



بررسی تجربی و شبیه‌سازی یک سرعت‌سنج یونی و مطالعه اثر لایه مرزی هوا بر عملکرد آن

مصطفی قلعه‌خانی، سید ایمان حسینی، و مجتبی هاشم‌زاده

گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

پست الکترونیکی: imanhosseini@shahroodut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴)

چکیده:

در این مقاله سعی شده است تا سرعت جریان هوا با رهاسازی و ردیابی یون‌های الکتریکی در آن اندازه‌گیری شود. در واقع اگر یک پلاسمای تخلیه الکتریکی در معرض جریان هوا قرار گیرد، بخشی از یون‌های آن همراه با جریان به حرکت در می‌آیند که سرعت‌سنج‌های یونی با ردیابی این یون‌ها سرعت هوا را اندازه‌گیری می‌کنند. در این پژوهش، یک تونل باد طراحی و آماده شده است. سپس یک سرعت‌سنج یونی ساخته شده و در دیواره آن نصب شده است. مطابق نتایج به دست آمده، اثر لایه مرزی مجاور دیواره روی حرکت یون‌ها موجب می‌شود تا سرعت اندازه‌گیری شده توسط سرعت‌سنج یونی با سرعت هوای جاری در درون تونل باد، تناسب مشخصی را نشان دهد. به منظور درک صحیح سازوکار فیزیکی دخیل در این مسئله، ابتدا حرکت یون‌ها در لایه مرزی با استفاده از شبیه‌سازی بررسی شده است و سپس به صورت تحلیلی مورد مطالعه دقیق‌تری قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها به انضمام داده‌های شبیه‌سازی و مقادیر محاسبه شده به صورت تحلیلی بیانگر آن هستند که یون‌های ردیابی شده، به جای حرکت در جریان یکنواخت زمینه، در لایه مرزی مجاور دیواره و با سرعتی کمتر به سمت پایین جریان حرکت می‌کنند به طوری که این پدیده تناسب بین سرعت‌های اندازه‌گیری شده را مشخص می‌کند و اثر لایه مرزی در عملکرد جریان‌سنج‌های یونی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: لایه مرزی، پلاσμα، تخلیه تاج، جریان‌سنج یونی، جریان الکترومیدرودینامیکی

انواع مختلفی دارد که تخلیه جرقه‌ای و تخلیه قوسی از آن میان بیشتر مشاهده شده‌اند [۲].

در ناحیه تخلیه، شاهد حضور الکترون‌ها و گونه‌های مختلف یونی و همین‌طور ذرات خنثی هستیم. شارش هوا روی تخلیه الکتریکی می‌تواند باعث انتقال یون‌ها و سایر گونه‌های باردار از ناحیه تخلیه به بیرون شود که باعث می‌شود پارامترهای تخلیه مثل ولتاژ یا شدت جریان الکتریکی تغییر کنند.

در واقع اولین روش در ساخت جریان‌سنج‌های پلاسمایی، مواجهه مستقیم تخلیه الکتریکی با شارش سیال است [۳]. بدین منظور کافی است که یک تخلیه الکتریکی را بین دو الکتروود برقرار کرده و سپس به طور عرضی در معرض جریان سیال قرار داده شود. این چیدمان در مقالات مختلفی بررسی شده و

۱. مقدمه

سرعت‌سنج‌های پلاسمایی دسته‌ای از سرعت‌سنج‌ها هستند که براساس برهم‌کنش سیال با پلاسمای ناشی از یک تخلیه الکتریکی کار می‌کنند. در یک تخلیه الکتریکی، دو الکتروود که با فاصله معین در محیطی نارسا قرار دارند به یک منبع تغذیه الکتریکی متصل می‌شوند. اگر اختلاف پتانسیل دو الکتروود به اندازه‌ای شود که منجر به یونیدگی ذرات ماده شده و جریان الکتریکی در این فاصله برقرار شود، اصطلاحاً تخلیه الکتریکی رخ داده است [۱]. در یک تخلیه الکتریکی در هوا، شاهد یونش گازهای موجود در هوا خواهیم بود که در نهایت به تشکیل حالت چهارم ماده یعنی پلاσμα منتهی می‌شود. تخلیه الکتریکی

روی حرکت یونها بررسی شود.

برای بررسی دقیق این پدیده، یک تونل باد فراهم شده و جریان سنج یونی در دیواره آن نصب شده است. ردیابی یونها در آن به وسیله یک آشکارساز الکترونیکی انجام می‌شود. داده‌های به دست آمده از ردیابی یونها نشان می‌دهد که این سرعت سنج یونی به واسطه نصب در دیواره تونل باد، از لایه مرزی آن تأثیر پذیرفته است که در ادامه، این پدیده در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای مشاهده می‌شود. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، میدان سیال مورد مطالعه قرار گرفته و در مرحله بعد حرکت یونها در لایه مرزی این میدان مشاهده شده است که تأیید کننده فرضیات اصلی است. در نهایت به کمک معادلات حاکم بر لایه مرزی، حرکت دقیق یونها مورد تحلیل قرار گرفته و نشان داده می‌شود که تطابق دقیقی بین داده‌های به دست آمده و مدل‌های تحلیلی وجود دارد.

۲. اجزای سرعت سنج یونی

همانگونه که در مقدمه نیز بیان شد مبنای عملکرد سرعت سنج یونی، ردیابی یونها و اندازه‌گیری سرعت آنها است. یک سرعت سنج یونی به طور معمول شامل ۳ عنصر اصلی است: اولاً یک تخلیه الکتریکی تپی که بتواند یک توده یونی را در مسیر سیال رها کند، ثانیاً یک آشکارساز در مسیر سیال که برای ردیابی یونها استفاده می‌شود و نهایتاً روشی برای اندازه‌گیری زمان.

در واقع کمیتی که به طور عملی در سرعت سنج‌های یونی اندازه‌گیری می‌شود، زمان است؛ به این صورت که فاصله زمانی آغاز تخلیه الکتریکی (آزادسازی یونها) تا لحظه شناسایی آنها بوسیله آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود. سپس با تقسیم فاصله مکانی بین تخلیه و آشکارساز بر زمان به دست آمده، سرعت متوسط پیمایش یونها یا به عبارتی سرعت سیال اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱ نحوه عملکرد سرعت سنج یونی را نشان می‌دهد.

این شکل، نمایی از کانال عبور هوا را نشان می‌دهد که یک منبع یون (a) و یک آشکارساز یون (b) در دیواره آن نصب شده است و به طور مداوم جریان هوا از سمت چپ به سمت راست در

پارامترهای وابسته آن شناسایی و انتخاب شده‌اند به نحوی که در نهایت اندازه‌گیری یک کمیت مشخص از تخلیه الکتریکی بتواند معیاری از سرعت شارش هوا را ارائه دهد [۴-۷]. در ساده‌ترین حالت، برخورد هوا باعث تغییر شدت جریان الکتریکی عبوری از تخلیه می‌شود. در واقع برخورد هوا به تخلیه الکتریکی باعث پراکنده شدن یونها و کاهش مشارکت آنها در انتقال جریان الکتریکی در ناحیه تخلیه می‌شود. لذا در ولتاژ ثابت، شاهد کاهش جریان الکتریکی بر اثر برخورد هوا هستیم که این روند کاهشی با سرعت هوا نسبت مستقیم دارد [۸-۱۰].

هرچند گروه اول تحقیقات همگی بر روی مواجهه مستقیم تخلیه الکتریکی با جریان هوا و مطالعه متغیرهای آن تمرکز داشته‌اند، اما در پژوهش‌های بعدی رویکرد متفاوتی اتخاذ شده است. در این طرح جدید یک تخلیه الکتریکی تپی در مسیر سیال یا در جداره کانال قرار گرفته و یون‌هایی را در مسیر سیال آزاد می‌کند [۱۱ و ۱۲]. این یونها به عنوان یک نشانگر در مسیر سیال مورد ردیابی قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر اندازه‌گیری سرعت این یونها، سرعت سیال را نشان می‌دهد [۱۳-۱۵]. این دسته از سرعت سنج‌های پلاسمایی به واسطه نقش اساسی یونها در اندازه‌گیری، سرعت سنج‌های یونی نیز نامیده می‌شوند.

