

کنترل جریان مافوق صوت عبوری از دو مدل نوک پخ و نوک تیز با استفاده از پرتو لیزر

فاطمه جعفری خرمی^۱، روح الله خوشخو^{۲*}، سیدمحمد رضا دربان^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶)

چکیده

کنترل جریان و کاهش پسا به ویژه در جریان مافوق صوت، همواره در صنعت هوافضا مورد توجه بوده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی قابلیت تأثیرگذاری لیزر بر آیرودینامیک جریان هوا در جریان مافوق صوت در اطراف وسیله پرنده است. در این تحقیق، به بررسی میزان جابه‌جایی و تغییر زاویه موج شوک با و بدون تابش لیزر بر مدل‌های مورد نظر برای دستیابی به راهکار جدید یعنی استفاده از لیزر جهت کاهش پسا معطوف شده است. بدین منظور، تمامی آزمایش‌ها تجربی در تونل باد مافوق صوت با استفاده از دو مدل مخروط نوک پخ و نوک تیز و در ماخ‌های ۱/۷، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۴ انجام پذیرفته است. همچنین از دو مدل لیزر MSL-FN-532-S و Q-SMART850 جهت بررسی تأثیر لیزر بر موج شوک استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، در مدل مخروط نوک پخ، تابش لیزر به‌طور پیوسته در جلوی مدل، موجب افزایش فاصله موج شوک تا جسم و در نتیجه منجر به کاهش پسا می‌شود و در مدل مخروط نوک تیز، با تابش لیزر، موج شوک ایجاد شده زاویه کمتری نسبت به حالت بدون تابش لیزر پیدا می‌کند و در نهایت، با افزایش انرژی پالس‌های لیزر و در حقیقت، استفاده از لیزر با توان بالاتر، میزان تأثیر پرتو لیزر بر موقعیت و یا زاویه موج شوک بیشتر می‌شود.

کلیدواژه‌ها: لیزر، جریان مافوق صوت، موج شوک، بررسی تجربی، کنترل جریان

Supersonic Flow Control over Blunt and Sharp Models Using Laser Beam

F. Jafari Khorami, R. Khoshkhoo*, S. Mohammad Reza Darbani
Assistant Professor, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 27/09/2021; Accepted: 12/03/2022)

Abstract

Flow control and drag reduction, especially in supersonic flow, have always been a topic of interest in aerospace industry. The purpose of current study was to investigate the effect of laser on supersonic air flow. In this research, the impact of displacement values and shock wave angle alteration on the drag reduction were assessed in the desired models, with and without laser beam application. All experiments have been performed in supersonic wind tunnels using sharp and blunt cone models in Mach 1.7, 2, 2.5, 3 and 3.4. Also, two laser models MSL-FN-532-S and Q-SMART 850 have been used to investigate the effect of laser on shock wave. Experimental results show that in the blunt-cone model, continuous laser radiation increases the wave-object distance, thereby reducing the drag. In the sharp-cone model, laser radiation decreases the shock wave angle comparing the state without laser beam; therefore, by raising the laser pulses energy and applying more powerful lasers, we can promote the beam effect on displacement or shock wave angle.

Keywords: Laser, Supersonic Flow, Shock Wave, Experimental Survey, Flow Control

۱. مقدمه

پدیده‌های فیزیکی تخلیه انرژی در جریان مافوق صوت انجام شده است. بلوکن و همکاران [۶]، با استفاده از معادلات جریان لزوج و استفاده از تابع منبع انرژی تعریف شده، مقدار انرژی انتقال یافته را به صورت دوبعدی بررسی کردند.

کراسنوبایو و سیونیو [۷]، از یک تابع منبع انرژی سه بعدی برای تحلیل تأثیر لیزر بر جریان سیال استفاده کرده و آن را به صورت تحلیلی حل کرده و افت فشار استاتیک ناشی از تخلیه انرژی را مشاهده کردند. در مطالعات تحلیلی بعدی، کراسنوبایو و ترنت اوا [۸ و ۹]، حل جریان مافوق صوت را برای یک تابع منبع انرژی کلی به ترتیب در فضای دوبعدی و سه بعدی گسترش دادند. ادلگرن و همکاران [۱۰]، هنگام اعمال تخلیه لیزر در بالادست جریان مافوق صوت، افت لحظه‌ای فشار روی سطح کره را مشاهده کردند.

لوین و ترنت اوا [۱۱ و ۱۲]، یک تابع متقارن ثابت گاوسی را به عنوان منبع تخلیه انرژی با زاویه حمله صفر درجه در نظر گرفتند و معادلات اوپلر را برای جریان مافوق صوت عبوری از مخروط حل کردند. سپس مؤثرترین مکان تخلیه انرژی را در حالت سکون و در ماخ جریان آزاد یافتند. آن‌ها همچنین یک تابع منبع انرژی نامتقارن گاوسی را در زاویه حمله غیر صفر شبیه سازی کردند و در نتیجه مشاهده کردند که افزودن یک زاویه حمله مثبت به محل تخلیه انرژی، میزان پسا را کاهش می‌دهد و میزان برآ را روی مخروط افزایش می‌دهد.

ریگینز و همکاران [۱۳] و ریگینز و نلسون [۱۴]، تخلیه انرژی پایدار را در یک جریان مافوق صوت گذشته از یک نیم کره محاسبه کردند. آن‌ها گردابه‌هایی را که به دلیل برهم کنش منطقه گرم شده با شوک بدنه ایجاد شده‌اند، را تصویربرداری کردند.

جورجیفسکی و لوین [۱۵ و ۱۶]، معادلات اوپلر را برای جریان مافوق صوت با عدد ماخ ۳ عبوری از یک کره را حل کردند. آن‌ها تخلیه انرژی را به عنوان یک شرط اولیه مدل کردند. علاوه بر این، آن‌ها یک موج انبساط تولید شده از اثر متقابل لکه حرارتی با شوک بدنه را که به سمت کره انتشار می‌یابد و لحظه‌ای که فشار سطح را کاهش می‌دهد، مطالعه کردند.

کندالا و کندلر [۱۷]، با حل معادلات ناویر-استوکس با فرض عدم تعادل ترموشیمیایی، مکانیسم جذب انرژی را در یک تخلیه لیزر بررسی کردند. از یک مدل ترموشیمیایی ۱۱ گونه‌ای برای بررسی تأثیرات واقعی گاز در هوا و از مدل تابش برای شبیه سازی پالس لیزر استفاده شد. آن‌ها، تخلیه انرژی را در جریان مافوق صوت عبوری از یک کره مطالعه کردند و جهش فشار را به دلیل برهم کنش موج انفجار با سطح کره و کاهش فشار استاتیک

پدیده‌های دینامیکی سیال اهمیت فوق العاده‌ای در صنعت هوافضا دارند. یکی از این پدیده‌ها، ایجاد موج شوک در جریان مافوق صوت است، که می‌تواند اثرات نامطلوبی از جهت تولید پسا و انتقال حرارت به همراه داشته باشد. کارایی بهتر اجسام پرنده در جریان هوا و کنترل آن، دانشمندان را به فکر راه‌هایی جهت کنترل جریان حول جسم پرنده واداشته است [۱].

