

مطالعه تجربی کاهش شدت امواج ضربه‌ای مافوق صوت، به روش تخلیه

پیوسته پلاسمای ضعیف

مه‌دی رحیمی^۱، اکرم خدایاری^۲ و فرزاد ویسی^۳

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه رازی، کرمانشاه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۰)

چکیده

امواج ضربه‌ای در هواپیماهای ماورای صوت بسیار مضر است، به طوری که باعث افزایش نیروی پسا و گرم شدن سطوح می‌شود. در این تحقیق، مدل تونل باد با ترکیبی از اسپایک فیزیکی ۶۰ درجه باریک به‌عنوان کاتد و سیلندر مخروط ناقص ۶۰ درجه به‌عنوان آند در اعداد ماخ ۱/۵، ۱/۹۵ و ۲/۴۵ مورد آزمایش قرار گرفته است. جریان پلازما در جلوی مدل آیرو-اسپایک پلاسمایی به‌وسیله تخلیه الکتریکی با ۵۰ Hz، ۵۰ mA و ۳۰ KV تولید می‌شود. به‌طور هم‌زمان، از روش‌های شادوگراف و تصویربرداری تابان پلازما برای مشاهده جریان و تولید پلازما استفاده شده است. تصاویر شادوگراف در اعداد ماخ مذکور نشان می‌دهد که تخلیه پلازما در پشت موج ضربه‌ای با وجود افزایش میدان مغناطیسی تأثیر کمی در کاهش شدت موج ضربه‌ای داشته است. با افزایش عدد ماخ، موج ضربه‌ای دماغه مخروط ناقص به پائین‌دست حرکت کرده و در نتیجه تخلیه پلازما در پائین دماغه مدل به همراه میدان مغناطیسی ثابت باعث تضعیف شوک و ناپدید شدن آن در قسمت پائین دماغه شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در عدد ماخ ۲/۴۵ موج ضربه‌ای به دماغه ناقص چسبیده و در نتیجه تخلیه پیوسته پلازما در پائین اسپایک و در جلوی موج باعث حذف آن شده است. این مهم‌ترین نتیجه‌ای است که نشان می‌دهد تخلیه پلازما به روش آیرو اسپایک قادر به حذف امواج ضربه‌ای و در نتیجه کاهش درگ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: امواج ضربه‌ای، کاهش درگ، پلازما، اسپایک، ماوراء صوت

Experimental Study of Reducing the Intensity of Supersonic Shock Waves, Using Continuous Plasma Discharge

M. Rahimi, A. Khodayari and F. Veysi

Engineering School

Razi University, Kermanshah

(Received:23/June/2017 ; Accepted:11/November/2017)

ABSTRACT

Shock waves are presented in hypersonic aircrafts. They increase drag and as a result of additional friction, surface heating increases. In this research, a wind tunnel model; a combination of a 60° slender physical spike, used as cathode and a 60° truncated cone- cylinder, as anode, were experimented in flows with Mach numbers 1.5, 1.95, and 2.45. Plasma was produced in front of the aero-spike model by electrical discharge of 50 HZ, 30 KV_{DC}, and 50 mA. Shadow and plasma glow imaging techniques were used simultaneously for flow and plasma visualization. Shadow imaging, in the afore mentioned Mach numbers, shows that the plasma being discharged behind shock wave, in spite of increasing the magnetic field, has a slight effect on decreasing the intensity of the shock wave. With increasing Mach number, the Shock wave of the truncated conical nose moves downstream and as a result of the plasma discharge taking place below the nose and the constant magnetic field, the wave below the nose is eliminated. The experimental results indicate that at Mach number 2.45, the shock wave attaches to the truncated nose, thus; the continuous plasma discharge below the spike and in front of the wave eliminates the wave. This is the most important result of this study indicates that aero-spike plasma discharge can remove shock waves and thus reduce drag.

Keywords: Shock Waves, Drag Reduction, Plasma, Aero Spike, Supersonic

۱- دانشجوی دکتری: Rahimi.mahdi@razi.ac.ir

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): a.khodayari@razi.ac.ir

۳- دانشیار: veysi@razi.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات:

B	شدت میدان مغناطیسی،
D,d	قطر
E	میدان الکتریکی
F	نیروی لورنتز
f	نیرو بر واحد حجم
J	دانسیته جریان
L,l	طول
n	دانسیته الکترونی
q	بار الکتریکی
T	دما
V	سرعت

علائم یونانی

σ	قابلیت هدایت الکتریکی
	زیرنویس
appl.	اعمالی
b	بدنه
ind.	القایی
s	استاتیکی
t	کل

۱- مقدمه

اصولاً نحوه کلی فیزیک پلاسما ایجاد تخلیه الکتریکی بین کاتد و آند می‌باشد که منجر به یونیزه شدن هوا یا هر گاز دیگری بین الکترودها و تشکیل لایه‌ای از پلاسما می‌گردد. در اثر عبور الکترون و در نتیجه جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی به وجود می‌آید که به نوبه خود باعث به وجود آمدن نیروی لورنتز به پلاسما خواهد شد. این نیرو عمود بر صفحه بردار سرعت و بردار میدان مغناطیسی است. روش‌های متنوعی برای توسعه فناوری کاهش درگ موجی از زمان شروع ساخت وسایل آیرودینامیکی سرعت‌بالا ابداع شده که در زیر، تعدادی از آن‌ها آورده شده است.

کیو و همکارانش^۱ اثر پلاسمای بادوام بر ساختار موج ضربه‌ای را در آزمایش‌ها مشاهده کرده و بیان کردند اثر تخلیه پلاسما بر کاهش موج ضربه‌ای دو هدف اولیه را دنبال می‌کند.

