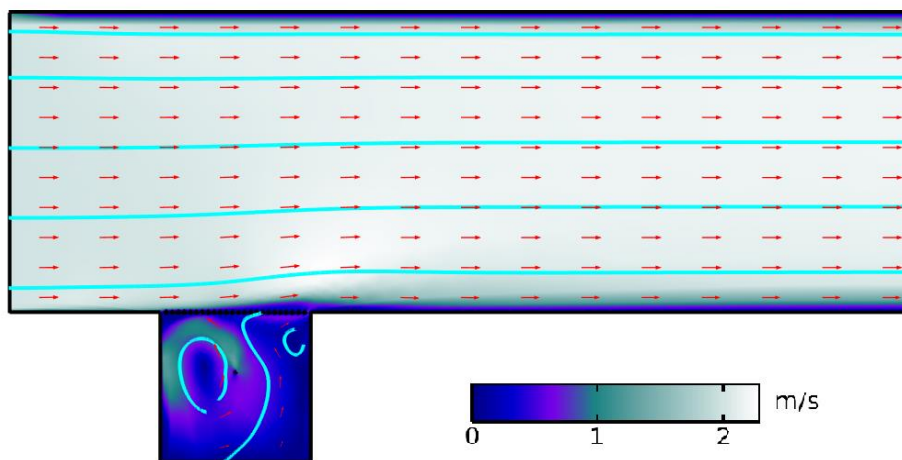
مثلث پوشیده شده و به صورت اتوماتیک توسط نرم افزار تولید شده است.



شکل (۴-۷): شبکه پیاده شده برای حل معادلات به صورت عددی

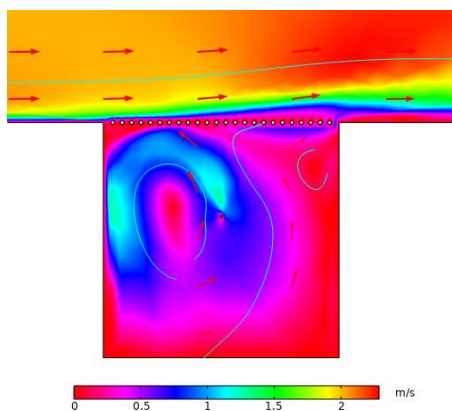
۲-۴: نتایج شبیه سازی منبع یونی در جریان هوا

پس از مدل سازی منبع یونی به صورت مستقل، اثر جریان هوا روی آن بررسی می شود. در واقع شرایط شبیه سازی تغییر نکرده و تنها مساله قبلی در هندسه متفاوت و در حضور جریان هوا بررسی شده است. سرعت جریان هوا ورودی از دهانه سمت چپ برابر ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نتیجه شبیه سازی بدین ترتیب است.



شکل (۴-۸): جریان هوای درون تونل باد در حضور منبع یون

همانطور که دیده می شود جریان هوای ایجاد شده توسط منبع یون (که در قسمت قبلی مشاهده گردید) به طور کامل تحت تاثیر جریان اصلی تونل باد قرار گرفته است. البته لایه مرزی در کف تونل باد ضخیم تر است (به خاطر حضور منبع) و خطوط جریان به سمت بالا کشیده شده اند.



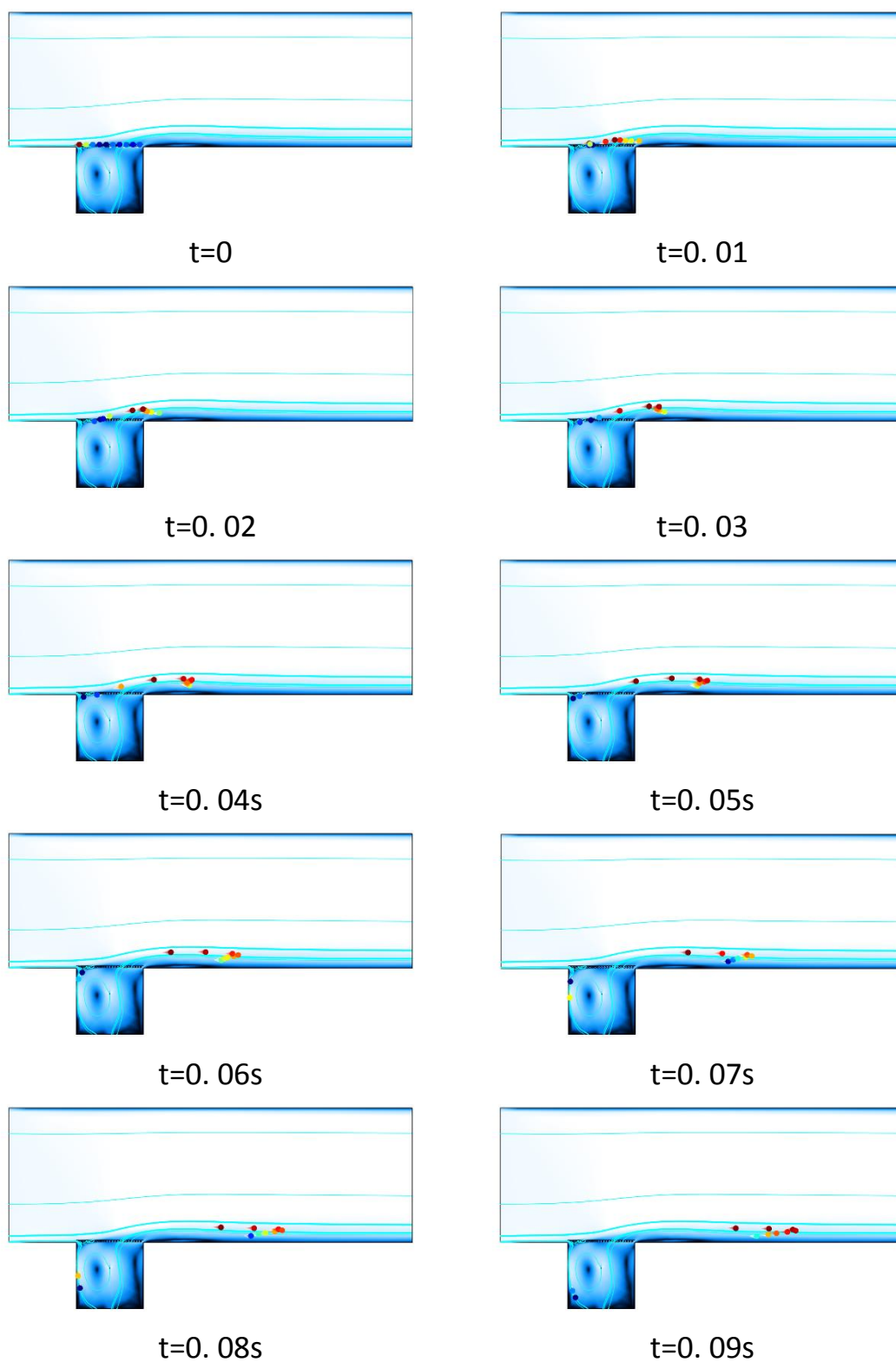
شکل (۴-۹): نمای دقیق تری از جریان هوا در اطراف دهانه منبع یون

در واقع با توجه به شکل جریان درون منبع یون و اطراف دهانه آن، به نظر می‌رسد که در درون تونل باد جریان سیال بیشتر متأثر از شرایط هندسی است و اثرات ناشی از میدان الکتریکی در درجه دوم اهمیت قرار دارند. در این حالت می‌توان از ویژگی‌های منبع یون چشم پوشی کرده و مساله را به برخورد دو جریان متعامد ساده کرد. در واقع دلیل اینکه هندسه توری قرار گرفته بر روی منبع یون در محاسبات به طور دقیق رعایت نشده به دلیل همین تاثیر کم این پارامتر در شکل جریان نهایی است. در هر صورت به عنوان آخرین مرحله شبیه سازی، با در نظر گرفتن تمامی مسائل و پارامترهای دخیل در مساله، حرکت ذرات باردار نمونه در میدان سیال بررسی می‌شود. در این مدل تعدادی ذره باردار به عنوان نماینده ذرات باردار موجود در سیال از دهانه منبع یون رها می‌شوند و حرکت آن‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۴-۱۰). تمامی اثرات الکتریکی و سیالاتی در این مدل در نظر گرفته شده‌اند و سرعت تونل باد برابر ۲ متر بر ثانیه (نزدیک به متوسط سرعت‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشات تجربی) در نظر گرفته شده است. بررسی حرکت این ذرات نشان می‌دهد که آهسته تر از سرعت زمینه به سمت پائین دست حرکت می‌کنند.