یکی از چالش‌های اصلی در صنعت هوافضا، استفاده از وسایل و فناوری‌های جدید جهت بهبود مؤلفه‌های آیرودینامیکی، نظیر کاهش جدایش جریان و کاهش پسا در اطراف وسیله پرنده به‌ویژه در جریان مافوق صوت است. لذا ایده تلفیق صنعت هوافضا با اپتیک و لیزر، جهت استفاده از لیزرهای گوناگون و نوین، برای دستیابی به روش‌های کنترل جریان آیرودینامیکی، چند دهه‌ای است، که آغاز شده و روزبه‌روز بر جذابیت آن افزوده شده است. بررسی برهم کنش لیزر با ماده، اولین بار در سال ۱۹۶۳ پس از اختراع لیزر توسط برچ [۲]، با استفاده از لیزر یاقوت در طول موج (nm) ۶۹۴ با پهنای تپ (ns) ۵۰، برای مطالعه بر روی سطوح مواد مختلف انجام شد. امروزه لیزرها، یک عضو حیاتی از سامانه‌هایی هستند، که به نوعی پیشتازی علم را در حوزه‌های مختلف صنعتی و نظامی و به‌تازگی در علوم هوافضا رقم زده‌اند. بدون شک، شگفتی‌آفرینی انواع لیزرها در کاربردهای گوناگون صنعتی و نظامی، امروزه یک پدیده غیرقابل انکار است. توانایی یک تپ لیزری برای برهم کنش با ماده و ایجاد پلاسمای سطحی در محلی که پرتو لیزر، کانونی شده است، به نظر می‌رسد، شاه‌راهی است به سوی روشی خاص، که می‌توان از آن جهت کنترل جریان مافوق صوت بهره‌برداری نمود [۳ و ۴].

مطالعات زیادی در زمینه کاهش پسای وسایل پرنده مافوق صوت به منظور افزایش بازده پرواز انجام شده است. یکی از روش‌های کاهش پسا در پروازهای مافوق صوت، لبه نوک تیز جلوی وسیله پرنده است، که با تشکیل یک ناحیه چرخشی، منجر به تولید امواج شوک مخروطی و کاهش میزان ماخ محلی در مقابل وسیله پرنده می‌شود. منتهی باعث افزایش سرعت انتقال حرارت در نوک شده که این امر جزء معایب این روش محسوب می‌شود [۵].

مطالعات جدیدتر، احتمال کاهش پسا با استفاده از تخلیه انرژی را نشان می‌دهد. تخلیه لیزری یا ماکروویو پالسی در مقابل یک بدنه صاف، ساختار جریان را پس از موج ضربه‌ای تغییر می‌دهد و پسا را بدون هیچ‌گونه ضرری، در لبه نوک تیز کاهش می‌دهد. در چند دهه گذشته، مطالعات زیادی برای توضیح

بار و حداکثر فشار کاری مخازن ۴۰ بار) به داخل محفظه آزمایش می‌فرستد. این دستگاه قادر به تولید جریانی در محدوده ماخ ۱/۳ تا ۳/۴ است. محفظه آزمایش دارای ارتفاع ۳۰ mm و پهنای ۲۰ mm است و ماخ موردنظر توسط تغییر سطح مقطع گلوگاه متناسب با فشار ورودی ایجاد می‌شود. مدل‌های مورد استفاده در آزمایش بر روی یک پایه نصب می‌شوند که زاویه حمله آن از ۱۰- تا ۱۰+ درجه قابل تغییر است.

۲-۲. مدل‌های تست

اجسام نمونه در آزمایش‌ها، بنام مدل نوک پخ و نوک تیز (مخروطی شکل) به کار گرفته شده‌اند. جهت نمایش چگونگی جریان آیرودینامیکی حول اجسام پرنده در محفظه آزمایش تونل باد به کار می‌روند. سطح مقطع محفظه آزمایش، یک اینچ مربع است. نمایی از مدل نوک پخ و نوک تیز به ترتیب در شکل (۱)، (الف) و (ب) نشان داده شده است سایز و ابعاد مدل نوک پخ و نوک تیز در شکل (۱) (ج) و (د) نشان داده شده است.

۲-۳. سیستم ثبت تصویر جریان شلیرن^۱

چنانچه در هنگام کار تونل، از طریق پنجره محفظه به مدل نگاه کنیم، الگوی جریان اطراف مدل را نمی‌توان دید. به منظور مرئی سازی این الگو، دستگاه‌های نوری مختلفی به کار گرفته می‌شود که در این تونل باد فراصوتی GA10، از سیستم معمول شلیرن استفاده شده است.

۲-۴. سیستم عکاسی

یک دوربین نیکون دی ۳۲۰۰ برای عکس برداری از پرده تصویر پیش‌بینی شده است. از ویژگی‌های مهم این دوربین می‌توان به حس گر CMOS 24 مگا پیکسلی آن و حداکثر رزولوشن ۶۰۱۶ در ۴۰۰۰ اشاره کرد. همچنین، این دوربین دارای پردازنده 3 Expeed و حداکثر سرعت شاتر ۱/۴۰۰۰ ثانیه است. این دوربین جهت تصویربرداری از نتایج آزمایش‌ها در فاصله ۲۰ سانتی متری از پرده نمایشگر قرار گرفته است.

۲-۵. لیزر

لیزر مورد استفاده، بایستی توانایی لازم جهت تولید تپ‌هایی با شدت کافی برای ایجاد پلازما را دارا باشد. برای این منظور به نظر می‌رسد، که انرژی حدود چند ده میلی ژول و پهنای تپ نانوثانیه کافی باشد. جهت انجام تست، از دو نوع لیزر استفاده شده، که در ادامه شرح داده شده است.

۲-۵-۱. لیزر MSL-FN-532-S

بر روی بدنه مرتبط با امواج انبساطی که به کره منتقل شده است، تأیید کردند.

در یک مطالعه تجربی گسترده، هولدن و وادامز [۱۸]، اندازه‌گیری‌هایی از انتقال حرارت و فشار و همچنین عکس‌های شلیرن را برای انواع مدل‌ها با استوانه توخالی و مخروطی مضاعف ارائه دادند. هدف اصلی این تحقیق، ارائه جزئیات داده تجربی دقیق اندازه‌گیری سطح است که برای ارزیابی توانایی مدل‌های عددی فعلی در پیش‌بینی بارهای سطحی استفاده می‌شود. علاوه بر این، نوین هان و اولیویه به‌طور تجربی، برهمکنش لایه مرزی و موج شوک دوبعدی را در گوه پخ بررسی کرده و تأثیر دمای دیواره بر میزان جدایش را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند، که افزایش درجه حرارت دیواره، منطقه جدایش را در تمامی زوایای لبه حمله افزایش می‌دهد.

در یک شبیه‌سازی عددی، جان و کولکرنی [۱۹]، بررسی تأثیر پخی لبه حمله در میزان اندازه حباب جدایش جریان در تعامل لایه مرزی و موج شوک دوبعدی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، که با افزایش شعاع لبه حمله، میزان ناحیه جدایش افزایش می‌یابد، اندازه ناحیه جدایش وابسته به میزان آنژی و ضخامت لایه مرزی است. استارسیکوزکی و همکاران [۲۰]، به‌طور تجربی و نظری، اثر تخلیه لیزر پالسی بر کنترل پرواز یک پرتابه کوچک دوار را در عدد ماخ ۳ بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند، که برای پرتابه خود، فقط ۲mJ انرژی در هر پالس برای تغییر حرکت پرتابه در زاویه حمله ۱ درجه با ۳/۵cm طول مدل، کافی است.

