

بررسی تجربی طیف فرکانسی ریزش گردابه ها از جسم لبه پهن دوتایی به صورت سری با مقطع نیم دایره ای

استفاده از جسم لبه پهن دوتایی، راهکاری برای بهبود دقت دبی سنج گردابه ای می باشد. در این تحقیق تجربی، با استفاده از تونل باد و جریان سنج سیم داغ ریزش گردابه های ناشی از مدل دوتایی با سطح مقطع نیم دایره که به صورت سری نصب شده اند در نسبت های مختلف l/d (قطر و l شکاف بین دو استوانه نیم دایره ای) اندازه گیری و بررسی شده است. نتایج نشان می دهد، با افزایش l/d ، عدد استروهاال کاهش می یابد. همچنین با بررسی میزان انحراف از معیار تکرار پذیری خوانش عدد استروهاال و منحنی نرمال گاوس، استفاده از مدل دوتایی با مقطع نیم دایره برای نسبت های $0 < l/d < 0.9$ و $1.4 < l/d < 3$ جهت استفاده در دبی سنج های گردابه ای مناسب بوده و دقت اندازه گیری آن با سطح اطمینان ۹۵٪ کمتر از ۱/۸٪ است.

احسان اردکانی^۱

دانشجوی دکتری

فواد فرحانی^۲

دانشیار

محمد علی اردکانی^۳

استاد

واژه های راهنما: ریزش گردابه ها، عدد استروهاال، مدل لبه پهن دوتایی، طیف فرکانسی، دبی سنج گردابه

۱- مقدمه

پدیده ریزش گردابه ها ناشی از اجسام لبه پهن از سال ۱۸۷۸ توسط استروهاال مورد مطالعه قرار گرفته است. هنگامی که یک جسم لبه پهن در جریان سیال قرار می گیرد، گردابه ها به طور متناوب از هر یک از سطوح جانبی جسم لبه پهن ریزش می کنند. فرکانس بی بعد شده ریزش گردابه ها، عدد استروهاال ($St = \frac{f \times d}{U}$) می باشد که در آن f فرکانس ریزش گردابه ها، d مشخصه طولی جسم لبه پهن و U سرعت متوسط جریان آزاد است. روشکو^۴ [۱] نشان داد که عدد استروهاال ریزش گردابه های ناشی از یک استوانه با مقطع دایره در محدوده عدد رینولدز بالاتر از ۳۰۰، ثابت بوده و مقدار آن تقریباً ۰/۲۰۵ و مستقل از عدد رینولدز است.

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، e.ardekani@irost.ir

^۲ دانشیار، پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، f.farhani@irost.ir

^۳ نویسنده مسئول، استاد، پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ardekani@irost.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

بر این اساس وی برای اولین بار ایده ساخت دبی‌سنج گردابه‌ای را پیشنهاد نمود. از مزایای این نوع دبی‌سنج می‌توان به نداشتن قطعات متحرک، افت فشار کم، قابلیت اطمینان بالا، عدم حساسیت به خواص سیال و دما اشاره نمود [۲، ۳]. همچنین عدم نیاز به کالیبراسیون متناوب از دیگر ویژگی‌های دبی‌سنج گردابه‌ای می‌باشد. با این حال، دبی‌سنج گردابه‌ای در دبی‌های کم معایب خاص خود از جمله نسبت سیگنال به نویز کم و کاهش دقت اندازه‌گیری را دارد [۴].

تلاش‌های زیادی به منظور بهبود عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای و افزایش دقت اندازه‌گیری آن، انجام شده است. یکی از روش‌ها، برای بهبود عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای، بهینه نمودن شکل جسم لبه‌پهن و یا دوتایی نمودن آن به صورت سری می‌باشد [۵-۷]. پانکانین^۱ [۸]، با بهینه نمودن هندسه جسم لبه‌پهن و همچنین محل قرارگیری حسگر، پایداری فرکانس حاکم و خطی بودن دبی‌سنج گردابه‌ای را بهتر و در نتیجه دقت اندازه‌گیری را بهبود داد. هوندا^۲ و یاماساکی^۳ [۹] با استفاده از دو جسم لبه‌پهن سری، حساسیت دبی‌سنج گردابه‌ای برای دبی‌های کم و همچنین تکرارپذیری ریزش گردابه‌ها را افزایش دادند. ایگارشی^۴ [۱۰-۱۲]، تکرارپذیری ریزش گردابه‌ها و قدرت گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی با مقطع دایره و نیم‌دایره به قطر d که با یک فاصله l ، از یکدیگر به صورت سری قرار دارند را بررسی نمود. نتایج نشان داد، هنگامی که نسبت بی‌بعد شده دایره و نیم‌دایره (l/d) ، حدود ۰/۱۵ تا ۰/۱۶ است، ریزش گردابه‌های ناشی از جسم دوتایی، منظم‌تر و قوی‌تر می‌باشد. همچنین وی نشان داد، برای جسم دوتایی از نوع مثلث و نیم‌دایره که به صورت سری و با نسبت بی‌بعد $0/15 < l/d < 0/16$ از یکدیگر قرار دارند، ریزش گردابه‌ها قوی‌تر و منظم‌تر می‌شود. لازم به ذکر است که نسبت انسداد مدل در تحقیقات وی ۰/۲ تا ۰/۳ می‌باشد. بنتلی^۵ و بنسون^۶ [۱۳]، ریزش گردابه‌های ناشی از ترکیب‌های سری اجسام لبه‌پهن با مقطع مستطیل شکل را به صورت تجربی بررسی نمودند و دریافتند که برای برخی از ترکیب‌های اجسام دوتایی، ریزش گردابه‌ها، تکرارپذیری مناسب‌تری را برای طیف وسیعی از سرعت جریان، نسبت به یک جسم لبه‌پهن مستطیلی شکل منفرد دارد. بنتلی و همکارانش [۱۴]، جسم دوتایی لبه‌پهن که ترکیبی از جسم اول با سطح مقطع مستطیل و جسم دوم با سطح مقطع مثلث بوده و به صورت سری قرار گرفته‌اند را به صورت تجربی و با استفاده از تصویر برداری بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که در برخی از فاصله‌های میان دو جسم، ریزش گردابه‌های ناشی از جسم دوتایی از لحاظ تکرارپذیری بهتر از جسم تکی بوده، همچنین قدرت ریزش گردابه‌ها نیز بهبود یافته است. فو^۷ و یانگ^۸ [۱۵]، ارتعاش ناشی از ریزش گردابه‌های دو جسم لبه‌پهن با مقطع مثلث که به صورت سری قرار دارند را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که نسبت سیگنال به نویز گردابه‌ها بهتر شده و در نتیجه استفاده از جسم دوتایی در دبی‌سنج‌های گردابه‌ای را پیشنهاد دادند. پنگ^۹ و همکارانش [۷]، ریزش گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی با

¹ Pankanin

² Honda

³ Yamasaki

⁴ Igarshi

⁵ Bentley

⁶ Benson

⁷ Fu

⁸ Yang

⁹ Peng

سطح مقطع مثلثی که به صورت سری قرار دارند را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تکرارپذیری و حساسیت سیگنال به نویز اجسام دوتایی مناسب بوده و آن را برای استفاده در دی‌سنج گردابه‌ای نیز پیشنهاد دادند. همچنین در ارتباط با الگوی جریان پایین دست دو جسم لبه پهن با مقطع دایره‌ای که به صورت سری قرار دارند، تحقیقات گوناگونی به صورت عددی و تجربی انجام گرفته است [۱۶]. ایگارش [۱۱] با استفاده از مرئی سازی، الگوی‌های مختلف جریان برای دو جسم لبه پهن با مقطع دایره‌ای را ارائه داد، که این الگوها بستگی به نسبت بی بعد l/d (فاصله دو مرکز دایره) و عدد رینولدز دارد. برای عدد رینولدز ۱۵۰۰۰، هنگامی که نسبت بی بعد l/d کم‌تر از ۱/۷ می‌باشد، دو سیلندر به اندازه کافی به هم نزدیک بوده و جریان جدا شده از جسم اول به جسم دوم برخورد نمی‌کند و جسم دوم تحت تأثیر ناحیه جدایش جسم اول می‌باشد. به عبارت دیگر دو جسم، مانند یک جسم لبه پهن در نظر گرفته می‌شود. برای نسبت‌های l/d بیش‌تر از ۱/۷ و کم‌تر از ۳/۷ جریان جدا شده از سیلندر اول به سیلندر دوم برخورد می‌کند. به عبارت دیگر لایه‌های برشی جریان، جدا شده از استوانه بالادست، دوباره روی سطح استوانه پایین دست برخورد کرده و ممکن است در شکاف دو استوانه گردابه ایجاد شود. با افزایش نسبت l/d بیش‌تر از ۳/۷، ریزش گردابه‌ها به طور کامل از هر استوانه اتفاق افتاده و ممکن است بر یکدیگر تأثیر گذارند. برای l/d بزرگ‌تر از ۴ برای تمامی اعداد رینولدز، پدیده پرش اتفاق می‌افتد، به عبارت دیگر ریزش گردابه‌ها قبل از رسیدن به جسم دوم کامل می‌شود. شو^۱ و ژو^۲ [۱۷]، عدد استروهل پایین دست دو جسم لبه پهن با مقطع دایره را در اعداد رینولدز ۱۲۰۰ تا ۴۲۰۰۰ به صورت تجربی بررسی نموده و نشان دادند که عدد استروهل بستگی به l/d دارد. هنگامی که این نسبت برابر ۱ می‌باشد، عدد استروهل حدود ۰/۳ بوده و با افزایش l/d به مقدار ۲، عدد استروهل به حدود ۰/۱۵ کاهش می‌یابد. هنگامی که نسبت l/d از ۲ تا ۵ افزایش می‌یابد، عدد استروهل نیز از مقدار ۰/۱۵ تا ۰/۱۸ افزایش دارد. با افزایش نسبت l/d از ۵ به ۱۵، عدد استروهل نیز افزایش یافته و از حدود ۰/۱۸ به ۰/۲۱ رشد یافته که تقریباً برابر عدد استروهل یک استوانه تنها خواهد بود.

بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد، هدف از استفاده دو جسم لبه پهن که به صورت سری قرار دارند، تقویت ریزش گردابه‌ها می‌باشد. به طوری که نسبت سیگنال به نویز و تکرارپذیری اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها نیز افزایش یابد. دقت اندازه‌گیری دی‌سنج گردابه‌ای به طیف فرکانسی اطراف فرکانس حاکم (فرکانس ریزش گردابه‌ها) بستگی دارد. با شناخت طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، می‌توان دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را نیز مشخص نمود. در اطراف فرکانس حاکم، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، هرچقدر باریک‌تر باشد و یا به عبارت دیگر، انحراف از معیار آن کم‌تر باشد، سطح اطمینان اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها بالاتر و در نتیجه دقت اندازه‌گیری دی‌سنج افزایش می‌یابد.

اکثر تحقیقات انجام شده در ارتباط با مدل دوتایی، به صورت تجربی بوده و نتایج آن برای بهبود کیفیت دی‌سنج‌های گردابه‌ای به‌ویژه برای جریان‌های کم می‌تواند قابل استفاده باشد. گستردگی اشکال و نحوه قرارگیری آن سبب شده که تحقیقات انجام گرفته، کاملاً هدفمند و قابل مقایسه نباشد. همچنین بحث‌هایی در ارتباط با طیف فرکانسی و دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، تغییرات فرکانس ریزش گردابه‌ها بر مبنای نسبت بی بعد دو جسم لبه پهن با مقطع نیم‌دایره به طور کامل انجام پذیرفته است. در این مقاله ریزش

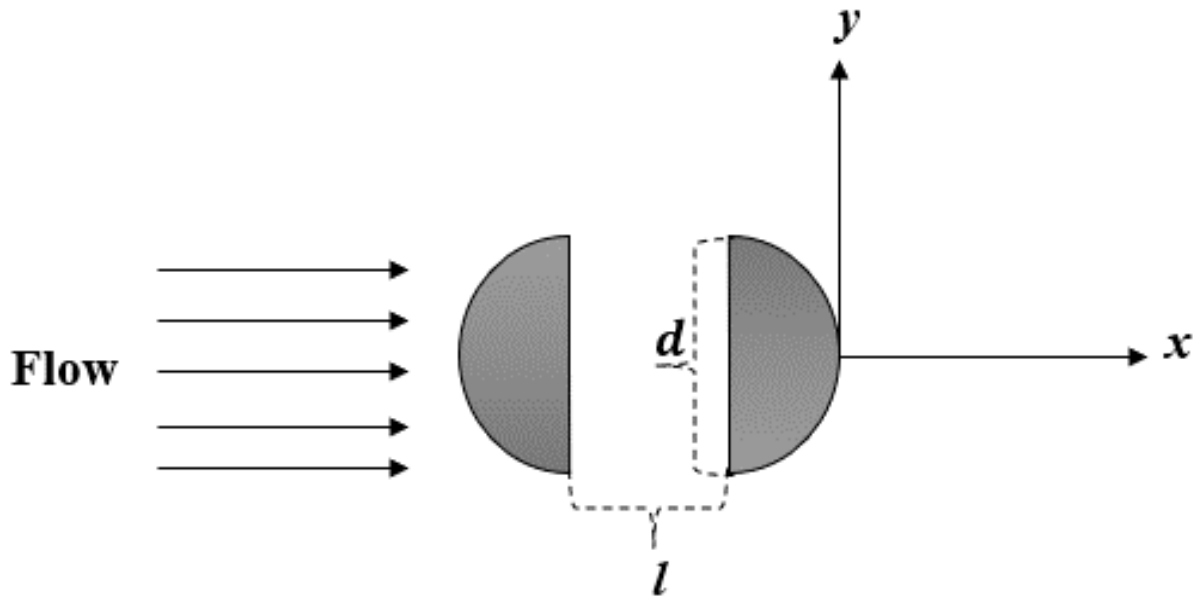
¹ Xu² Zhou

گردابه‌های ناشی از جسم لبه پهن دوتایی با مقطع نیم‌دایره (مطابق شکل (۱)) به صورت تجربی بررسی شده است. تأثیر فاصله بین دو جسم بر روی فرکانس ریزش گردابه‌ها و طیف فرکانسی آن، همچنین دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مقاله، قابل استفاده در دبی‌سنج‌های گردابه‌ای می‌باشد.

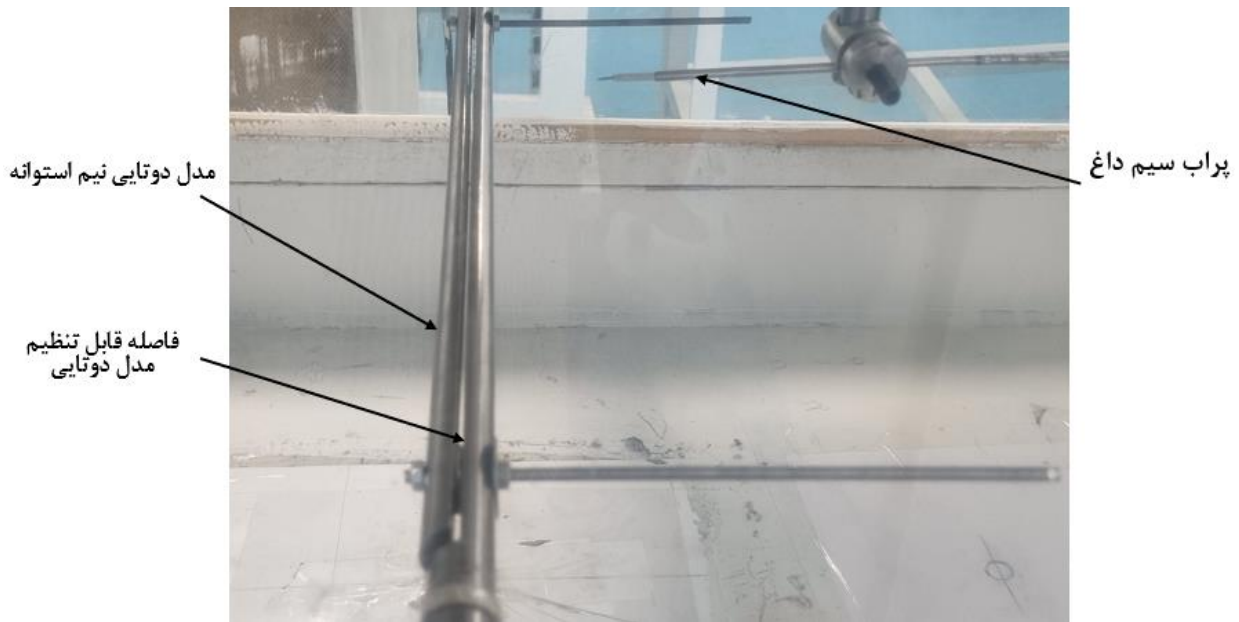
۲- روش آزمایش

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه تونل باد پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شده است. تونل باد مورد استفاده از نوع مدار بسته با سطح مقطع اتاق آزمون $60\text{ Cm} \times 60\text{ Cm}$ است و نسبت نازل تونل باد فوق ۱۲ می‌باشد. سرعت تونل باد با استفاده از کنترل دور از ۲ تا 28 m/s قابل تنظیم است. به منظور یکنواخت نمودن سرعت جریان هوا و کاهش اغتشاش‌های آن از ۴ سری توری با مش ۲۰ و ۲۴ در اتاق آرامش، به همراه لانه زنبوری استفاده شده است. غیر یکنواختی سرعت تونل باد کمتر از 0.1% و مقدار شدت اغتشاش‌های تونل باد در مرکز اتاق آزمون، کم‌تر از 0.2% است. ریزش گردابه‌های ناشی از مدل، با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ ساخت شرکت فراسنجش صبا اندازه‌گیری شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک بعدی می‌باشد. سیم پراب از نوع تنگستن با قطر ۵ میکرون است. عدم قطعیت اندازه‌گیری جریان هوا با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ 1.57% می‌باشد [۱۸، ۱۹]. به منظور کالیبراسیون جریان‌سنج سیم‌داغ و همچنین اندازه‌گیری سرعت جریان هوا بالادست مدل، که جریان هوا پایا بوده و شدت اغتشاش آن نیز کم است، از لوله استاتیکی پیتوت^۱ استفاده می‌شود. لوله استاتیکی پیتوت مورد استفاده در این تحقیق از نوع استاندارد بوده است. برای کالیبره نمودن دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، به سرعت‌های مشخص و معلوم نیاز است تا ولتاژهای خروجی متناظر با این سرعت‌ها اندازه‌گیری شوند. برای ایجاد سرعت‌های مشخص و کالیبره نمودن دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ در جریان هوا به دستگاه کالیبراتور نیاز است، که معمولاً از تونل باد با ابعاد مختلف و یا مخزن هوای فشرده به همراه نازل استفاده می‌شود. پس از مشخص نمودن سرعت‌های مرجع و ولتاژهای خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، رابطه $E = f(U)$ تعیین می‌شود. به منظور جابه‌جایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده پراب استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقت جابه‌جایی 0.1 mm در سه بعد می‌باشد که با استفاده از رایانه حرکت آن قابل کنترل است. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم‌داغ از طریق کارت اخذ داده از نوع NI به رایانه ارسال و توسط نرم افزار Flow Ware تجزیه و تحلیل شده و سرعت لحظه‌ای مشخص می‌شود. با اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای، می‌توان سرعت متوسط، شدت اغتشاش‌ها و سرعت نوسانی جریان را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از تبدیل فوریه، سرعت نوسانی را از حوزه زمان به حوزه فرکانس تغییر داده و در نتیجه می‌توان فرکانس ریزش گردابه‌ها را اندازه‌گیری نمود. مدل مورد استفاده در این تحقیق، دو نیم‌دایره به قطر 16 mm می‌باشد که دارای شکاف یک بعدی در امتداد قطر آن (مطابق شکل (۱)) است، همچنین محور مختصات در شکل فوق نشان داده شده است. شکل (۲)، تصویر مدل لبه پهن دوتایی نیم‌دایره را نشان می‌دهد که با استفاده از پیچ‌های تنظیم، می‌توان فاصله بین دو نیم‌دایره را تنظیم نمود.

