

بررسی تجربی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلثی در زاویه‌های مختلف جریان

احسان اردکانی، فواد فرحانی، محمد علی اردکانی*

پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

چکیده

مبنای عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای رابطه خطی $Q = kf$ (k عدد ثابت و f فرکانس ریزش گردابه‌ها) است. لذا دقت دبی‌سنج فقط تابعی از دقت اندازه‌گیری فرکانس داده‌ها می‌باشد. به منظور مشخص نمودن دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، نیاز است که طیف فرکانسی آن بررسی شود. در این تحقیق تجربی، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع ۱۰ میلی‌متر در پایین‌دست مدل با استفاده از تونل باد و دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری و با استفاده از توزیع نرمال گاوس برازش شده است. با توجه به سطح اطمینان مورد نظر، دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها بررسی و تغییرات آن با استفاده از انحراف معیار توزیع نرمال، کمی‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد تغییرات عدد استروهل برای اعداد رینولدز بالاتر از ۱۲۰۰ مستقل از عدد رینولدز بوده ولی به زاویه جریان وابسته است. با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها برای مدل مثلثی در زاویه 60° و $1/53$ ٪ و برای زاویه 0° این خطا ۲/۴۶٪ می‌باشد. میزان انحراف معیار طیف فرکانسی در جهت جریان دارای روند افزایشی بوده ولی در جهت عمود بر جریان خارج از ناحیه جدایش، ثابت می‌باشد. هنگامی که زاویه جریان در بازه $18^\circ < \alpha < 23^\circ$ است، خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها تا حدود ۹٪ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، عدد استروهل، مدل مثلثی، جریان‌سنج سیم‌داغ، دبی‌سنج گردابه‌ای

ریزش گردابه‌های ناشی از اجسام لبه‌پهن، از پدیده‌های مهم جریان سیالات می‌باشد که شناخت آن از اهمیت زیادی برخوردار است. ریزش گردابه‌ها از یک جسم لبه‌پهن باعث ارتعاش جسم و یا ارتعاش اجسام پایین‌دست آن می‌شود. لذا بررسی آن برای سازه‌هایی که در معرض جریان باد قرار دارند، اهمیت دارد. همچنین این پدیده اساس کار دبی‌سنج‌های گردابه‌ای نیز می‌باشد [۱]. دبی‌سنج‌های گردابه‌ای از نوع دبی‌سنج‌های خطی بوده که دارای مزیت‌هایی از جمله دقت بالا، بازه اندازه‌گیری مناسب، قابلیت استفاده در سیالات و فشارهای مختلف می‌باشد [۲]. مهمترین خصوصیت این نوع دبی‌سنج عدم نیاز آن به کالیبراسیون به صورت متناوب است. در این نوع دبی‌سنج، فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از جسم لبه‌پهن اندازه‌گیری شده و با استفاده از آن، سرعت و یا دبی جریان هوا را می‌توان اندازه‌گیری نمود. همچنین با استفاده از ریزش گردابه‌ها، می‌توان جریان بالادست ناحیه جدایش را مغشوش نموده و ناحیه جدایش را کاهش و یا به تعویق انداخت. به عنوان مثال با مغشوش نمودن جریان در دیفیوزرهای زاویه باز می‌توان ناحیه جدایش را کنترل و در نتیجه ضریب بازیابی فشار و یا راندمان دیفیوزر را افزایش داد [۳، ۴].

برای بررسی پدیده ریزش گردابه‌ها معمولاً از عدد استروهمال ($St = \frac{fd}{U}$) استفاده می‌شود، که در آن d اندازه مشخصه جسم لبه‌پهن به عنوان مثال طول ضلع یک مثلث متساوی‌الاضلاع، U سرعت جریان آزاد و f فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌باشد. علاوه بر بررسی عدد استروهمال، نیاز است که طیف فرکانسی اطراف فرکانس حاکم (فرکانس ریزش گردابه‌ها) نیز بررسی شود. با شناخت طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، می‌توان عدم قطعیت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را مشخص نمود. مدل مثلث متساوی‌الاضلاع از جمله اجسام لبه‌پهن غیرمتقارن است که ریزش گردابه‌های ناشی از آن، می‌تواند کاربردهای مختلفی داشته باشد. در این ارتباط تحقیقات مختلفی انجام پذیرفته است.

سریکانت^۱ و همکاران [۵] پدیده ریزش گردابه‌های ناشی از یک مثلث متساوی‌الاضلاع که رأس آن رو به جریان بوده را به صورت عددی برای اعداد رینولدز کمتر از ۸۰ بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد برای اعداد رینولدز از ۵۰ تا ۸۰، تغییرات عدد استروهمال در محدوده ۰/۱۸ تا ۰/۱۹۲ بوده و برای اعداد رینولدز کمتر از ۵۰، ریزش گردابه‌ها اتفاق نمی‌افتد. کومار^۲ و دالال^۳ [۶] ریزش گردابه‌های ناشی از یک مدل مثلث متساوی‌الاضلاع که رأس آن رو به جریان است را به صورت عددی در محدوده اعداد رینولدز ۸۰ تا ۲۰۰ و نسبت انسداد ۰/۰۸۳ تا ۰/۳۳ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت انسداد، عدد رینولدز بحرانی (ریزش گردابه‌ها قبل از این عدد اتفاق نمی‌افتد) افزایش می‌یابد. برای مثال، در نسبت انسداد ۰/۰۸۳، عدد رینولدز بحرانی حدود ۴۰ بوده و در نسبت انسداد ۰/۳۳، این عدد حدود ۶۴ می‌باشد. عدد استروهمال در نسبت‌های انسداد ۰/۰۸۳ و ۰/۳۳، به ترتیب ۰/۲ و ۰/۲۵ گزارش شده است. نتایج آنها نشان داد که برای نسبت انسداد کمتر از ۰/۰۸۳، عدد استروهمال و عدد رینولدز بحرانی مستقل از نسبت انسداد هستند. درخشنده^۴ و محبوب^۵ [۷] در مطالعه مروری خود، فرکانس ریزش گردابه‌ها و الگوی جریان آن را برای اجسام لبه‌پهن متقارن و غیرمتقارن نظیر استوانه با مقطع دایره، مثلث، مربع و مستطیل را بر حسب اعداد رینولدز طبقه‌بندی و بررسی کردند. بر اساس مطالعه مروری انجام شده، تحقیق برای اعداد رینولدز پایین‌تر از ۴۵۰ به صورت عددی توسط پژوهشگران انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد برای مثلثی که رأس آن رو به جریان است، عدد استروهمال با افزایش عدد رینولدز در بازه ۵۰ تا ۲۵۰ افزایش قابل توجه داشته و در بازه اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۶۰۰ تغییرات عدد استروهمال نسبت به عدد رینولدز قابل ملاحظه نیست. زیتون^۶ و همکاران [۸] جریان پایین دست مدل مثلث متساوی‌الاضلاع را در اعداد رینولدز کمتر از ۲۰۰ به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که عدد رینولدز بحرانی برای مدل مثلثی شکل که رأس آن رو به جریان قرار دارد، برابر ۳۸/۰۴ می‌باشد. برای حالتی که

¹ Srikanth

² Kumar

³ Dalal

⁴ Derakhshandeh

⁵ Mahbub

⁶ Zeitoun

ضلع مثلث در برابر جریان هوا قرار داده شود، عدد رینولدز بحرانی برابر $34/8$ است. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز از 40 به 200 ، عدد استروهمال از $0/12$ به $0/2$ افزایش یافته و پس از آن ثابت می‌ماند. آگراوال^۱ و همکاران [۹] پدیده ریزش گردابه‌ها در پایین دست مدل مثلثی را با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ و سرعت‌سنجی تصویر ذرات^۲ بررسی کردند. آنها زاویه‌های مختلف رأس مدل مثلثی (30° ، 45° ، 60° و 90°) را در عدد رینولدز 520 مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که ناحیه جدایش و ضریب نیروی پسا، با افزایش زاویه رأس مدل مثلثی افزایش یافته ولی عدد استروهمال به صورت خطی کاهش می‌یابد. لو^۳ و همکاران [۱۰] جریان پایین دست اجسام لبه‌پهن نامتقارن مانند اجسام مثلثی، مربعی و دوزنقه‌ای را با استفاده از تونل‌های باد و آب بررسی کردند. هدف از تحقیق آن‌ها، تعیین مقادیر فرکانس ریزش گردابه‌ها، ضرایب نیروی برا و پسا اجسام لبه‌پهن، در اعداد رینولدز 2100 و 3400 بود. در این مطالعه، همچنین تغییرات عدد استروهمال با زاویه جریان برای مدل‌های مختلف لبه‌پهن بررسی شد. نتایج نشان داد که عدد استروهمال به زاویه جریان نسبت به مدل بستگی دارد و در زاویه جریان 22° به حداکثر مقدار خود می‌رسد. آن‌ها با استفاده از روش مرئی‌سازی، فاصله بین گردابه‌های متوالی پایین‌دست مدل مثلثی را مشخص نموده که تقریباً $1/8$ برابر اندازه ضلع مثلث است. در یک تحقیق تجربی، اردکانی و همکاران [۱۱] ریزش گردابه‌های ناشی از یک مدل مثلثی را برای به‌کارگیری در دی‌سنج گردابه‌ای و یا کالیبراسیون جریان‌سنج‌های سیم‌داغ در سرعت‌های پایین، مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، با استفاده از تونل باد و جریان‌سنج سیم‌داغ، توزیع جریان هوا، توزیع شدت اغتشاش‌های جریان و ریزش گردابه‌های ناشی از یک مدل مثلث متساوی الاضلاع به ضلع 10 میلی‌متری را بررسی کردند. آنها نشان دادند که تغییرات عدد استروهمال با زاویه جریان قابل توجه است. برای مثال، عدد استروهمال در زاویه جریان 20° به حداکثر مقدار خود برابر $0/23$ و در زاویه جریان 60° به حداقل مقدار خود برابر $0/133$ می‌رسد. نتایج آنها همچنین نشان داد که زاویه جریان بر توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان تأثیر معنی‌داری ندارد. آنها به این نتیجه رسیدند برای کالیبراسیون جریان‌سنج‌های سیم‌داغ، علاوه بر اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد نیز ضروری است. آنها نشان دادند هنگامی که $x/a = 2/5$ و $y/a \leq 5/2$ قرار می‌گیرد (x فاصله از مبدا مختصات در جهت جریان، y فاصله از مبدا مختصات عمود بر جهت جریان و a اندازه ضلع مثلث است)، سرعت اندازه‌گیری شده برابر با سرعت جریان آزاد بوده و شدت اغتشاش جریان کمتر از 6% است. همچنین، مشاهدات سوامیناتان^۴ و همکاران در رابطه با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ برای اندازه‌گیری سرعت جریان، نشان می‌دهد که شدت اغتشاش جریان کمتر از 6% تأثیر کمی بر دقت اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد دارد [۱۲].