سرعت سنج‌های یونی می‌توانند در شرایط دشوار به ایفای نقش بپردازند. از سرعت سنج‌های یونی می‌توان در بازه گسترده‌ای از فشار و سرعت استفاده کرد. گزارش‌هایی از عملکرد مثبت این سرعت سنج‌ها از فشار کمتر از یک میلی‌متر جیوه [۱۴] تا فشار اتمسفر و از سرعت نیم متر بر ثانیه [۱۶] تا حداکثر سرعت $3/8$ ماخ (1300 متر بر ثانیه) وجود دارد [۱۳].

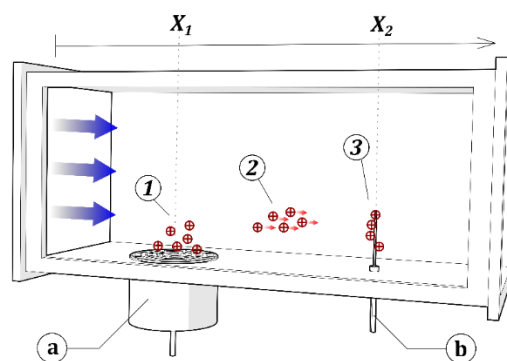
طی سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه گروه اول سرعت سنج‌های پلاسمایی انجام شده است و مطالعاتی در خصوص مدل‌سازی تئوری و رایانه‌ای و بررسی تطابق داده‌ها با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است [۱۷-۲۱].

در این پژوهش سعی شده است تا یک سرعت سنج یونی ساخته شده و به واسطه آن حرکت یونها در سیال مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد. به علاوه بناست تا اثر لایه مرزی مجاور دیواره

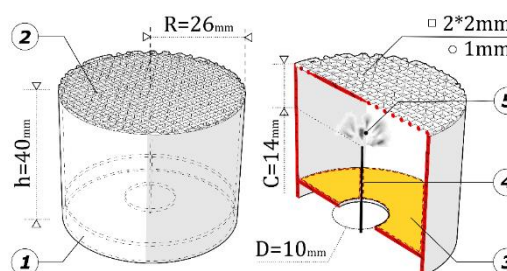
یون‌ها در ناحیه تخلیه غیریکنواخت بوده [۲۲] و در تاج مثبت در نواحی دور از الکتروود تخلیه شاهد تراکم یون‌های مثبت هستیم که این امر باعث می‌شود تا به راحتی به وسیله یک الکتروود مشبک بتوان یون‌های مطلوب را از ناحیه تخلیه خارج کرده و برای ردیابی مورد استفاده قرار داد. این در حالی است که در سایر تخلیه‌ها، گونه‌های مختلف یونی به شدت در محیط تخلیه با یکدیگر آمیخته شده‌اند و جداسازی آنها آسان نخواهد بود.

در واقع تخلیه تاج در شرایطی شکل می‌گیرد که میدان بین الکتروودها شدیداً غیریکنواخت بوده و در اطراف یک الکتروود، گرادیان شدید میدان وجود داشته باشد [۲۳]. اصولاً این حالت در اطراف الکتروودهای نوک‌تیز رخ می‌دهد. به عبارت دیگر اگر یک الکتروود نوک‌تیز را به یک منبع یک‌سوی ولتاژ بالا وصل کنیم، یک میدان الکتریکی شدید در اطراف آن شکل می‌گیرد که به ایجاد تخلیه الکتریکی به شکل یک هاله روشن اما کم نور با شاخک‌هایی بیرون زده در اطراف آن منجر می‌شود. به خاطر توزیع غیریکنواخت میدان الکتریکی، این تخلیه تا الکتروود بعدی ادامه پیدا نمی‌کند. تنها شاهد جریان ضعیفی از یون‌های مثبت هستیم که تمایل دارند از الکتروود نوک‌تیز با پتانسیل مثبت دور شوند و به سمت الکتروود با پتانسیل صفر (یا زمین) بروند؛ البته ذرات خنثی نیز بر اثر برخورد با این یون‌ها و دریافت تکانه از آنها، همراه با یون‌ها در همین مسیر حرکت می‌کنند. این جریان اصطلاحاً به جریان الکترویدرودینامیکی^۱ موسوم است [۲۴].

در این پژوهش نیز از تخلیه تاج برای تولید یون‌ها استفاده شده است. شکل کلی منبع یون‌ها به صورت زیر است: یک استوانه فلزی تو خالی با قطر ۵۲ میلی‌متر و طول ۴۰ میلی‌متر ساخته شده و یک سمت آن با توری فلزی و سمت دیگر آن با یک صفحه پلاستیکی عایق پوشانده شده که یک سوزن به عنوان الکتروود مثبت از مرکز آن و به صورت هم‌محور با استوانه وارد آن شده است و تقریباً تا میانه استوانه امتداد پیدا کرده است. یک حفره نیز در مرکز سطح پایین استوانه وجود دارد. شکل ۲ نمایی از منبع یونی توصیف شده را نشان می‌دهد. در این شکل، ۱- دیواره پایینی ۲- توری، ۳- عایق، ۴- الکتروود مثبت متصل به ولتاژ ۱۵ کیلوولت و ۵- تخلیه



شکل ۱. مراحل اندازه‌گیری سرعت با سرعت‌سنج یونی.



شکل ۲. طرحواره‌ای از منبع یونی. ۱- دیواره پایینی ۲- توری، ۳- عایق، ۴- الکتروود مثبت متصل به ولتاژ ۱۵ کیلوولت و ۵- تخلیه.

آن برقرار است. در مرحله ۱ تعدادی یون از یک تخلیه تپی وارد جریان هوا می‌شوند. این لحظه را معادل زمان $t_0 = 0$ در نظر می‌گیریم و شدت سیگنال آشکارساز را از این لحظه به بعد رصد می‌کنیم. یون‌ها همراه جریان هوا به سمت پایین کانال حرکت می‌کنند (مرحله ۲) تا زمانی که به آنتن آشکارساز برخورد کنند (مرحله ۳) و در این حالت، لحظه برخورد یون‌ها به آشکارساز معادل زمان $t = T$ اندازه‌گیری شده است. لذا سرعت متوسط پیمایش یون‌ها برابر با مسافت طی شده تقسیم بر بازه زمانی مورد نظر خواهد بود. به عبارت دیگر سرعت را می‌توان از رابطه (۱) به دست آورد.

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{X_2 - X_1}{T}, \quad (1)$$

منبع یون‌های رها شده در سیال، یک تخلیه الکتریکی تپی است. رژیم تخلیه الکتریکی مجموعه‌ای از خواص آن را معین می‌کند که به ولتاژ و جریان وابسته است و در این پژوهش از تخلیه الکتریکی با رژیم تاج استفاده شده است. در تخلیه تاج، توزیع

کافی است. داده‌های این مدار با استفاده از یک اسیلوسکوپ دیجیتال ثبت می‌شوند؛ بدین صورت که خروجی مدار آشکارساز به یک کانال اسیلوسکوپ متصل شده است و سطح ولتاژ آشکارساز ثبت می‌شود. کانال دیگر اسیلوسکوپ نیز به مدار مولد تپ تخلیه متصل است و سیگنال آن را ثبت می‌کند. اسیلوسکوپ از نوع دیجیتال مدل Hantek:6022E بوده و داده‌های آن به صورت همزمان در رایانه نمایش داده شده و ذخیره می‌شود. شکل ۳ چیدمان کلی سامانه سرعت‌سنج یونی را نشان می‌دهد. در این شکل ۱- رایانه، ۲- منبع تغذیه، ۳- مدار کنترل کننده، ۴- دکمه قطع و وصل، ۵- اسیلوسکوپ، ۶- سرعت‌سنج، ۷- دیفیوزر، ۸- دیمر، ۹- بادزن تونل باد، ۱۰- جریان هوا، ۱۱- نازل، ۱۲- آشکارساز، ۱۳- دیواره اتصال به توری و ۱۴- منبع یونی است.

۳. نتایج تجربی

مطابق شکل ۳ روند کلی انجام آزمایش‌ها بدین صورت است. ابتدا بادزن تونل باد (۹) روشن می‌شود و با استفاده از دیمر (۸) سرعت چرخش بادزن و سرعت هوای درون تونل باد روی مقدار ثابتی تنظیم می‌شود. جهت جریان هوا (۱۰) از نازل (۱۱) به سمت دیفیوزر (۷) تونل باد است و سرعت آن با استفاده از سرعت‌سنج نصب شده در امتداد ناحیه آزمون تونل باد (۶) اندازه‌گیری می‌شود. دقت سرعت‌سنج ۵ درصد و توان تفکیک آن ۰/۱ متر بر ثانیه و از نوع پروانه‌ای است.

