

بررسی تجربی جریان هوا پایین دست مدل مثلثی در زوایای مختلف

احسان اردکانی^۱، علیرضا تیمورتاش^۱، محمد علی اردکانی^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۲۲

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۶-۲۹

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۱۰-۲۳

کلمات کلیدی:

ریزش گردابه‌ها

شدت اغتشاش‌ها

مدل مثلثی

جریان سنج سیم‌داغ

دبی‌سنج گردابه‌ای

خلاصه: پدیده ریزش گردابه‌ها از اجسام لبه‌پهن از جمله مدل مثلثی، از پدیده‌های مهم جریان سیالات است. با بررسی ریزش گردابه‌ها و جریان هوا در پایین دست مدل مثلثی می‌توان دبی‌سنج جریان هوا از نوع گردابه‌ای را طراحی نمود و یا دستگاه جریان سنج سیم‌داغ را در سرعت‌های پایین کالیبره نمود. در این مقاله توزیع سرعت جریان هوا، توزیع شدت اغتشاش‌های آن و ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع ۱۰ میلی‌متر بررسی شد، این تحقیقات با استفاده از تونل باد و دستگاه جریان سنج سیم‌داغ انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد زاویه جریان هوا تأثیر شدیدی بر توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن ندارد. ولی تغییرات عدد استروهل نسبت به زاویه جریان بالا می‌باشد، به طوری که عدد استروهل در زاویه ۲۰ درجه بیشترین مقدار را معادل ۰/۲۳ و در زاویه ۶۲ درجه کمترین مقدار را معادل ۰/۱۳۳ دارا می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد مناسب‌ترین زاویه برای استفاده در دبی‌سنج ۶۲ درجه می‌باشد. برای کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ نیاز است که علاوه بر اندازه‌گیری ریزش گردابه‌ها، سرعت جریان آزاد نیز اندازه‌گیری شود. در این حالت در صورتی که پراب در ناحیه $X/a = 2/5$ و $X/a \leq 5/2$ قرار گیرد، سرعت متوسط جریان هوا که به وسیله جریان سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری می‌شود، برابر سرعت جریان آزاد بوده و همچنین شدت اغتشاش‌های ناشی از مدل تأثیری بر اندازه‌گیری سرعت جریان هوا ندارد.

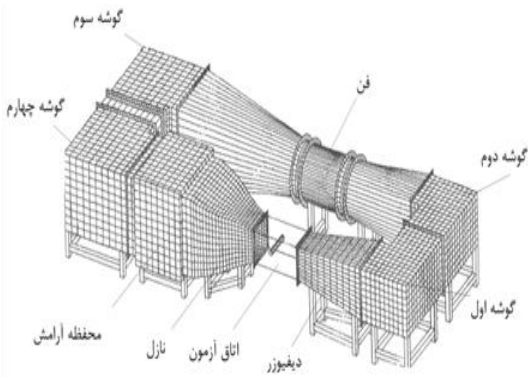
۱- مقدمه

پدیده ریزش گردابه‌ها از اجسام لبه‌پهن از جمله مدل مثلثی، از پدیده‌های مهم جریان سیالات می‌باشد. شناخت این پدیده اهمیت زیادی در سیالات دارد. ریزش گردابه‌ها سبب ارتعاش جسم شده و یا آن که سبب ارتعاش اجسام پایین دست می‌شود، لذا در سازه‌هایی که در معرض باد قرار دارند، اهمیت دارد. همچنین این موضوع پایه و اساس دبی‌سنج‌های گردابه‌ای نیز می‌باشد [۱]. با اندازه‌گیری ریزش گردابه‌های ناشی از اجسام لبه‌پهن می‌توان سرعت و در نتیجه دبی را اندازه‌گیری کرد. دبی‌سنج‌های گردابه‌ای از نوع دبی‌سنج‌های خطی هستند که مزیت این نوع دبی‌سنج‌ها دقت بالا، بازه اندازه‌گیری مناسب و قابلیت استفاده در سیالات مختلف و شرایط گوناگون از

لحاظ فشار است [۲]. مهم‌ترین خصوصیت این نوع دبی‌سنج این است که نیازی به کالیبراسیون مداوم ندارد. در این نوع دبی‌سنج، فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از جسم لبه‌پهن را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از آن سرعت و یا دبی جریان هوا را می‌توان اندازه‌گیری نمود. برای بررسی پدیده ریزش گردابه‌ها معمولا از عدد استروهل و $St=fa/U$ عدد رینولدز استفاده می‌شود. در این رابطه عدد استروهل $St=fa/U$ تعریف می‌شود که در آن a اندازه مشخصه جسم لبه‌پهن به عنوان مثال طول ضلع یک مثلث، U سرعت جریان آزاد و f فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌باشد. عدد رینولدز $Re=Ua/\nu$ تعریف می‌شود که ν لزجت سینماتیکی سیال است. از جمله کاربردهای اندازه‌گیری ریزش گردابه‌ها، کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ در سرعت‌های پایین است [۳].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ardekani@irost.ir