یکی افزایش و بهبود مؤثر شکل آیرودینامیکی یک جسم پرنده بدون نیاز به الزامات سرمایه‌ی اسپایک^۲ فیزیکی و دیگری کاهش صدای موج ضربه‌ای به طوری که در مجموعه انرژی صرفه‌جویی خواهد شد [۱]. همچنین بیولاریو و کیو^۳ اظهار نمودند که تخلیه پلاسما به طور مؤثری ساختمان پیچیده جبهه شوک تشکیل شده در جلوی دماغه پخ^۴ را به یک ساختمان ساده که تنها دارای یک شوک مخروطی در نوک مدل است، تبدیل می‌کند. در نتیجه تخلیه الکتریکی پلاسما باعث کاهش درگ روی جسم می‌شود [۲].

چنگ و پاول^۵ از یک اسپایک فیزیکی برای بهبود نسبت منطری^۶ یک جسم پخ استفاده نموده و بیان کرده است که این نوع اسپایک باعث می‌شود موج منحنی شکل در جلوی دماغه به بالادست جریان حرکت نموده و در نهایت به یک شکل جدیدی از موج مخروطی تبدیل شود که باعث کاهش درگ موجی جسم خواهد شد. مشکل اصلی این روش این است که به عملکرد خارج از طراحی وسیله حساسیت دارد و فقط برای یک ماخ و یک زاویه حمله مناسب می‌باشد. همچنین اگر نسبت طول اسپایک به قطر جلوی جسم پرنده کمتر از یک باشد، استفاده عملی از اسپایک فیزیکی به‌تنهایی برای بهبود موج ضربه‌ای محدودیت ایجاد می‌کند. علاوه بر این، اسپایک فیزیکی درگ اصطکاکی اضافی بر روی ساختار بدنه جسم تحمیل می‌نماید و در نتیجه به الزامات سرمایه‌ی نیاز است که باعث محدود کردن عملکرد اسپایک فیزیکی می‌شود [۳].

بیولاریو و کیو تحقیق نمودند که تخلیه پلاسما با توزیع مخروطی در اطراف یک اسپایک فیزیکی باعث می‌شود ساختمان موج غیر چسبیده به یک موج ضربه‌ای مخروطی چسبیده در نوک اسپایک تغییر نماید. بطوریکه فشار در جلوی دماغه مخروطی ناقص به میزان ۳۰٪ کاهش و فشار روی بدنه مخروطی به میزان ۵٪ افزایش یابد. همچنین فشار روی بدنه سیلندری بدون تغییر باقی بماند. بنابراین، قرار دادن یک اسپایک آیرو- پلاسمایی به جسم در سرعت‌های مافوق صوت باعث بهبود در شکل آیرودینامیکی اجسام دماغه پهن خواهد شد [۴]. اسپنسر پی کیو^۷ از دو نوع اسپایک پلاسمایی برای

2- Spike

3- Kuo and Bivolaru

4- Blunt

5- Chang and Paul

6- Aspect Ratio

7- Spencer P Kuo

1- Kuo et al.

اخیراً محمدخانی و مومینوند اثرات یک اسپایک فیزیکی به همراه تزریق جت گاز در شرایط صوتی روی بدنه اسپایک را به روش عددی توسط یک مدل دماغه پهن تحقیق نموده اند و بیان کرده اند که اثرات قابل توجهی در کاهش درگ موجی به وجود می‌آید [۸].

۲- میدان مغناطیسی

اگر جریان گازی که هادی الکتریسیته است، از یک میدان مغناطیسی که عمود بر جریان باشد، عبور کند یک میدان الکتریکی عمود بر جریان گاز و میدان مغناطیسی القاء خواهد شد. یک روش برای اینکه یک گاز هادی الکتریسیته شود، این است که به گاز انرژی داده شود (مثلاً با افزایش درجه حرارت) تا اتم‌های آن‌ها به بارهای مثبت و منفی تجزیه گردد. گازی که بدین مرحله از تجزیه می‌رسد، اصطلاحاً پلاسما گویند که هادی جریان الکتریسیته است. مطالعه تأثیر متقابل میدان‌ها الکتریکی و مغناطیسی و جریان یک سیال هادی الکتریسیته را اصطلاحاً هیدرودینامیک مغناطیسی^۳ می‌گویند.

هنگامی که یک بار الکتریکی در میدان مغناطیسی حرکت می‌کند نیرویی به نام نیروی لورنتز بر آن وارد می‌شود که مقدارش از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B}. \quad (1)$$

چنانچه جریان بار الکتریکی که با سرعت \vec{V} در حرکت بوده و دارای دانسیته^۴ بر واحد حجم باشد، آن‌گاه نیرو بر واحد حجم به وسیله رابطه زیر به دست می‌آید:

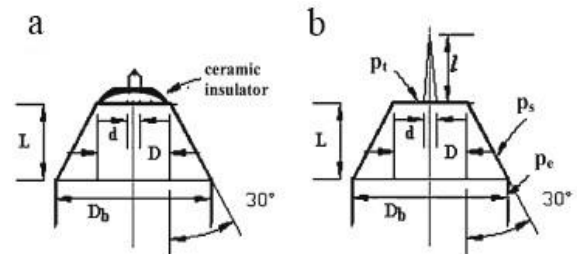
$$\vec{f} = nq\vec{V} \times \vec{B}, \quad (2)$$

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}. \quad (3)$$

nqV مقدار همان بار الکتریکی در سطح مقطع واحد یا همان دانسیته جریان می‌باشد. $V \times B$ در رابطه لورنتز را میدان الکتریکی القاء شده می‌نامند.

بنابر قانون اهم، به دلیل وجود میدان القایی در بین صفحات، جریان القایی متناسب با میدان الکتریکی القاء شده و ضریب هدایتی رسانا نیز به وجود خواهد آمد ($\vec{J}_{ind.} = \sigma \vec{E}_{ind.}$). حال اگر شدت جریانی که به واسطه وجود میدان الکتریکی تولید می‌شود با \vec{J} نشان داده شود، آن‌گاه شدت جریان کل

تشریح روش‌های تخلیه پلاسمایی در تضعیف موج ضربه‌ای در دو حالت تخلیه الکتریکی پرپودیک (شکل a-1) و تخلیه الکتریکی پالسی (شکل b-1) استفاده نمود. شکل ۱ شما تیکی از مدل‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.



