

بررسی تجربی اثرات سیم اغتشاش ساز بر روی مشخصه‌های دنباله آبشار خطی کمپرسور

عبدالامیر بک خوشنویس^۱ و محسن وحیدی^۲

گروه مهندسی مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۳/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۸/۱۷)

چکیده

در این مقاله به دلیل اهمیت شدت اغتشاشات جریان ورودی به محفظه احتراق موتور، اثر مغشوش کردن جریان روی پره بر خصوصیات دنباله جریان در یک آبشار خطی کمپرسور به صورت تجربی بررسی شده است. بدین منظور، دو سیم در طول هر پره نصب و اثر آنها بر سرعت متوسط، شدت اغتشاشات و فرکانس‌های گردابه‌ای در عدد رینولدز ۴۵۵۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری پارامترهای دنباله، از جریان‌سنج سیم داغ یک‌بعدی استفاده شده است. تولید آشفتگی به وسیله سیم‌های اغتشاش‌ساز، سبب شد که جدایش در لایه مرزی، در فاصله دورتری از لبه حمله اتفاق بیفتد و عرض دنباله نیز کاهش یابد. نصب سیم همچنین سبب افزایش بیشینه اغتشاشات در دنباله پره و کاهش فرکانس در بیشینه دامنه و در نتیجه کاهش عدد استروهال گردید.

واژه‌های کلیدی: جریان‌سنج سیم داغ، سیم اغتشاش‌ساز، آبشار خطی کمپرسور، عدد استروهال، شدت اغتشاشات

Experimental Investigation of Characteristics of Wake Related to Linear Compressor Cascade with Turbulence Promoters

A.B. Khoshnevis and M. Vahidi

Eng. Faculty

Hakim Sabzevari Univ.

(Received: 19 June, 2012; Accepted: 8 November, 2013)

ABSTRACT

In this paper, due to the importance of incoming flow turbulence intensity into combustion chamber, tripping wire effect on the flow wake has been experimentally investigated within a linear compressor cascade. To do this, two wires were implemented along each blade and their effects on average velocity, turbulence intensity and vorticity frequencies at Reynolds number 45500 were accurately considered. To measure wake parameters, single channel hot wire anemometer was used. Turbulence creation in response to the turbulence promoters made the separation to take place within the boundary layer in a distance farther from the edge of attack and also a decrease in wake width was observed. It is found that turbulence promoters increased the maximum turbulence intensity in blades wake and also reduced corresponding frequency in maximum amplitude and the Strouhal number, consequently.

Keywords: Hot-Wire Anemometer, Turbulence Promoters, Compressor linear Cascade, Strouhal Number
Turbulence Intensity

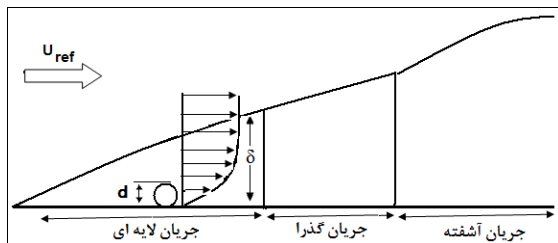
۱. دانشیار (نویسنده پاسخگو): khosh1966@yahoo.com

۲. کارشناسی ارشد: eng.vahidi@gmail.com

جریان لایه‌ای به آشفته، به صورت ناگهانی و در فاصله‌ای بسیار کوتاه رخ دهد. در کاربردهای مهندسی، این روش را به اصطلاح تریپ کردن^۱ لایه مرزی می‌نامند و برخلاف ظاهر مضر آن، کاربردهای متنوع و گسترده‌ای دارد.

میزان تأثیر زبری سطوح بر روی جریان سیال، وابسته به اندازه نسبی عناصر زبری در مقایسه با طول مقیاس لرح جریان است. اثر زبری می‌تواند از اثرات ناچیز و غیرقابل توجه برای زبری‌هایی با طول مقیاس ناچیز، تا اثرات قابل توجه و کاملاً مؤثر برای زبری‌های با طول مقیاس بزرگ، متغیر باشد. اولین و بارزترین تأثیر زبری سطح بر روی جریان، افزایش مقاومت در مقابل عبور جریان است که خود را به صورت افزایش پسای اصطکاکی برای جریان‌های خارجی و یا افزایش افت فشار برای جریان‌های محصور (جریان‌های داخلی) نشان می‌دهد. زبری سطوح همچنین می‌تواند منجر به افزایش نرخ تبادل مومنتوم، گرما و جرم از طریق دیواره‌ها گردد.

در فرآیند تریپ کردن لایه مرزی جریان تراکم‌ناپذیر، چندین فاکتور مهم و مؤثر حضوری فعال دارند که در این میان عدد ماخ جریان، مهم‌ترین عامل محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، اندازه ارتفاع زبری مورد نظر را می‌توان با d نمایش داد.



شکل (۱): لایه مرزی ایجاد شده در حضور مانع.

پروفیل سرعت نشان داده شده در موقعیت x از ابتدای لبه حمله صفحه (یا همان موقعیت نصب عنصر زبری)، پروفیل سرعت، مربوط به وضعیتی است که هیچ گونه زائده‌ای به عنوان زبری در مسیر جریان وجود ندارد. عدد رینولدز زبری بر مبنای اندازه ارتفاع زبری، d ، اندازه سرعت موضعی درست در نقطه فوقانی زائده (زبری) مورد نظر، u_d و نیز ویسکوزیته سینماتیکی ν تعریف می‌شود:

$$Re_d = u_d d / \nu \quad (1)$$

برای اعداد رینولدز زبری کوچک‌تر از یک مقدار مشخص، زبری هیچ‌گونه تأثیری بر روی موقعیت نقطه گذر از حالت لایه‌ای به آشفته (که به طور یقین، نقطه‌ای در پایین دست محل نصب

فهرست علائم

c	طول وتر پره، mm
D	قطر استوانه، mm
d	قطر سیم‌ها، mm
E	ولتاژ بالای پل وتسون، V
E_r	ولتاژ بالای پل وتسون در دمای T_r ، V
f	فرکانس جریان در دامنه بیشینه، Hz
i	زاویه برخورد پره، $^\circ$ درجه
NO	مونوکسید نیتروژن
n	ثابت کالیبراسیون و توان رابطه ضریب تصحیح
Re	عدد رینولدز
Re_{cr}	عدد رینولدز بحرانی
Re_d	عدد رینولدز زبری
St	عدد استروهل
T	دمای محیط آزمایش، $^\circ C$
T_a	دمای جریان سیال، $^\circ C$
T_r	دمای مرجع، $^\circ C$
$\%Tu$	درصد شدت اغتشاشات جریان سیال
T_w	دمای حسگر، $^\circ C$
U	مؤلفه افقی سرعت جریان، m/s
U_∞	سرعت جریان ورودی خوانده شده توسط لوله
m/s	پیتوت، m/s
u'	مؤلفه اغتشاشی سرعت افقی، m/s
u_d	سرعت موضعی زبری، m/s
V	مؤلفه عمودی سرعت جریان، m/s
v'	مؤلفه اغتشاشی سرعت عمودی، m/s
$W = \sqrt{U^2 + V^2}$	سرعت متوسطی که سنسور ضبط می‌کند، m/s
W_{ref}	سرعت جریان آزاد، m/s
x	فاصله از لبه فرار پره، mm
y	نصب پره‌ها، mm
C_d	ضریب پسا
C_l	ضریب برآ
γ	زاویه نصب پره‌ها، درجه
ν	ویسکوزیته سینماتیکی، m^2/s

۱- مقدمه

گاهی اوقات برخی عوامل خارجی، به ویژه موانع و پستی بلندی‌های هندسی، می‌توانند موجب شوند که فرآیند گذر از

هاشمی و همکاران اثر شدت اغتشاشات هوا بر روی تشکیل NO در احتراق مخلوط سوخت‌های هیدروکربن و هیدروژن را به صورت عددی بررسی کردند [۴]. نتایج آنها نشان داد که افزایش شدت اغتشاشات هوا، غلظت NO را در ناحیه شعله و در خروجی محفظه احتراق کاهش می‌دهد. با افزایش شدت اغتشاشات هوا، بیشینه افزایش NO در خروجی محفظه احتراق، برای مورد سوخت هیدروژن خالص رخ می‌دهد.