در واقع همانطور که دیده می‌شود ذرات باردار نمی‌توانند به طور کامل از لایه مرزی خارج شوند و با سرعتی کمتر از سرعت زمینه به سمت پائین دست حرکت می‌کنند. این باعث می‌شود تا زمان رسیدن ذرات به آشکار ساز بیشتر از مقدار مورد انتظار باشد.

از آنجا که هرچه سرعت سیال بالاتر باشد ضخامت لایه مرزی کمتر شده و گرادیان آن بزرگتر خواهد بود لذا یون‌ها سریعتر به دکتور می‌رسند. به طور کلی انتظار داریم تاخیر زمانی ایجاد شده از بابت حرکت یون‌ها در لایه مرزی با سرعت ورودی به تونل باد متناسب باشد. این تناسب در بخش بعدی به طور تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و صحت داده‌های بدست آمده بررسی خواهد شد.

تصاویر زیر حرکت ذرات باردار را نشان می‌دهد این ذرات در لحظه صفر از خروجی منبع یونی ردیابی شده‌اند و تا رسیدن به آشکار ساز در فواصل زمانی ده میلی ثانیه بررسی شده‌اند.



شکل (۴-۱۰): ردیابی حرکت ذرات باردار در میدان سیال

(سرعت جریان اصلی در تونل باد برابر ۲ متر بر ثانیه)

۳-۴: بررسی حرکت یون‌ها در لایه مرزی

در بخش‌های قبلی دیدیم که یون‌ها به جای ورود به سیال زمینه، در لایه مرزی تشکیل شده روی دیواره به سمت پایین حرکت می‌کنند و این موضوع باعث می‌شود تا یون‌ها دیرتر از زمان مورد انتظار به آشکارساز برسند و سرعت اندازه‌گیری شده بدین واسطه کمتر از سرعت واقعی سیال به نظر برسد. این موضوع به طور تجربی در آزمایشات و همینطور در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای مشاهده گردید. در این بخش به طور تحلیلی این موضوع بررسی می‌گردد تا از صحت فرضیات مطرح شده اطمینان حاصل گردد.

در سیال آرام رابطه سرعت در لایه مرزی با سرعت زمینه مطابق عبارت زیر است [۳۱]:

$$u(x, y) = U \left(\frac{2y}{\delta} - \frac{y^2}{\delta^2} \right) \quad (۳-۴)$$

که در آن δ ضخامت لایه مرزی و x و y مختصات نقطه مورد بررسی درون لایه مرزی را نشان

می‌دهد. از جهت دیگر ضخامت لایه مرزی در جریان لایه‌ای، با رابطه زیر مشخص می‌شود [۳۱]:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5.0}{Re_x^{1/2}} \quad (۴-۴)$$

که در آن عدد رینولدز ظاهر شده است. عدد رینولدز در این حالت با معادله (۴-۵) مشخص

شده است و در آن ν ویسکوزیته سینماتیک سیال است:

$$Re_x = \frac{Ux}{\nu} \quad (۵-۴)$$

اگر روابط ۴-۵ و ۴-۴ را در رابطه ۳-۴ جایگذاری کنیم خواهیم داشت

$$u(x, y) = U \left[\frac{2y(Ux/\nu)^{\frac{1}{2}}}{5x} - \frac{y^2(Ux/\nu)}{25x^2} \right] \quad (۶-۴)$$

که این رابطه با کمی ساده‌سازی به رابطه زیر تبدیل می‌شود

$$u(x, y) = \frac{2y}{5\sqrt{xv}} U^{\frac{3}{2}} - \frac{y^2}{25xv} U^2 \quad (7-4)$$

یا به طور ساده تر

$$u(x, y) = 2AU^{\frac{3}{2}} - A^2U^2 \quad A = \frac{y}{5\sqrt{xv}} \quad (8-4)$$

که در اینجا ضریب A تنها به ژئومتری مساله و ویسکوزیته دینامیک سیال وابسته است و انتظار داریم برای یک نقطه مشخص این پارامتر ثابت باشد. به عبارتی در اینجا تابعیت سرعت در یک نقطه از لایه مرزی با سرعت سیال زمینه مشخص شده است. تابع بدست آمده در 4-8 بین سرعت جریان زمینه و سرعت در لایه مرزی، یک تابع نقطه‌ای است. لازم است بدانیم مقدار u متوسط در طول مسیر پیموده شده توسط یون‌ها چه مقدار خواهد بود. از آنجا که مسیر طی شده توسط یون‌ها با خط لایه مرزی موازی است، رابطه آن به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$y = K\sqrt{x} \quad (9-4)$$

که K ضریبی ثابت است و به خط جریانی بستگی دارد که یون‌ها وارد آن شده‌اند. اگر این رابطه

را در فرمول 4-7 جایگذاری کنیم خواهیم داشت

$$u(x, y) = \frac{2K\sqrt{x}}{5\sqrt{xv}} U^{\frac{3}{2}} - \frac{K^2x}{25xv} U^2 = \frac{2K}{5\sqrt{v}} U^{\frac{3}{2}} - \frac{K^2}{25v} U^2 \quad (10-4 \text{ الف})$$

$$u(x, y) = u = \bar{u} \quad (10-4 \text{ ب})$$

همانطور که دیده می‌شود در مسیر پیموده شده توسط یون‌ها که با معادله 4-9 مشخص شده؛ مقدار u تابعی از x و y نبوده لذا مقدار متوسط آن با مقدار نقطه‌ای آن برابر خواهد بود یعنی در طول مسیر پیموده شده مقدار سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای برابر است و رابطه 4-8 در تمامی نقاط صدق می‌کند لذا همین رابطه را مبنا قرار داده و محاسبات را ادامه می‌دهیم در ادامه می‌خواهیم از این رابطه برای بررسی سرعت‌های بدست آمده در اندازه‌گیری با جریان‌سنج یونی استفاده کنیم.

۴-۴: تصحیح و تطبیق داده‌ها

جدول زیر داده‌های زمانی بدست آمده از آزمایشات را نشان می‌دهد. در ردیف اول سرعت سیال ثانیه نمایش داده شده است که توسط بادسنج پروانه‌ای اندازه‌گیری شده است. ردیف بعدی زمان اندازه‌گیری شده (t) برای حرکت یون‌ها از منبع یون تا آشکارساز را بر مبنای سیگنال‌های نمایش داده شده در شکل (۲-۴) را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: مقادیر زمان اندازه‌گیری شده در سرعت‌های مختلف

سرعت هوا m/s	t: زمان اندازه‌گیری شده ms	t' زمان تصحیح شده با کسر مقدار لازم برای باز شدن دریچه	سرعت بر مبنای زمان t'
۴.۱	۵۶۷	۴۷۷	۰,۲۵۲
۷.۱	۴۲۴	۳۳۴	۰,۳۵۹
۱.۲	۳۷۰	۲۸۰	۰,۴۲۹
۳.۲	۳۴۰	۲۵۰	۰,۴۸۰
۵.۲	۳۰۰	۲۱۰	۰,۵۷۱
۷.۲	۲۷۳	۱۸۳	۰,۶۵۶

همانطور که در بخش ۴-۱ اشاره گردید باید زمان لازم برای باز شدن دریچه را از زمان اندازه‌گیری شده کم کنیم تا زمان واقعی پرواز یون‌ها بدست آید. بررسی با دوربین فیلم برداری نشان می‌دهد که دریچه تقریباً طی ۹۰ میلی ثانیه به موقعیت مناسبی برای رهاسازی یون‌ها می‌رسد لذا این زمان به عنوان ثابت زمان لازم برای باز شدن دریچه در نظر گرفته می‌شود و از اعداد ستون دوم کسر می‌گردد تا زمان تصحیح شده (t') بدست آید. سپس بر مبنای آن مقدار سرعت را محاسبه می‌کنیم.