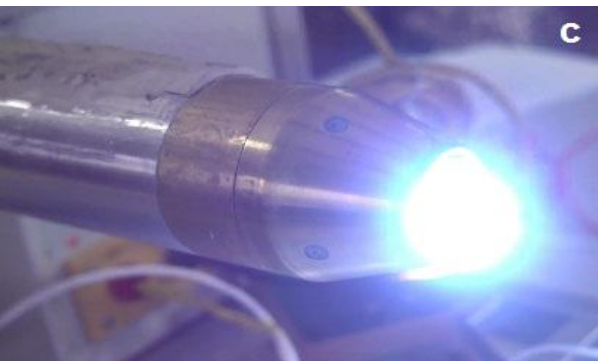
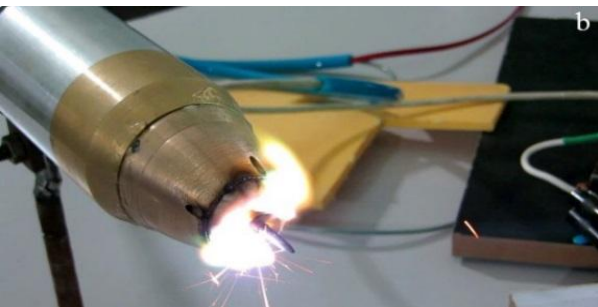
شکل (۱): شماتیکی از مدل‌های مورد استفاده در تخلیه پرپودیکی (a) و در تخلیه پالسی (b) [۵].

این تحقیق نشان می‌دهد که پلاسمای تولید شد باعث افزایش زاویه موج ضربه‌ای و پراکندگی در ساختمان موج می‌شود و با افزایش چگالی تخلیه، موج به سمت بالادست حرکت نموده و باعث افزایش فاصله استند آف^۱ موج ضربه‌ای از دماغه مدل می‌شود. همچنین انرژی ذخیره شده به واسطه کاهش درگ، دوسوم انرژی است که برای تخلیه پلاسما مورد نیاز است. در حالت تخلیه پالسی نسبت منظری بدنه^۲ تا ۷۰٪ افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که اثرات پلاسما در حالت تخلیه پالسی روی ساختمان موج ضربه‌ای نسبت به تخلیه پرپودیک خیلی مؤثرتر می‌باشد [۵]. همچنین اسپنسر پی کیو بیان کرده که درگ موجی ناشی از موج روی مخروط به قدرت موج و در نتیجه به عدد ماخ جریان وابسته بوده و عدد ماخ در نوک مدل به واسطه تخلیه پلاسما از عدد ماخ جریان اصلی کمتر است. کاهش عدد ماخ مؤثر جریان ورودی در ناحیه نوک مدل باعث می‌شود که هوای منحرف شده ناشی از تخلیه پلاسما درگ موجی را کاهش دهد. از این رو ساختمان موج ضربه‌ای بهبود یافته و به سمت بالادست حرکت کرده و نتیجه آن کاهش درگ موجی روی مخروط می‌باشد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که استفاده از تخلیه پلاسما در شکل غیر حرارتی می‌تواند شکل موج ضربه‌ای اطراف یک وسیله مافوق صوت را تضعیف یا به صورت ایده ال حذف نماید. بنابراین، کاهش مصرف سوخت و داشتن سامانه پیشرانس کوچک‌تر برای همان سرعت کروز انتظار می‌رود [۶-۷].

1- Stand-off

2- Aspect Ratio

برقراری سرعت تا 16 m/s را داشته باشد، استفاده شده است. در حین آزمایش‌ها از میدان مغناطیسی ثابت برای افزایش دانسیته جریان و در نتیجه یکنواختی تولید پلاسما استفاده به عمل آمده است (شکل ۳-ب). شکل ۳-ج با استفاده از منبع تغذیه ارتقاء یافته در محیط آزمایشگاه بعد از آزمایش‌های صورت گرفته در تونل باد، انجام شده است. همان‌طوری که از تخلیه کامل پیرامون اسپایک مشخص است با افزایش قدرت منبع تغذیه، تخلیه تابان پلاسما یک هم‌پوشانی کاملی پیرامون اسپایک و دماغه مخروطی ناقص را نشان می‌دهد.



شکل (۳): (a) چیدمان تست آزمایشگاه، (b) تخلیه پلاسما در فشار اتمسفر و (c) افزایش قدرت تخلیه پلاسما.

القاء شده در سطح واحد بین صفحات موازی به دلیل وجود میدان الکتریکی القایی عبارت خواهد بود با:

$$\vec{J} = \sigma(E_{\text{appl.}} + E_{\text{ind.}}) = \sigma(E_{\text{appl.}} + \vec{V} \times \vec{B}). \quad (۴)$$

بنابراین، وجود میدان مغناطیسی می‌تواند علاوه بر افزایش دانسیته جریان باعث چرخش جریان بیشتر ذرات باردار الکتریکی جریان هوا حول محور اسپایک شود و بدین ترتیب باعث افزایش هم‌پوشانی پلاسما در تخلیه تابان^۱ و افزایش نیروی لورنتز شود. البته استفاده از میدان مغناطیسی ثابت باعث کاهش دانسیته پلاسما نیز می‌شود و در ارتفاعات بالا باعث می‌شود مشکلات ارتباطات رادیویی کمتر شود.

۳- مراحل تجربی

آزمایش‌ها در یک محفظه آزمون تونل باد مدارباز مافوق صوت مکشی به ابعاد $60 \text{ cm}^2 * 60$ و اعداد ماخ مافوق صوت از $1/5$ تا $2/45$ و دردمای $T=293 \text{ K}$ و فشار $P=1/6 \text{ atm}$ انجام گرفته است. شکل ۲ تونل باد مافوق صوت مذکور را نشان می‌دهد. تونل باد از نوع مدارباز مکشی با عملکرد پیوسته می‌باشد.