با توجه به تحقیقات گذشته، در این تحقیق، با استفاده از لیزر، جریان هوای مافوق صوت اطراف وسیله پرنده، گرم و یونیزه شده و پلاسمای ضعیف تشکیل می‌شود. اثرات انتقال گرمای صورت گرفته بر جریان هوا، بر کنترل جریان هوا در اطراف وسیله پرنده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، تأثیر دو نوع مختلف لیزر با انرژی‌های متفاوت به‌صورت پایا و پالسی بر موقعیت شوک نیز مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تأثیرات لیزرهای مورد استفاده در این آزمایش، در هیچ تحقیقاتی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

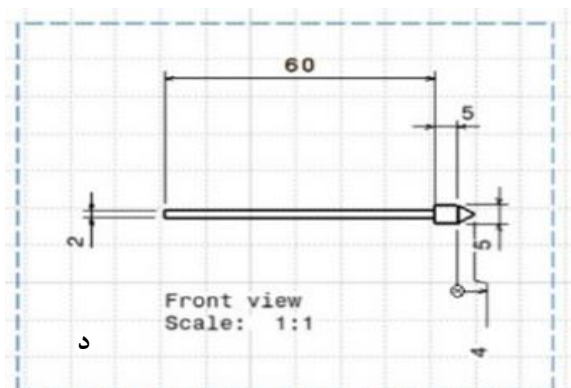
۲. تجهیزات آزمایشگاهی

چون تحقیق، به‌صورت آزمایشگاهی، صورت گرفته است، در این بخش، مجموعه تجهیزات و ابزار مورد نیاز برای آزمون‌ها و سیستم داده‌برداری به‌طور خلاصه ارائه شده است.

۲-۱. تونل باد مافوق صوت

تونل باد فراصوتی مدل GA10، یک تونل باد متناوب است که هوای خشک ذخیره شده را با فشار بالایی (حداکثر فشار اسمی ۲۰

^۱ Schlieren Flow Visualisation

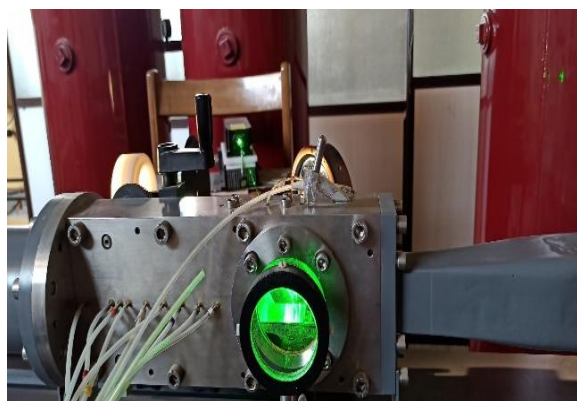


شکل ۱. شماتیک و ابعاد مدل‌های مورد استفاده جهت انجام تست الف) نمایی از مدل نوک پخ (ب) نمایی از مدل نوک تیز (ج) ابعاد مدل نوک پخ (د) ابعاد مدل نوک تیز

در شکل (۲)، شمایی از چیدمان لیزر MSL-FN-532-S به همراه اجزاء آن نمایش داده شده است. در شکل (۳)، نحوه قرارگیری این لیزر رو به روی محفظه آزمایش تونل باد مافوق صوت جهت انجام آزمایش‌ها مورد نظر نشان داده شده است. در تصویر همان‌طور که مشاهده می‌شود، نور لیزر به رنگ سبز بوده و محل قرارگیری آن باید به‌گونه‌ای باشد، که پرتوی لیزر دقیقاً به نوک مدل مخروطی مورد نظر (واقع در محفظه آزمون) تابانده شود.



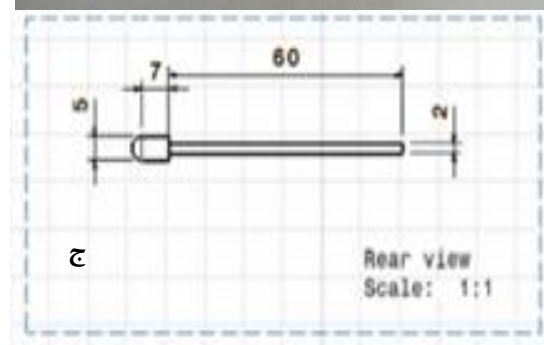
شکل ۲. چیدمان لیزر MSL-FN-532-S

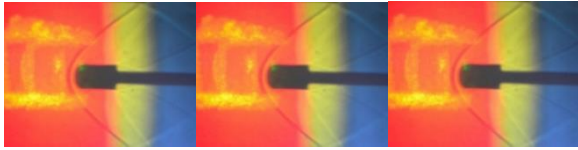


شکل ۳. نحوه قرارگیری لیزر

۲-۵-۲. لیزر Q-SMART 850

لیزر MSL-FN-532-S از نوع فرکانس ثابت بوده و هدف از چیدمان و به‌کارگیری این لیزر، دستیابی به نوعی آبرواسپایک لیزری برای کنترل جریان در اطراف وسیله پرنده است. بنابراین می‌توان میزان قابلیت تأثیرگذاری این نوع لیزر بر آیرودینامیک جریان هوا در اطراف جسم پرنده را ارزیابی نمود. این لیزر امکان کار با پالس‌هایی با انرژی‌های مختلف را دارد، که در این آزمایش، از انرژی پالس، ۱۵۰ mJ استفاده شد. میزان فرکانس ثابت و طول موج لیزر، به ترتیب یک کیلوهرتز و ۵۳۲ نانومتر است. سایر مشخصات و ویژگی‌های این نوع لیزر در مرجع [۲۱] بیان شده است.





شکل ۶. نمایش سه مرحله تکرارپذیری، مدل نوک پخ در ماخ ۲/۵ با تابش لیزر

۴. نتایج و بحث

همان گونه که ذکر شد، در آزمایش‌ها، از دو مدل مخروط نوک پخ و نوک تیز استفاده شده است. این دو مدل مخروط که در شکل (۱)، (الف) و (ب) نشان داده شده‌اند، به عنوان نمونه آزمایشگاهی در محفظه آزمایش تونل باد مافوق صوت قرار گرفته‌اند. همچنین از دو نوع لیزر موجود در دانشکده اپتیک و لیزر دانشگاه به نام‌های لیزر فرکانس ثابت با میزان انرژی پالس کمتر MSL-FN-532-S و فرکانس متغیر به صورت پالسی و با میزان انرژی پالس بیشتر کیو اسمارت ۸۵۰ استفاده شده است. این پژوهش، در محدوده اعداد ماخ ۱/۷، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۴ انجام شده است. در ابتدا، لیزر MSL-FN-532-S با تابش پیوسته بر جلوی دماغه مدل مورد استفاده قرار گرفت و سپس تأثیر لیزر Q-SMART850 مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. جهت محاسبه زاویه و یا فاصله موج شوک تا جلوی مدل، از نرم افزار دیجی تایزر استفاده شده است.

۴-۱. نتایج به دست آمده با مدل نوک تیز و لیزر MSL-FN-532-S

در این قسمت، کلیه آزمایش‌ها با استفاده از لیزر MSL-FN-532-S و به صورت تابش پیوسته لیزر بر جلوی دماغه مدل، صورت گرفته است. همچنین جهت انجام آزمایش‌ها از مدل مخروط با نوک تیز استفاده شده است. آزمایش‌ها در محدوده اعداد ماخ ۱/۷، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۴ انجام شده است. لذا جهت نمونه، دو ماخ برای هر لیزر و هر مدل بیان شده است.

