

تحلیل تجربی پلاسمای لیزری در محیط‌های مختلف با تکنیک سایه‌نگاری و کاربرد آن در پایش محیطی حساس

مصیب معظمی گودرزی^{۱*}، نادر امیری راد^۲، داود شهابی^۳

^{۱*} نویسنده مسئول، پژوهشگر، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

mosayebmoazami@ihu.ac.ir.com

naderamiri@ihu.ac.ir

^۲ پژوهشگر، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

kpdshahabi@ihu.ac.ir

^۳ پژوهشگر، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

چکیده

پلاσμα به‌عنوان فاز چهارم ماده، دارای ویژگی‌هایی است که آن را برای مطالعات آزمایشگاهی و کاربردهای فناوری مناسب می‌سازد. در این پژوهش، پارامترهای کلیدی پلاσμα شامل سرعت انتشار، دما و چگالی با استفاده از تکنیک سایه‌نگاری اندازه‌گیری شدند. آزمایش‌ها با لیزر Nd:YAG در دو انرژی ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی‌ژول و در دو محیط متفاوت هوا و آب انجام گرفت. برای ایجاد پلاσμα از طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و برای تصویربرداری سایه‌نگاری از هارمونیک دوم با طول موج ۵۳۲ نانومتر استفاده شد. تصاویر ثبت شده در فواصل زمانی ۱ تا ۱۰ میکروثانیه امکان تحلیل گسترش جبهه موج پلاσμα را فراهم کردند. نتایج نشان داد که سرعت انتشار پلاσμα در هوا به‌طور میانگین ۳۰۵۴ کیلومتر بر ثانیه و در آب ۲۰۷۴ کیلومتر بر ثانیه است، دمای پلاسمای هوا ۳۴۳۵ درجه کلوین و در آب ۲۰۰۸ درجه کلوین اندازه‌گیری شد و چگالی آن نیز در هوا برای انرژی‌های ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی‌ژول به ترتیب ۵۰۰۴ و ۵۰۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب و در آب ۴۰۹۱ و ۴۰۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. تحلیل تغییرات زمانی پارامترها افت تدریجی دما، سرعت و چگالی پس از تشکیل پلاσμα را نشان داد. این مطالعه نشان می‌دهد که سایه‌نگاری ابزار مناسبی برای تحلیل دقیق پلاسمای لیزری در محیط‌های مختلف است و ویژگی‌های حساس و دینامیک آن امکان کاربرد در سامانه‌های رمزنگاری نوری و پایش محیطی حساس را فراهم می‌آورد. الگوهای فضایی و زمانی پلاσμα می‌توانند به عنوان کانال رمزگذاری داده یا شاخص‌های محیطی عمل کنند، به طوری که تغییرات کوچک محیطی اثر مستقیمی بر پارامترها داشته باشد. یافته‌های تحقیق می‌تواند در طراحی نسل جدید سیستم‌های لیزری و کاربردهای فناوری مرتبط با انتقال اطلاعات و پایش محیطی پیشرفته مفید واقع شود.

واژه‌های کلیدی: گسترش پلاσμα، دمای پلاσμα، چگالی پلاσμα، تکنیک سایه‌نگاری، لیزر Nd:YAG، پایش محیطی حساس

۱. مقدمه

پلازما، به عنوان چهارمین حالت ماده، در دهه های اخیر توجه گسترده ای را در حوزه های علمی، صنعتی و پزشکی به خود جلب کرده است. این حالت ویژه که شامل یون ها، الکترون های آزاد و اتم های برانگیخته است، به دلیل خواص فیزیکی منحصر به فردش از جمله رسانایی بالا، حساسیت به میدان های الکترومغناطیسی و توانایی تولید امواج شوک بستری مناسب برای بررسی های تجربی و نظری فراهم می کند [۱].

پلاسمای تولید شده با لیزر، به دلیل خواص یونیزه، حساسیت بالا به شرایط محیطی و تابش، و دینامیک فضایی-زمانی پیچیده، نه تنها برای مطالعات پایه پلازما اهمیت دارد، بلکه به عنوان یک رسانه چند منظوره با کاربردهای فناورانه بالقوه نیز مطرح است. با بهره گیری از تکنیک های تشخیصی اپتیکی مانند سایه نگاری می توان پارامترهای پلازما، از جمله چگالی، ساختار و گسترش آن را با دقت بالا اندازه گیری کرد [۲]. از سوی دیگر، زمینه نور ساختاری^۱ در سال های اخیر به طور گسترده برای کاربرد در رمزنگاری نوری و انتقال امن اطلاعات مورد مطالعه قرار گرفته است [۲] و [۳].

با ترکیب استفاده از پلازما به عنوان یک محیط دینامیک حساس و بهره گیری از نور ساختاری لیزر برای رمزنگاری اطلاعات، می توان سامانه های نوینی ایجاد کرد که هم برای پایش محیطی حساس (به دلیل وابستگی پلازما به شرایط محیطی) و هم برای انتقال امن اطلاعات یا رمزنگاری فیزیکی قابل استفاده باشند.

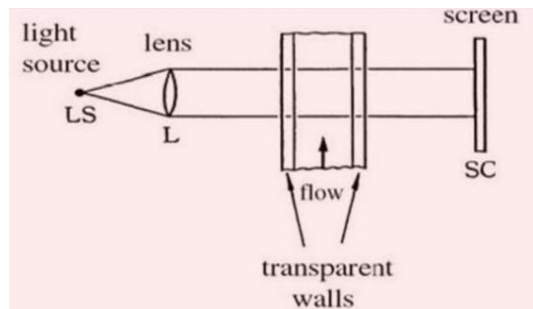
به عبارت دقیق تر، الگوهای فضایی-زمانی گسترش پلازما که با روش سایه نگاری قابل ثبت هستند، می توانند به عنوان «کانال رمزنگاری» عمل کنند. گستره وسیعی از پارامترها، از جمله چگالی، دما، سرعت انتشار و ساختار فضایی پلازما، همراه با حساسیت آن به محیط، می تواند ریسک رهگیری یا دستکاری اطلاعات را کاهش دهد. هم زمان، همان حساسیت محیطی پلازما اجازه می دهد که این سامانه در نقش حسگر محیطی یا پایشگر نیز عمل کند، به عنوان مثال برای تشخیص

تغییرات گاز، فشار، دما، رطوبت یا رخداد های محیطی دیگر خدادهای خارجی است [۳].

یکی از ویژگی های بنیادی پلازما که در کاربردهای پایش محیطی حساس اهمیت دارد، حساسیت بالای پارامترهای پلازما نسبت به تغییرات محیطی است. در پلازما، ذرات باردار (یون ها و الکترون ها)، اتم های برانگیخته و رادیکال های آزاد به دلیل نیروهای الکترومغناطیسی و یونیزاسیون، نسبت به تغییرات ترمودینامیکی و شیمیایی محیط بسیار واکنش پذیر هستند. این حساسیت ذاتی باعث می شود پارامترهای پلازما مانند چگالی الکترونی، انرژی یون ها، دما و توزیع انرژی تحت تأثیر عواملی مانند نوع گاز محیط، فشار، دما و حضور آلاینده ها تغییر کنند. اندازه گیری این تغییرات می تواند به عنوان یک مکانیزم حسگری قوی برای تشخیص وضعیت و کیفیت محیط به کار رود؛ حتی تغییرات جزئی در محیط، پاسخ قابل اندازه گیری در پلازما ایجاد می کنند. نمونه بارز این کاربردها، حسگرهای گازی مبتنی بر پلازما هستند که با فعال سازی سطح و افزایش واکنش با گونه های گازی، حساسیت اندازه گیری گازها را به طور قابل توجهی افزایش می دهند. در این حسگرها، پردازش پلازما باعث افزایش یون های اکسیژن سطحی و بهبود واکنش با گازهای هدف می شود و در نتیجه پاسخ حسگر نسبت به گازهای محیطی بهبود می یابد. این نمونه ها نشان می دهند که پلازما می تواند به عنوان ابزاری برای تشخیص و پایش دقیق پارامترهای محیطی با حساسیت بالا مورد استفاده قرار گیرد [۳].