نگ^۵ و همکاران [۱۳] مکانیزم ریزش گردابه‌ها در زوایای مختلف جریان پایین‌دست یک مدل مثلث متساوی‌الاضلاع را به صورت عددی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که عدد رینولدز بحرانی به زاویه جریان بستگی دارد. به عنوان مثال، عدد رینولدز بحرانی برای محدوده $30^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$ برابر 35 است. نتایج همچنین نشان داد که در عدد رینولدز 80 ، در تمامی زاویه‌ها ریزش گردابه‌ها اتفاق می‌افتد.

تحقیقات متعددی در ارتباط با پدیده ریزش گردابه‌های ناشی از اجسام لبه‌پهن به خصوص مدل مثلثی انجام گرفته است که معمولاً در اعداد رینولدز کمتر از 200 به صورت عددی و در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از 200 به صورت عددی و تجربی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در ارتباط با تأثیر عدد رینولدز، زاویه جریان، نسبت انسداد، زاویه رأس مدل، ناحیه جدایش و ... تحقیقات فراوانی انجام شده، ولیکن هنوز موارد متعددی نظیر شکل‌های توسعه یافته لبه‌پهن، جریان‌های غیرنیوتونی، جریان‌های دارای شتاب، جریان‌های نوسانی و ... وجود دارد که در این زمینه‌ها تحقیقات قابل توجهی انجام نگرفته است [۱۴]. همچنین در ارتباط با طیف فرکانسی ریزش

¹ Agrawal

² Particle Image Velocimetry (PIV)

³ Luo

⁴ Swaminathan

⁵ Ng

گردابه‌ها و قدرت آن گزارشی ارائه نگردیده است. اهمیت طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها بدین جهت است که عدم قطعیت و یا دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را می‌توان مشخص کرد.

در این مقاله، ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلی و طیف فرکانسی آن در زاویه‌های مختلف جریان به صورت تجربی در اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار گرفته و همچنین ریزش گردابه‌ها و طیف فرکانسی آن در پایین‌دست مدل در جهت‌های طولی و عرضی نیز بررسی و نتایج آن ارائه شده است. طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها با استفاده از منحنی نرمال گاوس برازش شده و با استفاده از آن، عدم قطعیت و یا دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها بررسی و نتایج آن ارائه می‌شود که نتایج به دست آمده دارای کاربرد در طراحی دبی‌سنج گردابه‌ای است.

۲- روش آزمایش

کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه تونل باد پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شده است. تونل باد مورد استفاده از نوع مدار بسته می‌باشد که سرعت آن با استفاده از کنترل دور از ۲ تا ۲۸ m/s قابل تنظیم است. مقطع اتاق آزمون تونل باد $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ است و به منظور یکنواخت نمودن سرعت جریان هوا و کاهش اغتشاش‌های آن، از ۴ سری توری با مش ۲۰ و ۲۴ به همراه لانه‌زنبوری در اتاق آرامش استفاده شده است. همچنین نسبت ورودی به خروجی نازل تونل باد، ۱۲ می‌باشد. غیریکنواختی

سرعت تونل باد کمتر از ۰/۱٪ و مقدار شدت اغتشاش‌های تونل باد $(Tu\% = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \times 100)$ که در آن u' ، اختلاف سرعت لحظه‌ای $U(t)$ و سرعت متوسط U است) در مرکز اتاق آزمون، کمتر از ۰/۲٪ می‌باشد.

ریزش گردابه‌های ناشی از مدل با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ ساخت شرکت فراسنجش صبا اندازه‌گیری شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک بعدی و سیم پراب از نوع تنگستن با قطر ۵ میکرون است. به منظور جابه‌جایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده پراب استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقت جا به جایی ۰/۱mm در سه بعد می‌باشد که با استفاده از رایانه حرکت آن قابل کنترل است. داده‌های اخذ شده توسط جریان‌سنج سیم‌داغ از طریق کارت اخذ داده از نوع نشنال اینسترومنتس^۱ به رایانه ارسال و توسط نرم افزار فلوویر^۲ تجزیه و تحلیل می‌شود. عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ برابر ۱/۵۷٪ به دست می‌آید [۱۵]. با فرض توزیع نرمال گاوس و ضریب پوشش ۲، پارامترهای عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای طبق مرجع [۱۵] به صورت جدول ۱ ارائه می‌شود.

جدول ۱: پارامترهای عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ [۱۵]

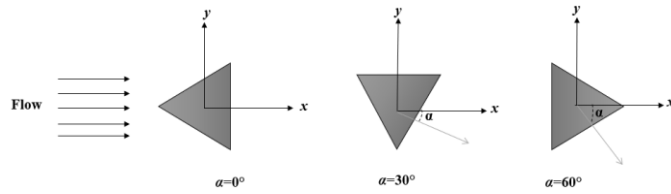
Table 1: The instantaneous velocity measurement uncertainty parameters using hot-wire anemometer [15]

۰/۰۰۶	عدم قطعیت در استفاده از لوله پیتوت و فشارسنج الکترونیکی برای سرعت‌های بیش‌تر از ۲/۵ m/s
۰/۰۰۳	عدم قطعیت در استفاده از مکانیزم انتقال دهنده
۰/۰۰۰۷	عدم قطعیت در ارسال داده‌ها از طریق کارت A/D
۰/۰۰۲	عدم قطعیت ناشی از تغییرات دمای محیطی [۱۶]
۰/۰۰۴	عدم قطعیت برازش منحنی کالیبراسیون

مدل مورد استفاده در این تحقیق به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع ۱۰mm و طول ۱۵۰mm است، لذا نسبت طول به ضلع مدل ۱۵ بوده و می‌توان مدل را دوبعدی فرض نمود. شکل ۱ محور مختصات و زاویه چرخش مدل را نشان می‌دهد. به منظور تغییر زاویه مدل از مکانیزم چرخان استفاده می‌شود که از طریق رایانه حرکت دورانی آن قابل کنترل است.

¹ National Instruments (NI)

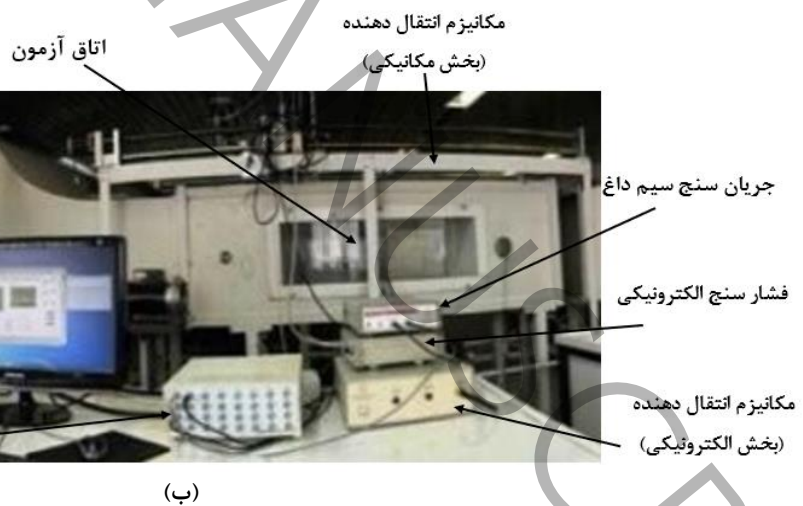
² FlowWare



شکل ۱: محور مختصات و زاویه چرخش مدل

Figure 1: The coordinates and model rotation angle

شکل ۲- الف تصویر مدل مثلثی همراه با مکانیزم چرخان و پراب جریان سنج سیم داغ را نشان می‌دهد. میزان دوران موتور پله‌ای مکانیزم چرخان به ازای هر پالس 0.72° است. شکل ۲- ب تصویری از تجهیزات مورد استفاده نظیر جریان سنج سیم داغ، مکانیزم انتقال دهنده، فشارسنج الکترونیکی و سیستم اخذ داده‌ها را نشان می‌دهد. برای کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ و اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد بالادست مدل، از لوله استاتیکی پیتوت به همراه فشار سنج از نوع Omega استفاده شده است.