در ادامه، اسیلوسکوپ (۵) نیز تنظیم شده و آماده ثبت داده‌ها خواهد بود. نهایتاً به صورت دستی و به وسیله یک دکمه (۴) فرایند اندازه‌گیری از سوی کاربر آغاز می‌شود. مدار کنترل کننده (۳) با دریافت این فرمان از یک سو منبع تغذیه ولتاژ بالا (۲) را به مدت ۳۰۰ میلی‌ثانیه روشن و سپس خاموش می‌کند. از سوی دیگر یک تپ با همین طول زمانی مبنی بر اعلام وضعیت منبع، به اسیلوسکوپ ارسال می‌کند.

در لحظه دریافت این تپ، ذخیره داده‌ها در اسیلوسکوپ و درون رایانه (۱) آغاز می‌شود. با انجام این تخلیه تپی، یون‌های ناشی از تخلیه از منبع یون (۱۴) وارد جریان سیال

است. در ضمن توری و دیواره‌ها به پتانسیل صفر (زمین) متصل هستند. هنگامی که الکتروود مرکزی (یا به عبارتی همان سوزن) را به منبع ولتاژ بالا متصل کنیم شاهد شکل‌گیری یک تخلیه تاج در درون استوانه خواهیم بود. منبع تغذیه به کار رفته در این پژوهش ولتاژی برابر ۱۵ کیلوولت را به طور یک‌سو ایجاد می‌کند و می‌تواند به راحتی باعث شکل‌گیری یک تخلیه تاج در اطراف سوزن نوک‌تیز شود. یون‌های مثبت تمایل دارند که از سوزن با پتانسیل مثبت دور شوند. لذا به سمت توری (با پتانسیل صفر) شتاب می‌گیرند که بخشی از آنها از توری عبور می‌کنند. این ساختار مانند یک چشمه یون عمل می‌کند و می‌تواند یون‌های مثبت را وارد جریان هوا کند. لذا در مقاله پیش رو به این مجموعه، چشمه یونی یا منبع یونی گفته می‌شود. البته شدت جریان الکتریکی یون‌های مثبت خارج شده از این چشمه یونی بسیار اندک و در حد نانو آمپر است. با این حال شارش الکترویدرودینامیکی هوا در این حالت می‌تواند سرعتی تا ۱ متر بر ثانیه داشته باشد که ناشی از انتقال تکانه یون‌های اولیه به مولکول‌های خنثی است. این جریان به طور تجربی و در شبیه‌سازی نیز مشاهده شده است که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

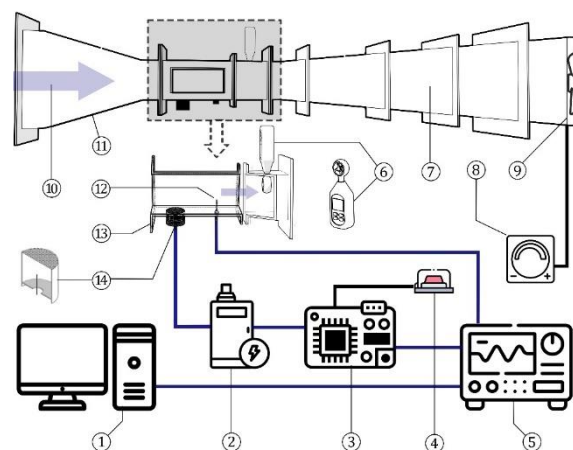
برای انجام آزمایش‌ها بر روی جریان‌سنج یونی در آغاز یک تونل باد طراحی و ساخته شده است که در ناحیه آزمون با سطح مقطع ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر و طول ۲۶ سانتی‌متر جریان هوای لایه‌ای را فراهم می‌کند. منبع یون‌ها و آشکارساز مطابق شکل ۳. الف در دیواره ناحیه آزمون تونل باد نصب شده‌اند به نحوی که فاصله مرکز مولد یون تا آنتن آشکارساز ۱۲ سانتی‌متر است. انتظار داریم با ایجاد یک تخلیه تپی در منبع یونی، یون‌هایی در مسیر سیال رها شوند که بتوانیم آنها را پس از مدت زمان مشخص از شروع تپ تخلیه آشکارسازی کنیم.

آشکارساز یک مدار الکترونیکی بسیار حساس است که با استفاده از ترانزیستورهای اثر میدان و ترانزیستورهای پیوند دو قطبی ساخته شده است. این مدار الکترونیکی می‌تواند به جریانی در محدوده ۱۰ پیکوآمپر واکنش نشان دهد. لذا برای آشکارسازی جریان بسیار ضعیف، یون‌های همراه شده با سیال

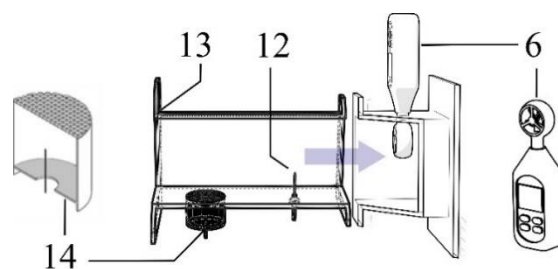
۴ است. تب صورتی رنگ مربعی مشاهده شده در کانال اول اسیلوسکوپ، همان فرمان شروع و اتمام تخلیه تپی را نشان می‌دهد و سیگنال کانال دوم به رنگ آبی نیز خروجی مدار آشکارساز را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود پس از مدتی معین از شروع تخلیه تپی، شاهد افزایش سطح سیگنال آشکارساز هستیم. این بدان معناست که بعد از برقراری تخلیه الکتریکی، یون‌ها به همراه جریان هوا به سمت پایین دست حرکت کرده و آشکارسازی می‌شوند. در ضمن، همانگونه که از شکل ۴ مشخص است یک فاصله زمانی بین پایان سیگنال تخلیه تپی (رنگ صورتی) و شروع آشکارسازی یون‌ها (آخرین تب کوچک آبی رنگ) دیده می‌شود. در حقیقت در این شکل، این زمان همان زمان پرواز یون‌ها است. از آنجایی که عوامل بیرونی در این نتیجه اثر می‌گذارد، بنابراین این زمان از یک تب به یک تب دیگر می‌تواند تغییر کند. اگر عوامل محیطی (مثلاً نوفه ناشی از برق شهر و یا مدرج نبودن دستگاه) را از سیگنال حذف کنیم (که در اینجا نشان داده نشده است) نتایج تقریباً از تپی به تب دیگر تغییر نخواهد کرد. از طرف دیگر، سیگنال ولتاژ آشکارساز در این کار مدوله است یعنی یک تب دیگر بر روی آن سوار است. این امر کاملاً صحیح است. در حقیقت این تب مدوله شده، ولتاژ برق شهر است. در اینجا می‌توانستیم برای حذف نوفه شهری از یک صافی میان‌گذر (band pass filter) استفاده کنیم. دلیل حذف نکردن آن این است که می‌خواستیم نشان دهیم که وسیله‌ای که در اینجا ساخته شده آنقدر حساس بوده که اثر میدان الکترومغناطیسی ناشی از برق شهر و محیط اطراف را نیز تشخیص داده است.

یک ریزموج در سیگنال آشکارسازی دیده می‌شود که ناشی از میدان برق شهری است و به کمک یک صافی یسامدی قابل حذف است. سایر اثرات محتمل ناشی از انواع دیگر تداخل‌های الکترومغناطیسی در اندازه‌گیری‌ها قبلاً بررسی و طی آزمایش‌های متعدد حذف شده‌اند و داده‌های به‌دست آمده فاقد نوفه‌اند.

جدول ۱ داده‌های به‌دست آمده را برای سرعت‌های مختلف هوا نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود هرچه سرعت سیال بالاتر می‌رود، سیگنال آشکارسازی یون‌ها به لحظه شروع تخلیه

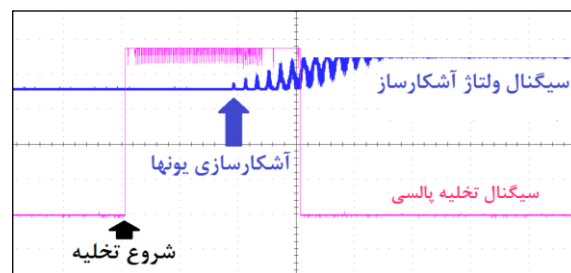


(الف)



(ب)

شکل ۳. (الف) چیدمان کامل سامانه سرعت سنج یونی. در این شکل ۱- رایانه، ۲- منبع تغذیه، ۳- مدار کنترل کننده، ۴- دکمه قطع و وصل، ۵- اسیلوسکوپ، ۶- سرعت‌سنج، ۷- دیفیوزر، ۸- دیمر، ۹- بادزن تونل باد، ۱۰- جریان هوا، ۱۱- نازل، ۱۲- آشکارساز، ۱۳- دیواره اتصال به توری و ۱۴- منبع یونی است. (ب) اجزای مستقر در ناحیه آزمون تونل باد.