شکل ۱. نقشه شماتیک تونل باد

Fig.1. Schematic diagram of a close circuit wind tunnel

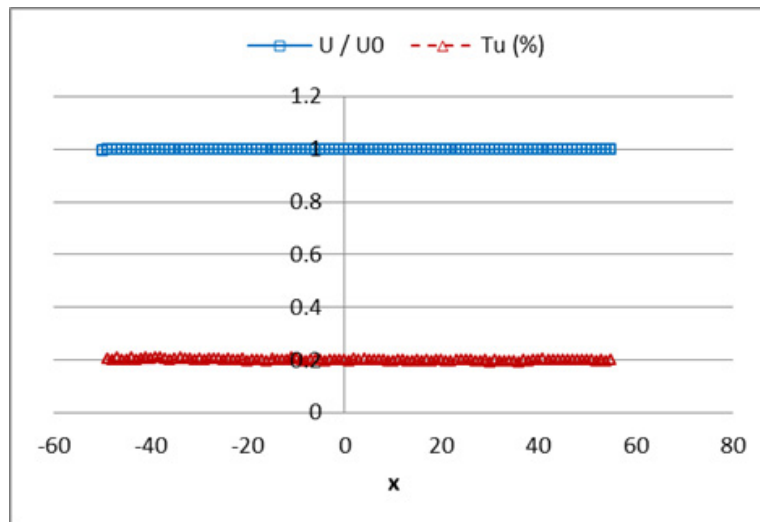
ارناب و همکاران [۶] جریان پایین دست مدل مثلث متساوی الساقین را در کانالی، به منظور بررسی انتقال حرارت جابجایی به صورت عددی در بازه عدد رینولدز $200 \leq Re \leq 80$ بررسی نمودند. نکته مهم در تحقیق آن‌ها تاثیر نسبت انسداد β (نسبت سطح مقطع مدل به سطح مقطع کانال) در بازه $33\% \leq \beta \leq 51\%$ بر روی ریزش گردابه‌ها می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که عدد رینولدز بحرانی (عدد رینولدزی که پس از آن ریزش گردابه‌ها جاری می‌شود) بستگی به نسبت انسداد دارد و با افزایش نسبت انسداد، عدد رینولدز بحرانی افزایش یافت و هنگامی که نسبت انسداد $8/5$ درصد است، عدد رینولدز بحرانی برابر 40 و هنگامی که نسبت انسداد 33 درصد است، عدد رینولدز بحرانی برابر 64 خواهد شد. همچنین فرکانس ریزش گردابه‌ها نیز بستگی به نسبت انسداد مدل به سطح مقطع کانال دارد. هنگامی که در عدد رینولدز 20 نسبت انسداد $0/33$ است، آن‌ها نتیجه گرفتند که عدد استروهمال برابر $0/25$ و هنگامی که نسبت انسداد $8/5$ درصد است، عدد استروهمال برابر $0/2$ می‌شود.

در این تحقیق جریان پایین دست مدل مثلثی شکل به صورت تجربی بررسی شده است. توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن و همچنین ریزش گردابه‌ها در زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن جهت کاربردهای دبی‌سنجی و یا کالیبراسیون جریان‌سنج سیم‌داغ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

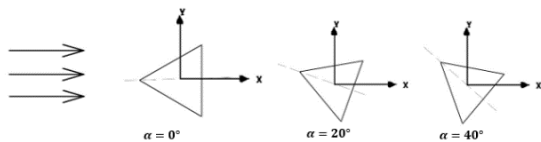
۲- روش آزمایش

کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه تونل باد پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شده است. تونل باد مورد

مدل مثلثی شکل از جمله اجسام لبه‌پهن غیرممتقارن می‌باشد که با بررسی جریان پایین دست آن و ریزش گردابه‌های ناشی از مدل، می‌توان علاوه بر بررسی فیزیک جریان، کاربردهای مختلف در صنعت و تحقیقات، از نتایج آن به دست آورد. در این ارتباط تحقیقات مختلفی انجام پذیرفته است. سریکانت و همکاران [۴] جریان پایین دست مدل مثلث متساوی الاضلاع و همچنین پدیده ریزش گردابه‌های ناشی از آن را به صورت عددی برای اعداد رینولدز کمتر از 80 بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند تغییرات عدد استروهمال برای اعداد رینولدز 50 تا 80 ، از $0/18$ تا $0/192$ است. و برای اعداد رینولدز کمتر از 50 ریزش گردابه‌ها گزارش نشده است. جوهانسون و همکاران [۵] جریان پایین دست مدل مثلث متساوی الساقین را در اعداد رینولدز بالا به صورت عددی بررسی نمودند و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. آن‌ها جریان برگشتی در ناحیه دنباله و همچنین افزایش سرعت محلی نسبت به سرعت آزاد را در نزدیکی مدل نشان دادند. کومار و دالال [۶] پدیده ریزش گردابه‌های پایین دست مدل مثلث متساوی الاضلاع را به صورت عددی و در اعداد رینولدز پایین بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند، هنگامی که زاویه مدل مثلث نسبت به جریان صفر است، در عدد رینولدز 50 ، عدد استروهمال $0/15$ بوده، با افزایش عدد رینولدز تا 250 ، عدد استروهمال مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند. لو و همکاران [۷] تاثیر نسبت انسداد بر روی عدد استروهمال ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلثی را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند هنگامی که نسبت انسداد از 20 درصد به 28 درصد افزایش می‌یابد، عدد استروهمال از $0/2$ به $0/28$ افزایش یافته، به عبارت دیگر عدد استروهمال 5 درصد افزایش می‌یابد. زیتون و همکاران [۸]، نرخ انتقال حرارت و همچنین جریان پایین دست مدل متساوی الاضلاع را در اعداد رینولدز کمتر از 200 به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند عدد رینولدز بحرانی برای مدل مثلثی شکل که راس آن در جلوی جریان قرار داده شده، برابر $38/04$ می‌باشد. به عبارت دیگر قبل از عدد رینولدز بحرانی، هیچ ریزش گردابه‌ای اتفاق نمی‌افتد. آن‌ها نشان دادند هنگامی که عدد رینولدز برابر 40 می‌شود، عدد استروهمال برای ریزش گردابه‌ها حدود $0/12$ شده که با افزایش عدد رینولدز تا حدود 120 ، عدد استروهمال تا حدود $0/2$ افزایش یافته و پس از آن ثابت می‌شود. همچنین نتایج نشان داد، هنگامی که ضلعی از مدل مثلثی در برابر جریان هوا قرار داده شود عدد رینولدز بحرانی آن برابر $34/8$ است.



شکل ۲. تغییرات سرعت بی‌بعد شده جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در امتداد اتاق آزمون $U=10.5\text{m/s}$
 Fig. 2. Variation of dimensionless mean velocity in terms of turbulence intensity at downstream at $U=10.5\text{m/s}$



شکل ۳. محور مختصات و زاویه چرخش مدل
 Fig. 3. Coordinate axis and model roll angle

اتاق آزمون، 0.2 درصد است؛ که در آن u' از اختلاف سرعت لحظه‌ای $(U(t))$ و سرعت متوسط (U) به دست می‌آید.