یکی از روش های نوین و بسیار دقیق در مطالعه پدیده های پلاسمایی، بهره گیری از تکنیک تصویربرداری سایه نگاری است که قابلیت ردیابی دقیق جبهه موج، گسترش، سرعت و دمای پلازما را بدون تماس مستقیم با آن فراهم می آورد. به ویژه در مواجهه با پلاسماهای القاشده توسط لیزر، که در فواصل زمانی بسیار کوتاه و با گسترش پرسرعت در محیط اتفاق می افتند، اهمیت این تکنیک دوچندان می گردد [۴].

شکل ۳ طرحی از سیستم مورد استفاده برای اندازه‌گیری انتشار موج ضربه را با استفاده از روش سایه‌نگاری نشان می‌دهد [۷].

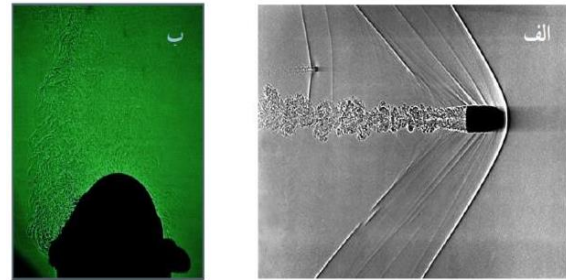


شکل ۳. طرح مورد استفاده در روش سایه‌نگاری

نور خروجی از یک منبع نقطه‌ای، با عبور از یک عدسی به طور مستقیم بر روی صفحه‌ای ثبت می‌شود. لازم نیست باریکه کاملاً موازی باشد. وقتی هیچ سیالی داخل لوله قرار نداشته باشد، صفحه به طور یکنواخت روشن خواهد شد اما در صورتی که سیالی وجود داشته باشد [۸].

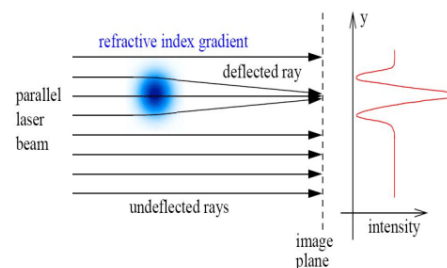
تصویربرداری شادوگرافی یکی از ابزارهای تشخیصی اپتیکی است که می‌تواند تغییرات فضایی-زمانی پارامترهای پلازما مانند چگالی الکترونی، دما و سرعت گسترش را با استفاده از تغییرات در ضریب شکست نور ثبت کند. این روش به دلیل حساسیت به گرادیان‌های چگالی و دما در پلازما، قادر به آشکارسازی سطحی‌ترین تغییرات پلازما و برهم‌کنش آن با محیط اطراف است و می‌تواند به‌عنوان یک روش پایش محیطی حساس عمل کند، زیرا تغییرات کوچک در ساختار پلازما به دلیل تغییرات محیطی در الگوهای شادوگرافی قابل مشاهده و تحلیل هستند. این پیامدها با مطالعاتی مانند انتشارات آزمایشی نشان داده شده‌اند که شادوگرافی می‌تواند چگالی و ساختار پلازما را با حساسیت بالا اندازه‌گیری کند و از این طریق تأثیرات محیطی را پایش کند [۹].

مسئله اصلی در این پژوهش، اندازه‌گیری دقیق پارامترهای پلازما نظیر سرعت، دما و چگالی در دو محیط گاز و مایع با بهره‌گیری از تکنیک سایه‌نگاری است. با توجه به این که پلازما در محیط‌های مختلف بسته به ویژگی‌های ترمودینامیکی آن‌ها رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد، بررسی هم‌زمان آن در محیط‌هایی مانند هوا و آب، امکان



شکل ۱. الف. سایه‌نگاری از یک گلوله بادی که توسط موسسه روچستر گرفته شده است. ب. تصویر سایه‌نگاری از هوای گرم [۵]

گرادیان ضریب شکست باعث خمیدگی لیزر عبوری از محیطی با ضریب شکست بالاتر نسبت به جهت خودش می‌شود. علت این اثر بخاطر اغتشاش ۲ جبهه موج لیزر عبوری به سبب سرعت‌های انتشار متفاوت حاصل از ضرایب شکست متفاوت در نواحی مختلف می‌باشد. اگر عدسی‌ها در سیستم نتوانند چنین اثرات شکستی را جبران کنند، اشعه‌های نورانی لیزر عبوری از پلازما ممکن است در سطح تصویری ۳ از دوربین جابجا شوند. اشعه‌های منحرف شده از گرادیان‌های ضریب شکست باعث ایجاد ناحیه‌های تاریک روی دوربین و محلی که اشعه‌های منحرف شده به هم می‌رسند باعث ایجاد ناحیه‌های روشن‌تر می‌شوند.



شکل ۲. اصول کاری تصویربرداری سایه‌نگاری اشعه لیزری در اثر عبور از محیط چگال منحرف می‌شود و باعث ایجاد ناحیه‌های درخشان و تیره می‌شود.

همچنانکه دیدیم تکنیک‌های تصویربرداری سایه‌نگاری لیزری و شلرین تقریباً دارای یک اصول کاری یکسان مبنی بر اینکه موج لیزر عبوری از پلازما بدون تداخل با موج مرجع به سمت دوربین CCD هدایت شوند، می‌باشند. تحلیل اشکال حاصل از تصویربرداری سایه‌نگاری لیزری موضوعی است، که در این مقاله سعی شده به خوبی تحلیل شود [۶].

این پژوهش تأثیر نوع گاز محیط شامل آرگون، هوا و هلیوم بر نرخ تشکیل پلاسما و سرعت فرسایش بررسی شد. سایه‌نگاری متمرکز در مقیاس نانو ثانیه‌ای، امکان مشاهده رفتار پلاسما را در هر یک از گازها فراهم کرد.

در سال ۲۰۲۱، ژاکوب بودای و همکاران [۱۴] پژوهشی با تمرکز بر استفاده از داده‌های سایه‌نگاری برای تعیین انرژی انبساط اولیه پلاسما انجام دادند. آن‌ها از تصاویر ثبت شده در مراحل ابتدایی تشکیل پلاسما برای استخراج مدل انرژی و دینامیک حرارتی استفاده کردند که این کار امکان شبیه‌سازی پیشرفته‌تری از پلاسما در سیستم‌های طیف‌سنجی شکست فراهم آورد.

در سال ۲۰۲۴ بریت و ویندان قطره‌های هپتان را بدون تماس با هر سطحی در هوا معلق نگه داشتند تا از هر گونه آلودگی یا اثرات سطحی جلوگیری شود [۴].

با توجه به پژوهش‌های پیشین، نیاز به تحقیقی که اندازه‌گیری هم‌زمان دما، سرعت و چگالی پلاسما را با تفکیک زمانی بالا و در دو محیط گازی و مایع انجام دهد، احساس می‌شود. نوآوری اصلی این تحقیق ترکیب سایه‌نگاری لیزری با روش‌های کمی برای اندازه‌گیری سه پارامتر مهم پلاسما در دو محیط متفاوت و مقایسه روند تغییرات آن‌ها با گذر زمان است؛ امری که در اغلب پژوهش‌های قبلی به صورت مجزا یا فقط در یک محیط مورد بررسی قرار گرفته بود.

سؤال اصلی این تحقیق آن است که "رفتار زمانی پارامترهای پلاسما القایی لیزری نظیر سرعت، دما و چگالی در محیط‌های هوا و آب چگونه بوده و چه تفاوت‌هایی بین آن‌ها وجود دارد؟" هدف اصلی، ارائه یک مدل تجربی دقیق و قابل تعمیم از نحوه تغییر این پارامترها پس از تشکیل پلاسما و در شرایط گوناگون انرژی لیزر و نوع محیط است.