خوشنویس و همکاران به صورت تجربی و با استفاده از جریان سنج سیم داغ، دنباله سیلندری که دو سیم در زوایای 40° و 140° روی آن نصب شده را مورد بررسی قرار دادند [۵]. نتایج نشان داد برای $Re = 30000$ ، حالت بهینه ای وجود دارد که در آن ضریب پسای عامل بر روی سیلندر به مقداری کمتر از ضریب پسای سیلندر صاف می‌رسد.

گرگی و همکاران تأثیر نیروی باد بر کابل‌های برق را در تونل باد مورد بررسی قرار دادند [۶]. تقریباً در همه مدل‌ها به جز کابل روکش دار، ضریب پسا در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه کمتر از سرعت ۱۷ متر بر ثانیه بوده و افزایش اغتشاشات و مومنتوم جریان سبب شده که عدد رینولدز بحرانی و در نتیجه افت ناگهانی ضریب پسا، در رینولدزهای کمتری اتفاق بیفتد.

فروزش و همکاران اثر اغتشاشات جریان ورودی بر روی پارامترهای دنباله جریان در پشت یک ایرفویل متقارن NACA0012 را در زاویه حمله صفر و عدد رینولدز ۳۸۷۰۰ بررسی کردند [۷]. آنها مشاهده کردند که در هر سه حالت اغتشاشی، با افزایش نسبت x/d و شدت اغتشاشات ورودی، مقدار نصف دهانه دنباله $(b_{1/2})$ افزایش می‌یابد. فاصله شکل‌گیری گردابه نیز با شدت اغتشاشات کاهش یافته است.

از تحقیقاتی که اثر سیم اغتشاش ساز بر روی ایرفویل را بررسی کرده‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

کیانگو و لیگران^۳ اثرات زبری و اغتشاشات ورودی را بر روی دنباله ایرفویل در سرعت‌های مادون صوت به صورت تجربی مطالعه نمودند، و از این مطالعه نتیجه گرفتند زمانی که زبری سطح افزایش می‌یابد، تمامی نمودارهای دنباله اعم از سرعت متوسط و شدت اغتشاشات به طور قابل ملاحظه‌ای گسترش می‌یابند و فرکانس گردابه‌ای بدون بعد کاهش یافته و همچنین اغتشاشات ورودی جریان اثرات کمتری در سرعت دنباله دارد [۸]. همچنین آنها در ادامه نشان دادند نمودار دنباله وابستگی قابل ملاحظه‌ای نسبت به زبری سطح دارد، در صورتی که نسبت به شدت اغتشاشات ورودی حساسیت کمتری

این زبری خواهد بود) نخواهد داشت. اما زمانی که عدد رینولدز زبری به یک حد مشخص بحرانی می‌رسد، گذر جریان از موقعیت طبیعی خود به نقطه‌ای جلوتر (به سمت بالادست جریان) منتقل خواهد شد. در سرعت‌های جریان مادون صوت، در صورت رسیدن به عدد رینولدز زبری بحرانی، نقطه گذر بسیار نزدیک به موقعیت نصب زبری مورد نظر خواهد بود. نتایج تجربی متعدد موجود حاکی از آن است که در محدوده مادون صوت، عدد رینولدز بحرانی برای یک عنصر زبری (با نسبت ارتفاع به عرض یک) تقریباً ۶۰۰ می‌باشد. می‌توان نشان داد که با افزایش عدد ماکس جریان (با افزایش اثرات تراکم‌پذیری جریان) عدد رینولدز بحرانی به اعداد بزرگ‌تر از ۶۰۰ منتقل خواهد شد [۱]. می‌توان گفت گذار در لایه مرزی تحت تأثیر زبری سطح و تلاطم جریان قرار دارد. بنابراین کاهش بازدارندگی وابسته به لایه مرزی متلاطم برای یک مقدار یکتا از عدد رینولدز روی نمی‌دهد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند برای سطوح زبر و یا جریان با تلاطم زیاد، گذار می‌تواند در عدد رینولدز بحرانی با مقدار کم ۵۰۰۰۰ روی دهد. در تحقیق حاضر، سیم‌های اغتشاش ساز بر روی پره‌های یک آبشار کمپرسور خطی نصب شده و اثرات آن بر روی مشخصه‌های دنباله بررسی شده است.

۲- تحقیقات انجام شده

بررسی‌های اندکی تنها به مطالعه اثرات آشفتگی بر روی احتراق اختصاص داده شده است.

کاماجی و آیسودا^۱ احتراق یک ریز قطره معلق در یک میدان صوتی را مورد بررسی قرار دادند [۲]. نتایج آنها بیانگر افزایشی اندک در نرخ احتراق تا یک مقدار بیشینه و بعد از آن کاهش به مقداری کمتر از نرخ احتراق ایستا، با افزایش دامنه‌های میدان صوتی بود.

کار تجربی که فقط به اثرات آشفتگی بر روی احتراق ریز قطره بپردازد، توسط اوتا^۲ و همکاران انجام شده است [۳]. آشفتگی با استفاده از چهار فن مستقر در اطراف قطر یک محفظه استوانه‌ای ایجاد شده است. در این مطالعه آنها از یک کره متخلخل با قطرهای مختلف استفاده کرده و مشاهده نمودند که نرخ احتراق متناسب با شدت آشفتگی به یک مقدار بیشینه می‌رسد و سپس برای شدت اغتشاشات بزرگ‌تر کاهش می‌یابد.

1- Kumagai and Isoda

2- Ohta

3- Qiang and Ligran

همچنین در سال ۲۰۰۳، خوشنویس به بررسی دنباله یک ایرفویل متقارن درون یک کانال/دیفیوزر مستقیم و کانال/دیفیوزر خمیده پرداخت [۱۳]. ایرفویل مجهز به سیم اغتشاش‌ساز بود و نتیجه تحقیق نشان داد گرادیان فشار معکوس، شدت استهلاک تفاضل سرعت در دنباله را کاهش می‌دهد.

