

# بررسی تجربی ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه بیضوی در نزدیکی صفحه تخت

محمدجواد ایزدی یزدی<sup>۱</sup> و عبدالامیر بک خوشنویس<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۵/۲۳)

## چکیده

ویژگی‌های جریان در اطراف یک استوانه بیضوی با نسبت محور  $AR=2$  قرار گرفته در نزدیکی یک صفحه تخت به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. استوانه بیضوی در داخل و خارج از یک لایه مرزی آشفته که ضخامتش  $0.38B$  برابر ارتفاع سطح مقطع استوانه می‌باشد ( $\delta=0.38B$ )، قرار گرفته است. اعداد رینولدز بر اساس ارتفاع سطح مقطع استوانه،  $15,000$  و  $30,000$  می‌باشند. اندازه‌گیری سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها زمانی که دنباله استوانه بیضوی با لایه مرزی ایجاد شده بر روی یک صفحه تخت تداخل می‌کند، با استفاده از جریان سنج سیم داغ ثابت انجام شده است. در ناحیه نزدیک دنباله، پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها وابسته به نسبت فاصله  $(G/B)$  و عدد رینولدز  $(Re)$  می‌باشند. مشخص شد که تداخل دنباله و لایه مرزی به جز در  $G/B=0.1$ ، در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  سریع‌تر رخ می‌دهد. تداخل دنباله با لایه مرزی در مؤلفه نوسانی سرعت نسبت به سرعت متوسط سریع‌تر می‌باشد. با افزایش نسبت فاصله، ضریب پسا استوانه کاهش می‌یابد که مقدار کاهش ضریب پسا در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر است. نتایج نشان می‌دهند که عدد استروهال با افزایش نسبت فاصله، افزایش می‌یابد و تقریباً مستقل از  $\delta/B$  است. ناحیه دنباله پشت استوانه بیضوی نسبتاً کوچک است و پروفیل‌های سرعت تمایل دارند که به سرعت به لایه مرزی صفحه تخت برسند.

**واژه‌های کلیدی:** تداخل دنباله و لایه مرزی، استوانه بیضوی، عدد استروهال، ضریب پسا، جریان سنج سیم داغ

## Experimental Investigation of Flow Characteristics around an Elliptic Cylinder Near a Flat Plate

M.J. Ezadi Yazdi and A.A. Bak Khoshnevis

Mechanical Engineering Department  
Hakim Sabzevari University

(Received:26/January/2016; Accepted:13/August/2016)

### ABSTRACT

The flow characteristics around an elliptic cylinder with an axis ratio of  $AR=2$  located near a flat plate were investigated experimentally. The elliptic cylinder was located on the inside and outside a turbulent boundary layer region whose thickness ( $\delta$ ) is  $0.38B$ . The Reynolds numbers based on the height of the cylinder cross-section were 15000 and 30000. Measurements of mean velocity and turbulence intensities have been made using the hot-wire anemometry when the wake of elliptic cylinder interact with the boundary layer on a flat plate. In the near-wake region, streamwise mean velocity profiles and turbulence intensities were strongly dependent on gap ratio  $(G/B)$  and Reynolds number  $(Re)$ . It is found that, wake and boundary layer interaction except in  $G/B=0.1$ , at Reynolds number of 30000 is faster than the 15000. The wake-boundary layer interaction at fluctuating velocity quantities begins earlier than the mean velocity. As the gap ratio increases, the drag coefficient of the cylinder itself decreases, which the decrease value of the drag coefficient at Reynolds number of 30000 is more than the 15000. The results show that the Strouhal number by increasing the gap ratio increases and nearly independent of  $\delta/B$ . The wake region behind the elliptic cylinder is relatively small and the velocity profiles tend to approach rapidly to those of a flat plate boundary layer.

**Keywords:** Wake-Boundary Layer Interaction, Elliptic Cylinder, Strouhal Number, Drag Coefficient, Hot-Wire Anemometry

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: javadezadi2013@yahoo.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): khoshnevis@hsu.ac.ir

## فهرست علائم و اختصارات

$A$	قطر بزرگ استوانه بیضوی، mm
$AR = A/B$	نسبت محوری استوانه
$B$	قطر کوچک استوانه بیضوی، mm
$G$	فاصله‌ی شکاف بین انتهای استوانه و صفحه تخت، mm
$G/B$	نسبت فضای خالی
$P_{s,e}$	فشار استاتیک، pa
$P_{s,w}$	فشار استاتیک، pa
$q_\infty$	فشار دینامیکی جریان آزاد، pa
$Re$	عدد رینولدز
$St$	عدد استروهل
$U$	سرعت محلی، m/s
$U_{ref}$	سرعت جریان آزاد، m/s
$u_{r,m,s}$	مربع نوسانات سرعت، m/s
$u',v',w'$	سرعت‌های نوسانی در جهت‌های x, y, z و m/s
$\rho'$	چگالی نوسانی، kg/m <sup>3</sup>
$\tau_{xx}$	تنش برشی، N/m <sup>2</sup>
$\mu$	لزجت دینامیکی، kg/ms
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$ref$	مقدار کمیت‌ها در جریان آزاد
$\infty$	مقدار کمیت‌ها در جریان آزاد

## علائم یونانی

## زیرنویس

## ۱- مقدمه

جریان حول اجسام پهن به علت اهمیت آموزشی و کاربردی گسترده، به‌وفور مورد بررسی قرار می‌گیرند. به‌ویژه گردابه تشکیل شده پشت استوانه دایره‌ای توسط پژوهشگران زیادی به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. علت فراوانی مطالعات در این زمینه، هندسه ساده و تشکیل جریان گردابی متناوب می‌باشد. جهت تعمیم مسئله مذکور، بررسی جریان حول یک استوانه دایره‌ای واقع در نزدیکی یک صفحه تخت به‌وفور مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات می‌تواند بر روی مسائل مهندسی بسیاری نظیر خطوط لوله زیردریا، سازه‌های ساختمانی و ازدیاد انتقال حرارت در مبدل حرارتی به کار رود. برهم‌کنش (تداخل) لایه‌مرزی حول یک صفحه تخت و گردابه استوانه را می‌توان از دو منظر بررسی نمود:

- ۱- بررسی اثر حضور یک استوانه در لایه‌مرزی آشفته اطراف سطح صاف به‌نحوی که جریان در لایه‌مرزی آشفته توسط استوانه کنترل گردد و
- ۲- بررسی اثر پروفیل‌های لایه‌مرزی بر جریان گذرنده از استوانه.

موریمو<sup>۱</sup> و همکاران [۱] توزیع لایه‌مرزی توسط استوانه را به-ازای مقادیر مختلف نسبت فضای خالی بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که نواحی داخلی (نزدیک صفحه مسطح) لایه‌مرزی سریع‌تر از نواحی بیرونی بازیابی می‌شوند. آن‌ها همچنین نتیجه‌گیری نمودند که نوسانات سرعت، سریع‌تر از سرعت متوسط بازیابی می‌شوند. بیرمن و زدراکوویچ<sup>۲</sup> [۲] به اندازه‌گیری توزیع فشار و تشکیل گردابه به‌ازای مقادیر مختلف نسبت فضای خالی استوانه دایره‌ای واقع در یک لایه‌مرزی به ضخامت ۰/۸ برابر قطر استوانه پرداختند. آن‌ها گزارش نمودند که به‌ازای مقادیر کوچک‌تر از یک نسبت فضای خالی بحرانی (۰/۳)، تشکیل گردابه دارای یک مقدار محدود بوده و به‌ازای مقادیر بزرگ‌تر از یک نسبت فضای خالی بحرانی، عدد استروهل (St) تقریباً ثابت می‌ماند. انگریلی<sup>۳</sup> و همکاران [۳] به بررسی اثر جداره بر فرکانس تشکیل گردابه در اعداد رینولدز زیر بحرانی در یک لایه‌مرزی با ضخامت ۰/۲۵ برابر قطر استوانه پرداختند. آن‌ها نتیجه‌گیری نمودند که با نزدیک شدن استوانه به جداره، فرکانس تشکیل گردابه افزایش می‌یابد. تانیگوشی و میاکوشی<sup>۴</sup> [۴] به منظور بررسی اثر ضخامت لایه‌مرزی بر نسبت بحرانی فضای خالی، به اندازه‌گیری توزیع فشار و نیروهای نوسانی اعمال شده از طرف سیال بر استوانه دایره‌ای واقع در نزدیکی یک جداره مسطح پرداختند. آن‌ها نتیجه‌گیری نمودند که عدد استروهل تقریباً مستقل از ضخامت لایه‌مرزی بوده و دارای مقدار تقریبی ۰/۲ می‌باشد.

تولاپورکارا<sup>۵</sup> و همکاران [۵] به بررسی تجربی تداخل بین لایه‌مرزی و دنباله‌های اجسام مختلف پرداختند. اندازه‌گیری سرعت متوسط و تنش‌های رینولدز زمانی که دنباله یک ایرفویل NACA۰۰۱۲ و یک استوانه مستطیلی با لایه‌مرزی ایجاد شده بر روی یک دیواره تخت تداخل می‌کند، انجام دادند.

1- Marumo  
2- Bearman and Zdravkovich  
3- Angrilli  
4- Taniguchi and Miyakoshi  
5- Tulapurkara

اعمال فرضیات منطقی به معادله برنولی تبدیل کردند. همچنین، معادله همبولدرز برای محاسبه شیب ضریب برآ باله در اثر زمین با تعریف نسبت منطقی معادل ( $AR_e$ ) بسط داده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که روش پیشنهادی، زمان محاسبات را در مقایسه با شبیه‌سازی عددی سایر محققین به‌میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

اونگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی شبیه‌سازی عددی جریان اطراف یک استوانه دایره‌ای در نزدیکی بستر دریا در اعداد رینولدز بالا با استفاده از مدل k-ε پرداختند. اثرات نسبت فاصله به قطر ( $G/D$ )، عدد رینولدز و زبری بستر دریا بررسی شد. مقادیر هیدرودینامیکی و مکانیزم تشکیل گردابه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که رویکرد حاضر برای اهداف طراحی در اعداد رینولدز بالا در نزدیکی بستر در اقیانوس واقعی مناسب می‌باشد.

هوانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۱۱] به بررسی تجربی ویژگی‌های جریان اطراف مرز یک استوانه دایره‌ای که به‌صورت عمودی بر روی یک صفحه تخت نصب شده بود، پرداختند. آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های مرئی سازی مسیر ذرات جریان و تصویربرداری از ذرات سیال در یک تانکر آب انجام شد. اعداد رینولدز مورد بررسی از ۵۰۰ تا ۶,۰۰۰ بودند. الگوهای جریان را با استفاده از بردارهای سرعت مشخص کردند و خطوط جریان به‌منظور بررسی ویژگی‌های جریان بحث شد. آن‌ها همچنین ویژگی‌های ناپایداری دنباله در نزدیکی مرز را ارائه دادند. چهار حالت مشخصه جریان (تک‌گردابه، دوگردابه، سه‌گردابه و گردابه ناپایدار) ناشی از جدایش لایه‌مرزی در منطقه بالادست، در نزدیکی مرز مشاهده کردند.

سارکار و سارکار<sup>۵</sup> [۱۲] به بررسی تداخل دنباله و لایه‌مرزی پشت یک استوانه دایره‌ای با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداختند. نتایج برای سه نسبت شکاف به قطر مختلف ( $G/D$ )، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ (که در آن  $G$  نشان‌دهنده فضای خالی بین صفحه تخت و استوانه و  $D$  قطر استوانه می‌باشد) انجام شد. مشاهده شد که نسبت  $G/D$ ، تأثیر زیادی بر روی تغییر دینامیک دنباله و تغییر شکل لایه‌مرزی دیواره دارد.