¹ Pitot tube



شکل ۱- مدل لبه پهن دوتایی استوانه نیم دایره به همراه محور مختصات



شکل ۲- تصویر مدل لبه پهن دوتایی استوانه نیم دایره که دارای قابلیت تنظیم فاصله است

در این تحقیق در ابتدا شکاف مدل دوتایی را صفر نموده و مدل را به صورت استوانه دایره ای یکپارچه درآورده و سرعت جریان و ریزش گردابه ها پایین دست مدل اندازه گیری نموده و نتایج آن با نتایج سایر محققین صحنه گذاری شد. عدد استروهال مدل با سطح مقطع دایره برابر 0.205 است که در این تحقیق این عدد استروهال برای مدل استوانه دایره ای به دست آمده و نتایج آن تأیید شده اند. سپس فاصله شکاف مدل دوتایی را افزایش داده و آزمایش ها تکرار می شوند. تغییرات فاصله شکاف مدل دوتایی در این تحقیق در بازه $0/1 \leq l/d \leq 3$ بوده و عدد رینولدز این تحقیق 10500 در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی دقت اندازه گیری فرکانس ریزش گردابه ها، طیف فرکانسی آن با منحنی نرمال گاوس برازش شده، سپس با در نظر گرفتن سطح اطمینان 95% ، داده ها تجزیه و تحلیل می شوند.

۳- نتایج

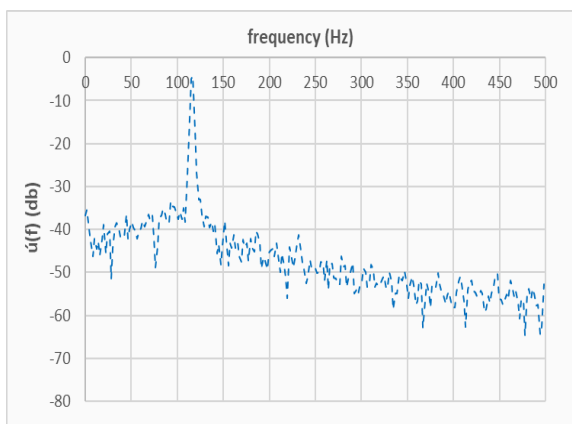
نتایج این تحقیق در دو بخش بررسی می‌شود که در بخش ابتدایی، عدد استروهال و یا به عبارت دیگر فرکانس ریزش گردابه‌ها و در بخش دوم عدم قطعیت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها بررسی می‌شوند.

۳-۱- بررسی عدد استروهال

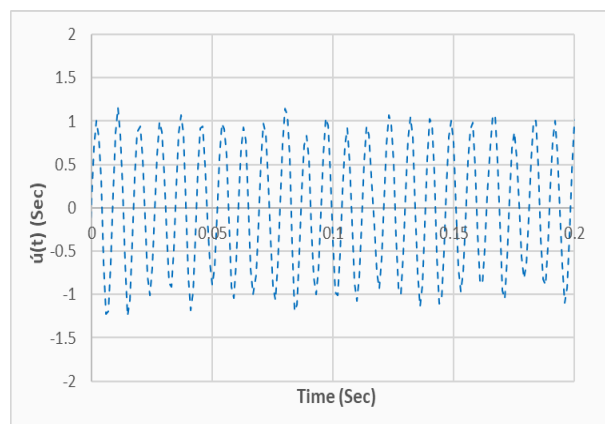
شکل (۳-الف) اسیلوگرام سرعت نوسانی پایین دست مدل دوتایی ($x/d = 2$ و $y/d = 2$) را نشان می‌دهد. سرعت جریان هوا در محل اندازه‌گیری برابر سرعت جریان آزاد بوده و همچنین شدت اغتشاش‌های جریان کمتر از ۶٪ می‌باشد. مطابق مرجع [۲۰]، این نقطه برای اندازه‌گیری جریان آزاد و ریزش گردابه‌ها مناسب است. مطابق شکل (۳-الف) سرعت نوسانی نزدیک به موج سینوسی می‌باشد که مشخص کننده ریزش گردابه‌ها است [۲۱]. به منظور به دست آوردن فرکانس حاکم و یا به عبارت دیگر فرکانس ریزش گردابه‌ها، نیاز است که سرعت نوسانی جریان از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شود که این امر با استفاده از تبدیل فوری انجام می‌شود. شکل (۳-ب) طیف فرکانسی سرعت نوسانی را نشان می‌دهد که فرکانس حاکم در آن ۱۲۶ Hz است.

۳-۱-۱- بررسی فرکانس ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل استوانه دایره‌ای و نیم‌دایره

شکل (۴)، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل استوانه دایره‌ای، مدل نیم‌دایره با سطح مقطع محدب رو به جریان و مدل نیم‌دایره با سطح محدب پشت به جریان را در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰ نشان می‌دهد. محور عمودی شکل‌های فوق به صورت لگاریتمی (dB) می‌باشد. فرکانس ریزش گردابه‌های مدل استوانه دایره‌ای ۱۲۶ Hz بوده و این فرکانس برای نیم‌دایره با سطح محدب رو به جریان ۱۳۲ Hz و نزدیک به مدل استوانه دایره‌ای می‌باشد. در حالی که مدل نیم‌دایره با سطح محدب پشت به جریان دارای فرکانس ریزش گردابه‌های به مراتب کمتر و ۸۰ Hz است که بیانگر تفاوت شدید، ناحیه جدایش و لایه‌های برشی میان مدل‌های نیم‌دایره با سطح محدب رو و پشت به جریان دارد.

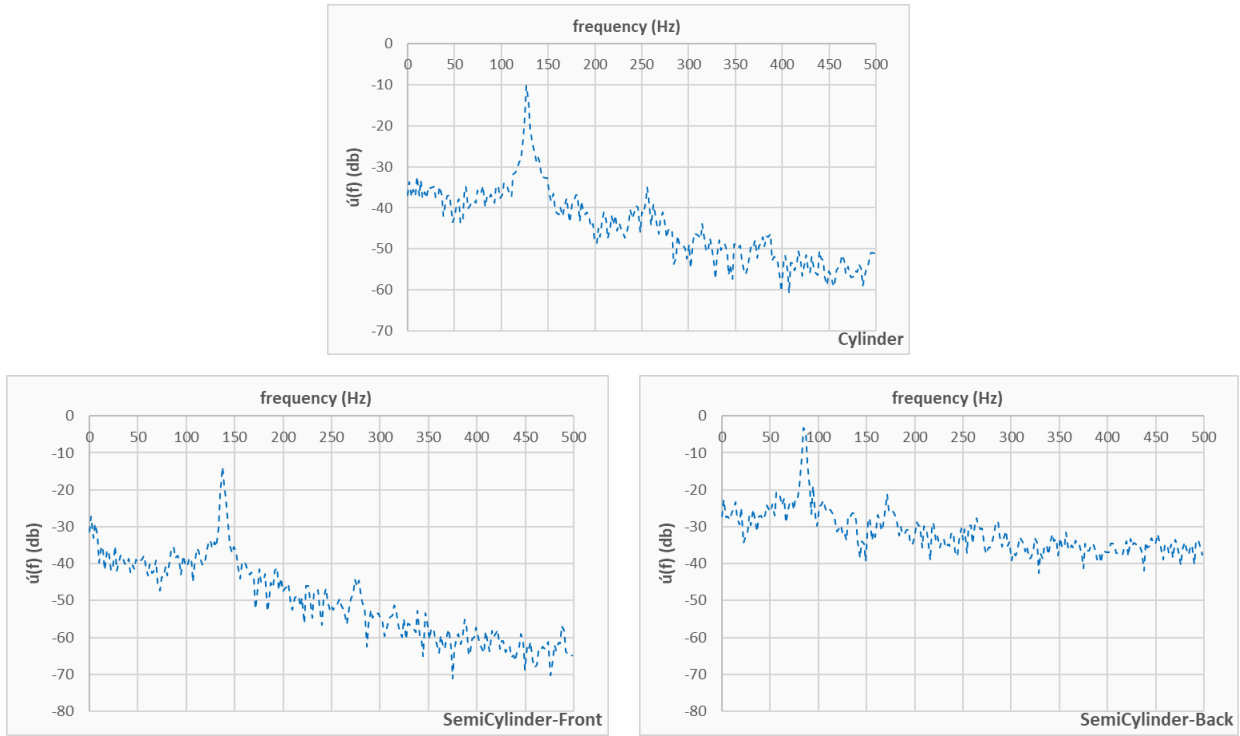


(ب)



(الف)

