

بررسی جریان سرد پشت شعله نگهدارهای وی - شکل به روش PIV

سید محمدعلی نجفی^۴

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران

عباس ابراهیمی^۲

دانشکده مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی شریف

مهدی سلیمانی^۱ و حجت قاسمی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۲)

چکیده

در مقاله حاضر ضمن معرفی نوع جدیدی از شعله‌نگهدارها، با استفاده از روش PIV ویژه‌گی‌های میدان جریان در پشت آن در رژیم جریان سرد بررسی شده است. میدان‌های سرعت لحظه‌ای، عدد استروهل، میدان سرعت متوسط، میدان ورتیسیتی، طول و هندسه ناحیه بازچرخش از جمله خصوصیات هستند که متأثر از شکل هندسی شعله نگهدار می‌باشند. در این مقاله، تاثیر شکل شعله‌نگهدار بر این خصوصیات مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از روش PIV ساختار پیچیده و ناپایای این جریان با دقت زیاد زمانی و مکانی بدست آمده است. این آزمایش‌ها بر روی دو نوع شعله‌نگهدار وی-شکل، یکی با لبه صاف و دیگری با لبه موج‌دار انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از افزایش طول و عرض ناحیه بازچرخش در شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار نسبت به شعله‌نگهدار با لبه صاف می‌باشد. برای هر دو نوع شعله‌نگهدار یک ساختار متقارن از جریان در پشت شعله‌نگهدار به‌وجود می‌آید. همچنین، افت فشار استاتیک پشت شعله‌نگهدار موج‌دار بیشتر از شعله‌نگهدار لبه صاف می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شعله‌نگهدار، پایداری، PIV، طول ناحیه بازچرخش، ورتیسیتی

Cold Flow PIV Measurements Behind V-Shaped Flame Holder

M. Soleimani and H. Ghassemi

Mechanical Engineering
Department
Iran University of Science and
Technology

A. Ebrahimi

Department of Aerospace
Engineering
Sharif University of
Technology

S. M. A. Najafi

Mechanical Engineering
Department
Iran University of
Science and Technology

(Received: 7/October/2016; Accepted: 11/January/2017)

ABSTRACT

This paper introduces a new type of flame holder. Flow field is investigated, using PIV measurements in cold flow regime. The experiments on two types of V-shape flame holder: one with smooth edges and the other with wavy edges. The instantaneous velocity fields, Strouhal number, average velocity, vorticity, and recirculation zone length were among the parameters affected by the flame holder geometry. In this work, we examined the influence of these characteristics. Complex structure and unsteadiness of the flow was obtained with high accuracy. The results indicate an increase in length and width of the recirculation zone when using the wavy edges instead of smooth edges. For both geometries, a symmetrical flow structure was observed behind the flame holder. Also, higher static pressure drop was detected behind the flame holder for geometry with wavy edges.

Keywords: Flame holder, Stability, PIV, Recirculation Zone Length, Vorticity

۱- کارشناس ارشد: m64solimani@gmail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): h_ghassemi@iust.ac.ir

۳- استادیار: ebrahimi_a@sharif.ir

۴- دانشجوی دکتری: manajafi@mecheng.iust.ac.ir

۱- مقدمه

پایدار کردن شعله در جریانی که سرعت آن از سرعت شعله بیشتر می‌باشد، مهم‌ترین دلیل استفاده از شعله‌نگهدارها است. در موتورهای رم جت، پس‌سوز، موتورهای توربوجت و توربوفن برای نگه‌داشتن شعله از اجسام سرپهن به طور گسترده استفاده می‌شود. از جمله این اجسام سرپهن نوع وی-شکل می‌باشد که در جریان‌های با سرعت زیاد به سه دلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ افت فشار کل کم، سادگی در ساخت و سبکی [۱]. شعله‌نگهدار جریانی را متشکل از لایه‌های مرزی، لایه‌های برشی و دنباله تولید می‌کند [۲]. ناپایداری در لایه‌های برشی یا ناپایداری کلونین-هلمهولتز، باعث تقویت اغتشاشات و هدایت گردابه‌های چرخشی بالارونده و پوسته‌ای متقارن از لایه‌های برشی می‌شود. دنباله یا همان ناپایداری کارمن باعث هدایت گردابه‌های تولیدی و انتشار آن در پشت شعله‌نگهدار شده و ساختاری نوسانی دارد. مکانیزم نگهداری براساس بوجود آمدن حباب‌های بازچرخشی در پشت شعله‌نگهدار می‌باشد که به دلیل اختلاف فشار استاتیکی است که در پشت جسم به‌وجود می‌آید. ناحیه بازچرخشی انباشته‌شده از گازهای داغی می‌باشد که به عنوان یک منبع گرمایی عمل می‌کند. ناحیه بازچرخشی و جریان آزاد محیط اطراف دارای تبادل توربولانسی بین گازهای سوخته نشده اطراف و گازهای سوخته شده دارای انرژی می‌باشد. این ناحیه زمان مورد نیاز برای مخلوط شدن و آمادگی سوخت برای احتراق را فراهم می‌کند. مطالعات گذشته نشان می‌دهند که ساختار جریان در دنباله ایجاد شده در پشت شعله‌نگهدار تاثیر زیادی در پایدار کردن شعله دارد. شناخت هرچه بیشتر جریان حول شعله‌نگهدار می‌تواند کمک زیادی در پایدارسازی و نگهداری شعله به این روش نماید. به همین دلیل بررسی میدان سرعت، میدان دما، آشفتگی و ساختار جریان پشت جسم سرپهن از مهم‌ترین موضوعات تحقیق در این زمینه در سال‌های اخیر بوده است. بعد از گذشت ۵۰ سال از مطالعه جزئیات شعله‌نگهدارها در سال ۱۹۵۰ دزویی^۱ [۳] و کینگ^۲ [۴] دریافتند که جدایش شعله با فشار، دما و سرعت ورودی مرتبط می‌باشد. زوکوسکی و ماربل^۳ [۵] نشان دادند که طول ناحیه بازچرخشی نقش مهمی در پایداری شعله ایفا می‌کند.