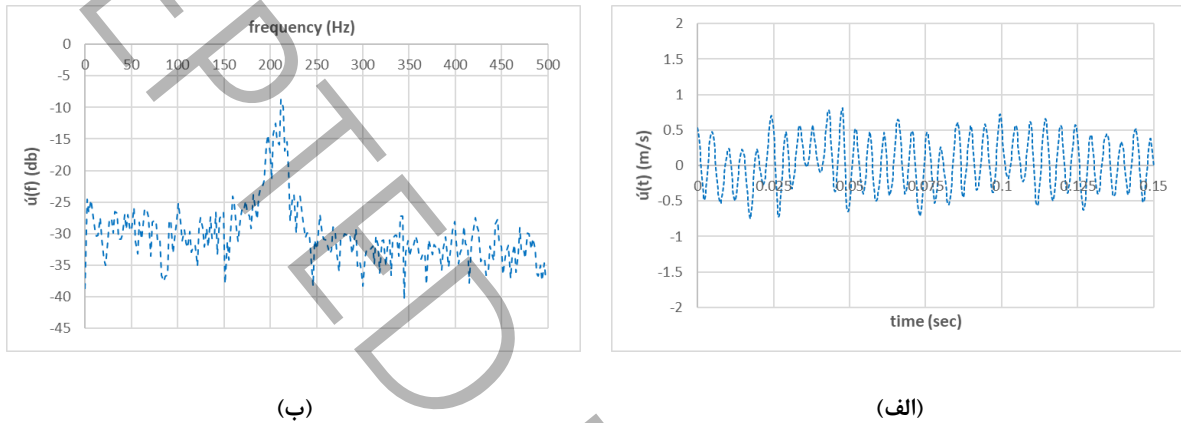


شکل ۲: (الف) تصویر مدل مثلثی در اتاق آزمون تونل باد به همراه مکانیزم چرخان (ب) تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق

Figure 2: (a) Picture of the triangular model in the wind tunnel test section along with the rotating mechanism, (b) the equipment used in this research

در این تحقیق، ابتدا مدل در زاویه صفر درجه نسبت به جریان قرار می‌گیرد (مطابق شکل ۱). سپس با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده، محل مناسب پراب که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها به وضوح دیده می‌شود مشخص شده و اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها در اعداد رینولدز ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰۰ انجام می‌گردد. مطابق شکل ۳- الف، سرعت نوسانی جریان در ناحیه‌ای که گردابه‌ها در آن به

وضوح دیده می‌شود، به صورت سینوسی و یا نزدیک به سینوسی می‌باشد [۱]. برای به دست آوردن فرکانس حاکم و همچنین طیف فرکانسی سرعت نوسانی جریان، با استفاده از تبدیل فوریه^۱، سرعت نوسانی جریان از حوزه زمان (شکل ۳-الف) به حوزه فرکانس (شکل ۳-ب) تبدیل شده و فرکانس حاکم به عنوان فرکانس ریزش گردابه‌ها مشخص می‌شود. به منظور بررسی و تجلیل طیف فرکانسی گردابه‌ها، منحنی اطراف فرکانس حاکم با استفاده از منحنی استاندارد گاوس برازش شده و انحراف معیار و عدم قطعیت آن بررسی می‌شود. با استفاده از فرکانس حاکم، عدد استروهل ریزش گردابه‌ها به دست آمده و نتایج را می‌توان با نتایج سایر محققین مقایسه نمود. در این تحقیق، فرکانس حاکم و همچنین طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در پایین دست مدل مثلی در راستای جریان (در جهت x) و عمود بر آن (در جهت y) بررسی گردیده و سپس با استفاده از مکانیزم چرخان، زاویه مدل نسبت به جریان تغییر داده شده و ریزش گردابه‌های جریان پایین دست مدل اندازه‌گیری و تحلیل می‌شود.



شکل ۳: (الف) اسیلوگرام سرعت لحظه‌ای در حوزه زمان (ب) طیف نوسانات سرعت در حوزه فرکانس در $Re = 6700$ و $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$

Figure 3: (a) Oscillogram of the instantaneous velocity in the time domain, (b) the u-fluctuation spectrum for $Re = 6700$ and

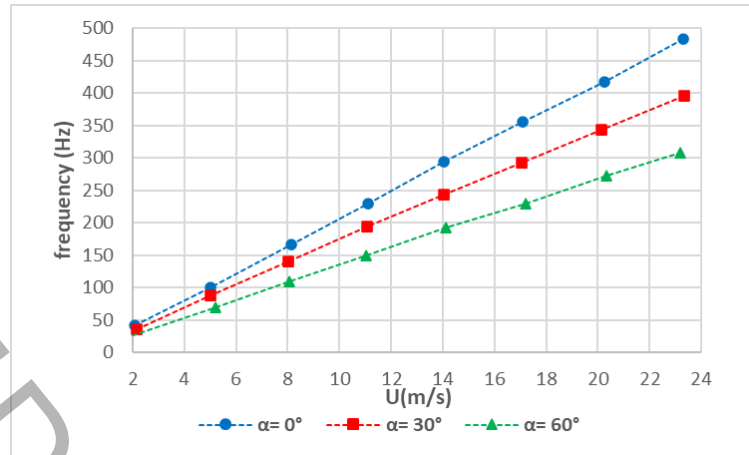
$$\left(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2\right)$$

۳- نتایج

۳-۱- بررسی پدیده ریزش گردابه‌ها و تأثیر زاویه مدل مثلی

در ابتدا با استفاده از منحنی‌های مطابق شکل ۳، فرکانس ریزش گردابه‌ها اندازه‌گیری شده است. در شکل ۴ از مرجع [۱۱] فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب سرعت جریان در چند زاویه مختلف نشان می‌دهد.

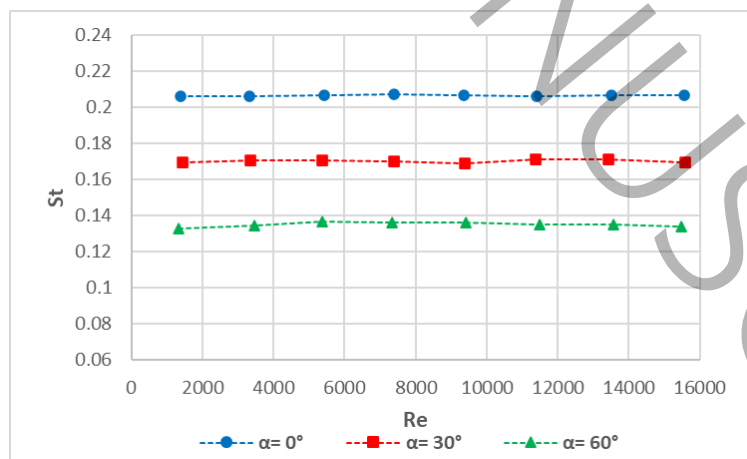
¹ Fast Fourier Transform (FFT)



شکل ۴: فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب سرعت در زاویه‌های مختلف و در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ [۱۱]

Figure 4: The vortex shedding frequency at different flow angles and distance ($\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2$) [11]

مطابق شکل ۴ رابطه فرکانس ریزش گردابه‌ها و سرعت جریان هوا به صورت خطی است و شیب این خطوط با زاویه جریان نسبت به مدل تغییر می‌کند. همچنین، شیب فرکانس ریزش گردابه‌ها در زاویه 0° که در آن رأس مدل مثلی در مقابل جریان هوا قرار دارد (شکل ۱) از دو زاویه دیگر بیشتر است. این موضوع به دلیل حرکت جریان بر روی سطح مثلث و ایجاد گردابان سرعت بالاتر در جهت عمود بر سطح می‌باشد. به منظور بررسی بهتر، داده‌های فرکانس ریزش گردابه‌ها و سرعت جریان در شکل ۴، با استفاده از اعداد استروهل و رینولدز بی‌بعد شده و به صورت شکل ۵ ارائه شده است [۱۱]. شکل ۵ منحنی عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز را در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل برای اعداد رینولدز بالاتر از ۱۲۰۰، عدد استروهل از عدد رینولدز مستقل بوده و برای اعداد رینولدز مختلف ثابت می‌باشد ولی با زاویه جریان نسبت به مدل تغییر می‌کند که به دلیل تشابه هندسی و سینماتیکی جریان می‌باشد.