نتایج آن‌ها نشان داد که برای پسای یکسان، تداخل دنباله و لایه‌مرزی در استوانه مستطیلی نسبت به ایرفویل سریع‌تر است. تولاپورکارا و همکاران [۶] به بررسی تجربی تداخل دنباله و لایه‌مرزی در معرض انحناهای محدب، مقعر و گردایان فشار معکوس پرداختند. اندازه‌گیری‌های سرعت متوسط و مقادیر آشفتگی زمانی که دنباله یک ایرفویل متقارن با لایه‌مرزی بر روی (۱) دیواره‌هایی با دیفیوزر مستقیم/مجرای مستقیم (۲) دیواره‌های محدب و مقعر با دیفیوزر منحنی و مجرای منحنی تداخل می‌کند، انجام شد. اثرات گردایان فشار معکوس و انحناها بر روی تداخل به‌طور جداگانه و در حالت ترکیبی مطالعه شد. اندازه‌گیری‌ها در شش حالت مختلف یعنی، (۱) بدون گردایان فشار و اثرات انحناء (۲) با گردایان فشار معکوس و بدون انحناء (۳) و (۴) انحنای محدب با گردایان فشار صفر و گردایان فشار معکوس (۵) و (۶) انحنای مقعر با گردایان فشار صفر و گردایان فشار معکوس انجام شد. نتایج نشان داد که اثر انحناء باعث عدم تقارن دنباله می‌گردد و در ترکیب با گردایان فشار معکوس، عدم تقارن افزایش یافت. مشاهده کردند که گردایان فشار معکوس تداخل دنباله با لایه‌مرزی را سریع‌تر می‌کند. ترکیب گردایان فشار معکوس با انحنای مقعر تداخل را سریع‌تر می‌کند.

بررسی عددی آیرودینامیک و فیزیک جریان یک ایرفویل NACA۴۴۱۲ در اثر زمین برای محدوده وسیعی از زاویه حمله از ۴- تا ۲۰ درجه توسط کیو<sup>۱</sup> و همکاران [۷] انجام شد. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای زاویه‌های کم تا متوسط، زمانی که ارتفاع چرخش کاهش یافته است، جریان هوا در مجرای همگرای بین سطح پایینی ایرفویل و زمین مسدود شده که منجر به افزایش فشار بر روی سطح پایینی ایرفویل می‌شود.

سو<sup>۲</sup> و همکاران [۸] به بررسی تجربی و عددی عملکرد آیرودینامیکی یک باله نازک در نزدیکی زمین پرداختند. تأثیر پارامترهای طراحی، از قبیل زاویه حمله، نسبت منطقی و زاویه تاب را بررسی کردند و با نتایج تجربی و عددی دیگر محققان مقایسه نمودند.

توکلی و سیف [۹] یک روش عملی برای بررسی آیرودینامیکی و پایداری استاتیک طولی اثر باله بر زمین ارائه دادند. معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز را با

3- Ong

4- Huang

5- Sarkar and Sarkar

1- Qu

2- Suh

تداخل لایه‌مرزی و دنباله استوانه بیضوی بر فرآیند تشکیل گردابه و ریزش گردابه تأثیر زیادی دارد.

وانگ و تان<sup>۵</sup> [۱۷] به بررسی تجربی ویژگی‌های جریان در دنباله نزدیک یک استوانه دایره‌ای قرار گرفته در نزدیکی یک لایه مرزی کاملاً آشفته به ضخامت ۰/۴ برابر قطر استوانه با استفاده از روش تصویربرداری از ذرات سیال پرداختند. میدان‌های سرعت و گردابه در منطقه دنباله برای نسبت فضای خالی از ۰/۱ تا ۱ را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که برخی از ویژگی‌های جریان، شامل عدد استروهال و سرعت جابجایی گردابه‌های جدا شده تقریباً ثابت باقی می‌مانند و مستقل از S/D می‌باشند.

امین و کانتیداس<sup>۶</sup> [۱۸] به بررسی عددی تداخل دنباله ناپایدار یک استوانه بیضوی و لایه‌مرزی صفحه تخت پرداختند. نسبت محور استوانه بیضوی ۱/۶۷ با زاویه حمله صفر درجه در نظر گرفته شد. بررسی‌ها در عدد رینولدز ۵۰۰ انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که گردابه‌های دنباله به شدت بر لایه‌مرزی تشکیل شده حول صفحه تخت اثر می‌گذارد.

نیروی [۱۹] به بررسی شبیه‌سازی عددی جریان آشفته حول یک استوانه با سطح مقطع مربعی در نزدیکی یک سطح مسطح با استفاده از روش PANS k-ε پرداخت. عدد رینولدز ۱۳,۲۰۰ بود. نتایج او نشان داد که برای جریان پایا، روش PANS عملکرد بسیار خوبی دارد و در حالت ناپایا دقتی برابر رهیافت PANS نشان داد.

سارکار و سارکار [۲۰] به بررسی عددی جریان گذرنده از استوانه‌های دایره‌ای (نسبت محوری AR=۱) و بیضوی با نسبت‌های محوری متفاوت (۴ و ۳,۲) در نزدیکی دیواره برای یک نسبت شکاف به قطر ثابت، ۵/۰ با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداختند. تلاش کردند تا یک درک فیزیکی از جریان شامل تداخل‌های لایه برشی جدا شده از استوانه و لایه‌مرزی دیواره انجام گیرد. مشاهده کردند که هر دو استوانه (دایره‌ای و بیضوی) و نسبت G/D، تأثیر زیادی بر تغییرات دینامیک دنباله و لایه‌مرزی دیواره دارند.

وانگ و تان [۲۱] به بررسی تجربی مقایسه الگوهای جریان دنباله در دنباله نزدیک یک استوانه دایره‌ای و مربعی قرار گرفته در نزدیکی دیواره صفحه با استفاده از روش تصویربرداری ذرات سیال پرداختند. اثرات تغییر ارتفاع شکاف (S) در محدوده

توپولوژی جریان اطراف یک آئینه کامیون به منظور کاهش پسا توسط بلوم<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها آئینه کامیون را با قراردادن یک استوانه دایره‌ای در نزدیکی لبه ابتدایی یک جسم پهن مدل‌سازی کردند. از روش تصویربرداری از ذرات سیال به منظور اندازه‌گیری میدان سرعت جریان استفاده کردند و پس از آن داده‌ها را با استفاده از روش‌های آماری و میانگین‌گیری زمانی تجزیه و تحلیل کردند. استوانه در دو موقعیت مختلف نسبت به لبه ابتدایی جسم پهن قرار داده شد. همچنین، فاصله بین هندسه‌ها متفاوت بود که به صورت G/D نشان داده شد. نتایج نشان داد که با افزایش G/D، عدد استروهال افزایش می‌یابد.

چوی و لی<sup>۲</sup> [۱۴] به صورت تجربی ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه بیضوی با نسبت محور AR=۲ که در نزدیکی یک صفحه تخت قرار گرفته را مورد مطالعه قرار دادند. استوانه بیضوی در یک لایه‌مرزی آشفته که ضخامتش از ارتفاع استوانه بیش تر بود، تعبیه شد. آن‌ها به مطالعه تداخل بین دنباله استوانه و لایه‌مرزی پرداختند. نتیجه گرفتند که ضریب پسای استوانه بیضوی در حدود نصف ضریب پسا در استوانه دایره‌ای است.

میکلیس و کوتسونایس<sup>۳</sup> [۱۵] به بررسی تجربی تداخل یک استوانه خارج از سطح با جریان جدا شده از لبه ابتدایی یک جسم پهن با استفاده از روش تصویربرداری از ذرات سیال پرداختند. آزمایش‌ها در عدد رینولدز ۱۰<sup>۴</sup> × ۲/۶ انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که موقعیت در جهت جریان استوانه نسبت به لبه ابتدایی جسم پهن اثرات قابل توجهی بر روی توپولوژی جریان میانگین و دینامیک تشکیل گردابه دارد.

کوالهیرو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی جریان گذرنده از یک استوانه بیضوی با نسبت محور ۲/۵ در نزدیکی صفحه تخت پرداختند. آزمایش‌ها در یک تونل هیدرودینامیکی عمودی با اغتشاشات پایین برای اعداد رینولدز تا ۲,۰۰۰ انجام شد. از روش مرئی‌سازی جریان به منظور شناسایی جدایش لایه‌مرزی، منطقه چرخشی، فرآیند ریزش گردابه و دیگر ساختارهای جریان استفاده کردند. همچنین اندازه‌گیری‌های جریان سنج فیلم داغ در دنباله استوانه به منظور تعیین فرکانس ریزش گردابه بدون بعد انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که

1- Blom  
2- Choi and Lee  
3- Michelis and Kotsonis  
4- Cavalheiro

5- Wang and Tan  
6- Amin and Das

حرارتی خیلی بالایی تخت فضای کاملاً محدود تولید می‌کنند. در این حالت، حضور دیواره منجر به افزایش قابل توجه آشفته‌گی‌های جریان می‌گردد. ضریب انتقال حرارت استوانه‌های بیضوی نیز برابر یا اندکی بزرگ‌تر از استوانه‌های دایره‌ای برآورد شده است (وتا<sup>۲</sup> و همکاران [۲۳ و ۲۴]). علاوه بر آن‌ها، خواص عمومی دینامیک سیالاتی استوانه‌های بیضوی مابین استوانه-های دایره‌ای ( $AR=1$ ) و صفحات مسطح ( $AR=\infty$ ) قرار دارد. مشخصات جریان گردابه پشت استوانه‌های بیضوی واقع در یک جریان یکنواخت، به شدت تابع زاویه حمله و نسبت قطرهای استوانه ( $AR$ ) می‌باشد (مودی و ویلاندا<sup>۳</sup> [۲۵]؛ مودی و دیکشیت<sup>۴</sup> [۲۶]). استوانه‌های بیضوی کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی داشته و می‌توانند به‌عنوان یک ابزار انفعالی مؤثر به‌منظور کنترل جریان به‌کار روند. با این حال تا جایی که می‌دانیم، مقاله‌ای در زمینه برهم‌کنش (تداخل) میان استوانه بیضوی واقع در نزدیکی یک صفحه تخت با لایه‌مرزی زمانی که استوانه در داخل و خارج از یک لایه‌مرزی کاملاً آشفته قرار گرفته، منتشر نشده است.

در این مقاله، به بررسی تجربی تداخل لایه‌مرزی کاملاً آشفته و دنباله تشکیل شده پشت یک استوانه بیضوی در اعداد رینولدز مختلف، به‌ازای مقادیر مختلف نسبت فضای خالی، با انجام آزمایش‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

این آزمایش در یکی از تونل‌های باد در آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه حکیم سبزواری با جریان‌سنج سیم داغ انجام شده است.

### ۲-۱- تونل باد

نمای شماتیکی از تونل باد در شکل ۱ نشان داده شده است. تونل باد عمدتاً از یک فن‌گریز از مرکز، یک دیفیوزر، یک اتاق آرامش با لانه‌زنبوری و شبکه‌ها، نازل و یک اتاق آزمون با دیواره‌های شفاف ساخته شده است. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع مدارباز و دمشی بوده که دارای اتاقک

نسبت فضای خالی  $S/D=0.1-1$  را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هم متوسط‌گیری کل و هم میدان‌های جریان لحظه‌ای به‌شدت وابسته به  $S/D$  می‌باشند. همچنین، رشد دنباله و تبادل مومنتوم برای استوانه مربعی نسبت به استوانه دایره‌ای در همان نسبت فضای خالی، کندتر بود.