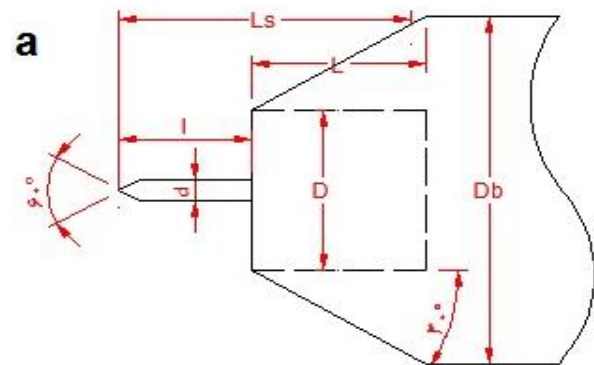


شکل (۲): تونل باد مافوق صوت.

برای اطمینان از صحت پلاسمای تولید شده روی اسپایک ابتدا یکسری آزمایش‌های مختلف در حالت فشار و دمای اتمسفری در محیط آزمایشگاه انجام پذیرفت که شکل ۳ چیدمان و روش آزمایش در حالت تخلیه پلاسما را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها برای شبیه‌سازی اثرات باد روی تخلیه تابان از جت باد سرعت پائین که توانایی

۴- مدل آبرو اسپایک پلاسمایی

مدل مذکور به نحوی در نظر گرفته شده است که هم به عنوان ژنراتور موج ضربه‌ای و هم به عنوان ژنراتور پلاسمایی عمل نماید. ابعاد مدل بر اساس مساحت محفظه آزمون تونل باد مافوق صوت موجود و در نظر گرفتن نسبت انسداد و انعکاس موج ضربه‌ای از دیواره‌های آن در نظر گرفته شده است. بر این اساس قطر مدل $D_b = 58 \text{ mm}$ و طول آن $L_b = 480 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. مشخصات دماغه بر اساس شکل ۴-a برابر با $d = 3/5$ و $D = 26 \text{ mm}$ ، طول مخروط ناقص $L = 33 \text{ mm}$ با یک دماغه مخروطی ناقص 60° و طول اسپایک برابر 20 mm با همان زاویه دماغه در نظر گرفته شده است. شکل ۴-b تخلیه تابان پلاسمای روی این مدل آبرو اسپایک را در عدد ماخ $1/5$ نشان می‌دهد که وجود یک تخلیه متقارن حول انتهای محور اسپایک را در تونل باد به وضوح بیان می‌کند.



شکل (۴): (a) شماتیکی از مدل با الکترودهای تخلیه الکتریکی برای تولید پلاسمای و (b) تصویری از تخلیه تابان پلاسمای در عدد ماخ $1/5$.

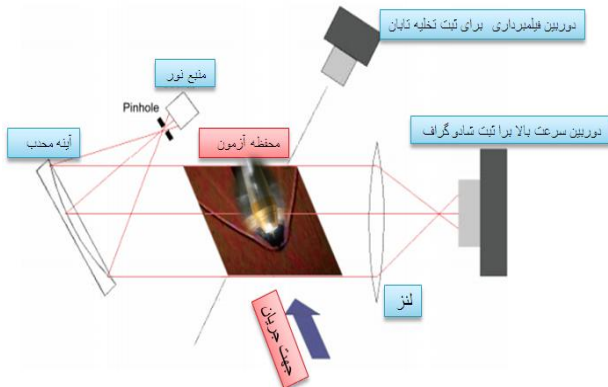
نسبت باریکی طول به قطر اسپایک مدل تست ۶ و از جنس تنگستن-مولیبدن (برای تحمل بیشتر افزایش دمای ناشی از تخلیه پلاسمای در اطراف اسپایک) در نظر گرفته شده است [۶]. این قسمت به عنوان کاتد (قطب منفی) وظیفه تولید پلاسمای متقارن مخروطی در نوک دماغه مخروطی ناقص را به عهده دارد. زاویه نوک اسپایک همان زاویه مخروط دماغه را دارد [۳]. از یک سرامیک و عایق حرارتی جهت جلوگیری از اتصال کوتاه و جداسازی کاتد (اسپایک آبرو- پلاسمایی) از آند (دماغه مخروطی ناقص) و همچنین جلوگیری از انتقال حرارت به مدل و نگهداری اسپایک پلاسمایی در خط مرکزی مدل برای داشتن توزیع متقارن پلاسمای در اطراف دماغه مدل با درز 11 mm استفاده شده است. قطر عایق در نوک دماغه برابر 24 mm در نظر گرفته شده و قسمت داخلی آن با اپوکسی مخصوص عایق‌بندی شده است. همچنین از یک میدان مغناطیسی در انتهای اسپایک و محل اتصال آن به دماغه مخروطی استفاده شده است تا بتوان سرعت دورانی ذرات الکتریکی را حول اسپایک تقویت کرد. از مخروط ناقص دماغه مدل به عنوان آند (قطب مثبت) استفاده می‌شود. بدنه سیلندری طوری در نظر گرفته شده است که بالانس داخلی بتواند به راحتی در داخل آنجا بگیرد و هم‌زمان بتواند ضریب نیروی درگ را در دو حالت با و بدون تخلیه پلاسمای اندازه‌گیری کرد. طول قسمت سیلندر برابر با 268 mm بوده و یک آداپتور برای نصب بالانس داخلی در نظر گرفته شده است. شکل ۵ مدل نصب‌شده در محفظه آزمون را نشان می‌دهد.



شکل (۵): مدل مخروطی با دماغه مخروطی ناقص 60° و اسپایک آبرو پلاسمایی نصب‌شده در محفظه آزمون تونل باد مافوق صوت.

