



استفاده از آرایه آنتن آبشاری برای تشخیص گلوله‌های پلاسمایی و بررسی سرعت گلوله‌ها در فواره پلاسمای آرگون

رضا عماد هیودی، پوریا سیفی و حمیدرضا قمی*

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

پست الکترونیکی: h-gmdashty@sbu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸)

چکیده

در این مطالعه روشی نوین جهت اندازه‌گیری سرعت گلوله‌های پلاسمایی، مبتنی بر دریافت و آشکارسازی سیگنال الکتریکی گلوله‌ها با استفاده از آرایه‌ای از آنتن آبشاری در فواره (جت) پلاسمای آرگون با ساختار نوک-حلقه ارائه شده است. در این ساختار الکتروود نوک نقش محرک تولید پلاسما و الکتروود حلقه نقش کنترل فواره پلاسما را بر عهده دارد. جهت بررسی و مطالعه تغییرات فواره پلاسما الکتروود حلقه در فواصل مختلف نسبت به الکتروود نوک قرار داده شده و تغییرات ایجاد شده در سرعت گلوله‌ها اندازه‌گیری شده است. در آزمایش‌ها مشاهده شد که اگر دو الکتروود از هم ۱/۵ سانتی‌متر فاصله داشته باشند، در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از محل تشکیل پلاسما، سرعت گلوله‌ها حدوداً ۱۴۰ کیلومتر بر ثانیه خواهد بود. اگر دو الکتروود ۳/۲۵ سانتی‌متر از هم فاصله داشته باشند گلوله‌ها حدوداً ۱۲۰ کیلومتر بر ثانیه سرعت دارند و در صورتی که دو الکتروود ۵ سانتی‌متر از هم فاصله داشته باشند، سرعت گلوله‌ها حدوداً ۱۰۰ کیلومتر بر ثانیه خواهد بود. با بررسی نتایج مشاهده شد که با افزایش فاصله بین دو الکتروود، سرعت گلوله‌های پلاسمایی نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که با فاصله گرفتن از محل تشکیل پلاسما در تیوب فواره، سرعت متوسط گلوله‌های پلاسمایی افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در فاصله ۲۱ سانتی‌متری از آن، سرعت متوسط گلوله‌های پلاسمایی در هر سه پیکربندی در حدود ۱۲۰ کیلومتر بر ثانیه خواهد بود. در نهایت با تغییر توان الکتریکی به این نتیجه رسیدیم که با افزایش توان الکتریکی سرعت گلوله‌ها افزایش می‌یابد. طبق نتایج به‌دست آمده با دو برابر شدن توان اعمالی مشاهده شد که در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از محل تشکیل پلاسما سرعت گلوله‌ها در توان پایین‌تر حدوداً ۴۰ کیلومتر بر ثانیه و در توان بالاتر حدوداً ۹۰ کیلومتر بر ثانیه خواهد بود؛ این نتایج در صورتی حاصل شده است که فاصله دو الکتروود از هم ۳/۲۵ سانتی‌متر است.

واژه‌های کلیدی: گلوله پلاسمایی، سیگنال الکتریکی، فواره پلاسمای آرگون، سرعت گلوله

۱. مقدمه

پلاسما، گاز روشن‌کننده پلاسما و یک یا دو الکتروود به عنوان محرک تولید پلاسما است. این فواره‌های پلاسمایی می‌توانند هندسه و پیکربندی متفاوتی داشته باشند. همچنین فواره‌های پلاسمایی می‌توانند توسط جریان مستقیم پالسی یا جریان

فواره پلاسمای فشار اتمسفری^۱ غیرحرارتی ساختاری شامل یک لوله دی‌الکتریک به عنوان محیط هدایت‌کننده گاز و فواره

۱. Atmospheric-pressure plasma jet

در اندازه‌گیری سرعت گلوله‌های پلاسمایی با روش دوربین فوق‌سریع و فوتومولتی‌پلایر، از خاصیت نوری گلوله‌ها استفاده می‌شود. یعنی با آشکارسازی فوتون‌های گسیل شده از گلوله در گام اول مکان گلوله و در ادامه سرعت آنها تشخیص داده می‌شود؛ اما ما در این مقاله با استفاده از میدان الکترومغناطیسی ایجادشده در اطراف گلوله‌های در حال حرکت مکان و سرعت این گلوله‌ها را تشخیص می‌دهیم.