کابوچی<sup>۱</sup> و همکاران [۲۲] به مطالعه تجربی اثر جریان شبیه به جت بر روی دنباله نزدیک پشت استوانه دایره‌ای در نزدیکی دیواره صفحه با استفاده از روش تصویربرداری ذرات سیال پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سه رژیم جریان مجزا هنگامی که فاصله بین استوانه و دیواره متفاوت است، وجود دارد: (۱) رژیم جریان در فاصله بزرگ ( $G/D > 0.8$ ) که در آن تشکیل گردابه‌ها تقریباً متقارن است. تأثیرات کمی از دیواره در این رژیم جریانی تشخیص داده شد. (۲) رژیم جریان در فاصله متوسط ( $0.3 < G/D < 0.8$ ) که در آن تشکیل گردابه با پیدایش ساختارهای کوچک به‌علت گذر از لایه‌های برشی بسیار بلند تناوبی می‌شود و (۳) رژیم جریان در فاصله کوچک ( $G/D < 0.3$ ) که در آن جریان شبیه به جت، لایه برشی سطح پایینی را از بین می‌برد و از شروع تشکیل گردابه‌های تناوبی جلوگیری می‌کند.

در اکثر مطالعات پیشین، یک استوانه دایره‌ای درون یک لایه‌مرزی نسبتاً نازک غوطه‌ور شده بود؛ اما حالتی که یک استوانه بیضوی درون یک لایه‌مرزی نسبتاً نازک غوطه‌ور شده باشد، مورد مطالعه واقع نشده است. علاوه بر آن، استوانه‌های غیردایره‌ای مانند استوانه‌های بیضوی و مستطیلی در برخی مواقع به استوانه‌های دایره‌ای ترجیح داده می‌شوند. به‌عنوان مثال در مصارف آیرودینامیکی، به‌ازای مقادیر کوچک زاویه حمله، ضریب پسا در استوانه‌های بیضوی بسیار کوچک‌تر از استوانه‌های دایره‌ای می‌باشد. لذا به‌منظور بررسی ویژگی‌های آیرودینامیکی اثر باله بر زمین (WIG)، طراحی ایرفویل‌هایی با سطح مقطع بیضوی، منجر به بهبود ضرایب آیرودینامیکی و افزایش پایداری استاتیک WIG در فواصل مختلف از زمین می‌گردد. سطوح آیرودینامیکی بهینه‌تر در بررسی اثر باله بر زمین (WIG)، منجر به کاهش سطح مرطوب شده و افزایش سرعت در ناوهای جنگی با سرعت بالا و وسایل حمل و نقل هوایی جدید می‌گردد. همچنین، اکثر دستگاه‌های الکترونیکی بار

2- Ota

3- Modi and Wiland

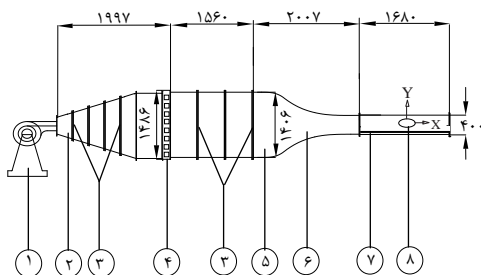
4- Modi and Dikshii

1- Khabbouchi

## ۲-۲- اندازه‌گیری‌های جریان‌سنج سیم داغ

سرعت‌سنج استفاده شده در این تحقیق از نوع دما ثابت است که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، اغتشاش‌ها و فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت استوانه را دارد.

پروفیل‌های سرعت دنباله و شدت اغتشاش در جهت جریان با استفاده از یک جریان‌سنج سیم داغ و پراب یک‌بعدی اندازه‌گیری شدند. پراب مورد استفاده از نوع یک‌بعدی بوده و سنسور آن از جنس تنگستن به طول  $1/25$  میلی‌متر و قطر  $5$  میکرومتر می‌باشد. دستگاه جریان‌سنج سیم داغ به‌همراه پراب، دارای فرکانس قطع  $5$  کیلوهرتز می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم داغ از طریق کارت A/D (آنالوگ به دیجیتال) به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار مربوطه (Flow ware) تجزیه و تحلیل می‌شوند. برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک مکانیزم دقیق با سه درجه آزادی استفاده شده است. دقت این مکانیزم انتقال پراب  $0/01$  میلی‌متر است. حرکت این مکانیزم انتقال‌دهنده توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می‌شود. همچنین، از لوله استاتیکی پیتوت به‌همراه مبدل الکترونیکی فشار، به‌منظور اندازه‌گیری فشار کل جریان هوا استفاده شده است. لایه‌مرزی کاملاً توسعه‌یافته در محل استقرار استوانه بر روی صفحه تخت (در غیاب استوانه) به‌دقت توسط اندازه‌گیری‌های جریان‌سنج سیم داغ دما ثابت مورد بررسی قرار گرفت. به‌عنوان نمونه در حالتی که سرعت جریان آزاد  $U_{ref}$ ،  $20$  متر بر ثانیه بود، ضخامت لایه‌مرزی  $\delta=0/38B$  می‌باشد. ضریب شکل،  $H=1/44$  به‌دست آمده است که تأیید می‌کند لایه مرزی ایجاد شده بر روی صفحه تخت کاملاً توسعه‌یافته است. خلاصه‌ای از پارامترها در جدول ۱ آورده شده است. اندازه‌گیری‌های جریان‌سنج سیم داغ در لایه‌مرزی آشفته و کاملاً توسعه‌یافته انجام شد.



شکل (۱): شماتیک تونل باد دم‌نده شامل اجزاء: ۱- فن

سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه‌زنبوری ۵- اتاق آرامش  
۶- نازل ۷- اتاق آزمون ۸- استوانه بیضوی (مقیاس میلی‌متر).

آزمایشی از جنس پلکسی گلاس با طول  $168$  سانتی‌متر، عرض  $40$  سانتی‌متر و ارتفاع  $40$  سانتی‌متر می‌باشد. با استفاده از موتور  $7$  کیلوواتی که برای تولید جریان هوا در دستگاه تونل باد به‌کار رفته، می‌توان به حداکثر سرعت  $30$  متر بر ثانیه رسید. یکنواختی پروفیل سرعت در ورودی تونل باد توسط جریان‌سنج سیم داغ بررسی شد (شکل ۲-الف را ببینید). شدت اغتشاش‌های جریان آزاد در اتاق آزمون کم‌تر از  $0/15\%$  است (شکل ۲-ب). در شکل ۳، نمای هندسی مدل استوانه به‌کار رفته در این مطالعه و سامانه‌های مختصات نشان داده شده است. یک استوانه بیضوی با نسبت محور  $(AR=A/B)$ ،  $2$  و طول  $390$  میلی‌متر از جنس آلومینیوم با آلیاژ  $7023$  در این مطالعه به‌کار رفته که در آن  $A$  و  $B$  به‌ترتیب قطر محورهای بزرگ و کوچک استوانه بیضوی هستند. قطر محورهای بزرگ و کوچک و نسبت طول به عرض  $(L/B)$  استوانه بیضوی  $(AR=2)$  به ترتیب برابر  $42/4$  میلی‌متر،  $21/2$  میلی‌متر و  $18/40$  می‌باشد. این نسبت منطقی مدل تجربی به‌منظور اطمینان از جریان دوبعدی در منطقه مرکزی دنباله نزدیک، به‌اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شد. یک صفحه تخت صاف با ضخامت  $20$  میلی‌متر، طول  $1200$  میلی‌متر و عرض  $380$  میلی‌متر، لبه ابتدایی صفحه، لبه تیز با زاویه  $30$  درجه بود. استوانه بیضوی در  $500$  میلی‌متری پایین لبه ابتدایی صفحه تخت قرار گرفت. لایه‌مرزی تشکیل شده بر روی صفحه تخت، در مکان استوانه دارای ضخامت  $8$  میلی‌متر بود. هنگام انجام آزمایش‌ها سرعت جریان آزاد  $(U_{ref})$  در  $10$  و  $20$  متر بر ثانیه ثابت شد و اعداد رینولدز متناظر براساس ارتفاع سطح مقطع استوانه در حدود  $15,000$  و  $30,000$  بودند. مختصات  $X$  و  $Y$ ، به‌ترتیب نشان‌دهنده فاصله جریان از استوانه و فاصله عمودی از صفحه انتهایی هستند. مختصات  $x$  و  $y$ ، فواصل نسبی متناظر از مرکز استوانه را نشان می‌دهند،  $G$  نشان‌دهنده فاصله شکاف بین انتهای استوانه و صفحه تخت است. برای این حقیق،  $G$  برابر  $2/12$ ،  $4/24$ ،  $10/6$ ،  $21/2$ ،  $31/8$  و  $42/4$  میلی‌متر در نظر گرفته شد، بنابراین نسبت فضاهای خالی  $(G/B)$  به‌ترتیب برابر  $0/1$ ،  $0/2$ ،  $0/5$ ،  $1$ ،  $1/5$  و  $2$  به‌دست می‌آیند.

هنگام انجام آزمایش‌ها، تغییرات دما در اتاق آزمون تونل باد، کم‌تر از  $0/5$  درجه سانتی‌گراد حفظ شد. از آنجاکه نسبت انسداد این مدل آزمایشی برابر  $0/53$  بود، اثر انسداد در این مطالعه تصحیح نشد.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی اثر تداخل دنباله و لایه‌مرزی بر روی پروفیل‌های سرعت متوسط، شدت اغتشاش‌ها و عدد استروهال در نسبت فضاهای خالی مختلف و اعداد رینولدز ۱۵,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ پرداخته شده است.

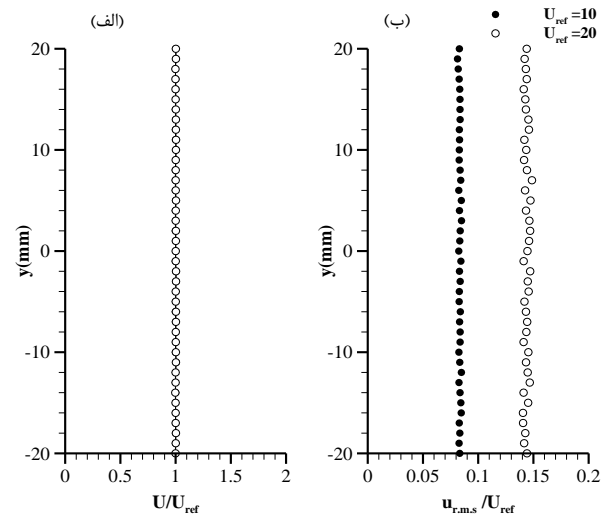
#### ۳-۱- پروفیل‌های سرعت متوسط

در شکل ۴ الف-ج پروفیل‌های بی‌بعد سرعت متوسط در ایستگاه‌های ۱۲/۵ و ۱۰، ۷/۵، ۶، ۵، ۳/۷۵، ۲/۵ و  $x/B=2/5$  و در نسبت فضاهای خالی ۲ و ۱/۵، ۱، ۰/۵، ۰/۲، ۰/۱ و  $G/B=0/1$  اعداد رینولدز ۱۵,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ نشان داده شده است. با افزایش  $G/B$ ، انحنای جریان پایین‌دست استوانه بزرگ‌تر می‌شود که بیش‌تر در حالت عدد رینولدز ۳۰,۰۰۰ قابل مشاهده است. عرض دنباله استوانه بیضوی در عدد رینولدز ۱۵,۰۰۰ نسبت به عدد رینولدز ۳۰,۰۰۰ در همان  $G/B$  بزرگ‌تر است. در هر  $G/B$ ، موقعیت لایه برشی بالایی در عدد رینولدز ۳۰,۰۰۰ در مقایسه با ۱۵,۰۰۰ همیشه اندکی بالاتر است. همچنین، یک انحنای رو به پایین نسبتاً کوچک‌تری همان‌گونه که به سمت پایین دست گسترش می‌یابد، دارد.

