

مطالعه پارامترهای دینامیکی گلوله پلاسمایی تولید شده توسط جت هلیوم در حضور گازهای محیطی مختلف

سید سراج الدین رضوی زاده و حمیدرضا قمی مرزدشتی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

پست الکترونیکی: h-gmdashty@sbu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵)

چکیده

در این مقاله پارامترهای دینامیکی یک گلوله پلاسمایی (موج یونیزان هدایت شده) در حضور گازهای اکسیژن، نیتروژن و هوای خشک مورد بررسی قرار می‌گیرد. دینامیک گلوله پلاسمایی تولید شده توسط یک جت پلاسمای هلیوم در فشار اتمسفر با بسامد ۳۰ کیلوهرتز از لحظه خروج از لوله جت تا لحظه نابودی کامل در محیط گازی اطراف آن، توسط یک دوربین فوق سریع (ICCD) ثبت و اندازه‌گیری می‌شود. گلوله پلاسمایی با تأثیرپذیری از گازهای محیطی سرعت، اندازه و طول انتشار متفاوتی در هر کدام از گازهای محیطی دارد. سرعت گلوله پلاسمایی در اکسیژن و هوای خشک بیشتر از نیتروژن است و تا حدود ۱۸ کیلومتر بر ثانیه نیز می‌رسد. بیشترین طول انتشار گلوله پلاسمایی در محیط نیتروژن و هوای خشک با حدود ۱۲ میلی‌متر است. طیف تابشی جت پلاسمای هلیوم نیز جهت بررسی گونه‌های شیمیایی تولید شده در گازهای محیطی مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان دهنده تأثیر گازهای محیطی و به خصوص نقش مولکول‌های اکسیژن بر انتشار گلوله پلاسمایی است.

واژه‌های کلیدی: گلوله پلاسمایی، جت پلاسما، موج یونیزان هدایت شده، دوربین فوق سریع، گاز محیطی، طول انتشار

۱. مقدمه

بسامدهای در محدوده کیلوهرتز به علت سازوکار خاص انتشار خود، که توسط امواج یونیزان هدایت شده معروف به گلوله‌های پلاسمایی منتشر می‌شوند، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند [۴-۷]. از سال ۲۰۰۶ که گلوله‌های پلاسمایی توسط لو و لاروسی [۸] مشاهده شدند، گروه‌های

جت‌های پلاسمایی فشار اتمسفری در سال‌های اخیر به خاطر کاربردهای زیادشان در تیمار سطح، صنایع پزشکی و داروهای زیستی، توسط گروه‌های زیادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱-۳]. در بین جت‌های پلاسمایی، جت‌های هلیوم با

منبع تولید گلوله‌های پلاسمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این جت پلاسمایی در محفظه‌ای که با گازهای محیطی از جنس اکسیژن، نیتروژن و هوای خشک پر شده است، قرار می‌گیرد. برای بررسی پارامترهای مکانیکی گلوله پلاسمایی، از یک دوربین فوق سریع ICCD برای عکس برداری در فواصل زمانی نانو ثانیه استفاده می‌شود. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل سرعت، قطر گلوله و طول انتشار آنها است.

۲. چیدمان آزمایشگاهی

برای تولید گلوله‌های پلاسمایی، یک جت پلاسمای هلیوم در فشار اتمسفر با بسامد ۳۰ kHz سینوسی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات این جت پلاسمای در شکل ۱ نشان داده شده است. قطر لوله جت پلاسمایی ۲/۵ میلی‌متر و از جنس پیرکس است و در داخل آن یک الکتروود توخالی ولتاژ بالا قرار دارد که جریان گاز هلیوم با عبور از داخل این الکتروود وارد لوله جت می‌شود. منبع تغذیه مورد استفاده در این آزمایش، یک منبع ولتاژ بالای دست ساز سینوسی با بیشینه ولتاژ ۲ kV است که به الکتروود ولتاژ بالا در مرکز جت پلاسمای متصل شده است. در خارج از لوله جت و در فاصله ۵ میلی‌متری از الکتروود ولتاژ بالا، یک حلقه مسی به عنوان الکتروود زمین دور لوله جت متصل شده است. فاصله الکتروود زمین با دهانه جت نیز ۱۲ میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان از یک اسپلوسکوپ مدل Teledyne lecroy wavejet touch354 استفاده شد.

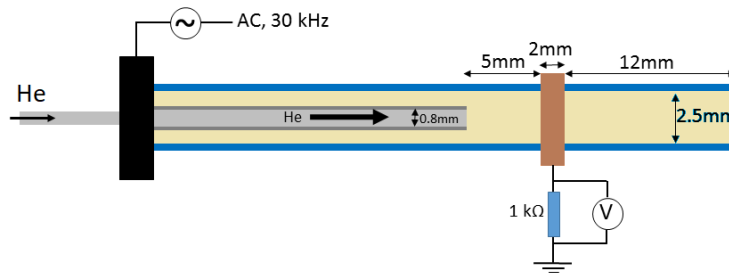
برای قرار دادن جت پلاسمای در محیط‌های گازی متفاوت، یک محفظه شیشه‌ای استوانه‌ای با حجم ۱ لیتر مورد استفاده قرار گرفت. این محفظه دارای دو پنجره اپتیکی از جنس کوارتز در دو طرف دارد، که امکان تصویر برداری یا طیف نگاری از شعاع جت پلاسمای را مهیا می‌سازد. گاز محیطی مورد استفاده در هر آزمایش، از ده دقیقه قبل از شروع آزمایش از طریق ورودی پایین محفظه، با جریان ۲۰۰۰ sccm وارد آن می‌شود و هوای موجود در محفظه به همراه گاز محیطی از خروجی بالای محفظه خارج می‌شود. این فرایند باعث می‌شود که رفته رفته غلظت گاز محیطی در داخل

زیادی در سراسر دنیا به بررسی و مطالعه خواص و سازوکار انتشار گلوله‌های پلاسمایی پرداخته‌اند [۹]. مطالعات انجام گرفته بر روی جت‌های پلاسمایی بیشتر در هوای اتمسفری انجام شده است و چون ترکیبات موجود در هوا بسیار زیاد هستند مطالعه اثر جزء به جزء این ترکیبات بر انتشار گلوله‌های پلاسمایی کاری بسیار دشوار است [۱۰].