۲. روش اندازه‌گیری سرعت گلوله پلاسمایی با آنتن

در این روش که از کار موسارد و همکارانش [۱۰] الگوبرداری شده، از نوعی آنتن برای تشخیص زمان رسیدن گلوله پلاسمایی به مکان مورد نظر استفاده می‌شود. این آنتن از چرخاندن یک دور سیم اطراف لوله‌ی الکتریکی در فاصله‌ای معین از مکان تشکیل گلوله، حاصل می‌شود. اگر گلوله‌های پلاسمای را کره‌هایی باردار فرض کنیم طبق قانون لنز با نزدیک شدن این کره‌ها به حلقه، جریانی در آن القا می‌شود؛ با به دست آوردن لحظه‌ی القا شدن این جریان توسط اوسیلوسکوپ و داشتن لحظه‌ی ایجاد جریان (که توسط یک آنتن دیگر در محل شروع ستون پلاسمای^۳ به دست می‌آید) و فاصله طی شده توسط گلوله، می‌توان سرعت گلوله‌های پلاسمایی را به دست آورد.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است یک طرف حلقه آنتن به مغزی سیم روکشدار و طرف دیگر آن به حفاظ متصل می‌شود؛ این سیم روکشدار جریان ایجادشده توسط آنتن را به اوسیلوسکوپ منتقل می‌کند. برای حفاظت از جریان ایجادشده در مقابل نوفه منبع تغذیه دور آنتن‌ها از یک ورقه نازک آلومینیومی زمین شده استفاده شد (شکل ۲).

سازوکار کلی آزمایش بدین‌صورت است که گلوله پلاسمایی با عبور از بین هر آنتن یک قله در حد چند ده میلی‌ولت با پهنایی در حدود چند صد نانوثانیه ایجاد می‌کند و با تنظیم کردن تریگر اوسیلوسکوپ می‌توان فاصله زمانی رسیدن گلوله پلاسمایی از آنتن مرجع‌گیری به سایر آنتن‌ها را به دست آورد. با داشتن این زمان و مشخص بودن فاصله بین آنتن‌ها می‌توان

متناوب با بسامدهای کاری متفاوت در توان‌های متفاوت راه‌اندازی شوند [۱-۳]. این ساختارها می‌توانند پلاسمای را در حالت‌های عملکردی متفاوتی، از جمله رشته‌ای، استریمر، گلوله و غیره تشکیل دهند [۴ و ۵].

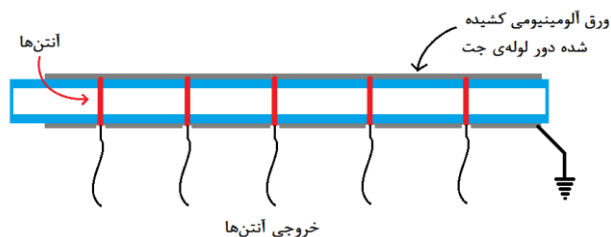
گلوله‌های پلاسمایی برای اولین بار توسط تشکه و همکارانش گزارش شد [۱]. عکس‌های فوق‌سریع نشان دادند که فواره پلاسمای شامل گلوله‌های گسسته پلاسمایی هستند که با سرعت‌هایی بسیار بالا در حد چند ۱۰ کیلومتر بر ثانیه منتشر می‌شوند و ستون پلاسمای را تشکیل می‌دهند. این در حالی است که سرعت جریان گاز از چند ۱۰ متر بر ثانیه تجاوز نمی‌کند [۱]. لو و لاروسی [۶] مدلی برای توضیح رفتار گلوله‌های پلاسمای تحت تأثیر میدان الکتریکی ضعیف ارائه دادند. آنها از مدل استریمر بر پایه یونش نوری برای توضیح سرعت بسیار بالای انتشار گلوله‌های پلاسمایی استفاده کرده‌اند [۶] و همچنین در مدل‌سازی‌های بعدی خود از جبهه امواج یونی در استریمرهای مثبت برای توضیح جنبه‌های مختلف این پدیده استفاده کرده‌اند.

در دهه اخیر استفاده از فواره‌های پلاسمایی فشار اتمسفری در تیمار سطوح، سنتز نانو ذرات، صنایع پزشکی و درمانی و غیره، روزه‌روز افزایش یافته و توسط گروه‌های متفاوتی در سراسر جهان توسعه پیدا کرده است [۷-۹]. برای بررسی ویژگی‌های این گلوله‌ها تاکنون از روش‌های زیادی از جمله دوربین‌های فوق‌سریع^۱، تصویربرداری شلیرن^۲، استفاده از لوله فوتومولتی‌پلایر، فلئورسانس القاشده لیزری، طیف‌سنجی جذب لیزری استفاده شده است [۵]. بهترین روش برای بررسی سرعت گلوله‌های پلاسمایی استفاده از دوربین‌های فوق‌سریع و لوله فوتومولتی‌پلایر است؛ اما در این مقاله ما از روشی دیگر که برای اولین بار توسط موسارد و همکارانش [۱۰] استفاده شد، استفاده کردیم. دلیلش آن که چیدمان و ابزار به نسبت ساده‌تر و هزینه‌ای بسیار کمتر نسبت به دو روش ذکرشده دارد و از دقت بسیار خوبی برخوردار است.