۵- تخلیه پیوسته

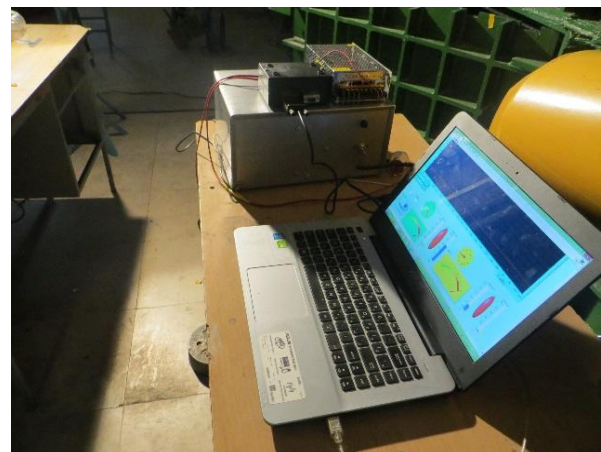
برای تخلیه پلاسما از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا DC پیوسته استفاده شده است. این منبع تغذیه در ولتاژ بالا دارای ۵۰ mA و ولتاژ ۳۰ KV است که پس از تأمین ولتاژ شکست به ۱ A و ۶۰۰V کاهش می‌یابد. ورودی برق این مدار ۵۰ Hz و ۲۲۰V بوده که توسط پل دیودی و یک خازن با $1 \mu F$ و ترانس کاهنده به ولتاژ ۲۲۰ VDC تبدیل می‌شود. سپس توسط مدار سوئیچینگ، موج PWM با فرکانس مرکزی ۸ KHz و دامنه ولتاژ ۱۲ V تولید می‌شود. دانسیته الکترونی بر اساس گزارشات در مرجع [۵]. در عدد ماخ $2/5$ برابر با 10^{19} m^{-3} منظور شده است. شکل ۶ منبع تغذیه دوپل ساخته شده به همراه برنامه ثبت نتایج ولتاژ و آمپر را نشان می‌دهد. منبع تغذیه ولتاژ پائین آن دارای جریان ۱ آمپر و ولتاژ ۶۰۰ ولت می‌باشد.



شکل (۷): شماتیکی از تنظیم اپتیکی سیستم شادوگراف برای مشاهده موج ضربه‌ای [۷].

۷- نتایج آزمایشات از تخلیه پیوسته پلاسما

میزان بهبود در رفتار موج ضربه‌ای به دانسیته و حجم پلاسما در هر تخلیه بستگی دارد. این تخلیه الکتریکی پلاسما می‌تواند با استفاده از پدیده برخورد^۲ هوای ورودی به جسم را منحرف نماید و به مثابه یک اسپایک فیزیکی و حذف اثرات منفی آن، سبب کاهش شدت موج ضربه‌ای گردد. در این آزمایش‌ها برای همپوشانی پلاسما پیرامون اسپایک، میدان مغناطیسی خارجی به صورت دائم وجود داشته و فقط در موقع تخلیه پلاسما شدت آن بیشتر شده است. عکس‌های شادوگراف از میدان جریان اطراف دماغه و اسپایک در عدد ماخ $1/5$ با و بدون تخلیه پلاسما در شکل ۸ آورده شده است. شکل ۸-a شکل امواج ضربه‌ای را در قبل از تخلیه پلاسما نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد موج بالایی دارای زاویه $60/9$ و موج پایینی دارای زاویه $63/7$ درجه بوده است که می‌تواند ناشی از مسیر حرکت سیکلوترونی الکترون‌های پلاسما باشد که باعث اختلاف در زوایای بالا و پائین موج ضربه‌ای به صورت منفرد شده است. همچنین عدم سیل بندی منبع ولتاژ بالا و در نتیجه نشت جریان آن در قبل از استارت منبع باعث این اختلاف شده است. در این آزمایشات شکل موج تخلیه پلاسما به صورت RC است بنابراین، پلاسمایی تولید شده با وجود آن که DC



شکل (۶): منبع تغذیه دوپل و نرم‌افزار آن.

۶- مشاهدات اپتیکی

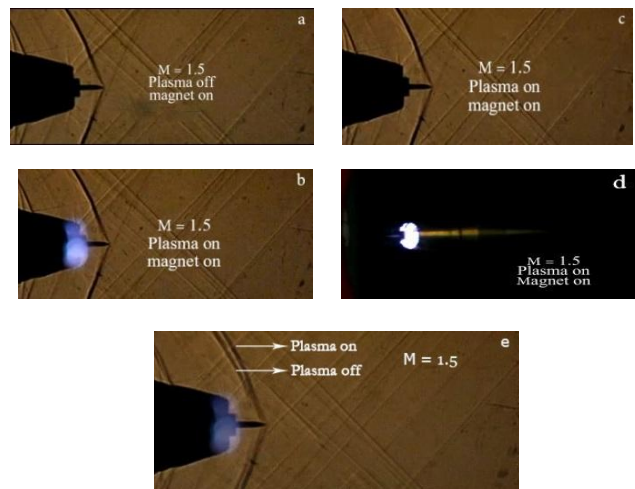
شماتیکی از مراحل اپتیکی برای عکس‌های هم‌زمان سیستم شادوگراف^۱ و تخلیه تابان بعد از تخلیه پلاسما در شکل ۷ نشان داده شده است [۷]. چیدمان شکل برای مشاهده اپتیکی میدان جریان اطراف دماغه مخروطی ناقص، اسپایک و دماغه کاند استفاده شده است. یک دوربین با نرخ 300 فریم بر ثانیه برای ثبت مستقیم عکس‌های دستگاه شادوگراف از دینامیک میدان جریان و یک دوربین ویدئویی برای ارزیابی توزیع فضایی و تکامل زمانی از تخلیه تابان با نرخ 30 فریم بر ثانیه

میدان مغناطیسی برقرار شده که علاوه بر هم‌پوشانی پلازما باعث تغییراتی در زاویه موج ضربه‌ای مایل بالا و پائین شده است. اما به دلیل تولید پلاسمای ضعیف، مرحله دوم را که افزایش زاویه موج ضربه‌ای و در نتیجه تضعیف و یا حذف ایده‌آل آن است، را سبب شود.