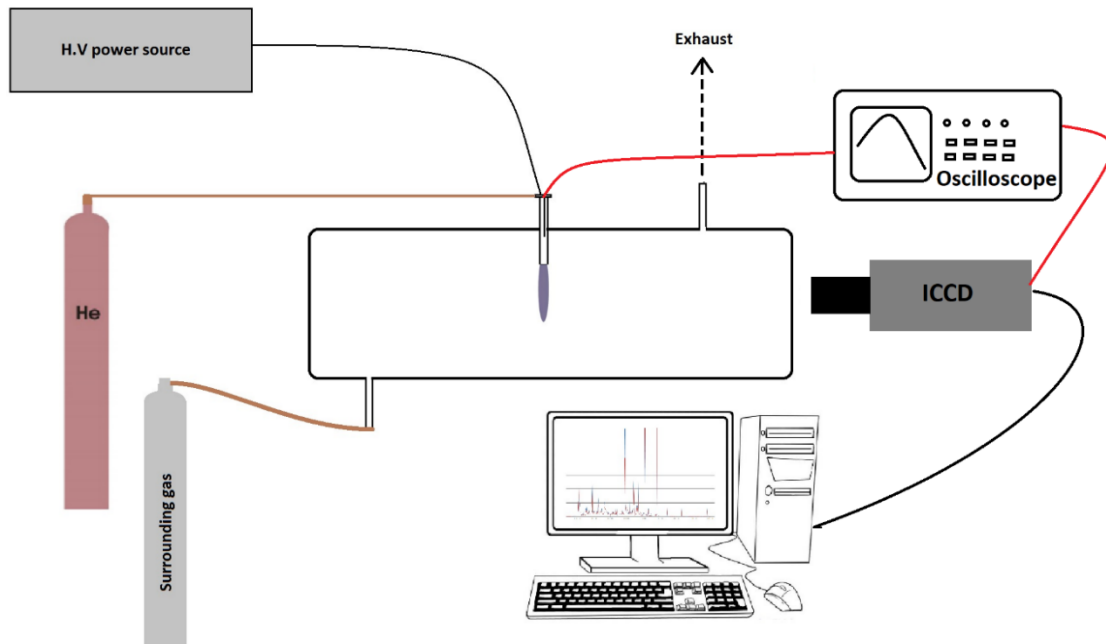
گلوله‌های پلاسمایی که توسط جت هلیوم تولید می‌شود، قابلیت انتشار در گازهای محیطی دیگری به غیر از هوا را نیز دارد. اثرات این گازهای محیطی بر نحوه انتشار گلوله‌های پلاسمایی توسط گروه‌های تحقیقاتی زیادی بررسی شده است [۱۱-۱۵]. در بعضی از تحقیقات انجام شده از روش گاز محافظ برای پوشاندن گاز هلیوم خارج شده از دهانه جت استفاده می‌شود [۱۲]. در تعداد دیگری از تحقیقات جت هلیوم را وارد محفظه‌ای می‌کنند که قبلاً با یک گاز زمینه پر شده است [۱۱-۱۴]. ژیان و همکاران نشان داده‌اند که با افزایش غلظت گاز اکسیژن، چگالی الکترون‌های زمینه کاهش پیدا می‌کند و طول جت نیز کم می‌شود بلکه همکاران اثر الکترون‌گاتیوی گاز محافظ را هم به صورت تجربی و هم نظری بررسی کرده‌اند. آنها با استفاده از ترکیب گاز نیتروژن و اکسیژن، اثر یون‌های الکترون‌گاتیو را بر روی انتشار گلوله‌های پلاسمایی مطالعه کرده‌اند. آکمان و همکاران وجود لایه مرزی بین ستون هلیوم و گاز محیطی را برای انتشار گلوله پلاسمایی ضروری دانسته‌اند [۱۲]. ترکیب گازهای نیتروژن و اکسیژن در لایه مرزی نقش مهمی در انتشار گلوله پلاسمایی دارد.

یونش نوری پدیده مهم دیگری است که مستقیماً به غلظت مولکول‌های نیتروژن و اکسیژن در گاز محیطی بستگی دارد. تحقیقات بسیاری به بررسی نقش یونش نوری در انتشار تخلیه استریم‌های مثبت پرداخته‌اند [۱۶ و ۱۷] و گلوله‌های پلاسمایی از منظر نحوه انتشار تشابه بسیاری به تخلیه استریم‌های مثبت دارند [۱۰]. بردن و همکاران انتشار گلوله‌های پلاسمایی را با و بدون یونش نوری شبیه‌سازی کرده‌اند و ثابت کرده‌اند که بدون یونش نوری گلوله‌های پلاسمایی سرعت کمتری دارند [۱۸].

در این تحقیق یک جت پلاسمایی با گاز هلیوم به عنوان



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مشخصات هندسی جت پلاسمای هلیوم مورد استفاده برای تولید گلوله پلاسمایی.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره چیدمان اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی گلوله پلاسمایی در گازهای محیطی مختلف توسط دوربین فوق سریع (ICCD).