مدل مورد استفاده در این تحقیق به شکل مثلث به ضلع 10 میلی‌متر است. شکل ۳ محور مختصات و زاویه چرخش مدل را نشان می‌دهد. به منظور تغییر زاویه مدل از موتور پله‌ای استفاده می‌شود. شکل ۴ تصویر آن مدل، همراه با موتور پله‌ای و پراب جریان‌سنج سیم‌داغ را نشان می‌دهد که از طریق رایانه حرکت دورانی آن قابل کنترل است. میزان دوران موتور پله‌ای به ازای هر پالس 0.72 درجه می‌باشد. برای کالیبراسیون جریان‌سنج سیم‌داغ و اندازه‌گیری سرعت آزاد بالادست مدل از لوله استاتیکی پیتوت به همراه فشار سنج u^2 استفاده شده است. در این تحقیق در ابتدا مدل در زاویه صفر درجه قرار داده می‌شود که با استفاده از مکانیزم جابه‌جایی محل مناسبی که در آن فرکانس ریزش گردابه به وضوح دیده می‌شود را مشخص نموده و فرکانس ریزش گردابه‌ها در سرعت‌های مختلف و زاویه‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. سپس در سه فاصله $5/2$ ، $1/5$ ، $1/a=1$

استفاده از نوع مدار بسته می‌باشد، که سرعت آن با استفاده از کنترل دور از 2 تا 28 متر بر ثانیه قابل تنظیم است. شکل ۱ نقشه شماتیک تونل باد را نشان می‌دهد.

مقطع اتاق آزمون تونل باد $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ است. به منظور یکنواخت نمودن سرعت جریان هوا و کاهش اغتشاش‌های آن از 4 سری توری با مش 20 و 24 در اتاق آرامش، به همراه لانه زنبوری استفاده شده است

جریان پایین‌دست مدل با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ ساخت شرکت فرانسجش صبا اندازه‌گیری شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک‌بعدی می‌باشد. سیم پراب از نوع تنگستن با قطر 5 میکرون است. به منظور جابه‌جایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده پراب استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقت جا به جایی $1\text{mm}/0$ میلی‌متر 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 16bit به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار فلو-ویر^۲ تجزیه و تحلیل می‌شود.

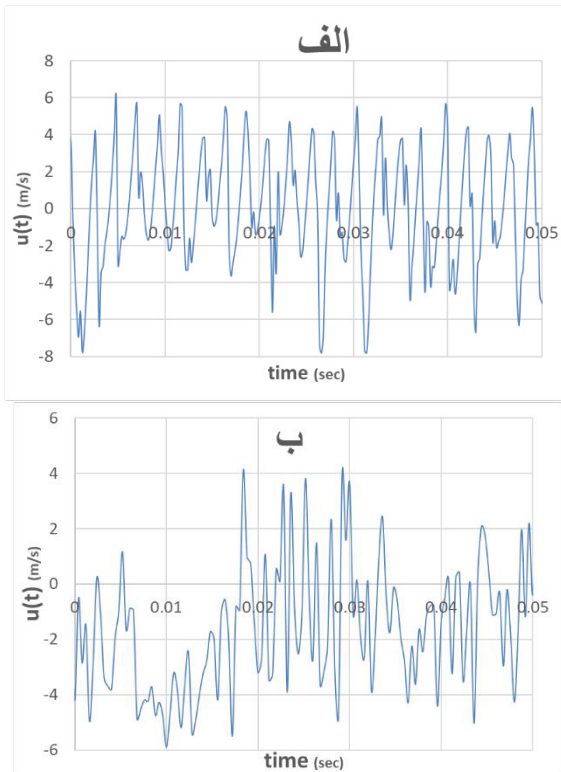
شکل ۲ تغییرات سرعت بی‌بعد شده و شدت اغتشاش‌های جریان، در خط مرکزی تونل باد و در امتداد جریان هوا را نشان می‌دهد. مطابق این شکل تغییرات سرعت در خط مرکزی تونل باد ناچیز بوده و مقدار شدت اغتشاش‌های تونل باد $(TU\% = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \times 100)$ در مرکز

1 National Instruments (NI)

2 Flow Ware



شکل ۴. مدل مثلثی متصل به موتور پله‌ای
Fig. 4. Triangular model connected to a stepper motor



شکل ۵. اسیلگرام سرعت لحظه‌ای در زاویه ۰ درجه و سرعت $U=20$ m/s
الف: $x/a=2, y/a=9/10, x/a=5/1$; ب: $y/a=9/10, x/a=2$
Fig. 5. Oscillogram of u -fluctuation velocity ($u(t)$) measured by downstream sensor at $U=20$ m/s, $\alpha=0^\circ$ a) $x/a=2, y/a=0.9$, b) $x/a=1.5, y/a=0$

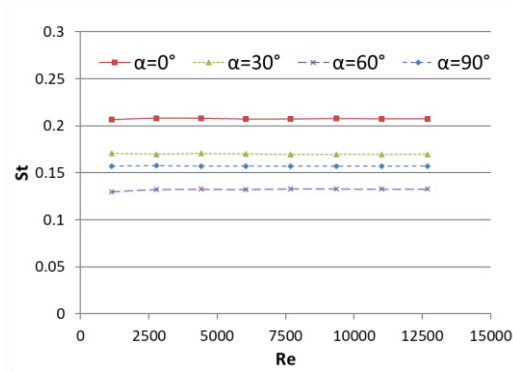
برای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌بایست سرعت لحظه‌ای را در حوزه فرکانس بررسی کرد. شکل ۶ فرکانس سرعت

جریان پایین دست مدل در سرعت‌های مختلف و زاویه‌های حساس اندازه‌گیری شده است.

۳- بررسی نتایج

۳-۱- بررسی ریزش گردابه‌ها

همان گونه که بیان شد به منظور اندازه‌گیری ریزش گردابه‌ها، نیاز است که پراب جریان سنج سیم‌داغ در مکان مناسبی نسبت به مدل قرار گیرد. لازم به ذکر است که اغتشاش‌های پایین دست مدل مثلثی، از ریزش گردابه‌ها و موارد دیگر از جمله ناپایداری جریان، جدایش و ... به وجود می‌آید که معمولاً اغتشاش‌های ناشی از ریزش گردابه‌ها، دارای فرکانس مشخصی بوده که باید با عدد استروهال هم‌خوانی داشته باشد ولیکن سایر اغتشاش‌ها معمولاً دارای فرکانس کمی بوده و به صورت طیفی نمایان می‌شود. شکل ۵-الف اسیلگرام سرعت لحظه‌ای جریان را در فاصله $(x/a=2, y/a=9/10)$ از مدل و شکل ۵-ب اسیلگرام سرعت لحظه‌ای جریان در فاصله $(x/a=1.5, y/a=0)$ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵-الف اسیلگرام سرعت لحظه‌ای نزدیک به موج سینوسی است، لذا در این نقطه پدیده ریزش گردابه‌ها به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۵-ب اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای در ناحیه دنباله مدل را نشان می‌دهد که در این حالت اسیلگرام سرعت لحظه‌ای به حالت سینوسی و یا نزدیک به آن نمی‌باشد، لذا در این نقطه نمی‌توان فرکانس ریزش گردابه‌ها را اندازه‌گیری نمود.