۳- انگیزه تحقیق

استفاده از سیم اغتشاش‌ساز، به ویژه در اعداد رینولدز بالا، سبب تغییرات اساسی نهانی در نقطه جدایش جریان می‌شود. نوسان‌های دینامیکی که ذات جریان‌های آشفته می‌باشند، می‌توانند باعث اختلاط و تبادل شدید کمیت‌های جریانی، به ویژه مومنتوم، حرارت و جرم گردند. از این رو جریان‌های آشفته، جریان‌هایی به شدت اضمحلالی و با ضریب اصطکاک (و ضریب انتقال حرارت و ضریب انتقال جرم) بالا در مقایسه با جریان‌های لایه‌ای محسوب می‌شوند. هرچه میزان نوسان در مقیاس بزرگ‌تری رخ دهد، اندازه تبادل مومنتوم و حرارت رخ داده بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین (با در نظر گرفتن افت فشار افزایش یافته در جریان‌های آشفته)، در مسائل درگیر با انتقال حرارت و انتقال جرم، آشفته نمودن جریان تا جایی که افت فشار افزایش یافته منجر به ناکارآمدی و عدم صرفه اقتصادی پروژه نگردد، همواره مدنظر مهندسين بوده است.

هدف تحقیق حاضر، بررسی اثرات نصب سیم اغتشاش‌ساز روی پره‌های آبشار خطی کمپرسور بر مشخصه‌های دنباله آبشار کمپرسور مادون صوت می‌باشد، به گونه‌ای که روند تغییر پروفیل‌های سرعت، اغتشاشات و مومنت‌های سرعت در نهایت با آبشار کمپرسور ساده مقایسه می‌گردد. تحقیق حاضر اطلاعات جدیدی را در مورد تأثیر سیم اغتشاش‌ساز بر روی دنباله آبشار کمپرسور جمع‌آوری می‌کند.

۴- تجهیزات آزمایشگاهی

تمام آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه تونل باد انجام شده است. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع مدار باز با قدرت ۷ kW و دمشی است. جهت انجام این آزمایش، یک محفظه با طول ۱۵۰ cm، عرض ۴۰ cm و ارتفاع ۱۵ cm از جنس پلکسی گلاس ساخته شده است (شکل ۲). سرعت تونل باد را می‌توان با کنترل دورفن تعبیه شده در آن، از ۰-۳۰ متر بر ثانیه تغییر داد. در این تحقیق توان تولیدی برای هر کدام از آزمایش‌ها یکسان انتخاب شده است. با توجه به مشخصات تونل باد حداکثر اغتشاشات اسمی جریان آزاد برای این دستگاه ۰/۱

دارد. تیمر^۱ و رویج^۲ در سال ۲۰۰۳ در تونل باد، به بررسی تجربی اثرات سیم اغتشاش‌ساز نصب شده روی دماغه ایرفویل DU 93-W-210 پرداختند [۹]. قطر سیم‌ها ۱/۲ mm و ۲ mm و عدد رینولدز در تحقیق آنها 2×10^6 انتخاب شده بود. آنها سیم‌ها را در موقعیت ۱%، ۰/۵%، ۰/۲۵% و ۰%، سطح فشار ایرفویل نصب کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از سیم به قطر ۲ mm که در ۰/۲۵% نصب شده، تأثیر بسزایی در افزایش ظرفیت بیشینه لیفت ایرفویل دارد. در صورتی که سیم نازک‌تر در موقعیت مذکور تأثیر چندانی از خود نشان نمی‌دهد و سطح بازدارندگی عریضی را از خود به جا می‌گذارد.

فردنریج^۳ و همکاران توسط تونل باد و روش‌های عددی، اثرات رینولدز در محدوده $10^6 - 10^7$ و زبری روی ایرفویل DU97-300 که کاربرد در توربین‌های بادی دارد، را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. آنها در بحث استفاده از زبر کننده‌ها، که شامل سیم اغتشاش‌ساز و نوار زیگزال بود، مشاهده کردند که سیم اغتشاش‌ساز نصب شده در $x/c=0/3$ از دماغه ایرفویل به صورت جزئی باعث افزایش بیشینه ضریب برآ نسبت به ایرفویل صاف می‌گردد. همچنین باعث کاهش $(C_l/C_d)_{max}$ می‌شود.

فاکادوم^۴ و همکاران با استفاده از سیم اغتشاش‌ساز به بررسی کارایی ایرفویل متقارن NACA0018 پرداختند [۱۱]. آنها با نصب سیم مورد نظر در دماغه ایرفویل، نشان دادند که استفاده از سیم اغتشاش‌ساز، ضریب برآ را در زوایای برخورد بزرگ‌تر، افزایش می‌دهد. همچنین نشان دادند سیم مورد نظر، بدون افزایش ضریب پسا عامل بهبود زاویه استال^۵ در ایرفویل می‌باشد. از طرف دیگر در زوایای برخورد بزرگ‌تر برای ایرفویل بدون سیم، جدایش جریان بزرگ‌تری اتفاق افتاده که استفاده از سیم در این فرآیند را محدود ساخته و باعث افزایش نیروی برآ و کارایی ایرفویل شده است.

هابر و مولر^۶ نیز در آزمایشات خود نشان دادند که اثرات سیم اغتشاش‌ساز در موقعیت بیشینه ضخامت ایرفویل Wortmann FX 63-137، تأثیرات مضر برای بیشینه لیفت را محدود می‌کند. آنها نشان دادند قرار گرفتن سیم در این موقعیت می‌تواند منجر به کاهش ضریب پسای کمینه شود [۱۲].

- 1- Timmer
- 2- Rooij
- 3- Freudenreich
- 4- Fukudome
- 5- Stall
- 6- Huber and Muelle

است [۱۵]. این مکانیزم به صورت موازی با خط نصب پره‌ها حرکت کرده و داده‌های مورد نظر را ضبط می‌نماید. مکانیزم فوق بر روی قاب‌های جداگانه‌ای مستقل از پایه‌های تونل باد نصب شده‌اند تا ارتعاشات احتمالی بدنه تونل به مکانیزم جابه‌جاکننده پراب منتقل نگردد و کیفیت داده‌برداری افزایش یابد.

آبشار کمپرسور مورد آزمایش دارای ۳ عدد پره از نوع KH-۴۳۵۶ بوده که با زاویه نصب ۴۰ درجه در مقطع آزمایش قرار داده شده‌اند (شکل ۱).

پره‌های مورد آزمایش دارای ارتفاع ۱۱۵mm و طول وتر ۳۳mm می‌باشند. سیم‌های مورد استفاده جهت ایجاد اغتشاش، دارای قطر ۲mm بوده که در هر دو طرف پره در قسمت میانی آنها نصب شده است (شکل ۳).

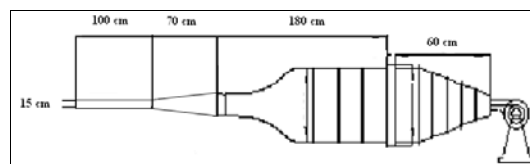


شکل (۳): نمایی از نصب سیم‌های اغتشاش ساز بر روی پره‌های کمپرسور در تونل باد.