۱. Intensified charge-coupled device

۲. Schlieren photography

۳. Plasma plume



شکل ۲. نمایی از نحوه قرارگیری آرایه آنتن‌ها و منزوی کردن آنها از نوفه منبع تغذیه.

در هر لوله فاصله آنتن‌ها از هم ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد و اولین آنتن از الکتروود ولتاژ بالا ۷۰ میلی‌متر فاصله داشت. همچنین از یک آنتن جداگانه برای گرفتن مرجع اندازه‌گیری‌ها استفاده شد. این آنتن مرجع‌گیری در فاصله ۱ میلی‌متری از نوک الکتروود ولتاژ بالا قرار دارد تا لحظه تولید گلوله‌های پلاسمایی آشکار کند. در تمام آزمایش‌ها از گاز آرگون با گرید صنعتی (خلوصی در حدود ۹۹/۹۹ درصد) استفاده شد. اوسیلوسکوپ استفاده‌شده در این آزمایش‌ها مدل DSLR۸۰۰C از شرکت ام تی ان ام الکترونیکز^۱ بود. این نوع اوسیلوسکوپ فاقد نمایشگر بوده و برای مشاهده شکل امواج نیازمند رایانه‌ای جداگانه است. همچنین از کاوندۀ ولتاژ بالای SEW PD-۲۰S برای به دست آوردن ولتاژ و از پیچۀ روگوفسکی برای اندازه‌گیری جریان استفاده شد.

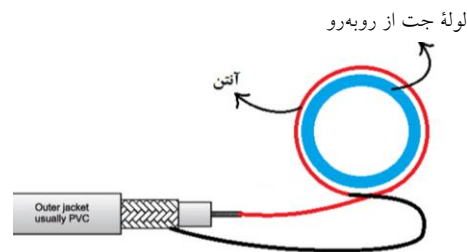
۴. نتایج تجربی

۴.۱. تأثیر فاصله حلقه زمین شده از الکتروود ولتاژ بالا

بر سرعت گلوله‌های پلاسمایی

در این آزمایش به چگونگی تأثیر فاصله دو الکتروود از هم بر سرعت گلوله‌های پلاسمایی پرداخته شد.

برای این آزمایش از یک منبع تغذیه تقریباً سینوسی با بسامد ۷۵ کیلوهرتز و ولتاژ قله-قله ۱۰/۱ کیلوولت استفاده شد. لوله مورد استفاده در این آزمایش از جنس پیرکس بود و ۱ میلی‌متر قطر داخلی و ۴ میلی‌متر قطر خارجی داشت. تعداد آنتن‌های مورد استفاده ۱۲ عدد بود.



شکل ۱. نحوه قرارگیری آنتن دور لوله فواره و اتصال آن به سیم روکشدار.

سرعت متوسط گلوله‌های پلاسمای را در هر فاصله به دست آورد. شکل ۳، نحوه محاسبه سرعت گلوله‌های پلاسمایی با استفاده داده‌های به‌دست آمده از اوسیلوسکوپ را نشان می‌دهد. در ادامه برای بررسی وجود جریان جابه‌جایی ما از آنتن اول که نزدیک‌ترین آنتن به منبع ایجاد پلاسمای است استفاده کردیم. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که هیچ‌گونه جریان جابه‌جایی وجود ندارد.

