

# رفتار مشخصه‌های آشفتگی جریان دنباله نزدیک در اثر اندرکنش

## استوانه پشت یک ایرفویل

عبدالله شادآرام<sup>۱</sup>، یونس ممبینی<sup>۲</sup> و سید آرش سید شمس طالقانی<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۶/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۰/۲۲)

### چکیده

تداخل جریان دنباله سیال میان دو یا چند جسم را می‌توان در کاربردهای صنعتی زیادی از قبیل صنایع هوافضا و فن‌های خنک‌کننده مشاهده نمود. در این مقاله، میدان سرعت و آشفتگی دنباله نزدیک ایرفویل به همراه یک استوانه در پشت آن به وسیله جریان سنج سیم‌داغ بررسی شده است. پارامترهای اساسی این تحقیق فاصله استوانه از ایرفویل در راستای افقی و عمودی و عدد رینولدز جریان است. مدل سازی براساس نسبت قطر استوانه به طول وتر ایرفویل ( $d/c$ )، محل قرارگیری آن و عدد رینولدز  $14,300$  براساس قطر استوانه در تونل باد با مقطع آزمایش  $305 \times 305 \text{ mm}^2$  انجام گرفته است. با توجه به فرکانس گردابه‌ها، فرکانس داده‌برداری  $2 \text{ KHz}$  منظور شده است. نتایج به‌صورت نمودار شدت نوسانات سرعت، مؤلفه‌های تنش رینولدز و فرکانس گردابه‌ها در ناحیه دنباله نزدیک ارائه شده‌اند. همچنین، شدت آشفتگی تولید شده در محدوده دنباله نزدیک استوانه بررسی شده است. فرکانس گردابه‌ها با برخی داده‌های موجود مقایسه شده و از دقت کافی برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان سنج سیم‌داغ، ایرفویل، دنباله نزدیک، استوانه، گردابه، آشفتگی

## The Behavior of Turbulence Characteristics of Near-Wake Flow Due to the Interaction between an Airfoil and a Downstream Cylinder

A. Shadaram, Y. Mombeiny, and S.A.S. Taleghani

Mech. Eng. Dep't.

K.N. Toosi. Univ. of Tech.

### ABSTRACT

The interaction between the wakes of two or more bodies is important in many industrial applications, e. g., aerospace system and cooling fans. In this paper, the velocity field and the turbulence of the wake generated behind an airfoil in the presence of a circular cylinder were studied experimentally, using hot-wire anemometry. The basic parameters of this study included horizontal and vertical distance between the airfoil and the cylinder and the flow Reynolds number. The modeling was carried out according to the ratio of cylinder diameter to airfoil chord ( $d/c$ ) as well as the relative location of the airfoil and the cylinder. The Reynolds number based on cylinder diameter was 14300 (wind tunnel test section is  $305 \times 305 \text{ mm}^2$ ). Due to the frequency of vortices, the sampling rate of the experiments was set to 2kHz. The results of this research offered data such as turbulence intensities, Reynolds stresses, and vortex frequency in the near wake region. Turbulence intensity was investigated in the vicinity of near-wake behind the cylinder. Some of the vortices frequency were compared with the existing results showing relatively good agreements.

**Keywords:** Hot-Wire Anemometry, Airfoil, Near-Wake, Cylinder, Vortex, Turbulence

۱- دانشیار: shadaram@kntu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: younes.mombeiny@yahoo.com

۳- دانشجوی دکترا (نویسنده پاسخگو): arash\_taleghani@yahoo.com

## Archive of SID

## فهرست علائم

صورت تجربی و یا عددی بوده‌اند بر روی این ترکیب تمرکز داشته‌اند.

وانگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۲] با استفاده از تکنیک تصویربرداری به مطالعه تأثیر وجود یک میله نازک در جلوی مسیر جریان سیال یکنواخت بر روی یک استوانه مدور پرداختند. آن‌ها فواصل مختلف میان میله و استوانه، نسبت قطرهای مختلف میله به استوانه و قرارگیری‌های مختلف نسبت به هم را در یک عدد رینولدز خاص و تأثیر آن‌ها را بر روی ضرایب پسا، برا و فشار مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکارانش نشان دادند که با تغییر هر کدام از این پارامترها ضرایب اشاره شده تغییر می‌کنند.

هیراموتو<sup>۲</sup> و هی‌چیپ<sup>۳</sup> [۳] با استفاده از تکنیک تصویربرداری جریان همراه با دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ به بررسی جریان دنباله نزدیک و ریزش گردابه‌ها در پشت دو استوانه که به صورت موازی و غیر موازی در برابر جریان سیال و عدد رینولدز خاص قرار می‌گیرند، پرداختند. در این تحقیق، فاصله میان دو استوانه و اثرات آن بر روی جریان دنباله نزدیک پشت آن‌ها و فرکانس گردابه‌های موجود در جریان دنباله نزدیک مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه جریان دنباله نزدیک حاصل از اندرکنش میان دو یا چند جسم صلب، همانند دو یا چند استوانه مدور که در مبدل‌های حرارتی کاربرد دارد مورد مطالعات زیادی قرار گرفته است، اما مطالعات چندانی بر روی وضعیتی که یک جسم صلب که دارای شکل آئرو دینامیکی بوده، مانند ایرفویل یا صفحات باریک و اجسام صلبی مثل استوانه‌ها در پشت آن‌ها، صورت نگرفته است.