مخلوط همگنی در داخل محفظه به وجود بیاید. خلوص گاز هلیوم مورد استفاده برای جت پلاسمای ۹۹٫۹۹۹٪ و خلوص نیتروژن و اکسیژن مورد استفاده برای گاز محیطی ۹۹٫۹٪ است. میزان جریان گاز هلیوم در این آزمایش از ۷۰۰ sccm تا ۱۰۰۰ sccm تغییر می‌کند. برای ثبت تصاویر گلوله پلاسمایی که سرعت‌های بسیار بالایی در حد کیلومتر بر ثانیه دارند، از یک دوربین فوق سریع ICCD مدل 4 Quik Edig استفاده شده است. زمان نوردهی تصاویر ثبت شده ۱۰ ns و فاصله زمانی بین تصاویر نیز ۱۰۰ ns است. برای تصویربرداری از گلوله پلاسمایی باید زمان ثبت هر عکس با عکس‌های قبلی و بعدی هماهنگ و در یک لحظه یکسان اتفاق بیفتد؛ به همین منظور لحظه عکاسی

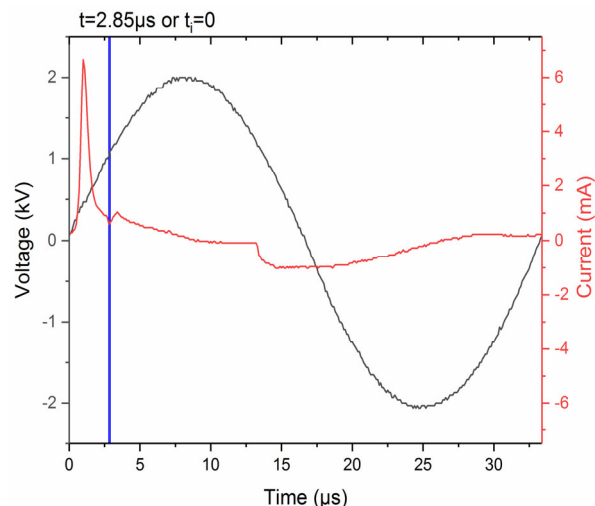
محفظه افزوده شده و سایر گازهای داخل محفظه به تدریج از آن خارج شوند. میزان جریان گازهای ورودی به محفظه با یک دستگاه کنترل جرمی گاز مدل ۵۸۵۰ Brooks اندازه‌گیری شده است. شکل ۲ نمای چیدمان این آزمایش را به همراه ورودی و خروجی گاز محیطی نشان می‌دهد. گاز هلیوم نیز با جریان‌های مختلف از طریق لوله جت وارد محفظه می‌شود و در نهایت از طریق خروجی محفظه از آن خارج می‌شود. گاز هلیوم در داخل محفظه با گاز محیطی مخلوط می‌شود. برای داشتن یک محیط گازی همگن در اطراف شعله جت پلاسمای در داخل محفظه، جریان گاز هلیوم ۵ دقیقه قبل از شروع آزمایش از طریق لوله جت وارد محفظه می‌شود تا با گذشت زمان، قبل از اعمال جریان به الکتروود ولتاژ بالا،

۳. نتایج

گلوله‌های پلاسمایی حدود ۱۲ میلی‌متر در داخل لوله حرکت کرده و پس از خارج شدن از دهانه جت وارد ستون هلیوم دمیده شده در گاز محیطی می‌شوند. شکل ۴ تصویر یک گلوله پلاسمایی را از لحظه خارج شدن از دهانه جت تا لحظه ناپدید شدن آن در محیط اطراف، که هوای خشک است، نشان می‌دهد. این شکل تلفیق ۸ تصویر مختلف است که در فاصله زمانی ۱۰۰ نانوثانیه از یکدیگر ثبت شده‌اند. با توجه به میزان درخشندگی گلوله پلاسمایی، زمان نوردهی ۱۰ نانوثانیه برای جلوگیری از اشباع دوربین انتخاب شده است.

گلوله پلاسمایی در زمان ۴۰۰ نانوثانیه بیشترین درخشندگی را دارد و حد تعیین اشباع دوربین فوق سریع نیز بر اساس شدت نور در همین لحظه است.

جت پلاسمایی و منبع تغذیه استفاده شده در این آزمایش دقیقاً مشابه مقالات المار و همکاران [۱۹ و ۲۰] است و میزان بار حمل شده توسط این گلوله پلاسمایی قبلاً توسط این گروه اندازه‌گیری شده است. اندازه بار حمل شده توسط این گلوله پلاسمایی در محیط هوا توسط روش پلاریمتری در حدود 350 pC به دست آمده است. همچنین این گلوله‌های پلاسمایی چون در نیم دوره مثبت ولتاژ AC تولید می‌شوند بار مثبت دارند [۲۰]. با توجه به این اعداد می‌توان میزان جریان الکتریکی هنگام عبور هر گلوله پلاسمایی را در حدود 1.7 mA برآورد کرد که با میزان اندازه‌گیری شده در الکتروود زمین به خوبی تطابق دارد. چگالی بار زمینه پشت گلوله نیز که به ستون تاریک معروف است در نیم دوره مثبت ولتاژ AC دارای بار الکتریکی مثبت و در نیم دوره منفی دارای بار منفی است [۱۲]. رفتار گلوله پلاسمایی در گازهای محیطی مختلف تا حدودی متفاوت است. شکل ۵ تصویر گلوله پلاسمایی را در زمان 400 ns پس از خروج از دهانه جت و ورود به سه گاز محیطی مختلف را نشان می‌دهد. درخشندگی گلوله پلاسمایی در گاز اکسیژن کمترین میزان خود را دارد و بعد از آن نیتروژن و بیشترین شدت نور هم در هوای خشک وجود دارد. همان طور که از شکل ۵ نیز نمایان است طولی که گلوله پلاسمایی در زمان یکسان طی می‌کند در گازهای مختلف