۵- تحلیل نتایج

این تحقیق اثر سیم اغتشاش ساز بر روی پارامترهای دنباله و اغتشاشات آبشار یک کمپرسور خطی را بررسی می‌کند. بدیهی است با فاصله گرفتن از پشت ایرفویل، دنباله ایرفویل از بین می‌رود، چون لایه برشی موجود تحت تأثیر جریان آزاد قرار می‌گیرد و در نتیجه جریان آزاد سعی بر مستهلک ساختن لایه برشی تحت نام دنباله می‌کند [۱۶]. به همین دلیل، داده برداری‌ها در یک فاصله از لبه فرار و در $x/c = 0/5$ (x فاصله موقعیت پراب از لبه فرار ایرفویل و c طول وتر پره می‌باشد) و در زوایای برخورد $i = -5$ ، $i = 0$ و $i = 5$ انجام شد. آزمایش‌ها در دو مرحله انجام شده است که در مرحله اول، آبشار کمپرسور به صورت ساده در تونل باد بررسی شده و سپس در مرحله دوم، سیم‌هایی به قطر ۲ mm و طول ۱۱۵ mm را در خط میانی پره‌ها به گونه‌ای که یکی در سطح بالایی و دیگری در سطح پایینی باشد نصب کرده، سپس پره‌ها در محفظه آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش زاویه استگر (نصب) پره‌ها ۴۰ درجه

درصد است که از این حیث دستگاه تونل باد دارای دقت بالایی است.



شکل (۲): نمایی از تونل باد و محفظه آزمایش.

برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان، از جریان‌سنج سیم داغ دما ثابت استفاده شده که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، اغتشاشات و فرکانس و گردابه‌های خارج شونده از آبشار را دارد. تونل باد و دستگاه جریان‌سنج سیم داغ هر دو ساخت شرکت فرانسجش صبا می‌باشند. پراب استفاده شده در این آزمایش‌ها یک‌بعدی بوده و دارای سنسوری به طول ۱/۲۵ میلی‌متر و قطر ۵ میکرومتر می‌باشد.

آزمایش‌ها در فصل زمستان انجام شده و کالیبراسیون دستگاه در دمای محیط $T = 15^{\circ}$ صورت گرفته است. البته دمای محیط آزمایشگاه در طول روز متغیر بوده اما بازه تغییرات در حد ۲ درجه قابل قبول است. در تحقیقی که سالاری و همکاران اثر تغییر دمای هوای جریان آزاد (دمای تونل) بر منحنی مشخصه و کالیبراسیون حسگرهای سیم داغ را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای تونل، ولتاژ بالای پل مدار و تستون در دستگاه HWA کاهش یافته و نرخ کاهش آن به فیزیک حسگرها، سرعت سیال و نسبت فراگرمایی آزمایش بستگی دارد که معمولاً در عمل برای تصحیح این اثر از ضرایب تصحیح دما استفاده می‌شود [۱۴]. همچنین نتایج بررسی اثر تغییر دمای حسگر نشان می‌دهد که منحنی‌های کالیبراسیون به دست آمده برای هر حسگر در نسبت‌های فراگرمایی متفاوت را می‌توان با اعمال ضریب تصحیح مناسبی بر هم منطبق کرد.

مقدار این ضریب تصحیح برای HWA در سرعت $U = 20 \text{ m/s}$ برابر $n = 0/605$ به دست آمده که با قرار دادن در رابطه (۱)، می‌توان مقدار واقعی ولتاژ تصحیح شده را به دست آورده و به کمک منحنی کالیبراسیون حسگر، سرعت واقعی جریان را محاسبه نمود.

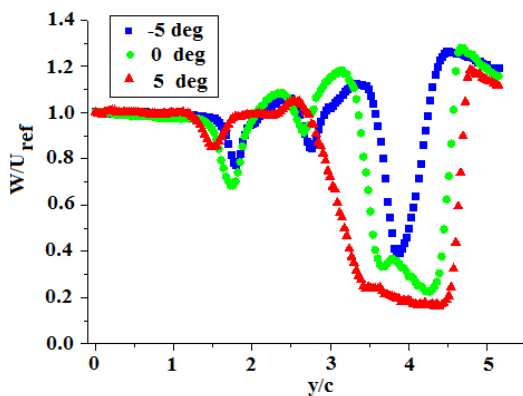
$$\frac{E_r}{E} = \left[\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a} \right]^n \quad (1)$$

برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک انتقال دهنده با دقت جابه‌جایی ۰/۰۱ میلی‌متر و با سه درجه آزادی استفاده شده

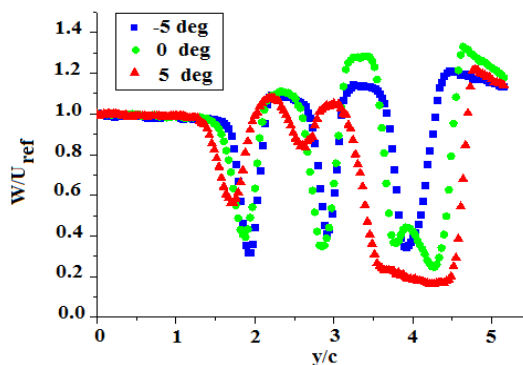
سرعت ضبط شده توسط حسگر و از U_{ref} برای نمایش سرعت جریان آزاد استفاده شده است.

۵-۱- بررسی سرعت متوسط بی بعد

با توجه به اینکه پره میانی آبشار تحت تأثیر پره‌های جانبی خود می‌باشد، در بررسی‌ها، تنها پروفیل‌های حاصل از آن مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که از شکل ۵ پیداست، با افزایش زاویه برخورد، پروفیل سرعت ضمن انتقال یافتن به سمت چپ، کوچک شده و به سمت اضمحلال پیش می‌رود. این اتفاق در آبشار پره‌های دارای سیم نیز تکرار می‌گردد، با این تفاوت که در این حالت، پروفیل‌های سرعت کشیده‌تر بوده و در زوایای برخورد بالاتر مضمحل می‌گردند (شکل ۶). پدیده اضمحلال پروفیل سرعت به این دلیل است که افزایش زاویه نصب سبب می‌شود آبشار، تبدیل به آبشار توربین شود و کاهش زاویه نصب، آبشار را به آبشار کمپرسور تبدیل نماید.

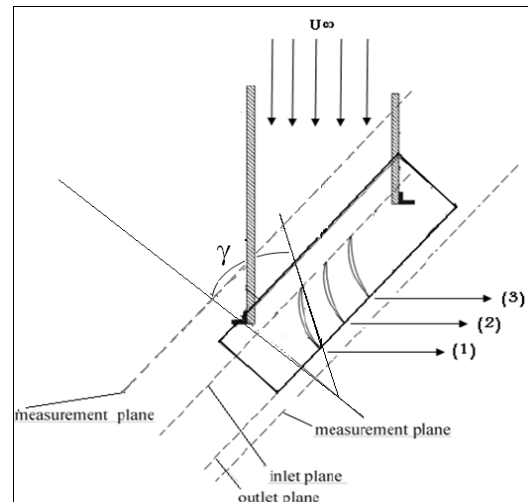


شکل (۵): مقایسه سرعت متوسط بی بعد آبشار بدون حضور سیم‌های اغتشاش‌ساز در سه زاویه برخورد مختلف در $Re=45500$.



شکل (۶): مقایسه سرعت متوسط بی بعد آبشار در حضور سیم‌های اغتشاش‌ساز در سه زاویه برخورد مختلف در $Re=45500$.