در ادامه این مقاله، ابتدا روش‌شناسی و طراحی آزمایشگاهی تحقیق شرح داده می‌شود، سپس یافته‌های حاصل از آزمایش‌ها با جداول و نمودارها ارائه می‌گردد. پس از آن به بحث و تفسیر نتایج با مقایسه آن‌ها با پژوهش‌های پیشین

شناخت دقیق‌تری از تأثیر محیط بر پارامترهای پلاسما و نرخ انتقال انرژی را فراهم می‌سازد. این موضوع نه تنها از منظر بنیادی، بلکه از نظر کاربردی نیز بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که در طراحی و کنترل سیستم‌های لیزری پیشرفته نظیر لایه‌نشانی لیزری، جراحی لیزری، یا شتاب‌دهنده‌های پلاسمایی، شناخت دینامیک پلاسما نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. برای روشن‌تر شدن جایگاه این تحقیق در ادبیات موضوع، مروری بر برخی مطالعات پیشین ضروری است. در سال ۲۰۰۱، ویلاگران مونیز و همکاران [۱۰] پژوهشی را با هدف مطالعه تغییرات ضریب شکست و چگالی الکترونی در پلاسماهای القاشده با لیزر انجام دادند. آن‌ها با استفاده از لیزر پیوسته و دوربین CCD به تصویربرداری سایه‌نگاری و تداخل‌سنجی از پلاسما پرداختند و توانستند تکامل موج شوک و توزیع چگالی الکترونی را ثبت کنند. این مطالعه روش‌شناسی نوینی برای تشخیص تغییرات گذرا در محیط‌های شفاف ارائه داد. در سال ۲۰۰۵، تنسو فوکوچی و همکاران [۱۱] از یک منحنی‌کننده آکوستوپتیک برای تصویربرداری سایه‌نگاری با سرعت بالا استفاده کردند. آن‌ها توانستند توزیع چگالی پلاسما را در زمان‌های مرتبه میکروثانیه در حضور تخلیه جرقه در هوا بازسازی نمایند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که سایه‌نگاری با شاتر نوری آکوستیکی می‌تواند توزیع دقیق چگالی در محیط‌های متلاطم را ثبت کند.

در سال ۲۰۰۷، میناردی و همکاران [۱۲] به مقایسه مستقیم بین تداخل‌سنجی و سایه‌نگاری در اندازه‌گیری چگالی پلاسما پرداختند. هدف آن‌ها بررسی دقت و حساسیت این دو روش بود. نتایج نشان داد که سایه‌نگاری از حساسیت بالاتری در ثبت تغییرات فضایی پلاسما برخوردار است، به‌ویژه هنگامی که تمرکز بر تغییرات سریع در چگالی باشد. آن‌ها از دو الگوریتم مختلف برای بازیابی اطلاعات تصویری نیز بهره بردند.

در سال ۲۰۰۹، جن فرین کویس و همکاران [۱۳] با استفاده از تکنیک سایه‌نگاری به بررسی میزان فرسایش و تشکیل پلاسما ناشی از تابش لیزر در گازهای مختلف پرداختند. در

پردازش شده و در نهایت نتیجه‌گیری، پیشنهادات عملی و تحقیقاتی و محدودیت‌های پژوهش بیان می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی دقیق رفتار پلاσμα در محیط‌های مختلف، از روش تجربی با طراحی آزمایشگاهی دقیق استفاده شد. نوع تحقیق از لحاظ هدف، کاربردی بوده و از منظر گردآوری داده‌ها، مبتنی بر روش‌های کمی و تجربی است. هدف اصلی، استخراج پارامترهای کلیدی پلاσμα شامل سرعت، دما و چگالی با استفاده از تکنیک سایه‌نگاری در دو محیط مجزا، یعنی هوا و آب، و در دو سطح انرژی متفاوت لیزر (۱۴۰ و ۲۰۰ میلی ژول) است. در این راستا، کلیه مراحل طراحی، انجام آزمایش‌ها، تصویربرداری، تحلیل داده‌ها و اعتبارسنجی نتایج بر پایه استانداردهای پذیرفته‌شده در فیزیک پلاσμα و اپتیک تجربی انجام گرفته است.

جامعه آماری این تحقیق، مجموعه‌ای از پلاسماهای القاشده لیزری ایجادشده در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی است که در دو محیط هدف (هوا و آب) و با دو مقدار انرژی متفاوت ایجاد شده‌اند. نمونه آماری شامل تصویر ثبت‌شده در بازه‌های زمانی مختلف از پلاسماهای ایجادشده توسط لیزر Nd:YAG در هر یک از شرایط مذکور است که با فواصل تأخیری مشخص (از ۱ تا ۱۰ میکروثانیه) برداشت شده‌اند. نمونه‌گیری به صورت هدفمند و بر اساس طراحی آزمایشات سیستماتیک صورت گرفت تا بتوان حداکثر اطلاعات ممکن از مراحل مختلف تکامل پلاσμα استخراج کرد.

برای جمع‌آوری داده‌ها، از دو منبع اصلی بهره گرفته شد: نخست، لیزر Nd:YAG به عنوان منبع تولید پلاσμα با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، انرژی‌های قابل تنظیم و پهنای پالس ۱۸ نانوثانیه، و دوم، تصویربرداری سایه‌نگاری با استفاده از لیزر کاوش (هارمونیک دوم Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر) برای ثبت تصاویر از دوربین CCD با سرعت بالا و نرم‌افزار تحلیل تصویر استفاده گردید. سایر تجهیزات مورد استفاده شامل ژول‌متر، نوسان‌نما، آینه‌های تخت، لنز

متمرکزکننده و جاذب اشباع پذیر بودند. چیدمان اپتیکی به گونه‌ای طراحی شد که تداخل بین لیزر کاوش و پلاσμα در کمترین حالت ممکن قرار گیرد و ثبت تصویری دقیق حاصل شود.

داده‌های به دست آمده از تصاویر سایه‌نگاری شامل جابه‌جایی جبهه موج، زمان تاخیر، میزان تیرگی و تغییر شکل محیط در اطراف پلاσμα بود. این داده‌ها به صورت کمی با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر تحلیل شد و پارامترهای فیزیکی مانند سرعت پیشروی جبهه موج، دمای تخمینی پلاσμα بر اساس مدل موج شوک، و چگالی جرم با استفاده از روابط برگرفته از دینامیک سیالات استخراج گردید. برای تحلیل سرعت، از شیب نمودار جابه‌جایی بر حسب زمان استفاده شد و برای دما از رابطه بین سرعت موج و دمای گاز بهره گرفته شد. محاسبه چگالی نیز با ترکیب داده‌های چشمی و مدل چگالی یون-صوتی صورت پذیرفت.

جهت اعتبارسنجی ابزارهای به کاررفته و نتایج حاصل، در گام نخست، صحت عملکرد دستگاه‌ها و سیستم تصویربرداری با منابع استاندارد بررسی شد. سپس، برای بررسی روابی صوری و محتوایی، مقایسه نتایج با مطالعات معتبر بین‌المللی انجام گرفت. تطابق نتایج با یافته‌های پژوهش‌هایی چون ویلاگران (۲۰۰۱)، فوکوچی (۲۰۰۵) و بودای (۲۰۲۱) نشان‌دهنده اعتبار رویکرد تجربی اتخاذشده بود. برای پایایی داده‌ها، آزمایش‌ها در چند نوبت تکرار شد و میانگین خطای نسبی در ثبت پارامترهای اصلی کمتر از ۵ درصد برآورد گردید که نشان‌دهنده تکرارپذیری مناسب نتایج است.

در مجموع، روش‌شناسی این تحقیق، با تکیه بر تکنیک‌های اپتیکی غیرتماسی، استفاده از فناوری لیزری دقیق و تحلیل پیشرفته تصاویر، توانسته است زمینه لازم برای اندازه‌گیری دقیق و مقایسه‌پذیر پارامترهای پلاσμα را در دو محیط مجزا و در شرایط مختلف فراهم سازد.

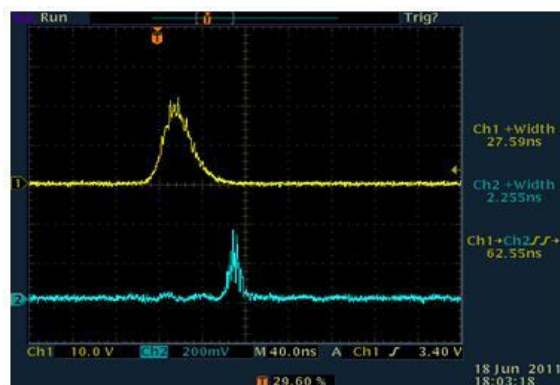
در شکل زیر شماتیک چیدمان سایه‌نگاری استفاده شده در این پژوهش ترسیم شده است معرفی می‌کنیم.