شکل ۴. نمونه یک داده به‌دست آمده ضمن اندازه‌گیری سرعت با سرعت‌سنج یونی (محور افقی زمان و محور عمودی ولتاژ را نشان می‌دهد).

می‌شوند و به همراه آن به سمت پایین حرکت می‌کنند. آشکارساز (۱۲) نیز که در پایین سیال قرار داده شده منتظر اعلام حضور یون‌ها است. با برخورد یون‌ها به آنتن آشکارساز، سیگنال مربوطه در کانال دیگر اسیلوسکوپ ظاهر می‌شود. نتیجه یک اندازه‌گیری نوعی به صورت نشان داده شده در شکل

اثر لایه مرزی روی حرکت یونهاست. برای درک دقیق سازوکار این پدیده لازم است نگاهی به شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده بر مبنای آن داشته باشیم که در قسمت‌های بعدی تشریح خواهد شد.

۳.۱. شبیه‌سازی

برای حل عددی این مسئله از شبیه‌سازی جریان لایه‌ای از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است و بناست تا به کمک مدل‌سازی، رهاسازی و حرکت یونها در مسیر سیال شبیه‌سازی شود. نرم‌افزار کامسول یک نرم‌افزار چند منظوره است که برای شبیه‌سازی مسائل مختلف علوم و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که شامل مقادیر اولیه‌ای است که خود شامل پارامترها، متغیرها و توابع شناخته شده است. قسمت بعدی شامل هندسه است که در این حالت هندسه مرتبط با مسئله مورد نظر به صورت صفر تا سه بعدی طراحی می‌شود. قسمت بعدی شامل فیزیک مسئله است که شرایط مرزی، شرایط اولیه و فیزیک مرتبط با مسئله به هندسه طراحی شده وارد می‌شود. در قسمت بعد مش‌بندی آمده است که بسته به هندسه مسئله، می‌تواند برای قسمت‌های نوک‌تیز، گوشه و دارای نایکنواختی و یا حالت‌های دیگر متفاوت باشد. در نهایت، قسمت آخر که مهم‌ترین قسمت شبیه‌سازی است شامل پردازش، اجرا و تحلیل داده‌ها و نمودارها است. در توصیف پدیده‌های فیزیکی دخیل در این مسئله، با یک دستگاه معادلات به هم پیوسته غیرخطی مواجه هستیم که از معادلات زیر تشکیل شده است:

معادلات ناویر استوکس و پیوستگی جرم

$$\rho_{air} \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} - \rho \nabla \phi, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (3)$$

که این معادلات برای حل جریان پایدار تراکم‌ناپذیر سیال به کار می‌روند. معادلات پواسون، پیوستگی بار و رابطه بین میدان و پتانسیل نیز به صورت زیرند:

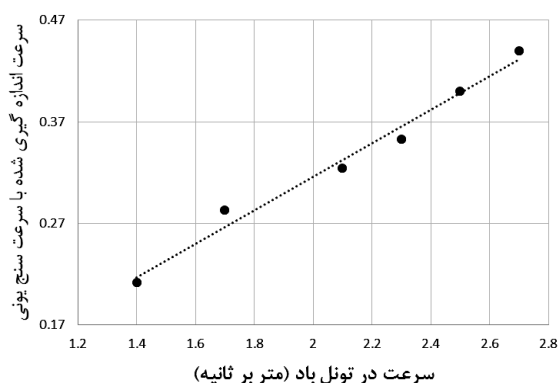
$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0, \quad (5)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi, \quad (6)$$

جدول ۱. زمان‌های اندازه‌گیری شده از پرواز یونها بین منبع تا آشکارساز در سرعت‌های مختلف هوا.

سرعت هوا (متر بر ثانیه)	زمان اندازه‌گیری شده (میلی ثانیه)
۱/۴	۴۷۷
۱/۷	۳۳۴
۲/۱	۲۸۰
۲/۳	۲۵۰
۲/۵	۲۱۰
۲/۷	۱۸۳



شکل ۵. رابطه خطی مشاهده شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سرعت‌سنج یونی و سرعت واقعی جریان هوا در تونل باد.

نزدیک‌تر می‌شود و زمان اندازه‌گیری شده کمتر می‌شود. به عبارتی این داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت هوا، یونها سریع‌تر به آشکارساز می‌رسند و سرعت یونها به سرعت سیال وابسته است.

اگر برای محاسبه سرعت از فرمول جابه‌جایی در واحد زمان استفاده کنیم (به عبارتی فاصله بین منبع یون تا آنتن آشکارساز که برابر ۱۲ سانتی‌متر است را بر فاصله زمانی به دست آمده در آزمایش‌های جدول فوق تقسیم کنیم) سرعت‌های به دست آمده با سرعت واقعی جریان هوا درون تونل باد (که به وسیله سرعت‌سنج پروانه‌ای اندازه‌گیری شده است) متفاوت‌اند.

نمودار شکل ۵ رابطه بین سرعت به دست آمده از حرکت یونها با سرعت واقعی هوا را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود، سرعت محاسبه شده کمتر از سرعت واقعی سیال اما کاملاً به طور خطی با آن متناسب است. این موضوع به دلیل

شود. با در نظر گرفتن تمامی این موارد، هندسه نهایی برای انجام شبیه‌سازی مطابق شکل ۶ است.

در شکل ۷ اجزای منبع یونی و شرایط مرزی برای شبیه‌سازی جریان الکتروهایدرودینامیکی در آن رسم شده است.

اجزای شماره گذاری شده در تصویر عبارتند از: (۱) الکتروود مثبت یا سوزن تخلیه، (۲) دیواره‌های فلزی، (۳) توری فلزی، (۴)

ورودی جریان هوا، (۵) فضای خالی در نظر گرفته شده در بالای توری به منظور مشاهده جریان خروجی و (۶) دیواره عایق. در واقع

عناصر نامبرده در این شکل همان اجزای معرفی شده در شکل ۲ و ۶ هستند که به منظور نمایش شرایط مرزی مجدداً به تصویر

کشیده شده‌اند. جدول ۲ این مقادیر را به همراه سایر ثوابت و کمیت‌های به کار رفته در مدل‌سازی نشان می‌دهد. همانگونه که

در این جدول نیز مشاهده می‌شود الکتروود مرکزی ولتاژ $V_p = 15 \text{ kV}$ داشته و توری فوقانی و دیواره‌ها ولتاژ صفر دارند.

همچنین فشار در ورودی و خروجی هوا و فشار کل برابر صفر است. نتیجه شبیه‌سازی اول با حل معادلات (۲) - (۸) در نرم‌افزار

کامسول، مطابق شکل ۸ است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در اطراف سوزن مثبت، شاهد تجمع شدید بارها هستیم

(شکل ۸. الف)، اما این چگالی بار با فاصله گرفتن از نوک سوزن به شدت افت می‌کند که این توزیع بار در تطابق با تعاریف موجود

از تخلیه تاج است. از این شکل دیده می‌شود که چگالی بر روی سوزن برابر $45 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ است. همچنین شاهد یک جریان

هوا از سمت سوزن به سمت توری هستیم (شکل ۸. ب) که مطابق انتظار همان جریان هوای الکتروهایدرودینامیکی بوده و در عمل نیز

مشاهده شده است. همچنین از این شکل شاهد جریان‌های گردابی هستیم به طوری که جریان گردابی در حدود 0.6 m/s است. تا

این قسمت نتایج شبیه‌سازی با ماهیت شناخته شده و مورد انتظار از پدیده تطابق دارند و به نوعی صحت فرضیات و معادلات به

کار رفته در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. حال لازم است مسئله را در حالت واقعی‌تری بررسی کنیم. در شبیه‌سازی بعدی، هندسه

کامل مسئله را منطبق با شرایط تجربی در نظر می‌گیریم و مقطع کامل تونل باد را به همراه منبع یونی متصل به آن شبیه‌سازی

می‌کنیم. ساختار مسئله مطابق شکل ۹ است.