این سرعت را u و سرعت جریان هوای اصلی را U نامگذاری می‌کنیم در این حالت انتظار داریم

مقدار u و U طبق رابطه ۴-۸ معرفی شده در بخش قبلی به هم مرتبط باشند. در صورتی که تمام

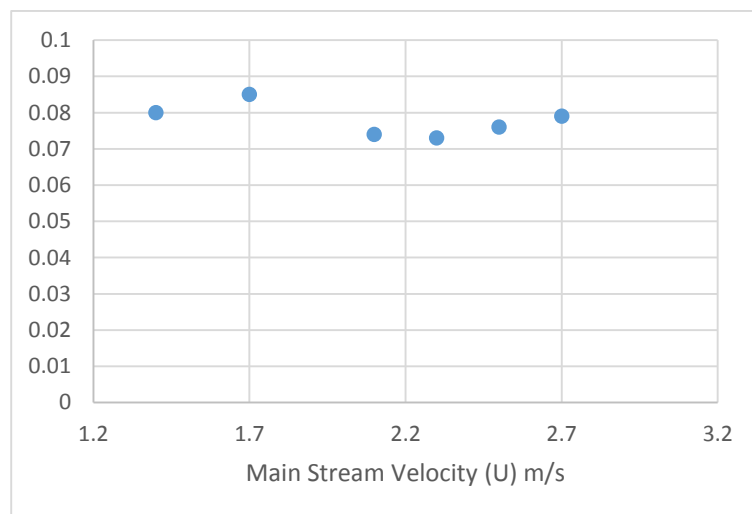
فرضیات مطرح شده تا اینجا صحیح باشند؛ با توجه به ثابت بودن هندسه مساله، انتظار داریم مقدار A

برای تمامی داده‌های بدست آمده یکسان و برابر باشد. به عنوان نمونه از یکی از داده‌ها استفاده کرده و مقدار A را محاسبه می‌کنیم. ردیف اول را در نظر می‌گیریم در اینحالت:

$$0.252 = 2A \left(1.4^{\frac{3}{2}}\right) - A^2(1.4^2) \rightarrow A = 0.08 \quad (9-4)$$

محاسبات را برای تمامی سرعت‌ها تکرار می‌کنیم. نمودار زیر مقدار A را برای آن‌ها نشان

می‌دهد



شکل (۴-۱۱): مقایسه مقادیر A حاصل از عبارت ۴-۸ برای تمامی سرعت‌ها

این نمودار نشان می‌دهد که مقدار A برای تمامی نقاط تقریباً برابر است و این مساله بیانگر آنست که تمامی نقاط در رابطه ۴-۸ صدق می‌کنند. به عبارتی می‌توان گفت که داده‌های سرعت بدست آمده از طریق جریان سنج یونی در واقع سرعت متوسط یک خط جریان مشخص از لایه مرزی بوده و سرعت جریان اصلی زمینه نمی‌باشد. دلیل این موضوع همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره گردید نحوه قرار گیری منبع یون و آشکار ساز در دیواره است که باعث می‌شود یون‌ها نتوانند در این مسیر از لایه مرزی خارج شوند و با سرعتی آهسته تر از سرعت سیال زمینه به سمت پائین دست حرکت کنند تا جایی که مجدداً به آشکار ساز که آن نیز درون لایه مرزی قرار دارد برخورد کنند.

اختلاف بسیار اندکی که در شکل ۴-۱۱ بین داده‌ها مشاهده می‌شود را می‌توان ناشی از خطای اندازه‌گیری در تجهیزات دانست. خطای اندازه‌گیری بادسنج در کاتالوگ ۵ درصد ذکر شده که با در نظر گرفتن این خطا همچنان داده‌ها در محدوده مجاز قرار دارند.

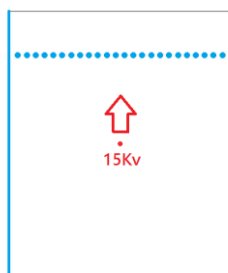
۴-۵: تغییر شرایط مدل‌سازی و پیش بینی عملکرد جریان‌سنج یونی

با توجه به نتایج بدست آمده تا این مرحله، دریافتیم که جریان‌سنج یونی ساخته شده و بررسی شده در این پژوهش هرچند از لحاظ مبنای عملکرد علمی خود به طور صحیح کار می‌کند (به عبارتی فرض اندازه‌گیری سرعت از روی زمان پرواز یون‌ها تأیید شده است) اما سرعت اندازه‌گیری شده توسط آن در واقع کسری از سرعت سیال زمینه بوده و در اصل سرعت متوسط یک خط جریان مشخص از سیال درون لایه مرزی در مجاورت دیواره بوده و کمتر از سرعت یکنواخت درون تونل باد می‌باشد. اگر منبع یون‌ها بتواند با سرعت بیشتری بتواند را به درون جریان اصلی پرتاب نماید ممکن است یون‌ها دیگر تحت تاثیر لایه مرزی قرار نگیرند و بتوانند وارد یک خط جریان از جریان اصلی زمینه شوند که این فرض از طریق مدل‌سازی بررسی خواهد شد.

در این مدل تمامی شرایط مشابه مدل‌سازی‌های قبلی است (شکل ۳-۲۲) و در سرعت ثابتی از تونل باد؛ تنها با جا به جا کردن الکتروود مثبت (درون منبع یون) و کاهش فاصله آن با توری دهانه منبع یون، سرعت جریان الکتروودینامیکی خروجی از منبع افزایش می‌یابد. که انتظار داریم افزایش شدت جریان بتواند یون‌ها را تا میانه مقطع تونل باد پرتاب کند. جدول زیر شرایط مدل‌سازی را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲: شرایط مدل‌سازی با منبع یون تقویت شده

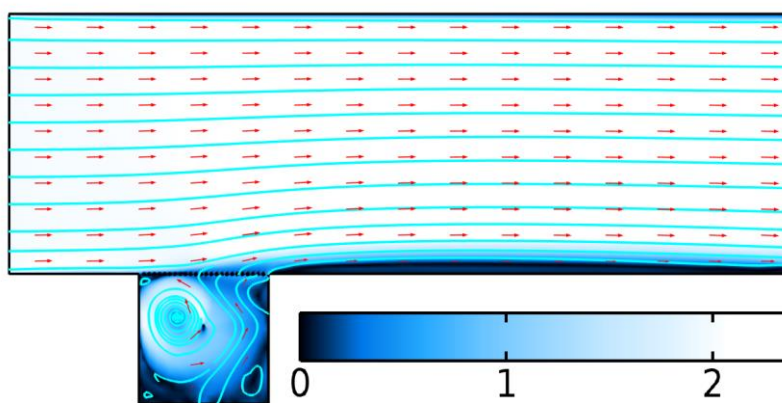
مدل	فاصله الکتروود مثبت از توری دهانه	حداکثر سرعت خروجی منبع یون به طور مستقل
۱*	۲۰ میلی متر	۰,۷ متر بر ثانیه
۲	۱۵ میلی‌متر	۱,۲ متر بر ثانیه
۳	۱۰ میلی‌متر	۲,۲ متر بر ثانیه



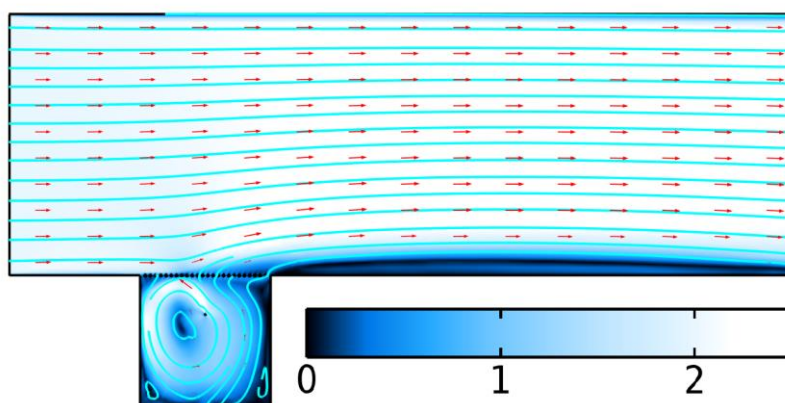
شکل (۴-۱۲): جابجایی الکتروود مثبت درون منبع یون و نزدیک کردن آن به توری دهانه

باعث افزایش سرعت خروجی یون‌ها می‌شود.