شکل ۸. منحنی تغییرات عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز در زاویه‌های مختلف مدل
Fig. 8. Variation of Strouhal number in terms of Reynolds number for triangular cylinder at different model angles

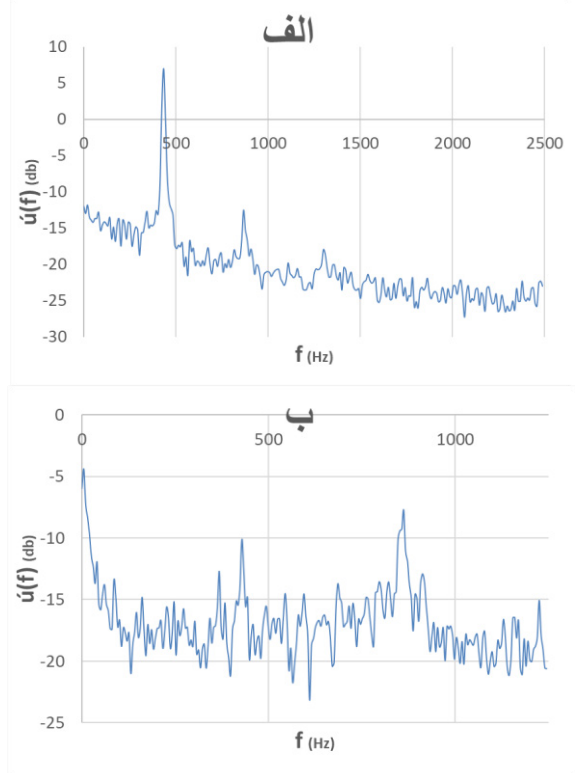
رعایت شده است. به عبارت دیگر فرکانس داده برداری $f=2f_m$ است. مطابق شکل ۶-الف، سرعت لحظه‌ای دارای فرکانس غالب ۴۳۳ هرتز بوده که به‌طور واضح و قدرت بیشتر نشان داده شده است.

این فرکانس غالب همان فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌باشد ولی در شکل ۶-ب فرکانس غالب به وضوح دیده نمی‌شود و اغتشاش‌های جریان ترکیبی از فرکانس‌های مختلف می‌باشد. با توجه به شکل ۶-الف فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلثی را می‌توان اندازه‌گیری نمود. شکل ۷ فرکانس ریزش گردابه‌ها را بر حسب سرعت در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد.

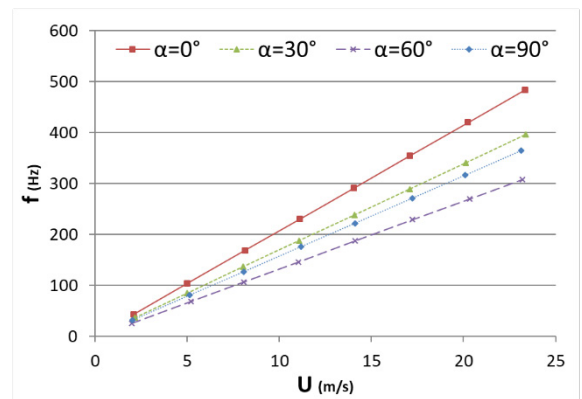
مطابق شکل ۷ رابطه فرکانس ریزش گردابه‌ها و سرعت جریان هوا به‌صورت خطی است. شیب این خطوط با زاویه جریان تغییر می‌کند. مطابق شکل فوق شیب فرکانس ریزش گردابه‌ها در زاویه ۰ درجه بیشتر از سه زاویه دیگر است. به منظور بررسی بهتر ریزش گردابه‌ها، شکل ۷ به‌صورت بی‌بعد بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از عدد استروهل، فرکانس ریزش گردابه‌ها و با استفاده از عدد رینولدز، سرعت جریان هوا بی‌بعد شده‌اند.

شکل ۸ منحنی $St-Re$ را برای مدل در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل زیر عدد استروهل برای اعداد رینولدز مختلف ثابت بوده و تابعی از آن نمی‌باشد. لذا با اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌توان به سادگی سرعت جریان هوا و دبی آن را محاسبه نمود.

عدد استروهل با زاویه جریان تغییر کرده ولی با عدد رینولدز ثابت است. هنگامی که مقدار عدد استروهل بزرگتر است، فرکانس ریزش



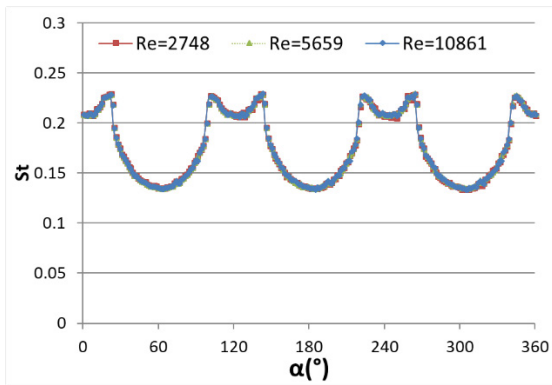
شکل ۶. سرعت لحظه‌ای در حوزه فرکانس در زاویه ۰ درجه و سرعت $U=20$ m/s
 الف: $U=20$ ، $x/a=2$ ، $y/a=0.9$ ؛ ب: $x/a=1.5$ ، $y/a=0$
Fig. 6. Oscillogram of the turbulence velocity ($u'(f)$) measured by downstream sensor at $U=20$ m/s, $\alpha=0^\circ$ a) $x/a=2$, $y/a=0.9$, b) $x/a=1.5$ $y/a=0$