هم‌چنین لابلج^۴ [۶] نشان داد که انتشار شعله اصلی به انتقال حرارت از شعله اولیه به جریان گازهای سوخته نشده در طول این ناحیه به وسیله لایه‌های برشی صورت می‌گیرد. وینترفلد^۵ [۷] به بررسی تبادل آشفتگی بین ناحیه بازچرخش و خارج آن، در شعله پایدارشده در پشت جسم سرپهن پرداخته و نتیجه گرفت که اجسام سرپهنی که بیشتر جریان را تحت تأثیر قرار دهند، تبادل بیشتری ایجاد می‌کنند. وینترفلد تحلیل عددی بر روی جریان پشت شعله‌نگهدار در حالت با و بدون احتراق انجام داده و گزارش کرد که حضور شعله زمان اقامت ذرات را افزایش می‌دهد و همچنین بیان نمودند که شعله‌نگهداری که تولید سرعت جدایش شعله بیشتری کند خاصیت پایداری بهتری دارد. دیویس و بیبر^۶ [۸] در پژوهشی تجربی به روش سیم داغ، توزیع مکانی دبی جرمی جریان معکوس در پشت جسم سرپهن را به صورت تابعی از نسبت انسداد به‌دست آوردند. آن‌ها همچنین مشخصه‌های آشفتگی مانند توزیع مکانی تنش برشی آشفتگی، شدت آشفتگی و انرژی جنبشی آشفتگی را در دنباله جسم سرپهن به‌دست آوردند.

سولری^۷ و همکارانش [۹] به بررسی تجربی جریان دنباله نزدیک آشفته پشت چند جسم مختلف سرپهن دوبعدی و متقارن محوری پرداختند و نشان دادند که در توزیع فشارها و سرعت‌ها، برای اجسام سرپهن مختلف تشابه وجود دارد. باکروزیس^۸ و همکارانش [۱۰] به بررسی تجربی دنباله محترق آشفته در پشت یک جسم سرپهن به شکل استوانه با مقطع مربعی پرداختند. آن‌ها سرعت متوسط و سرعت آشفتگی را برای دو عدد رینولدز به روش LDV اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که آشفتگی توسط احتراق سرکوب می‌شود و همچنین تولید و انتشار گردابه‌ها در جریان محترق وجود ندارد. لی^۹ و همکارانش [۱۱] دنباله پشت یک شعله‌نگهدار شعله را در جریان بدون احتراق و جریان احتراقی به روش مدل گالرکین از مرتبه کاهیده، شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از این مدل برای نشان دادن اثرات حرارت بر تضعیف تولید و انتشار گردابه‌ها استفاده

4- Loblich

5- Winterfeld

6- Davies and Beer

7- Sullerey

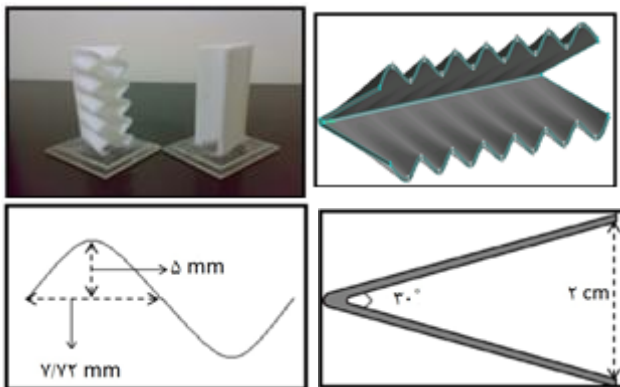
8- Bakrozis

9- Li

1- Dezubay

2- King

3- Zukoski and Marble



شکل (۱): نمایی از اجسام وی- شکل معمولی و موج‌دار.

۳- چیدمان آزمایشگاهی PIV

سرعت‌سنجی تصویر ذرات یا PIV یک روش غیرمخرب یا غیرتداخلی با میدان جریان است؛ طوری که تاثیری در رژیم حاکم بر جریان نمی‌گذارد و الگوی آن را به هم نمی‌ریزد. علاوه بر این، نوع اندازه‌گیری آن به صورت کلی است و میدان جریان را در یک ناحیه وسیع به دست می‌آورد. از روش PIV برای اندازه‌گیری میدان سرعت، با تفکیک زمانی و مکانی زیاد استفاده می‌شود. اجزای اصلی تشکیل دهنده روش PIV عبارتند از دوربین ثبت تصاویر سریع، دستگاه مولد نور، ذرات منعکس کننده نور. در این روش ذرات ریزی که بتوانند نور را منعکس کنند در داخل سیال جریان می‌یابند. این ذرات تقریباً هم چگالی سیال هستند و مطابق با آن حرکت می‌کنند. اندازه آن‌ها باید به اندازه‌ای کوچک باشد طوری که تاثیری در الگوی جریان نداشته باشند و به اندازه‌ای بزرگ باشد که نور کافی برای عکس‌برداری را منعکس کنند. دستگاه لیزر به عنوان مولد نور عمل کرده و با استفاده از سامانه‌های اپتیکی صفحه‌ای از میدان جریان را روشن می‌کند. یک دوربین عمود بر این صفحه، از این میدان عکس‌برداری می‌کند. با پردازش عکس‌های متوالی و از روی جایجایی ذرات، بردار سرعت میدان تعیین می‌گردد. شکل ۲ شماتیک و اصول کلی کار در روش PIV که در این پژوهش به کار گرفته شده را نشان می‌دهد.

جریان از چپ به راست در کانال در حال عبور می‌باشد پس از عبور جریان از روی جسم وی-شکل، ذرات درون جریان نور لیزر تابیده شده را منعکس نموده و سپس توسط دوربین از ذرات در حال عبور عکس‌برداری می‌شود. با داشتن فاصله زمانی بین دو عکس و جایجایی ذرات بردار سرعت به دست می‌آید. نور

کردند. بوش و گوتمارک^۱ [۱۲] در یک پژوهش تجربی به بررسی میدان جریان محترق و بدون احتراق حول یک جسم سرپهن وی- شکل با استفاده از روش PIV پرداختند. آنها برای نزدیک شدن به واقعیت، پاشش سوخت را در بالادست جسم انجام دادند و ساختار جریان را به صورت لحظه‌ای و متوسط در دنباله جسم سرپهن سه بعدی اندازه‌گیری کردند. آنها همچنین سرعت متوسط، ورتیسیته و انرژی جنبشی آشفته را برای دو جریان محترق و بدون احتراق اندازه گرفته و باهم مقایسه کردند. نتایج نشان‌دهنده تفاوت‌های اساسی ساختار جریان لحظه‌ای در این دو حالت بود. در حالت بدون احتراق شکل‌گیری گردابه‌های بزرگ و نامتقارن مشاهده شد در حالی که در حالت محترق شکل‌گیری گردابه‌های کوچک به هر دو صورت متقارن و نامتقارن دیده شد. همچنین در حالت محترق ناحیه سرعت معکوس بزرگ‌تر از حالت بدون احتراق است.