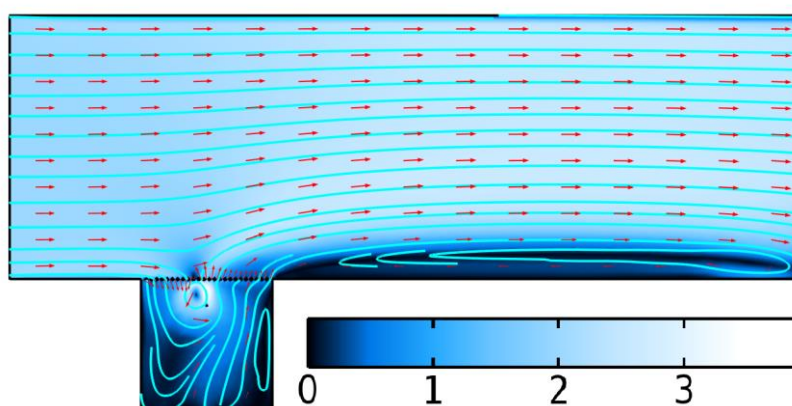
مدل شماره ۱ در واقع همان مدل مرجع و نزدیک به نمونه استفاده شده در بررسی‌های تجربی می‌باشد که در تمامی قسمت‌های قبلی بدان اشاره شده است و مورد استناد قرار گرفته است و در این قسمت تنها به منظور مقایسه داده‌ها در کنار مدل‌های مربوط به منبع یونی تقویت شده قرار داده شده است. سرعت تونل باد نیز برابر مقدار ثابت ۲ متر بر ثانیه و نزدیک به متوسط مقادیر تجربی است. مطابق شکل‌های نشان داده در صفحه بعد، نتیجه این بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییر منبع یونی و افزایش خروجی آن چندان راهکار مفیدی نمی‌باشد، چرا که در این حالت جریان اصلی سیال تحت تاثیر جریان ناشی از منبع یونی قرار گرفته و در مجاورت دیواره پائینی یک گردابه بزرگ تشکیل می‌شود. هرچند ممکن است در این حالت یون‌ها بتوانند به نواحی داخلی تر جریان نفوذ کنند اما از چنین ساختاری نمی‌توان به عنوان یک ابزار اندازه‌گیری استفاده کرد. در واقع برای یک ابزار اندازه‌گیری ایده آل است که بواسطه حضور آن هیچ تداخلی در محیط اندازه‌گیری ایجاد نشود اما در این حالت شکل سیال به طور کلی تحت تاثیر ابزار اندازه‌گیری قرار گرفته است که این حالت مطلوب نمی‌باشد.



شکل ۴-۱۳-الف: مدل شماره ۱



شکل ۴-۱۳-ب: مدل شماره ۲



شکل ۴-۱۳-ج: مدل شماره ۳

نتیجه گیری:

در این پژوهش ابتدا مروری بر روش‌های جریانسنجی با بهره‌گیری از پلاسمای الکتریکی انجام شد سپس با انتخاب روش جریان سنجی یونی، فرآیند بررسی آزمایشگاهی و مدلسازی رایانه‌ای آن به منظور بررسی و امکانسنجی اجرای روش مذکور انجام گردید.

مطابق فرضیه اصلی انتظار داریم تا با رهاسازی مقداری یون در مسیر سیال و ردیابی آن‌ها در یک نقطه مشخص، زمان پرواز یون‌ها را اندازه‌گیری کرده و با تقسیم فاصله بر زمان پرواز سرعت یون‌ها که معادل سرعت سیال است بدست آوریم.

مطابق نتایج آزمایشگاهی، زمان پرواز یون‌ها به وضوح با سرعت سیال مرتبط است و از اینرو صحت فرضیه اصلی تأیید می‌شود با اینحال عواملی موجب می‌شود تا از روی زمان اندازه‌گیری شده نتوان سرعت سیال را بدست آورد. بخشی از عوامل بواسطه محدودیت‌های تجهیزات به کار رفته در اندازه‌گیری (استفاده از دریچه مکانیکی برای رهاسازی یون‌ها و استفاده از مدار الکترونیکی نامناسب برای آشکار سازی آن‌ها) و بخشی بواسطه مسائل فیزیکی دخیل در پدیده (اثر لایه مرزی روی حرکت یون‌ها) می‌باشد که می‌توان با بررسی بیشتر و استفاده از تجهیزات بهتر این چالش‌ها را رفع نمود.

مدلسازی این پدیده برای اولین بار طی این پژوهش انجام شده است. بخشی از مدلسازی شامل شبیه سازی منبع یونی بوده است که در نظر گرفتن فرضیات خاص، میدان سیال ناشی از پیشرانش الکترومیدرودینامیکی ایجاد شده در این منبع یون محاسبه شده است. سپس منبع یون در مجاورت ناحیه تست تونل باد قرار داده شده است و با در نظر گرفتن سایر اثرات سیالاتی و الکترومیدینامیکی دخیل در پدیده حرکت ذرات باردار در تونل باد مشاهده شده است.

با بررسی حرکت این ذرات، ضمن تأیید مجدد صحت فرض اصلی برای جریانسنجی، جنبه‌های کاربردی آن از قبیل چیدمان اجزا و اثرات بروز خطا بهتر شناسایی شده‌اند.

پیشنهادهات:

با توجه به نتایج مدل سازی رایانه‌ای و تست‌های آزمایشگاهی که به منظور بررسی عملکرد جریانسنج یونی انجام شده است. پیشنهادهات زیر جهت افزایش دقت نتایج بدست آمده و گسترش دامنه دانش در این حوزه ارائه می‌گردد:

۱- قطع و وصل مکانیکی شارش یون‌ها برای اندازه‌گیری سرعت سیال یک روش مطلوب نمی‌باشد لذا در اولین پیشنهاد توصیه می‌گردد که این متد با قطع و وصل الکترونیکی جایگزین شود که این روش مستلزم طراحی یک مدار آشکار ساز مقاوم به نویزهای ناشی از قطع و وصل جریان است.