۴-۱-۱. ماخ ۳

در تونل باد با مدل مخروط نوک تیز و با عدد ماخ ۳، آزمایش‌ها تکرار شد. در ابتدا، این آزمایش بدون تابش لیزر انجام شد که در شکل (۷) (الف) مشاهده می‌شود. سپس با تاباندن لیزر MSL-FN-532-S به نوک مدل مخروط مورد نظر جهت گرمایش و تولید پلاسما، آزمایش در ماخ ۳ مجدداً تکرار شد. همان طور که در شکل (۷) (ب) مشاهده می‌شود، ناحیه زرد رنگ به علت تابش لیزر در اطراف موج شوک قابل مشاهده است. سپس تصاویر آزمایش‌ها با لیزر و بدون لیزر به صورت دقیق با در نظر گرفتن نوک مدل‌ها، بر هم منطبق شده که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در ماخ ۳، با تابش لیزر به نوک مدل و ایجاد پلاسما، موج شوک در همه نقاط به مقدار کمی به سمت مدل تغییر زاویه داشته است. این مقدار

شرکت کوآنتل در سال ۱۹۷۰ تأسیس شد. شرکت کوآنتل با طراحی و تولید تجهیزات اپتیکی، در فرانسه و آمریکا، یکی از مهم‌ترین مراکز تولید لیزر در سطح جهان است. یکی از لیزرهای ساخت این شرکت، کیو اسمارت ۸۵۰ است که به صورت پالسی عمل می‌کند [۲۲]. در شکل (۴)، شمایی از چیدمان لیزر کیو اسمارت ۸۵۰ به همراه اجزاء این لیزر نمایش داده شده است. این لیزر با دو طول موج مختلف کار می‌کند، که در طول موج ۲۶۶ نانومتر، دارای انرژی پالس، ۱۰۰ mJ و در طول موج ۳۵۵ نانومتر، دارای انرژی پالس ۲۳۰ mJ است. میزان فرکانس تکرار، در این تحقیق، ۵ Hz در نظر گرفته شده است. جزئیات بیشتر در رابطه با خصوصیات و ویژگی‌های این لیزر در مرجع [۲۲] بیان شده است.



شکل ۴. شمایی از چیدمان لیزر کیو اسمارت ۸۵۰

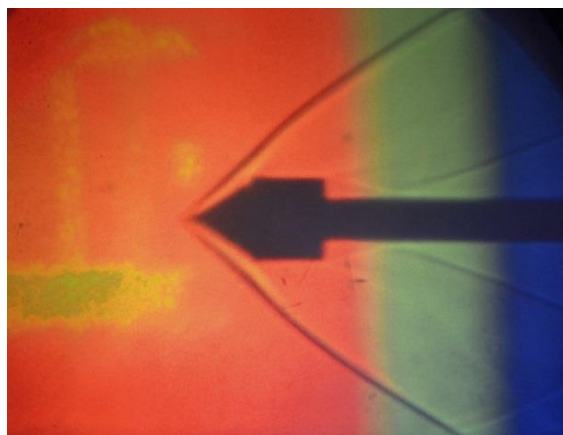
۳. بررسی تکرارپذیری

برای نشان دادن تکرارپذیری آزمایش‌ها و صحت نتایج، در تصاویر (۵) و (۶)، به عنوان نمونه، مدل نوک پخ در ماخ ۲/۵ با تابش لیزر و بدون تابش لیزر MSL-FN-532-S در ثانیه چهارم ایجاد موج شوک نشان داده شده است. همان گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، تمامی آزمایش‌ها در ماخ‌های ۱/۷ تا ۳/۴ سه مرتبه انجام شده‌اند و موج شوک در تمامی آن‌ها، به یک میزان جابه‌جایی داشته‌اند. این روند نشان داده شده در شکل‌های (۵) و (۶)، در مدت زمان آزمایش‌ها برای هر کدام از مدل‌ها و در تمامی ماخ‌ها تکرار شده و در تمامی آزمایش‌ها، پس از تثبیت موقعیت موج شوک، این عکس‌برداری صورت گرفته است.



شکل ۵. نمایش سه مرحله تکرارپذیری، مدل نوک پخ در ماخ ۲/۵ بدون تابش لیزر

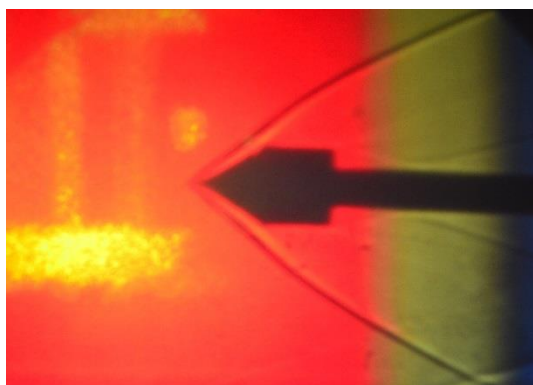
الف) بدون تابش لیزر (ب) با تابش لیزر



شکل ۸. نمایش تلفیق با و بدون لیزر مدل نوک‌تیز در ماخ ۳



(الف)



(ب)

شکل ۹. نمایی از موج شوک جلوی مدل نوک‌تیز در ماخ ۳/۴
الف) بدون تابش لیزر (ب) با تابش لیزر

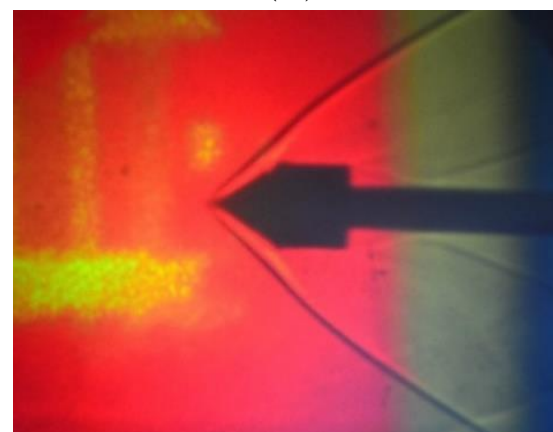
جابه‌جایی به علت ایجاد گرما و تولید پلاسما در نزدیکی مدل بوده و منجر به جابه‌جایی موج شوک می‌شود. از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در استفاده از مدل مخروط نوک‌تیز می‌توان به این نتیجه رسید، که با افزایش عدد ماخ، جابه‌جایی موج شوک در فواصل دور دست، نمایان‌تر و بیشتر است.

۴-۱-۲. ماخ ۳/۴

در تونل باد با مدل نوک‌تیز و با عدد ماخ ۳/۴، آزمایش‌ها تکرار شد. در ابتدا، این آزمایش بدون تابش لیزر انجام شد که در شکل (۹) (الف) مشاهده می‌شود. سپس با تاباندن لیزر MSL-FN-532-S به نوک مدل مخروط مورد نظر جهت گرمایش و تولید پلاسما، آزمایش در ماخ ۳/۴ مجدداً تکرار شد. در ادامه، تصاویر آزمایش‌ها با لیزر و بدون لیزر به صورت دقیق با در نظر گرفتن نوک مدل‌ها، بر هم منطبق شده است، که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در ماخ ۳/۴، با تابش لیزر به نوک مدل و ایجاد پلاسما، موج شوک در همه نقاط به مقدار کمی به سمت مدل تغییر زاویه داشته است. این مقدار جابه‌جایی به علت ایجاد گرما و تولید پلاسما بیشتر به علت تراکم جریان هوا در نزدیکی مدل بوده که منجر به جابه‌جایی موج شوک و افزایش فاصله دو موج شوک و در نتیجه کاهش پسا می‌شود.