در پژوهش‌هایی که در بالا به آنها اشاره شد تأثیرات انواع شعله‌نگهدارها و شکل‌های مختلف آنها بر جریان پس از شعله‌نگهدار بررسی شده است. در این مقاله به بررسی تأثیرات موج‌دار کردن لبه‌های یک شعله‌نگهدار وی شکل بر جریان با استفاده از روش PIV پرداخته شده است. آن‌گاه این آثار با آثار همان شعله‌نگهدار با لبه‌های صاف مقایسه شده است.

۲- چیدمان و شرایط آزمایشگاهی

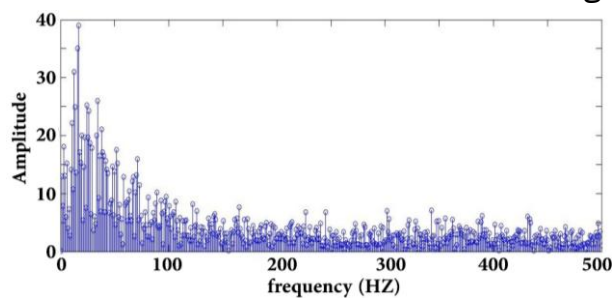
آزمایش‌ها در تونل بادی که متشکل از یک دمنده با حداکثر دور ۲۸۵۰ rpm و قابل تنظیم توسط یک اینورتر می‌باشد، انجام شده است. طول کانال تونل ۱۲۰ سانتی‌متر و سطح مقطع آن ۸×۸ سانتی‌متر مربع می‌باشد که مقطع آزمایش در ۴۰ سانتی‌متری انتهای تونل قرار گرفته است. محدوده سرعت هوا در آزمایش از ۰٫۹ تا ۲٫۶ متربرثانیه می‌باشد. شعله‌نگهدارهای وی- شکل دارای زاویه راس ۳۰ درجه، انسداد (یا دهنه) ۲ سانتی‌متر، طول ۸ سانتی‌متر و با ضخامت لبه ۲ میلی‌متر می‌باشند. یک نوع شعله‌نگهدار دارای لبه صاف بوده و نوع دیگر آن دارای لبه موج‌دار سینوسی است. شکل ۱ تصاویری از این اجسام وی- شکل را نشان می‌دهد. در جسم با لبه موج‌دار، موجی سینوسی به ارتفاع ۵ میلی‌متر و نیم‌دامنه ۷٫۷۲ میلی‌متر به وجود آمده است که این موج سینوسی با شیئی یک‌نواخت تا زاویه راس جسم به صفر می‌رسد.

فرآیند جاری شدن یا انتشار گردابه‌ها پدیده‌ای نوسانی است که هنگام برخورد جریان سیال با اجسام جریان‌بند بوجود می‌آید. در این حالت ورتیسیتیته در پشت جسم تولید شده و از هر دو طرف (بالا و پایین) جسم جدا می‌شود. این فرکانس با افزایش طول مشخصه جسم کاهش می‌یابد. فرکانس جاری شدن گردابه‌ها با استفاده از طول مشخصه جسم و سرعت جریان بی‌بعد شده و به صورت عدد استروهمال بیان می‌گردد که در رابطه (۱) بیان شده است:

$$St = \frac{fd}{V} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، f فرکانس جاری شدن گردابه‌ها، d طول مشخصه جسم و V سرعت جریان آزاد می‌باشد.

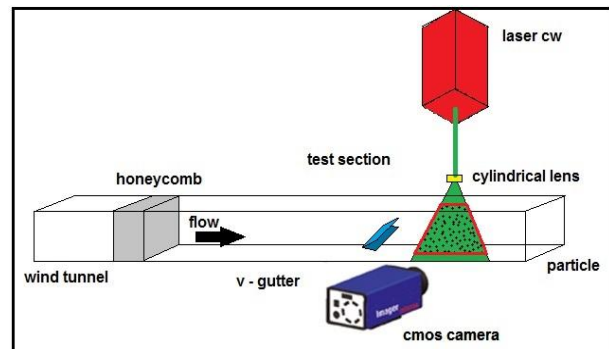
جهت به دست آوردن فرکانس گردابه‌های تولید شده در پشت استوانه، مؤلفه سرعت افقی در نقطه‌ای مشخص در پشت استوانه به دست می‌آید. این مقدار با استفاده از میدان‌های سرعت لحظه‌ای از روش PIV در اختیار بوده است. سپس با استفاده از روش FFT فرکانس‌های حاضر در این مولفه سرعت به دست می‌آید. فرکانس بزرگ‌ترین مولفه مشخص می‌شود و با استفاده از این فرکانس عدد استروهمال جریان از طریق معادله (۱) به دست می‌آید. شکل ۳ نشان دهنده نمونه‌ای از فرکانس به دست آمده با استفاده از روش FFT در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه برای استوانه با قطر ۲/۵ سانتی‌متر است. بیشترین فرکانس به دست آمده در بازه زمانی مشخص در این سرعت حدوداً ۱۴ می‌باشد.



شکل (۳): نمونه‌ای از فرکانس به دست آمده با استفاده از روش FFT در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه.

نتایج تجربی معتبر در منابع مختلف نشان می‌دهند که اندازه عدد استروهمال در این بازه عدد رینولدز تقریباً بین ۰/۲ تا ۰/۲۲ می‌باشد که با نتایج به دست آمده مطابقت خوبی دارد. در شکل ۴ عدد استروهمال بر حسب رینولدز که با استفاده از روش تجربی در منبع [۱۳] برای استوانه به دست آمده است نشان

لیزر با مقطع مدور و قطر کوچک تامین شده و با استفاده یک عدسی استوانه‌ای، به یک صفحه نازک تبدیل می‌شود. لیزر به کار رفته در این مجموعه از نوع لیزر پیوسته با طول موج ۵۳۲ nm و توان ۹W می‌باشد. دوربین به کار رفته نیز PCO از نوع CMOS و دارای سنسوری با ابعاد ۱۰۲۴×۱۲۸۰ پیکسل است که قادر به عکس‌برداری با سرعت بالا است. برای تولید ذرات نیز از یک مه‌ساز اولتراسونیک که قادر به تولید ذراتی به اندازه تقریبی ۱ میکرون می‌باشد استفاده شده است.



شکل (۲): شماتیک چیدمان آزمایشگاهی PIV.