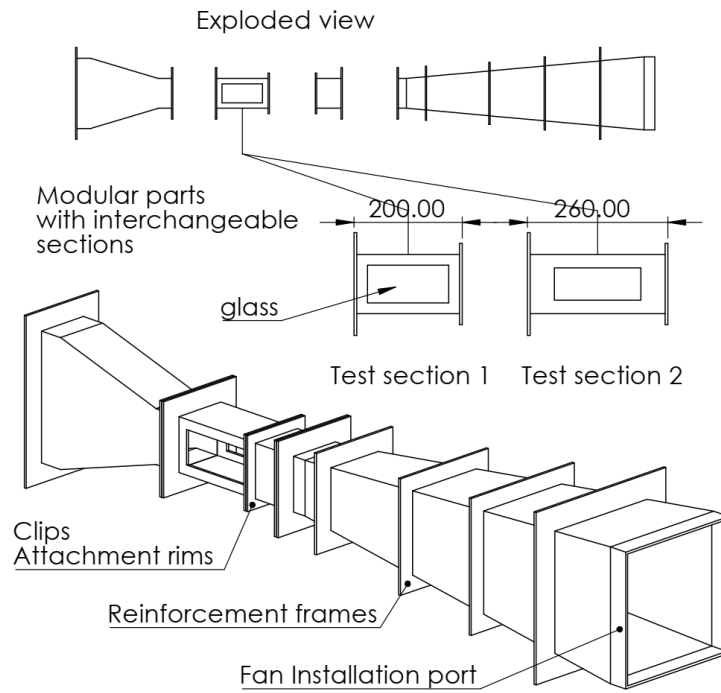
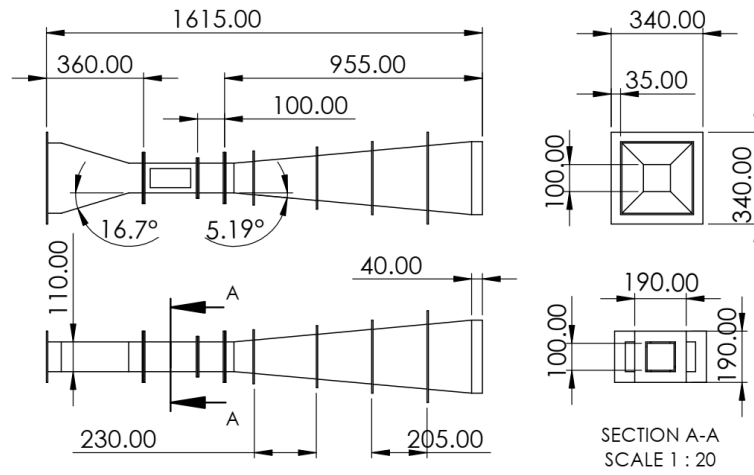
۲- برای تشخیص حضور یون‌ها از یک مدار ترانزیستوری ساده استفاده شده است. این مدار به نویزهای محیطی حساس بوده و دامنه عملکرد کوچکی دارد و به سرعت اشباع می‌شود طراحی یک مدار دقیق‌تر و با دامنه عملکرد وسیع‌تر می‌تواند قابلیت‌های دستگاه را افزایش دهد.

۳- مطابق آنچه در برخی رفرنس‌ها اشاره شده است سیگنال حاصل از گذار یون‌ها در حالتی که جریان سیال آشفته است با حالتی که جریان فرم لایه‌ای دارد متفاوت خواهد بود لذا در صورتی که بتوان شکل سیگنال را به درستی تشخیص داد، رژیم جریان از روی آن قابل تشخیص خواهد بود. طراحی مدار بهبود یافته می‌تواند این قابلیت را نیز فراهم آورد.

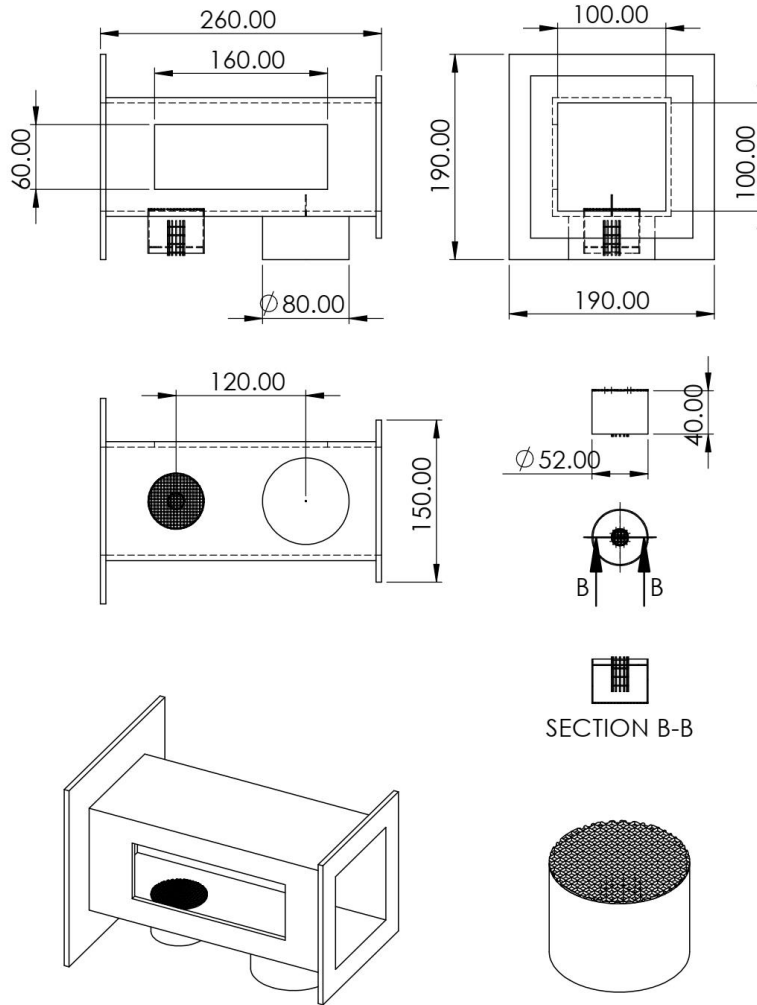
۴- هرچند منبع یون در دیواره نصب شده و آشکار ساز نیز در مسیر سیال اختلال چندانی ایجاد نمی‌کند (پراب آن به صورت یک سیم نازک و کوتاه در مسیر سیال واقع شده) اما لایه مرزی سیال روی دیواره می‌تواند در فرآیند اندازه‌گیری اختلال ایجاد نماید لذا توصیه می‌شود چیدمان‌های متفاوت دیگری برای حذف این موضوع بررسی شود.

۵- در این پژوهش تنها یک متد جریان سنجی پلاسمایی بررسی شده است. بررسی و مقایسه متدهای مختلف ممکن است به رهیافت جدیدی برای اندازه‌گیری جریان منجر شود

پیوست ۱: نقشه تونل باد



پیوست ۲: نقشه ناحیه تست و منبع یونی:



2N3819



Specifications^a

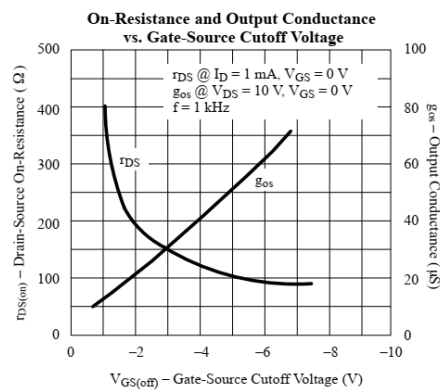
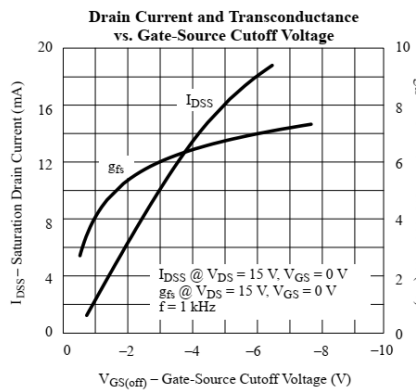
Parameter	Symbol	Test Conditions	Limits			Unit	
			Min	Typ ^b	Max		
Static							
Gate-Source Breakdown Voltage	$V_{(BR)GSS}$	$I_G = -1 \mu A, V_{DS} = 0 V$	-25	-35		V	
Gate-Source Cutoff Voltage	$V_{GS(off)}$	$V_{DS} = 15 V, I_D = 2 nA$		-3	-8		
Saturation Drain Current ^c	I_{DSS}	$V_{DS} = 15 V, V_{GS} = 0 V$	2	10	20	mA	
Gate Reverse Current	I_{GSS}	$V_{GS} = -15 V, V_{DS} = 0 V$		-0.002	-2	nA	
		$T_A = 100^\circ C$		-0.002	-2	μA	
Gate Operating Current ^d	I_G	$V_{DG} = 10 V, I_D = 1 mA$		-20		pA	
Drain Cutoff Current	$I_{D(off)}$	$V_{DS} = 10 V, V_{GS} = -8 V$		2			
Drain-Source On-Resistance	$r_{DS(on)}$	$V_{GS} = 0 V, I_D = 1 mA$			150	Ω	
Gate-Source Voltage	V_{GS}	$V_{DS} = 15 V, I_D = 200 \mu A$	-0.5	-2.5	-7.5	V	
Gate-Source Forward Voltage	$V_{GS(F)}$	$I_G = 1 mA, V_{DS} = 0 V$		0.7			
Dynamic							
Common-Source Forward Transconductance ^d	g_{fs}	$V_{DS} = 15 V$ $V_{GS} = 0 V$	$f = 1 kHz$	2	5.5	6.5	mS
			$f = 100 MHz$	1.6	5.5		
Common-Source Output Conductance ^d	g_{os}		$f = 1 kHz$	25	50	μS	
Common-Source Input Capacitance	C_{iss}	$V_{DS} = 15 V, V_{GS} = 0 V, f = 1 MHz$		2.2	8	pF	
Common-Source Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}			0.7	4		
Equivalent Input Noise Voltage ^d	\bar{e}_n	$V_{DS} = 10 V, V_{GS} = 0 V, f = 100 Hz$		6		nV/\sqrt{Hz}	