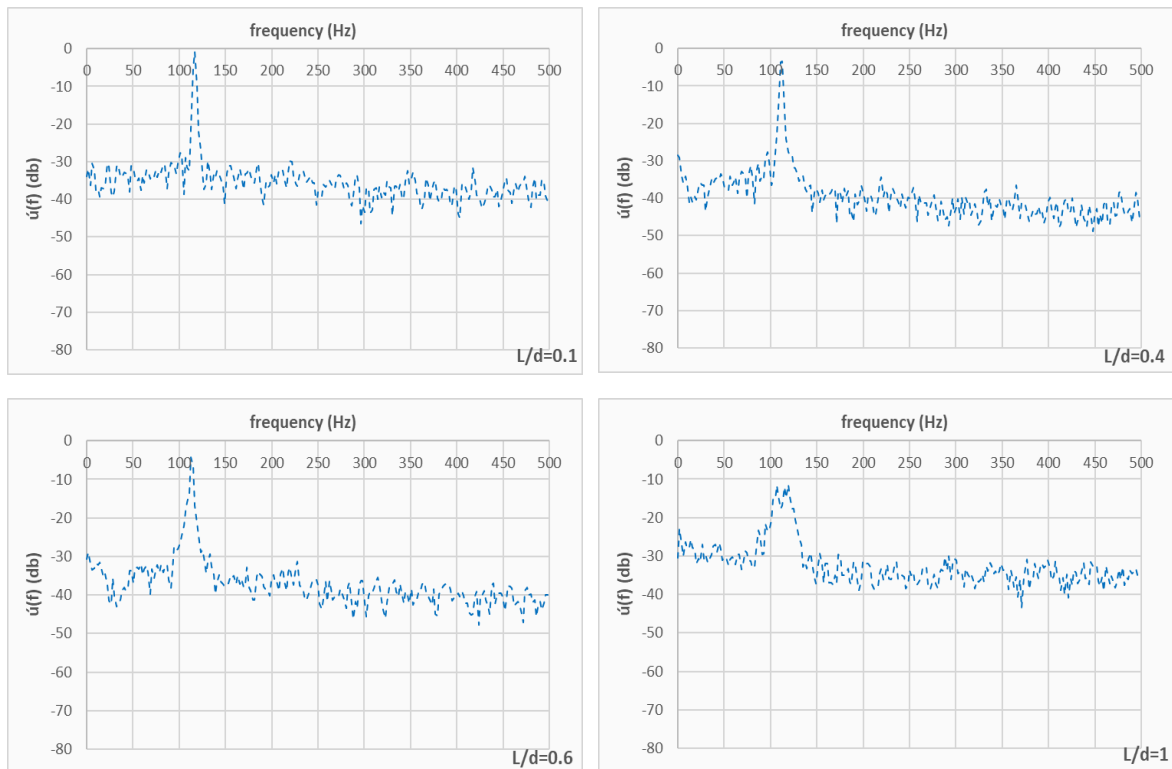
شکل ۳- (الف) اسیلوگرام و (ب) طیف فرکانسی سرعت نوسانی جریان، پایین دست مدل دوتایی در $x/d = 2$ و $y/d = 2$ و عدد رینولدز ۱۰۵۰۰ در $l/d = 0.15$

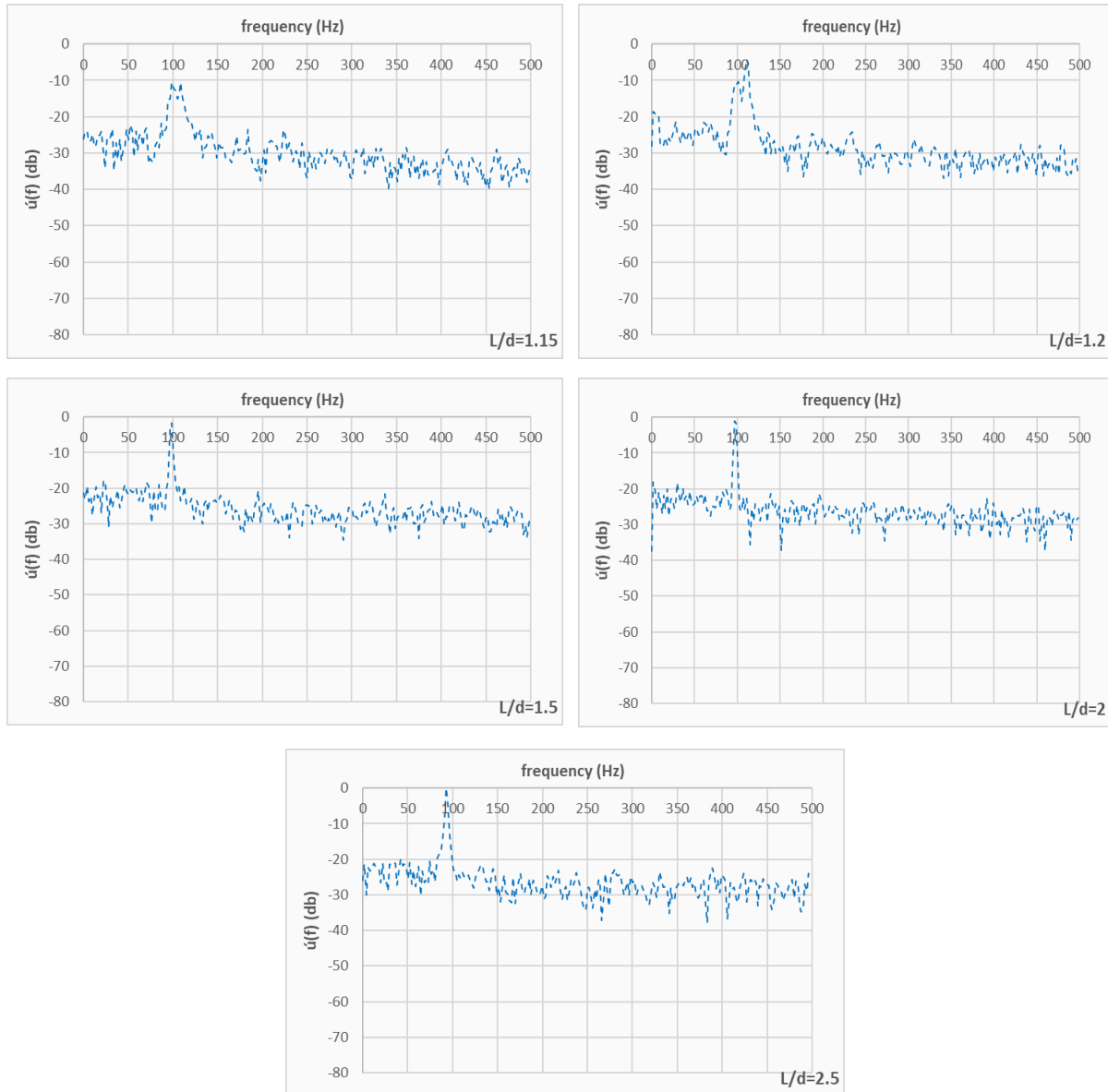


شکل ۴- طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل استوانه دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰

۳-۱-۲- بررسی فرکانس ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای

شکل (۵) طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل دوتایی با فواصل شکاف بی بعد شده l/d را در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰ نشان می‌دهد.





شکل ۵- طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره برای نسبت‌های l/d مختلف در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰

مطابق شکل فوق، برای مدل دوتایی فرکانس ریزش گردابه‌ها بستگی به نسبت l/d داشته به طوری که با افزایش l/d در بازه ۰ تا ۳، فرکانس ریزش گردابه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی تعداد زیادی از طیف‌های فرکانسی ریزش گردابه‌ها که برخی از آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده، می‌توان دریافت در بازه $0/9 < l/d < 1/4$ ، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها مشابه محدوده‌ی $0 < l/d < 0/9$ و $1/4 < l/d < 3$ نبوده و طیف فرکانسی در اطراف فرکانس حاکم پهن‌تر است، این بدان مفهوم است که دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها در این بازه کم‌تر بوده و مناسب استفاده در دبی‌سنج نخواهد بود. برای بازه خارج از $0/9 < l/d < 1/4$ ، طیف فرکانسی در اطراف فرکانس حاکم باریک‌تر می‌باشد. مطابق شکل (۵) در بازه $0 < l/d < 0/9$ ، دامنه فرکانس حاکم نسبت به دامنه سایر فرکانس‌ها، قوی‌تر از بازه $1/4 < l/d < 3$ می‌باشد.

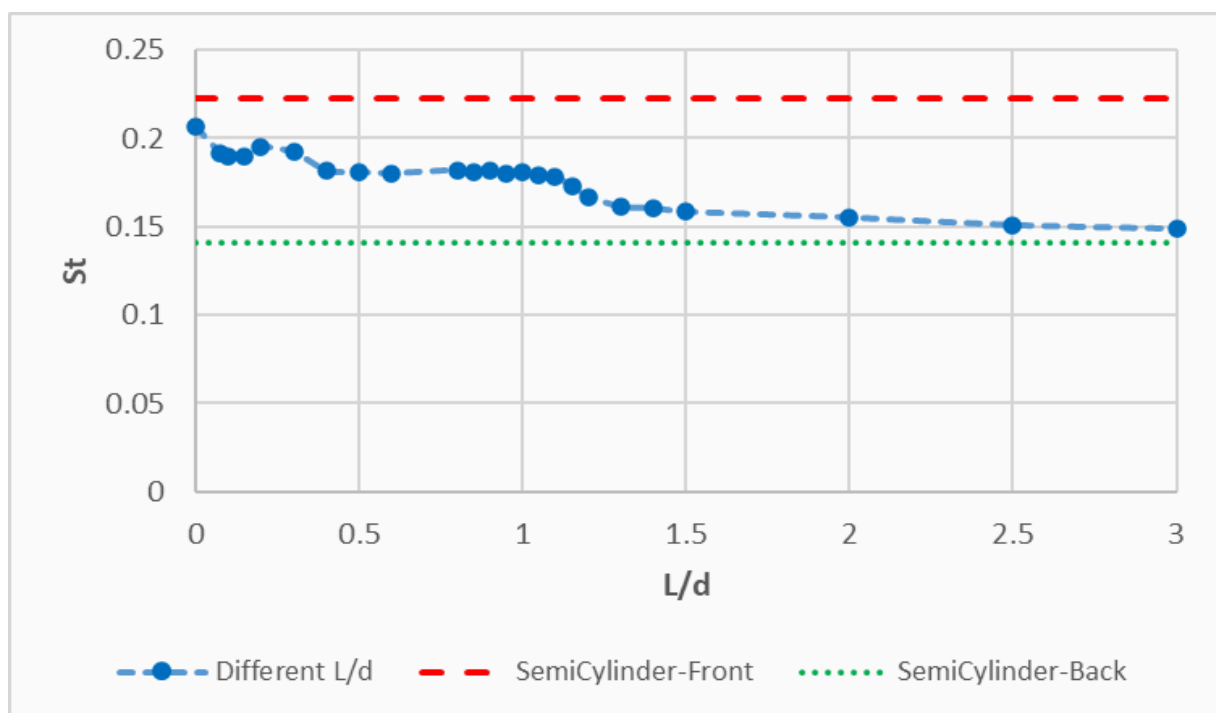
به نظر می‌رسد هنگامی که $l/d < 0/9$ است، دو مدل را می‌توان به عنوان یک جسم لبه پهن در نظر گرفت ولی در بازه $0/9 < l/d < 1/4$ ، لایه‌های برشی جریان ناشی از مدل اول بر مدل دوم تأثیر گذاشته و برخورد دارند. برای بازه $1/4 < l/d < 3$ ، فاصله دو مدل به اندازه کافی بزرگ است که گردابه‌های ناشی از جسم اول، قبل از رسیدن به جسم دوم کامل می‌شود.