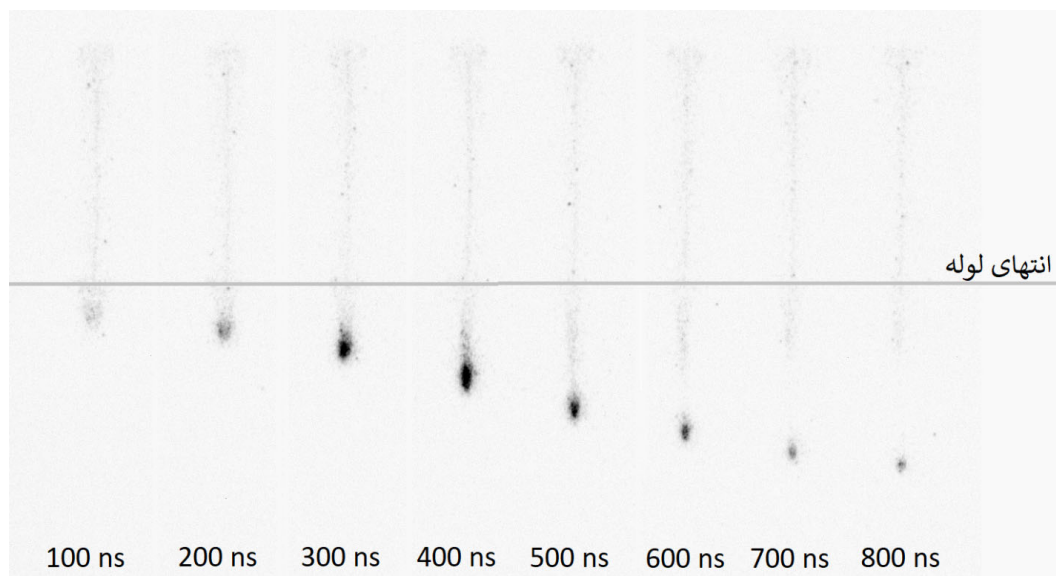


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار مشخصه ولتاژ-جریان مربوط به جت پلاسمایی. خط آبی رنگ لحظه عبور گلوله پلاسمایی از مقابل الکتروود زمین است.

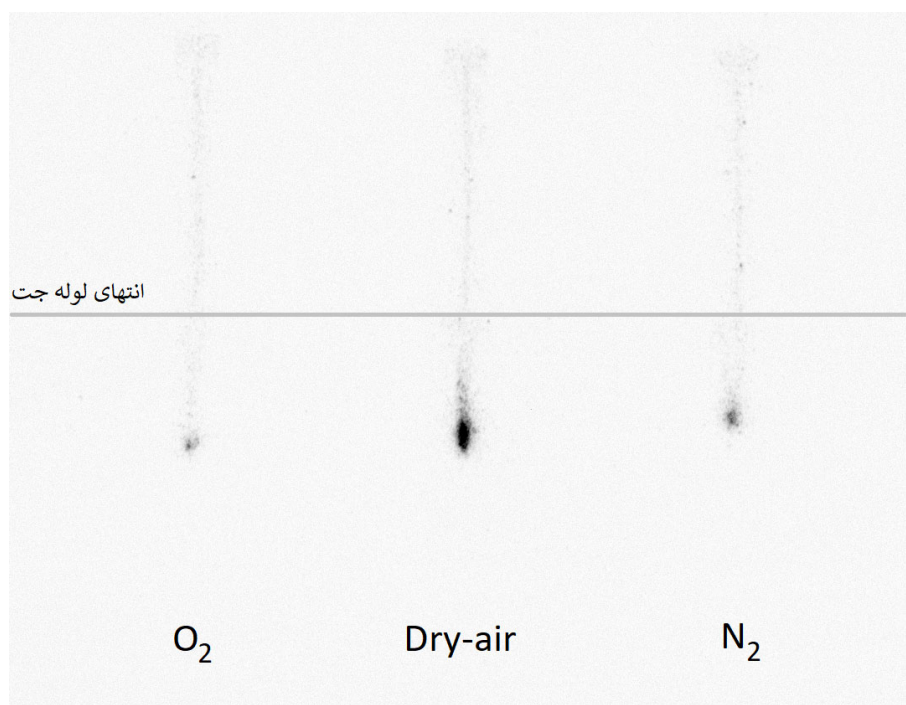
باید توسط سازوکار ماشه خارج از دوربین تعیین شود. از پالس‌های جریانی که از الکتروود زمین به یک دستگاه اوسیلوسکوپ وارد می‌شود برای تنظیم لحظه عکاسی استفاده شده است. با استفاده از این تصاویر و ابعاد لوله جت پلاسمایی می‌توانیم پارامترهایی نظیر سرعت، ابعاد و فاصله طی شده توسط هر گلوله پلاسمایی را از لحظه شکل‌گیری تا لحظه پایانی محاسبه کرد.

نمودار تغییرات ولتاژ و جریان جت پلاسمایی در یک دوره کامل پالس ولتاژ که حدود $33 \mu\text{s}$ است در شکل ۳ نشان داده شده است. لحظه عبور گلوله پلاسمایی در داخل لوله جت از مقابل الکتروود زمین که برابر با $2.85 \mu\text{s}$ است، توسط خط آبی رنگ نشان داده شده است. از این زمان به عنوان مبدأ تصویربرداری برای ثبت مکان گلوله پلاسمایی در لحظات دیگر استفاده می‌شود.

طیف تابشی جت هلیوم در گازهای محیطی مختلف توسط دستگاه طیف سنج AVANTES AvaSpec2048TEC در مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری طیف تابشی یکی از پنجره‌های محفظه از جنس کوارتز ساخته شده است تا طیف ناحیه فرابنفش نیز ثبت شود. فیبر اپتیکی دستگاه طیف سنج در فاصله نیم سانتی‌متری در بیرون پنجره کوارتز قرار گرفته است.



شکل ۴. نحوه انتشار گلوله پلاسمایی خارج شده از دهانه جت هلیوم در محیط گازی هوای خشک. زمان نوردهی هر تصویر ۱۰ نانوثانیه و فاصله بین تصاویر ۱۰۰ نانوثانیه است.