Notes

- a. $T_A = 25^\circ C$ unless otherwise noted.
- b. Typical values are for DESIGN AID ONLY, not guaranteed nor subject to production testing.
- c. Pulse test: $PW \leq 300 \mu s$, duty cycle $\leq 2\%$.
- d. This parameter not registered with JEDEC.

NH

Typical Characteristics



- [١] B. Yu, P. Yuan, and E. Shen, "Modeling study on the circuit model of AC plasma anemometer," *Measurement*, vol. 112, pp. 80-87, 2017.
- [٢] F. C. Lindvall, "A glow discharge anemometer," *Electrical Engineering*, vol. 53, no. 7, pp. 1068-1073, 1934.
- [٣] W. Fucks, "Investigation of the operating properties of the leakage current anemometer," 1947.
- [٤] R. F. Mettler, "The anemometric application of an electrical glow discharge in transverse air streams," California Institute of Technology, 1949.
- [٥] A. Morgan and T. Vrebalovich, "Investigation of Direct and Alternating Current Glow Anemometers," 1950.
- [٦] F. Werner, "An investigation of the possible use of the glow discharge as a means for measuring air flow characteristics," *Review of Scientific Instruments*, vol. 21, no. 1, pp. 61-68, 1950.
- [٧] F. D. WERNER and R. L. GERONIME, "Applications of the Corona Discharge for Measurements of Density and Velocity Transients in Air Flow," MINNESOTA UNIV ROSEMOUNT ROSEMOUNT AERONAUTICAL LABS, 1953.
- [٨] J. Lovelock and E. Wasilewska, "An ionization anemometer," *Journal of Scientific Instruments*, vol. 26, no. 11, p. 367, 1949.
- [٩] G. L. Mellen, "Gas-Flow Speedometer," *Electronics*, February, 1950.
- [١٠] R. Munnikhuisen, "High Range True Air-Speed Indicator," *Mr Technical Intelligence, Technical Data Digest*, vol. 13, no. 5, pp. 7-12, 1948.
- [١١] B. Boyd, R. G. Dorsch, and G. H. Brodie, "True Airspeed Measurement by Ionization-tracer Technique," 1952.
- [١٢] W. B. Kunkel and L. Talbot, "Ion tracer technique for airspeed measurement at low densities," 1954.
- [١٣] W. C. Cooley and H. G. Stever, "Determination of Air Velocity by Ion Transit-Time Measurements," *Review of Scientific Instruments*, vol. 23, no. 4, pp. 151-154, 1952.
- [١٤] K. J. Nygaard, "Anemometric Characteristics of a Wire-to-Plane Electrical Discharge," *Review of Scientific Instruments*, vol. 36, no. 12, pp. 1771-1774, 1965.
- [١٥] P. Durbin, D. McKinzie, and E. Durbin, "An anemometer for highly turbulent or recirculating flows," *Experiments in fluids*, vol. 5, no. 3, pp. 184-188, 1987.
- [١٦] M. Yamanaka, H. Hirosawa, Y. Matsuzaka, and H. Tanaka, "Glow-discharge ionic anemometer," *Review of scientific instruments*, vol. 56, no. 4, pp. 617-622, 1985.
- [١٧] J. Barat, "A high-resolution ionic anemometer for boundary-layer measurements," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 21, no. 10, pp. 1480-1488, 1982.
- [١٨] Y. Higashiyama and K. Asano, "Two-dimensional anemometry with an ion-flow anemometer," *Journal of electrostatics*, vol. 25, no. 3, pp. 245-254, 1990.
- [١٩] K. Asano, Y. Higashiyama, K. Yatsuzuka, and K. Urayama, "Ion-flow anemometer using a high-voltage pulse," *Journal of electrostatics*, vol. 32, no. 1, pp. 91-107, 1994.
- [٢٠] C. Clayton and J. Webb, "The measurement of mass flow and linear velocity of a gas by continuous ionization," *The International journal of applied radiation and isotopes*, vol. 15, no. 10, pp. 603-610, 1964.

- [٢١] M. Hribar, "An improvement of the continuous-ionization method for linearity at low gas-velocities," *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, vol. 18, no. 9, pp. 631-638, 1967.
- [٢٢] P. Lilienfeld, L. R. Solon, and H. J. DiGiovanni, "Ion tracer anemometer for the measurement of low density air flow," *Review of Scientific Instruments*, vol. 38, no. 3, pp. 405-409, 1967.
- [٢٣] R. Bass III, C. Gerlach, T. Owen, and S. Suhler, "Low velocity gas flow measurement Final technical report," 1971.
- [٢٤] S. OHIGASHI, Y. HAMAMoTo, and S. TANABE, "Technique of Measuring Gas Stream Velocity by means of Electric Discharge," *Bulletin of JSME*, vol. 11, no. 48, pp. 1169-1174, 1968.
- [٢٥] S. Ohigashi, Y. Hamamoto, and S. Tanabe, "A new digital method for measuring gas flow velocity by electric discharge," SAE Technical Paper, 0148-7191, 1969.
- [٢٦] E. Evlanov, B. Zubkov, D. Nenarokov, V. Linkin, M. Zavjalov, and P. Tyuryukanov, "Gas-discharge anemometer for the investigation of flow dynamics in rarefied gas media," *Cosmic Research*, vol. 39, no. 5, pp. 453-458, 2001.
- [٢٧] D. Gardiner, G. Wang, M. Bardon, M. LaViolette, and W. Allan, "An experimental study of spark anemometry for in-cylinder velocity measurements," *Journal of engineering for gas turbines and power*, vol. 130, no. 4, 2008.
- [٢٨] B. Chua and J. J. Pak, "Miniaturized corona flow sensor operating in drift mobility increment mode for low flow velocity measurement," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 224, pp. 65-71, 2015.
- [٢٩] B. Yu, E. Shen, P. Yuan, and H. Shen, "Research on the plasma anemometer based on AC glow discharge," *Journal of Sensors*, vol. 2017, 2017.
- [٣٠] P. Béquin, V. Joly, and P. Herzog, "Corona discharge velocimeter," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 104, no. 3, pp. 477-485, 2018.
- [٣١] F. M. White, *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 2011.
- [٣٢] T. Vrebalovich, "The development of direct and alternating current glow discharge anemometers for the study of turbulence phenomena in supersonic flow," California Institute of Technology, 1954.
- [٣٣] C. E. Marshall, *Plasma anemometer and pressure sensor design and characteristics*. University of Notre Dame, 2016.
- [٣٤] F. Li, H. Luo, J. Du, M. Yuan, F. Lin, and C. Nie, "Plasma pressure sensor based on direct current glow discharge," *Aerospace Science and Technology*, vol. 106, p. 106069, 2020.
- [٣٥] K. Janka, "Ion deflection air flow meter with constant deflection," *Review of scientific instruments*, vol. 55, no. 6, pp. 976-982, 1984.
- [٣٦] M. Cops and J. Moore, "Electronic fuel injection systems utilizing corona discharge air mass flow transducers," *SAE Transactions*, pp. 1735-1744, 1977.
- [٣٧] T. X. Dinh, T. T. Bui, and T. Terebessy, "Corona anemometry using dual pin probe," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 257, pp. 185-193, 2017.
- [٣٨] Z. Zhou, J. D. Jones, A. M. Leung, W. Nie, and X. Wang, "A high-linearity DC planar Ionic anemometer," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 45, pp. 118-125, 2015.
- [٣٩] I. Birchall, J. Spencer, and P. Tanner, "The measurement of transient mass flow rate in a gas using an ionization method," *Review of Scientific Instruments*, vol. 41, no. 5, pp. 782-783, 1970.
- [٤٠] C. Jones, "Ionised air as a wind tunnel tracer," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 10, no. 12, p. 1287, 1977.