(الف)



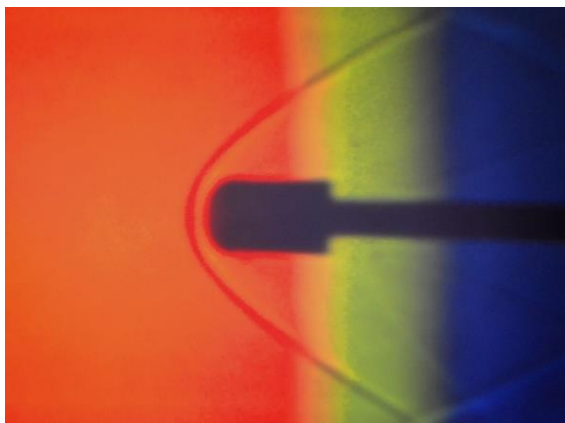
(ب)

شکل ۱۰. نمایی از موج شوک ایجاد شده جلوی مدل نوک‌تیز در ماخ ۳

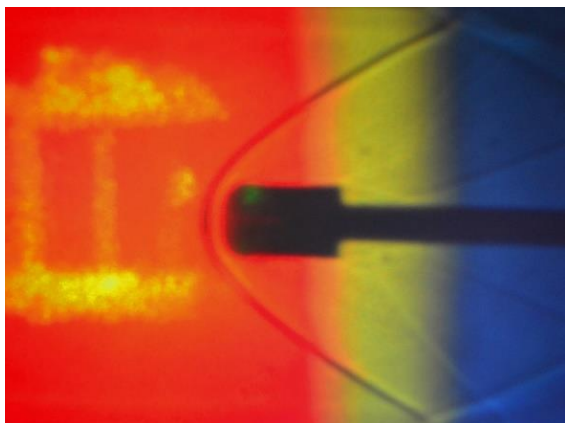
و به صورت تابش پیوسته لیزر بر جلوی دماغه مدل نوک پخ، صورت گرفته است. آزمایش‌ها در محدوده اعداد ماخ ۱/۷، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۴ انجام شده است. لذا جهت نمونه، دو ماخ برای هر لیزر و هر مدل بیان شده است.

۴-۲-۱. در ماخ ۳

آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد با مدل نوک پخ و در عدد ماخ ۳ انجام شده است. در شکل (۱۲)، (الف) و (ب) موج شوک در دو حالت با استفاده از لیزر و بدون استفاده از لیزر مشاهده می‌شود. ابتدا آزمایش در حالت بدون استفاده از لیزر، صورت گرفت. سپس با تاباندن لیزر MSL-FN-532-S، به نوک مدل مخروط مورد نظر جهت گرمایش و ایجاد پلازما، آزمایش در ماخ ۳ مجدداً تکرار شد. همان‌طور که در شکل (۱۳)، مشاهده می‌شود، تصاویر آزمایش‌ها با لیزر و بدون لیزر به صورت دقیق با در نظر گرفتن نوک مدل‌ها، بر هم منطبق شده است. با توجه به اینکه هرچه عدد ماخ بالاتر رود، تراکم موج شوک ایجاد شده بیشتر می‌شود، در ماخ ۳، بعد از ثبت نتایج آزمایش و انطباق آن‌ها همان‌طور که در شکل (۱۳)، مشاهده می‌شود، قسمت موج شوک با حالت پلازما ایجاد شده (تابش لیزر) از موج شوک با حالت بدون تابش لیزر به سمت جلو با فاصله بیشتر از مدل، جابه‌جایی داشته است. این بیان‌کننده تأثیر لیزر بر موقعیت موج شوک است.



(الف)

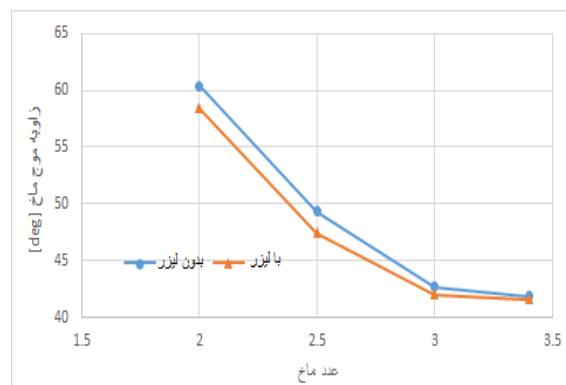


(ب)



شکل ۱۰. نمایش تلفیق با و بدون لیزر مدل نوک تیز در ماخ ۳/۴

با توجه به انجام آزمایش‌ها در همه ماخ‌های در محدوده ۱/۷ تا ۳/۴، زاویه موج شوک در دو حالت با تابش و بدون تابش لیزر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به میزان تغییر زاویه موج شوک در ماخ‌های مختلف برحسب درجه، به صورت عددی در جدول (۱) و به صورت نموداری در شکل (۱۱)، نشان داده شده است. میزان زاویه موج شوک با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌تایزر محاسبه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان زاویه موج شوک در صورت استفاده از لیزر، کمتر از میزان زاویه با استفاده از لیزر است و این امر نشان‌دهنده کاهش زاویه موج شوک و ضعیف‌تر شدن آن در حقیقت، کاهش پسای ناشی از موج شوک است.



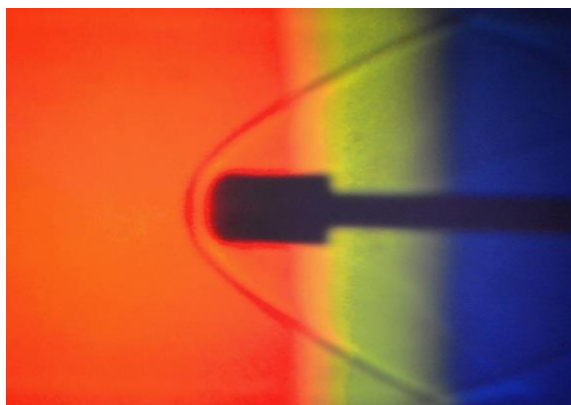
شکل ۱۱. نمودار میزان زاویه موج شوک، با و بدون تابش لیزر از نوک مدل نوک تیز در ماخ‌های مختلف با لیزر MSL برحسب درجه

جدول ۱. میزان زاویه موج شوک با و بدون تابش لیزر از نوک مدل نوک تیز در ماخ‌های مختلف با لیزر MSL برحسب درجه

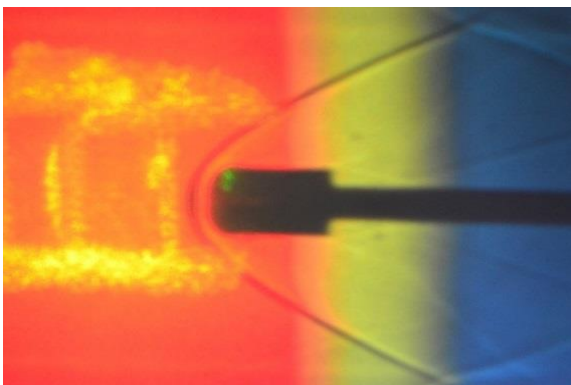
ماخ	بدون لیزر	با لیزر
۱/۷	-	-
۲	۶۰/۴	۵۸/۴
۲/۵	۴۹/۳	۴۷/۴
۳	۴۲/۷	۴۲
۳/۴	۴۱/۹	۴۱/۵۹