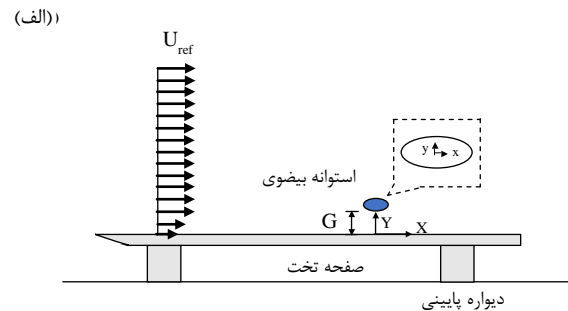
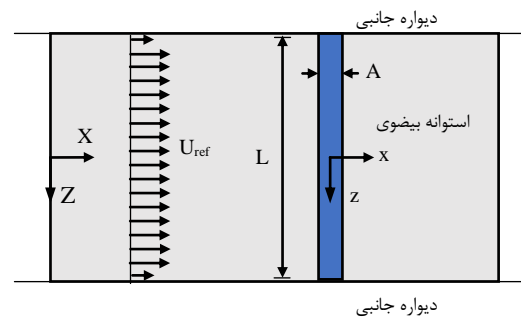
در حالت  $G/B=0/1$  (شکل ۴-الف)، شکاف جریان در جهت جریان انتشار می‌یابد که در محدوده ۶،  $x/B=3/75$  قابل مشاهده است و همچنین پروفیل‌های سرعت در  $x/B=5$  تقریباً تخت می‌شوند که در منطقه نزدیک دیواره  $(y/B=0-0/3)$ ، عدد رینولدز ۳۰,۰۰۰ نسبت به ۱۵,۰۰۰ پراکندگی (انتشار) شکاف جریان کندتر است که به‌عنوان نمونه در  $x/B=3/75$  نشان داده شده است که هنوز هم یک موقعیت بیشتر در منطقه نزدیک دیواره دارد.

برای ۰/۵ و ۰/۲،  $G/B=0/1$  (شکل‌های ۴-الف تا پ)، یک پدیده مشابهی در پروفیل‌های سرعت در منطقه دنباله دور (۶  $x/B \geq$ ) مشاهده می‌شود. منطقه چرخشی پشت استوانه نیز می‌تواند به‌خصوص در ۰/۵ و  $G/B=0/2$  قابل درک باشد که در آن جریان در حدود خط مرکزی استوانه، متقارن است.

در  $G/B \leq 0/2$  تنها لایه‌ی برشی سطح بالایی استوانه است که همچنان وجود دارد (شکل‌های ۲-الف و ۲-ب). گردابه‌های لایه برشی سطح پایینی استوانه از بین می‌روند. در واقع وجود جریان شبیه به جت، در منطقه باریک بین استوانه و صفحه



شکل (۲): در ورودی اتاق آزمون تونل باد: (الف) یکنواختی سرعت متوسط جریان. (ب) شدت اغتشاش جریان آزاد.



شکل (۳): نمای شماتیکی از تجهیزات آزمایشگاهی و سامانه‌های مختصات: (الف) نمای بالا؛ (ب) نمای جانبی.

جدول (۱): مشخصات لایه‌مرزی بر روی صفحه تخت.

سرعت جریان آزاد $U_{ref}$ (m/s)	۲۰
ضخامت لایه‌مرزی $\delta$ (mm)	۸
ضخامت جابجایی $\delta^*$ (mm)	۰/۷۵۲
ضخامت مومنتوم $\theta$ (mm)	۰/۵۲۱
ضریب شکل $H(= \delta^*/\theta)$	۱/۴۴

رینولدز  $30,000$  نسبتاً کوچک است و پروفیل‌های سرعت تمایل دارند که به سرعت به لایه مرزی صفحه تخت برسند.

اگرچه زمانی که نسبت شکاف بزرگ‌تر از  $0/5$  باشد، جریان گردابی به وضوح در نزدیکی دنباله ظاهر می‌شود، ساختارهای دنباله برای نسبت‌های شکاف‌های  $2$  و  $1/5$ ،  $1$ ،  $0/5$  کاملاً از همدیگر متفاوت هستند. برای  $G/B=0/5$  (شکل ۴-پ)، پروفیل‌های سرعت متوسط، صرف‌نظر از نسبت محوری استوانه، پروفیل‌های مشابهی در ایستگاه‌های پایانی دارند. در این نسبت شکاف، استوانه عبور جریان از شکاف را محدود می‌کند و به‌عنوان یک سد برای جریان عمل می‌کند؛ بنابراین، سرعت جریان در نزدیکی صفحه تخت، صرف‌نظر از نسبت محوری، مقدار بسیار کوچک‌تری از سرعت در نسبت شکاف‌های  $2$  و  $1/5$  دارد. با این وجود، برای نسبت شکاف‌های  $2$  و  $1/5$  (شکل‌های ۴-ت، ث و ج)، ناحیه نقصان سرعت پشت استوانه تشکیل می‌شود و پروفیل‌های سرعت جریان در نزدیکی دیواره، به سبب شکاف جریان، مشابه لایه‌مرزی آشفته می‌شوند.

در  $G/B=1$  (شکل ۴-ت)، به‌علت افزایش فاصله سطح زیرین استوانه از صفحه تخت تغییرات جالبی در پدیده‌های ذکر شده رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تداخل دنباله با لایه‌مرزی در فاصله دورتری در پایین دست مدل رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد برخلاف حالت‌های قبل تداخل دنباله با لایه مرزی برای  $Re=30,000$  در  $x/B=3/75$  رخ داده که نسبت به  $Re=15,000$  که در  $x/B=5$  تداخل شکل گرفته، بسیار سریع‌تر می‌باشد که به‌علت ساختار متفاوت گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد. پروفیل‌های سرعت در  $x/B=3/75$  نشان می‌دهند که یک منطقه سرعت یکنواخت بین لایه مرزی و دنباله وجود دارد. این ناحیه به‌عنوان ناحیه جریان پتانسیل نامیده می‌شود. همچنین، کمینه سرعت موجود در دنباله در تمامی ایستگاه‌ها برای هر دو عدد رینولدز قابل مشاهده است که مقدارش در عدد رینولدز  $15,000$  نسبت به  $30,000$  بزرگ‌تر است.

در  $G/B=1/5$  (شکل ۴-ث)، تداخل دنباله با لایه‌مرزی در منطقه ریزش گردابه (ایستگاه‌های پایانی) رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تداخل دنباله با لایه‌مرزی در  $Re=30,000$  در  $x/B=7/5$  رخ داده است که نسبت به  $Re=15,000$  که در  $x/B=10$  می‌باشد، سریع‌تر اتفاق افتاده

تخت، لایه برشی سطح پایینی را از بین می‌برد و از شروع تشکیل گردابه‌های تناوبی جلوگیری می‌کند.

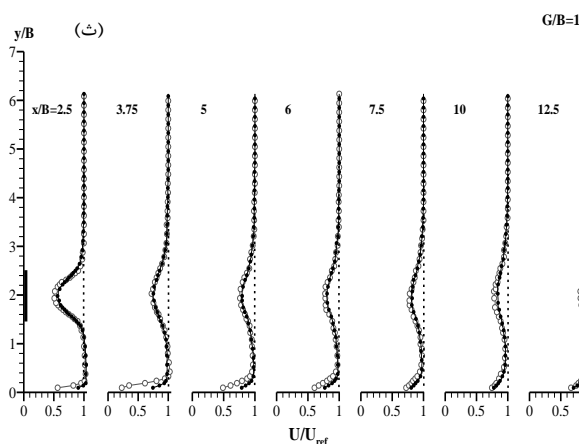
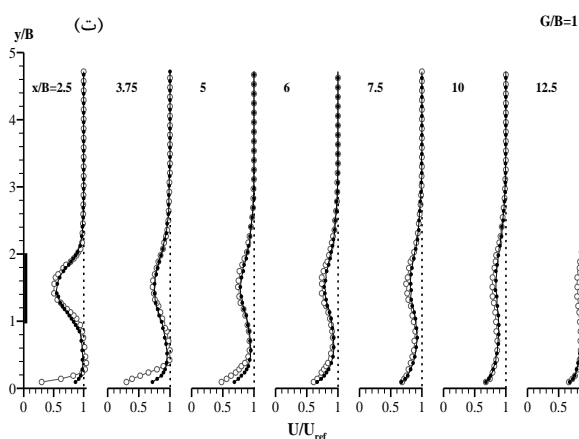
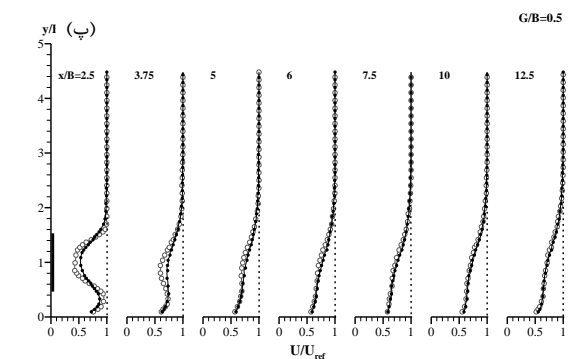
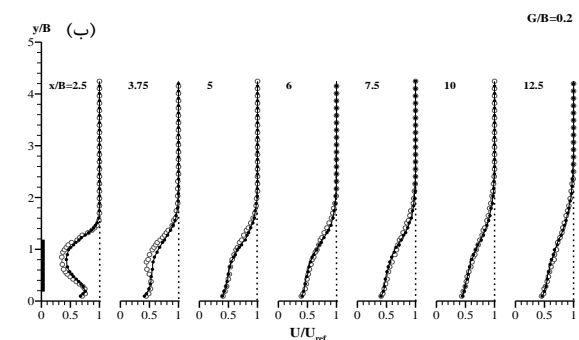
نکته قابل توجه دیگری که در تمامی  $G/B$  ها قابل مشاهده است منطقه تداخل دنباله با لایه‌مرزی است. در  $G/B=0/1$  (شکل ۴-الف)، تداخل دنباله با لایه‌مرزی در  $x/B=2/5$  (منطقه دنباله نزدیک) رخ داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تداخل دنباله با لایه‌مرزی در عدد رینولدز  $15,000$  نسبت به  $30,000$  زودتر اتفاق افتاده است. همچنین، کمینه سرعت دنباله جریان در  $x/B=2/5$  قابل مشاهده است که در عدد رینولدز  $15,000$  نسبت به  $30,000$  بزرگ‌تر و با گسترش جریان به سمت پایین دست از بین می‌رود.

در  $G/B=0/2$  (شکل ۴-ب)، نیز تداخل دنباله با لایه‌مرزی در  $x/B=2/5$  (در منطقه دنباله نزدیک) رخ می‌دهد که برعکس حالت قبل تداخل در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  زودتر رخ می‌دهد. همچنین، کمینه سرعت دنباله جریان در عدد رینولدز  $15,000$  در  $3/75$  و  $x/B=2/5$  قابل مشاهده می‌باشد که نسبت به عدد رینولدز  $30,000$  که فقط در  $x/B=2/5$  قابل مشاهده است مقدار بزرگ‌تری دارد. همچنین، ناحیه دنباله پشت استوانه بیضوی در عدد رینولدز  $30,000$  نسبتاً کوچک است و پروفیل‌های سرعت تمایل دارند که به سرعت به لایه مرزی صفحه تخت برسند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در  $0/2$  و  $G/B=0/1$  (شکل‌های ۴-الف و ۴-ب)، به‌علت حضور استوانه در لایه مرزی آشفته و از بین رفتن لایه برشی سطح پایینی استوانه به‌علت کوچک بودن فاصله زیرین استوانه با صفحه تخت، باعث تداخل سریع دنباله با لایه مرزی می‌شود.