- [۴۱] F. Früngel, W. Thorwart, and H. Patzke, "Paper N-2: High-Speed Photography of Rapid Air Currents and Shock Waves by Means of High-Frequency High-Voltage Sparks," *Journal of the SMPTE*, vol. 71, no. 1A, pp. 498-502, 1962.
- [۴۲] C. Lahaye, E. Leger, and A. Lemay, "Wake velocity measurements using a sequence of sparks," *AIAA Journal*, vol. 5, no. 12, pp. 2274-2276, 1967.
- [۴۳] V. Kalugin, "Ultrasensitive glow discharge method for visualizing hypersonic flows of rarefied gases," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 7, no. 4, pp. 75-78, 1966.
- [۴۴] L. R. Gartrell, *A Technique for Measuring Hypersonic Flow Velocity Profiles*. National Aeronautics and Space Administration, 1973.
- [۴۵] N. Hutchins, J. Monty, M. Hultmark, and A. Smits, "A direct measure of the frequency response of hot-wire anemometers: temporal resolution issues in wall-bounded turbulence," *Experiments in Fluids*, vol. 56, no. 1, pp. 1-18, 2015.
- [۴۶] م. ص. نژاد, مبانی جریان‌های آشفته و مدلسازی آن‌ها. دانش‌نگار, ۱۳۸۸.
- [۴۷] J. R. Roth, *Industrial Plasma Engineering: Volume 1: Principles*. CRC Press, 1995.
- [۴۸] S. Nijdam, E. Van Veldhuizen, P. Bruggeman, and U. Ebert, "An introduction to nonequilibrium plasmas at atmospheric pressure," *Plasma chemistry and catalysis in gases and liquids*, pp. 1-44, 2012.
- [۴۹] ح. محسنی, مهندسی فشارقوی الکتریکی پیشرفته. ۱۳۷۷.
- [۵۰] F. F. Chen, *Introduction to plasma physics and controlled fusion*. Springer, 1984.
- [۵۱] R. Barriol, G. Hannyer, and C. Rousseau, "A new approach for ionic air flow sensors: transit time," SAE Technical Paper, 0148-7191, 1984.
- [۵۲] B. Boreham, C. Jones, and R. Griffiths, "Field evaluation of a new Langmuir-type probe for atmospheric dispersion studies using ions as a tracer," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 18, no. 3, p. 218, 1985.
- [۵۳] F. Arnold, "Atmospheric ions and aerosol formation," *Planetary Atmospheric Electricity*, pp. 225-239, 2008.
- [۵۴] M. A. Biondi, "Atmospheric electron-ion and ion-ion recombination processes," *Canadian Journal of Chemistry*, vol. 47, no. 10, pp. 1711-1719, 1969.
- [۵۵] A. Ehlerding, "Electron-ion recombination in atmospheric and laboratory plasmas," *Fysikum*, 2006.
- [۵۶] T. Maruyama and T. Katayama, "Transfer of small negative atmospheric ions," *Journal of applied physics*, vol. 94, no. 11, pp. 7365-7369, 2003.
- [۵۷] V. Mohnen, "Formation, nature, and mobility of ions of atmospheric importance," in *Electrical processes in atmospheres*: Springer, 1976, pp. 1-17.
- [۵۸] R. Wilding and R. Harrison, "Aerosol modulation of small ion growth in coastal air," *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 32, pp. 5876-5883, 2005.
- [۵۹] B. Yu, P. Yuan, E. Shen, and H. Shen, "Numerical model of AC glow discharge plasma anemometer via the coupling of gas flow and plasma model," *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 81, no. 3, p. 30801, 2018.
- [۶۰] A. Karpatne, A. Sharma, J. Sirohi, and L. L. Raja, "Computational study of a novel microwave excited plasma sensor for aerodynamic flows," *Journal of Applied Physics*, vol. 129, no. 8, p. 084503, 2021.
- [۶۱] J. Trelles, C. Chazelas, A. Vardelle, and J. Heberlein, "Arc plasma torch modeling," *Journal of thermal spray technology*, vol. 18, no. 5, pp. ۷۵۲-۷۲۸ ۲۰۰۹.
- [۶۲] S. Kolev and A. Bogaerts, "A 2D model for a gliding arc discharge," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 24, no. 1, p. 015025, 2014.

- [٢٣] Y. Guan, R. S. Vaddi, A. Aliseda, and I. Novosselov, "Experimental and numerical investigation of electrohydrodynamic flow in a point-to-ring corona discharge," *Physical Review Fluids*, vol. 3, no. 4, p. 043701, 2018.
- [٢٤] R. S. Vaddi, Y. Guan, A. Mamishev, and I. Novosselov, "Analytical model for electrohydrodynamic thrust," *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 476, no. 2241, p. 20200220, 2020.
- [٢٥] L. Zhao and K. Adamiak, "EHD flow produced by electric corona discharge in gases: From fundamental studies to applications (a review)," *Particulate Science and Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 6٧-٧٦, 2016.
- [٢٦] L. Léger, E. Moreau, G. Artana, and G. Touchard, "Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate," *Journal of Electrostatics*, vol. 51, pp. 300-306, 2001.
- [٢٧] S. Shadmani, M. Mojtaba, S. Mojtaba Mousavi Nainiyan, M. Mirzaei, R. Ghasemiasl, and S. Pouryoussefi, "Experimental investigation of flow control over an Ahmed body using DBD plasma actuator," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 5, pp. 1267-1276, 2018.
- [٢٨] R. Sosa, E. Arnaud, E. Mémin, and G. Artana, "Study of the flow induced by a sliding discharge," *IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 2, pp. 305-311, 2009.
- [٢٩] M. Forte, L. Leger, J. Pons, E. Moreau, and G. Touchard, "Plasma actuators for airflow control: measurement of the non-stationary induced flow velocity," *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 6-10, pp. 929-936, 2005.
- [٣٠] L. Leger and E. Depussay, "Experimental comparison between the effect of electrical discharge and the effect of surface heating on Mach 2 rarefied airflow over a flat plate," *Experiments in fluids*, vol. 53, no. 3, pp. 699-706, 2012.
- [٣١] E. Vasil'ev and D. Nesterov, "Numerical modeling of the interaction between an electric arc and a gas flow," *Fluid Dynamics*, vol. 48, no. ٣, pp. 251-259, 2013.
- [٣٢] N. E. Jewell-Larsen, S. V. Karpov, I. A. Krichtafovitch, V. Jayanty, C. -P. Hsu, and A. V. Mamishev, "Modeling of corona-induced electrohydrodynamic flow with COMSOL multiphysics," in *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics , Paper E*, 2008, vol. 1: Citeseer, pp. 1-13.
- [٣٣] M. A. G. Hernández, A. I. M. López, A. A. Jarzabek, J. M. P. Perales, Y. Wu, and S. Xiaoxiao, "Design methodology for a quick and low-cost wind tunnel," *Wind tunnel designs and their diverse engineering applications*, p. 1, 2013.
- [٣٤] R. V. Smith, "The Design, Construction and Calibration of a Small Wind Tunnel," University of Southern California, 1950.
- [٣٥] P. Béquin, A. Nanda Tonlio, and S. Durand, "Air plasma sensor for the measurement of sound pressure using millimetric and micrometric discharges," *Journal of Applied Physics*, vol. 127, no. 3, p. 034502, 2020.
- [٣٦] J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*. Taylor & Francis, 1995.
- [٣٧] A. M. Howatson, *An Introduction to Gas Discharges: Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies*. Elsevier Science, 2013.
- [٣٨] A. Fridman and L. A. Kennedy, *Plasma Physics and Engineering, Second Edition*. Taylor & Francis, 2011.
- [٣٩] W. Jones, D. Maidment, and D. Morgan, "A simple ionic flowmeter for measuring very small rates of flow of air," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 1, no. 6, p. 623, 1968.