۳-۱-۳- بررسی تأثیر نسبت بی‌بعد (l/d) بر روی عدد استروهاال

به منظور بررسی تأثیر l/d ، فرکانس ریزش گردابه‌ها به صورت عدد استروهاال بی‌بعد شده و در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین در شکل فوق، عدد استروهاال نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن رو به جریان است نیز نشان داده شده که برابر $0/۲۲$ است. این مقدار نزدیک به عدد استروهاال استوانه دایره‌ای می‌باشد. برای نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن پشت به جریان است عدد استروهاال $0/۱۴$ می‌باشد، که تفاوت شدیدی با مدل استوانه دایره‌ای دارد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در مرجع [۲۲] که با استفاده از مرئی‌سازی انجام شده، می‌توان تشخیص داد که الگوی جریان برای مدل نیم‌دایره که قسمت محدب آن پشت به جریان است مشابه الگوی جریان برای مدل مثلث متساوی‌الاضلاعی است که رأس آن پشت به جریان است. لازم به ذکر است که عدد استروهاال در این حالت برای مدل مثلثی برابر $0/۱۳۵$ می‌باشد [۲۳] که این عدد با عدد استروهاال برای حالت نیم‌دایره که قسمت محدب آن پشت به جریان می‌باشد، نزدیک است.

مطابق شکل (۶) تغییرات عدد استروهاال در بازه $0/4 < l/d < 1/1$ ، تقریباً ثابت و برابر $0/۱۸$ می‌باشد. برای بازه $1/1 < l/d < 1/4$ ، تغییرات عدد استروهاال زیاد می‌باشد. در بازه $1/4 < l/d < 3$ ، مقدار عدد استروهاال با شیب کمی کاهش یافته و از $0/۱۶$ به $0/۱۵$ می‌رسد.

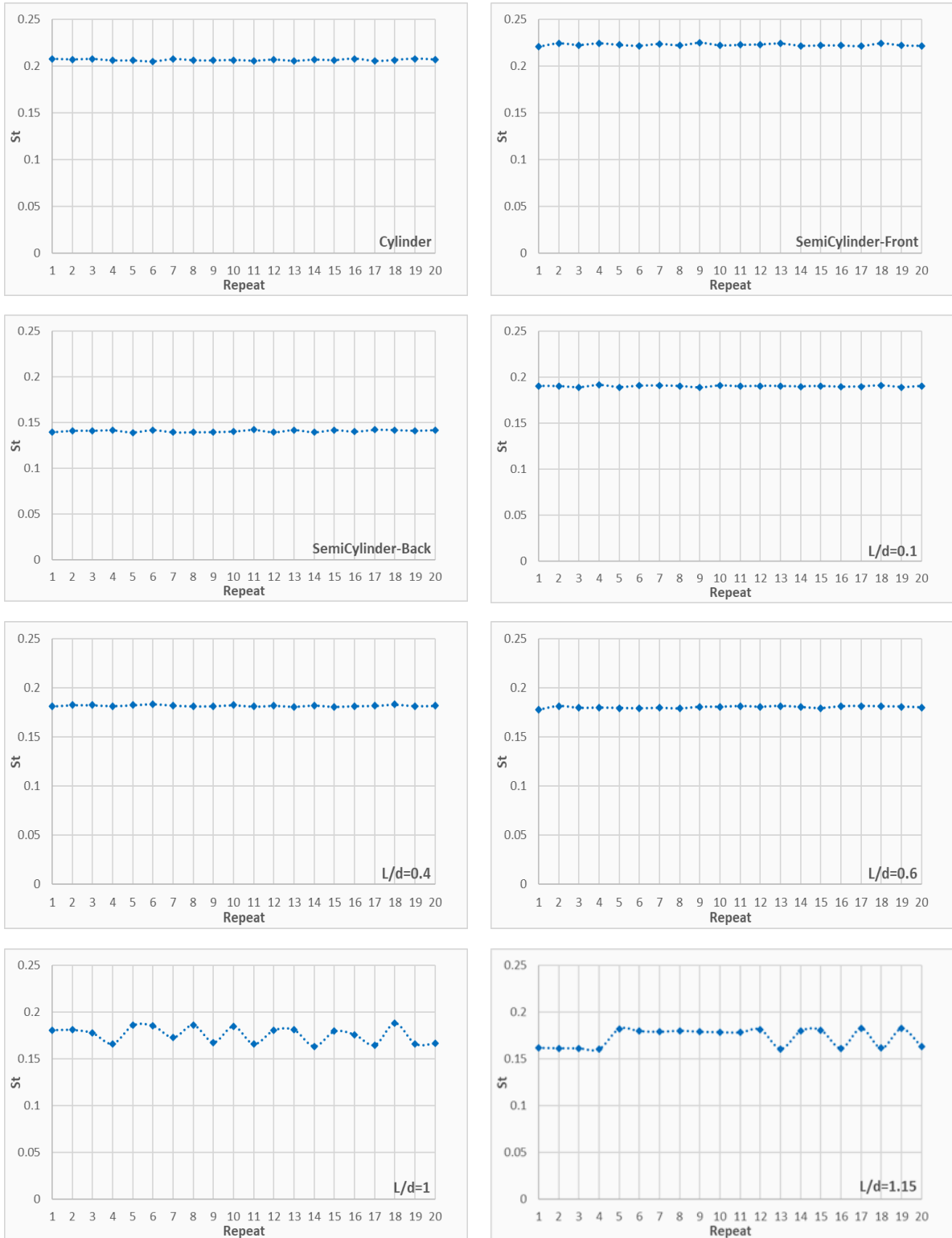


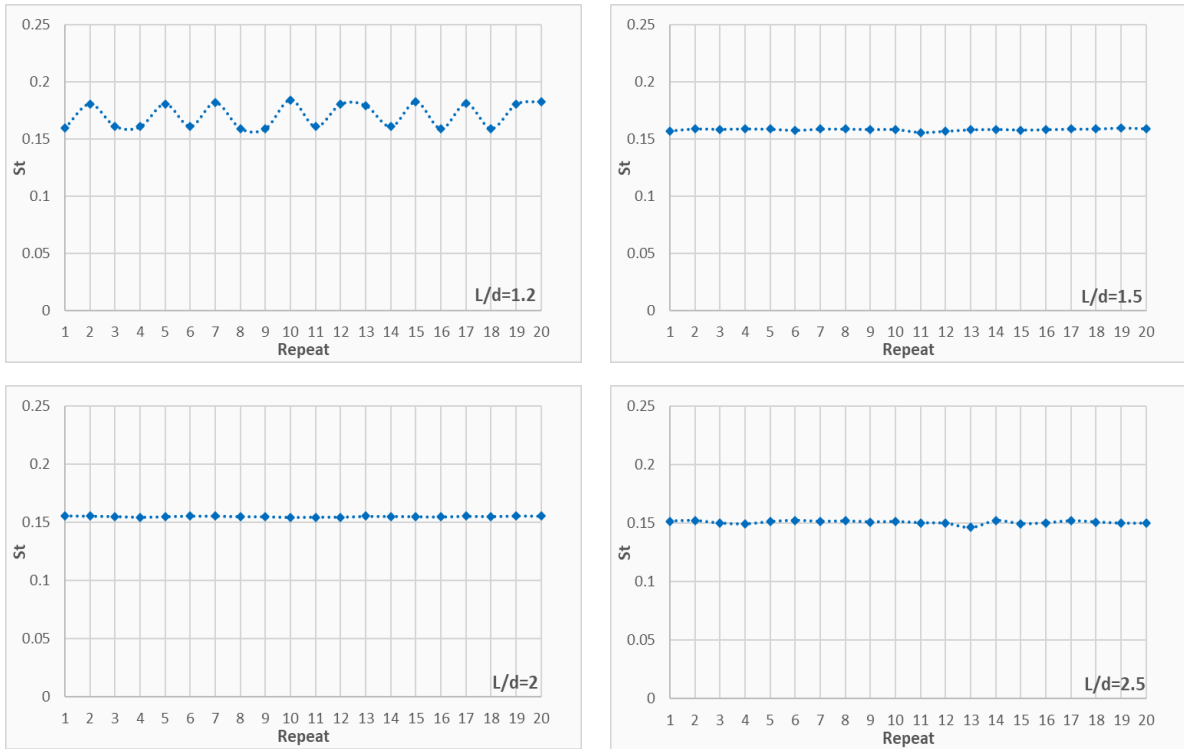
شکل ۶- تغییرات عدد استروهاال ریزش گردابه‌ها بر حسب l/d