در  $G/B=0/5$  (شکل ۴-پ)، نیز مشاهده می‌گردد که تداخل دنباله با لایه مرزی در منطقه دنباله نزدیک رخ داده است که در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  زودتر اتفاق افتاده است. همچنین، در هر دو عدد رینولدز کمینه سرعت دنباله جریان در  $3/75$  و  $x/B=2/5$  قابل مشاهده می‌باشد که مقدار آن برای عدد رینولدز  $15,000$  بزرگ‌تر و با گسترش جریان به سمت پایین دست از بین می‌رود. در  $G/B=0/5$  (شکل ۴-پ)، به این علت که استوانه در خارج از لایه‌مرزی آشفته قرار دارد، نسبت به  $0/2$  و  $G/B=0/1$  (شکل‌های ۴-الف و ۴-ب)، تداخل دنباله با لایه‌مرزی دیرتر اتفاق می‌افتد که در نمودارهای مربوطه مشهود است. همچنین، در این  $G/B$  نیز ناحیه دنباله پشت استوانه بیضوی در عدد



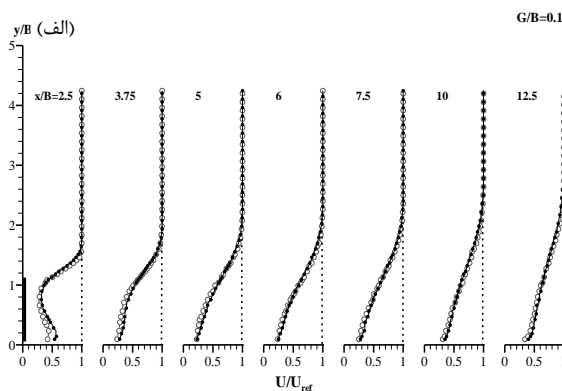


است. همچنین، در این  $G/B$  منطقه جریان پتانسیل بین لایه مرزی و صفحه تخت تا  $x/B=6$  قابل مشاهده است.

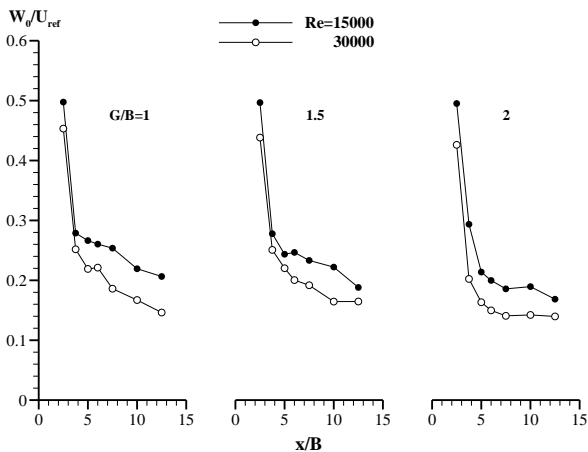
در  $G/B=2$  (شکل ۴-ج)، تداخل دنباله با لایه مرزی در آخرین ایستگاه رخ داده است و در این  $G/B$  منطقه جریان پتانسیل تا  $x/B=10$  قابل رؤیت می‌باشد. پارامتر نقصان سرعت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{W_c}{U_{ref}} = \frac{U_{ref} - U_{min}}{U_{ref}} \quad (1)$$

در شکل‌های ۵ و ۶ پارامتر نقصان سرعت در اعداد رینولدز  $15,000$  و  $30,000$  برحسب  $x/B$  در  $G/B$  های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات این پارامتر برحسب  $x/B$  کاهش می‌باشد. در  $0.2$  و  $0.1$   $G/B$  به علت تداخل سریع دنباله با لایه مرزی و از بین رفتن دنباله به علت حضور استوانه در لایه مرزی آشفته مقدار این پارامتر فقط در منطقه دنباله نزدیک قابل رؤیت است. در  $G/B=0.5$  نیز مقدار نقصان سرعت تا  $x/B=6$  قابل مشاهده می‌باشد (در هر دو عدد رینولدز) و از این ایستگاه به بعد، پروفیل‌های سرعت متوسط تمایل دارند که به سرعت به لایه مرزی صفحه تخت برسند؛ اما همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار این پارامتر در ۲ و  $1.5$   $G/B$  هم در منطقه دنباله نزدیک و هم در منطقه ریزش گردابه قابل رؤیت می‌باشد. همچنین، مقدار پارامتر نقصان سرعت با افزایش  $G/B$  کاهش شدیدی پیدا می‌کند. نکته قابل توجه دیگر در هر دو عدد رینولدز تغییرات مشابه پارامتر نقصان سرعت در  $1.5$  و  $1$   $G/B$  می‌باشد که نشان می‌دهد ساختار گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه در این دو نسبت  $G/B$  مشابه یکدیگر می‌باشند.



در شکل ۷، به مقایسه پارامتر نقصان سرعت در اعداد رینولدز ۱۵,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ در ۲ و ۱/۵،  $G/B=1$  برحسب  $x/B$  پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می شود، مقدار این پارامتر در عدد رینولدز ۳۰,۰۰۰ نسبت به ۱۵,۰۰۰ کاهش قابل ملاحظه ای دارد که به علت ساختار گردابه های متفاوت تشکیل شده پشت استوانه می باشد.



شکل (۷): مقایسه نقصان سرعت بی بعد در اعداد رینولدز ۱۵,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ برحسب  $x/B$ .

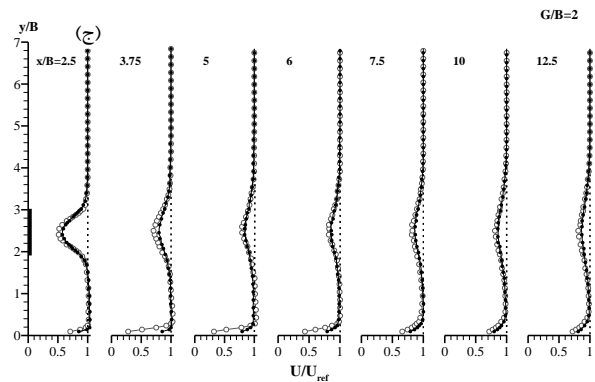
### ۳-۲- شدت اغتشاش ها

در شکل ۸، پروفیل های بی بعد شدت اغتشاش ها در ایستگاه های ۱۲/۵ و ۱۰، ۷/۵، ۶، ۵، ۳/۷۵، ۲/۵ و  $x/B$  در نسبت فضاهای خالی ۲ و ۱/۵، ۱، ۰/۵، ۰/۲، ۰/۱،  $G/B=0/1$  و در اعداد رینولدز ۱۵,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ نشان داده شده است.

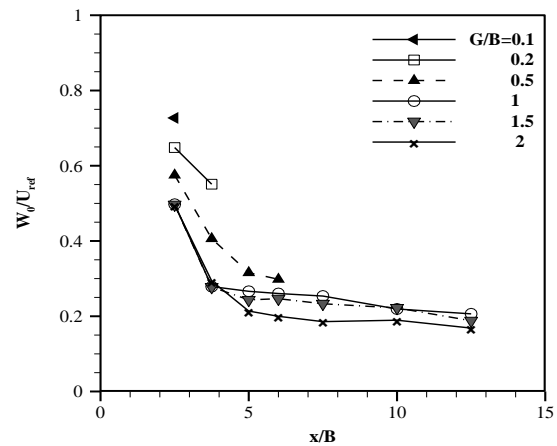
شدت اغتشاش ها پارامتر مهمی است که کیفیت جریان سیال را مشخص می کند. شدت اغتشاش ها به صورت زیر بیان می شود:

$$\%Tu = \frac{u_{r.m.s}}{U_{ref}} = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_{ref}} \times 100 \quad (2)$$

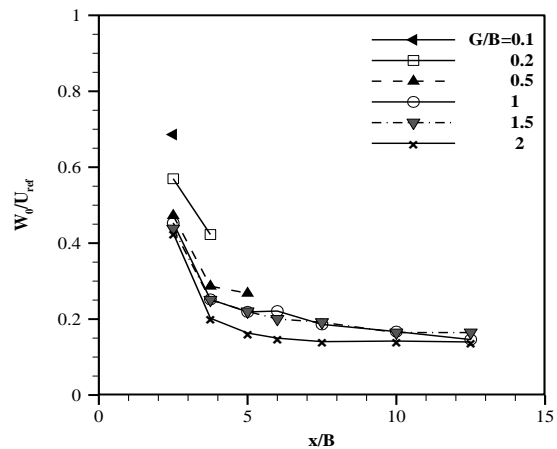
در  $G/B=0/1$  (شکل ۸- الف)، همان طور که مشاهده می شود تداخل دنباله با لایه مرزی در منطقه دنباله نزدیک و در  $x/B=2/5$  رخ داده است. همان طور که مشاهده می شود در  $x/B=2/5$ ، دو مقدار بیشینه در پروفیل شدت اغتشاش ها در هر دو عدد رینولدز مشاهده می گردد که با حرکت به سمت پایین دست جریان این دو مقدار بیشینه با یکدیگر ادغام شده و تبدیل به یک پیک می شوند. همچنین، مشاهده می شود تداخل لایه برشی سطح پایینی استوانه با لایه مرزی صفحه تخت در عدد رینولدز ۱۵,۰۰۰ منجر به کاهش شدت اغتشاش ها نسبت



شکل (۴): پروفیل های سرعت متوسط  $(U/U_{ref})$  بی بعد در ایستگاه های مختلف  $(x/B)$  و عدد رینولدز ۱۵,۰۰۰ و عدد رینولدز ۳۰,۰۰۰ (الف)  $G/B=0/1$ ، (ب) ۰/۲، (پ) ۰/۵، (ت) ۱، (ث) ۱/۵ و (ج) ۲.



شکل (۵): تغییرات نقصان سرعت بی بعد برحسب  $x/B$  در  $Re=15,000$ .



شکل (۶): تغییرات نقصان سرعت بی بعد برحسب  $x/B$  در  $Re=30,000$ .

دنباله نزدیک). در این  $G/B$  نیز تداخل لایه برشی سطح پایینی استوانه با لایه‌مرزی صفحه تخت در  $Re=15,000$  منجر به کاهش جزئی شدت اغتشاش نسبت به لایه برشی سطح بالایی استوانه می‌شود. برخلاف  $Re=30,000$  که منجر به افزایش شدت اغتشاش می‌گردد. تغییرات پروفیل شدت اغتشاش‌ها از  $12/5$  تا  $x/B=3/75$  برای هر دو عدد رینولدز تقریباً مشابه می‌باشند به جز این که میزان شدت اغتشاش‌ها در بخش بیرونی لایه برشی سطح بالایی استوانه، در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر می‌باشد.

در  $G/B=1$  (شکل ۸-ت) نسبت به  $G/B=0/5$  (شکل ۸-پ) شاهد کاهش شدت اغتشاش‌ها در منطقه تداخل خواهیم بود. همچنین، میزان شدت اغتشاش‌ها چه در منطقه تداخل و چه در لایه برشی سطح بالایی استوانه تقریباً یکسان است.

در  $2$  و  $G/B=1/5$  (شکل‌های ۸-ث و ۸-ج)، مشاهده می‌شود که اغتشاش‌ها در  $Re=15,000$  نسبت به  $30,000$  تا  $x/B=7/5$  بیش‌تر می‌باشد و در ایستگاه‌های پایانی تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشند. علاوه بر این، دنباله و لایه‌مرزی در  $x/B=2/5$  توسط جریان پتانسیل از یکدیگر جدا می‌شوند که در آن تنش برشی رینولدز صفر است و تنش نرمال ( $u'$ ) مقدار بسیار کوچک‌تری از اغتشاش‌های جریان آزاد دارد. در  $2$  و  $G/B=1/5$  دیده می‌شود که ناحیه بین لایه‌مرزی و دنباله که در آن میزان ( $u'$ ) کوچک می‌باشد نسبت به منطقه جریان پتانسیل باریک‌تر است؛ بنابراین، تداخل بین مؤلفه نوسانی سرعت نسبت به سرعت متوسط زودتر آغاز می‌شود. مشاهده می‌گردد که میزان شدت اغتشاش‌ها در بخش بیرونی لایه‌مرزی تا  $x/B=5$  برای  $Re=30,000$  نسبت به  $15,000$  بالاتر است. همچنین، میزان شدت اغتشاش‌ها در بخش بیرونی لایه برشی نیز در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر است.