۴- نتایج

جهت استخراج نتایج، تصاویر حاصل از عکس‌برداری با سرعت بالا، تحلیل شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- اعتبار سنجی

به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از روش PIV مورد استفاده در این پژوهش مقادیر عدد استروهمال برای دو استوانه با قطر ۱/۵ و ۲/۵ سانتی‌متر در رینولدزهای مختلف به دست آمده است که در جدول ۱ این مقادیر نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات آزمایش.

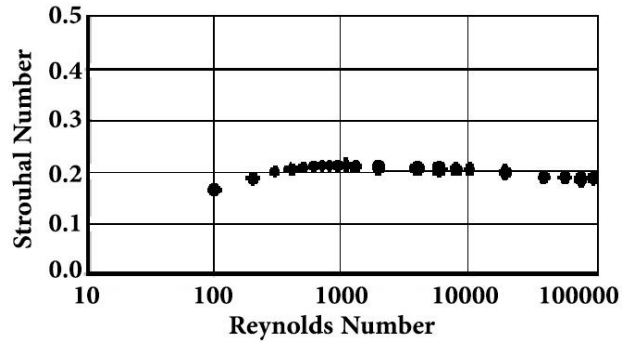
St	Re	V (m/s)	D (cm)
عدد	عدد	سرعت	قطر
استروهمال	رینولدز	جریان	استوانه
۰,۲۰۷	۱۲,۵	۰,۹	۱,۵
۰,۲۲	۲۲,۳	۱,۵	۱,۵
۰,۲۲۱۲	۲۹,۵	۲	۱,۵
۰,۲۱۹۳	۷,۹	۰,۹	۲,۵
۰,۲۲۲۷	۱۳,۴	۱,۵	۲,۵
۰,۲۲۲۵	۱۷,۸	۲	۲,۵

۴-۲- سرعت لحظه‌ای

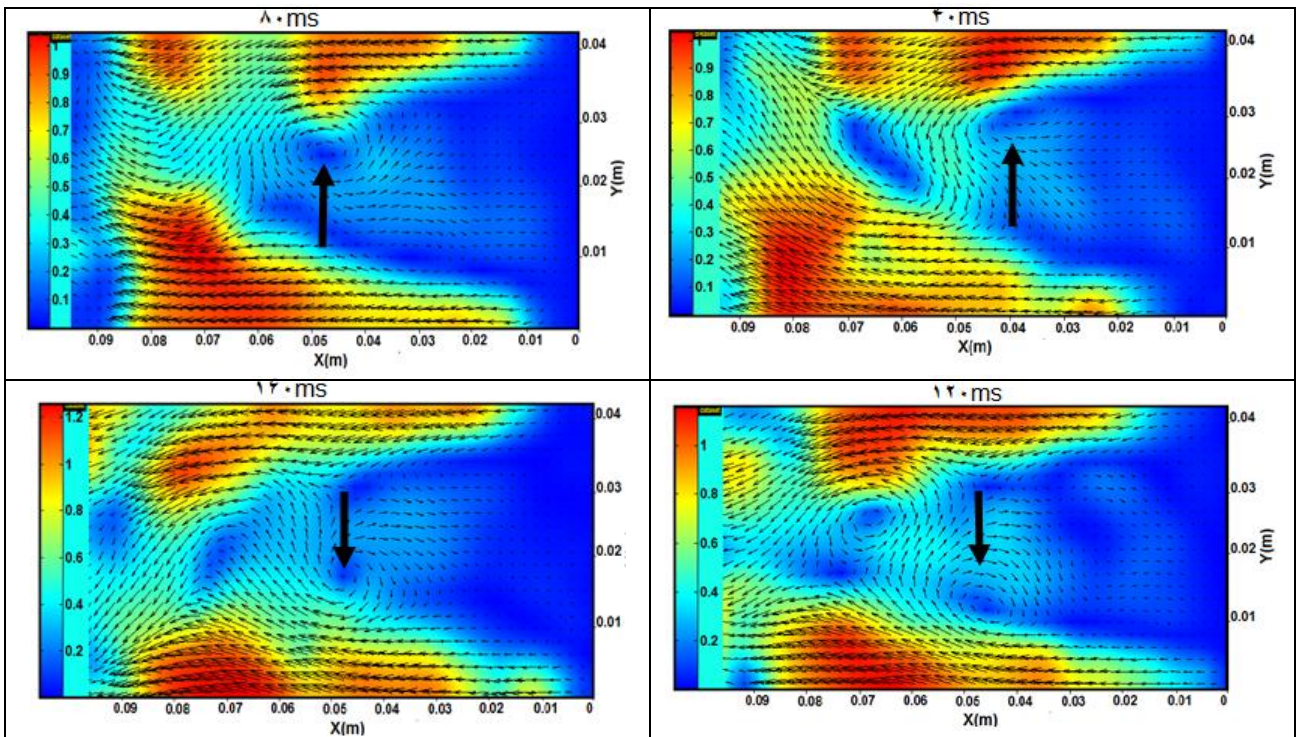
در شکل ۵ نمودار سرعت لحظه‌ای در پشت جسم وی- شکل معمولی با فاصله زمانی ۴۰ میلی‌ثانیه که با استفاده از روش PIV به‌دست‌آمده نشان داده شده است در این نمودارها سرعت جریان از راست به چپ و جسم وی- شکل دارای انسداد ۲ سانتی‌متر و زاویه رأس ۳۰ درجه می‌باشد (شکل ۱).

جریان از راست به چپ و مقادیر کمی کانتورهای سرعت بر حسب متر بر ثانیه در سمت چپ نمودار کشیده شده است. این نمودارها با فاصله زمانی ۴۰ میلی‌ثانیه رسم شده و به وضوح به‌وجود آمدن و از بین رفتن گردابه‌ها را در دوطرف جسم وی- شکل نشان می‌دهد.

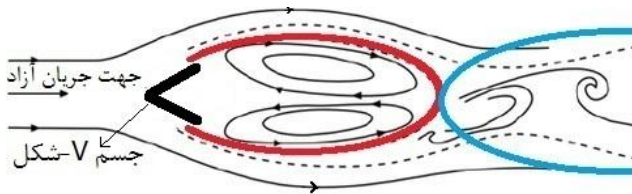
داده شده است. همان‌طور که مشخص است نتایج به‌دست‌آمده با این نمودار مطابقت دارد. علت انتخاب جریان حول استوانه، وجود دینامیک شناخته‌شده تولید و پخش گردابه در آن می‌باشد.



شکل (۴): نمودار عدد استروهل بر حسب رینولدز.



شکل (۵): نمونه‌ای از سرعت‌های لحظه‌ای میدان جریان.