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. در معادله (۵)، \vec{J} چگالی جریان است و با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\vec{J} = \mu_E \rho \vec{E} + \rho \vec{u} - D \nabla \rho, \quad (7)$$

تحرك پذیری یون‌ها با μ_E مشخص شده است و D ضریب پخش آنها را نشان می‌دهد. به عبارتی در این معادله، اثرات رسانش، همرفت و پخش در چگالی جریان مشخص شده است.

مقدار μ_E در بازه $1 - 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{V.s}$ قرار دارد [۲۱، ۲۹ - ۲۵] که در این مدل‌سازی برابر $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{V.s}$ در نظر

گرفته شده است. برای ضریب پخش مقادیر متفاوتی گزارش شده است [۲۷، ۲۸، ۳۰ و ۳۱] که در اینجا معادل $5.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$

در نظر گرفته شده است. نهایتاً رابطه تجربی "پیک" در تخلیه تاج، که بیانگر شدت میدان الکتریکی در سطح الکتروود مثبت در

هوا در فشار و دمای استاندارد است [۳۲] و با استفاده از رابطه زیر داده می‌شود.

$$E_0 = E_c (1 + 2.62 \times 10^{-7} / \sqrt{R_0}) \quad (8)$$

که در آن $R_0 = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$ شعاع الکتروود تاج (سوزن تخلیه) و $E_c = 3.31 \times 10^6 \text{ V/m}$ اندازه میدان الکتریکی شکست در

هواست.

در اولین قدم شبیه‌سازی، جریان الکتروهایدرودینامیکی ناشی از تخلیه تاج به طور مستقل بررسی می‌شود. به عبارت دیگر فرض

می‌شود که تخلیه تاج درون منبع یونی به تنهایی و بدون هیچ جریان هوای خارجی برقرار باشد. انتظار می‌رود نتیجه شبیه‌سازی،

توزیع یون‌ها و جریان الکتروهایدرودینامیکی ناشی از حرکت یون‌ها را نشان دهد. در واقع این شبیه‌سازی صرفاً جهت تأیید

نتایج به دست آمده از کار تجربی است.

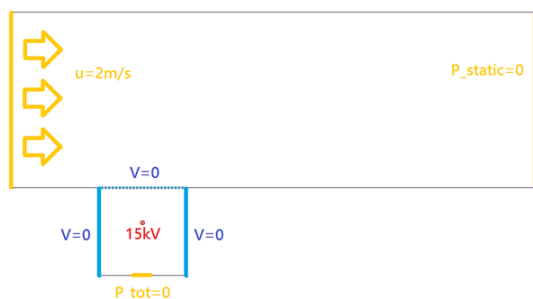
هندسه منبع یونی قبلاً در شکل ۲ نشان داده شده است. برای سهولت در شبیه‌سازی، شکل را به صورت دو بعدی در نظر

گرفته و سوزن درون منبع را با یک نقطه جایگزین و ساده‌سازی می‌کنیم. نهایتاً یک فضای خالی در بالای منبع یون لحاظ می‌شود

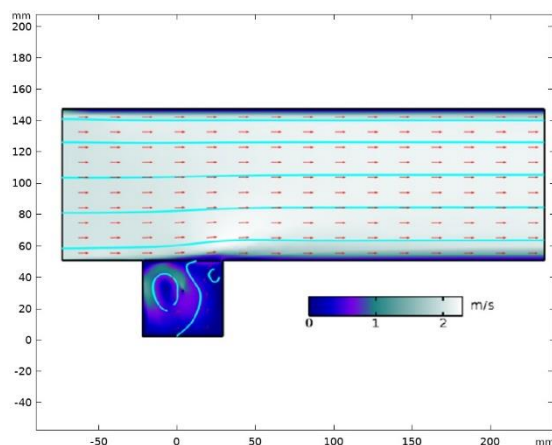
تا نحوه خروج یون‌ها از توری بالایی در میدان شبیه‌سازی دیده

جدول ۲. خلاصه شرایط مرزی به کار رفته در مدل سازی.

موقعیت	شرط مرزی	شرایط مرزی الکتریکی
الکتروود مرکزی	ولتاژ مثبت ۱۵ کیلوولت	$V_p = 15 \text{ kV}$
توری فوقانی و دیواره‌ها	صفر ولت (متصل به زمین)	$V_w = 0$
خروجی هوا	فشار استاتیکی برابر صفر است	$P_{output} : P_{static} = 0$
ورودی هوا	فشار کل صفر است	$P_{input} : P_{total} = 0$

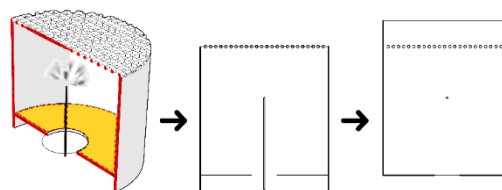


شکل ۹. هندسه و شرایط مرزی الکتریکی و سیالی برای شبیه‌سازی میدان سیال ناشی از حضور منبع یونی در تونل باد.

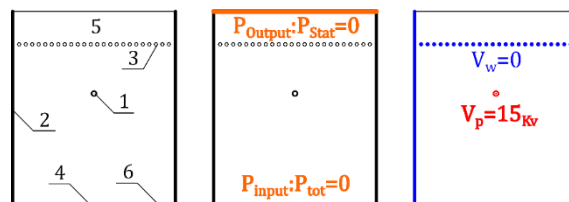


شکل ۱۰. توزیع سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی جریان سیال با حضور منبع یونی در تونل باد.

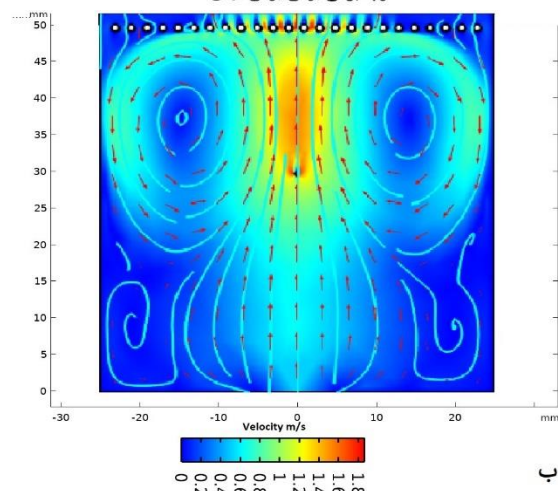
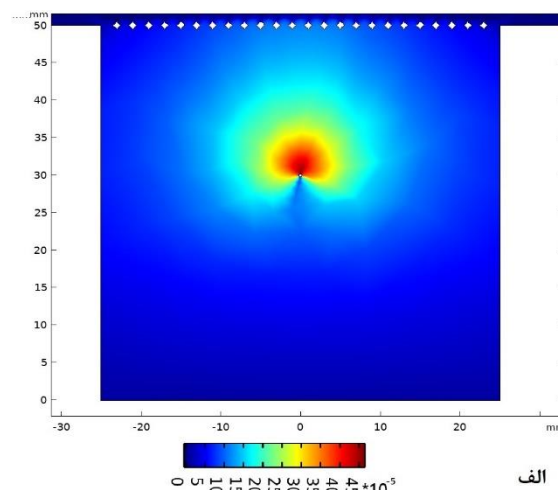
شرایط مرزی نیز با حالت قبل تفاوت چندانی ندارد و تنها یک جریان یکنواخت با سرعت ۲ متر بر ثانیه از سمت چپ به راست برقرار شده است که این مقدار تقریباً معادل متوسط سرعت‌های آزمایش شده به صورت تجربی است. معادلات حاکم بر این مسئله نیز همان معادلات ذکر شده قبلی اند و تفاوتی ندارند.



شکل ۶. هندسه ساده شده منبع یونی به منظور شبیه‌سازی جریان الکترو هیدرودینامیکی.



شکل ۷. اجزای مدل منبع یونی و شرایط مرزی برای شبیه‌سازی جریان الکترو هیدرودینامیکی در آن. در این شکل (۱) الکتروود مثبت یا سوزن تخلیه (۲) دیواره‌های فلزی (۳) توری فلزی (۴) ورودی جریان هوا (۵) فضای خالی در نظر گرفته شده در بالای توری به منظور مشاهده جریان خروجی و (۶) دیواره عایق است.



شکل ۸. نتایج شبیه‌سازی اول شامل (الف) توزیع چگالی بار و (ب) توزیع سرعت هوا.