شکل ۷. فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب سرعت در زاویه‌های مختلف
Fig. 7. Variation of frequency of vortex shedding in terms of velocity at different angles

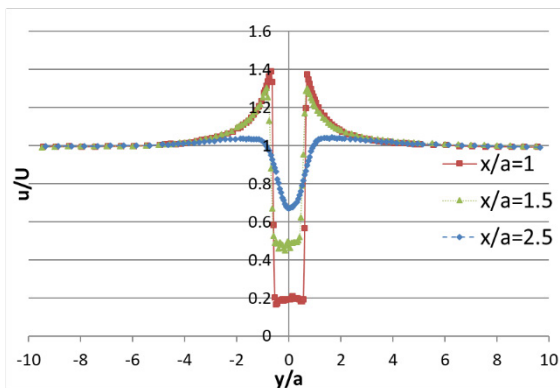
لحظه‌ای را در سرعت 20 m/s نشان می‌دهد. با انجام تبدیل سریع فوریه^۱ سرعت لحظه‌ای از حوزه زمان به فرکانس تبدیل می‌شود. در تبدیل سرعت لحظه‌ای از حوزه زمان به فرکانس اصل نایکویست

1 Fast Fourier Transform (FFT)



شکل ۹. منحنی تغییرات عدد استروهل بر حسب زاویه چرخش مدل در اعداد رینولدز مختلف

Fig.9. Variation of Strouhal number in terms of roll angle for triangular cylinder at different Reynolds numbers



شکل ۱۰. منحنی توزیع سرعت بی بعد شده جریان هوا در پایین دست مدل برای زاویه ۰ درجه در فواصل مختلف در عدد $Re=10861$

Fig. 10. The dimensionless mean velocity at downstream of the triangular cylinder at $Re=10861$, $\alpha=0^\circ$

جریان آزاد در فواصل $y/a = \pm 0.7$ است. با افزایش فاصله به پایین دست جریان این مقدار کاهش یافته و در $x/a = 2/5$ جریان دارای سرعت محلی بزرگتر از سرعت جریان آزاد نخواهد بود. همچنین با افزایش فاصله به سمت پایین دست، عمق ناحیه دنباله کوچکتر ولی پهنای آن افزایش می یابد. به طوری که در فاصله $x/a = 1$ کمترین سرعت در ناحیه دنباله برابر 0.19 در فاصله $x/a = 2/5$ برابر 0.67 است. همچنین پهنای ناحیه دنباله در $x/a = 1$ برابر $a/25$ و در $x/a = 2/5$ برابر $a/8$ است. با توجه به شکل ۹ مقدار بیشترین عدد استروهل در زاویه 20° درجه و کمترین آن در زاویه 62° درجه رخ می دهد. لذا در این دو زاویه، سرعت جریان هوا نیز بررسی می شود.

شکل ۱۱ توزیع سرعت جریان هوا را پایین دست مدل مثلثی در زاویه های 0° ، 20° و 62° درجه نشان می دهد. لازم به ذکر است، مطابق

گردابه ها، در سرعت ثابت بیشتر و در نتیجه دقت اندازه گیری دستگاه بالاتر می رود، ولی مشکلی که در این حالت ایجاد می شود این است که پاسخ فرکانسی دستگاه اندازه گیر ریزش گردابه ها می بایست کوتاه تر باشد تا بتواند این پدیده را اندازه گیری کند.

۳-۲- بررسی تأثیر زاویه مدل مثلثی بر ریزش گردابه ها

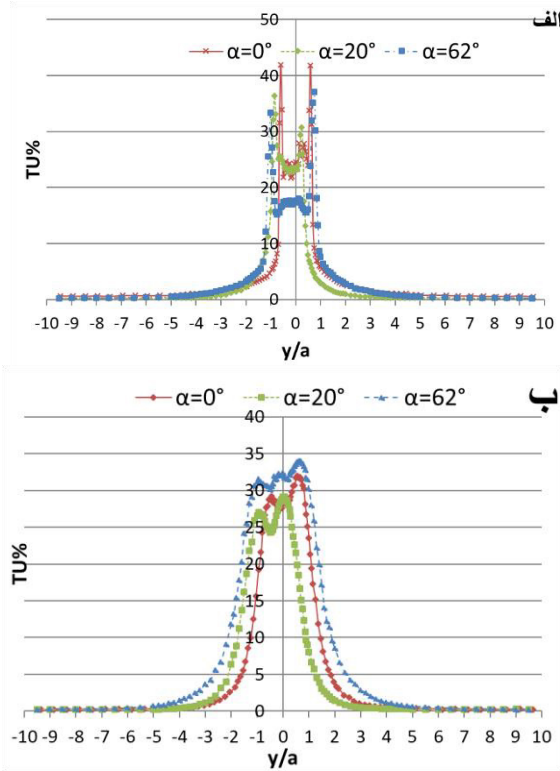
شکل ۷ تغییرات فرکانس ریزش گردابه ها بر حسب سرعت جریان را در زاویه های مختلف مدل نشان می دهد، که به صورت خطی است. مطابق شکل فوق شیب خطوط با زاویه مدل تغییر می کند. به منظور بررسی بهتر، شکل ۹ تغییرات عدد استروهل بر حسب زاویه مدل در اعداد رینولدز مختلف نشان داده می شود. علت تغییرات غیرخطی عدد استروهل نسبت به زاویه، تغییر سطح مقطع مدل در برابر جریان به صورت غیرخطی است.

مطابق شکل فوق منحنی های $St-\alpha$ در اعداد رینولدز مختلف بر روی یکدیگر منطبق می باشد. همان گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، تغییرات $St-\alpha$ برای هر 120° درجه تکرار شده است و هر تکرار نیز با یکدیگر تقارن دارند. کمترین مقدار عدد استروهل 0.133 بوده و در زاویه های 62° ، 182° و 302° درجه رخ می دهد و بیشترین مقدار عدد استروهل 0.23 بوده و در زاویه های 20° و 100° درجه اتفاق می افتد و این زاویه ها با دوره تناوب 120° درجه تکرار می شود. همچنین منحنی فوق نیز دارای مقدار کمینه نسبی در زاویه 120° درجه می باشد و این زاویه با دوره تناوب 120° درجه تکرار می شود. با توجه به شکل ۹ تغییرات عدد استروهل در ناحیه کمینه مقدار با زاویه جریان زیاد نبوده، لذا قرار دادن مدل در زاویه 62° درجه برای کاربرد دبی سنجی مناسب است.