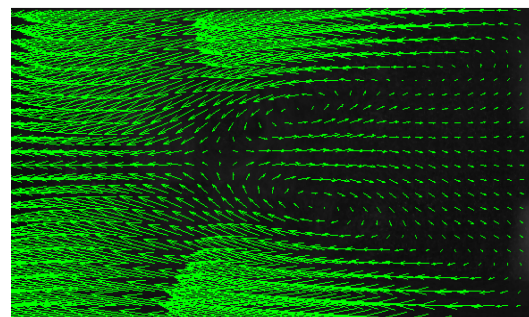
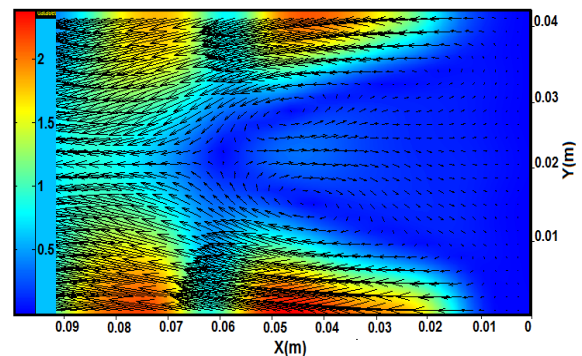
شکل (۶): ناحیه باز چرخش (ناحیه با کادر قرمز) و پدیده کارمن در پشت جسم (ناحیه با کادر آبی).

این پدیده به‌وجود آمدن و جاری شدن متناوب و نامتقارن گردابه‌ها همان ورتکس شدینگ می‌باشد. ورتکس‌ها به صورت متناوب و نامتقارن به وجود آمده و از بین می‌روند و باعث نوسانی شدن جریان در پائین دست می‌شود. این پدیده ناپایداری کارمن نامیده می‌شود. که در شکل ۶ نشان داده شده است.

۴-۳ ساختار متوسط میدان سرعت

با توجه به استفاده از تکنیک PIV دوبعدی، سرعت‌های اندازه‌گیری شده به صورت دوبعدی است. از مؤلفه سوم سرعت که عمود بر صفحه روشن شده توسط لیزر می‌باشد، به دلیل تقارن نسبی جریان در این راستا صرف‌نظر شده است. همچنین قابل ذکر است که اثرات دیواره در صفحه‌ای که توسط نور روشن شده (صفحه میانی) ناچیز می‌باشد. در هر حال فرض شده که می‌توان از اثر دیواره صرف‌نظر کرد.

شکل ۷، ساختار متوسط سرعت جریان برای شعله‌نگهدار وی-شکل معمولی با زاویه راس ۳۰ درجه و نسبت انسداد ۲۵٪ را نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن این میدان متوسط، از تعداد بسیاری عکس در یک بازه زمانی مشخص توسط نرم‌افزار پردازش تصاویر متوسط‌گیری صورت گرفت. برای شکل ۷ با متوسط‌گیری از تعداد ۱۳۲۰ عکس (گرفته شده در ۱ ثانیه، توسط دوربین عکس‌برداری سریع) میدان متوسط به‌دست آمده است.



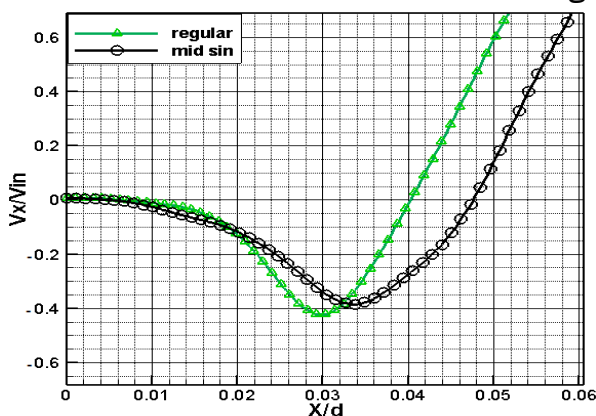
شکل (۷): نمودار سرعت متوسط در پشت شعله‌نگهدار.

در این جا لازم است تا به اثر انسداد در جریان بر نتایج به‌دست‌آمده توجه کرد. همان‌طور که اشاره شد مقدار انسداد در مقطع آزمون به ۲۵٪ می‌رسد. این خود موجب افزایش قابل توجه جریان آزاد در بالا لبه شعله‌نگهدارها خواهد شد. برای اطمینان از دقت نتایج به‌دست‌آمده، لازم است تا سرعت جریان

تصحیح گردد. اما به توجه هدف این تحقیق، یعنی بررسی اثر موج‌دار کردن لبه شعله‌نگهدار، از طریق مقایسه با لبه ساده، تصحیح سرعت ضروری نخواهد بود.

نمودار سرعت متوسط در پشت شعله‌نگهدار، در شکل ۷ نشان داده شده است. جهت جریان از راست به چپ می‌باشد که پس از عبور از روی جسم وی-شکل بلافاصله به عقب برگشته و ناحیه بازچرخش را تولید می‌کند. این بازگشت جریان عامل اختلاط جریان بالا دست با جریان سوخته شده و دارای انرژی پایین دست می‌باشد. مهم‌ترین تفاوت میدان جریان متوسط با جریان لحظه‌ای، متقارن بودن میدان متوسط می‌باشد. در حالی که در جریان لحظه‌ای تولید و از بین رفتن گردابه‌ها مشاهده می‌شود. میدان جریان متوسط به دلیل متقارن بودن جریان و وجود ناحیه بازچرخش این قابلیت را ایجاد می‌کند که بتوان به آسانی اندازه و طول ناحیه بازچرخش را به‌دست آورد. طول ناحیه بازچرخش از پارامترهای مهمی است که در پایداری شعله در پشت شعله‌نگهدار بسیار موثر می‌باشد.

شکل ۸، طول ناحیه بازچرخش را در محور افقی برای شعله‌نگهدار معمولی و شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار نشان می‌دهد. نتایج در یک سرعت و در شرایط یکسان به‌دست آمده است. همان‌گونه که در این دو نمودار مشخص می‌باشد، روند کلی تغییرات سرعت کاملاً مشابه به هم می‌باشد. تفاوت در اندازه طول ناحیه بازچرخش به دلیل تفاوت در ستاپ و سرعت‌ها می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص می‌باشد در یک سرعت جریان مشخص، طول ناحیه بازچرخش برای شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار بیشتر از شعله‌نگهدار معمولی است. ایجاد این تفاوت هدف و علت موج‌دار کردن لبه جسم وی-شکل می‌باشد.