در حالت کلی سیدوف نشان داد که شعاع امواج ضربه‌ای که بصورت بی‌دررو منتشر می‌شوند از رابطه ۱ بدست می‌آید، که R شعاع موج ضربه‌ای و t زمان است. n برای موج ضربه‌ای کروی $\frac{2}{5}$ و برای موج استوانه‌ای $\frac{1}{5}$ است. بنابراین برای موج کروی داریم [۶].

$$R = (E/\rho)^{1/5} t^n \quad (1)$$

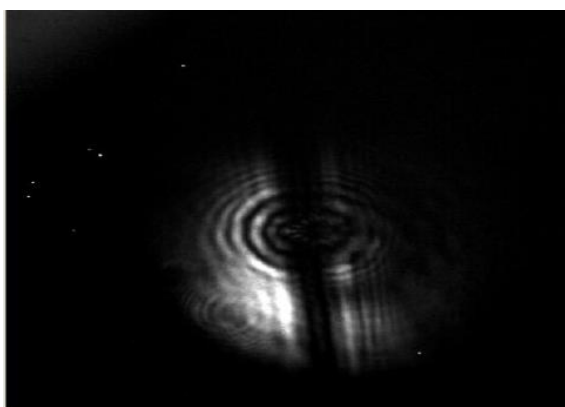
۳. تئوری و محاسبات

باریکه کاوش با انرژی مد نظر و باریکه برهمکنشی نیز با انرژی دیگری مثلاً (۱۴۰) میلی ژول قرار می‌گیرد. اختلاف زمانی بین مدار فرمان نوسانگر کاوش و برهمکنش نیز اعمال می‌شود. یعنی باریکه کاوش چند نانو ثانیه پس از باریکه برهمکنش از میان پلاسما عبور می‌کند و سایه پلاسما و حرکت موج یون-صوت را روی دوربین می‌اندازد. به عنوان مثال شکل ۵ تاخیر سایه‌نگاری در زمان ۷۰ نانوثانیه در یکی از پروژه‌های انجام شده می‌باشد.

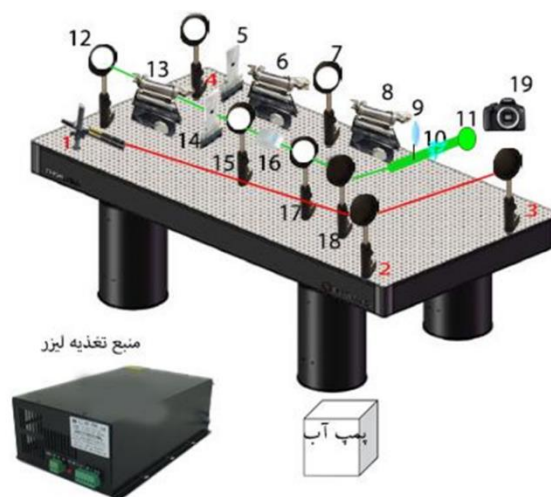


شکل ۵: طرح تاخیری ایجاد شده روی اسیلوسکوپ در زمان ۶۳

نانوثانیه [۷]



شکل ۶: تصویر سایه‌نگاری در زمان ۶۳ نانو ثانیه [۷]



شکل ۴. شماتیک چیدمان سایه‌نگاری استفاده شده

دستگاه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱. لیزر هلیوم نئون جهت هم‌راستا سازی محور اپتیکی
۲. آینه ۱۰۰ بازتاب مرئی
۳. آینه ۱۰۰ درصد بازتاب طول موج ۱۰۶۴ نانومتر
۴. جاذب اشباع پذیر
۵. نوسانگر (اوسیلاتور)
۶. آینه ۷۰ درصد بازتاب جهت ساخت لیزر
۷. تقویت کننده (آمپلی فایر)
۸. عدسی همگرا جهت کانونی کردن نور لیزر و تولید پلاسما
۹. مکان تشکیل پلاسما
۱۰. تصویر پلاسما
۱۱. آینه ۱۰۰ درصد بازتاب طول موج ۱۰۶۴ نانومتر جهت ساخت لیزر هارمونیک دوم ND-YAG
۱۲. نوسانگر برای تولید لیزر هارمونیک دوم
۱۳. جاذب اشباع پذیر
۱۴. بلور KDP برای تولید هماهنگ دوم از باریکه کاوش مورد استفاده قرار می‌گیرد.
۱۵. آینه ۴۰ درصد بازتاب جهت ساخت لیزر کاوش
۱۶. آینه ۱۰۰ درصد بازتاب ۱۰۶۴ نانومتر جهت بازتاب نور با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و عبور نور ۵۳۲ نانومتر
۱۷. آینه ۱۰۰ درصد بازتاب مرئی جهت هدایت نور ۵۳۲ نانومتر بر روی پلاسما
۱۸. دوربین یا CCD جهت تصویربرداری

پس از ثبت تصویرها میزان پیش‌روی لبه موج اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به مدل موج ضربه گسترش جبهه موج پلاسما را با رابطه ۲ نشان می‌دهیم. این رابطه را اولین بار سادوف-تیلور بصورت تجربی در آزمایشگاه به دست آورد [۱۵].

$$R = (E/\rho)^{1/5} t^{2/5} \quad (2)$$

در این رابطه R شعاع گسترش جبهه موج پلاسما، E انرژی لیزر، ρ چگالی گاز زمینه و t مدت زمان پس از کندگی است [۱۶] و [۱۵].

پس از ثبت تصاویر می‌توان سرعت انتشار موج را به دست آورد. به این ترتیب که از روی تصویر در یک زمان معین فاصله طی شده به وسیله موج را اندازه می‌گیریم و بر زمان انتشار تقسیم می‌کنیم.

با برازش داده‌های موجود در جدول ۱ برای سرعت استاندارد یون-صوت معادله‌ای برای وابستگی دما و سرعت می‌توان نوشت [۱۷]. رابطه‌ای که برای سرعت و دمای پلاسما در نظر گرفته می‌شود به صورت معادله ۵ می‌باشد. پس از محاسبه سرعت پلاسما بصورت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ با رابطه ۵ دمای پلاسما قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

$T(K)$	$D(km/s)$	$P(atm)$	ρ_1/ρ_0	$T(K)$	$D(km/s)$	$P(atm)$	ρ_1/ρ_0
۲۹۳	۰/۳۳	۱	1	۱۴۰۰۰	۹/۳۱	۱۰۰۰	۱۱/۱۰
۴۸۲	۰/۷۰	۵	۲/۸۴	۲۰۰۰۰	۱۱/۸	۱/۶۵۰	۱۰/۱۰
۷۰۵	۰/۹۸	۱۰	۳/۸۸	۳۰۰۰۰	۱۵/۹	۲/۹۸۰	۹/۷۵
۲۲۶۰	۲/۱۵	۵۰	۶/۰۴	۵۰۰۰۰	۲۳/۳	۶/۳۸۰	۸/۹۷
۴۰۰۰	۳/۳۵	۱۲۷	۸/۵۸	۱۰۰۰۰۰	۴۰/۱	۱۹/۲۰۰	۸/۶۲
۶۰۰۰	۴/۵۴	۲۳۶	۹/۷۵	۲۵۰۰۰۰	۸۱/۶	۷۶/۵۰۰	۷/۸۰
۸۰۰۰	۵/۶۴	۳۶۶	۱۰/۳۰	۵۰۰۰۰۰	۱۱۴/۰	۱۴۳/۹۰۰	۶/۲۷
۱۰۰۰۰	۶/۹۷	۵۶۱	۱۱/۰۰				

پس از محاسبه سرعت انتشار موج یون-صوت می‌توان رابطه‌ای تجربی برای به دست آوردن دمای آن ارائه داد. طبق معادله ۳ برای گاز کامل مجذور سرعت با فشار متناسب است. برای بستگی سرعت موج صوتی به فشار و چگالی در گاز کامل دو اتمی و همچنین سرعت موج یونی در درون پلاسما، به صورت زیر است.

$$c_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \quad (3)$$

$$c_i = \sqrt{\frac{2K_B T}{m_i}} \quad (4)$$

در معادله ۳، p فشار موج و ρ چگالی آن می‌باشد. در معادله ۴، K_B ثابت بولتزمن، $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت است که در قسمت بعدی توضیح داده شده است [۱۶] و [۸].