۳-۳- بررسی جریان پایین دست مدل

به منظور بررسی مناسب تر ریزش گردابه ها، جریان در نزدیکی و پایین دست مدل در زاویه های حساس بررسی شد. شکل ۱۰ توزیع سرعت بی بعد شده جریان هوا در عرض مدل در فواصل مختلف در زاویه صفر درجه را نشان می دهد. سرعت جریان هوا با استفاده از سرعت آزاد بی بعد شده است.

مطابق شکل فوق در فاصله $x/a = 1$ جریان دارای سرعت محلی بزرگتر از سرعت جریان آزاد بوده و مقدار آن $1/38$ برابر سرعت

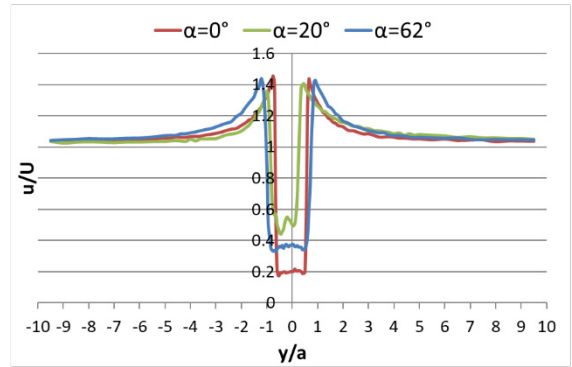


شکل ۱۳. منحنی توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست مدل در زوایای مختلف الف: $x/a=1$ ؛ ب: $x/a=2/5$ در عدد $Re=10861$
Fig. 13. The turbulence intensity at downstream of the triangular cylinder at different angles in $Re=1086$, a) $x/a=1$, b) $x/a=2.5$

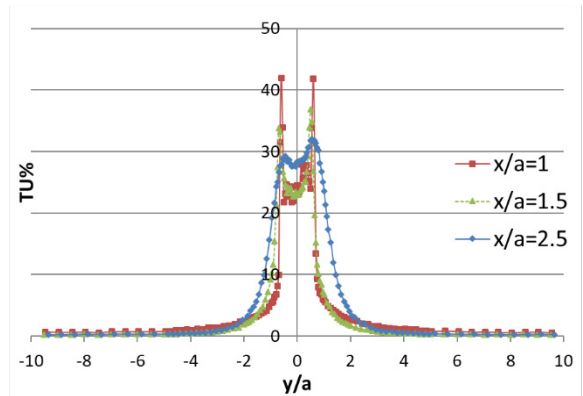
$$TU\% = \frac{\sqrt{(u')^2}}{v} \times 100 \text{ بیان می‌شود.}$$

هنگامی که $x/a=1$ است، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی مدل دارای دو مقدار بیشینه حدود ۴۲ درصد بوده که در فاصله $y/a=\pm 0.16$ قرار دارد. با افزایش فاصله از مدل شدت اغتشاش‌ها کاهش یافته و به تدریج دو مقدار بیشینه محو و تبدیل به یک مقدار بیشینه در مرکز می‌شود.

سوامیناتان و همکاران [۹] نشان دادند هنگامی که شدت اغتشاش‌ها ۳۰ درصد است، مقدار خطا در اندازه‌گیری سرعت با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ حدود ۵ درصد است. هنگامی که شدت اغتشاش‌ها کمتر از ۲ درصد باشد، این خطا ناچیز خواهد بود. اردکانی [۱۰] نشان داد در صورتی که بخواهیم جریان‌سنج سیم‌داغ را کالیبره نماییم، نیاز است که پراب در منطقه‌ای که شدت اغتشاش‌های آن در بازه $0.1 \leq U \leq 0.99$ و سرعت نیز در بازه $0.1 \leq U \leq 0.99$ باشد، قرار گیرد. با توجه به شکل ۱۲، هنگامی که $1 \leq x/a \leq 2/5$ است،



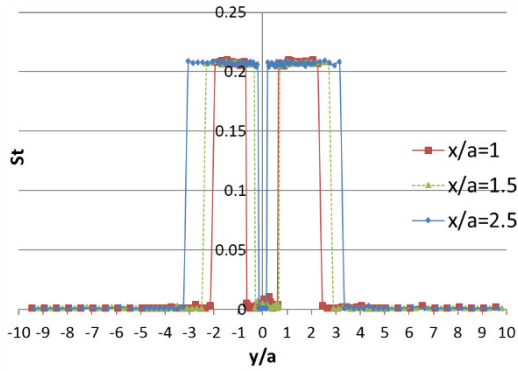
شکل ۱۱. منحنی توزیع سرعت جریان هوا در زوایای مختلف در $x/a=1$ و عدد $Re=10861$
Fig. 11. The dimensionless mean velocity at downstream of the triangular cylinder at different angles in $Re=1086$, $x/a=1$



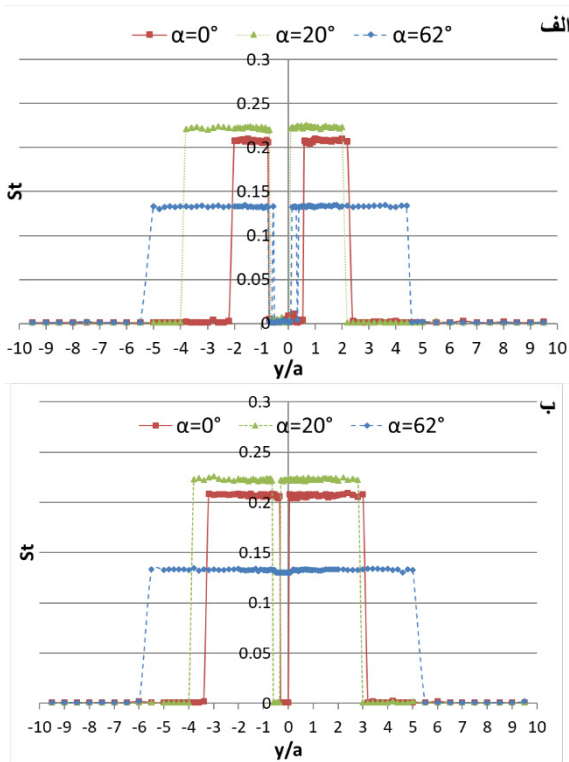
شکل ۱۲. منحنی توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست مدل مثلثی برای زاویه ۰ درجه در فواصل مختلف در عدد $Re=10861$
Fig. 12. The turbulence intensity at downstream of the triangular cylinder for $Re=10861$, $\alpha=0^\circ$