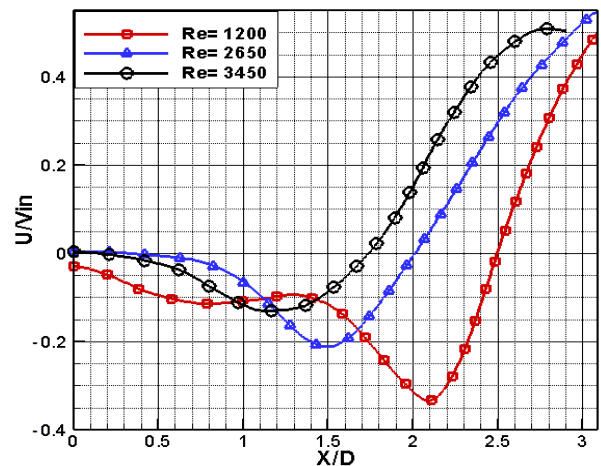


شکل (۸): نمودار طول ناحیه بازچرخش.

۴-۴- تأثیرات سرعت بر روی طول ناحیه بازچرخش

نمودار شکل ۹ نشان دهنده تغییرات طول ناحیه بازچرخش با تغییرات عدد رینولدز است، که بیان‌کننده سرعت جریان عبوری از آن برای شعله‌نگهدار معمولی می‌باشد. در این نمودار سرعت جریان عبوری از روی شعله‌نگهدار، با استفاده از سرعت عبوری در بالادست بی‌بعد شده است. همچنین طول ناحیه بازچرخش، با استفاده از اندازه انسداد شعله‌نگهدار بی‌بعد شده است. سپس از این مقادیر، برای به‌دست آوردن عدد بی‌بعد رینولدز استفاده شده است.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز اندازه طول ناحیه بازچرخش بی‌بعد شده کاهش پیدا می‌کند. همچنین علاوه بر طول بازچرخش مقدار کمینه نمودار نیز کاهش می‌یابد. طول ناحیه بازچرخش، با افزایش رینولدز، به مقداری ماکزیمم رسیده و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. این کاهش طول ناحیه بازچرخش با افزایش عدد رینولدز به دلیل گذار جریان لایه‌ای به جریان آشفته می‌باشد. بدین صورت که زمانی که جریان از لایه‌ای به آشفته تبدیل می‌شود، انتقال مومنتم جریان افزایش پیدا می‌کند و این افزایش مومنتم باعث افزایش نیرو به اطراف این ناحیه شده و باعث کوچک شدن آن می‌شود. در مطالعات تجربی دیگر نیز به این موضوع اشاره شده است. طبق گزارش اعلام شده در مرجع [۱۲] با افزایش رینولدز طول این ناحیه به نصف کاهش یافته است.



شکل (۹): تغییرات طول ناحیه بازچرخش با افزایش عدد رینولدز.

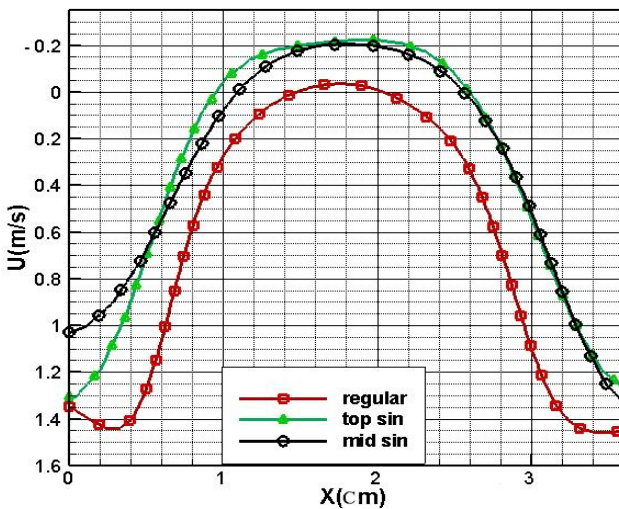
اندازه‌گیری‌ها در شکل ۸ و ۹ بر اساس تحلیل تصاویر PIV در پشت شعله‌نگهدار بوده است. تصاویر مربوط به صفحه تقارن

افقی است که توسط لیزر روشن شده و با کادر قرمز در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴-۵- عرض ناحیه بازچرخشی

از نتایج دیگر بدست آمده از میدان سرعت متوسط عرض ناحیه بازچرخش می‌باشد. این پارامتر در نگهداری و پایداری شعله تاثیر به‌سزایی دارد. افزایش عرض و طول، و به طور خلاصه حجم ناحیه بازچرخشی می‌تواند برای تامین منبع انرژی در پایین دست شعله نگهدار تضمین ایجاد کند. شکل ۱۰ نشان‌دهنده عرض ناحیه بازچرخش در نقطه $X=3\text{ cm}$ روی محور سبز رنگ در نمودار شکل ۹ در پشت شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار و معمولی می‌باشد. این نمودار توزیع سرعت را در دو نقطه بیشینه و میانی لبه سینوسی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نمودارها مشخص می‌باشد عرض ناحیه بازچرخش در شعله‌نگهدار با لبه سینوسی بیشتر از عرض ناحیه بازچرخش در شعله‌نگهدار معمولی می‌باشد. نکته مهم دیگر که در این نمودارها مشخص می‌باشد شیب به صفر رسیدن سرعت جریان می‌باشد که در شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار این شیب بسیار تندتر می‌باشد.



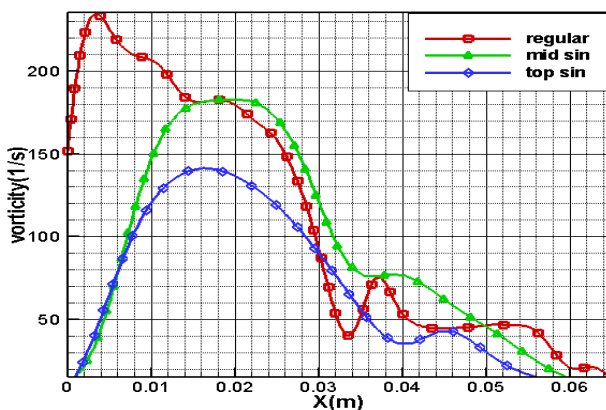
شکل (۱۰): نمودار عرض ناحیه بازچرخشی در $X=3\text{ cm}$ از لبه شعله‌نگهدار معمولی و سینوسی.