مدلی که برای دمای پلاسمایی ارائه می‌شود به صورت رابطه ۵ است.

$$u = at^b \quad (5)$$

که مقادیر a و b مقادیر ثابتی هستند، که به ترتیب ۰/۰۱۶۰۹ و ۰/۶۷۸۲۳ می‌باشد [۱۶].

در این رابطه سرعت برحسب $\frac{km}{s}$ و دما بر حسب الکترون ولت eV است.

با مشخص بودن دما و سرعت و مکان جبهه موج به دست آمده چگالی الکترونی پلاسما را محاسبه می‌کنیم.

ابتدا گازی را در حالت سکون بررسی کنیم، این گاز با چگالی و فشار ثابت ρ_0 و p_0 توسط یک پیستون محدود شده است. فرض می‌کنیم که گاز در زمان اولیه توسط پیستونی که با سرعت ثابتی به داخل گاز حرکت می‌کند فشرده می‌شود که با u نشان می‌دهیم. تنها یک راه حل وجود دارد که

معادلات سرعت اول و دومی به ترتیب به رابطه‌ی $c_s = \sqrt{\frac{2k_B T}{m_i}}$ برای سرعت موج یونی در درون پلاسما و رابطه $c_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$ برای بستگی سرعت موج صوتی به فشار و چگالی در گاز کامل دو اتمی در یک فرایند بی‌درو شباهت زیادی دارند. ثابت k_B ثابت بلتزن و $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت است. دامنه‌ی اعتبار روابط بالا در گستره دمایی، فشار و چگالی به ترتیب 5×10^5 کلوین، 1.5×10^5 و ۱۱ برابر چگالی هوا در شرایط متعارفی است. با حذف u و p میان روابط بالا معادله بستگی چگالی به دما برای هوا بدست می‌آید.

$$\rho = 3.45728T^{0.0507} \quad (13)$$

در روابط بالا فشار بر حسب اتمسفر، سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه، دما بر حسب کلوین و ρ چگالی است [۱۶].

۴. یافته‌ها

سؤال اصلی این پژوهش آن بود که: رفتار زمانی پارامترهای پلاسما القایی لیزری نظیر سرعت، دما و چگالی در محیط‌های هوا و آب چگونه است و چه تفاوت‌هایی میان آن‌ها وجود دارد؟ «برای پاسخ به این پرسش، مجموعه‌ای از آزمایش‌های کنترل شده با استفاده از لیزر Nd:YAG در دو سطح انرژی (۱۴۰ و ۲۰۰ میلی ژول) و در دو محیط هدف (هوا و آب) انجام شد. داده‌های حاصل از تصاویر سایه‌نگاری ثبت شده در بازه‌های زمانی از ۱ تا ۱۰ میکروثانیه، به منظور استخراج پارامترهای فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از اندازه‌گیری جابه‌جایی جبهه موج پلاسما بر حسب زمان، نمودارهای سرعت-زمان برای هر چهار حالت (هوا و آب، هر کدام با دو سطح انرژی) رسم گردید. نمونه‌ای از داده‌های ثبت شده در جدول زیر نمایش داده می‌شود:

محیط	انرژی لیزر (mJ)	سرعت متوسط (km/s)
هوا	۱۴۰	۳/۲۱
هوا	۲۰۰	۳/۸۷
آب	۱۴۰	۲/۴۶
آب	۲۰۰	۳/۰۰

شرایط مرزی مسئله را در گاز دست نخورده برآورده کند $u=0$ و $p=p_0$ و $\rho=\rho_0$ باشد. درحالی که در ناحیه کنار پیستون سرعت گاز وجود دارد. ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال در حضور امواج ضربه‌ای، به کمک معادلات زیر برای پایداری جرم، پایداری تکانه و انرژی و با در دست بودن معادله‌ی حالت برای سیال قابل محاسبه است [۱۸].

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (6)$$

$$\rho_1 \left(U_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} \right) = \rho_2 \left(U_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} \right) \quad (7)$$

$$e_1 + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} = e_2 + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} \quad (8)$$

در این روابط، ρ_1 و ρ_2 چگالی جرمی، u_1 و u_2 سرعت حرکت سیال p_1 و p_2 فشار در دو سوی مرز جدایی دو محیط e_1 و e_2 انرژی درونی سیال بر واحد جرم است. موج ضربه‌ای سبب گسستگی فشار، چگالی و سرعت در لبه‌ی خود در حین انتشار موج می‌شود. فشار در لبه‌ی موج ضربه‌ای رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید.

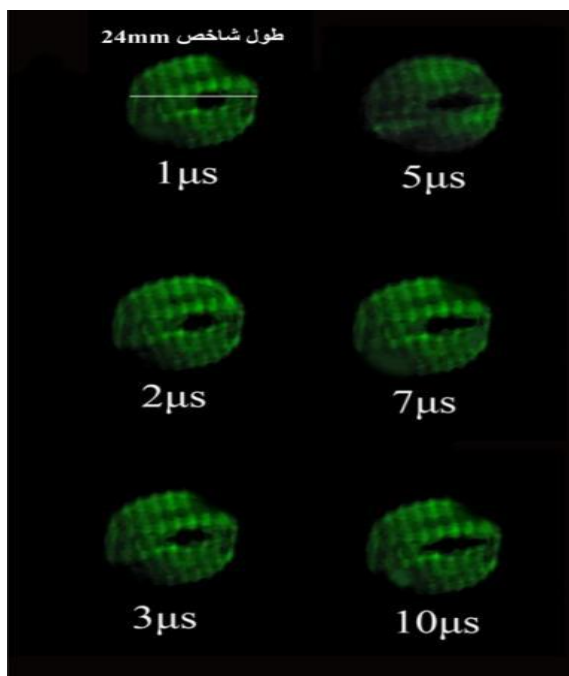
$$P_2 = P_1 + \rho_1 U_1^2 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (9)$$

که در آن، u_1 سرعت موج ضربه‌ای در محل گسستگی پلاسما و محیط بوده و $\rho_1 = 1.293 \frac{kg}{m^3}$ و $p_1 = 1 atm$ برای اندازه‌گیری دمای پلاسما از راه مطالعه‌ی انتشار امواج ضربه‌ای در مرز جدایی پلاسما و محیط، معادله‌ی حالت هوا مورد نیاز است. برای این منظور از داده‌های زلدویچ و همکارانش استفاده شده است. از برازش داده‌های جدول ۱ به توابعی با رفتاری نزدیک به رفتار سرعت انتشار موج اکوستیکی در پلاسما و گاز کامل، و معادله‌ی حالت گاز کامل، معادله‌های سرعت انتشار موج در هوا و معادله‌ی حالت به شکل زیر به دست آمد.