شکل ۹ در زاویه ۲۰ درجه عدد استروهل بیشترین و در زاویه ۶۲ درجه کمترین مقدار را دارد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، توزیع سرعت جریان هوا برای زوایای مختلف مشابه است. هنگامی که زاویه جریان ۰ و ۶۲ درجه است، مدل نسبت به محور مختصات تقارن داشته و در نتیجه توزیع سرعت نسبت به محور مختصات متقارن است، ولی توزیع سرعت برای زاویه ۲۰ درجه تقارن کامل ندارد. ناحیه دنباله برای حالتی که زاویه مدل ۰ درجه است، قوی‌تر بوده به طوری که سرعت محلی جریان حدود 0.2 سرعت آزاد است و برای زاویه ۶۲ درجه این مقدار 0.3 و برای زاویه ۲۰ درجه، 0.43 است.

شکل ۱۲ توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا پایین‌دست مدل در زاویه ۰ درجه را نشان می‌دهد. شدت اغتشاش‌ها با رابطه



شکل ۱۴. منحنی تغییرات عدد استروهال در پایین دست مدل برای زاویه ۰ درجه در فواصل مختلف در عدد $Re=10861$
 Fig. 14. The Strouhal number at downstream of the triangular cylinder at $Re=10861$, $\alpha=0^\circ$



شکل ۱۵. منحنی تغییر عدد استروهال در پایین دست مدل در زوایای مختلف مدل نسبت به جریان هوا در عدد $Re=10861$ الف: $x/a=1$ ب: $x/a=2.5$

Fig. 15. The Strouhal number at downstream of the triangular cylinder at different angles in $Re=10861$, a) $x/a=1$, b) $x/a=2.5$

با این تفاوت که ناحیه‌هایی که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری می‌باشد که برای زاویه ۰ به مقدار $0.3 \leq y/a \leq 3$ و 0.3 و $0.165 \leq y/a \leq 3$ ، برای زاویه ۲۰ درجه به مقدار $0.165 \leq y/a \leq 3$ و 0.165

در ناحیه‌ای که $y/a \geq 1/75$ و یا $y/a \leq -1/75$ باشد، شدت اغتشاش‌ها کمتر از ۶ درصد است، ولی با توجه به شکل ۱۰، هنگامی که $x/a=1$ در فاصله $y/a \geq 4$ و یا $y/a \leq -4$ و هنگامی که $x/a=2/5$ در فاصله $y/a \geq 2/5$ و یا $y/a \leq -2/5$ شرط سرعت محقق می‌شود.

شکل ۱۳-الف، توزیع شدت اغتشاش‌ها را برای مدل در زاویه‌های ۰، ۲۰ درجه (بیشترین عدد استروهال) و ۶۲ درجه (کمترین عدد استروهال) در فاصله $x/a=1$ و شکل ۱۳-ب در فاصله $x/a=2/5$ نشان می‌دهد. هنگامی که $x/a=1$ است، شدت اغتشاش‌های ناشی از مدل دارای دو مقدار بیشینه است. هنگامی که $x/a=2/5$ است و یا به عبارت دیگر در پایین دست جریان، ناحیه شدت اغتشاش‌ها از لحاظ عرضی برای سه زاویه فوق نسبت به حالت $x/a=1$ افزایش می‌یابد.

به منظور تشخیص مکان‌هایی که در آن ریزش گردابه‌ها اتفاق می‌افتد، منحنی تغییرات عدد استروهال در فواصل مختلف پایین دست مدل برای زاویه ۰ درجه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

هنگامی که $x/a=1$ است، در فاصله $0.18 \leq y/a \leq 2.1$ و $0.18 \leq y/a \leq 2.1$ عدد استروهال برابر ۰/۲۱ بوده و به عبارت دیگر فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری می‌باشد. با افزایش فاصله از مدل $x/a=2/5$ این ناحیه مقداری بزرگتر شده $0.12 \leq y/a \leq 3$ و $0.12 \leq y/a \leq 3$ خواهد بود.

شکل ۱۵-الف، منحنی تغییرات عدد استروهال پایین دست مدل و در عرض آن برای زاویه‌های ۰، ۲۰ و ۶۲ درجه در فاصله $x/a=1$ نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق هنگامی که زاویه مدل از ۰ به ۲۰ درجه تغییر می‌کند، عدد استروهال بزرگتر شده و ناحیه‌هایی که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری می‌باشد به مقدار $y/a \leq 2$ و $0.18 \leq y/a \leq -0.18$ افزایش می‌یابد. با توجه به این که مدل مثلی در زاویه ۲۰ درجه نسبت به محور مختصات نامتقارن است، مکان‌هایی که ریزش گردابه‌ها در آن مشاهده می‌شود نیز نامتقارن است. همچنین با تغییر زاویه مدل به ۶۲ درجه، عدد استروهال کوچکتر شده و ناحیه‌هایی که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری نیز می‌باشد، افزایش یافته و به ناحیه $0.125 \leq y/a \leq 4/6$ و $0.125 \leq y/a \leq 4/6$ محدود می‌شود.

شکل ۱۵-ب، منحنی تغییرات عدد استروهال پایین دست مدل و در عرض آن برای زاویه‌های ۰، ۲۰ و ۶۲ درجه در فاصله $x/a=2/5$ نشان می‌دهد. تغییرات عدد استروهال همانند حالت $x/a=1$

همچنین شدت اغتشاش‌ها متقارن است، ولی با افزایش فاصله عرضی این مقدار به شدت کاهش یافته به طوری که $y/a > 1/1$ مقدار شدت اغتشاش‌ها کمتر از ۶ درصد خواهد بود. در ناحیه $1 \leq x/a \leq 2/5$ و در فاصله $y/a \geq 1/75$ و یا $y/a \leq -1/75$ شدت اغتشاش‌ها کم‌تر از ۶ درصد خواهد بود. در این منطقه می‌توان پراب جریان‌سنج سیم‌داغ را جهت کالیبراسیون قرار داد، به طوری که اغتشاش‌های جریان در اندازه‌گیری تأثیری نداشته باشد.