۴-۲. نتایج مدل نوک پخ و لیزر MSL-FN-532-S

در این قسمت، کلیه آزمایش‌ها با استفاده از لیزر MSL-FN-532-S



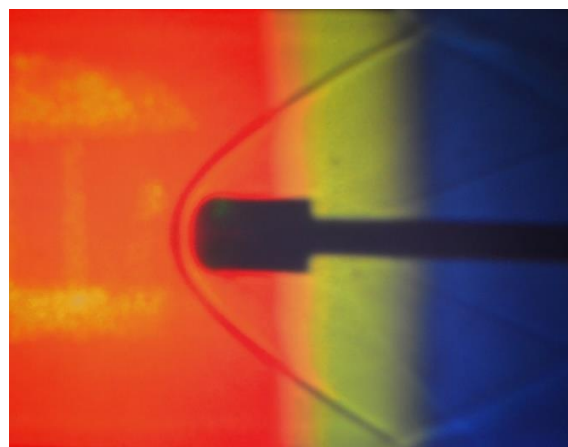
(الف)



(ب)

شکل ۱۴. نمایی از موج شوک ایجادشده با مدل نوک‌پخ در ماخ ۳/۴ (الف) بدون تابش لیزر (ب) با تابش لیزر

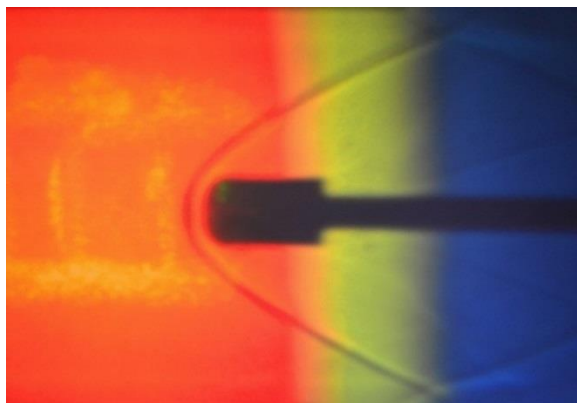
شکل ۱۲. نمایی از موج شوک ایجادشده جلوی مدل نوک‌پخ در ماخ ۳ (الف) بدون تابش لیزر (ب) با تابش لیزر



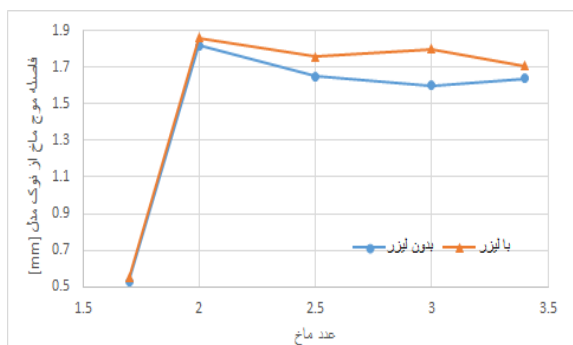
شکل ۱۳. نمایش تلفیق با و بدون لیزر مدل نوک‌پخ در ماخ ۳

۴-۲-۲. در ماخ ۳/۴

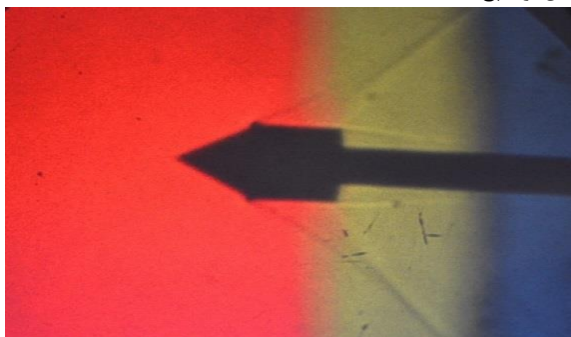
آزمایش‌ها در تونل باد با مدل نوک‌پخ و در عدد ماخ ۳/۴ انجام شده است. در شکل (۱۴)، موج شوک در دو حالت با استفاده از لیزر و بدون استفاده از لیزر مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وضوح موج شوک با افزایش میزان ماخ، بهتر می‌شود. ابتدا آزمایش در حالت بدون استفاده از لیزر، صورت گرفت. سپس با تاباندن لیزر MSL-FN-532-S، به نوک مدل موردنظر جهت گرمایش و پلاسمای آزمایش در ماخ ۳/۴ مجدداً تکرار شد. سپس تصاویر آزمایش‌ها با لیزر و بدون لیزر به صورت دقیق با در نظر گرفتن نوک مدل‌ها، بر هم منطبق شده است. با توجه به اینکه هرچه عدد ماخ بالاتر رود، تراکم موج شوک ایجادشده بیشتر می‌شود. در ماخ ۳/۴ بعد از ثبت نتایج آزمایش و انطباق آن‌ها همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، موج شوک با حالت پلاسمای ایجادشده (تابش لیزر) از موج شوک با حالت بدون تابش لیزر فاصله بیشتری از نوک مدل گرفته است. البته میزان جابه‌جایی موج شوک در این عدد ماخ نسبت به ماخ ۲/۵ و ۳ کمتر است و به نظر می‌رسد، که این امر به علت شکل آیرودینامیکی سر مدل نوک پخ است. همچنین، در این عدد ماخ، تمام قسمت‌های کمان موج شوک به سمت مدل نوک پخ، کشیده شده است. در شکل (۱۶) به صورت نموداری و جدول (۲) به صورت عددی، میزان فاصله موج شوک با و بدون تابش لیزر، از نوک مدل نوک‌پخ در ماخ‌های مختلف نشان داده شده است. فاصله بین موج شوک و جلوی مدل، با استفاده از نرم‌افزار دیجیتالی محاسبه شده است. نتایج نشان‌دهنده، میزان تغییرات فاصله موج شوک از نوک مدل است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از لیزر، کاهش فاصله در همه نتایج قابل‌رؤیت است. مقیاس اندازه‌گیری برحسب میلی‌متر است.



شکل ۱۵. نمایش تلفیق با و بدون لیزر مدل نوک پخ در ماخ ۳/۴

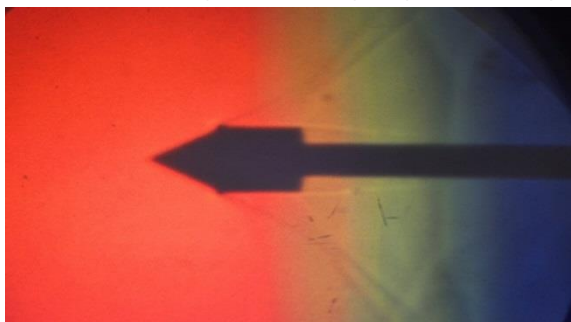


شکل ۱۶. نمودار میزان فاصله موج شوک با و بدون تابش لیزر از نوک مدل نوک پخ



(ب)

شکل ۱۷. نمایی از موج شوک‌های ایجاد شده با مدل نوک تیز در ماخ ۱/۷ (الف) بدون تابش لیزر (ب) با تابش لیزر



شکل ۱۸. نمایش تلفیق با و بدون لیزر مدل نوک تیز در ماخ ۱/۷

جدول ۲. میزان فاصله موج شوک با و بدون تابش لیزر از نوک مدل نوک پخ در ماخ‌های مختلف برحسب میلی‌متر

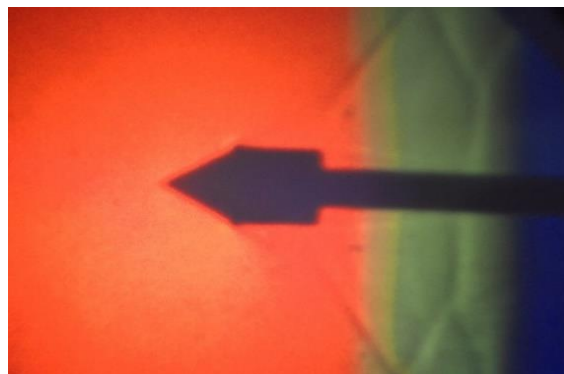
ماخ	بدون لیزر	با لیزر
۱/۷	۰/۵۳	۰/۵۵
۲	۱/۸۲	۱/۸۶
۲/۵	۱/۶۵	۱/۷۶
۳	۱/۶	۱/۸
۳/۴	۱/۶۴	۱/۷۱