مقدار ماکزیمم سرعت‌ها در درون ناحیه بازچرخش نیز بسیار مورد اهمیت می‌باشد، که در شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار این مقدار بیشتر از شعله‌نگهدار معمولی می‌باشد. همچنین در این نمودارها مشخص است که طول ناحیه بازچرخش در

کشیده شده و در انتهای ناحیه بازچرخش این مقادیر تقریباً به هم می‌رسند.

برای درک بهتر از ورتیسیتی موجود در لبه‌های شعله‌نگهدار در درون جریان نمودار ورتیسیتی بر حسب فاصله از جسم برای هر دو شعله‌نگهدار معمولی و سینوسی رسم شده است برای شعله‌نگهدار سینوسی در دو قسمت از آن یعنی در بیشینه نمودار سینوسی و در وسط منحنی سینوس نمودارها رسم شده‌اند.

در شکل ۱۲ نمودار مقدار ورتیسیتی متوسط پشت شعله نگهدار معمولی و شعله‌نگهدار سینوسی نشان داده شده است. مقدار ورتیسیتی در لبه‌های هر دو شعله‌نگهدار دارای ماکزیمم مقدار خود می‌باشد. یعنی بلافاصله بعد از عبور از شعله‌نگهدار سرعت جریان کاهش می‌یابد و لایه‌های برشی بیشترین مقدار خود را پیدا می‌کنند و سپس با فاصله گرفتن از جسم از مقدار آن کاسته می‌شود. این مقدار و روند برای هر دو شعله‌نگهدار یکسان می‌باشد. با این تفاوت که شعله‌نگهدار معمولی دارای ورتیسیتی بالاتری نسبت به حالت‌های مختلف شعله‌نگهدار سینوسی می‌باشد این بدان معنا است که سرعت جریان منفی در درون شعله‌نگهدار معمولی پایین‌تر از سرعت جریان در درون شعله‌نگهدار سینوسی است. همچنین لایه‌های برشی شدت بیشتری دارند که نشان دهنده قدرت بیشتر ورتکس شدیدتر می‌باشد این نتایج با نتایج بوش [۱۲] همخوانی بسیار نزدیکی دارد.



شکل (۱۲): نمودار مقدار ورتیسیتی متوسط پشت شعله‌نگهدار معمولی و شعله‌نگهدار سینوسی.

۴-۷- فشار استاتیک پشت شعله‌نگهدار

فشار استاتیک پشت شعله‌نگهدار از جمله فاکتورهای مهم در جریان معکوس پشت شعله‌نگهدار محسوب می‌شود که بسیار

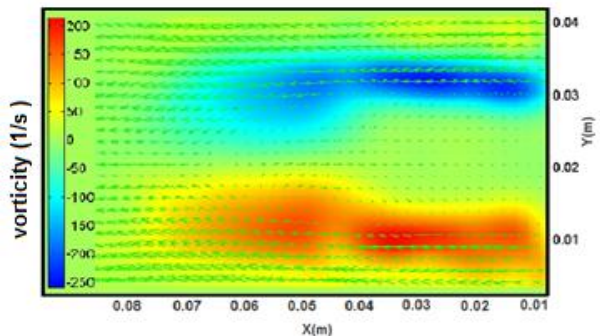
شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار بیشتر از شعله‌نگهدار معمولی می‌باشد (برای سرعت سیال در این آزمایش).

۴-۶- میدان ورتیسیتی جریان پشت شعله‌نگهدار

با وجود داشتن میدان‌های سرعت لحظه‌ای و متوسط و با داشتن اندازه سرعت در تک تک نقاط میدان پشت شعله‌نگهدار براحتی می‌توان مقدار ورتیسیتی موجود در جریان را بدست آورد. برای به دست آوردن ورتیسیتی با داشتن مقادیر سرعت می‌توان از رابطه (۲) استفاده نمود.

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

به وسیله رابطه (۲) و با استفاده از مقادیر سرعت به دست آمده از روش PIV مقادیر ورتیسیتی بدست می‌آید. در شکل ۱۱ می‌توان میدان ورتیسیتی متوسط به دست آمده از جریان را مشاهده نمود در این نمودار لبه‌های شعله‌نگهدار در $X = 0.01$ سانتی متر قرار گرفته است و جریان از راست به چپ حرکت می‌کند و مقدار کمی ورتیسیتی نیز در سمت چپ نمودار مشخص می‌باشد.



شکل (۱۱): میدان ورتیسیتی متوسط پشت شعله‌نگهدار.

در شکل ۱۱ میدان ورتیسیتی متوسط پشت شعله‌نگهدار نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تمرکز مقدار بیشینه ورتیسیتی درست بعد از جداسدن جریان از لبه شعله‌نگهدار می‌باشد این مقدار ورتیسیتی در پشت لبه‌ها دارای بیشینه مقدار خود و بتدریج با فاصله گرفتن از لبه‌ها مقدار آن کاسته می‌شود و نشان دهنده بیشترین برش در لایه‌های اطراف لبه شعله‌نگهدار است. مقدار ورتیسیتی بصورت مثبت و منفی در بالا و پایین ناحیه بازچرخش قرار گرفته‌اند این لایه‌های برشی علت اصلی مخلوط شوندگی جریان آزاد بالا دست و مواد سوخته شده و پرحرارت حاصل از احتراق می‌باشند این مقادیر مثبت و منفی ورتیسیتی رفته رفته به سمت خط مرکز جریان

مورد مطالعه قرار گرفت از جمله این پارامترها میدان لحظه‌ای سرعت، میدان متوسط، فشار استاتیک پشت جریان، طول و اندازه ناحیه بازچرخش، توزیع ورتیسیتی است تمامی این موارد برای هردو شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار و معمولی انجام شد و تأثیرات هرکدام از شعله‌نگهدارها بر روی میدان جریان با همدیگر مقایسه گردید. مشاهده گردید که بعد از عبور جریان از روی نگهدارنده و جدایش از روی لبه‌ها به دلیل افت فشار استاتیک به وجود آمده جریان پرسرعت با ورتیسیتی زیاد در لایه‌های برشی به سمت خط مرکز جسم متمایل شده و ناحیه‌ای با سرعت معکوس در پشت جسم به وجود می‌آید که از آن به عنوان ناحیه بازچرخش عنوان شد در این ناحیه جریان دچار بازچرخش شده و سرعت منفی پیدا می‌کند. با بررسی میدان لحظه‌ای جریان دیده شد که ورتکس‌های به صورت نامتقارن اما متناوب از لبه‌های بالا و پایین نگهدارنده جدا شده و بعد از مدت بسیار کوتاهی مضمحل شده و از بین می‌روند. بعد از بررسی جریان در سرعت‌های مختلف و بر روی هر دو شعله‌نگهدار نتایج زیر حاصل گردید:

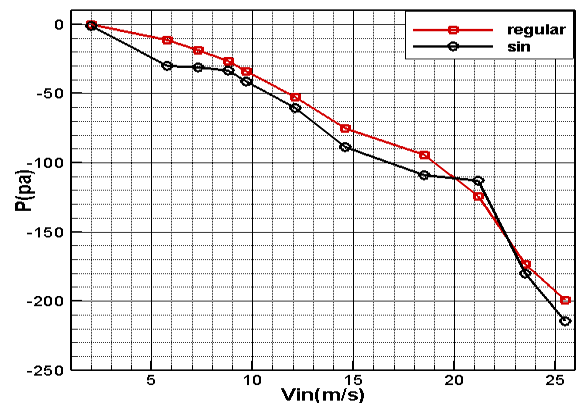
- عدد استرهال به دست آمده برای نگهدارنده در بازه ۰٫۲۳ تا ۰٫۲۱ می‌باشد،
 - طول ناحیه بازچرخش و فشار استاتیک پشت نگهدارنده با افزایش سرعت کاهش می‌یابند،
 - موج‌دار کردن لبه شعله‌نگهدار باعث افزایش طول و عرض ناحیه بازچرخش می‌شود،
 - سرعت جریان درون ناحیه بازچرخش نگهدارنده سینوسی بیشتر از نگهدارنده معمولی می‌باشد و
 - ورتیسیتی لبه‌های نگهدارنده سینوسی به دلیل بالا بودن سرعت جریان در ناحیه بازچرخش کم‌تر از نگهدارنده معمولی می‌باشد.
- فشار استاتیک پشت نگهدارنده سینوسی کم‌تر از فشار استاتیک نگهدارنده معمولی می‌باشد

۶- مراجع

1. Mattingly, J.D. "Aircraft Engine Design", AIAA, Reston, Virginia, 2002.
2. Briones, A.M. Sekar, B. "Effect of Von Kármán Vortex Shedding on Regular and Open-Slit V-gutter Stabilized Turbulent Premixed Flames, DTIC Document, pp. 2012.

بر الگوی جریان پشت اثر می‌گذارد. فشار استاتیک در فاصله $x=1/7$ سانتی‌متری روی محور تقارن و پشت شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار اندازه‌گیری شده است. تغییرات فشار استاتیک برای شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار با سرعت‌های مختلف در شکل ۱۳ رسم شده است. فشار استاتیک، به دلیل نبود مشکلات اپتیکی تا سرعت‌های ۲۶ متر بر ثانیه، با استفاده از یک مجموعه مانومتر شیب‌دار گازوئیلی اندازه‌گیری شد.

همان‌گونه که در نمودارها مشاهده می‌شود فشار استاتیک در شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار افت بیشتری نسبت به فشار در شعله‌نگهدار معمولی پیدا کرده است. البته تفاوت این دو فشار آن چنان کم است که می‌توان به آن توجه نکرد. با این وجود، چون تکرار اندازه‌گیری موید وجود این اختلاف هرچند اندک است، اعتناء به آن مفید خواهد بود. بنابراین گرادیان فشار ایجاد شده برای شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار، بیشتر از حالت معمولی می‌باشد. این امر سبب افزایش دبی جریان معکوس برای شعله‌نگهدار با لبه موج‌دار می‌شود. علاوه بر این اندازه فشار کمینه در ناحیه بازچرخش می‌تواند بیان‌کننده نیروی پسای اعمال شده بر جسم باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نیروی پسای وارد شده بر شعله‌نگهدار سینوسی بیشتر از حالت معمولی می‌باشد.



شکل (۱۳): نمودار فشار استاتیک پشت شعله‌نگهدار سینوسی و معمولی.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویر ذرات (PIV) در رژیم جریان سرد برای شعله‌نگهدارهای با لبه موج‌دار و معمولی مشخصه‌های جریان مورد بررسی قرار گرفت. برای شناخت و تحلیل هرچه بیشتر جریان و ساختار دینامیک و پیچیده جریان پشت شعله‌نگهدار پارامترهای مختلفی از جریان

9. Sullerey, R., Gupta, A. and Moorthy, C. "Similarity in the Turbulent Near Wake of Bluff Bodies", AIAA journal, Vol. 13, No. 11, pp. 1425-1429, 1975.
10. Bakrozis, A., Papailiou, D. and Koutmos, P. "A Study of the Turbulent Structure of a two-dimensional Diffusion Flame Formed behind a Slender Bluff-Body", Combustion and Flame, Vol. 119, No. 3, pp. 291-306, 1999.
11. Li, F., Banaszuk, A., Tadmor, G., Noack, B., and Mehta, P.G. "A Reduced Order Galerkin Model for the Reacting Bluff Body Flame Holder", 3rd AIAA Flow Control Conference, San Francisco, California, pp. 2006-3487, 2006.
12. Bush, S.M. and Gutmark, E.J. "Reacting and Non-reacting Flowfields of a V-gutter Stabilized Flame", AIAA journal, Vol. 45, No. 3, pp. 662-672, 2007.
13. Kiel, B., Garwick, K., Lynch, A., Gord, J. R., and Meyer, T. "Non-reacting and Combusting Flow Investigation of Bluff Bodies in Cross Flow", In 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, p. 5234, 2006.
3. E. Dezubay, Characteristics of disk-controlled flames", Aero Digest, Vol. 61, No. 1, pp. 54-57, 1950.
4. King, C. R. "A Semiempirical Correlation of Afterburner Combustion Efficiency and Lean-Blowout Fuel-air-ratio Data with Several Afterburner-inlet Variables and Afterburner Lengths" National Advisory Committee for Aeronautics, Cleveland, 1957.
5. Zukoski, E.E., Marble, F.E. "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blowoff from Bluff Bodies", Jet Propulsion Laboratory, 205-210, 1983.
6. Loblich, K.R. "Zur Kinetik der Stabilisierung Turbulenter Flammen Durch Flammenhalter, Thesis, Technische Hochschule, Hannover Germany", 1962.
7. Winterfeld, G. "On Processes of Turbulent Exchange Behind Flame Holders", In Symposium (International) on Combustion, Vol. 10, No. 1, pp. 1265-1275, 1965.
8. Davies, T.W. and Beer, J. "Flow in The Wake of Bluff-Body Flame Stabilizers", In Symposium (International) on Combustion, Vol. 13, No. 1, pp. 631-638, 1971.