شکل **a-b,c** شادو گراف تخلیه پلازما و شکل **d-e** تخلیه تابان را نشان می‌دهد. تخلیه بیشتر پلازما باعث شده زاویه موج ضربه‌ای بالا و پائین مدل به ترتیب به $۶۲/۵$ و $۶۵/۵$ درجه افزایش یابد. همچنین شکل **e** تصاویر موج را در موقعی که نشتی دانسیته جریان برقرار بوده و در نتیجه ابتدا زاویه موج ضربه‌ای به علت کاهش فشار در پشت جبهه موج، کاهش یافته و سپس به واسطه تخلیه ضعیف پلازما افزایش نموده است را نشان می‌دهد. بنابراین افزایش دانسیته جریان به علت تخلیه بیشتر پلازما در پشت موج منحنی شکل باعث کاهش شدت موج ضربه‌ای و افزایش زاویه موج در بالا و پائین به ترتیب برابر $۱/۶$ و $۱/۸$ درجه گردیده است، که حاکی از تأثیر تخلیه پلازما بر موج ضربه‌ای است. بنابراین، در عدد ماخ $۱/۵$ ترکیب پلازما و میدان مغناطیسی باعث شده ساختمان موج منحنی به اندازه قطر مخروط ناقص تضعیف و روی موج ضربه‌ای جلوی اسپایک نیز تأثیر داشته باشد. یکی از الزامات تخلیه پلازما برای تضعیف یا حذف موج ضربه‌ای تخلیه آن در جلوی موج ضربه‌ای است. اما به علت این که در عدد ماخ $۱/۵$ موج منحنی از دماغه مخروطی فاصله دارد، تخلیه در پشت موج ضربه‌ای صورت گرفته است، و تأثیر زیادی بر کاهش شدت موج ضربه‌ای ایجاد نموده است.

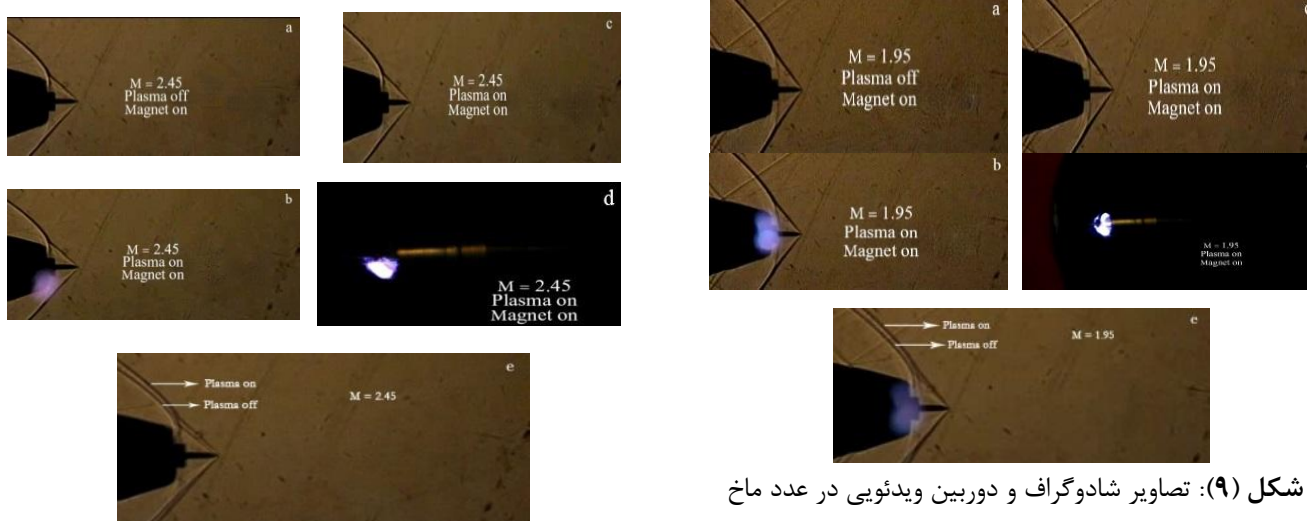
عکس‌های شادوگراف و دوربین ثبت تخلیه تابان پلازما از میدان جریان اطراف دماغه و اسپایک در عدد ماخ $۱/۹۵$ با و بدون تخلیه پلازما در شکل **۹** آورده شده است. شکل **a-۹** شکل امواج ضربه‌ای را در قبل از تخلیه پلازما نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد موج بالایی دارای پائینی دارای زاویه $۴۷/۳$ و موج پائینی دارای زاویه $۴۹/۵$ درجه بوده است که می‌تواند همانند عدد ماخ $۱/۵$ ناشی از مسیر سیکلوترونی حرکت ذرات باردار و عدم سیل بندی منبع تغذیه و نشت جریان آن در قسمت پائین اسپایک و دماغه مدل باشد. به طوری که دانسیته جریان در پائین مدل برقرار شده و باعث تغییرات زاویه موج ضربه‌ای شده است.

پیوسته است، درای سطح ناهموار و موجی^۱ می‌باشد و در پرپود مربوطه، باعث تخلیه الکتریکی لحظه‌ای بیش از $۰/۱$ آمپر شده است. بنابراین، در یک لحظه، میدان مغناطیسی برقرار شده که علاوه بر هم‌پوشانی پلازما باعث تغییراتی در زاویه موج ضربه‌ای مایل بالا و پائین شده است. اما به دلیل تولید پلاسمای ضعیف، مرحله دوم را که افزایش زاویه موج ضربه‌ای و در نتیجه تضعیف و یا حذف ایده‌آل آن است، را سبب شود.



شکل (۸): تصاویر شادوگراف و دوربین ویدئویی در عدد ماخ $۱/۵$: (a) قبل از تخلیه پلازما. (b,c) - تخلیه پلازما و میدان مغناطیسی به ترتیب در حالت تخلیه تابان و ۵۰ میلی ثانیه پس از آن. (d) - تخلیه تابان پلازما و (e) - ترکیبی از موج‌های ضربه‌ای با نشتی دانسیته جریان و تخلیه بیشتر پلازما.