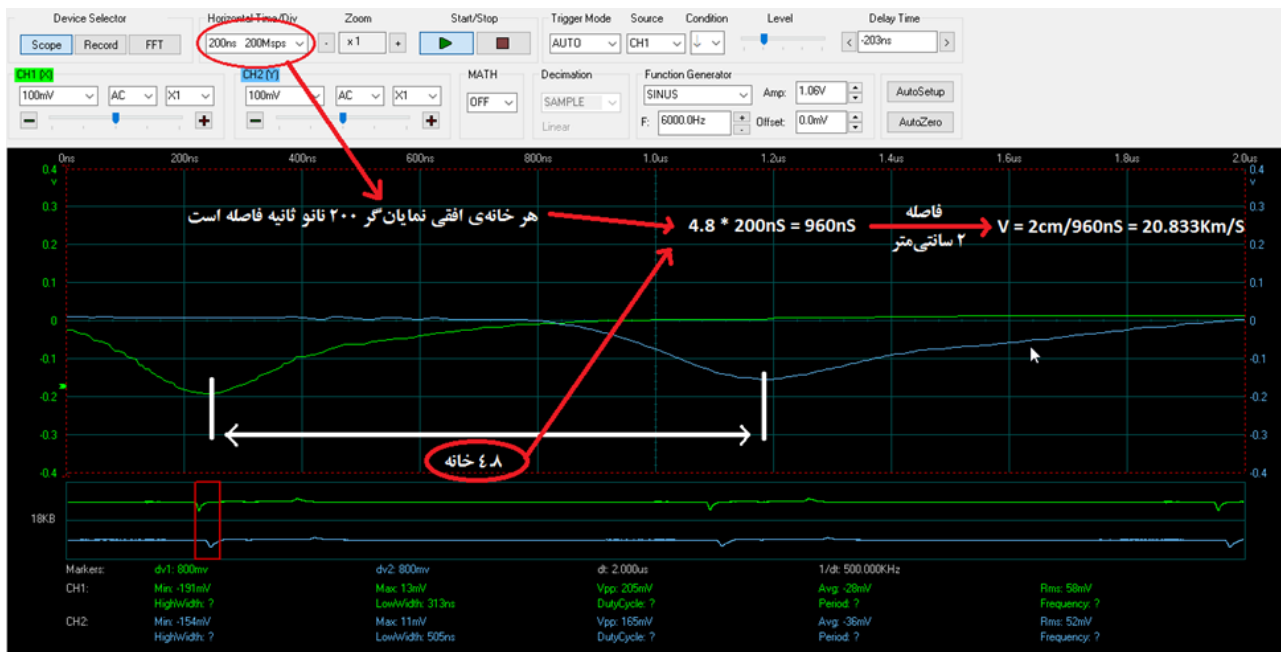
۳. چیدمان آزمایش

۳.۱. نحوه اتصال منبع تغذیه به نازل فواره پلاسمای

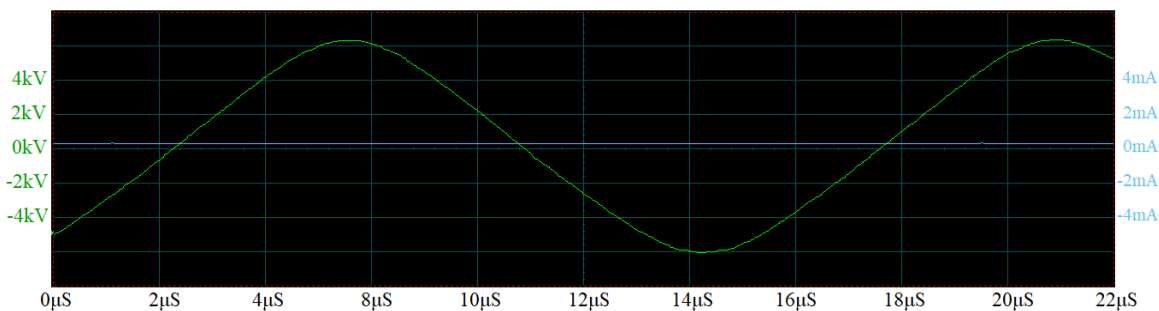
ما برای این کار از پیکربندی شبه DBD استفاده کردیم؛ بدین صورت که الکتروود ولتاژ بالا به صورت یک سیم نازک وارد لوله می‌شود و الکتروود زمین به صورت حلقه‌ای اطراف لوله و با کمی فاصله در امتداد نوک الکتروود ولتاژ بالا قرار می‌گیرد. شکل ۶، شماتیکی از پیکربندی نازل جت پلاسمای را نشان می‌دهد.

۳.۲. پیکربندی نهایی لوله فواره و مدار متصل به آن

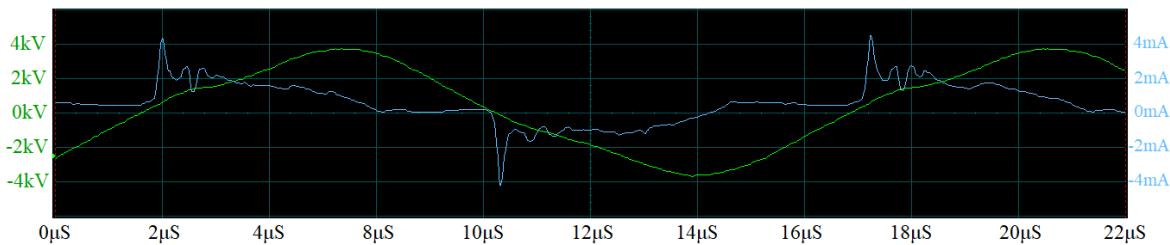
شکل ۷، شماتیک کلی چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر فاصله دو الکتروود بر سرعت گلوله‌های پلاسمایی، در تمام لوله‌ها ۳ مکان برای الکتروود زمین اطراف لوله تعبیه شد و حلقه‌هایی از ورقه آلومینیوم به عرض ۵ میلی‌متر در فاصله‌های ۱۵، ۳۲/۵ و ۵۰ میلی‌متری از الکتروود ولتاژ بالا اطراف لوله چسبانده شدند؛ خود الکتروود ولتاژ بالا هم یک سیم مسی با قطر ۰/۵ میلی‌متر بود.