نتایج شبیه‌سازی دوم که در شکل ۱۰ آورده شده توزیع سرعت هوا در هندسه فوق را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، جریان الکتروهیدرودینامیکی ایجاد شده به واسطه تخلیه تاج هرچند از جریان اصلی برقرار در تونل باد بسیار ضعیف‌تر است، اما روی ضخامت لایه مرزی مجاور دیواره پایینی تأثیر گذاشته و به طور محسوسی ضخامت آن را تغییر داده است.

در آخرین شبیه‌سازی (شکل ۱۱) به منظور کسب نتیجه نهایی می‌خواهیم اثر لایه مرزی و تغییر ضخامت آن به واسطه برخورد جریان الکتروهیدرودینامیکی را روی حرکت یون‌ها مطالعه کنیم. بدین منظور در همان هندسه قبلی یعنی شکل ۹ و میدان سیال به دست آمده در آن (شکل ۱۰)، تعدادی ذره باردار در نظر می‌گیریم که در خروجی منبع یونی قرار دارند.

برهمکنش این ذرات باردار با یکدیگر و با میدان را لحاظ می‌کنیم و حرکت آنها را ردیابی می‌کنیم. در شکل ۱۱ ردیابی ذرات باردار (نقاط رنگی) در تونل باد در بازه‌های زمانی مشخص پس از شروع تخلیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شکل، سرعت جریان اصلی در تونل باد ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین زمان در محدوده $0.095 - 0$ تغییر می‌کند. همانگونه که از این شکل دیده می‌شود، با گذشت زمان یون‌ها از سمت چپ شروع به حرکت کرده و به سمت راست حرکت می‌کنند به طوری که در زمان $t = 0.5$ ، یون‌ها در محدوده $[-25, 25] \text{ mm}$ قرار دارند در حالی که در زمان $t = 0.095$ ، یون‌ها در محدوده $[140, 190] \text{ mm}$ قرار می‌گیرند. نکته دیگری که از این شکل دیده می‌شود این است که بر روی محور قائم یون‌ها در محدوده $[50, 58] \text{ mm}$ قرار دارند. این امر بیانگر آن است که این ذرات در لایه مرزی مجاور دیواره به دام افتاده‌اند و در محدوده لایه مرزی حرکت می‌کنند. همچنین از این شکل اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که سرعت ذرات در محدوده $0.1, 1.8] \text{ m/s}$ قرار دارد. نتیجه به دام افتادن این است که ذرات دیرتر به وجه سمت راست یعنی آشکارساز می‌رسند. ردیابی ذرات باردار نشان می‌دهد که این ذرات با سرعتی کمتر از سرعت یکنواخت سیال به سمت پایین حرکت می‌کنند. در واقع این شبیه‌سازی و از آنجا که سرعت درون لایه مرزی

کمتر از سرعت سیال زمینه است، این ذرات آرام‌تر به سمت پایین حرکت می‌کنند. این پدیده به خوبی عدم تساوی سرعت‌های اندازه‌گیری شده با سرعت‌سنج یونی را تشریح می‌کند و همانطور که گفته شد در آزمایش‌ها نیز مشاهده شده است.

به عبارت دیگر در عمل یون‌های آزاد شده از تخلیه به جای ورود به جریان اصلی، در لایه مرزی حرکت می‌کنند. یک نکته دیگر که از این شکل می‌توان نتیجه گرفت این است که ذرات باردار و سرعت سیال می‌توانند با یکدیگر انرژی مبادله کنند. همانگونه که از شکل ۸ الف دیده می‌شود، در زمان $t = 0.5$ ، اغلب ذرات سرعت‌های کمتر از 1 m/s دارند. ذرات آرام‌تر در سمت راست منبع یونی و ذرات سریع‌تر در سمت چپ منبع یونی قرار دارند. با گذشت زمان، ذرات می‌توانند از جریان باد انرژی کسب کرده و سرعت خود را افزایش دهند. همانگونه که از شکل ۸ د دیده می‌شود اکثر ذرات رنگ قرمز و قهوه‌ای دارند که نشان‌دهنده آن است که ذرات گستره سرعت $[1.6, 1.8] \text{ m/s}$ دارند. در نتیجه ذراتی که به آشکارساز می‌رسد سرعت بیشتری نسبت به زمان صفر دارند. نکته دیگری که باید در نظر داشت این است که آیا تبادل انرژی که در بالا در نظر گرفتیم باعث به وجود آمدن ناپایداری می‌شود یا خیر؟ از آنجایی که تعداد یون‌ها یا به عبارتی چگالی یون‌ها کم بوده و سرعت ذرات نیز کوچک است می‌توان از این ناپایداری‌ها صرف نظر کرد؛ اما همانگونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود با افزایش سرعت ذرات، این تبادل انرژی و بروز ناپایداری می‌تواند اتفاق افتد. نکته نهایی که از این شکل به دست می‌آید این است که آیا بارهای تصویری در اینجا مهم هستند یا خیر؟ باید در نظر داشت که در مسائل الکترواستاتیک در صورتی که یک مرز ترجیحاً رسانا و ذرات باردار داشته باشیم می‌توانیم با حذف مرز رسانا از بارهای تصویری استفاده کنیم و مسائل الکترواستاتیک را حل کنیم. از آنجایی که در مسائل پلاسمایی و جریان آرام بارهای تصویری در نظر گرفته نمی‌شود، در این مقاله از بیان آن صرف نظر می‌کنیم. نهایتاً برای بررسی صحت قطعی این فرض می‌توان از روش‌های تحلیلی استفاده کرد.

آنتن آشکارساز حرکت کرده‌اند. از آنجا که هندسه مسئله ثابت است، می‌توان مسیر یونها را ثابت فرض کرد. منحنی مکان هندسی لایه مرزی آرام به شکل $\delta \approx \sqrt{x}$ است که δ ضخامت لایه مرزی در طول پیشروی آن x را نشان می‌دهد. اگر یونها درون لایه مرزی حرکت کنند می‌توان مسیر طی شده توسط آنها را با معادله $y = \alpha\sqrt{x}$ تقریب زد که α یک ضریب کوچک‌تر از ۱ است و انتظار داریم برای مسیرهای یکسان، برابر باشد.

در یک جریان آرام، کارمن نشان داد که رابطه سرعت هر نقطه در لایه مرزی (u) با سرعت سیال زمینه (U) با استفاده از یک رابطه سهموی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u(x, y) = U \left(\frac{2y}{\delta} - \frac{y^2}{\delta^2} \right), \quad 0 \leq y \leq \delta(x) \quad (9)$$

که δ ضخامت لایه مرزی در طول پیشروی آن است. از رابطه بالا مشخص است که حد بیشینه y برابر δ است. در حد $y \rightarrow \delta$ ، $u(x, y) = U$ و سرعت هر نقطه در لایه مرزی برابر با سرعت سیال زمینه خواهد بود. دقت داشته باشید که $y \rightarrow \infty$ نمی‌تواند وجود داشته باشد؛ چرا که از نظر فیزیکی ضخامت لایه مرزی نمی‌تواند تا بی‌نهایت ادامه داشته باشد. با در نظر گرفتن رابطه انتگرال تکانه و برخی محاسبات ریاضی (روابط ۵-۷ تا ۹-۷ در مرجع ۳۳ را ببینید)، داریم

$$\frac{\delta}{x} = 5 \left(\frac{\nu}{Ux} \right)^{1/2} \quad (10)$$

که در این رابطه، $\nu = \mu / \rho$ ، μ و شکسانی و ρ چگالی است. با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۹)، داریم