۳-۱-۴- تکرارپذیری عدد استروهاال

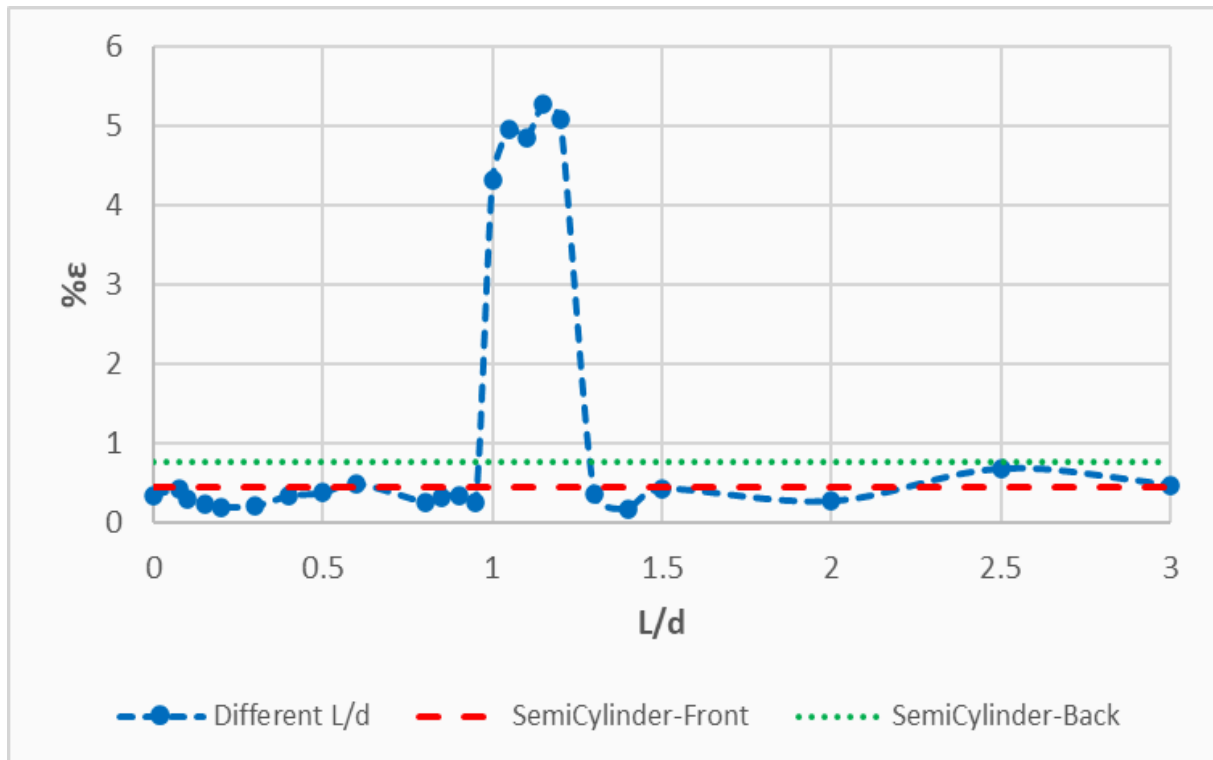
یکی از مهم ترین بحث ها در استفاده از دبی سنج ها، تکرارپذیری اندازه گیری دبی جریان می باشد که به انتخاب مدل لبه پهن بستگی دارد.

شکل (۷) تکرارپذیری عدد استروهاال برای مدل دوتایی را برای نسبت های مختلف l/d نشان می دهد.





شکل ۷- تکرارپذیری عدد استروهمال برای مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای در رینولدز ۱۰۵۰۰ و نسبت‌های l/d مختلف



شکل ۸- انحراف معیار تکرارپذیری عدد استروهمال مدل دوتایی بر حسب نسبت l/d در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰

به منظور کمی‌سازی این تکرارپذیری، انحراف معیار تکرارپذیری، مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود که در آن \bar{S} عدد استروهمال متوسط و S_i عدد استروهمال اندازه‌گیری شده است.

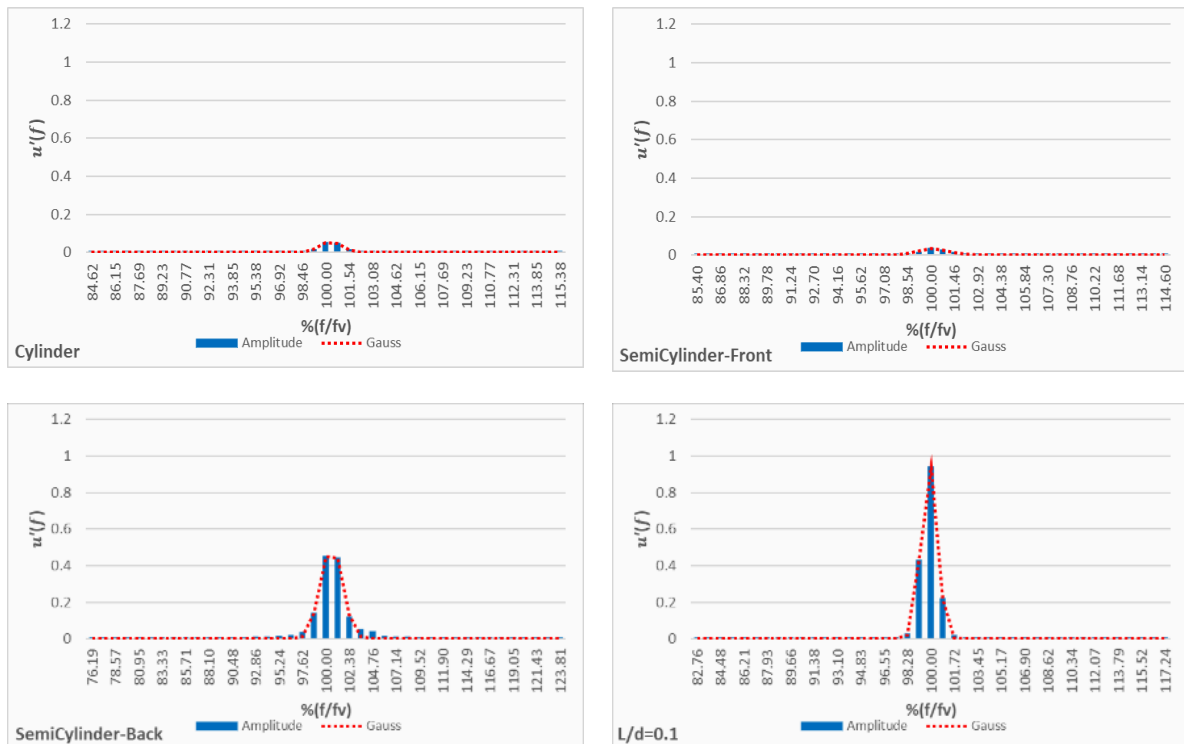
$$\% \varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|S_i - \bar{S}|}{\bar{S}} \times 100 \quad (1)$$

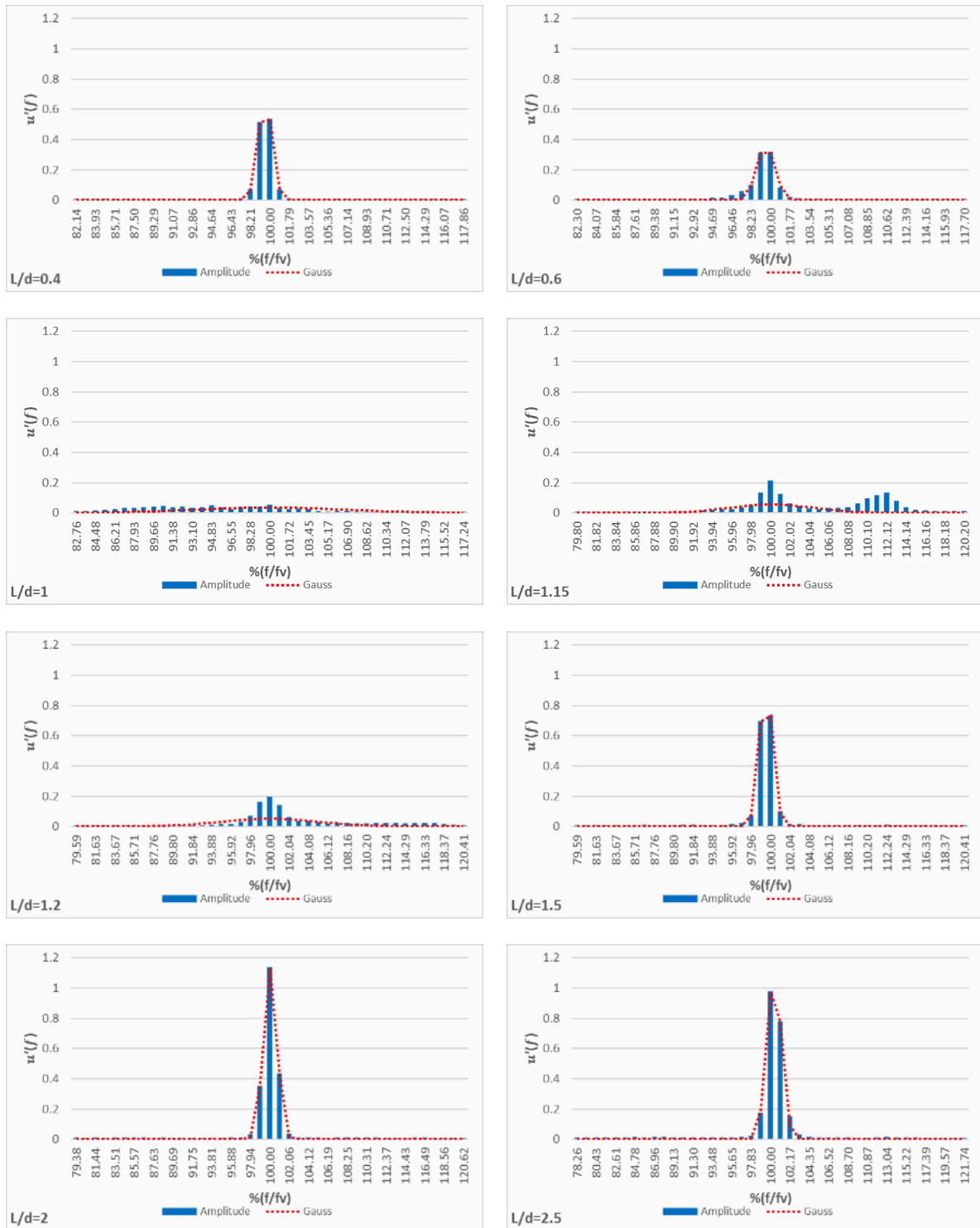
شکل (۸) انحراف معیار ناشی از تکرارپذیری عدد استروهاال بر حسب نسبت بی بعد شده مدل دوتایی را نشان می دهد. مطابق شکل مذکور، این انحراف معیار برای مدل های دایره و نیم دایره ای که قسمت محدب آن رو به جهت جریان هوا است، برابر ۰/۵٪ مشخص شده و برای مدل نیم دایره که سطح محدب آن پشت به جریان هوا است، این مقدار ۰/۸٪ است. مقدار انحراف از معیار عدد استروهاال مدل دوتایی بستگی به نسبت بی بعد شده l/d دارد. هنگامی که $l/d < 0/9$ و $l/d > 1/4$ این انحراف معیار حدود ۰/۳٪ تا ۰/۸٪ می باشد. به عبارت دیگر، این انحراف معیار کمتر و یا در حدود مدل استوانه دایره ای است. در بازه $0/9 < l/d < 1/4$ مقدار انحراف معیار ناشی از تکرارپذیری عدد استروهاال، به حدود ۰/۵٪ افزایش می یابد. با توجه به طیف فرکانسی ریزش گردابه ها (شکل (۵)) نیز می توان تشخیص داد که در این بازه l/d ، طیف فرکانسی اطراف فرکانس حاکم پهن شده است. لذا انتخاب جسم لبه پهن دوتایی با نسبت بی بعد $0/9 < l/d < 1/4$ مناسب استفاده در دبی سنجی نمی باشد.