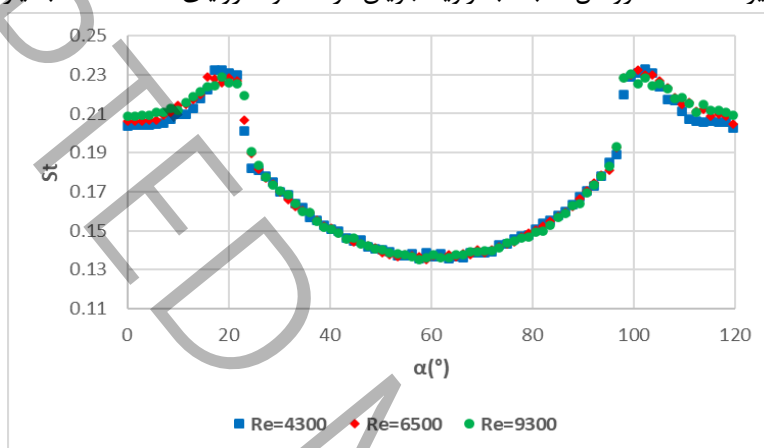


شکل ۵: منحنی تغییرات عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز در زاویه‌های مختلف مدل و در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ [۱۱]

Figure 5: The Strouhal number variations with Reynolds number for different flow angles and at the distance

$$\left(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2\right) [11]$$

شکل ۶ از مرجع [۱۱] تغییرات عدد استروهل برحسب زاویه جریان نسبت به مدل در اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، منحنی‌ها در اعداد رینولدز مختلف بر روی یکدیگر منطبق می‌باشند. کمترین مقدار عدد استروهل ۰/۱۳۵ است و در زاویه‌های نزدیک به ۶۰° رخ می‌دهد و بیشترین مقدار عدد استروهل ۰/۲۳ بوده و در زاویه‌های نزدیک به ۲۰° و ۱۰۰° اتفاق می‌افتد. ذکر این نکته ضروری است که مدل مورد استفاده مثلث متساوی الاضلاع بوده و مرکز مختصات آن در مرکز هندسی مدل (شکل ۱) قرار گرفته، لذا چرخش آن نسبت به جهت جریان (محور x) دارای تقارن می‌باشد. بر این اساس، منحنی شکل ۶ نسبت به زاویه ۶۰° دارای تقارن می‌باشد. همچنین منحنی شکل ۶ نیز دارای مقدار کمینه نسبی در زاویه ۶۰° می‌باشد. با توجه به شکل ۶ تغییرات عدد استروهل در ناحیه کمینه با زاویه جریان زیاد نیست، لذا قرار دادن مدل در زاویه ۶۰° برای کاربردهای دبی‌سنجی مناسب می‌باشد. در نتیجه به دلیل گردایان نزدیک به صفر عدد استروهل نسبت به تغییرات زاویه جریان نسبت به مدل، خطای نصب مدل در دبی‌سنج کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات عدد استروهل نسبت به زاویه جریان در محدوده زوایای ۱۸° تا ۲۳° بسیار شدید است.



شکل ۶: منحنی تغییرات عدد استروهل بر حسب زاویه جریان نسبت به مدل در اعداد رینولدز مختلف و در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ [۱۱]

Figure 6: The Strouhal number variations with flow angle for different Reynolds numbers and at the distance

$$\left(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2\right) [11]$$

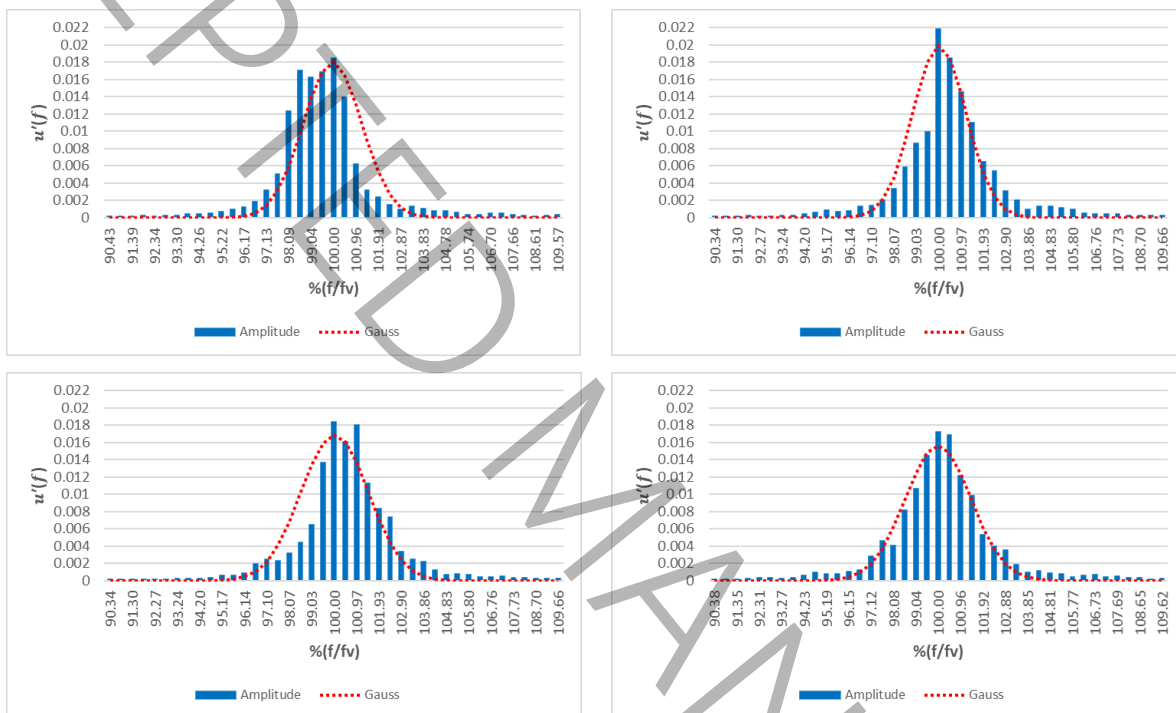
۳-۲- بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در زمان‌های مختلف

همان‌گونه که بیان شد، به منظور بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، سرعت نوسانی جریان با استفاده از تبدیل فوریه و با در نظر گرفتن اصل نایکویست از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شده است. با توجه به اینکه نوسانات سرعت جریان با زمان تغییر می‌کند، در نتیجه احتمال تغییر در طیف فرکانسی وجود دارد. شکل ۷ طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. محور افقی شکل ۷، با استفاده از فرکانس حاکم (فرکانس ریزش گردابه‌ها (f_v)) بی‌بعد شده و بر مبنای درصد نشان داده شده است. برای تحلیل و کمی‌سازی داده‌ها، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، با استفاده از توزیع نرمال گاوس برازش شده است. لازم به ذکر است بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را می‌توان با توزیع نرمال گاوس بیان نمود. چگالی توزیع نرمال گاوس به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود که منحنی آن به صورت زنگوله‌ای می‌باشد [۱۷].

$$\left(\frac{f}{f_v}\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{f}{f_v} - 1.0\right)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $(\frac{f}{fv})$ نسبت فرکانس طیف به فرکانس حاکم و σ انحراف از معیار می‌باشد. با توجه به اینکه محور افقی شکل ۷، به

صورت درصدی نرمالایز شده است، بنابراین مقدار میانگین در رابطه فوق برابر ۱۰۰ خواهد بود و همچنین مقدار چولگی نمودارهای فوق کم‌تر از ۰/۵ می‌باشد که بیان کننده این موضوع است که می‌توان داده‌های فوق را با توزیع نرمال گاوس تحلیل کرد. به منظور بررسی و مشخص نمودن عدم قطعیت در اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، از معکوس جدول نرمال گاوس استفاده می‌شود. با توجه به جدول ارائه شده در مرجع [۱۷]، برای بازه σ ، عدم قطعیت ۳۳٪، برای بازه 2σ ، عدم قطعیت داده‌ها ۵٪ و برای بازه 3σ ، عدم قطعیت داده‌ها ۳٪ می‌باشد. لذا با مشخص نمودن انحراف از معیار (σ) در منحنی‌های به دست آمده، می‌توان عدم قطعیت ریزش گردابه‌ها را مشخص نمود.

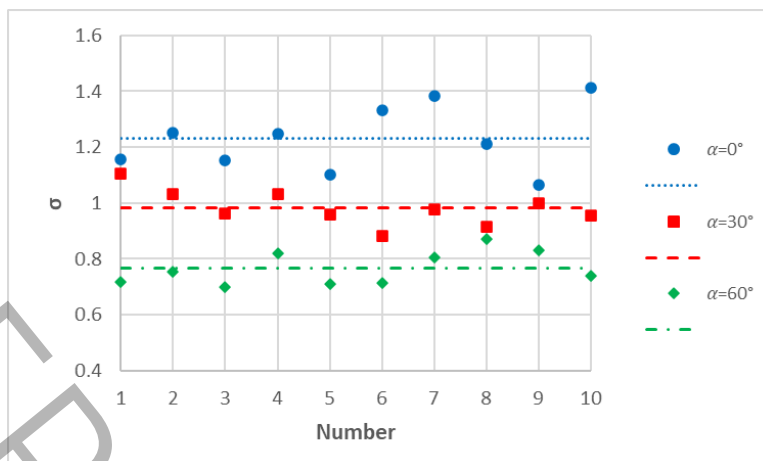


شکل ۷: طیف فرکانسی سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها و توزیع نرمال گاوس در زمان‌های مختلف برای زاویه 0° و $Re = 6700$