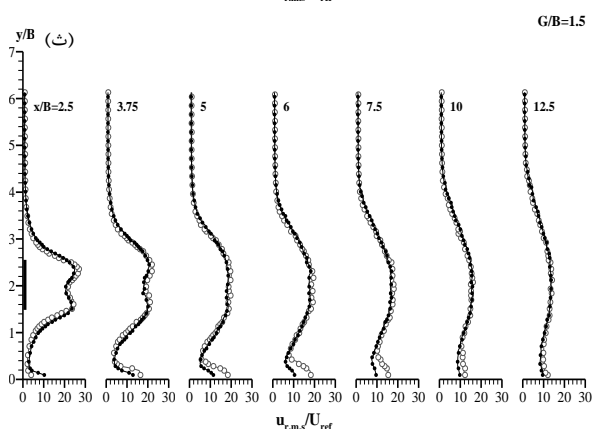
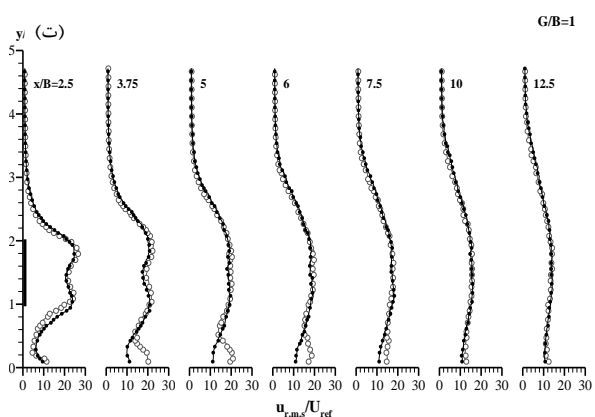
### ۳-۳- بررسی عدد استروهاال

همان‌طور که در مشخصات دستگاه جریان‌سنج سیم داغ گفته شد، این دستگاه قادر به اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های متناوب خارج‌شونده از پشت استوانه می‌باشد که با استفاده از آن و سرعت سیال و قطر استوانه می‌توان عدد استروهاال را به‌دست آورد. برای اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های خارج‌شونده از پشت استوانه باید پراب را در محل مناسبی قرار داده و سپس

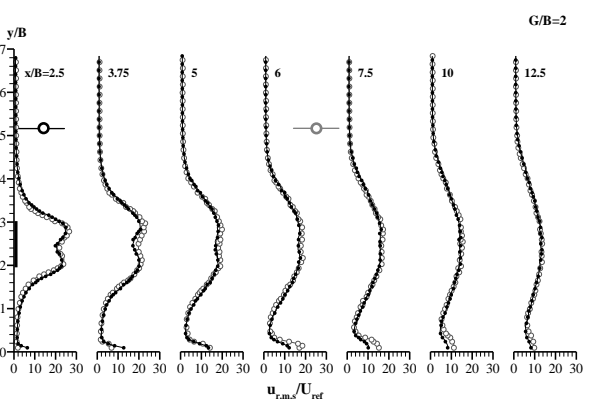
به لایه برشی سطح بالایی استوانه می‌شود. برخلاف عدد رینولدز  $30,000$  که منجر به افزایش شدت اغتشاش‌ها شده است که همین کاهش در شدت اغتشاش‌ها در منطقه تداخل یافته منجر به تداخل سریع‌تر در پروفیل سرعت میانگین در عدد رینولدز  $15,000$  نسبت به  $30,000$  می‌شود. مشاهده می‌شود تا  $x/B=7/5$ ، شدت اغتشاش‌ها در منطقه تداخل دنباله با لایه‌مرزی در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر می‌باشد. همچنین، میزان شدت اغتشاش‌ها در تمامی ایستگاه‌ها در بخش بیرونی لایه برشی سطح بالایی استوانه، در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر می‌باشد.

در  $G/B=0/2$  (شکل ۸-ب)، تداخل دنباله با لایه‌مرزی در منطقه دنباله نزدیک و در  $x/B=2/5$  رخ داده است. از مقایسه  $G/B=0/1$  با  $G/B=0/2$  در  $x/B=2/5$  می‌توان مشاهده کرد که افزایش فاصله استوانه با سطح صاف منجر به افزایش شدت اغتشاش‌ها در منطقه تداخل می‌شود (برای هر دو عدد رینولدز). همانند  $G/B=0/1$  در این حالت نیز تا  $x/B=3/75$  شاهد دو مقدار بیشینه در پروفیل شدت اغتشاش‌ها (در هر دو عدد رینولدز) می‌باشیم که با گسترش جریان به سمت پایین دست این دو مقدار با یکدیگر ادغام شده و تبدیل به یک پیک می‌شوند. همچنین، در این  $G/B$  نیز تداخل لایه برشی سطح پایینی استوانه با لایه‌مرزی صفحه تخت در عدد رینولدز  $15,000$  منجر به کاهش شدت اغتشاش‌ها نسبت به لایه برشی سطح بالایی استوانه می‌شود که نسبت به  $G/B=0/1$  این کاهش کم‌تر می‌باشد. برخلاف عدد رینولدز  $30,000$  که منجر به افزایش شدت اغتشاش‌ها می‌شود که نسبت به  $G/B=0/1$  بیش‌تر می‌باشد. همچنین تا  $x/B=7/5$ ، شدت اغتشاش‌ها در منطقه تداخل دنباله با لایه‌مرزی در  $Re=30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر است. همچنین، میزان شدت اغتشاش‌ها تا  $x/B=5$  در بخش بیرونی لایه برشی سطح بالایی استوانه، در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر و در بقیه ایستگاه‌ها تقریباً یکسان می‌باشد.

در  $G/B=0/5$  (شکل ۸-پ)، نیز تداخل دنباله با لایه‌مرزی در  $x/B=2/5$  رخ داده است. تا  $x/B=6$  شاهد دو مقدار بیشینه در پروفیل شدت اغتشاش‌ها (در هر دو عدد رینولدز) می‌باشیم که با گسترش جریان به سمت پایین دست این دو مقدار با یکدیگر ادغام شده و تبدیل به یک پیک می‌شوند (به‌علت از بین رفتن جریان برگشتی و چرخشی پشت استوانه در منطقه



(ج)



شکل (۸): پروفیل‌های شدت اغتشاش‌های

$(U_{r.m.s.}/U_{ref}) \times 100$  بی‌بعد در ایستگاه‌های مختلف  $(x/B)$  و

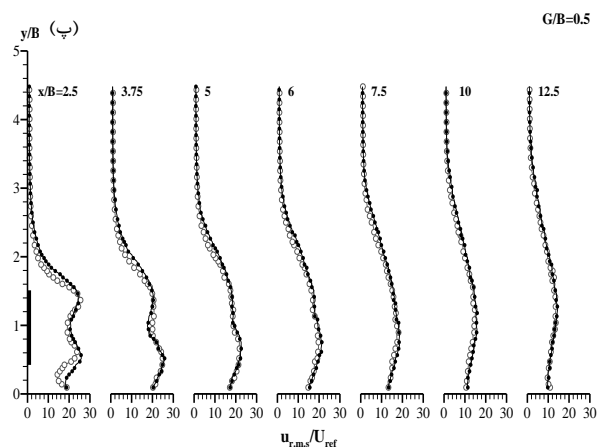
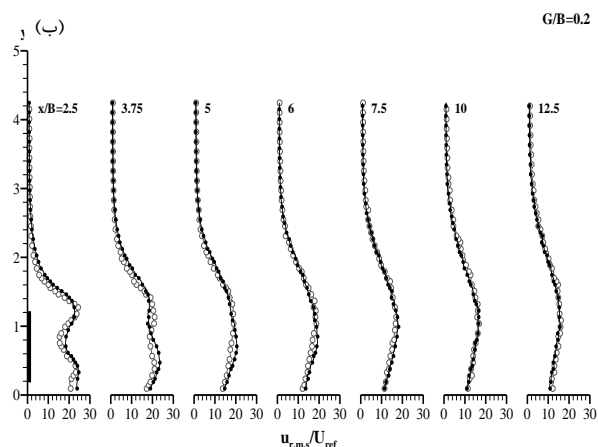
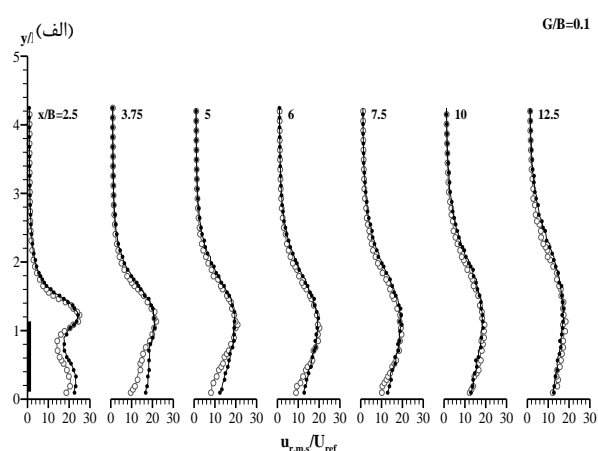
عدد رینولدز  $15,000$  و عدد رینولدز  $30,000$ : (الف)

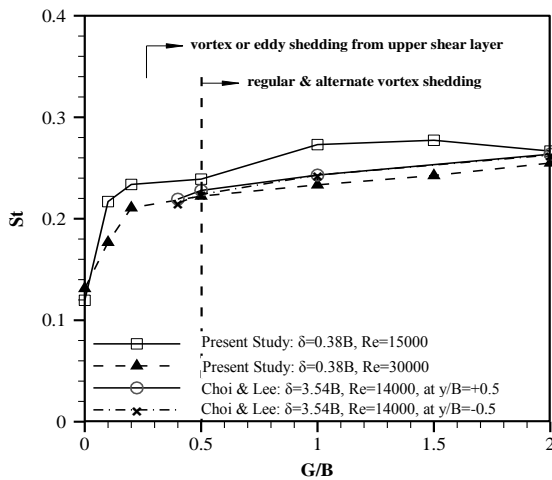
$G/B=0/1$ , (ب)  $0/2$ , (پ)  $0/5$ , (ت)  $1$ , (ث)  $1/5$  و (ج)  $2$ .

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

$$St = \frac{f \cdot B}{U_{ref}} \quad (۳)$$

فرکانس را به دست آورد. با توجه به بالابودن پاسخ فرکانسی دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ نسبت به سامانه‌های 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 جهت‌های  $x$  و  $y$  و در نقاط منتخبی از دنباله جریان، دینامیک دنباله را تا حدودی آشکار می‌سازد.





شکل (۹): تغییرات عدد استروهمال،  $St$ ، برحسب  $G/B$ ، مطالعه حاضر در  $\delta=0.38B$  و  $Re=15,000$  و  $Re=30,000$ ، نتایج تجربی چوی و لی [۱۴]، در  $\delta=3.54B$  و  $Re=14,000$ .

به منظور مقایسه تغییرات عدد استروهمال برحسب  $G/B$  برای رینولدزهای مختلف و  $\delta/B$  های مختلف مربوط به اطلاعات عدد استروهمال به دست آمده از مطالعه حاضر همراه با مطالعه تجربی چوی و لی [۱۴] در شکل ۹ نشان داده شده است. برای  $Re=15,000$  همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، اطلاعات نشان می‌دهد که عدد استروهمال، هنگامی که  $G/B$  کاهش می‌یابد، کاهش می‌یابد. تغییر عدد استروهمال به نظر می‌رسد بیش‌تر وابسته به اثر  $G/B$  باشد تا  $\delta/B$ ، بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده توسط مطالعه حاضر و چوی و لی [۱۴]. در  $Re=30,000$ ، عدد استروهمال با افزایش  $G/B$  تا ۱، افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین فرکانس گردابه کارمن در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  کم‌تر می‌باشد که منجر به کاهش عدد استروهمال می‌گردد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که عدد استروهمال به تغییرات  $G/B$  وابسته است، درحالی‌که به نظر می‌رسد عدد استروهمال تقریباً مستقل از  $\delta/B$  برای رینولدزهای مختلف باشد.