انتخاب شد و سپس در زوایای برخورد ۰، ۵ و $i=-5$ و عدد رینولدز $Re=45500$ (که بر اساس طول وتر پره، سرعت جریان آزاد و ویسکوزیته دینامیکی در دمای ۱۵ درجه به دست آمده) پارامترهای جریان اندازه‌گیری شده است (شکل ۴).



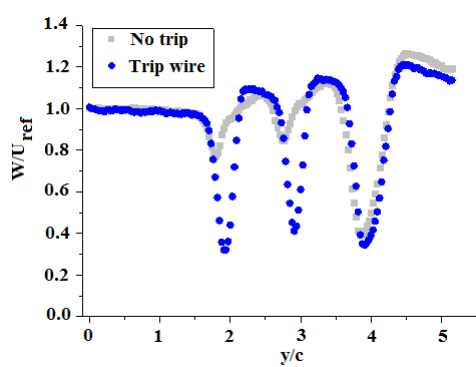
شکل (۴): نمایی از زوایای نصب (۲) و برخورد (۱) پره‌ها در آبشار کمپرسور.

برطبق رابطه (۱)، با داشتن ارتفاع زبری و سرعت موضعی جریان بر روی سیم، می‌توان عدد رینولدز زبری ناشی از نصب سیم‌های اغتشاش‌ساز را به دست آورده و با مقدار رینولدز بحرانی مقایسه نمود.

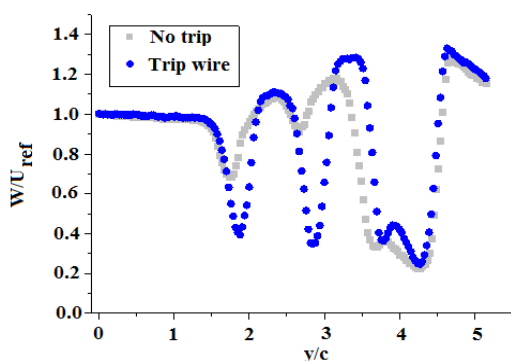
با اندازه‌گیری مقدار سرعت موضعی توسط جریان‌سنج سیم داغ، $u_d=15$ m/s و ارتفاع زبری (قطر سیم اغتشاش‌ساز)، $d=2$ mm، مقدار رینولدز زبری برابر با $Re_d=2068$ است که در مقایسه با مقدار رینولدز بحرانی ($Re_{cr}=600$) بیشتر است. برطبق مرجع [۱] می‌توان گفت که موقعیت نقطه گذر از حالت لایه‌ای به آشفته، به نقطه‌ای جلوتر و نزدیک‌تر به لبه حمله پره منتقل شده است.

سرعتی که حسگرهای تک مؤلفه‌ای به علت شکل هندسی خود (استوانه‌ای شکل)، نشان می‌دهند علاوه بر اندازه سرعت در جهت جریان (U)، شامل اندازه سرعت عمود بر راستای جریان (V) نیز می‌باشد و بیانگر بزرگی سرعت جریان (W) است ($W = \sqrt{U^2 + V^2}$). در صورتی که با افزایش فاصله از پشت مدل، سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگر به مقدار سرعت در راستای جریان (U) نزدیک می‌شود. از آنجا که داده برداری‌ها در این تحقیق، در فاصله $x/c=0/5$ (فاصله‌ای نزدیک به لبه فرار پره‌ها) انجام شده، از عبارت W برای نشان دادن

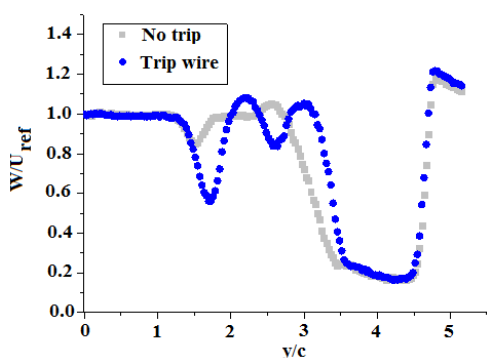
خود، ذره در موقعیت جدید خود، حرکتی را در مقیاس کوچک ولی در خلاف جهت مومنتوم لایه مزبور انجام می‌دهد تا مومنتوم، به طور مجدد تا حدی به مومنتوم اولیه خود برسد. مجموعه این نوع حرکات، در کنار تمایل جریان به حفظ قانون پیوستگی، منجر به تشکیل ادی می‌گردد. حضور ادی می‌تواند باعث توزیع متناسب مومنتوم، اغتشاش، انرژی حرارتی، فشار و دما در داخل میدان گردد. در یک جریان بدون وجود گرادیان در میدان سرعت متوسط، یک نوسان در مؤلفه سرعت، لزوم به یک ادی^۱ تبدیل نشده و اغتشاش مزبور پس از مدت کوتاهی تحت اثرات لزج سریعاً میرا می‌گردد [۱].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۷): مقایسه سرعت متوسط بی‌بعد آبشار در حضور و بدون حضور سیم‌های اغتشاش‌ساز در زوایای برخورد مختلف: (الف) $i=5$ ، (ب) $i=0$ و (ج) $i=5$.

تولید آشفتگی به وسیله سیم‌ها در لایه مرزی، سبب می‌شود جدایش در یک فاصله دورتر از لبه حمله اتفاق افتاده و عرض دنباله کاهش یابد [۱۷]. این اثر از لحاظ کیفی شبیه به انتقال طبیعی برای آشفتگی است که با افزایش سرعت، در موقعیت‌های پیش افتاده افزایشی (جلوی نقطه رکود) بر روی سیلندر توسعه می‌یابد [۱۸]. در یک جریان آشفته به واسطه حرکات اتفاقی و نامنظم ذرات و وجود اغتشاش یا نوسان در جریان، گاهی در امتداد عمود بر راستای جریان اصلی، یک سری جریان‌های جانبی رخ می‌دهد. به واسطه این عمل، مومنتوم لایه‌های نزدیک دیواره که به واسطه ذات اضمحلالی جریان آشفته بخشی از انرژی آنها از دست رفته، به طور دائمی توسط لایه‌های پرانرژی بالاتر تقویت شده و همین امر باعث می‌شود که بخشی از مومنتوم از دست رفته سیال مجاور دیواره، توسط لایه‌های پرانرژی بالاتر جبران گردد.

بعد از نصب سیم‌های اغتشاش‌ساز، پروفیل‌های سرعت بی‌بعد در تمام زوایا به سمت راست منتقل شده و طول پروفیل نیز به طور محسوسی افزایش یافته است که این افزایش طول در زاویه برخورد ۰ درجه، به بیشترین مقدار خود یعنی ۰/۶ می‌رسد (شکل ۷).