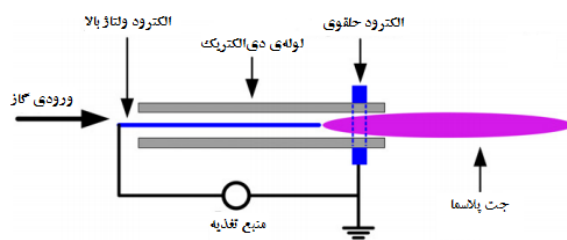
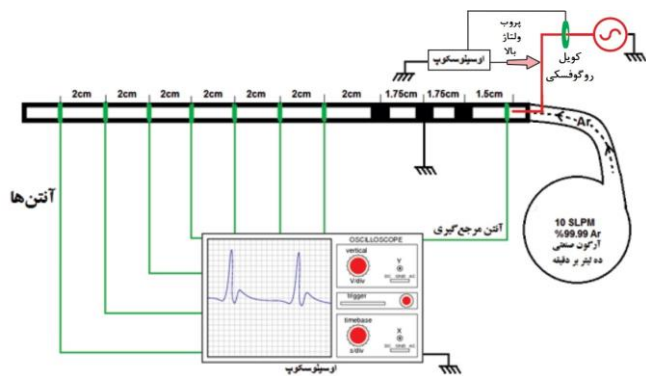
شکل ۳. نحوه محاسبه سرعت گلوله‌های پلاسمایی با استفاده داده‌های به دست آمده از اوسیلوسکوپ.



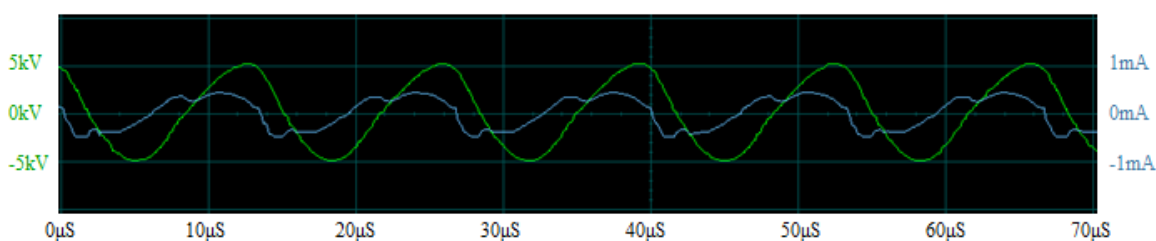
شکل ۴. ولتاژ منبع تغذیه (نمودار سبز) و جریان آشکار شده در آنتن اول (نمودار آبی) بدون وجود جریان گاز آرگون. نمودار سبز ولتاژ منبع تغذیه.



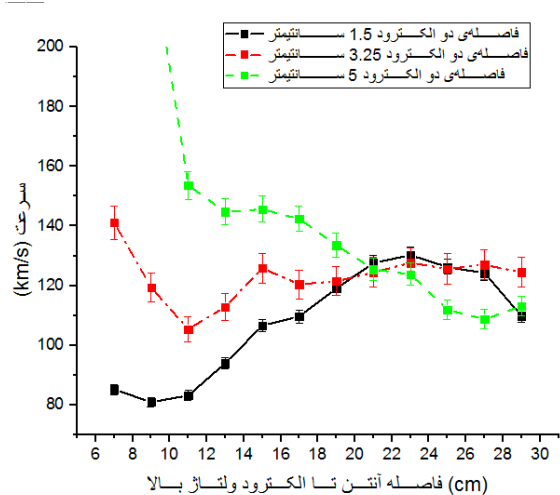
شکل ۵. ولتاژ منبع تغذیه (نمودار سبز) و جریان آشکار شده در آنتن اول (نمودار آبی) با حضور جریان گاز آرگون.



شکل ۶. پیکربندی و نحوه اتصال منبع تغذیه به فواره در تمام آزمایش‌ها. شکل ۷. طرحواره کلی چیدمان آزمایش.