شکل **a-۸** شکل امواج ضربه‌ای را در قبل از تخلیه پلازما نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد موج بالایی دارای زاویه پائینی دارای زاویه $۶۳/۷$ درجه بوده است که می‌تواند ناشی از مسیر حرکت سیکلوترونی الکترون‌های پلازما باشد که باعث اختلاف در زوایای بالا و پائین موج ضربه‌ای به صورت منفرد شده است. همچنین عدم سیل بندی منبع ولتاژ بالا و در نتیجه نشت جریان آن در قبل از استارت منبع باعث این اختلاف شده است. در این آزمایشات شکل موج تخلیه پلازما به صورت RC است بنابراین، پلاسمایی تولید شده با وجود آن که DC پیوسته است، دارای سطح ناهموار و موجی می‌باشد و در پرپود مربوطه، باعث تخلیه الکتریکی لحظه‌ای بیش از $۰/۱$ آمپر شده است. بنابراین، در یک لحظه،



شکل (۹): تصاویر شادوگراف و دوربین ویدئویی در عدد ماخ ۱/۹۵: (a) قبل از تخلیه پلاسما. (b,c) - تخلیه پلاسما و میدان مغناطیسی به ترتیب در حالت تخلیه تابان و ۵۰ میلی ثانیه پس از آن (d) - تخلیه تابان پلاسما و (e) - ترکیبی از موج‌های ضربه‌ای با نشتی دانسیته جریان و تخلیه بیشتر پلاسما.

شادوگراف تخلیه پلاسما شکل **۹-b,c** و تخلیه تابان شکل **۹-d** نشان می‌دهد تخلیه پلاسما با دانسیته جریان بیشتر به مدل باعث شده است زاویه موج ضربه‌ای بالا و پائین مدل به ترتیب به ۴۹/۱ و ۵۰/۵ درجه افزایش یافته است. افزایش دانسیته جریان ناشی از تخلیه الکتریکی پلاسما در پشت موج منحنی سبب شده شدت موج ضربه‌ای کاهش یافته و زاویه موج در بالا و پائین به ترتیب برابر با ۱/۸ و ۱درجه افزایش نسبت به نشت دانسیته جریان می‌باشد. همچنین شکل **۹-e** تصاویر موج را در موقعی که نشتی دانسیته جریان برقرار بوده و در نتیجه ابتدا زاویه موج ضربه‌ای به علت کاهش فشار در پشت جبهه موج، کاهش یافته و سپس به واسطه تخلیه ضعیف پلاسما افزایش نموده است را نشان می‌دهد. بنابراین در عدد ماخ ۱/۹۵ ترکیب پلاسما و میدان مغناطیسی باعث شده موج منحنی تا حدودی تضعیف شود، هرچند در گزارشات مربوط به مقالات ارائه شده در دنیا اشاره شده که تخلیه در پشت موج ضربه‌ای باعث تضعیف موج ضربه‌ای نشده است. اما به علت وجود میدان پلاسما و مغناطیس در جریان تونل باد می‌توان با افزایش دانسیته جریان منبع تغذیه این کار را عملی کرد.

عکس‌های شادوگراف و دوربین ثبت تخلیه تابان پلاسما از میدان جریان اطراف دماغه و اسپایک در عدد ماخ ۲/۴۵ با و بدون پلاسما در شکل **۱۰** آورده شده است.

شکل (۱۰): تصاویر شادوگراف و دوربین ویدئویی در عدد ماخ ۲/۴۵: (a) قبل از تخلیه پلاسما. (b,c) - تخلیه پلاسما و میدان مغناطیسی به ترتیب در حالت تخلیه تابان و ۵۰ میلی ثانیه پس از آن. (d) - تخلیه تابان پلاسما و (e) - ترکیبی از موج‌های ضربه‌ای با نشتی دانسیته جریان و تخلیه بیشتر پلاسما.

همچنان که از تصاویر شادوگراف شکل **۱۰-a** مشخص است با افزایش عدد ماخ به ۲/۴۵، زاویه موج ضربه‌ای از مقدار ۴۷ درجه در عدد ماخ ۱/۹۵ به مقدار ۴۰ درجه در عدد ماخ ۲/۴۵ کاهش یافته و موج منحنی در فاصله ۱۲ mm از نوک اسپایک به سمت پائین دست جریان به فاصله ۱۸ mm از نوک دماغه اسپایک حرکت کرده است. واضح است که با افزایش سرعت جریان هوا و وجود میدان مغناطیسی ثابت، دانسیته جریان افزایش یافته و در نتیجه به علت سرایت پلاسما در حین خاموش بودن منبع تغذیه، موج منحنی در قسمت پائین دماغه حذف شده است.

شادوگراف شکل **۱۰-b,c** و تخلیه پلاسما و شکل **۱۰-d** تخلیه تابان نشان می‌دهد تخلیه پلاسما با دانسیته جریان بیشتر به مدل باعث شده است زاویه موج ضربه‌ای بالا و پائین مدل به ترتیب به ۴۱/۹ و ۴۵/۴ درجه افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش بیشتر دانسیته جریان ناشی از تخلیه پلاسما روی موج منحنی باعث افزایش زاویه به میزان ۱در بالای مدل و ۷در پائین مدل شده است. در این شکل، کاهش قابل توجه در شدت موج ضربه‌ای در پائین مدل و کاهش ملایم در بالای موج منحنی مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از نشتی

عدم توازن آن شده است. بنابراین، شکل‌های $a-8$ تا $a-10$ در حضور نشت دانسیته جریان از منبع تغذیه و تولید پلازما بوده است.

۸ - نتیجه‌گیری

جریان پلازما در جلوی مدل آبرو- اسپایک پلاسمایی به‌وسیله تخلیه الکتریکی تابان با 50 Hz ، 50 mA و 30 KV تولید گردید. این جریان پلازما به‌عنوان منحرف‌کننده جریان ورودی به مدل برای انتقال موج از یک موج کاملاً چسبیده به یک موج منحنی‌الشیکل غیر چسبیده در نظر گرفته شده است. برای افزایش دانسیته جریان و تثبیت تخلیه تابان از میدان مغناطیسی ثابت در حین آزمایشات استفاده شده به‌طوری‌که در اعداد ماخ مافوق صوت پائین یک تخلیه صفحه‌ای متقارن در نزدیکی دماغه مخروطی ناقص شکل گرفته است.