۳-۲- بررسی عدم قطعیت اندازه گیری فرکانس ریزش گردابه ها

۳-۲-۱- بررسی آماری طیف فرکانسی ریزش گردابه ها اطراف فرکانس حاکم

همان گونه که بیان شد، برای بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه ها، سرعت نوسانی جریان با استفاده از تبدیل فوریه (FFT) و با در نظر گرفتن اصل نایکوئیست از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شده است.





شکل ۹- دامنه فرکانس ریزش گردابه‌ها در اطراف فرکانس حاکم برای نسبت‌های مختلف L/d در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰ (خطوط نقطه‌چین مربوط به منحنی برازش شده گاوس)

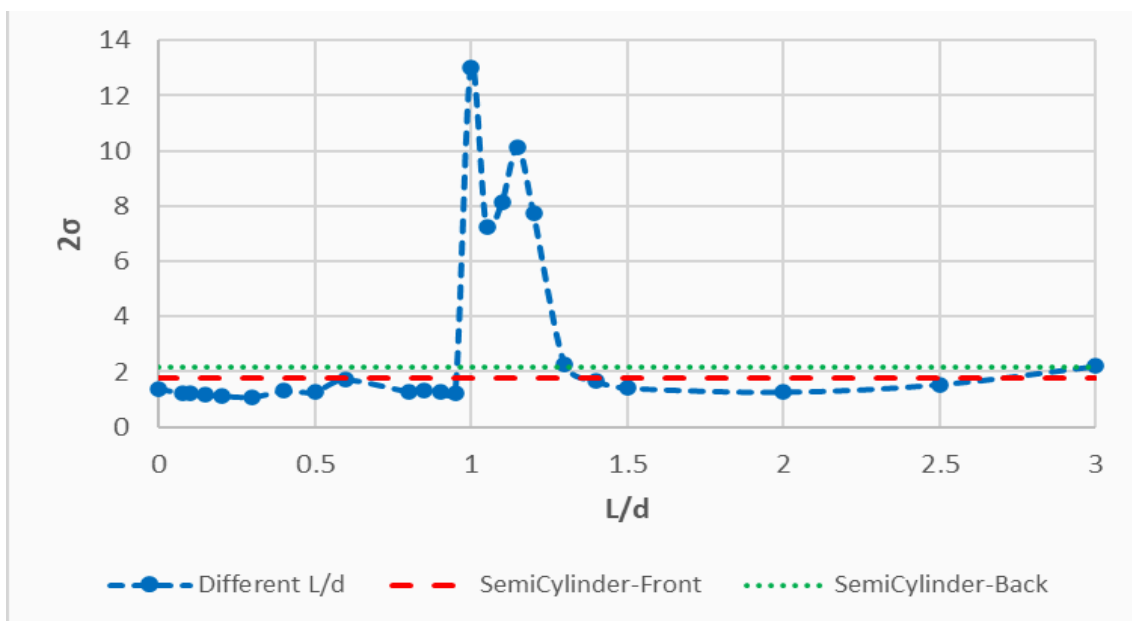
شکل (۹) توزیع طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها را در اطراف فرکانس حاکم نشان می‌دهد. به منظور بررسی عدم قطعیت و مشخص نمودن درصد خطا، محور افقی شکل (۹) با استفاده از فرکانس حاکم (فرکانس ریزش گردابه‌ها (f_v)) بی‌بعد شده و بر مبنای درصد نشان داده شده است. محور عمودی نیز دامنه فرکانس ریزش گردابه‌ها $(u'(f))$ را نشان می‌دهد.

برای تحلیل و کمی‌سازی داده‌ها، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها با استفاده از توزیع نرمال گاوس برازش می‌شوند. لازم به ذکر است بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را می‌توان با توزیع نرمال گاوس بیان نمود که چگالی آن به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود و منحنی آن به صورت زنگوله‌ای می‌باشد [۲۴].

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

در رابطه فوق، $\left(\frac{f}{f_v}\right)$ فرکانس طیف به فرکانس حاکم و σ انحراف از معیار می‌باشد. با توجه به اینکه محور افقی شکل فوق به صورت درصدی نرمالایز شده، بنابراین مقدار میانگین در رابطه فوق برابر ۱۰۰ خواهد بود. 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 [۲۴]، برای بازه σ ، سطح اطمینان ۶۸٪، برای بازه 2σ ، سطح اطمینان ۹۵٪ و برای بازه 3σ ، سطح اطمینان ۹۹٪ می‌باشد. لذا با مشخص نمودن σ از منحنی‌های به دست آمده می‌توان عدم قطعیت اندازه‌گیری ریزش گردابه‌ها را مشخص نمود.

۳-۲-۲- بررسی تأثیر نسبت بی‌بعد (l/d) بر روی عدم قطعیت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها:
 به منظور مشخص نمودن دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، سطح اطمینان ۹۵٪ را در نظر گرفته و مقدار 2σ را با استفاده از منحنی‌های برازش شده شکل (۹) محاسبه و بر حسب (l/d) ، در شکل (۱۰) نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به این که محور افقی شکل (۹)، با استفاده از فرکانس حاکم (f_v) ، بی‌بعد و به صورت درصد بیان شده است. مقدار 2σ بیان کننده دقت اندازه‌گیری و یا درصد خطای اندازه‌گیری است.



شکل ۱۰- انحراف معیار منحنی برازش شده گاوس بر حسب نسبت بی‌بعد l/d

مطابق این شکل برای نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن رو به جریان است، مقدار متوسط 2σ برابر $1/8$ می‌باشد. این بدان مفهوم است که به احتمال 95% ، دقت داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه $\pm 1/8$ فرکانس حاکم است و به عبارت دیگر به احتمال 95% اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها دارای خطایی کمتر از $\pm 1/8$ می‌باشد. در صورتی که عدم قطعیت 68% در نظر گرفته شود، خطای اندازه‌گیری در بازه σ و یا به عبارت دیگر $0/9 \pm$ خواهد بود. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که میزان 2σ برای نیم‌دایره پشت به جریان، برابر ۲ و برای جسم دوتایی بستگی به نسبت بی‌بعد شده (l/d) دارد. هنگامی که $l/d < 0/9$ ، مقدار 2σ حدود $1/2$ تا $1/8$ بوده و برای $l/d > 1/4$ نیز این مقدار حدود ۱ تا $1/8$ می‌باشد. این به این معناست که مدل دوتایی در فواصل ذکر شده، دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به مدل دایره‌ای و یا نیم‌دایره دارد. در بازه $0/9 < l/d < 1/4$ مقدار 2σ تا مقدار ۱۳ افزایش یافته، به عبارت دیگر در صورتی که فاصله بین مدل در این بازه باشد، احتمال خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها تا $13\% \pm$ خواهد بود. لذا انتخاب جسم لبه پهن دوتایی با مقطع دو نیم‌دایره با این فاصله، مناسب استفاده در دبی‌سنجی نمی‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های بهبود عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای، دوتایی و سری نمودن جسم لبه پهن از جمله مدل دوتایی نیم‌دایره می‌باشد. لذا بررسی و شناخت فرکانس ریزش گردابه‌های پایین دست مدل دوتایی و طیف فرکانسی آن دارای اهمیت بوده که می‌توان از نتایج آن در طراحی و ساخت دبی‌سنج از نوع گردابه‌ای استفاده نمود. در این پژوهش، ریزش گردابه‌ها و طیف فرکانسی آن در پایین دست مدل دوتایی از نوع نیم‌دایره به صورت تجربی در عدد رینولدز 10500 بررسی شده و نتایج آن به شرح زیر بیان می‌شود:

- عدد استروهمال مدل نیم‌دایره که قسمت محدب آن رو به جریان است، $0/22$ به دست آمده که این مقدار نزدیک به مدل دایره‌ای می‌باشد ولی عدد استروهمال برای مدل نیم‌دایره که قسمت محدب آن پشت به جریان است حدود $0/14$ است. با مطالعات انجام گرفته بر روی الگوی جریان، مشخص گردید که الگوی جریان این مدل تقریباً مشابه مثلث متساوی الاضلاع که رأس آن پشت به جریان می‌باشد، بوده و عدد استروهمال آن $0/135$ است.

- فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی، بستگی به نسبت بی‌بعد (l/d) دارد. هنگامی که فاصله دو مدل صفر می‌باشد، عدد استروهمال برابر $0/205$ و برابر مدل استوانه دایره‌ای خواهد بود. با افزایش l/d ، عدد استروهمال کاهش می‌یابد. این مقدار برای بازه $0/4 < l/d < 1/1$ تقریباً ثابت بوده و برابر $0/18$ می‌باشد. برای بازه $1/4 < l/d < 3$ ، عدد استروهمال دارای تغییرات کم بوده و مقدار آن از $0/16$ تا $0/15$ کاهش می‌یابد.