ژانگ<sup>۴</sup> و همکارانش [۴] با استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ و دستگاه اندازه‌گیری نیرو<sup>۵</sup> جریان حاصل از اندرکنش میان یک ایرفویل و استوانه، به گونه‌ای که ایرفویل در بالادست استوانه در مسیر جریان سیال قرار گرفته را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این آزمایش استوانه

c	طول وتر ایرفویل
d	قطر استوانه
f	فرکانس گردابه‌ها
h	فاصله مرکز استوانه از امتداد وتر ایرفویل
l	فاصله از لبه فرار ایرفویل در جهت جریان
u'	سرعت اغتشاشی در جهت جریان
v'	سرعت اغتشاشی در جهت عمود بر جریان
U <sub>∞</sub>	سرعت جریان آزاد
x	فاصله پراب از مرکز استوانه در جهت جریان
y	فاصله پراب از مرکز استوانه در جهت عمود بر جریان
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهل

## ۱- مقدمه

در طراحی اجسام و قطعات متحرک، بررسی جریان سیال اطراف یک جسم صلب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای مثال می‌توان به جریان دنباله نزدیک پشت استوانه‌ها، صفحات تخت، ایرفویل‌ها، پره‌ها و ترکیبی از آن‌ها اشاره نمود. جریان دنباله نزدیک، عموماً به ناحیه‌ای گفته می‌شود که در آن جریان به طور قوی تحت تأثیر شرایط جریان بالادست و مشخصات هندسی جسم قرار می‌گیرد. رفتار جریان در ناحیه دنباله نزدیک تأثیر بسزایی در ضرایب آئرو دینامیکی یک جسم دارد. از این‌رو شناخت این ناحیه و ساختار آشفتگی آن دارای اهمیت است. از آنجا که میزان آشفتگی بر اندازه ناحیه دنباله نزدیک، توزیع سرعت، توزیع فشار و نیروی پسای وارده بر اجسام تأثیر دارد، بررسی اغتشاشات جریان در این ناحیه اهمیت زیادی دارد [۱].

تاکنون مطالعات بسیاری به صورت عددی و تجربی بر روی جریان دنباله نزدیک پشت اجسام صلب منفرد هنگامی که در مسیر جریان سیال قرار می‌گیرند، انجام گرفته است. لیکن، مطالعات کمتری بر روی جریان دنباله نزدیک حاصل از اندرکنش میان دو یا چند جسم صلب صورت گرفته است؛ از آنجا که این امر اخیراً یکی از موضوعات عمده‌ای است

1- Wang  
2- Hiramotoa  
3- Higuchib  
4- Zhang  
5- Load Cell

## Archive of SID

### ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

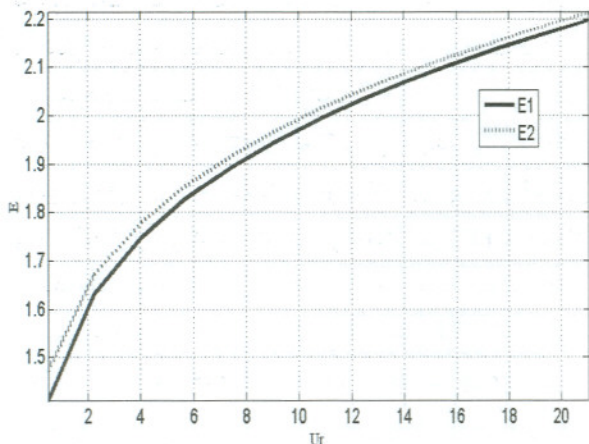
آزمایش‌ها در دستگاه تونل باد از نوع مدار باز مکشی، با فن الکتریکی دارای توان  $5/7 \text{ kw}$ ، حداکثر سرعت در محفظه آزمایش  $40 \text{ m/s}$ ، و در آزمایشگاه آئروپنایمیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام گرفته است. محفظه آزمایش دارای سطح مقطع  $305 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$  و طول  $600 \text{ mm}$ ، و جنس جداره‌های محفظه آزمایش از پلکسی-گلاس می‌باشد. شدت اغتشاشات در جهت جریان یکنواخت درون محفظه آزمایش با نصب توری مشبک همواره کمتر از  $1/4\%$  می‌باشد. نسبت انسداد مقطع کاری در این تحقیق بین  $0/4$  تا حداکثر  $0/85$  بوده و با توجه به مراجع [۸-۱۰] نشان می‌دهد که داده‌های بدست آمده قابل اعتماد است و نیازی به تصحیح تونل باد نمی‌باشد. تونل باد مجهز به دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ از نوع دما ثابت بوده و از نوع دوبعدی مدل 55P62 است. این سنسور قادر به اندازه‌گیری همزمان مؤلفه‌های سرعت‌های لحظه‌ای در راستای  $x$  و  $y$ ، مؤلفه‌ی سرعت‌های اغتشاشی  $u'$  و  $v'$ ، مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز و دیگر مشخصه‌های آشفتگی است. پیش از شروع کار، کالیبراسیون پراب توسط دستگاه کالیبراتور انجام می‌گیرد. تجهیزات بخش کالیبراسیون از مجموعه‌ای شامل کمپرسور هوا، مخزن هوای فشرده، رطوبت‌گیر، رگلاتور فشار و نازل کالیبراسیون هوا تشکیل شده است. قبل از هر آزمایش، سنسور سرعت‌سنج همراه با اتصالات مربوطه در خروجی نازل دستگاه کالیبراتور نصب شده و نسبت به شرایط جوی آزمایشگاه و برای محدوده سرعت‌هایی که در آزمایش با آن کار می‌شود، کالیبره می‌گردد. فشار و دمای آزمایشگاه به ترتیب  $668 \text{ mmHg}$  و  $25^\circ \text{C}$  می‌باشد. ایرفویل نامتقارن از نوع NACA4412 و از جنس چوب صیقلی شده و دارای طول وتر (c)  $100 \text{ mm}$  می‌باشد. استوانه از جنس آلومینیم و دارای قطر (d)  $14 \text{ mm}$  می‌باشد. عرض ایرفویل و استوانه هر دو  $300 \text{ mm}$  بوده و به بدنه محفظه آزمایش ثابت شده‌اند. استوانه و ایرفویل به صورت عمود بر دیواره‌های جانبی تونل باد به گونه‌ای نصب می‌شوند، که وتر ایرفویل در راستای جریان آزاد باشد. در شکل ۱ نمایی از تصویر برش