۳-۴. نتایج مدل نوک تیز و لیزر پالسی Q-SMART850

در این قسمت، نوع لیزر عوض شد تا تأثیر استفاده از لیزر با توان و انرژی بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به پالسی بودن و توان بالاتر لیزر Q-SMART850، از این لیزر جهت بررسی تأثیر افزایش مقدار انرژی بر روی موج شوک استفاده شد. لازم به ذکر است، که این نوع لیزر نیز در مدت زمان انجام آزمایش، به طور پیوسته بر روی نوک مدل تابانده شده است. لیزر در ماخ ۱/۷ با انرژی پالس 230 mJ و فرکانس تکرار 5 Hz و در ماخ ۲ با انرژی پالس 230 mJ و فرکانس تکرار 5 Hz به مدل تابانده شده است. لازم به ذکر است، که با توجه به زیاد بودن میزان توان لیزر و امکان آسیب دیدن شیشه و عدسی محفظه تونل باد، نتایج فقط برای ماخ‌های ۱/۷ و ۲ تست شد و از انجام آزمایش در سایر ماخ‌ها صرف نظر شد.

۱-۳-۴. در ماخ ۱/۷

در شکل (۱۷)، موج شوک در دو حالت با استفاده از لیزر و بدون استفاده از لیزر، نشان داده شده است. در شکل (۱۸)، مقایسه امواج ایجاد شده از دو حالت با لیزر و بدون لیزر پرداخته شده است. همان گونه که مشاهده می شود، زاویه امواج انبساطی تا سطح مدل، در هنگام استفاده از لیزر کاهش یافته است. البته استفاده از این لیزر بر روی امواج شوک در انتهای مدل نیز تأثیر بیشتری گذاشته است. به نظر می رسد، با افزایش مقدار انرژی حاصل از تابش لیزر، مقدار تأثیر پذیری بر امواج انبساطی نیز افزایش یافته و در نتیجه میزان پسا نیز کاهش می یابد.



(الف)

۴-۳-۲. در ماخ ۲

اندازه‌گیری برحسب درجه است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان زاویه موج شوک در صورت استفاده از لیزر، کمتر از میزان زاویه موج شوک بدون تابش لیزر است. همچنین به علت استفاده از لیزر با توان بالاتر، میزان کاهش زاویه نسبت به استفاده از لیزر MSL-FN-532-S بیشتر است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، در اثر انتقال انرژی توسط پالس‌های لیزر، ناحیه پلاسما با فشار و دمای بالایی ایجاد می‌شود. یک موج انفجاری تشکیل می‌شود و از ناحیه پلاسما به میدان جریان منتشر می‌شود و در نتیجه یک موج انبساطی نیز به سمت عقب انعکاس پیدا می‌کند. موج انبساطی منجر به ایجاد یک ناحیه با فشار کم و برهمکنش آن با موج شوک، تولید یک گردابه حلقوی می‌کند، که خصوصیات آیرودینامیکی را تغییر و منجر به کاهش پسا می‌شود [۲۳].

جدول ۳. میزان زاویه موج شوک با و بدون تابش لیزر از نوک مدل نوکتیز در ماخ‌های مختلف با لیزر Q-SMART

ماخ	بدون لیزر	با لیزر
۲	۶۰/۴	۵۶/۶

در شکل (۱۹)، موج شوک در دو حالت با استفاده از لیزر و بدون استفاده از لیزر، نشان داده شده است. وضوح تصویر مناسب بوده و موج شوک به راحتی قابل مشاهده است. در شکل (۲۰)، مقایسه امواج ایجادشده از دو حالت با لیزر و بدون لیزر پرداخته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، زاویه موج شوک، در هنگام استفاده از لیزر کاهش یافته و در نتیجه میزان پسا نیز کاهش یافته است. علت کم شدن زاویه موج شوک می‌تواند به علت گرم شدن سر مدل و در نتیجه انبساط حجمی آن و یا تغییر در میزان لایه مرزی به علت تغییر در دما و تغییرات ویسکوزیته است. با افزایش شدت لیزر تأثیرات محسوس‌تر دیده می‌شود و روند کاهش زاویه موج شوک بیشتر می‌شود. با توجه به تحقیقات گذشته، در اثر گرمایش حاصل از لیزر و ایجاد گرما در منطقه تابش، فشار سکون کاهش می‌یابد. در نتیجه، زاویه موج شوک با تابش لیزر نسبت به زاویه موج شوک بدون تابش لیزر کاهش می‌یابد. چنانچه شدت لیزر افزایش یابد، این پدیده کم شدن زاویه و در حقیقت تأثیر لیزر بر کنترل موج شوک، بیشتر قابل مشاهده است.

مقادیر تغییر زاویه موج شوک در اثر تابش لیزر بر نوک مدل مخروطی، در جدول (۳) به خوبی نشان داده شده است. مقیاس



(ب)



(الف)

شکل ۱۹. نمایی از موج شوک ایجادشده جلوی مدل نوکتیز در ماخ ۲ (الف) بدون تابش لیزر (ب) با تابش لیزر

مدل مخروط نوک تیز با MSL: آزمایش‌ها سری دوم با یک

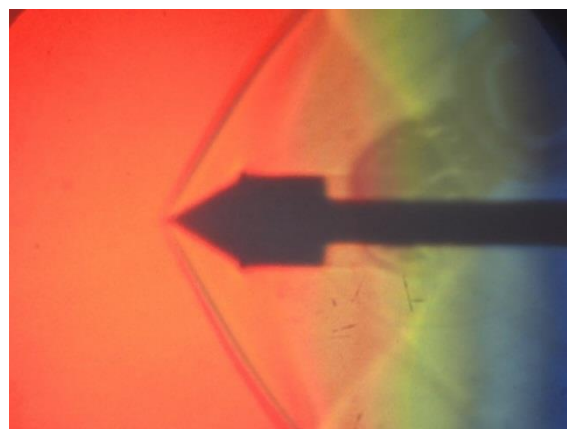
مدل متفاوت از مدل نوک پخ از نظر سطح آیرودینامیکی، انجام پذیرفت. این آزمایش‌ها با مدل نوک تیز در ماخ‌های ۱/۷، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۴ با و بدون لیزر انجام شد. در ماخ ۱/۷، موج انبساطی با تابش لیزر مقداری به سمت مدل مایل شده است. با تابش لیزر و ایجاد پلاسما، موج انبساطی ایجاد شده به مقدار کمی جابه‌جایی داشته است. نکته قابل توجه در ماخ ۲ و دیگر ماخ‌های بالاتر این است، که تمام منحنی شوک ایجاد شده شامل این تغییرات شده است و زاویه موج شوک کاهش یافته است که نشانگر تأثیر بیشتر لیزر بر روی این گونه آزمایش است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، هرچه عدد ماخ بالاتر می‌رود با تابش لیزر و ایجاد پلاسما، موج شوک ایجاد شده اختلاف زاویه کمتری نسبت به حالت بدون تابش لیزر پیدا می‌کند.