- میزان انحراف از معیار تکرارپذیری خوانش عدد استروهمال ریزش گردابه‌ها بررسی شده و مقدار آن در بازه $0 < l/d < 0/9$ کمتر از $0/5\%$ ، برای بازه $0/9 < l/d < 1/4$ در حدود 5% می‌باشد ولی در بازه $1/4 < l/d < 3$ حدود $0/5\%$ تا $0/8\%$ می‌باشد. این انحراف از معیار برای مدل نیم‌دایره که سطح محدب آن رو به جریان است $0/5\%$ و برای مدل نیم‌دایره که سطح محدب آن پشت به جریان است برابر $0/8\%$ می‌باشد.

- به منظور بررسی عدم قطعیت در اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، با استفاده از منحنی نرمال گاوس،

طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها برآزش شده و با در نظر گرفتن میزان انحراف از معیار منحنی نرمال گاوس، می‌توان با در نظر گرفتن سطح اطمینان مورد نظر، حداکثر خطای احتمالی در اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را تعیین نمود. برای مدل دوتایی نیم‌دایره‌ای، حداکثر خطا اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها بستگی به نسبت بی‌بعد l/d دارد. با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، این خطا برای بازه $0/9 < l/d < 1/4$ بالا بوده و حدود $\pm 13\%$ می‌باشد. خارج از بازه فوق، حداکثر خطا با سطح اطمینان ۹۵٪، کم‌تر از $\pm 11/8\%$ خواهد بود. در صورتی که میزان سطح اطمینان ۶۸٪ در نظر گرفته شود، خطای اندازه‌گیری از $\pm 11/8\%$ به $\pm 10/9\%$ کاهش می‌یابد.

- با توجه به میزان انحراف از معیار عدد استروهال ناشی از تکرارپذیری و همچنین بررسی منحنی نرمال گاوس برآزش شده طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، استفاده از مدل دوتایی با مقطع نیم‌دایره برای نسبت‌های $0 < l/d < 0/9$ و $1/4 < l/d < 3$ جهت استفاده در دبی‌سنج‌های گردابه‌ای پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] A. Roshko, "On the Wake and Drag of Bluff Bodies," *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 22, No. 2, pp. 124-132, 1955, <https://doi.org/10.2514/8.3286>.
- [2] S. Bailey, "2 New Flowmeters Have No Moving Parts," *Control Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 73, 1969, [A compact flowmeter that has no moving parts - Chemical Engineering | Page 1](#).
- [3] G. J. Blickley, "Vortex Flowmeters Provide Higher Accuracy, Lower Pressure Drops," *Control Engineering*, pp. 36-39, 1995, [Vortex flowmeters for all industries | Endress+Hauser](#).
- [4] N. Think, and J. Evangelisti, "Flow Modeling and Experimental Investigation of a Vortex Shedding Flow Meter," in *ASME FEDSM*, Vol. 97, pp. 109-118, 1997, [Flow measurement by a new type vortex flowmeter of dual triangulate bluff body | Request PDF](#).
- [5] J. Bentley, and J. Mudd, "Vortex Shedding Mechanisms in Single and Dual Bluff Bodies," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 14, No. 1-2, pp. 23-31, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(02\)00089-4](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(02)00089-4).
- [6] J. Peng, and M. Fang, "Response of a Dual Triangulate Bluff Body Vortex Flowmeter to Oscillatory Flow," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 35, pp. 16-27, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.11.001>.
- [7] J. Peng, X. Fu, and Y. Chen, "Flow Measurement by a New Type Vortex Flowmeter of Dual Triangulate Bluff Body," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 115, No. 1, pp. 53-59, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.03.020>.
- [8] G. L. Pankanin, "Influence of Vortex Meter Configuration of Measure Signal Parameters," In *1993 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, IEEE, pp. 337-340, 18-20 May 1993, Irvine, CA, USA, <https://doi.org/10.1109/IMTC.1993.382624>.

- [9] S. Honda, and H. Yamasaki, "Stabilization of Vortex Shedding in a Three-dimensional Flow in a Circular Pipe," *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 17, No. 7, pp. 764-769, 1981, <https://doi.org/10.9746/sicetr1965.17.764>.
- [10] T. Igarashi, "Flow Characteristics Around a Circular Cylinder with a Slit: 1st Report, Flow Control and Flow Patterns," *Bulletin of JSME*, Vol. 21, No. 154, pp. 656-664, 1978, <https://doi.org/10.1299/jsme1958.21.656>.
- [11] T. Igarashi, "Characteristics of the Flow Around Two Circular Cylinders Arranged in Tandem: 1st Report," *Bulletin of JSME*, Vol. 24, No. 188, pp. 323-331, 1981, <https://doi.org/10.1299/jsme1958.24.323>.
- [12] T. Igarashi, "Flow Characteristics Around a Circular Cylinder with a Slit: 2nd Report, Effect of Boundary Layer Suction," *Bulletin of JSME*, Vol. 25, No. 207, pp. 1389-1397, 1982, <https://doi.org/10.1299/jsme1958.25.1389>.
- [13] J. Bentley and R. Benson, "Design Conditions for Optimal Dual Bluff Body Vortex Flowmeters," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 4, No. 4, pp. 205-213, 1993, [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(93\)90027-G](https://doi.org/10.1016/0955-5986(93)90027-G).
- [14] J. Bentley, R. Benson, and A. Shanks, "The Development of Dual Bluff Body Vortex Flowmeters," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 7, No. 2, pp. 85-90, 1996, [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(97\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(97)00004-6).
- [15] X. Fu, and H. Yang, "Study on Hydrodynamic Vibration in Dual Bluff Body Vortex Flowmeter," *Chinese Journal of Chemistry*, Vol. 9, No. 2, pp. 123-128, 2001, [Online]. Available: <https://hgxb.cip.com.cn/EN/Y2001/V9/I2/123>.
- [16] B. Forouzi Feshalami, S. He, F. Scarano, L. Gan, and C. Morton, "A Review of Experiments on Stationary Bluff Body Wakes," *Physics of Fluids*, Vol. 34, No. 1, 2022, <https://doi.org/10.1063/5.0077323>.
- [17] G. Xu, and Y. Zhou, "Strouhal Numbers in the Wake of Two Inline Cylinders," *Experiments in Fluids*, Vol. 37, pp. 248-256, 2004, <https://doi.org/10.1007/s00348-004-0808-0>.
- [18] M. Ardekani, F. Farhani, and A. Nourmohammadi, "Experimental Study of Drag Coefficient of Multistrand Wires using Single Normal Hot-wire Anemometer Probe," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 50, pp. 237-244, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.07.009>.
- [19] F. E. Jørgensen, "How to Measure Turbulence with Hot-wire Anemometers: A Practical Guide," *Dantec Dynamics*, 2001, [https://www.semanticscholar.org/\[PDF\] How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide](https://www.semanticscholar.org/[PDF] How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide).
- [20] M. Ardekani, "Hot-wire Calibration using Vortex Shedding," *Measurement*, Vol. 42, No. 5, pp. 722-729, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.12.001>.
- [21] E. Ardekani, F. Farhani, and M. A. Ardekani, "Determination of Flow Angle from Measurements of Vortex Shedding Frequency Downstream of a Triangular Bluff Model using

a Single-sensor Hot-wire Probe," *Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 102731, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102731>.

[22] S. Xu, W. Zhang, L. Gan, M. Li, and Y. Zhou, "Experimental Study of Flow Around Polygonal Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 812, pp. 251-278, 2017, <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.801>.

[23] E. Ardekani, F. Farhani, and M. A. Ardakani, "Experimental Investigation of the Frequency Spectra of Vortex Shedding from a Triangular Bluff Body at Different Flow Angles," (in persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 56, No. 5, pp. 3-3, 2024, <https://doi.org/10.22060/mej.2024.23245.7733>.

[24] V. Seshadri, "*The Inverse Gaussian Distribution: Statistical Theory and Applications*", Vol. 137, Springer Science & Business Media, New York, 2012, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4612-1456-4>.

فهرست نمادهای انگلیسی

d	قطر استوانه نیم‌دایره‌ای (m)
f	فرکانس طیف (Hz)
f_v	فرکانس ریزش گردابه‌ها (Hz)
l	فاصله شکاف بین دو استوانه نیم‌دایره‌ای (m)
\bar{S}	عدد استروهل متوسط
S_i	عدد استروهل اندازه‌گیری شده
x	فاصله مدل از مبدأ مختصات در جهت جریان (m)
y	فاصله مدل از مبدأ مختصات در جهت عمود بر جریان (m)

نمادهای یونانی

σ انحراف از معیار

Experimental Investigation of Frequency Spectrum of Vortex Shedding from a Dual Bluff Body Placed in Series

Ehsan Ardekani

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

e.ardekani@irost.ir

Foad Farhani

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

f.farhani@irost.ir

*Corresponding Author: **Mohammad Ali Ardekani**

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

ardekani@irost.ir

Abstract

Using a dual bluff model has been considered an approach to enhancing the vortex flowmeter's accuracy. In this experimental research work, the vortex shedding from a dual cylindrical bluff model of semicircular cross-section, placed in series, at different l/d ratios, where d is the diameter and l is the distance between the two semicircular cylinders in series is measured and investigated using a wind tunnel and hot-wire anemometer.

Results show that the Strouhal number decreases with an increase in l/d , also show that the standard deviation of the repeatability of the Strouhal number reading and using the Gauss Normal Distribution for $0 < l/d < 0.9$ and $1.4 < l/d < 3.0$, a dual cylindrical bluff model of semicircular cross-section, placed in series, is suitable for vortex flowmeter application. In this case, at a 95% confidence level, the measurement accuracy is less than 1.8%.

Keywords: Dual bluff body, Frequency spectrum, Strouhal number, Vortex flowmeter, Vortex shedding