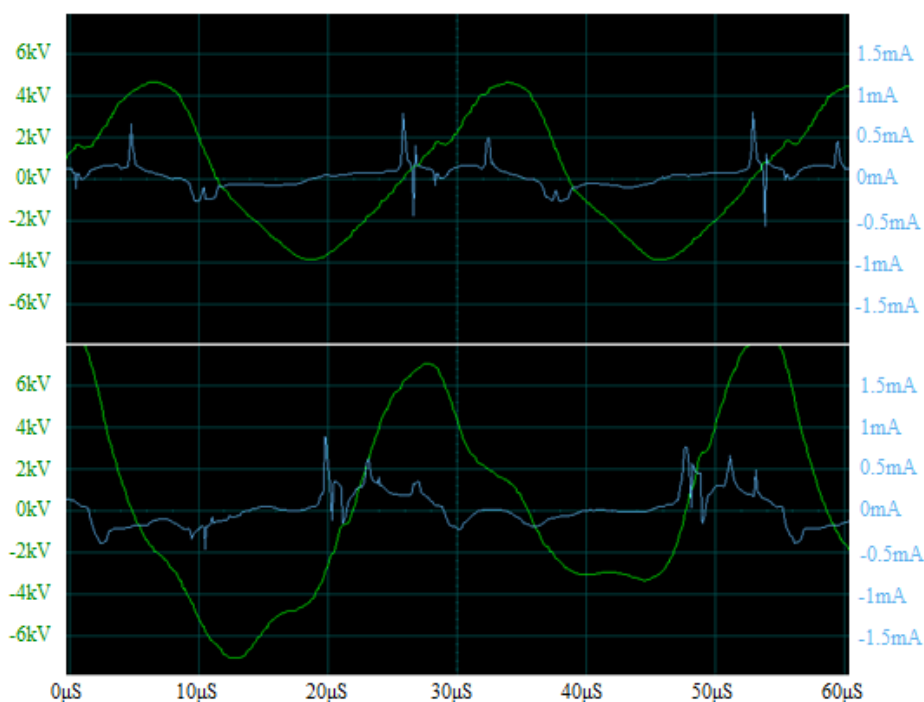
شکل ۸. نمایی از ولتاژ منبع تغذیه (در حالت بار) و گلوله آشکار شده در آنتن مرجع‌گیری. نمودار سبز رنگ مربوط به ولتاژ و نمودار آبی رنگ مربوط به جریان می‌باشد.



شکل ۹. نمودار تغییرات سرعت متوسط گلوله‌های پلاسمایی برای فاصله بین دو اکتروود ۱/۵ سانتی‌متر (خط سیاه)، ۳/۲۵ سانتی‌متر (خط نقطه چین قرمز) و ۵ سانتی‌متر (خط چین سبز).

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود در لحظه خیز ولتاژ، یک گلوله پلاسمایی با قله مثبت ایجاد می‌شود و در لحظه افت ولتاژ یک گلوله پلاسمایی با قله منفی ایجاد شد که می‌تواند حاکی از وجود دو نوع گلوله پلاسمایی با مجموع بار منفی و مجموع بار مثبت باشد [۴]. برای جمع‌آوری داده ابتدا آنتن مرجع‌گیری به یکی از کانال‌های اوسیلوسکوپ متصل شد و سپس به ترتیب آنتن اول تا دوازدهم به کانال دیگر اوسیلوسکوپ متصل شد. از فاصله قله آنتن مرجع‌گیری تا هر کدام از آنتن‌های داده‌گیری ۵ نمونه برداشته و از ۵ نمونه میانگین گرفته شد تا خطا به کمترین میزان خود برسد. نتایج نهایی در شکل ۹ گزارش شده است.

با مقایسه سه منحنی درمی‌یابیم که اگر دو اکتروود ۱/۵ سانتی‌متر فاصله داشته باشند ابتدا سرعت متوسط گلوله‌ها زیاد شده و سپس در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از اکتروود ولتاژ بالا دوباره این سرعت رو به کاهش می‌رود. همچنین اگر دو اکتروود ۳/۲۵



شکل ۱۰. مقایسه جریان و ولتاژ در دو مرحله. بالا مرحله اول و پایین مرحله دوم. نمودارهای سبز نمایانگر ولتاژ و نمودارهای آبی نمایانگر جریان هستند.

شد و به قله-قله ۱۶ کیلوولت رسید. فاصله الکتروود ولتاژ بالا با الکتروود زمین در هر دو آزمون ۳/۲۵ سانتی متر انتخاب شد. شکل ولتاژ و جریان هر دو مرحله در حالت بار در شکل ۱۰ آمده است.

همان طور که دیده می شود با افزایش توان (ولتاژ)، سرعت گلوله های پلاسمایی نیز به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. این افزایش سرعت نیز سبب می شود که گلوله های پلاسمایی مسیر بیشتری بپیمایند و ستون پلازما بزرگتر شود. این افزایش سرعت می تواند مربوط به افزایش شتاب بارها به دلیل ایجاد میدان الکتریکی قوی تر و همچنین بزرگتر شدن مجموع بار گلوله های پلاسمایی نیز باشد.

۵. بحث و نتیجه گیری

در آزمایش تأثیر فاصله الکتروود زمین از الکتروود ولتاژ بالا، دیده شد هرچه این فاصله بیشتر باشد سرعت اولیه گلوله های

سانتی متر باهم فاصله داشته باشند سرعت متوسط تقریباً ثابت می ماند و در نهایت اگر دو الکتروود ۵ سانتی متر باهم فاصله داشته باشند سرعت همواره رو به کاهش خواهد بود.