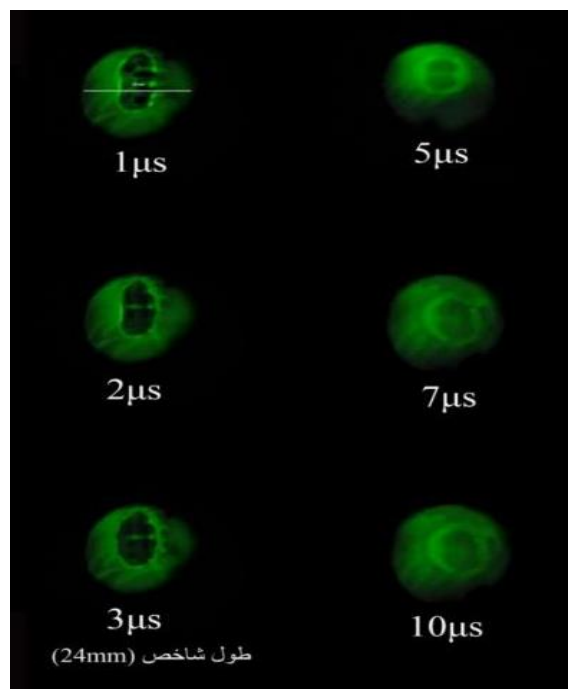
$$u = at^b \quad (10)$$

$$u = \left(1.4796 \frac{p}{\rho} \right)^{0.5} \quad (11)$$

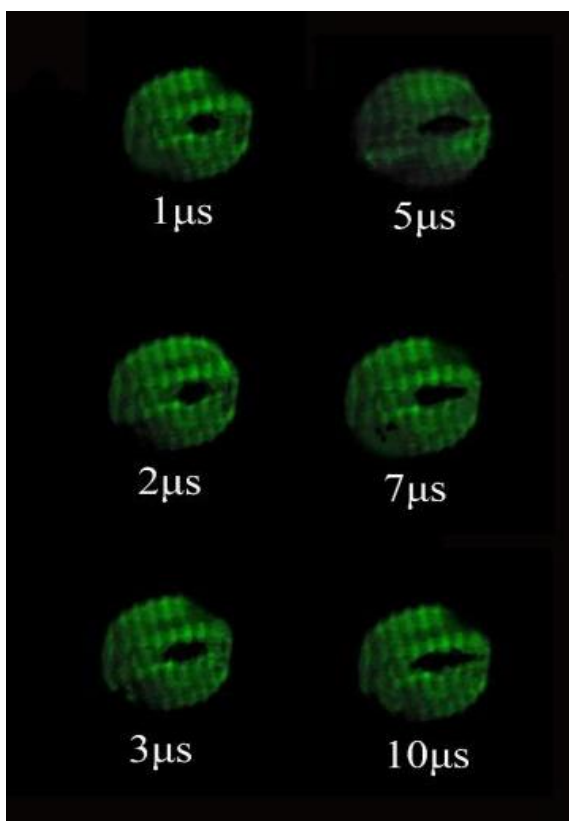
$$p = 4.3763 * 10^{-5} \rho T^{1.4656} \quad (12)$$



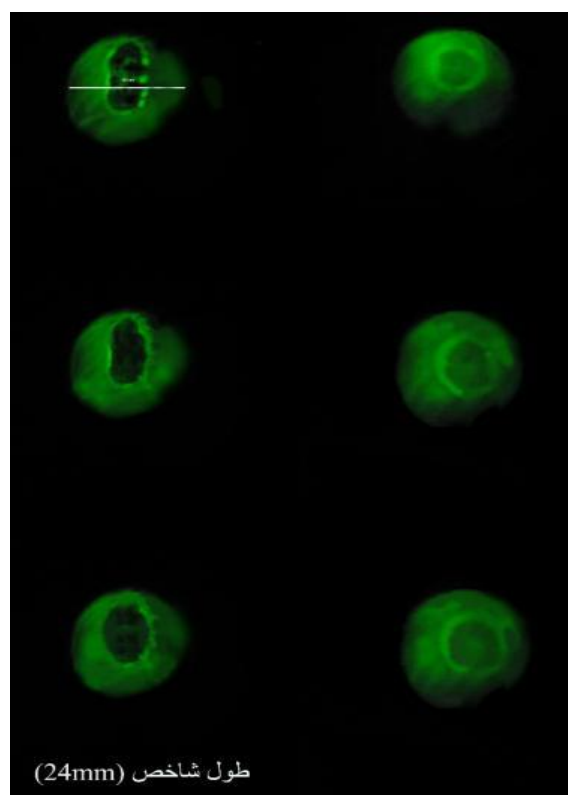
شکل ۹. تصاویر حاصل از سایه‌نگاری در زمان‌های تاخیری ۱ الی ۱۰ میکروثانیه در آب ۱۴۰ میلی ژول



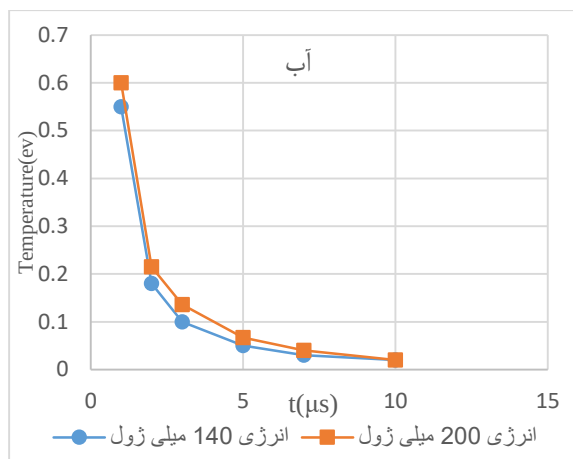
شکل ۷. تصاویر حاصل از سایه‌نگاری در زمان‌های تاخیری ۱ الی ۱۰ میکروثانیه در هوا با انرژی ۱۴۰ میلی ژول



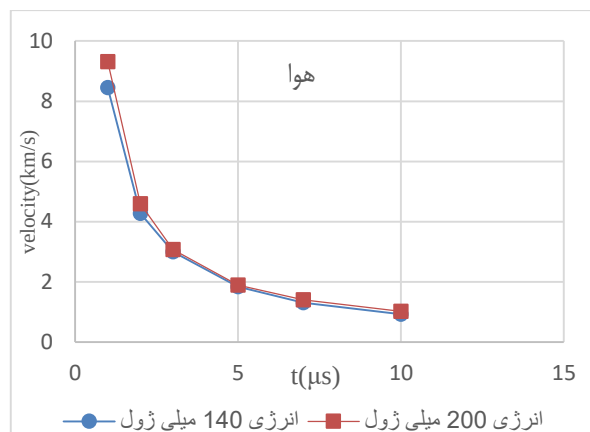
شکل ۱۰. تصاویر حاصل از سایه‌نگاری در زمان‌های تاخیری ۱ الی ۱۰ میکروثانیه در آب ۲۰۰ میلی ژول



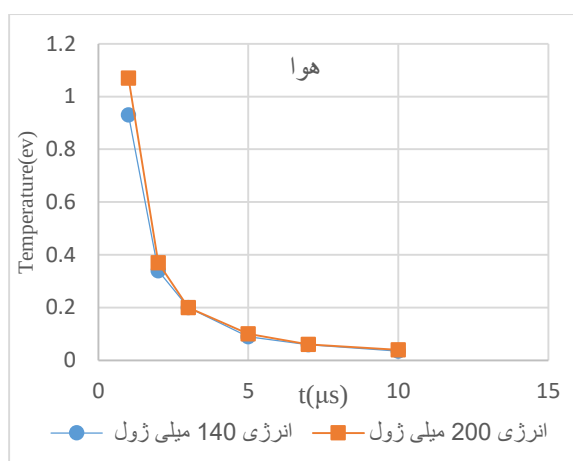
شکل ۸. تصاویر حاصل از سایه‌نگاری در زمان‌های تاخیری ۱ الی ۱۰ میکروثانیه در هوا با انرژی ۲۰۰ میلی ژول



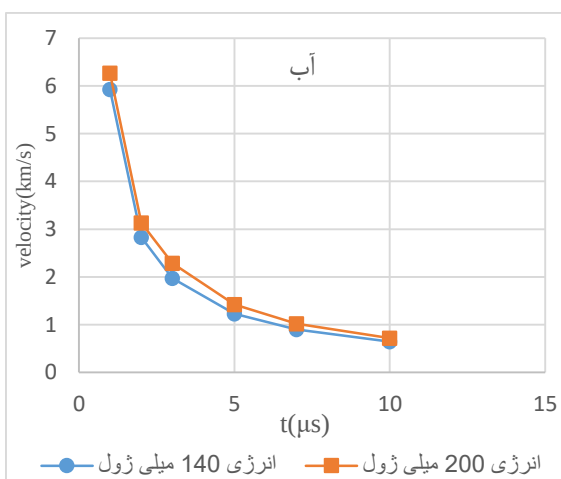
شکل ۱۳. نمودار دما زمان پلاسمای حاصل از آب با انرژی ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی ژول نسبت به زمان



شکل ۱۱. مقایسه سرعت پلاسمای حاصل از هوا در دو انرژی ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی ژول نسبت به زمان



شکل ۱۴. نمودار دما زمان پلاسمای حاصل از هوا با انرژی ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی ژول



شکل ۱۲. مقایسه سرعت پلاسمای حاصل از آب در دو انرژی ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی ژول نسبت به زمان

نسبت به زمان افزایش انرژی لیزر موجب افزایش دمای پلاسمای می شود. دمای پلاسمای در هوا بالاتر از آب گزارش شده است، که نشان دهنده راندمان بیشتر یونیزاسیون در محیط های با چگالی کمتر است.