- [⁸⁰] F. W. Peek, *Dielectric phenomena in high voltage engineering*. McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1920.
- [⁸¹] Y. V. Afonin and A. Petrov, "High-voltage pulse generator for velocity measurements in gas flows by spark tracer method," in *Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt*, 1998, vol. 2, pp. 10-13.
- [⁸²] Y. V. Afonin and A. Petrov, "The conditions of using the multi-spark discharge for gas flow velocity measurements," in *International Conference on the Methods of Aerophysical Research(ICMAR'98), Novosibirsk, Russia*, 1998, pp. 14-17.
- [⁸³] O. Biblarz, "Electrogasdynamic spectral anemometer," *Journal of Electrostatics*, vol. 5, pp. 101-120, 1978.
- [⁸⁴] H. Bomelburg, J. Herzog, and J. R. Weske, "The electric spark method for quantitative measurements in flowing gases," Maryland. Univ. , College Park. Inst. for Fluid Dynamics and Applied Mathematics, 1959.
- [⁸⁵] S. P. Castle and M. R. Sewell, "An Ionization Device for Air Velocity and Mass Flow Measurements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, no. 1, pp. 119-124, 1975.
- [⁸⁶] P. V. Desai and W. C. Johnston, "Corona discharge anemometer and its operational hypothesis," *Review of Scientific Instruments*, vol. 42, no. 5, pp. 595-600, 1971.
- [⁸⁷] T. X. Dinh, C. D. Tran, T. T. Bui, and H. T. Phan, "A study of angular rate sensing by corona discharge ion wind ",*Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 277, pp. 169-180, 2018.
- [⁸⁸] A. Ershov, S. Kamenshchikov, E. Kolesnikov, A. Logunov, A. Firsov, and V. Chernikov, "The possibility of measuring flow velocity using a low-intensity periodic pulse discharge," *Fluid Dynamics*, vol. 43, no. 4, 2008.
- [⁸⁹] P. M. Jurenka, "Research on a dielectric breakdown probe for measuring the density of a flowing gas," Montana State University-Bozeman, College of Engineering, 1989.
- [⁹⁰] G. Katys, "Discrete measuring of changing flows by means of various tracers," *Measurement Techniques*, vol. 2, no. 12, pp. 1001-1005, 1959.
- [⁹¹] K. Karlsson, "Gap Discharge Transducers in a Transit Time Flow Measurement System Designed for Harsh Environments," Luleå tekniska universitet, 2014.
- [⁹²] G. Malczynski and T. Schroeder, "An ion-drag air mass-flow sensor for automotive applications," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 28, no. 2, pp. 304-309, 1992.
- [⁹³] C. Marshall, E. Matlis, T. Corke, and S. Gogineni, "AC plasma anemometer—characteristics and design," *Measurement Science and Technology*, vol. 26, no. 8, p. 085902, 2015.
- [⁹⁴] H. H. Schwartz, "Investigation of an ion tracer technique for the measurement of supersonic air velocities," 1971.
- [⁹⁵] P. Thomas, "A diaphragmless microphone for radio broadcasting," *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 42, no. 3, pp. 219-222, 1923.
- [⁹⁶] M. G. Babu, P. Janakiraman, and B. Murthy, "A digital method of measuring the pulsating velocity in an IC engine," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 9, no. 1, p. 47, 1976.
- [⁹⁷] J. Kim and R. W. Anderson, "Spark anemometry of bulk gas velocity at the plug gap of a firing engine," *SAE transactions*, pp. 2256-2266, 1995.
- [⁹⁸] N. T. Van, T. T. Bui, T. X. Dinh, T. Terebessy, and T. C. Duc, "A symmetrically arranged electrodes for corona discharge anemometry," in *2017 19th*

- International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, 2017: IEEE, pp. 1112-1115.
- [٩٩] F. Ganeev, V. Soldatkin, and I. Urazbakhtin, "Study of tracer generator performance in ionic tracer systems for flight parameter measurement," *Russian Aeronautics (Iz VUZ)*, vol. 58, no. 2, pp. 215-220, 2015.
- [١٠٠] V. Kazak, A. Babenko, I. Zharin, and D. Shevchuk, "Theoretical basis of an ion marker method for monitoring of the UAV external contour in flight," in *2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 2017: IEEE, pp. 143-146.
- [١٠١] V. Alfeyorov, "Investigation of the structure of a strong electric discharge in a high-velocity air flow," *Fluid Dynamics*, vol. 39, no. 6, pp. 988-998, 2004.
- [١٠٢] G. Bianchi, B. Saracoglu, G. Paniagua, and T. Regert, "Experimental analysis on the effects of DC arc discharges at various flow regimes," *Physics of Fluids*, vol. 27, no. 3, p. 036102, 2015.
- [١٠٣] I. Klement'eva, V. Bityurin, and A. Bocharov, "Electrical Discharge Influence on Gas Flow Structure and Mixing," in *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009, p. 1045.
- [١٠٤] V. German, P. Kozlov, and G. Lyubimov, "Experimental investigation of the interaction between an electric arc and a gas flow," *Fluid Dynamics*, vol. 40, no. 4, pp. 651-659, 2005.

Abstract

In this thesis methods of flow metering by the adoption of electric plasma are studied and one of them is investigated experimentally and by computer simulation.

According to the selected method, a bundle of ions release from a pulsed electric discharge in the air stream and fly with the flow until hits and detected by a probe located at a known distance downstream. The flight distance divide into flight time can provide airflow speed.

A setup is arranged for the experimental survey, Main elements are a corona discharge as an ion source which is located in the vessel wall, an electronic circuit for the detection of ions, and a uniform, and controllable source of airflow by utilizing a homemade wind tunnel.

Detector signals clearly prove the relation between airspeed and flight time, but measured speed is not equal to the flow stream. This error appears due to the instrument's weakness and also some physical phenomena reveals in the computer simulation.

Computer simulation of the corona discharge and ion diffusion in the air was done by COMSOL software and by solving the governing plasma and fluid equations. Results show the boundary layer effect on ions passage, which could affect their flight time. Actually, ions are traveling through a streamline in the boundary layer and their speed is a fraction of the mainstream velocity. This proportion got investigated analytically, and the accommodation between experimental results and analytical results was achieved.

Key words: corona discharge, ionic anemometer, Electro hydrodynamic, flow meter



Shahrood University of Technology
Faculty of physics and nuclear engineering

**Experimental investigation and modeling of electrical plasma
applications in flow metering of gaseous mediums**

By:
Mostafa Qalekhani

Supervisor(s):
Dr. Seyyed Iman Hosseini
Dr. Mojtaba Hashemzadeh

September 2021