۴. ۲. تأثیر توان الکتریکی منبع تغذیه بر سرعت گلوله های پلاسمایی

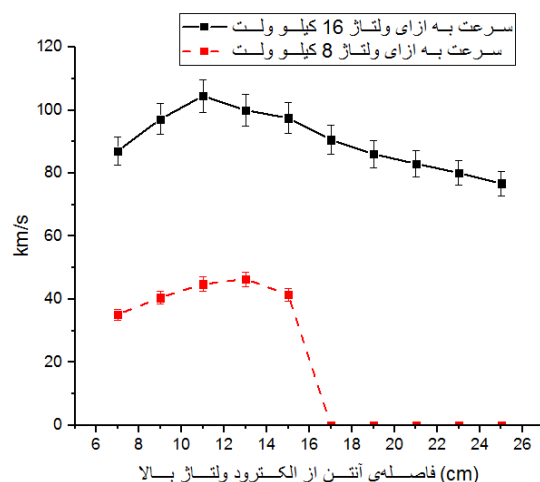
در این مرحله به چگونگی تأثیر مقدار دامنه ولتاژ بر سرعت گلوله های پلاسمایی پرداخته شد. لوله استفاده شده در این آزمایش دارای ۳ میلی متر قطر داخلی و ۵ میلی متر قطر خارجی بود و جنسی از پیرکس داشت. تعداد آنتن های نصب شده روی این لوله ۱۰ عدد برای گرفتن داده و ۱ عدد برای گرفتن مرجع انتخاب شد. منبع تغذیه هم از نوع سینوسی و در هر دو مرحله روی حدوداً ۳۵ کیلوهرتز تنظیم شد. فلوی گاز برای هر دو مرحله ثابت و روی ۵ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. در آزمون اول ولتاژ قله-قله ۸ کیلوولت بود و در آزمون دوم این ولتاژ دو برابر

وقتی که دو الکتروود به هم خیلی نزدیک باشند (آزمونی که دو الکتروود ۱/۵ سانتی‌متر باهم فاصله دارند) به دلیل بزرگ‌تر بودن میدان، احتمالاً گلوله‌هایی با چگالی بار بالا تولید می‌شود که شتاب نسبتاً پایینی دارند. البته به دلیل بالا بودن چگالی بار، میدان موضعی بسیار قوی‌ای در جبهه آنها تشکیل می‌شود (مانند همان اتفاقی که در استریم می‌افتد [۵]). همین میدان موضعی قوی می‌تواند باعث شود در فواصلی دورتر از میدان الکتریکی خارجی بازهم شتاب بگیرند و به سرعت خود بیفزایند؛ اما کم بودن سرعت اولیه باعث می‌شود که گلوله‌ها زمان بیشتری در لوله سیر کنند و اندرکنش بیشتر آنها با دیواره و سایر عوامل، موجب کاهش مجدد سرعت و درنهایت از بین رفتن گلوله‌ها می‌شود. به هر حال، نظیر چنین پدیده‌ای قبلاً توسط بیگام و همکارانش [۱۱] و همچنین وو و همکارانش [۱۲] گزارش شده است.

در آزمایش تأثیر توان منبع تغذیه (ولتاژ) بر سرعت گلوله‌های پلاسمایی، همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش توان (ولتاژ) سرعت گلوله‌ها به میزان قابل‌توجهی افزایش یافت. در توجیه این اتفاق می‌توان نوشت که با توجه به $E=V/d$ ، با افزایش ولتاژ میدان الکتریکی هم افزایش پیدا می‌کند. این افزایش باعث ایجاد گلوله‌هایی با چگالی بار بیشتر و همچنین باعث ایجاد شتاب اولیه بالاتر می‌شود. تا جایی که با افزایش دو برابری ولتاژ (و در نتیجه میدان) سرعت گلوله‌ها نیز حدوداً دو برابر شد و علاوه بر آن طول ستون پلازما هم افزایشی دو برابری داشت.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا روشی جدید برای اندازه‌گیری سرعت گلوله‌های پلاسمایی توسعه داده شد که نسبت به روش‌های مرسوم مانند دوربین‌های فوق سریع و فوتومولتی‌پلایر چیدمان ساده‌تر و هزینه بسیار کمتری دارد. همچنین نشان داده شد که نتایج به‌دست آمده از این روش تطابق بسیار خوبی با نتایج روش‌های ذکر شده تطابق بسیار خوبی دارد [۵]. در ادامه به بررسی تأثیر دو پارامتر فاصله دو الکتروود از هم و تغییرات توان



شکل ۱۱. مقایسه سرعت گلوله‌های پلاسمایی در دو مرحله ۸ کیلوولت (خط چین قرمز) و ۱۶ کیلوولت (خط سیاه).