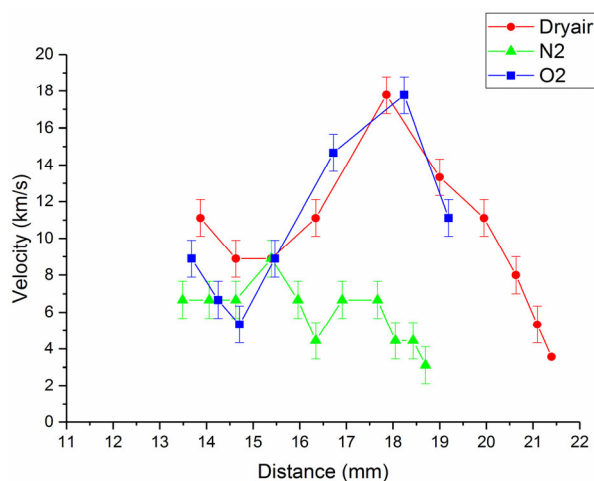


شکل ۵. تصویر ثبت شده توسط دوربین فوق سریع از گلوله پلاسمایی در محیط‌های گازی مختلف. زمان تصاویر ۴۰۰ نانوثانیه پس از لحظه خروج از دهانه جت است.

سرعت را دارد. سرعت گلوله پلاسمایی در گازهای اکسیژن و هوای خشک تقریباً برابر است. سرعت متوسط گلوله پلاسمایی در نیتروژن حدود $6/1 \text{ km/s}$ و در اکسیژن حدود 9 km/s است.

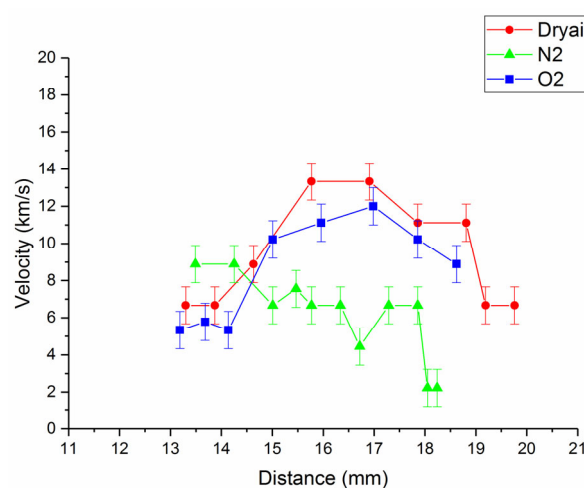
سرعت گلوله پلاسمایی برای جریان گاز هلیوم

کاملاً متفاوت است، که نشانگر تغییر سرعت گلوله پلاسمایی در گازهای مختلف دارد. سرعت گلوله پلاسمایی در گازهای مختلف در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. در شکل ۶ میزان جریان گاز هلیوم 700 sccm است. همان طور که مشاهده می‌شود، گلوله پلاسمایی در گاز نیتروژن کمترین



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سرعت گلوله پلاسمایی در محیط‌های گازی مختلف در خارج از دهانه جت. سرعت جریان گاز هلیوم ۸۰۰ sccm است.

محیطی تغییر می‌کند. شکل ۸ طول انتشار گلوله‌های پلاسمایی را برای جریان‌های گاز هلیوم از حدود ۷۰۰ sccm تا ۱۰۰۰ sccm در سه محیط گازی نیتروژن، اکسیژن و هوای خشک نشان می‌دهد. جت پلاسمایی بیشترین طول را در هوای خشک برای تمام جریان‌های هلیوم دارد و کمترین طول جت نیز مربوط به گاز محیطی اکسیژن است. برای گاز محیطی نیتروژن، طول جت در جریان‌های هلیوم بیشتر از ۹۰۰ sccm افزایش چشمگیری دارد و بیشترین طول جت نیز با حدود ۱۲ mm متعلق به همین محیط گازی نیتروژن است. همچنین افزایش طول جت با افزایش جریان گاز هلیوم که قبلاً نیز گزارش شده بود [۲۴] در تمامی گازها اتفاق می‌افتد. قطر گلوله‌های پلاسمایی پس از خروج از دهانه لوله جت شروع به کوچک شدن می‌کند و این اتفاق در محیط‌های گازی مختلف نیز مشاهده می‌شود، که در شکل ۴ نیز به خوبی نشان داده شده است. شکل ۹ قطر متوسط گلوله پلاسمایی در محیط‌های گازی نیتروژن، اکسیژن و هوای خشک نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود رابطه خاصی بین گاز محیطی و قطر متوسط گلوله وجود ندارد و می‌توان گفت که قطر گلوله بیشتر از پارامترهای خود جت مانند قطر دهانه، جنس دی‌الکتریک و میزان و شکل ولتاژ منبع تغذیه تأثیر می‌پذیرد که در این آزمایش‌ها ثابت بوده‌اند. قطر متوسط گلوله پلاسمایی بین ۰٫۵ mm تا ۰٫۶۵ mm است.

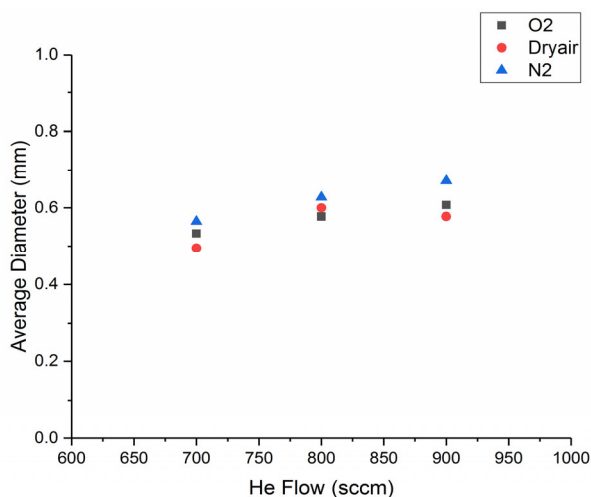


شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سرعت گلوله پلاسمایی در محیط‌های گازی مختلف در خارج از دهانه جت. سرعت جریان گاز هلیوم ۷۰۰ sccm است.