با افزایش عدد ماخ از $1/5$ به $2/45$ توزیع تخلیه پلازما به‌صورت نامتقارن صورت پذیرفته و تنها در قسمت پائین اسپایک عمل نموده است. تصاویر شادوگراف نشان می‌دهد که وجود میدان مغناطیسی در انتهای اسپایک و شدت تخلیه در قسمت پائین دماغه مدل سبب تضعیف کامل شوک در قسمت پائین دماغه و حذف آن شده است. از طرف دیگر ترکیب میدان مغناطیسی با تخلیه الکتریکی پلازما می‌تواند باعث افزایش سرعت زاویه‌ای الکترون‌ها و همپوشانی بهتر پلازما پیرامون اسپایک شود. در این آزمایشات شکل موج تخلیه پلازما به‌صورت RC بوده و در نتیجه پلاسمایی تولیدشده باوجود آنکه DC پیوسته است، دارای سطح ناهموار و موجی می‌باشد و در شرایط پرپود ریپل باعث تخلیه الکتریکی لحظه‌ای بیش از $10/1$ آمپر شده است. بنابراین، در یک لحظه میدان مغناطیسی برقرار شده که باعث هم‌پوشانی پلازما نیز می‌گردد. در اعداد ماخ مافوق صوت $1/5$ تا 2 تغییراتی در زاویه موج ضربه‌ای و مایل مشاهده شده است، اما به دلیل تولید موج پلاسمای ضعیف مرحله دوم را که افزایش بیشتر زاویه موج ضربه‌ای و در نتیجه تضعیف و یا حذف ایده آل آن را سبب شود، مشاهده نمی‌گردد. برای رفع این نقص باید قدرت سیستم تخلیه پلازما ارتقاء یابد.

در عدد ماخ $2/45$ موج ضربه‌ای به دماغه ناقص چسبیده و با تخلیه پلازما در جلوی موج منحنی‌الشیکل و در قسمت پائین اسپایک، باعث تضعیف و حذف موج در ناحیه پائین

دانسیته جریان و تشکیل پلازما (مخصوصاً در منطقه پائین دماغه مدل) در قبل از اینکه کلید در حالت روشن قرار گیرد، می‌باشد. تصاویر تخلیه تابان در شکل $d-10$ نشان می‌دهد که به علت ضعیف بودن منبع تغذیه ولتاژ بالا، تخلیه پلازما فقط در قسمت پائین دارای شدت نسبتاً خوب و در قسمت بالا خیلی کم بوده است، بطوریکه قسمت پائینی شوک منحنی ناشی از دماغه مخروط ناقص حذف شده اما قسمت بالایی شوک منحنی هرچند تضعیف شده است اما همچنان وجود دارد. همچنین شکل $e-10$ تصاویر موج در موقع نشت دانسیته جریان و تخلیه ضعیف پلازما را نشان می‌دهد. در موقع نشت دانسیته جریان ابتدا زاویه موج ضربه‌ای به علت وجود اسپایک و نشتی جریان و در نتیجه کاهش فشار در پشت جبهه موج، کاهش یافته و سپس به‌واسطه تخلیه ضعیف پلازما افزایش محدودی نموده است. بنابراین ترکیب تخلیه پلازما و میدان مغناطیسی خارجی، سبب شده موج منحنی حذف شود که با افزایش دانسیته جریان منبع تغذیه می‌توان شوک بالایی را نیز حذف کرد. البته مونتاژ مجموعه مدل و سیستم‌های مربوطه و زاویه انحراف جریان هوا نیز در عدم تقارن موج منحنی ناشی از دماغه مخروطی ناقص تأثیرگذار بوده است که اثرات آن ناچیز می‌باشد.

شکل ۱۱ نشتی جریان الکتریکی در نوک دماغه مدل در زمان خاموش بودن منبع را در محیط آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در این آزمایش بجای عایق سرامیکی از عایق میکا استفاده شده است.



شکل (۱۱): نشتی دانسیته جریان در موقعی که منبع تغذیه خاموش بوده است.

نتایج تست منبع تغذیه در شرایط اتمسفری نشان می‌دهد که درحالی‌که منبع تغذیه خاموش بوده است دانسیته جریان روی اسپایک تخلیه‌شده و باعث کاهش شدت موج ضربه‌ای و

5. Kuo, S.P. "Plasma Mitigation of Shock Wave: Experimental and Theory", Shock Waves, Vol. 17, No. 4, pp. 225-239, 2007.
6. Kuo, S.P. "Air Plasma Mitigation of Shock Wave", Advances in Aerospace Science and Technology, Vol. 1, No. 2, pp.59-69, 2016.
7. Bivolaru, D. and Kuo, S.P. "Observation of Supersonic Shock Wave Elimination by a Plasma Aero- Spike", Physics of Plasmas, Vol. 9, No. 2, pp. 721-723, 2002.
8. Mumivand, M. and Mohammad Khani, H. "Numerical Study of Aerodynamic Drag Reduction Blunt Nose with Spike and Jet Injection Combined Axial and Transverse", Journal of Mechanical Engineering modares, Vol. 16, pp. 133-142, 2016 (In Persian).

دماغه شده است و این مهم‌ترین نتیجه‌ای است که نشان می‌دهد تخلیه پیوسته پلاسما قادر به حذف امواج ضربه‌ای با استفاده از پدیده برخورد می‌باشد.

۹- مراجع

1. Kuo, S.P., Kalkhoran, I.M., Bivolaru D., and Orlick L. "Observation of Shock Wave Elimination by a Plasma in a M 2.5 Flow", Physics of Plasmas, Vol. 7, No.5, pp.1345-1348, 2005.
2. Kuo, S.P. and Bivolaru D. "Plasma Effect on Shock Waves in a Supersonic Flow", Physics of Plasmas, Vol. 9, No. 2, pp.721-723, 2001.
3. Chang, K.P. "Leading-Edge Flow Separation", Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1970.
4. Bivolaru, D. and Kuo, S.P. "Aerodynamic Modification of Supersonic Flow around Truncated Cone, Using Pulsed Electrical Discharges", AIAA J., Vol. 43, pp. 1482-1489, 2005.