#### ۴- استخراج ضریب پسا با استفاده از روش اختلاف مومنتوم

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، استفاده از روش اختلاف مومنتوم است. در رابطه با روش اختلاف مومنتوم،

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 فوریه، آن را به حوزه فرکانس برده و در نمایشگر به صورت دامنه نوسان برحسب فرکانس نوسان نشان می‌دهد. در تونل باد مورد آزمایش، بیشینه فرکانس داده‌برداری  $5\text{KHz}$  انتخاب شده است.

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 دامنه هستند؛ بنابراین فرکانس مربوط به بیش‌ترین دامنه، در واقع همان مقدار فرکانس گردابه کارمن است.

شکل ۹، اثر نسبت  $G/B$  بر روی عدد استروهمال، برای اعداد رینولدز مختلف ( $Re=15,000$  و  $30,000$ ) در  $\delta=0.38B$  را نشان می‌دهد. نشان داده شده است که عدد استروهمال برای  $G/B \geq 2$ ، برای استوانه بیضوی تقریباً ثابت و در عدد رینولدز  $15,000$  معادل  $0.2666$  و در عدد رینولدز  $30,000$  معادل  $0.2549$  می‌باشد. عدد استروهمال زمانی که نسبت  $G/B$  پایین‌تر از  $0.5$  کاهش یافته، افزایش می‌یابد که یک مقدار حداکثری را آشکارا می‌توان مشاهده نمود. این افزایش که برای کاهش  $G/B$  از  $2$  تا  $0.5$  رخ می‌دهد باید به واسطه منحرف شدن جریان عبوری از شکاف و افزایش سرعت جریان عبوری از شکاف به علت اثر انسداد ناشی از کاهش شکاف خالص بین استوانه بیضوی و لایه مرزی صفحه تخت ایجاد شده باشد. هنگامی که استوانه بیضوی نزدیک‌تر به صفحه تخت قرار گرفته باشد، برای مثال  $G/B \leq 0.5$ ، به وضوح شاهد کاهش عدد استروهمال بوده‌ایم. برای نسبت فضای خالی کم‌تر از  $0.5$ ، تشکیل گردابه‌های متناوب متوقف شده است؛ اگرچه عدد استروهمال را هنوز هم می‌توان از بیش‌ترین فرکانس طیفی تشکیل ادی‌ها از لایه برشی سطح بالایی استوانه محاسبه نمود. فرکانس تشکیل ادی‌ها از لایه برشی سطح بالایی استوانه هر دو به واسطه سوئیچینگ جریان شکاف و به واسطه شدت جریان عبوری از شکاف، هنگامی که  $G/B$  کاهش می‌یابد تحت تأثیر قرار خواهد گرفت؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل گردابه تناوبی و منظم در واقع در  $G/B=0.5$  در اعداد رینولدز  $30,000$  و  $15,000$  متوقف شده است.

$$C_D = \int \left[ \frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{L}\right) + 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) - 2 \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (6)$$

معادله (۶) به معادله ون دام مشهور است. این معادله را می‌توان در هر نقطه‌ای در پایین دست مدل که مقادیر جریان هوا را بتوان در آنجا به‌طور دقیق اندازه‌گیری نمود، استفاده کرد. با توجه به معادله (۶)، می‌توان آن را به سه انتگرال تقسیم کرد که انتگرال اول آن، عبارت اختلاف فشار، انتگرال دوم عبارت اختلاف مومنتوم و انتگرال سوم عبارت تنش‌های رینولدز است. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق فشار استاتیکی در ناحیه دنباله جسم دشوار است، گلدشتاین فشار استاتیکی در ناحیه دنباله را مطابق معادله (۷)، به‌صورت شدت اغتشاش‌های سه‌بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله (۸) ارائه کرد:

$$p_{s,e} = p_{s,w} + q' \quad , \quad q' = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (7)$$

$$C_D = 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \left( \frac{\overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \overline{u'^2}}{U_\infty^2} \right) \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (8)$$

$w'$  و  $v'$  نوسانات عرضی سرعت جریان هوا می‌باشند. معادله (۸) به معادله اصلاح‌شده ون دام مشهور است. با فرض شدت اغتشاش‌های همگن و یا به‌عبارت دیگر  $u' = v' = w'$ ، معادله (۸) ساده شده و به‌صورت معادله (۹) بیان می‌شود:

$$C_D = 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (9)$$

در این حالت می‌توان با استفاده از جریان سنج سیم داغ با پراب یک‌بعدی و فقط با اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها در جهت جریان، ضریب نیروی پسا را به‌دست آورد.

در تحقیق حاضر به‌علت صاف بودن سطوح مدل، نیروی پسی اصطکاکی بسیار ناچیز است و از طرف دیگر به‌علت درهم‌بودن رژیم جریان آزاد بیش‌تر نیروی پسی وارده به استوانه، به‌علت گردایان فشار ایجادشده در جلو و عقب مدل می‌باشد.

در شکل ۱۰ تغییرات ضریب پسا برحسب  $G/B$  نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمانی که استوانه در لایه مرزی آشفته قرار دارد ( $G/B < 0.5$ ) ضریب پسا با افزایش  $G/B$  افزایش می‌یابد که در تطابق خوبی با نتایج چوی و لی [۱۴] می‌باشد؛ اما زمانی که استوانه در خارج از لایه مرزی

تحقیقات متعددی انجام گرفته است. ون دام [۲۷] با استفاده از معادلات پیوستگی و بقاء مومنتوم خطی برای حجم کنترلی که جسم را در بر گرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز، ضریب نیروی پسا را مشخص نمود. گلدشتاین [۲۸] فشار استاتیکی در ناحیه دنباله را مشخص کرد. برای استفاده از معادله ارائه شده توسط گلدشتاین نیاز به اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در ناحیه دنباله و همچنین، اغتشاش‌ها به‌صورت سه‌بعدی می‌باشد. با افزایش فاصله از مدل، شدت اغتشاش‌های جریان هوا کاهش یافته و اغتشاش‌ها را می‌توان همگن فرض نمود. در این حالت با استفاده از جریان‌سنج با پراب یک‌بعدی می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری کرد.

ون دام [۲۷] با اعمال معادلات پیوستگی و بقاء مومنتوم خطی به حجم کنترلی که جسم را در بر گرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز ضریب نیروی پسا را مطابق معادله (۴) ارائه کرد:

$$C_D = \int \left[ \frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{L}\right) + 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \frac{1}{q_\infty} \int \tau_{xx} \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (4)$$

$p_{s,e}$  فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله یا بالادست مدل،  $p_{s,w}$  فشار استاتیکی در ناحیه دنباله مدل،  $U$  سرعت محلی،  $U_\infty$  سرعت جریان آزاد،  $q_\infty$  فشار دینامیکی جریان آزاد،  $y$  فاصله قائم در راستای عمود بر دنباله،  $\tau_{xx}$  تنش برشی و  $L$  نیز طول مشخصه مدل است که برای استوانه قطر آن در نظر گرفته می‌شود. مقدار  $\tau_{xx}$  را می‌توان به‌صورت مجموع تنش‌های لزجی و تنش‌های رینولدز مطابق معادله (۵) بیان کرد:

$$\tau_{xx} = \mu \left( 2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) - \rho \overline{u'^2} - 2 \overline{U} \overline{u'v'} - \overline{\rho' u'v'} - \overline{\rho' u'^2} \quad (5)$$

که در آن،  $\rho'$  نوسانات چگالی و  $u'$  نوسان سرعت جریان هوا در جهت جریان آزاد می‌باشد. مقدار مؤلفه تنش لزجی در معادله (۵) در جریان‌های با اعداد رینولدز بالا، بسیار کم‌تر از مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز خواهد بود. همچنین، برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر، نوسانات چگالی را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. از این رو معادله (۴) را می‌توان به‌صورت معادله (۶) بازنویسی کرد.

اندازه‌گیری تنها زمانی کامل است که همراه با شرح عدم قطعیت آن ارائه شود. عدم قطعیت سرعت لحظه‌ای به عوامل مختلفی بستگی دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

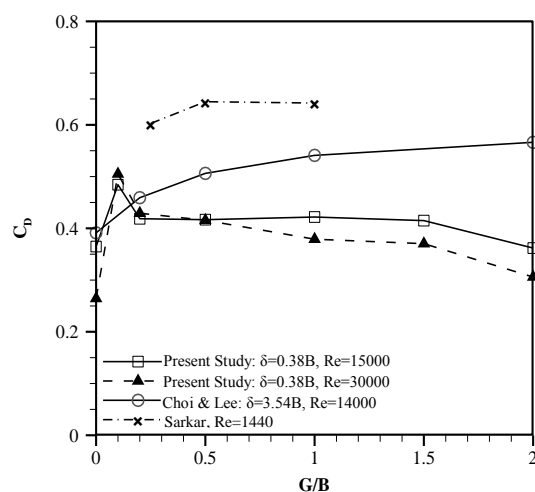
- عدم قطعیت جریان سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و ...)
- عدم قطعیت کالیبراسیون،
- عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال،
- عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری پراب،
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما،
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات فشار محیط و
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات رطوبت.

اندازه‌گیری با دستگاه جریان‌سنج سیم داغ مانند دستگاه‌های دیگر دارای خطا می‌باشد که باید آن را به حداقل رسانید. منشأ خطاهای جریان‌سنج سیم داغ را می‌توان خطاهای ناشی از دستگاه کالیبراتور، منحنی کالیبراسیون، دقت تفکیک‌پذیری کارت A/D و تغییرات دما دانست. کالیبراسیون جریان‌سنج سیم داغ با استفاده از تونل باد و لوله پیتوت در جریان با شدت اغتشاش ۰/۱٪ انجام شده است. خطای ذاتی لوله استاتیکی پیتوت کمتر از ۰/۳٪ می‌باشد. پس از کالیبره نمودن جریان‌سنج سیم داغ رابطه ولتاژ و سرعت را با استفاده از منحنی چندجمله‌ای درجه ۵ برازش نموده که خطای آن نیز کم‌تر از ۰/۵٪ خواهد بود. کارت A/D مورد استفاده ۱۲ بیتی بوده و بازه آن بین ۱۰+ و ۱۰- ولت است و در صورتی که تطبیق‌دهنده سیگنال استفاده شود، خطای تفکیک‌پذیری آن نیز کم‌تر از ۰/۰۵٪ می‌باشد. تغییرات دما تأثیر نامطلوبی بر دقت جریان‌سنج سیم داغ داشته به طوری که خطا برای تغییر ۱ درجه سلسیوس دمای محیط حدود ۰/۲٪ ایجاد می‌شود که اصلاح نمودن، آن را می‌تواند به ۰/۲ درصد کاهش دهد [۳۰، ۳۱]. با توجه به توضیح‌های ارائه شده می‌توان خطای کلی اندازه‌گیری را حدود ۰/۱٪ در نظر گرفت.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی ویژگی‌های جریان در اطراف یک استوانه بیضوی با نسبت محور  $AR=2$ ، قرار گرفته در نزدیکی یک صفحه تخت در اعداد رینولدز ۱۵,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ پرداخته شد. اثرات تغییر نسبت فضای خالی (۲-۱)  $G/B$  و عدد رینولدز بر روی ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه

آشفته قرار دارد ( $G/B > 0.5$ ) با افزایش  $G/B$  مقدار ضریب پسا کاهش می‌یابد. کاهش مقدار ضریب پسا در عدد رینولدز ۳۰,۰۰۰ نسبت به ۱۵,۰۰۰ بیش‌تر می‌باشد. علت تفاوت کار حاضر با نتایج مرجع [۱۴] در  $G/B > 0.5$  این است که در تحقیق چوی و لی به دلیل استفاده از سیم اغتشاش ساز در لبه ابتدایی صفحه تخت، لایه مرزی دارای ضخامت ۷۵ میلی‌متر بود که تا آخرین نسبت  $G/B$  استوانه در داخل لایه مرزی آشفته غوطه‌ور بود.