یافته های مربوط به چگالی پلاسمای

چگالی جرم پلاسمای با استفاده از مدل گاز ایده آل و تحلیل شدت سایه نگاری محاسبه شد. نتایج در جدول آمده است.

محیط	انرژی لیزر (mJ)	چگالی پلاسمای (kg/m³)
هوا	۱۴۰	۵/۰۴
هوا	۲۰۰	۵/۳۵
آب	۱۴۰	۴/۹۱
آب	۲۰۰	۴/۹۵

تحلیل: سرعت گسترش پلاسمای در هوا همواره بیشتر از آب است که به تفاوت چگالی و قابلیت فشرده سازی این دو محیط بازمی گردد. همچنین با افزایش انرژی لیزر، افزایش قابل ملاحظه ای در سرعت مشاهده می شود.

یافته های مربوط به دمای پلاسمای

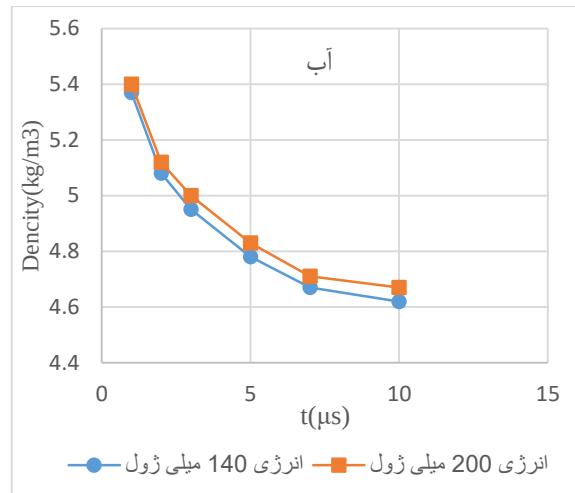
دمای پلاسمای با استفاده از مدل موج شوک و رابطه ی بین سرعت و دما محاسبه شد. مقادیر به دست آمده به شرح زیر است:

محیط	انرژی لیزر (mJ)	دمای پلاسمای (K)
هوا	۱۴۰	۳۲۰۰
هوا	۲۰۰	۳۴۳۵
آب	۱۴۰	۱۸۵۰
آب	۲۰۰	۲۰۰۸

می‌دهد که موجب افت تدریجی دما می‌گردد. این روند به وضوح در نمودارهای سرعت-زمان، دما-زمان و چگالی-زمان مشهود است. همچنین مشاهده شد که افزایش انرژی لیزر منجر به افزایش تمام پارامترهای پلاسمای می‌شود. این نتیجه کاملاً قابل انتظار و منطبق با مدل‌های نظری است؛ چرا که افزایش انرژی منجر به افزایش شدت میدان الکتریکی، افزایش نرخ یونیزاسیون و همچنین تحریک شدیدتر سطح ماده هدف می‌شود. از منظر علمی، این پژوهش گام مهمی در به کارگیری روش سایه‌نگاری به عنوان یک ابزار اندازه‌گیری کمی در فیزیک پلاسمای به شمار می‌رود. در حالی که بسیاری از مطالعات پیشین تنها بر تحلیل کیفی سایه‌ها و مرزهای جبهه موج تکیه داشتند، در این پژوهش با بهره‌گیری از پردازش عددی تصاویر، اندازه‌گیری دقیق سرعت، دما و چگالی پلاسمای فراهم شد. این دستاورد می‌تواند مسیر را برای استفاده وسیع‌تر از تکنیک سایه‌نگاری در اندازه‌گیری ویژگی‌های پیچیده پلاسمای گذرا هموار کند. از سوی دیگر، نتایج به دست آمده می‌تواند برای بهبود مدل‌های عددی و تحلیلی پلاسمای در محیط‌های متفاوت مورد استفاده قرار گیرد. در مطالعات پلاسمای کاربردی، همواره نیاز به داده‌های تجربی دقیق برای واسنجی مدل‌های نظری وجود دارد. این مقاله مجموعه‌ای معتبر از داده‌های قابل اعتماد را برای پلاسمای در دو محیط متفاوت فراهم می‌سازد. علاوه بر این، مطالعه رفتار پلاسمای در محیط‌های مختلف زمینه‌ای برای درک بهتر برهم‌کنش ماده-لیزر در مقیاس نانو ثانیه فراهم می‌کند. تفاوت پارامترها بین هوا و آب نه تنها بر شناخت ویژگی‌های ترمودینامیکی محیط مؤثر است، بلکه اطلاعاتی دقیق برای طراحی سیستم‌های لیزری در صنایع گوناگون به‌ویژه در مهندسی اپتیک، نانو فناوری و فیزیک پلاسمای فراهم می‌آورد.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نمایی دقیق از رفتار زمانی پلاسمای القاشده توسط لیزر در دو محیط متفاوت هوا و آب ارائه می‌دهند. مهم‌ترین پارامترهایی که اندازه‌گیری و تحلیل شدند، شامل سرعت گسترش جبهه موج پلاسمای، دمای تشکیل پلاسمای و چگالی جرم آن بودند. نتایج این پژوهش بر



شکل ۱۵. مقایسه چگالی پلاسمای حاصل از آب در دو انرژی ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی ژول نسبت به زمان

افزایش چگالی با افزایش انرژی لیزر همخوانی دارد، اما اختلاف بین محیط‌ها نسبت به دما و سرعت کمتر است. این نمودارها نشان‌دهنده روند نزولی دما، سرعت و چگالی پلاسمای در زمان‌های پس از تشکیل آن هستند، که با مدل‌های نظری موجود از کاهش انرژی در اثر گسترش و خنک شدن پلاسمای تطابق دارند.

۵. بحث

مطابق نتایج به دست آمده، گسترش جبهه موج پلاسمای در هوا با سرعتی بیشتر از آب رخ داده است. این مسئله از یک سو به تفاوت چگالی محیط‌ها بازمی‌گردد؛ هوای اتمسفر دارای چگالی کمتر و مقاومت پایین‌تری در برابر گسترش پلاسمای داغ است، در حالی که آب محیطی بسیار متراکم‌تر است و انرژی بیشتری برای گسترش نیاز دارد. از سوی دیگر، ویژگی‌های گرمایی و ضریب رسانش حرارتی محیط نقش مؤثری در سرعت اولیه گسترش ایفا می‌کند. به همین ترتیب، دمای بالاتر پلاسمای در محیط هوا نیز با سرعت بیشتر آن همبستگی دارد. کاهش دما، سرعت و چگالی پلاسمای با گذر زمان پس از تب لیزری نیز از نتایج مهم این پژوهش است. این کاهش در فاز گسترش پلاسمای به دلیل افزایش حجم گاز یونیزه شده و در نتیجه کاهش چگالی انرژی است. با گسترش پلاسمای، پدیده‌هایی مانند خنک شدن تابشی، باز ترکیب الکترون‌ها با یون‌ها، و انتقال گرما به محیط اطراف رخ