۵-۲- بررسی شدت اغتشاشات

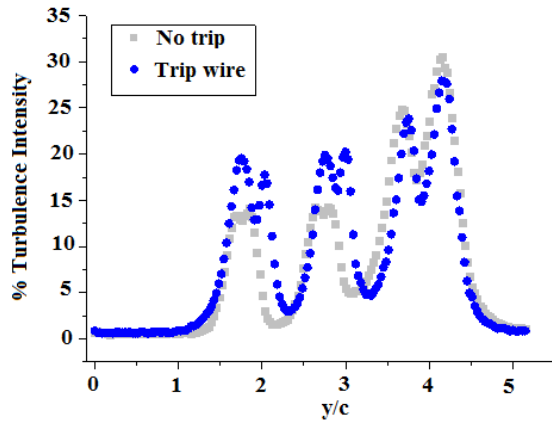
پارامتر شدت اغتشاشات از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\% T u = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_\infty} \times 100 \quad (2)$$

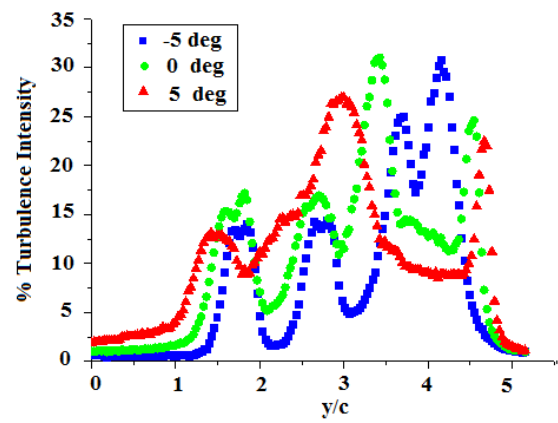
به علت وجود گردابه کارمن، در نواحی نزدیک به جسم، علاوه بر سرعت نوسانی u ، سرعت اغتشاشی v نیز قابل ملاحظه بوده و با توجه به طریقه قرارگیری سنسور در جهت جریان، این سرعت اغتشاشی نیز اندازه گرفته می‌شود. با توجه به مطالب فوق، در فاصله‌ای که داده‌برداری انجام شده ($x/c = 0.5$)، سنسور غالباً بیشینه اغتشاشات را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه شدت اغتشاشات پره میانی مهم است، بر طبق شکل ۸ (آبشار بدون حضور سیم‌های اغتشاش‌ساز) می‌توان گفت با افزایش زاویه برخورد، اغتشاش بیشینه افزایش یافته و قله آن نیز به سمت راست انتقال می‌یابد.

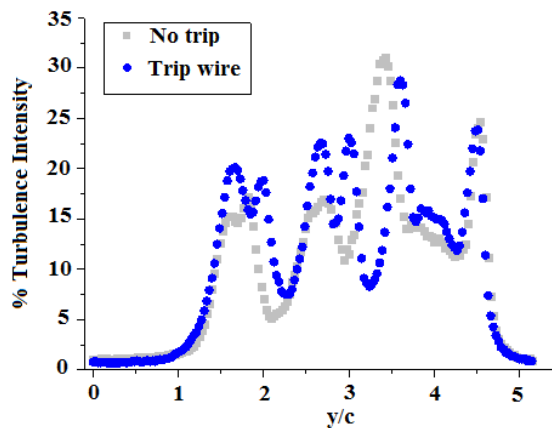
با در نظر گرفتن این اصل که همواره هر ذره متحرک سیال تمایل به حفظ مومنتوم خود دارد، وقتی به واسطه یک اغتشاش کوچک یا نوسان، ذره‌ای از سیال داخل لایه مرزی بدون وجود پتانسیل لازم و تنها تحت اثر ذات ناپایدار جریان، از لایه با مومنتوم کم به لایه با مومنتوم بالا و یا بالعکس جهش می‌نماید، برای حفظ و بازگشت مومنتوم ذره به مقدار اولیه



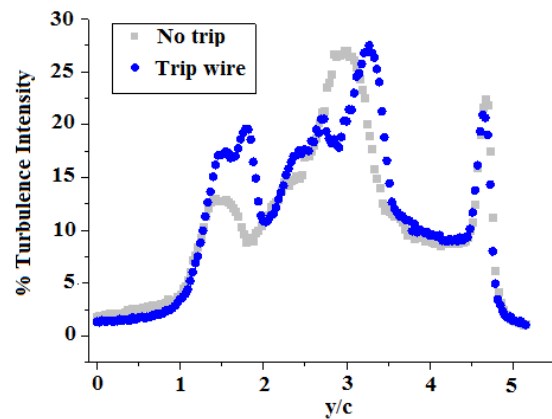
(الف)



شکل (۸): مقایسه شدت اغتشاشات در سه زاویه برخورد مختلف حالت ۱.



(ب)

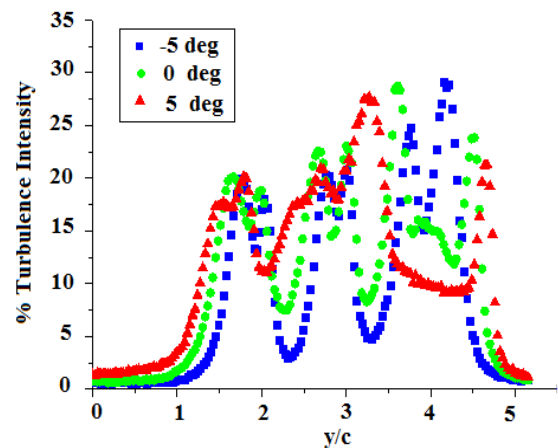


(ج)

شکل (۱۰): مقایسه شدت اغتشاشات آبشار در حضور و بدون حضور سیم‌های اغتشاش‌ساز در زوایای برخورد مختلف: (الف) $i=-5$ ، (ب) $i=0$ و (ج) $i=5$.

درست است که استفاده از سیم اغتشاش‌ساز، در اعداد رینولدز بالا، سبب تغییرات اساسی نهانی در نقطه جدایش جریان می‌شود، اما تأثیر این سیم‌ها در رینولدزهای پایین نیز قابل مشاهده است. این تغییرات را می‌توان در اشکال ۷ و ۱۰ مشاهده نمود. در شکل ۷ شاهد شتاب گرفتن سیال و افزایش

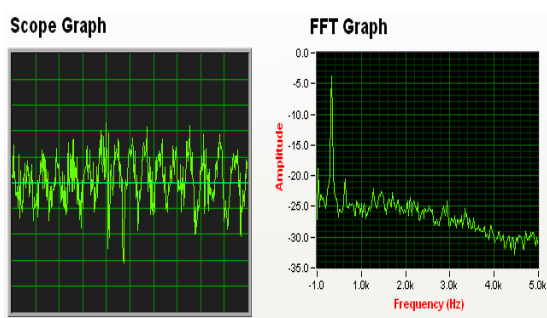
با افزایش زاویه برخورد در شکل ۹ (آبشار در حضور سیم‌های اغتشاش‌ساز)، عرض پروفیل نیز افزایش می‌یابد که بر طبق آنچه در ابتدا ذکر شد، هرچه میزان نوسان در مقیاس بزرگ‌تری رخ دهد، اندازه تبادل مومنتوم و حرارت رخ داده بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین با در نظر گرفتن افت فشار افزایش یافته در جریان‌های آشفته، در مسائل درگیر با انتقال حرارت و انتقال جرم، آشفته نمودن جریان تا جایی که افت فشار افزایش یافته منجر به ناکارآمدی و عدم صرفه اقتصادی پروژه نگردد، مطلوب است.



شکل (۹): مقایسه شدت اغتشاشات در سه زاویه برخورد مختلف.

استفاده از سیم‌های اغتشاش‌ساز، سبب افزایش بیشینه اغتشاشات در دنباله پره شده و شکل نمودار را نیز از نوع یک قله‌ای به دو قله‌ای تبدیل کرده است. عرض نمودار نیز در هر سه زاویه برخورد افزایش یافته، برخلاف عرض نمودار پروفیل سرعت که با نصب سیم کاهش یافته است (شکل ۱۰).