مدل مخروط نوک تیز با Q-SMART 850: این

آزمایش‌ها با لیزر شدت بالاتر و قوی‌تر انجام شد. با توجه به شدت بیشتر این لیزر و احتمال آسیب زدن به عدوات آزمایشگاهی و درعین حال کاربرد فراوان استفاده از آن، فقط در ماخ ۱/۷ و ۲ با مدل نوک تیز آزمایش‌ها انجام شد. در آزمایش ماخ ۱/۷، انرژی پالس لیزر برابر ۱۰۰ mJ و فرکانس تکرار ۵Hz اما به‌طور پیوسته به مدل مخروط تابانده شد، که میزان تغییر زاویه موج انبساطی در فاصله دور قابل مشاهده است و در ماخ ۲ با انرژی پالس ۲۳۰ mJ و فرکانس تکرار ۵Hz، میزان تغییر زاویه موج شوک ۰/۸ درجه است. این مقدار از تغییر زاویه، بیانگر تأثیر قابل توجه لیزر و ایجاد پلاسما بر موج شوک و کنترل جریان هوا بر روی مدل هست. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هرچه میزان انرژی پالس لیزر بیشتر شود، میزان تغییر زاویه موج شوک نیز بیشتر می‌شود.

۸. مرجع‌ها

- [1] Lee, J.; Janiszewska, J. "A Simple Method for Determining Lift and Drag on a Wing"; AIAA Paper, 2005, 2005-1061.
- [2] Brech F.; Cross, L. "Optical Microemission Stimulated by a Ruby Laser"; Appl. Spectrosc. 1962, 16-59.
- [3] Pathak, A.; Kumar, R.; Singh, V.; Agrawal, R.; Rai, S.; Rai, A. "Assessment of LIBS for Spectro Chemical Analysis: A Review"; Appl. Spectrosc. Rev. 2012, 47, 14-40.
- [4] Fortes, F.; Moros, J.; Lucena, P.; Cabalin, L.; Laserna, J. "Laser-Induced Breakdown Spectroscopy"; Anal Chem. 2013, 85, 640-669.
- [5] Knight, D. "Survey of Aerodynamic Drag Reduction at High Speed by Energy Deposition"; J. Propuls. Power 2008, 24, 6, 1153-1167.
- [6] Belokon, V.; Rudenko, O.; Khokhlov, R. "Aerodynamic Effects of Supersonic Flow Past a Laser-Beam"; Sov. Phys. Acoust. U.S.R. 1977, 23, 361-362.



شکل ۲۰. نمایش تلفیق با و بدون لیزر مدل نوک تیز در ماخ ۲

۵. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر لیزر بر موقعیت موج شوک است. در این تحقیق، تأثیر لیزر به‌صورت پیوسته بر موج شوک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از دو نوع لیزر MSL-FN-532-S و لیزر پرتوان Q-SMART 850 استفاده شد. محدوده عدد ماخ مورد بررسی از ۱/۷ الی ۳/۴ بود، که نتایج ذیل از این تحقیق، به دست آمد:

مدل مخروط نوک پخ با MSL: با توجه به نتایج

به دست آمده از آزمایش‌ها در مدل نوک پخ که در ماخ‌های ۱/۷، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ ماخ با و بدون تابش لیزر انجام گرفته است، در ماخ ۱/۷، تغییراتی در زاویه موج انبساطی قابل مشاهده است. به‌طور کلی، زمانی که لیزر MSL-FN-532-S بر مدل مخروط تابیده می‌شود، باعث جابه‌جایی موج شوک به مقدار ناچیزی در نوک مدل می‌شود. با توجه به اینکه تابش لیزر، پلاسما تولید کرده و باعث تغییر در ساختار مولکول‌های هوا در نوک مدل می‌شود. تأثیرات تابش لیزر باعث افزایش دما در نوک مدل و سپس باعث جابه‌جایی موج شوک به سمت دورتر از مدل می‌شود. جابه‌جایی موج شوک، نشانگر کاهش پسا و کنترل بهتر جریان است.

بررسی نتایج ماخ ۲ در مدل نوک پخ نشان می‌دهد که فاصله موج شوک با تابش لیزر به سمت مدل مخروط در حدود ۰/۴ mm جابه‌جایی بیشتری داشته است. در ماخ ۲/۵، جابه‌جایی موج شوک به میزان ۰/۱ mm است. هرچه عدد ماخ بیشتر می‌شود، دما در نوک مدل به‌وسیله جریان بیشتر هوا افزایش می‌یابد، که با تابش لیزر و ایجاد پلاسما، تغییرات در محل شوک بیشتر می‌شود. در ماخ ۳ و ۳/۴ نیز، این تغییرات موج شوک به میزان ۰/۲ mm و ۰/۷ mm است.

- [16] Georgievskii, P.; Levin, V. "Control of the Flow Past Bodies Using Localized Energy Addition to the Supersonic Oncoming Flow"; J. Fluid Dyn. 2003, 38, 794-805.
- [17] Kandala, R.; Candler, G. "Numerical Studies of Laser-Induced Energy Deposition for Supersonic Flow Control"; J. AIAA, 2004, 42, 2266-2275.
- [18] Holden, M.; Wadhams, T. "Validation Study of Laminar Shock/Boundary Layer and Shock/Shock Interactions in Hypersonic Flow, Part A: Experimental Measurements"; J. AIAA 2001, 1031.
- [19] John, B.; Kulkarni, V. "Numerical Assessment of Correlations for Shock Wave Boundary Layer Interaction"; J. Comput. Fluids, 2014, 90, 42-50.
- [20] Starikovskiy, A.; Limbach, C.; and Miles, R. "Trajectory Control of Small Rotating Projectiles by Laser Discharges"; J. AIAA 2016, 4308.
- [21] [Http://ww.cnilaser.com](http://ww.cnilaser.com).
- [22] [Http://www.photonicsolutions.co.uk/product](http://www.photonicsolutions.co.uk/product).
- [23] Golbabaei, M. "Application and Characterization of Energy Deposition in High Speed Flow Control", PhD Thesis, New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey, 2014.
- [7] Krasnobaev, K.; Syunyaev, R. "Calculation of Flow of Stellar Wind Past an X-Ray Source"; J. Fluid Dyn. 1983, 18, 584-589.
- [8] Krasnobaev, K. "Supersonic Flow Past Weak Sources of Radiation"; J. Fluid Dyn. 1984, 19, 4, 629-632.
- [9] Terent'eva, L. "Supersonic Flow over Energy-Releasing Sources"; J. Fluid Dyn. 1992, 27, 5, 747-750.
- [10] Adelgren, R.; Elliott, G.; Knight, D.; Zheltovodov, A.; Beutner T. "Energy Deposition in Supersonic Flows"; AIAA Paper 2001, 2001-0885.
- [11] Levin, V.; Terent'eva, L. "Supersonic Flow over a Cone with Heat Release in the Neighborhood of the Apex"; J. Fluid Dyn. 1993, 28, 244-247.
- [12] Levin, V.; Terent'eva, L. "Effect of a Local Energy Supply Region on 3-D Flow around a Cone"; J. Fluid Dyn. 1999, 34, 388-394.
- [13] Riggins, D.; Nelson, H.; Johnson, E. "Blunt-Body Wave Drag Reduction Using Focused Energy Deposition"; J. AIAA, 1999, 37, 460-467.
- [14] Riggins, D.; Nelson, H. "Hypersonic Flow Control Using Upstream Focused Energy Deposition"; J. AIAA, 2000, 38, 723-725.
- [15] Georgievskii, P.; Levin, V. "Unsteady Interaction of a Sphere with Atmospheric Temperature Inhomogeneity at Supersonic Speed"; J. Fluid Dyn. 1993, 28, 568-574.