شکل (۱۰): تغییرات ضریب پسا بر حسب  $G/B$ ، مطالعه

حاضر در  $\delta=0.38B$  و  $Re=15,000$  و  $30,000$ ، نتایج تجربی چوی و لی [۱۴] در  $\delta=3.54B$  و  $Re=14,000$ ، نتایج عددی سارکار [۱۱] در  $Re=1440$ .

قرارداشتن استوانه در داخل لایه مرزی باعث افزایش بیش‌تر تبادل مومنومی و در نتیجه منجر به افزایش ضریب پسا می‌گردد؛ اما در کار حاضر ضخامت لایه مرزی نازک بوده و استوانه تا  $G/B < 0.5$  در داخل لایه مرزی آشفته قرار دارد و بعد از آن در خارج از لایه مرزی قرار گرفته که منجر به کاهش تبادل مومنومی و در نتیجه کاهش ضریب پسا می‌گردد.

#### ۵- عدم قطعیت نتایج

اندازه‌گیری فرآیندی است که طی آن مقدار یک کمیت معین می‌شود. تمامی اندازه‌گیری‌ها با خطا همراه هستند. عدم آگاهی ما در مورد اندازه و علامت خطای اندازه‌گیری، عدم قطعیت نامیده می‌شود. تخمین عدم قطعیت، توصیف و تعیین خطای اندازه‌گیری به صورت آماری است. بنابراین نتیجه یک

افزایش می‌یابد. مقدار عدد استروهال در عدد رینولدز

$30,000$  نسبت به  $15,000$  کم‌تر بود و

(۶) نشان داده شد که ضریب پسا با افزایش  $G/B$  کاهش

می‌یابد که مقدار آن در  $Re=30,000$  نسبت به

$15,000$  کم‌تر بود.

#### ۷- مراجع

1. Marumo, E., Suzuki, K. and Sato, T. "A Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder", *Int. J. Fluid Mechanics*, Vol. 87, No. 1, pp. 121-141, 1978.
2. Bearman, P. and Zdravkovich, M. "Flow around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary", *Int. J. Fluid Mechanics*, Vol. 89, No. 1, pp.33-47, 1978.
3. Angrilli, F., Bergamaschi, S., and Cossalter, V., "Investigation of Wall Induced Modifications to Vortex Shedding from a Circular Cylinder", *Int. J. Fluids Engineering*, Vol. 104, No. 4, pp. 518-522, 1982.
4. Taniguchi, S. and Miyakoshi, K. "Fluctuating Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder and Interference with a Plane Wall", *Int. J. Experiments in Fluids*, Vol. 9, No. 4, pp. 197-204, 1990.
5. Tulapurkara, E., Ramjee, V. and Rajasekar, R. "Interaction Between Boundary Layer and Wakes of Different Bodies", *Int. J. AIAA*, Vol. 28, No. 6, pp. 1032-1037, 1990.
6. Tulapurkara, E., Khoshnevis, A. and Narasimhan, J. "Wake-Boundary Layer Interaction Subject to Convex and Concave Curvatures and Adverse Pressure Gradient", *Int. J. Experiments in fluids*, Vol. 31, No. 6, pp. 697-707, 2001.
7. Qu, Q., Wang, W., Liu, P. and Agarwal, R.K. "Airfoil Aerodynamics in Ground Effect for Wide Range of Angles of Attack", *Int. J. AIAA*, Vol. 53, No. 4, pp. 1048-1061, 2015.
8. Suh, S.-B., Jung, K.-H. and Chun, H.-H. "Numerical and Experimental Studies on Wing in Ground Effect", *Int. J. Ocean System Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 110-119, 2011.
9. Seif, M. S. and Tavakoli, M. "A Practical Method for Investigation of Aerodynamic and Longitudinal Static Stability of Wing-in-Ground Effect", *Int. J. Maritime Technology*, Vol. 4, No. 16, pp. 11-19, 2015.
10. Ong, M.C., Utnes, T., Holmedal, L.E., Myrhaug, D. and Pettersen, B. "Numerical Simulation of Flow Around a Circular Cylinder Close to a Flat Seabed at High Reynolds Numbers Using a  $k-\epsilon$  Model", *Int. J. Coastal Engineering*, Vol. 57, No. 10, pp. 931-947, 2010.
11. Huang, R.F., Hsu, C.M. and Lin, W.C. "Flow Characteristics Around Juncture of a Circular Cylinder Mounted Normal to a Flat Plate", *Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 55, pp. 187-199, 2014.

بیضوی در داخل و خارج از یک لایه مرزی کاملاً آشفته که ضخامتش  $0/38$  برابر ارتفاع سطح مقطع استوانه بود ( $\delta=0/38B$ )، بررسی گردید. به منظور انجام آزمایش‌ها از تونل باد دمیده مدارباز استفاده شد. داده‌برداری برای  $\gamma$  موقعیت طولی پشت استوانه انجام گرفت. برای بررسی پدیده‌های ذکر شده، پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها به دست آمد و توسط آن پارامترهای ضریب پسا و نقصان سرعت محاسبه گردید. نتایج به دست آمده نشان دادند که تداخل دنباله و لایه‌مرزی به مقدار عدد رینولدز و نسبت  $G/B$  وابسته است. در ادامه به ارائه نتایج به دست آمده دیگر از این تحقیق پرداخته شده است:

(۱) پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها در

منطقه دنباله نزدیک، به شدت وابسته به  $G/B$  و مقدار

عدد رینولدز می‌باشند،

(۲) تداخل دنباله و لایه‌مرزی به جز در  $G/B=0/1$ ، در

عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  سریع‌تر

اتفاق می‌افتد. همچنین، در  $G/B>1$  تداخل دنباله و

لایه مرزی به علت وجود ناحیه جریان پتانسیل بین

دنباله و لایه مرزی، در منطقه ریزش گردابه (دنباله

دور) اتفاق می‌افتد. همچنین، ملاحظه شد که پارامتر

نقصان سرعت در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به

$15,000$  کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد،

(۳) با افزایش  $G/B$ ، دنباله پهن‌تر می‌شود و تبادل

مومنتمومی افزایش می‌یابد، مخصوصاً در محدوده

نسبت فضاهای خالی کوچک ( $G/B=0/1-0/5$ ) که در

آن اثرات نزدیکی به صفحه تخت قابل توجه است.

برای نسبت فضاهای خالی ( $G/B=1$ ) و بالاتر، میزان

تبادل مومنتمومی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد اثر

صفحه تخت کاهش یافته است،

(۴) تداخل دنباله و لایه مرزی در مؤلفه نوسانی سرعت

نسبت به سرعت متوسط سریع‌تر می‌باشد. در

$G/B=0/1-0/5$  میزان شدت اغتشاش‌ها در منطقه

تداخل لایه مرزی و لایه برشی سطح پایینی استوانه

در عدد رینولدز  $30,000$  نسبت به  $15,000$  بیش‌تر

می‌باشد؛ اما در  $G/B\geq 1$  به دلیل کاهش اثر صفحه

تخت شدت اغتشاش‌ها در عدد رینولدز  $30,000$

نسبت به  $15,000$  کم‌تر می‌باشد،

(۵) مشخص شد که عدد استروهال تقریباً مستقل از

ضخامت لایه مرزی بوده و با افزایش  $G/B$  مقدار آن



25. Modi, V. and Wiland, E. "Unsteady Aerodynamics of Stationary Elliptic Cylinders in Subcritical Flow", *Int. J. AIAA*, Vol. 8, No. 10, pp. 1814-1821, 1970.
26. Modi, V. and Dikshii, A. "Near-Wakes of Elliptic Cylinders in Subcritical Flow", *Int. J. AIAA*, Vol. 13, No. 4, pp. 490-497, 1975.
27. Van Dam, C.P. "Recent Experience with Different Methods of Drag Prediction", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 751-798, 1999.
28. Goldstein, S. "A Note on the Measurement of Total Head and Static Pressure in a Turbulent Stream", *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 155, No. 886, pp. 570-575, 1936.
29. Ardekani, M.A., "Hotwire Anemometer", Tehran: K.N. Toosi Univ. of Tech. Publications, 2006 (in persian).
30. Yavuzkurt, S. "A Guide to Uncertainty Analysis of Hot-Wire Data", *Int. Jo. Fluids Engineering*, Vol. 106, No. 2, pp. 181-186, 1984.
31. Jorgenson, F. "How to Measure Turbulence with Hot Wire Anemometers", *Dantec Dynamics*, 2004.
12. Sarkar, S. and Sarkar, S. "Large-Eddy Simulation of Wake and Boundary Layer Interactions Behind a Circular Cylinder", *Int. J. Fluids Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 091201, 2009.
13. Blom, M., Hutan, A., Krauthem, B., Smeets, Vanwesenbeeck, E.J., Vonk, B., Van Uffelen, E. and De Zutter, G. "Flow Topology around a Cylinder In the Vicinity of a Bluff Body", 2015.
14. Choi, J.-H. and Lee, S.-J. "Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer", *Int. J. Fluids and Structures*, Vol. 14, No. 5, pp. 697-709, 2000.
15. Michelis, T. and Kotsonis, M. "Interaction of an Off-Surface Cylinder With Separated Flow From a Bluff Body Leading Edge", *Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 63, pp. 91-105, 2015.
16. Cavalheiro, M.G., Woiski, E. R. and Vieira, E.D.R. "Experimental Study of Flow Past an Elliptic Cylinder Near a Flat Plate", *Conference At Belem do Para, Berzil*, 2014.
17. Wang, X. and Tan, S. "Near-Wake Flow Characteristics of a Circular Cylinder Close to a Wall", *Int. J. Fluids and Structures*, Vol. 24, No. 5, pp. 605-627, 2008.
18. Amin, S. and Das, D.K. "Numerical Investigation of the Wake Affected Unsteadiness on Flat Plate Boundary Layer", *J. Mech. Eng.*, Vol. 43, No. 1, pp. 15-22, 2013.
19. Nirooei, M.H. "Numerical Simulation of Turbulent Flow around a Square Cylinder Near a Flat Surface", *Master of science Thesis, Department of Mechanical Engineering Sharif University, Sharif University*, 2010 (In persian).
20. Sarkar, S. and Sarkar, S. "LES of Flow Past Circular and Elliptic Cylinders in Proximity to a Wall", *In Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Seoul, Korea*, 2009.
21. Wang, X. and Tan, S. "Comparison of Flow Patterns in the Near Wake of a Circular Cylinder and a Square Cylinder Placed Near a Plane Wall", *Int. J. Ocean Engineering*, Vol. 35, No. 5, pp. 458-472, 2008.
22. Khabbouchi, I., Guellouz, M. and Nasrallah, S.B. "A Study of the Effect of the Jet-Like Flow on The Near Wake Behind a Circular Cylinder Close to a Plane Wall", *Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 285-300, 2013.
23. Terukazu, O., Hideya, N. and Yukiyasu, T. "Heat Transfer and Flow Around an Elliptic Cylinder", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, No. 10, pp. 1771-1779, 1984.
24. Ota, T., Aiba, S., Tsuruta, T. and Kaga, M. "Forced Convection Heat Transfer From on Elliptic Cylinder of Axis Ratio 1:2", *Bulletin of JSME*, Vol. 26, No. 212, pp. 262-267, 1983.