-توزیع عدد استروهال برای حالتی که مدل در زاویه ۰ درجه قرار دارد، نسبت به محور مختصات متقارن بوده و در فاصله $0/2 \leq y/a \leq 3$ ثابت است و به عبارت دیگر فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری است.

-با توجه به نکات قبلی ارایه شده، برای طراحی دبی‌سنج جریان هوا از نوع گردابه‌ای و یا کالیبراسیون جریان‌سنج سیم‌داغ نیاز است که علاوه بر اندازه‌گیری ریزش گردابه‌ها، سرعت جریان آزاد نیز اندازه‌گیری شود، در این حالت در صورتی که پراب در ناحیه $x/a = 2/5$ و $2/5 \leq y/a \leq 5$ قرار گیرد، شدت اغتشاش‌ها کمتر از ۶ درصد، سرعت برابر سرعت جریان آزاد و گردابه‌ها نیز قابل اندازه‌گیری است.

نمادها

St عدد استروهال ($St = fa/U$)

Re عدد رینولدز ($Re = Ua/\nu$)

a طول ضلع مدل مثلثی

f فرکانس ریزش گردابه‌ها

ν لزجت سینماتیکی

x فاصله از مبدأ مختصات مدل در جهت جریان

y فاصله از مبدأ مختصات مدل در جهت عمود بر جریان و عمود بر محور مدل

بر محور مدل

f_m فرکانس دارای بیشترین دامنه

TU درصد شدت اغتشاش‌ها

u اغتشاش‌های طولی جریان هوا

u سزعت محلی جریان

U سرعت جریان آزاد

α زاویه جریان با مدل مثلثی

$a \leq y/a \leq 3/8$ و برای زاویه ۶۲ درجه به مقدار $5/2 \leq y/a \leq 5/2$ -افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی و شناخت جریان پایین‌دست مدل مثلثی دارای اهمیت در مکانیک سیالات بوده و می‌تواند دارای کاربردهایی در طراحی و ساخت دبی‌سنج از نوع گردابه‌ای و یا کالیبراسیون جریان‌سنج سیم‌داغ داشته باشد. در این مقاله، جریان پایین‌دست مدل مثلثی به صورت تجربی بررسی شده و نتایج آن به صورت خلاصه به شرح زیر ارایه می‌شود:

-با اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای و استفاده از روش تبدیل سریع فوریه می‌توان فرکانس ریزش گردابه‌ها را مشخص نمود. با توجه به این که اغتشاش‌های سرعت به صورت سینوسی به همراه نوساناتی است، لذا استفاده از شمارش قله‌ها برای به دست آوردن فرکانس ریزش گردابه‌ها پیشنهاد نمی‌شود. عدد استروهال ریزش گردابه‌ها برای اعداد بزرگ‌تر از ۱۰۰۰، مستقل از عدد رینولدز بوده و در زاویه ۰ درجه برابر ۰/۲۱ است.

-عدد استروهال وابسته به زاویه جریان هوا نسبت به مدل می‌باشد، در زاویه ۲۰ درجه، عدد استروهال بیشترین مقدار خود (۰/۲۳) را دارا بوده و در زاویه ۶۲ درجه کمترین مقدار خود (۰/۱۳۳) را دارا است. هنگامی که زاویه مدل نسبت به جریان هوا ۶۲ درجه می‌باشد، تغییرات عدد استروهال نسبت به زاویه مدل کم بوده، لذا این زاویه از مدل برای کاربرد دبی‌سنج از نوع گردابه‌ای مناسب است. -پروفیل سرعت در پایین‌دست مدل در زاویه‌های مختلف تقریباً مشابه بوده و در نزدیکی مدل علاوه بر ناحیه دنباله، سرعت محلی از سرعت جریان آزاد بیشتر است. هنگامی که $x/a = 1$ می‌باشد، سرعت جریان در فاصله $y/a \geq 4$ و یا $y/a \leq -4$ برابر سرعت جریان آزاد می‌باشد، ولی هنگامی که $x/a = 2/5$ است، در فاصله $y/a \geq 2/5$ و یا $y/a \leq -2/5$ سرعت جریان برابر سرعت جریان آزاد خواهد شد. لذا در ناحیه $2x/a \geq 1/5$ و $y/a \geq 2/5$ یا $y/a \leq -2/5$ ، سرعت جریان با سرعت جریان آزاد برابر بوده که مناسب قرار دادن پراب جریان‌سنج سیم‌داغ جهت کالیبراسیون است.

-توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا نشان می‌دهد، که در زاویه ۰ درجه، شدت اغتشاش‌ها تا حدود ۴۲ درصد افزایش یافته است.

- convection fluid flow and heat transfer from a triangular cylinder placed in a channel, *Journal of Heat Transfer*, 129(5) (2007) 646-656.
- [7] 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*, 53.399-375(1994)(3)
- [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] M. Swaminathan, G. Rankin, K. Sridhar, A note on the response equations for hot-wire anemometry, (1986).
- [10] M. Ardekani, Hot-wire calibration using vortex shedding, *Measurement*, 42(5) (2009) 722-729.
- [1] M.A. Ardekani, Air flow measurement in experimental fluid mechanics, Iranian Research Organization on Science and Technology, Tehran, 2014.
- [2] R.W. Miller, Flow measurement engineering handbook, (1983).
- [3] H.H. Bruun, Hot-wire anemometry: principles and signal analysis, in, IOP Publishing, 1996.
- [4] 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.
- [5] A. Johnstone, M. Uddin, A. Pollard, Calibration of hot-wire probes using non-uniform mean velocity profiles, *Experiments in Fluids*, 39(3) (2005) 527-534.
- [6] A. Kumar De, A. Dalal, Numerical study of laminar forced

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Ardekani, A. Teymoortash, M.A. Ardekani, *Experimental investigation on flow downstream of a triangular bluff body at different angles*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(Special Issue 1) (2021) 427-436.

DOI: 10.22060/mej.2020.16547.6387