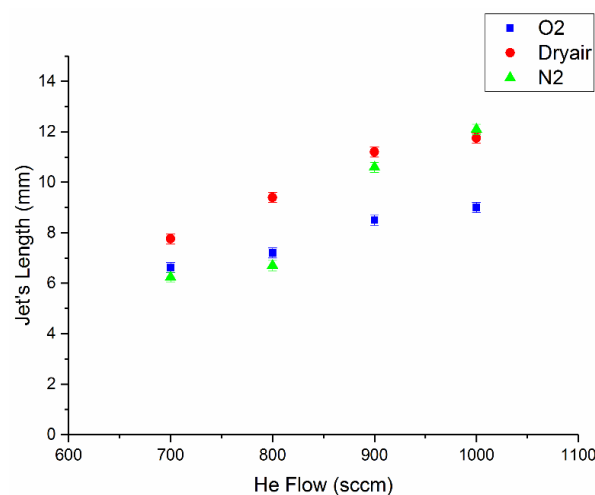
۸۰۰ sccm و در محیط نیتروژن کمتر از اکسیژن و هوای خشک می‌باشد. سرعت متوسط گلوله در گاز نیتروژن ۵٫۸ km/s و در اکسیژن ۱۱ km/s است. طبق این نمودارهای سرعت باید گفت که غلظت بیشتر گاز اکسیژن در محیط اطراف ستون هلیوم باعث افزایش سرعت گلوله‌های پلاسمایی می‌شود.

به طور کلی سرعت گلوله‌های پلاسمایی مشاهده شده در تحقیقات گذشته در محدوده ای از ۱ تا ۱۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه متغیر بوده است [۱۰]. در ساختار خاص جت پلاسمایی مورد استفاده در این آزمایش به علت جنس تطابق خوبی الکترونیک لوله جت و چیدمان خاص الکتروود در میانه لوله جت، فروشکست از میانه لوله جت شروع شده و سپس به سطح داخلی لوله گسترش می‌یابد و در انتها این موج یونش، به ستون هلیوم وارد شده به گاز محیطی، گسترش می‌یابد [۲۱]. سرعت گلوله پلاسمایی تا حد زیادی به ساختار هندسی جت پلاسمایی، نوع دی‌الکتریک به کار رفته در آن و میدان الکتریکی داخل لوله جت وابسته است و با بالا رفتن ضریب دی‌الکتریک، سرعت گلوله پلاسمایی کاهش می‌یابد [۲۲]. محدوده سرعت به دست آمده در این تحقیق تطابق با آزمایش‌های قبلی که از همین نوع جت پلاسمایی استفاده شده تطابق خوبی، دارد [۲۳].

طول انتشار گلوله‌های پلاسمایی نیز تحت تأثیر گازهای



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قطر متوسط گلوله پلاسمایی در محیط‌های گازی متفاوت به ازای جریان‌های مختلف هلیوم.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طول جت پلاسمای (طول انتشار گلوله پلاسمایی) به ازای جریان‌های مختلف هلیوم دمیده شده در محیط‌های گازی متفاوت.

دارند که کاملاً قابل انتظار است. اما نکته قابل توجه میزان کاهش طول موج O-H ۳۰۹ نانومتر در محیط اکسیژن است. علت این کاهش را می‌توان به کاهش تعداد الکترون‌های پرنرژی در محیط گازی اکسیژن نسبت داد. افزایش غلظت اکسیژن که گازی کاملاً الکترون خوار است باعث کاهش تعداد الکترون‌های پرنرژی و در نتیجه کاهش تولید گونه O-H می‌شود.