Figure 7: The frequency spectrum of the vortex u-fluctuation and the normal Gauss distribution at different times and for 0° flow angle and $Re = 6700$

شکل ۸ تکرارپذیری مقدار انحراف معیار منحنی برازش شده گاوس را برای ۱۰ بار اندازه‌گیری نشان می‌دهد. به منظور بررسی

تغییرات انحراف معیار σ نسبت به زمان، از پارامتر $\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\sigma_i - \bar{\sigma}|}{\bar{\sigma}} \times 100$ استفاده می‌شود که در این رابطه σ_i انحراف معیار توزیع نرمال گاوس و $\bar{\sigma}$ انحراف معیار متوسط می‌باشد. جدول ۲ مقادیر $\bar{\sigma}$ و ε برای زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸: تکرارپذیری مقدار انحراف معیار منحنی برازش شده گاوس برای یک دوره ۱۰ تایی در زوایای ۰°، ۳۰° و ۶۰°

Figure 8: Repeatability of the standard deviation values fitted using the Gauss distribution for a set of ten periods and for 0°, 30°, and 60° flow angles

جدول ۲: مقادیر $\bar{\sigma}$ و $\% \varepsilon$ برای زوایه‌های مختلف و ۱۰ بار تکرار

Table 2: Values of the $\bar{\sigma}$ and $\% \varepsilon$ for different angles and ten repeats

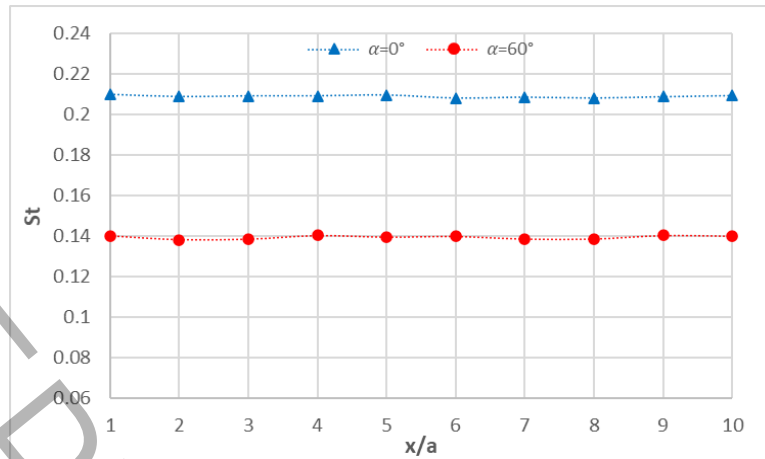
زاویه	$\bar{\sigma}$	$\% \varepsilon$
۰	۱/۲۳	۸٪
۳۰	۰/۹۸	۵٪
۶۰	۰/۷۶۵	۵٪

مطابق شکل ۸ و جدول ۲، در زاویه ۳۰°، مقدار متوسط σ برابر ۰/۹۸ می‌باشد. این بدان مفهوم است که به احتمال ۶۶٪ داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه ± 0.098 فرکانس حاکم است و یا به عبارت دیگر به احتمال ۶۶٪ اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها دارای خطایی حدود ۰/۹۸٪ می‌باشد. در صورتی که سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شود، خطای اندازه‌گیری در بازه ۲σ و یا به عبارت دیگر ± 0.196 خواهد بود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که میزان متوسط انحراف از معیار منحنی برازش شده گاوس برای مدل با زاویه ۰° برابر ۱/۲۳ و برای زاویه ۶۰° برابر ۰/۷۶۵ است. این بدان معنی است که احتمال خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها برای مدل مثلی در زاویه ۶۰° کم‌تر از دو زاویه دیگر بوده و در نتیجه عدم قطعیت در این زاویه کم‌تر است. لذا قرار دادن مدل مثلی در زاویه ۶۰° برای کاربرد دبی‌سنج گردابه‌ای مناسب‌تر می‌باشد.

۳-۳- بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد طولی

با توجه به این‌که در پایین‌دست مدل، ناحیه جدایش وجود دارد و این ناحیه بر روی پروفیل سرعت و شدت اغتشاش‌های آن تأثیر می‌گذارد، مناسب است که فرکانس ریزش گردابه‌ها و طیف آن در امتداد طولی (در جهت جریان) پایین‌دست مدل، بررسی شود. ناحیه جدایش در پایین‌دست مدل، با افزایش فاصله از مدل پهن‌تر شده که باعث گسترده‌تر شدن توزیع شدت اغتشاش‌های جریان نیز می‌شود [۱۸، ۱۹]. شکل ۹ تغییرات عدد استروهمال پایین‌دست مدل بر حسب $\frac{x}{a}$ در فاصله $\frac{y}{a} = 2$ ، خارج از ناحیه جدایش را نشان

می‌دهد. شکل فوق نشان می‌دهد که عدد استروهمال تا فاصله $\frac{x}{a} = 10$ ثابت بوده و تغییرات آن ناچیز و کمتر از ۰/۱٪ است.

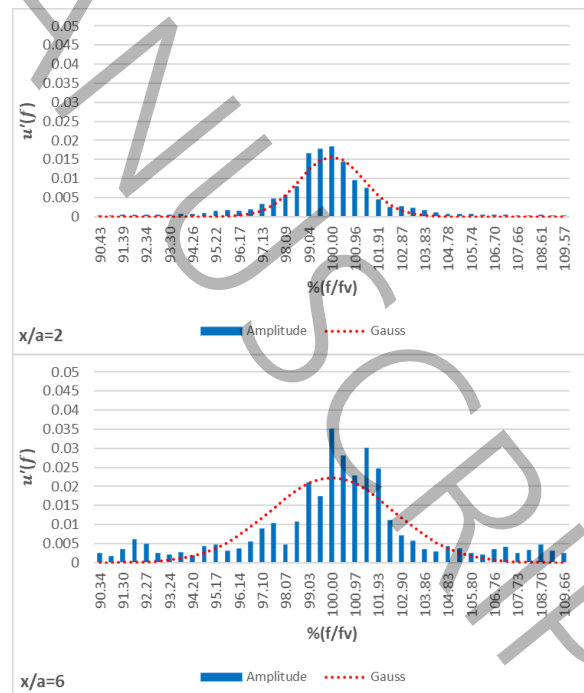
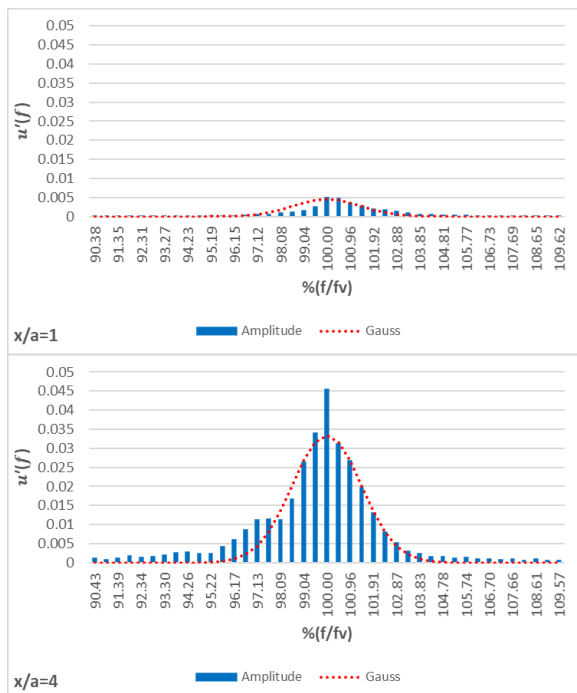


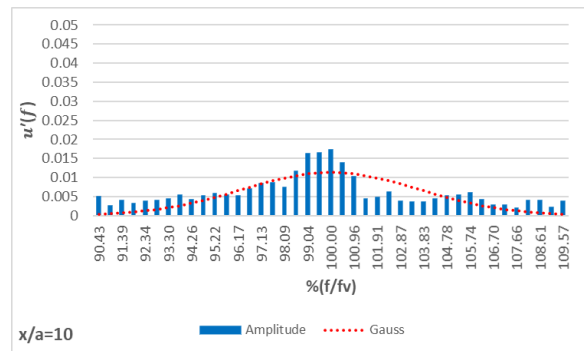
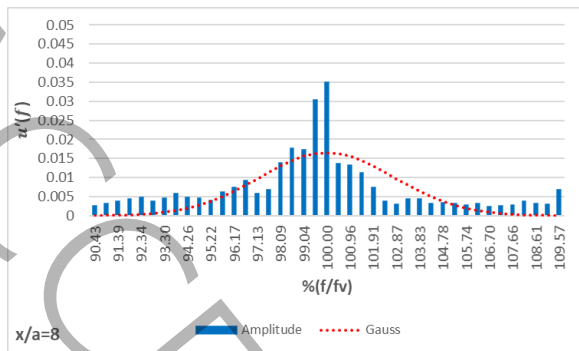
شکل ۹: تغییرات عدد استروهل بر حسب فاصله بی بعد شده $(\frac{x}{a})$ در $\frac{y}{a} = 2$ برای زوایای 0° و 60° و $Re = 6700$

Figure 9: Variations of the Strouhal number with the dimensionless distance $(\frac{x}{a})$ at $\frac{y}{a} = 2$ for 0° and 60° flow angles and

$Re = 6700$

شکل ۱۰ طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد طولی (در جهت جریان) که با استفاده از منحنی نرمال گاوس، برازش شده است، را نشان می‌دهد. محور افقی منحنی‌های شکل ۱۰ با استفاده از فرکانس ریزش گردابه‌ها بی بعد شده‌اند. مطابق شکل فوق، مقدار دامنه فرکانس ریزش گردابه‌ها در نزدیکی مدل ($\frac{x}{a} = 1$) کم و حدود 0.005 می‌باشد. با افزایش فاصله از مدل دامنه فرکانس ریزش گردابه‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این افزایش و کاهش توصیف کننده مراحل تقویت و تضعیف ریزش گردابه‌ها می‌باشد.