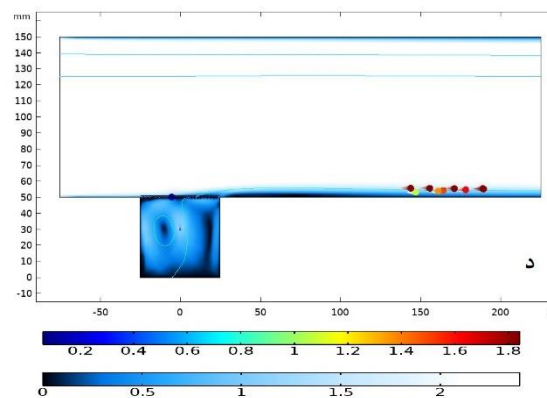
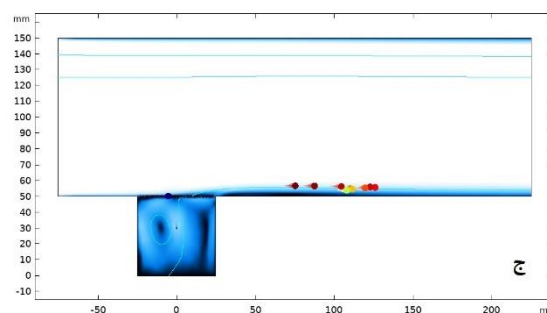
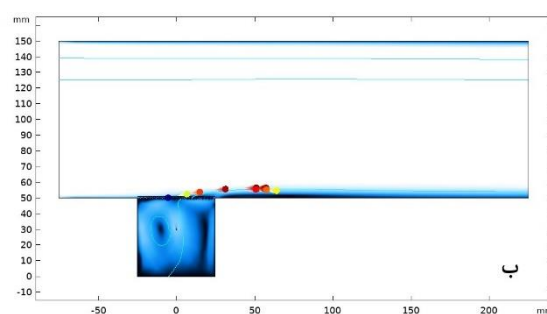
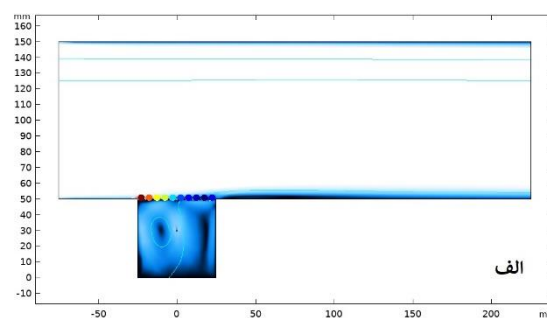
$$u(x, y) = \frac{2y}{5\sqrt{x\nu}} U^{3/2} - \frac{y^2}{25x\nu} U^2 \quad (11)$$

اگر معادله مسیر یعنی $y = \alpha\sqrt{x}$ را در معادله (۱۱) قرار دهیم داریم

$$u(x, y) = 2AU^{3/2} - AU^2 \quad (12)$$

که مقدار $A = \frac{\alpha}{5\sqrt{\nu}}$ تنها به هندسه مسئله α و شکسانی

سینماتیک سیال ν وابسته است و برای تمامی آزمایش‌ها یکسان است.



شکل ۱۱. شبیه‌سازی ردیابی ذرات باردار (نقاط رنگی) در تونل باد در بازه‌های زمانی (الف) $t = 0.5$ s، (ب) $t = 0.3$ s، (ج) $t = 0.09$ s و (د) $t = 0.06$ s پس از شروع تخلیه.

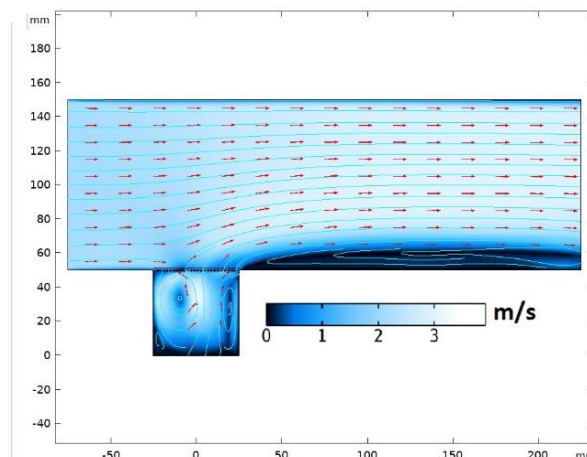
۲.۳. بررسی تحلیلی

بر اساس شواهد موجود در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی، فرض شده است که یونها پس از خروج از منبع یونی، به جای ورود به جریان یکنواخت زمینه در لایه مرزی مجاور دیواره به سمت

بر هم تطابق دارند و داده‌های تجربی در محدوده خطای دستگاه اندازه‌گیری هستند. مقدار سرعت هوا در تونل باد تا ۲/۷ و مقدار سرعت متوسط تا ۰/۷ افزایش می‌یابد. برای مقایسه بهتر بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی، این مقادیر در جدول ۳ آورده شده و مقدار خطای مطلق نیز به دست آمده است. همانگونه که از این جدول دیده می‌شود بیشترین خطایی که در این جدول وجود دارد برابر ۰/۰۴ است که نشان می‌دهد نتایج عملی و تئوری در توافق خوبی با یکدیگر هستند. به عنوان جمع‌بندی، آنگونه که در نمودار فوق دیده می‌شود سرعت‌های اندازه‌گیری شده در بررسی‌های تجربی در واقع سرعت پیمایش یون‌ها در یک مسیر مشخص در لایه مرزی مجاور دیواره بوده است. این پدیده که در نتایج شبیه‌سازی نیز دیده شده و هم اکنون در روابط تحلیلی هم صدق می‌کند، توضیح می‌دهد که چرا سرعت اندازه‌گیری شده توسط این سرعت‌سنج یونی از سرعت واقعی سیال کمتر اما با آن متناسب بوده است و بدین ترتیب اثر لایه مرزی را روی عملکرد جریان‌سنج‌های یونی نشان می‌دهد.

خروج یون‌ها از لایه مرزی با افزایش جریان الکتروهیدرودینامیکی منبع یونی:

اگر منبع یون‌ها بتواند با سرعت بیشتری آنها را به درون جریان اصلی پرتاب کند، ممکن است یون‌ها دیگر تحت تاثیر لایه مرزی قرار نگرفته و بتوانند وارد یک خط جریان از جریان اصلی زمینه شوند. آخرین گام این پژوهش بررسی این فرضیه به وسیله شبیه‌سازی رایانه‌ای است. آخرین گام این پژوهش بررسی این فرضیه به وسیله شبیه‌سازی رایانه‌ای است. در این شبیه‌سازی، تمامی شرایط مشابه شبیه‌سازی‌های قبلی خواهد بود با این تفاوت که فاصله سوزن تخلیه تا توری در منبع یون (شکل ۲ - پارامتر C) کمتر از حالت اولیه و معادل ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. تغییر این کمیت باعث افزایش شدت جریان الکتروهیدرودینامیکی خروجی از منبع یونی شده و موجب پرتاب یون‌ها به درون جریان سیال می‌شود. با این حال شاهد بروز یک ناپایداری دو جریانی و بروز گرداب‌هایی در دنباله مسیر خواهیم بود. این ناپایداری موجب اختلال در میدان سرعت سیال زمینه شده و به منزله اثر تداخلی دستگاه اندازه‌گیری محسوب می‌شود و مطلوب نیست؛ چرا که



شکل ۱۳. شبیه‌سازی برخورد جریان یونی شدید با جریان اصلی.

لذا انتظار داریم که به ازای یک A یکسان در تمامی آزمایش‌ها، سرعت به دست آمده توسط سرعت‌سنج یونی با سرعت جریان یکنواخت سیال زمینه مطابق با رابطه (۱۲) مرتبط باشد. سمت چپ رابطه (۱۲) سرعت در هر نقطه را نشان می‌دهد در حالی که سمت راست رابطه، مختصات مکان یعنی x و y وجود ندارد و این رابطه مستقل از مختصات فضایی است. حال این رابطه را برابر سرعت متوسط در نظر می‌گیریم. در نتیجه داریم

$$\bar{u} = 2AU^{3/2} - A^2U^2 \quad (13)$$

این رابطه نشان می‌دهد که سرعت متوسط و سرعت در هر نقطه با یکدیگر برابرند. لذا می‌توانیم از همین رابطه، برای سرعت متوسط کل مسیر حرکت یون‌ها استفاده کنیم. در این صورت رابطه میان سرعت متوسط طی مسیر با سرعت جریان یکنواخت زمینه مطابق رابطه (۱۳) خواهد بود. با در نظر گرفتن $A = 0.08$ (بر مبنای یکی از داده‌های ثبت شده)، این فرض اثبات می‌شود. در شکل ۱۳ سرعت متوسط بر حسب سرعت جریان زمینه که با بادسنج پروانه‌ای اندازه‌گیری شده است، رسم شده است.

داده‌هایی که با علامت Δ مشخص شده‌اند مقادیری هستند که از رابطه (۱۳) به دست آمده‌اند و داده‌هایی که با علامت \times مشخص شده‌اند مقادیری هستند که از اندازه‌گیری توسط سرعت‌سنج یونی به دست آمده و قبلاً در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. همانگونه که از این شکل دیده می‌شود، با افزایش سرعت هوا در تونل هوا، سرعت متوسط نیز افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود با تقریب خوبی نقاط این دو سری

شبیه‌سازی برای تأیید بیشتر نتایج تجربی انجام شده است؛ هر چند برخی نتایج شبیه‌سازی ممکن است باعث تکمیل شدن کارهای تجربی باشد. در این کار، با استفاده از نتایج تجربی نشان داده شد که هنگامی که یون‌ها در لایه مرزی به دام می‌افتند دیرتر به آشکارساز می‌رسند. این کار با استفاده از شبیه‌سازی نیز مورد تأیید قرار گرفت.