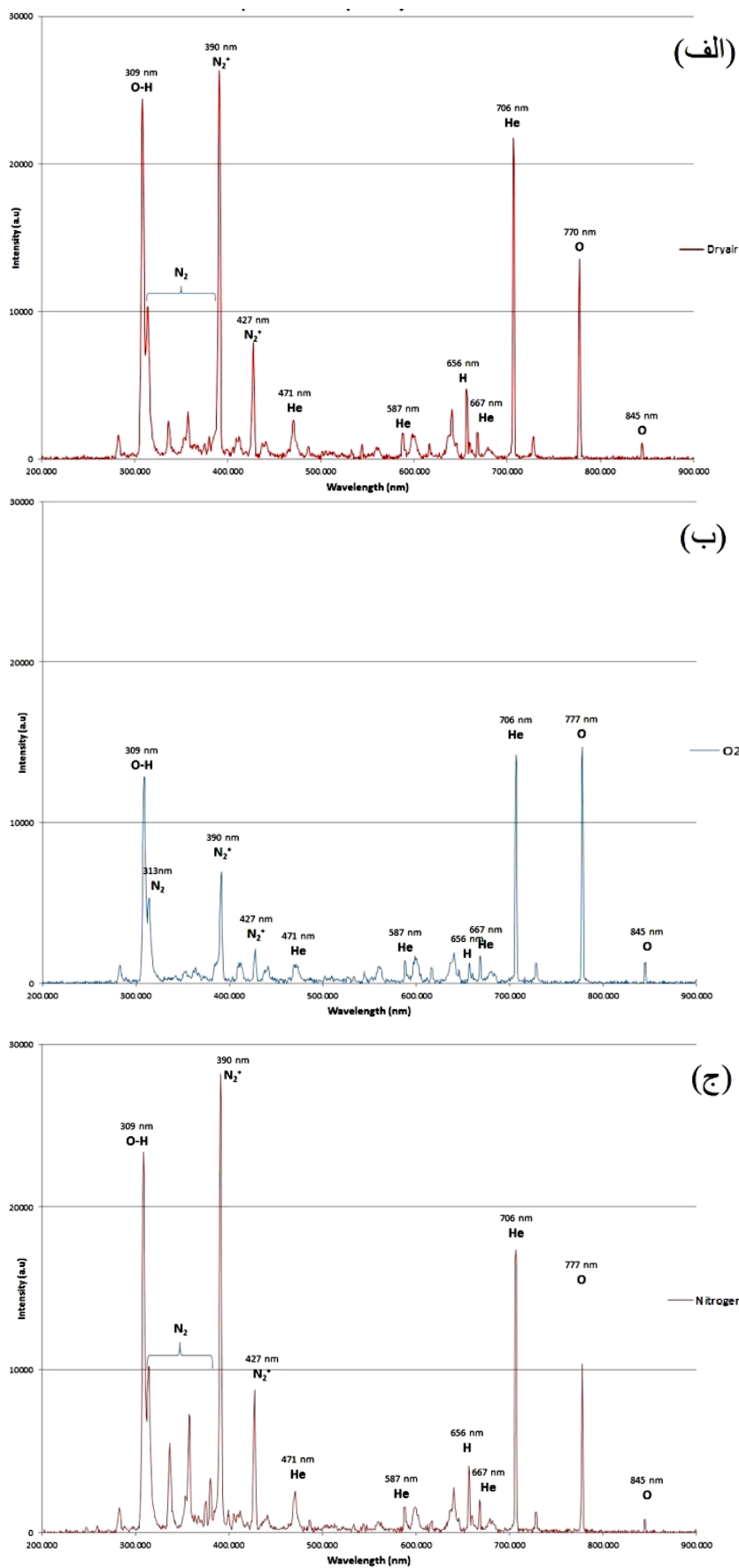
۴. بحث

دو نتیجه بسیار مهم این تحقیق یکی سرعت بیشتر گلوله‌های پلاسمایی در گازهای محیطی حاوی اکسیژن، و دیگری طول انتشار کمتر گلوله‌های پلاسمایی در محیط اکسیژن است. سرعت گلوله‌های پلاسمایی در گازهایی که مولکول‌های اکسیژن حضور دارند تفاوت قابل توجهی با گازی مثل نیتروژن دارد که اکسیژن در آن حضور ندارد. همان‌طور که مشخص است اکسیژن نقش قابل توجهی در انتشار گلوله‌های پلاسمایی دارد. برای توضیح این نتایج باید به نقش اکسیژن در فرایند یونش نوری و اثر آن در انتشار تخلیه استریمرها پرداخت. گلوله‌های پلاسمایی یا همان امواج یونیزان هدایت شده در نحوه انتشار و شکل‌گیری تشابه بسیار زیادی به تخلیه استریمرها دارند [۱۰]. یونش نوری نقش مؤثری در انتشار تخلیه تخلیه استریمرها مثبت در گازهای

طیف تابشی جت پلاسمای نیز جهت بررسی بیشتر سازوکار انتشار گلوله پلاسمایی در گازهای محیطی مختلف اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۰ الف، طیف تابشی جت هلیوم در محیط هوای خشک نشان داده شده است. گونه‌های شیمیایی تولید شده نیز بر روی هر طول موج مشخص شده است. طیف تابشی جت هلیوم در محیط گازی اکسیژن و نیتروژن نیز در (شکل ۱۰ ب و ج) و به ترتیب نشان داده شده‌اند.

طیف تابشی جت هلیوم در حضور هوای خشک کاملاً مشابه طیف تابشی جت هلیوم در هوای معمولی است و وجود بخار آب هم کاملاً در محفظه مشخص است [۲۵]. علت وجود طیف O-H به خاطر برخورد الکترون‌های پرنرژی با مولکول‌های بخار آب موجود در محفظه است [۲۶]. همان‌طور که از طیف تابشی جت هلیوم در گاز نیتروژن (شکل ۱۰ ج) مشخص است مقداری اکسیژن و بخار آب در داخل محفظه باقی مانده است و همچنین این ناخالصی‌ها در آزمایش گاز محیطی اکسیژن نیز مشاهده می‌شود و در شکل ۱۰ ب تابش نیتروژن و O-H و هیدروژن کاملاً مشخص است. طیف تابشی جت در هوای خشک و نیتروژن بسیار به یکدیگر نزدیک است و تفاوت عمده در شدت تابش اکسیژن ۷۷۷ نانومتر است که حدود ۶۰ درصد در هوای خشک بیشتر است.

طیف تابشی جت هلیوم در اکسیژن تفاوت زیادی از نظر میزان شدت طول موج‌های اکسیژن و نیتروژن با یکدیگر



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف تابشی جت هلیوم در فشار اتمسفری در حضور گاز محیطی، (الف) هوای خشک، (ب) اکسیژن و (ج) نیتروژن.

از ستون پلاسما در محیط تولید شده‌اند به وجود می‌آیند. کاهش طول جت یا همان طول انتشار گلوله‌های پلاسمایی نیز به صورت مستقیم با افزایش درصد گاز اکسیژن رابطه مستقیم دارد. علت کاهش طول انتشار به خاصیت الکترونگاتیوی اکسیژن مربوط می‌شود. مولکول‌های اکسیژن وارد شده به ستون هلیوم، الکترون‌های باقیمانده از تخلیه در کانال تاریک را در هر دوره پالس ولتاژ جذب کرده و باعث کم شدن چگالی الکترون‌های ضمیمه می‌شوند [۱۱].

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر گازهای محیطی مختلف بر یک جت پلاسمای هلیوم با استفاده از چیدمان طراحی شده در فشار اتمسفری مورد آزمایش قرار گرفت. سه گاز محیطی مختلف شامل اکسیژن، نیتروژن و هوای خشک به عنوان گازهای محیطی مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از یک دوربین فوق سریع ICCD، تصویر برداری از گلوله‌های پلاسمایی در فواصل زمانی ۱۰۰ ns و نوردهی ۱۰ ns انجام شد و پارامترهای دینامیکی گلوله‌های پلاسمایی توسط این تصاویر محاسبه شد. سرعت گلوله‌های پلاسمایی در گازهای محیطی حاوی اکسیژن افزایش می‌یابد و از طرفی به علت خاصیت الکترونگاتیوی اکسیژن طول انتشار جت کاهش می‌یابد. افزایش سرعت گلوله‌ها از طریق فرایند یونش نوری انجام می‌شود و بیشینه این سرعت حدود ۱۸ کیلومتر بر ساعت به دست آمد.