دامنه هستند. بنابراین فرکانس مربوط به بیشترین دامنه، در واقع همان مقدار فرکانس گردابه کارمن است (شکل ۱۲).



شکل (۱۱): سمت چپ نوسانات جریان در حوزه زمان و سمت راست در حوزه فرکانس.

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان گفت که در آبشار پره‌های مغشوش شده، در تمام زوایای برخورد، بیشینه فرکانس در نقطه‌ای حوالی $y=50\text{ mm}$ رخ می‌دهد، یعنی در فاصله بین پره ۱ و ۲، که این نقطه با توجه به تغییر زاویه برخورد، تغییر می‌کند. همچنین می‌توان گفت افزایش زاویه برخورد سبب کاهش فرکانس جریان می‌گردد که این کاهش در زاویه برخورد $i=5^\circ$ به طور کامل مشهود است. ایجاد اغتشاش در مجموع سبب کاهش فرکانس در بیشینه دامنه و به دنبال آن، کاهش عدد استروهل می‌گردد. البته این کاهش در زاویه برخورد $i=5^\circ$ نسبت به زاویه $i=0^\circ$ بیشتر است.

در زاویه برخورد $i=5^\circ$ ، وجود سیم‌ها سبب افزایش عدد استروهل می‌گردد و این بدان معناست که زبری، سبب شکل‌گیری گردابه‌های کارمن با فرکانس بیشتر در پشت آبشار شده است (شکل ۱۲-ج).

مقادیر عدد استروهل به‌ازای تغییر زاویه برخورد (که با استفاده از رابطه (۴) به دست آمده است) در جدول ۱ نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر، تمام داده برداری‌ها در سرعت $U=20\text{ m/s}$ و فاصله $x/c=0.15$ نسبت به لبه فرار پره‌ها انجام شده است، اما شاد آرام و همکاران با آنالیز طیفی جریان نشان دادند که با دو برابر شدن عدد رینولدز، فرکانس تشکیل گردابه‌ها تغییر محسوسی نمی‌یابد و همچنین با دور شدن از مدل در راستای جریان، چگالی طیف قدرتی نوسانات سرعت کاهش می‌یابد [۱۸].

طول پروفیل سرعت بی‌بعد بوده و در شکل ۱۰ با نصب سیم اغتشاش‌ساز، افزایش اغتشاشات جریان در دنباله آبشار مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن افت فشار افزایش یافته در جریان‌های آشفته، نصب این سیم‌ها جهت آشفته نمودن جریان تا جایی که سبب افزایش ضریب پسای طبقه کمپرسور و افت فشار افزایش یافته نشده و عملکرد کلی کمپرسور را تحت‌الشعاع قرار ندهد، همواره مدنظر مهندسين بوده است.

۵-۳- بررسی عدد استروهل

با توجه به بالا بودن پاسخ فرکانسی دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ نسبت به سیستم‌های سرعت‌سنج دیگر، مناسب است تا از این امکان استفاده کرده و با پردازش نتایج خام به دست آمده، نمودارهای با مفهومی از آنالیز طیفی دنباله جریان نشان داده شود. از آنجایی که دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ، اطلاعات هر نقطه را به صورت هزاران داده ذخیره می‌کند، ارائه اطلاعات از تمامی نقاط جریان به صورت نقطه به نقطه امکان‌پذیر نمی‌باشد. با این وجود آنالیز طیفی مؤلفه‌های سرعت در جهت x و y در نقاط منتخبی از دنباله جریان، دینامیک دنباله را تا حدودی آشکار می‌سازد.

عدد استروهل، از اعداد بی‌بعد است که فرکانس نوسانات گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل را به صورت بی‌بعد بیان می‌کند. عدد استروهل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$St = f \times c / W_{ref} \quad (3)$$

که در آن، f فرکانس گردابه پشت مدل، c طول وتر پره و W_{ref} سرعت جریان آزاد سیال است. فرکانس گردابه‌های تشکیل شده پشت مدل را می‌توان به وسیله سنسور جریان‌سنج سیم داغ در تونل باد به دست آورد.

تعیین فرکانس گردابه توسط سنسور سیم داغ: سنسور سیم داغ، میزان نوسانات جریان سیال در تونل باد را به صورت نوسان در زمان و به عبارتی در حوزه زمان دریافت می‌کند و با استفاده از تبدیل سریع فوری، آن را به حوزه فرکانس برده در نمایشگر به صورت دامنه نوسان برحسب فرکانس نوسان نشان می‌دهد. در تونل باد مورد آزمایش، بیشینه فرکانس داده برداری ۵ KHz انتخاب شده است (شکل ۱۱).

در حوزه فرکانس، می‌توان دامنه تمامی نوسانات (با فرکانس‌های مختلف) جریان که توسط سنسور اندازه‌گیری می‌شود را مشاهده نمود. از بین تمامی نوسانات جریان پشت مدل، مسلم است که نوسانات گردابه‌های کارمن دارای بیشترین

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، یک آشپاش خطی کمپرسور متشکل از سه عدد پره، یک مرتبه به صورت ساده و بار دیگر با نصب سیم‌های اغتشاش‌ساز بر روی پره‌ها در تونل باد و در عدد رینولدز $Re=45500$ مورد بررسی قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان از یک دستگاه جریان‌سنج سیم داغ یک‌بعدی استفاده شد. با توجه به مباحث عنوان شده می‌توان نتایج زیر را از آزمایش‌های انجام شده گرفت:

۱- با افزایش زاویه برخورد، پروفیل سرعت ضمن انتقال یافتن به سمت چپ، طول آن کمتر و مضمحل شده است. تولید آشفتگی به وسیله سیم‌ها در لایه مرزی، سبب شد که جدایش در فاصله‌ای دورتر از لبه حمله اتفاق افتاده و عرض دنباله نیز کاهش یابد.

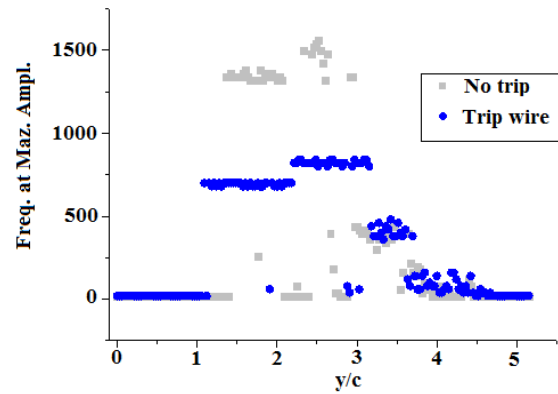
۲- بعد از نصب سیم، پروفیل‌های سرعت بی‌بعد در تمام زوایا به سمت پره سمت راستی منتقل شده و قله آنها نیز جابه‌جا گردید، که این جابه‌جایی در زاویه برخورد $i=0$ به بیشترین مقدار خود یعنی 0.16 رسید.