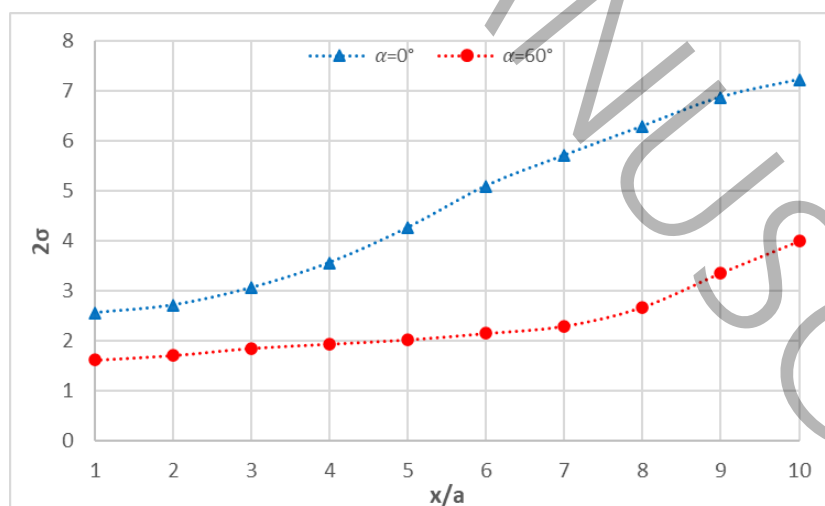




شکل ۱۰: طیف فرکانسی سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها و توزیع نرمال گاوس در امتداد طولی در $\frac{y}{a} = 2$ برای زاویه 0° و $Re = 6700$

Figure 10: The frequency spectrum of the vortex shedding u-fluctuation and the normal Gauss distribution in the longitudinal direction at $\frac{y}{a} = 2$ and for 0° flow angle and $Re = 6700$

به منظور بررسی کمی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، مقدار انحراف از معیار آنها (σ) بررسی می‌شود. شکل ۱۱ مقدار 2σ که معرف سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد را در پایین دست مدل بر حسب $\frac{x}{a}$ نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، با افزایش فاصله در پایین دست مدل مقدار 2σ ، افزایش می‌یابد. برای مدل مثلی با زاویه 0° ، در صورتی که پراب اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها در فاصله $\frac{x}{a} = 1$ قرار گیرد، حداکثر بازه‌ی خطای اندازه‌گیری با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حدود ۲/۵۵٪ و در فاصله $\frac{x}{a} = 10$ حدود ۷/۲۳٪ خواهد بود. همچنین هنگامی که مدل مثلی در زاویه 60° نسبت به جریان قرار دارد، با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪ حداکثر خطای اندازه‌گیری در $\frac{x}{a} = 1$ ، ۱/۶۱٪ و در $\frac{x}{a} = 10$ حدود ۴٪ می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱، به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری، پراب باید در فاصله‌های طولی نزدیک به مدل قرار گیرد.



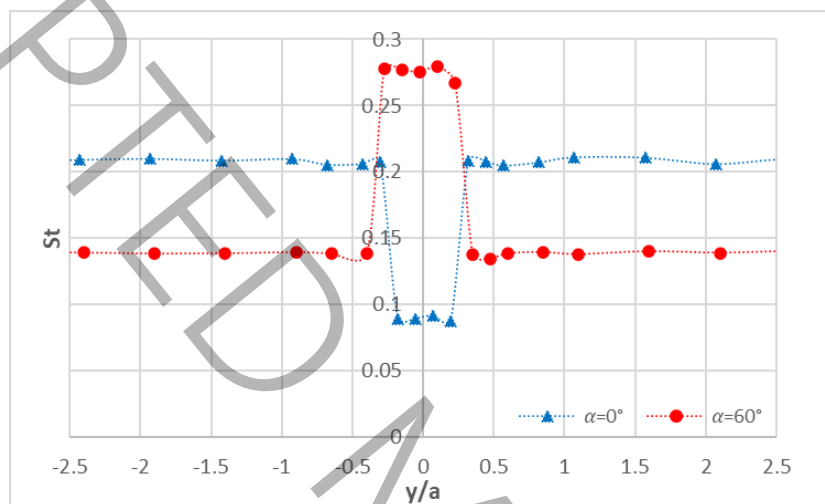
شکل ۱۱: مقدار 2σ پایین دست مدل در امتداد طولی در زوایای 0° و 60° و $Re = 6700$

Figure 11: Value of 2σ downstream of the model in the longitudinal direction for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

۳-۴- بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد عرضی

پایین دست اجسام لبه‌پهن از جمله مدل مثلثی، ناحیه‌های جدایش، جریان آزاد^۲ و سرعت بالاتر از جریان آزاد^۳ وجود دارد [۱۹].

این نواحی بر ریزش گردابه‌ها، طیف فرکانسی و قدرت آن تأثیر دارد. شکل ۱۲ تغییرات عدد استروهال بر حسب $\frac{y}{a}$ در امتداد عرضی مدل (عمود بر جهت جریان) در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در بازه حدود $-\frac{0.35}{a} < \frac{y}{a} < \frac{0.35}{a}$ ، عدد استروهال تغییرات زیادی داشته و با عدد استروهال نقاط دیگر تفاوت دارد که بیان‌کننده عدم وجود گردابه قوی در این منطقه است، به عبارت دیگر این ناحیه، ناحیه جدایش می‌باشد.

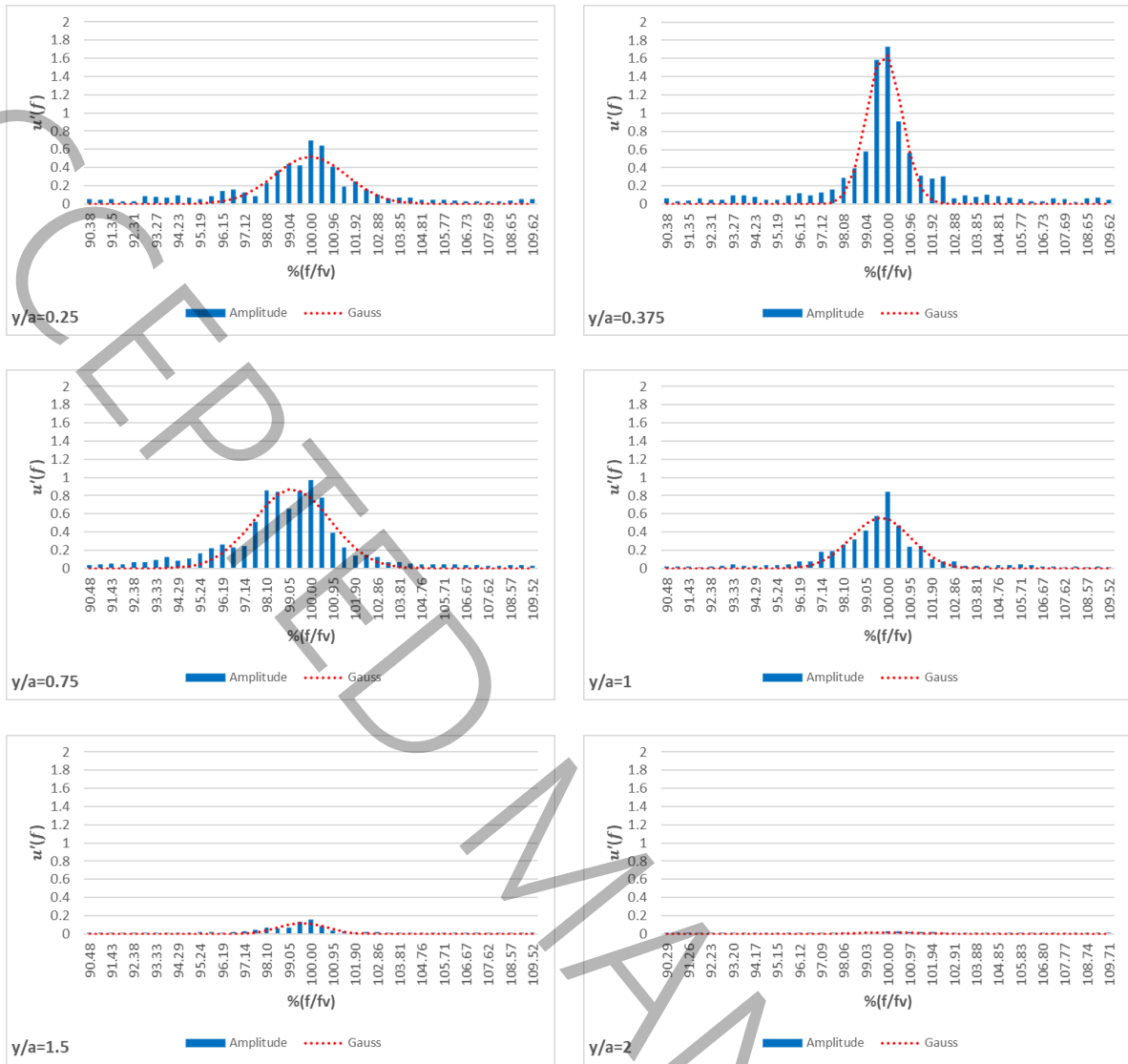


شکل ۱۲: تغییرات عدد استروهال بر حسب فاصله بی بعد شده $(\frac{y}{a})$ در $\frac{x}{a} = 2$ برای زوایای 0° و 60° و $Re = 6700$

Figure 12: Variations of the Strouhal number with the dimensionless distance $(\frac{y}{a})$ at $\frac{x}{a} = 2$ for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

شکل ۱۳، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد عرضی (در جهت عمود بر جریان) را نشان می‌دهد. این شکل نیز با استفاده از منحنی نرمال گاوس برازش شده است. مطابق شکل فوق، دامنه فرکانسی ریزش گردابه‌ها در ناحیه نزدیک دنباله، بیش تر می‌باشد و با دور شدن از آن، کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود.