حاوی اکسیژن دارد. فوتون‌های فرابنفش تابش شده از مولکول‌های نیتروژن که انرژی بیشتری نسبت به انرژی یونش اکسیژن دارند به راحتی قادر به یونش مولکول‌های اکسیژن هستند [۱۶]. تخلیه استریم‌های مثبت در گازهای با درصد اکسیژن بالاتر به علت یونش نوری، با سرعت بیشتری منتشر می‌شوند [۲۷].

نقش یونش نوری در انتشار گلوله‌های پلاسمایی به صورت تئوری نیز بررسی شده است [۱۸]. در مدل شبیه‌سازی شده توسط بردن، عدم وجود یونش نوری باعث کاهش قابل توجه سرعت گلوله‌های پلاسمایی شده است. سطح مقطع یونش نوری برای گازهای مختلف در سال ۱۹۷۰ توسط توماس و همکاران [۲۸] بررسی شد. سطح مقطع یونش نوری در طول موج‌های بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر برای اکسیژن نسبت به گازهای نیتروژن و کربن حدود دو برابر بیشتر است. پس فوتون‌های تابش شده از ترازهای مولکول نیتروژن که بیشتر در محدوده ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر قرار دارند بیشتر می‌توانند مولکول‌های اکسیژن را یونیزه کنند و الکترون‌های زمینه بیشتری برای انتشار هر چه سریع‌تر گلوله پلاسمایی فراهم نمایند.

اما یونش نوری تنها دلیل افزایش سرعت گلوله‌های پلاسمایی نیست. جدا شدن الکترون از یون‌های منفی اکسیژن در نیمه مثبت دوره ولتاژ نیز می‌تواند الکترون‌های زمینه زیادی را برای شتاب‌گیری به سمت سر گلوله پلاسمایی و یونش بیشتر محیط مقابل آن فراهم کند [۱۲]. یون‌های منفی اکسیژن از جذب الکترون‌های کم انرژی محیط که توسط یونش نوری یا پراکندگی

مراجع

- Korzec and J Engemann, *Plasma Sci.c* **33** (2005) 310.
- E Karakas, M A Akman, and M Laroussi, *Plasma Sources Science and Technology*. **21**, 3 (2012) 034016.
- SN Siadati, F Sohbatzadeh, and SK Alavi, Electrical and optical investigations of plasma bullets driven by different. *Physica Scripta*. **90**, 8 (2015) 085602.
- X Lu and M Laroussi, *J. Appl. Phys.* **100** (2006) 063302.
- X Lu, M Laroussi and V Puech, *Plasma Sources Science and Technology* **21** (2012) 034005
- X Lu, G V Naidis, M Laroussi and K Ostrikov, *Phys.*
- G Fridman, G Friedman, A Gutsol, A B Shekhter, V N Vasilets and A Fridman, *Applied plasma medicine Plasma Processes and Polymers* **5** (2008) 503.
- M Laroussi, *Plasma Sci.* **37** (2009) 714–25
- M Laroussi, *Plasma Sci.* **43** (2015) 703.
- F Sohbatzadeh, M Bagheri, and S Motallebi, *Iran. J. Phys. Res.* **16**, 4 (2017) 291.
۴. ف صحبت‌زاده، م باقری و س مطلبی، مجله پژوهش فیزیک ایران **۱۶** (۱۳۹۵) ۲۹۱.
- M Teschke, J Kedzierski, E G Finantu-Dinu, D

- Sobota, Charge transfer to a dielectric target by guided ionization waves using electric field measurements *Plasma Sources Science and Technology* **26** (2017) 035002.
21. GB Sretenović, O Guaitella, A Sobota, IB Krstić, VV Kovačević, BM Obradović, MM Kuraica, Electric field measurement in the dielectric tube of helium atmospheric pressure plasma, *Journal of Applied Physics*. 2017 Mar 28;121(12):123304.
 22. Z Xiong, E Robert, V Sarron, J-M Pouvesle, and M J Kushner, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** (2012) 275201.
 23. A Sobota, O Guaitella, and A Rousseau, *Plasma Sources Science and Technology* **23** (2014) 025016.
 24. A Begum, M Laroussi, and M R Pervez, Atmospheric pressure He-air plasma jet: breakdown process and propagation phenomenon *AIP Adv.* **3** (2013) 062117.
 25. V Poenariu, M R Wertheimer, and R Bartnikas, *Spectroscopic diagnostics of atmospheric pressure helium dielectric barrier discharges in divergent fields Plasma Processes and Polymers* **3** (2006) 17.
 26. J J Liu and M G Kong, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** (2011) 345203.
 27. R Ono and T Oda, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36** (2003) 1952.
 28. GM Thomas and TM Helliwell, "Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer", **10**, 5 (1970) 423.
 - Rep. **540** (2014) 123.
 11. Y Xian, P Zhang, X Pei and X Lu, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** (2014) 2448.
 12. A Schmidt-Bleker, S A Norberg, and J Winter, E Johnsen, S Reuter, K D Weltmann, and M J Kushner, *Plasma Sources Science and Technology* **24** (2015) 035022.
 13. Y Xian, X Lu, J Liu, S Wu, D Liu, and Y Pan, *Plasma Sources Science and Technology* **21** (2012) 034013.
 14. S Wu, Q Huang, Z Wang, and X Lu, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** (2011) 2286.
 15. M A Akman and M Laroussi, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** (2013) 839.
 16. J Y Won and P F Williams, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** (2002) 205.
 17. T M Briels, E M Van Veldhuizen and U Ebert, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** (2008) 906.
 18. D Breden, K Miki, and L L Raja, Self-consistent two-dimensional modeling of cold atmospheric-pressure plasma jets / bullets *Plasma Sources Science and Technology* **21** (2012) 034011.
 19. E Slikboer, O Guaitella, and A Sobota, Time-resolved electric field measurements during and after the initialization of a kHz plasma jetrom streamers to guided streamers, *Plasma Sources Science and Technology* **25** (2016) 03LT04.
 20. E Slikboer, E Garcia-Cauarel, O Guaitella, and A