۳- تریپ کردن لایه مرزی سبب افزایش بیشینه اغتشاشات در دنباله پره شده، پهنای نمودار را افزایش داده و شکل نمودار اغتشاشات را نیز از نوع یک قله‌ای به دو قله‌ای تغییر داده است. ۴- افزایش زاویه برخورد سبب کاهش فرکانس جریان شده، که این کاهش در زاویه برخورد $i=5$ کاملاً مشهود بوده است.

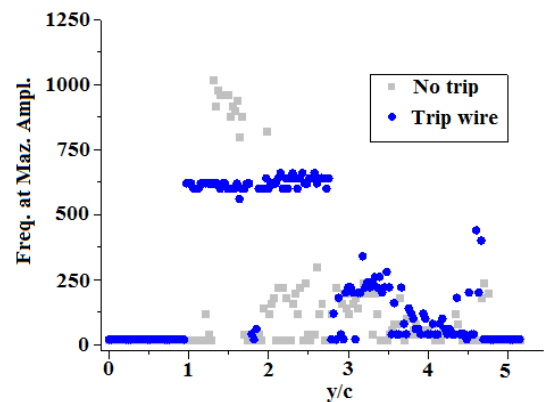
۵- استفاده از سیم‌های اغتشاش‌ساز سبب کاهش فرکانس در بیشینه دامنه و به دنبال آن، کاهش عدد استروهاال گردید. البته این کاهش در زاویه برخورد $i=5$ نسبت به زوایای دیگر مشهود تر بود.

۷- مراجع

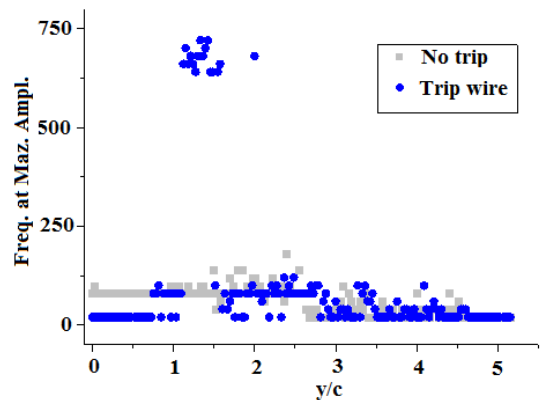
- Sanieinejad, M. "Fundamentals of Turbulent Flows and Turbulence Modeling", Daneshnegar Publisher, 978-964-2927-35-337, Tehran, 2009 (In Persian).
- Kumagai, S. and Isoda H., "Combustion of Fuel Droplets in a Falling Chamber", Sixth Symposium (International) on Combustion, Vol. 6, pp. 726-731, 1957.
- Ohta Y., Shimoyama K., and Ohigashi S., "Vaporization and Combustion of Single Liquid Fuel Droplets in a Turbulent Environment", JSME, Bulletin, Vol.18, Jan. pp. 47-56, 1975.
- Hashemi, S.A., Fattahi, A., Sheikhzadeh, G.A. and Mehrabian, M.A. "Investigation of the Effect of Air Turbulence Intensity on NO_x Emission in Non-Premixed Hydrogen and Hydrogen-Hydrocarbon Composite Fuel Combustion", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 36, pp. 10159-10168, 2011.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۲): مقایسه فرکانس جریان در بیشینه دامنه برای آشپاش در حضور و بدون حضور سیم‌های اغتشاش‌ساز در زوایای برخورد مختلف (بر حسب Hz): الف) $i=-5$ ، ب) $i=0$ و ج) $i=5$.

جدول (۱): مقادیر عدد استروهاال برای آشپاش کمپرسور در زوایای برخورد مختلف.

i	بدون سیم			در حضور سیم		
	-۵	۰	۵	-۵	۰	۵
f	۱۵۶۰	۱۰۲۰	۱۸۰	۸۴۰	۶۱۹	۷۲۰
St	۲/۵	۱/۶	۰/۳	۱/۴	۱/۰	۱/۲

5. Khoshnevis A.B., Foroozesh F., Pedram M., and Vahidi M. "Experimental Investigation on Drag Coefficient Reduction Due to Tripping Wire on a Cylinder", *J. Solid and Fluid Mech.*, Vol. 2, No. 2, pp. 81-90, 2012 .
6. Gorji M.E., Khoshnevis A.B., Gholipoor Asrami E. and Vahidi M. "Experimental Investigation of Air Flow Velocity Profiles Effect on the Wires and Cables of Power Transmission Lines and Supporting Devices", *J. Solid and Fluid Mech.*, Article 8, Vol. 2, No. 1, Page 83-97, Spring 2012.
7. Foroozesh F., Khoshnevis A.B., and Vahidi M. "Experimental Investigation of Flow Turbulence Effects on the Flow Wake Parameters Around a NACA0012 Airfoil", *Fluid Mech. and Aero. J.* Vol. 2, No. 1, pp. 83-93, Spring 2013.
8. Qiang Z. and Ligrani P.M. "Wake Turbulence Structure Downstream of a Cambered Airfoil in Transonic: Effect of Surface Roughness and Freestream Turbulence Intensity", *Int. J. Rotating Machinery*, Vol. 2006, No. 60234, pp. 1-12, 2006.
9. Timmer W.A. and Van-Rooij R.P.J.O.M. "Summary of the Delft Univ. Wind Turbine Dedicated Airfoils", *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of the ASME*, Vol. 125, No. 4, pp. 488-496, 2003.
10. Freudenreich K., Kaiser K., Schaffarczyk A.P., Winkler H., and Stahl B. "Reynolds Number and Roughness Effect on Thick Airfoil for Wind Turbines", *Wind Eng.*, Vol. 28, No. 5, pp. 528-546, 2004.
11. Fukudome K., Watanabe M., Iida A., and Mizuno A. "Separation Control of High Angle of Attack Airfoil for Vertical Axis Wind Turbines", *AIAA*, Vol. 39, No. 9, pp. 1-4, 2001.
12. Huber A.F. and Mueller T.J. "The Effect of Trip Wire Roughness on the performance of the Wortmann FX 63-137 Airfoil at low Reynolds Numbers", *Experiments in Fluids*, Vol. 5, No.4, pp. 263-272, 1987.
13. Khoshnevis A.B. "Experimental Study of Wake of an Airfoil Subjected to Curvature and Adverse Pressure Gradient", 11 Annual Conf. Int. of mech. Eng. Mashhad, Iran, May 13-15, 2003.
14. Salari M., Ardakani M.A. and Taghavi Zonnor R. "Experimental Study for Effect of Free Flow Temperature Changes and Hot Wire Anemometer on Sensors Calibration and Velocity Measurement", *J. Mech. and Aero.* Vol. 1, No. 3, pp. 49-59, 2005 (In Persian).
15. Ardakani M.A. "Hot Wire Anemometer", Publisher, Khagehnasir Toosi University, First Edition, pp. 96-97, 2006 (In Persian Book).
16. Fox R. W. and McDonald, A. T. "Introduction to Fluid Mechanics", John Wiley & Sons, Inc., Fifth Ed., 1998.
17. Roshko A. "Experiments on Oscillations of a Circular Cylinder In Uniform Flow", Tech. Rep. NPS-69SL 77071-R. Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1961.
18. ShadAram A., Azimifard M., and Rostami N. "Experimental Study of Flow Characteristics in Near Wake of Square Cylinders", *J. Mech. and Aero.*, Vol. 3, No. 4, pp. 13-23, 2007.