- 1 Wake
- 2 Free Stream
- 3 Over Flow

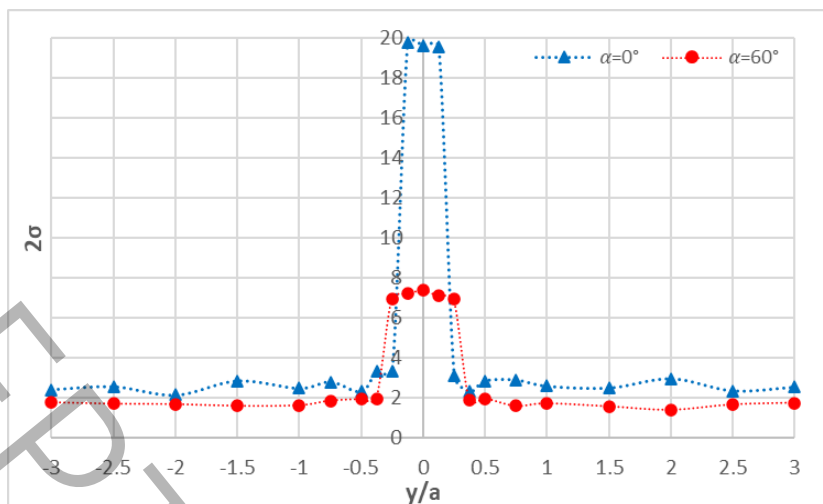


شکل ۱۳: طیف فرکانسی سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها و توزیع نرمال گاوس در امتداد عرضی در $\frac{x}{a} = 2$ برای زاویه 0° و $Re = 6700$

Figure 13: The spectrum of the vortex shedding frequency and the normal Gauss distribution in the lateral direction at

$$\frac{x}{a} = 2 \text{ for } 0^\circ \text{ flow angle and } Re = 6700$$

به منظور کمی‌سازی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، شکل ۱۴ مقدار 2σ که معرف سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد، را در امتداد عرضی نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق مقدار 2σ در فاصله $0.35 < \frac{y}{a} < 3$ و $-3 < \frac{y}{a} < -0.35$ ، برای مدل مثلی در زاویه 0° حدود $2/67$ و در زاویه 60° حدود $1/7$ بوده و تغییرات قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است اگر چه مقدار 2σ در این فاصله تغییر نمی‌کند ولی مطابق شکل ۱۳، قدرت ریزش گردابه‌ها با افزایش فاصله از مدل به شدت کاهش می‌یابد.

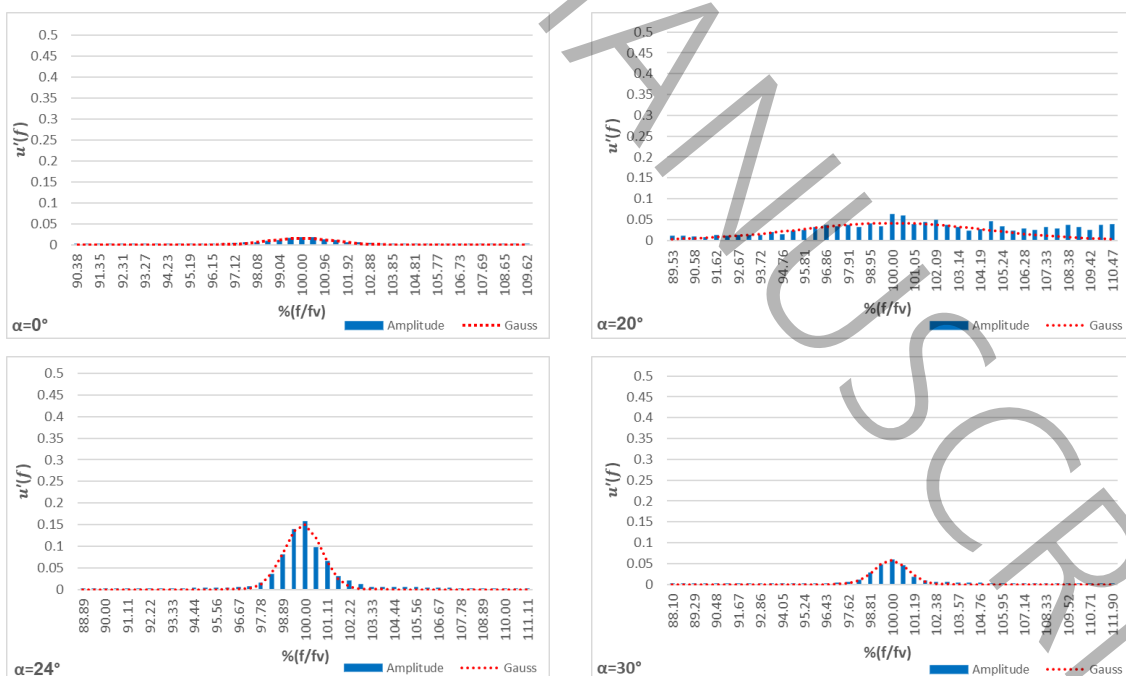


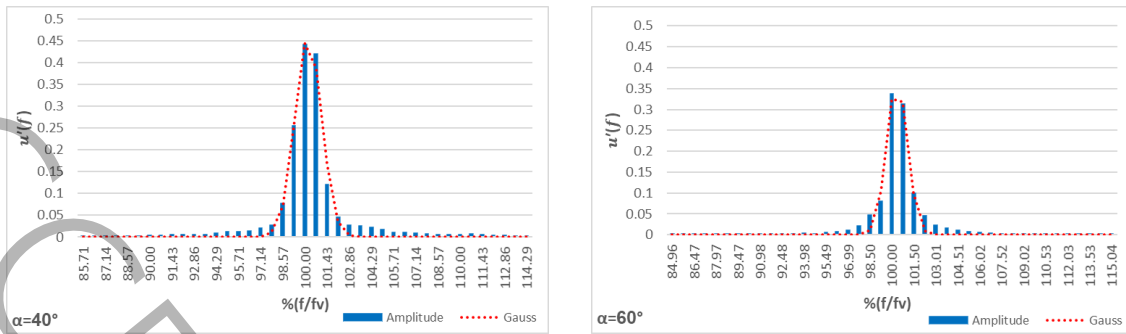
شکل ۱۴: مقدار 2σ پایین دست مدل در امتداد عرضی در $\frac{x}{a} = 2$ برای زوایای 0° ، 60° و $Re = 6700$

Figure 14: Value of 2σ downstream of the model in the lateral direction for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

۳-۵- بررسی تغییرات طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها با زاویه جریان

شکل ۱۵ طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ و عدد رینولدز 6700 در زاویه‌های مختلف را نشان می‌دهد که با منحنی نرمال گاوس برازش شده است. مطابق این شکل، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها هم از لحاظ دامنه و هم از لحاظ مقدار انحراف از معیار منحنی برازش شده گاوس (σ) در زوایای مختلف متفاوت می‌باشد.