آن دلالت دارد که بررسی دقیق رفتار زمانی پلاسماهای القاشده توسط لیزر در محیط‌های گازی و مایع، نقش اساسی در درک دینامیک گسترش، انتقال حرارت و تغییرات پارامترهای فیزیکی این پدیده دارد. هدف اصلی این تحقیق اندازه‌گیری و تحلیل سه پارامتر کلیدی پلاسما شامل سرعت، دما و چگالی با استفاده از روش سایه‌نگاری بود. برای تحقق این هدف، از لیزر $Nd:YAG$ در دو سطح انرژی ۱۴۰ و ۲۰۰ میلی‌ژول استفاده شد و پلاسما در دو محیط مجزا شامل هوای اتمسفر و آب تشکیل گردید. سپس با بهره‌گیری از تکنیک تصویربرداری سایه‌نگاری و ابزارهای دقیق اندازه‌گیری اپتیکی، تصاویر مربوط به پلاسما در فواصل زمانی مشخص ثبت و مورد تحلیل عددی قرار گرفت. داده‌های تجربی به‌دست آمده نشان داد که سرعت گسترش جبهه موج پلاسما در هوا بالاتر از آب است، که این امر با تفاوت در چگالی و ضریب فشردگی این دو محیط قابل توجیه می‌باشد. همچنین دمای پلاسما در هوا بیشتر از آب اندازه‌گیری شد و چگالی پلاسما نیز در هوا کمی بالاتر از آب بود. افزایش انرژی لیزر نیز به‌طور مستقیم باعث افزایش این سه پارامتر گردید. تحلیل‌های زمانی نشان داد که با گذشت زمان پس از تشکیل پلاسما، روندی کاهشی در سرعت، دما و چگالی مشاهده می‌شود که دلیل آن را می‌توان در پدیده‌هایی چون بازترکیب یون‌ها، گسترش سریع حجم پلاسما و انتقال حرارت به محیط اطراف دانست. این نتایج با مطالعات معتبر پیشین همچون پژوهش‌های ویلاگران، فوکوچی، میناردی و بودای سازگار است و صحت روش تجربی و تحلیل‌های انجام‌شده را تأیید می‌کند. از منظر کاربردی، یافته‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های لیزری صنعتی، به‌ویژه در فرآیندهایی مانند لایه‌نشانی لیزری، شتاب‌دهی پلاسما، تشخیص از راه دور، طیف‌سنجی شکست، و حتی کاربردهای زیست‌پزشکی مورد استفاده قرار گیرد. یکی از پیشنهاد‌های مهم برای کاربردهای صنعتی آن است که در فرایندهای برهم‌کنش لیزر با هدف در محیط مایع، میزان انرژی لیزر با دقت بیشتری تنظیم گردد، چرا که به‌دلیل ضریب جذب بالا و چگالی محیط، پلاسما به‌سرعت دچار افت دما و چگالی می‌شود که ممکن است بر کیفیت

فرآیند اثر منفی بگذارد. همچنین در کاربردهای زیستی، محیط مایع غالباً شبیه‌ساز محیط‌های بافتی بدن است و بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند به طراحی دقیق‌تر لیزرهای جراحی و تشخیصی کمک کند. برای پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود مطالعات مشابهی با لیزرهای فمتوثانیه و پیکوثانیه انجام گیرد تا بتوان تأثیر زمان پالس بر روند تشکیل و گسترش پلاسما را نیز به‌دقت بررسی کرد. همچنین به‌کارگیری هم‌زمان روش‌های تداخل‌سنجی، طیف‌سنجی نشر نوری (OES) و شبیه‌سازی عددی می‌تواند به بررسی هم‌زمان پارامترهای بیشتر نظیر چگالی الکترونی، میدان‌های مغناطیسی داخلی و گسترش غیرخطی پلاسما منجر شود. از دیگر پیشنهادات می‌توان به بررسی پلاسما در محیط‌های دیگر مانند گازهای نجیب، محیط‌های تحت فشار منفی، یا حتی محیط‌های پلیمری اشاره کرد. در کنار این موارد، محدودیت‌های این پژوهش نیز شایان ذکر است. نخست، وابستگی نتایج به دقت چیدمان اپتیکی و صحت تنظیمات نوری لیزر می‌تواند خطای سیستماتیک در ثبت تصاویر ایجاد کند. همچنین محدودیت وضوح زمانی دوربین‌های CCD مورد استفاده، امکان ثبت دقیق‌تر فرآیندهای اولیه تشکیل پلاسما را کاهش می‌دهد. دیگر آن که دقت در تعیین چگالی و دما به‌صورت غیرتماسی وابسته به مدل‌های نظری است و صحت این مدل‌ها نیز خود تابع فرضیات خاصی مانند تعادل محلی ترمودینامیکی (LTE) است که ممکن است در شرایط واقعی همیشه برقرار نباشد. در نهایت می‌توان گفت که این پژوهش با ارائه یک ساختار منسجم تجربی و تحلیل عددی دقیق، زمینه را برای مطالعات آتی در حوزه فیزیک پلاسما و فناوری‌های وابسته به لیزر فراهم ساخته است و امید است که مورد استفاده پژوهشگران و مهندسان فعال در این حوزه قرار گیرد.

سپاسگزاری

از تمامی استادان، پژوهشگران و فرهیختگانی که با دانش، راهنمایی‌ها و حمایت‌های ارزشمند خود در شکل‌گیری و تکمیل این مقاله نقش داشته‌اند، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم. همچنین از دکتری داود شهابی و دکتر ناد امیری راد

- density measurements. In: 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference; 2008 Jun 17 (Vol. 1, pp. 626-629). IEEE.
- [13] Hargather MJ, Settles GS. Retroreflective shadowgraph technique for large-scale flow visualization. *Applied optics*. 2009 Jul 27;48(22):4449-57.
- [14] Buday J, Pořízka P, Buchtová M, Kaiser J. Determination of initial expansion energy with shadowgraphy in laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2021 Aug 1;182:106254.
- [15] Campanella B, Legnaioli S, Pagnotta S, Poggialini F, Palleschi V. Shock waves in laser-induced plasmas. *Atoms*. 2019 Jun 7;7(2):57.
- [16] Herianto S, Hou CY, Lin CM, Chen HL. Nonthermal plasma-activated water: A comprehensive review of this new tool for enhanced food safety and quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021 Jan;20(1):583-626.
- [17] Zel'dovich YP, Raizer YP. *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*. Moscow: Academy of Sciences, U.S.S.R.; 1966.
- [18] Shrivastava R. Shock Wave's Existence, Salient Features And Importance. *International Journal of Mathematics Trends and Technology-IJMTT*. 2019;65.

پی‌نوشت‌ها

۱. structured light
۲. Distortion
۳. Image Plane

که با فراهم‌سازی امکانات و بستر مناسب پژوهشی، انجام این تحقیق را ممکن ساخته است، قدردانی به‌عمل می‌آید.

مراجع

- [1] Murphy AB. Computational modelling of thermal plasmas for industry. *Reviews of Modern Plasma Physics*. 2024 Aug 9;8(1):26.
- [2] Su Y, Wang Z, Wang Y, Xue R, Wang B, Zhong W, Peng X, Nie S, Cai Z, Wan W. Multiple-image encryption based on authenticable phase and phase retrieval under structured light illumination. *Optics Communications*. 2024 Aug 1;564:130603.
- [3] Cheriani MT, Mirzaei A. Plasma-Treated Nanostructured Resistive Gas Sensors: A Review. 2025.
- [4] Lokini P, Dumitrache C, Windom BC, Yalin AP. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Shadowgraphy of Acoustically Levitated Heptane Droplets. In: *Photonics*; 2024 Nov 7 (Vol. 11, No. 11, p. 1044). MDPI.
- [5] M Jafari Seyed Haghighi. Study of Shock Waves Resulting from Induced Fracture by Shadowgraphy[MSc thesis]. Shahid Beheshti University; 2017 (1396).
- [6] Kwapis EH, Hewitt M, Hartig KC. Shock physics and shadowgraphic measurements of laser-produced cerium plasmas. *Optics Express*. 2023 Mar 9;31(6):10694-708.
- [7] L Esfahani. Shadowgraphy of Laser-Produced Plasma in a Nanosecond Laser Field[MSc thesis]. Islamic Azad University, Science and Research Branch; 2015 (1394).
- [8] Settles GS. *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Berlin: Springer-Verlag; 2001.
- [9] Gautam G, Helstern CM, Drake KA, Parigger CG. Imaging of Laser-induced Plasma Expansion Dynamics in Ambient Air. 2016;7(June):45-51.
- [10] Villagran-Muniz M, Sobral H, Camps E. Shadowgraphy and interferometry using a CW laser and a CCD of a laser-induced plasma in atmospheric air. *IEEE transactions on plasma science*. 2001 Aug 31;29(4):613-6.
- [11] Fukuchi T, Nemoto K. High-speed shadowgraphy and interferometry using an acousto-optic laser deflector. In: *Ultrafast X-Ray Detectors, High-Speed Imaging, and Applications*; 2005 Sep 21 (Vol. 5920, pp. 132-141). SPIE.
- [12] Minardi S, Gopal A, Petridis C, Tatarakis M. Direct comparison of quantitative shadowgraphy with interferometry for plasma