پلاسمایی بیشتر می‌شود. این افزایش سرعت به این دلیل است که گلوله‌ها پس از ایجاد، زمان بیشتری در معرض میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرند؛ پس شتاب بیشتری پیدا می‌کند. البته دیده شد که زمانی که فاصله دو الکتروود در بیشترین حالت خود قرار دارد، گلوله‌ها با شتاب بیشتری سرعت خود را از دست می‌دهند. این پدیده را می‌توان چنین توصیف کرد که با توجه به ثابت بودن ولتاژ منبع تغذیه در همه آزمایش‌ها و همچنین بیشتر بودن فاصله دو الکتروود در این آزمون، بزرگی میدان ایجاد شده بین دو الکتروود با توجه به $E=V/d$ کمتر از سایر آزمون‌ها می‌شود. همین کاهش مقدار میدان الکتریکی احتمالاً باعث می‌شود گلوله‌هایی با چگالی بار کمتر (یا با اندازه‌ای کوچک‌تر) تولید شوند. این چگالی بار (یا اندازه) کمتر با توجه به وجود گونه‌های باردار باقی‌مانده از گلوله‌های پیشین روی دیواره داخلی و در گاز داخل لوله سبب می‌شود که گلوله‌ها سریع‌تر شکل و بار خود را از دست بدهند و با شتاب بیشتری سرعتشان کم شوند و درنهایت از بین بروند. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، در آزمونی که دو الکتروود ۳/۲۵ سانتی‌متر از هم فاصله دارند، گلوله‌های پلاسمایی در تمام مسیری که آنتن‌گذاری شده سرعت خود را تقریباً ثابت نگه می‌دارند. این اتفاق حاکی از آن است که گلوله‌ها شتاب و چگالی بار اولیه مناسبی را به‌دست آورده‌اند. از سوی دیگر

گلوله‌ها در حدود ۱۲۵ کیلومتر بر ثانیه و اگر فاصله دو الکتروند ۱/۵ سانتی‌متر باشد سرعت گلوله‌ها در حدود ۱۲۰ کیلومتر بر ثانیه خواهد بود. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش فاصله دو الکتروند از هم، سرعت متوسط گلوله‌های پلاسمایی در ابتدای مسیر خود بیشتر می‌شود. با فاصله گرفتن از محل تشکیل پلازما شاهد خواهیم بود که این رابطه تقریباً عکس می‌شود، یعنی با زیاد شدن فاصله دو الکتروند از هم سرعت متوسط گلوله‌های پلاسمایی در فواصل دور از محل تشکیل پلازما، کم می‌شود. در مرحله بعد با توجه به شکل ۱۱ می‌توان چنین برداشت کرد که در شرایط ثابت، سرعت گلوله‌ها با افزایش توان اعمالی همیشه بیشتر می‌شود.

اعمالی پرداخته شد. نتایج نشان داد که سرعت متوسط گلوله‌های پلاسمایی که در فواصل نزدیک محل تشکیل پلازما (مثلاً ۹ سانتی‌متری) قرار دارند، اگر فاصله دو الکتروند از هم ۵ سانتی‌متر باشد چیزی در حدود ۲۰۰ کیلومتر بر ثانیه است. اگر فاصله دو الکتروند ۳/۲۵ سانتی‌متر باشد سرعت گلوله‌ها در حدود ۱۲۰ کیلومتر بر ثانیه و اگر فاصله الکتروند ۱/۵ سانتی‌متر باشد سرعت گلوله‌ها در حدود ۸۰ کیلومتر بر ثانیه خواهد بود. این در حالی است که در فواصل دورتر از محل تشکیل پلازما (مثلاً در فاصله ۲۷ سانتی‌متری) اگر فاصله دو الکتروند از هم ۵ سانتی‌متر باشد سرعت گلوله‌های پلاسمایی حدوداً ۱۱۰ کیلومتر بر ثانیه، اگر فاصله دو الکتروند ۳/۲۵ سانتی‌متر باشد سرعت

مراجع

1. M Teschke, *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 33, 2 (2005) 310.
2. S Wu, *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 38, 12 (2010) 3404.
3. Z Xiong, *et al.*, J. Appl. Phys. 108, 10 (2010) 103303.
4. X Lu, M Laroussi, and V Puech, Plasma Sour. Sci. Technol. 21, 3 (2012) 034005.
5. X Lu, *et al.*, Phys. Rep. 540, 3 (2014) 123.
6. X Lu and M Laroussi, J. Appl. Phys., 100, 6 (2006) 063302.
7. G Fridman, *et al.*, *Applied plasma medicine Plasma Processes and Polymers* 5 (2008) 503.
8. M Laroussi, *IEEE Transactions on plasma science* 37, 6 (2009) 714.
9. M Laroussi, *IEEE transactions on plasma science* 43, 3 (2015) 703.
10. M Mussard, V S Dang, O Guaitella and A Rousseau. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, 30 (2013) 302001.
11. A Begum, M Laroussi, M R Pervez. *AIP Advances*, 3, 6 (2013) 062117.
12. S WU, *et al.*, *Plasma Processes and Polymers*, 10, 2 (2013) 136.