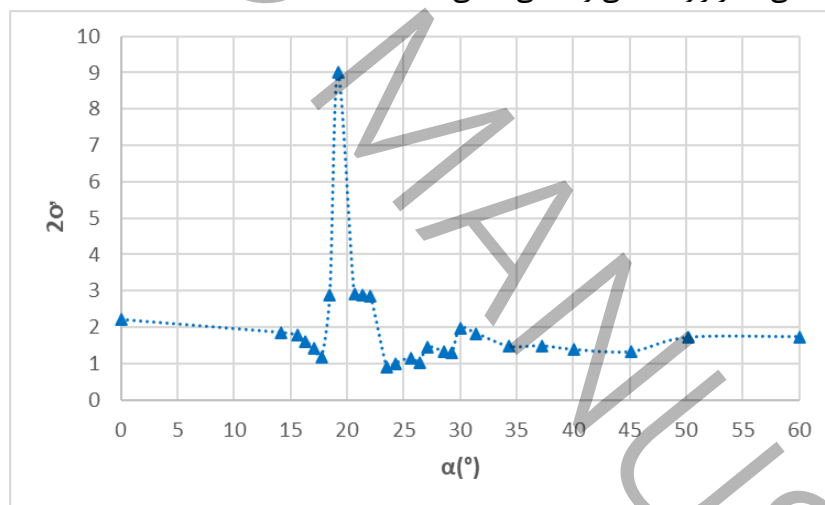




شکل ۱۵: طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل و توزیع نرمال گاوس در $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ برای زاویه‌های مختلف و $Re = 6700$

Figure 15: The spectrum of the vortex shedding frequency and the normal Gauss distribution at $(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2)$ for different flow angles and $Re = 6700$

شکل ۱۶ مقدار 2σ که بیان کننده سطح اطمینان ۹۵٪ است را در زاویه‌های مختلف جریان نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق، مقدار 2σ تا زاویه 18° کمتر از $2/2$ ٪ می‌باشد ولی در زوایای حدود 18° تا 23° این مقدار به حدود ۹٪ افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر با سطح اطمینان ۹۵٪، خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها در زوایای 18° تا 23° حدود ۹٪ می‌باشد. لذا قرار دادن مدل در این زاویه‌ها برای کاربردهایی نظیر زاویه‌سنجی و یا دبی‌سنجی مناسب نیست.



شکل ۱۶: مقدار 2σ بر حسب زاویه جریان در $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ و $Re = 6700$

Figure 16: Value of 2σ with flow angle at $(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2)$ and $Re = 6700$

۴- نتیجه‌گیری

بررسی و شناخت فرکانس ریزش گردابه‌های پایین دست مدل مثلثی و طیف فرکانسی آن دارای اهمیت بوده و می‌تواند دارای کاربردهایی در طراحی و ساخت دبی‌سنج از نوع گردابه‌ای باشد. در این مقاله، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل مثلثی به صورت تجربی بررسی شده و نتایج آن به شرح زیر بیان می‌شود:

عدد استروهمال ریزش گردابه‌ها برای اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۱۲۰۰، مستقل از عدد رینولدز بوده ولی به زاویه جریان هوا نسبت به مدل وابسته است. در زاویه 20° ، عدد استروهمال بیشترین مقدار خود (۰/۲۳) و در زاویه 60° (هنگامی که ضلع مثلث در مقابل جریان است) کمترین مقدار خود (۰/۱۳۵) را دارد. در این زاویه تغییرات عدد استروهمال نسبت به زاویه مدل کم بوده، لذا قرارگیری مدل در این زاویه، برای کاربرد دبی‌سنج از نوع گردابه‌ای مناسب است.

به منظور بررسی عدم قطعیت در اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، با استفاده از توزیع نرمال گاوس، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها برآزش شده و با در نظر گرفتن میزان سطح اطمینان و با استفاده از مقدار انحراف از معیار توزیع نرمال گاوس (σ) می‌توان عدم قطعیت و یا حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را مشخص کرد. برای مدل مثلثی که در زاویه 60° قرار دارد، با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها ۱/۵۳٪ و برای زاویه 0° این خطا حدود ۲/۴۶٪ می‌باشد. تکرار آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان انحراف (σ)، در زمان‌های مختلف در زاویه 60° حدود ۵٪ می‌باشد. ناحیه دنباله پایین‌دست مدل بر روی میزان انحراف از معیار طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها تأثیر دارد. با افزایش فاصله از مدل در

امتداد طولی، مقدار انحراف از معیار تا فاصله $\frac{x}{a} = 4$ برای زاویه 60° تغییرات زیادی نداشته و پس از آن افزایش می‌یابد.

تغییرات میزان انحراف از معیار طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها (σ)، در امتداد عرضی (جهت عمود بر جریان) ناچیز می‌باشد، ولی در ناحیه جدایش این تغییرات افزایش می‌یابد.

میزان انحراف از معیار طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها به زاویه جریان بستگی دارد. برای زاویه‌های $0^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$ و $60^\circ \leq \alpha \leq 23^\circ$ میزان انحراف از معیار ناچیز بوده و حدود ۰/۴۵ تا ۱/۱ می‌باشد. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها حدود ۰/۹٪ تا ۲/۲٪ خواهد بود، ولی در زوایای $18^\circ < \alpha < 23^\circ$ ، خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها تا حدود ۹٪ افزایش می‌یابد.

- [1] M. Ardekani, Air flow measurement in experimental fluid mechanics, Iranian Research Organization on Science and Technology, Iran, (2014). (in persian)
- [2] R.W. Miller, Flow measurement engineering handbook, United States: N. p., (1983). Web.
- [3] Y. Jinwen, Z. Yufei, C. Haixin, Flow Control Mechanisms of the Karman-Vortex Generator in Conical Diffuser Separation, 7TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS), (2017), 405-413.
- [4] J. Yang, Y. Zhang, H. Chen, S. Fu, Flow separation control in a conical diffuser with a Karman-vortex generator, Aerospace Science and Technology, 106 (2020) 106076.
- [5] S. Srikanth, A. Dhiman, S. Bijjam, Confined flow and heat transfer across a triangular cylinder in a channel, International Journal of Thermal Sciences, 49(11) (2010) 2191-2200.
- [6] A. Kumar De, A. Dalal, Numerical study of laminar forced convection fluid flow and heat transfer from a triangular cylinder placed in a channel, Journal of Heat transfer, 129(5) (2007).646-656.
- [7] J. Derakhshandeh, M.M. Alam, A review of bluff body wakes, Ocean Engineering, 182 (2019) 475-488.
- [8] O. Zeitoun, M. Ali, A. Nuhait, Convective heat transfer around a triangular cylinder in an air cross flow, International Journal of Thermal Sciences, 50(9) (2011) 1685-1697.
- [9] N. Agrwal, S. Dutta, B.K. Gandhi, Experimental investigation of flow field behind triangular prisms at intermediate Reynolds number with different apex angles, Experimental Thermal and Fluid Science, 72 (2016) 97-111.
- [10] S. Luo, M.G. Yazdani, Y. Chew, T. Lee, Effects of incidence and afterbody shape on flow past bluff cylinders, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 53(3) (1994) 375-399.
- [11] E. Ardekani, A. Teymourtash, M.A. Ardakani, Experimental Investigation on Flow Downstream of a Triangular Bluff Body at Different Angles, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(1 (Special Issue)) (2021) 427-436. (in persian)
- [12] M. Swaminathan, G. Rankin, K. Sridhar, A note on the response equations for hot-wire anemometry, (1986).
- [13] Z.Y. Ng, T. Vo, W.K. Hussam, G.J. Sheard, Two-dimensional wake dynamics behind cylinders with triangular cross-section under incidence angle variation, Journal of Fluids and Structures, 63 (2016) 302-324.
- [14] B. Forouzi Feshalami, S. He, F. Scarano, L. Gan, C. Morton, A review of experiments on stationary bluff body wakes, Physics of Fluids, 34(1) (2022).
- [15] F.E. Jørgensen, How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide, Dantec dynamics, 2001.
- [16] M. Ardekani, F. Farhani, Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures, Flow Measurement and Instrumentation, 20(4-5) (2009) 174-179.
- [17] V. Seshadri, The inverse Gaussian distribution: statistical theory and applications, Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] M. Ardekani, F. Farhani, A. Nourmohammadi, Experimental study of drag coefficient of multistrand wires using single normal hot-wire anemometer probe, Flow Measurement and Instrumentation, 50 (2016) 237-244.
- [19] M. Ardekani, Hot-wire calibration using vortex shedding, Measurement, 42(5) (2009) 722-729.

Experimental Investigation of the Frequency Spectra of Vortex Shedding from a Triangular Bluff Body at Different Flow Angles

Ehsan Ardekani, Foad Farhani, Mohammad Ali Ardekani¹

Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran-Iran

ABSTRACT

The base of the vortex flowmeter is the linear relationship $Q = kf$ (k is a constant and f is vortex shedding frequency). Therefore, the accuracy of the flow meter is only a function of the vortex shedding frequency measurement accuracy. To determine the frequency measurement accuracy, it is necessary to investigate its frequency spectrum. In this research, vortex shedding and its frequency spectrum downstream of an equilateral triangular model of 10 mm side have been investigated experimentally in a closed-type wind tunnel using a hot-wire anemometer. The vortex shedding frequency spectra were fitted using the normal Gauss distribution, and based on the expected confidence level, the accuracy of the frequency measurement was evaluated and its changes were quantified using the standard deviation of the normal distribution. Results show for $Re > 1200$, the Strouhal number variation is independent of the Re number, and it is only a function of the flow angle. Also, for a 95% confidence level, the maximum frequency measurement error for the triangular model is 1.53% for $\alpha = 60^\circ$, and 2.46% for $\alpha = 0^\circ$. The standard deviation of the frequency spectra has an increasing trend streamwise, however, it is constant spanwise outside the wake region. When the flow angle is in the range of $18^\circ < \alpha < 23^\circ$, the measurement error increases to about 9%.

KEYWORDS

Hot-wire anemometer, Strouhal number, Triangular model, Vortex flowmeter, Vortex shedding frequency spectrum

¹ Corresponding Author: Email: ardekani@irost.ir