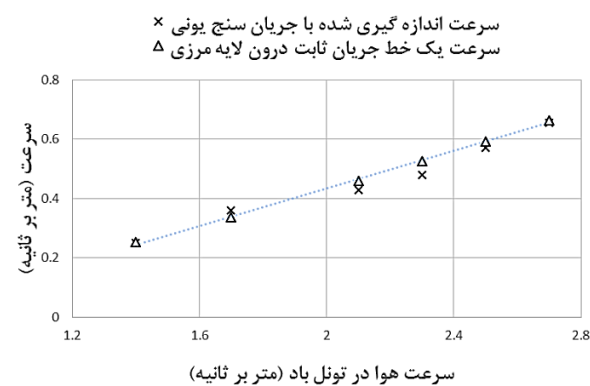
۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی و شبیه‌سازی فرایند اندازه‌گیری سرعت سیال با استفاده از سرعت‌سنج یونی پرداخته شده است. با رهاسازی تعداد مشخصی از یون‌ها از یک تخلیه الکتریکی تاج در مسیر سیال و ردیابی آنها در یک نقطه مشخص، زمان پرواز یون‌ها اندازه‌گیری شده و با تقسیم فاصله بر زمان پرواز، سرعت یون‌ها را که معادل سرعت سیال است به دست آوردیم. داده‌های تجربی یک تناسب مشخص را نشان می‌دهد که بیانگر وجود یک فیزیک پیچیده‌تر است و ضمن مدل‌سازی آشکار می‌شود. در این پژوهش، اثر لایه مرزی هوا بر روی حرکت یون‌های جریان‌سنج یونی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی جریان الکتروهایدرودینامیکی ایجاد شده در خروجی منبع یونی و مدل‌سازی حرکت ذرات باردار در سیال نشان می‌دهد که یون‌های هدف درون لایه مرزی مجاور دیواره به دام افتاده‌اند. لذا با سرعتی آرام‌تر از سرعت سیال زمینه به سمت آشکارساز حرکت می‌کنند. همچنین مشاهده شد که با افزایش زمان، سرعت ذرات برای رسیدن به آشکارساز افزایش یافته که این افزایش ناشی از انرژی باد است. در ضمن دیدیم که زمانی که سرعت هوا در تونل باد و سرعت ذرات افزایش می‌یابد، یک جریان بازگشتی تشکیل شده که باعث کاهش سرعت یون‌ها در داخل پلاسما می‌شود. در نهایت داده‌های تئوری و تجربی در یک جدول ارائه شد و نشان داده شد که بیشترین خطای مطلق برابر ۰/۰۴ است که نشان می‌دهد نتایج عملی و تئوری در توافق خوبی با یکدیگر هستند.

باعث کاسته شدن سرعت یون‌ها و حرکت آنها به سمت آشکارساز می‌شود.

جدول ۳. سرعت هوا در تونل باد، سرعت اندازه‌گیری شده با سرعت‌سنج یونی، سرعت اندازه‌گیری شده با استفاده از شبیه‌سازی کامسول و خطای مطلق.

سرعت اندازه‌گیری شده با استفاده از شبیه‌سازی کامسول (m/s)	سرعت اندازه‌گیری شده با سرعت‌سنج یونی (m/s)	سرعت هوا در تونل باد (m/s)	خطای مطلق
۰/۲۵۳	۰/۲۵۲	۱/۴	۰/۰۰۱
۰/۳۳۶	۰/۳۵۹	۱/۷	۰/۰۲
۰/۴۵۹	۰/۴۲۹	۲/۱	۰/۰۳
۰/۵۲۴	۰/۴۸۰	۲/۳	۰/۰۴
۰/۵۹۳	۰/۵۷۱	۲/۵	۰/۰۲
۰/۶۶۳	۰/۶۵۶	۲/۷	۰/۰۰۷



شکل ۱۲. تطابق داده‌های به دست آمده از جریان سنج یونی با نتایج حاصل از محاسبه سرعت در لایه مرزی.

لذا در کاربردهای عملی جهت حذف اثر لایه مرزی، به جای استفاده از جریان‌های یونی قوی از هندسه‌هایی در نصب منبع یون استفاده می‌شود که جریان یونی در معرض لایه مرزی قرار نگیرد و یون‌ها بتوانند مستقیماً وارد خط جریان یکنواخت زمینه شوند. در نهایت می‌توان اینگونه بیان داشت که در این کار،

مراجع

1. Y P Raizer, J E Allen, "Gas discharge physic", Springer, Germany, (1991).
2. J R Roth, "Industrial Plasma Engineering: Volume 1", Institute of Physics Publishing, England, (1995).
3. F C Lindvall, *Electr. Eng.* **53** (1934) 1068.
4. R F Mettler, "The anemometric application of an electrical glow discharge in transverse air streams", California Institute of Technology, United States, (1949).
5. A Morgan and T Vrebalovich, "Investigation of Direct and Alternating Current Flow Anemometers", California Institute of Technology, United states, (1950).
6. F Werner, *Rev. Sci. Instrum.* **21** (1950) 61.
7. 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, United States, (1953).
8. B Yu, P Yuan, and E Shen, *Measurement*, **112** (2017) 80.
9. B Yu, E Shen, P Yuan, and H Shen, *J. Sens.* **2017** (2017) 1.
10. B Yu, P Yuan, E Shen, and H Shen, *EP J AP* **81** (2018) 30801.
11. G L Mellen, *Electronics* **23** (1950) 80.
12. R Munnikhuisen, *CADO Technical Data Digest* **13** (1948) 7.
13. B Boyd, R G Dorsch, and G H Brodie, "True Airspeed Measurement by Ionization-tracer Technique", NACA R. M. E52C31, United States, (1952).
14. W B Kunkel, and L Talbot, "Ion tracer technique for airspeed measurement at low densities", NACA TN 3177, pp 31, United States, (1954).
15. W C Cooley and H G Stever, *Rev. Sci. Instrum.* **23** (1952) 151.
16. R Bass III, C Gerlach, T Owen, and S Suhler, "Low velocity gas flow measurement Final technical report", No. NASA-CR-103096, United States, (1971).
17. E Evlanov, B Zubkov, D Nenarokov, V Linkin, M Zavjalov, and P Tyuryukanov, *Cosmic Res.* **39** (2001) 453.
18. D Gardiner, G Wang, M Bardon, M Laviolette, and W D Allan, *J Eng Gas Turbine Power* **130** (2008) 042801.
19. B Chua and J J Pak, *SENSOR ACTUATA-PHYS* **224** (2015) 65.
20. P Béquin, V Joly, and P Herzog, *Acta Acust United Acust.* **104** (2018) 477.
21. P Béquin, A Nanda Tonlio, and S Durand, *Appl. Phys. Rev.* **127** (2020) 034502.
22. 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", Wiley-VCH, United States, (2012).
23. F F Chen, "Introduction to plasma physics and controlled fusion", Plenum Press, United States, (1984).
24. Y Guan, R S Vaddi, A Aliseda, and I Novosselov, *Phys. Rev. Fluids* **3** (2018) 043701.
25. L Zhao, and K Adamiak, *Part. Sci. Technol.* **34** (2016) 63.
26. N E Jewell-Larsen, S V Karpov, I A Krichtafovitch, V Jayanty, C -P Hsu, and A V Mamishev, *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics, Paper E, Citeseer* (2008) 1.
27. J S Chang, A J Kelly, and J M Crowley, "Handbook of Electrostatic Processes", Taylor & Francis, United States, (1995).
28. A M Howatson, "An Introduction to Gas Discharges", Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies, Elsevier Science, England, (2013).
29. A Fridman and L A Kennedy, "Plasma Physics and Engineering", Second Edition, Taylor & Francis, United States, (2011).
30. T Maruyama and T Katayama, *J. Appl. Phys.* **94** (2003) 7365.
31. W Jones, D Maidment, and D Morgan, *J. phys. E.* **1** (1968) 623.
32. F W Peek, "Dielectric phenomena in high voltage engineering", McGraw-Hill, United states, (1920).
33. F M White, "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, United States (2011).