را در موقعیت‌های عمودی مختلفی در پشت استوانه دیگر قرار داده و به بررسی اندرکنش میان این دو پرداختند. همچنین، با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری نیرو، اثرات آن را بر روی نوسانات و اغتشاشات نیروی پسا و برا بر روی ایرفویل و استوانه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق در رینولدزهای مختلف و اندازه‌گیری نیروهای نوسانی نشان دادند، هنگامی که استوانه در جریان دنباله نزدیک پشت ایرفویل واقع می‌شود، بیشترین نوسانات نیرو بر روی ایرفویل و استوانه قرار می‌گیرد. یلدریم<sup>۱</sup> و همکارانش [۵] با استفاده از تکنیک تصویر برداری ذرات، در یک عدد رینولدز خاص همین وضعیت را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که وجود ایرفویل در بالادست جریان، بر روی مشخصه‌های جریان دنباله نزدیک روی استوانه تأثیر گذار می‌باشد.

دیاسینوس<sup>۲</sup> و همکارانش [۶] با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی وجود یک ایرفویل نامتقارن در جلوی یک استوانه چرخان که بر روی زمین قرار دارد، پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به بررسی ایرفویل در زوایای حمله مختلف و فاصله میان ایرفویل و استوانه چرخان و تأثیر آن بر روی ضرائب پسا، برا و فشار پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد که با افزایش زاویه حمله‌ی ایرفویل و افزایش فاصله میان ایرفویل و سیلندر چرخان تا مقدار معینی، ضریب پسای وارده بر استوانه چرخان کاهش می‌یابد. گرچه توسط یلدریم و همکارانش [۵] جریان از اطراف ترکیب استوانه در پشت یک ایرفویل در عدد رینولدز کم به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفته است و ژو<sup>۳</sup> و همکارانش [۷] این موضوع را به صورت عددی مورد بررسی و تحقیق قرار دادند، با وجود این، در تحقیق حاضر با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج سیم‌داغ به بررسی کامل پروفیل‌های سرعت‌های نوسانی و همچنین تنش‌های رینولدزی در فواصل افقی و عمودی مختلف استوانه از ایرفویل پرداخته و رفتار این کمیت‌ها بررسی شده است.

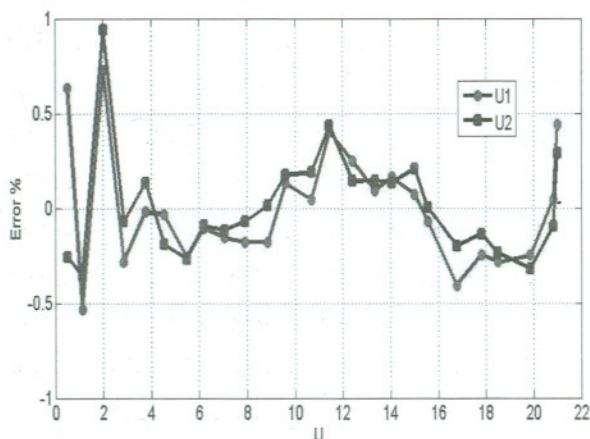
Archive of SID

و نمودار مربوط به خطای دو سنسور پراب در شکل های ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل (۲): منحنی کالیبراسیون دو سنسور سیم‌داغ به

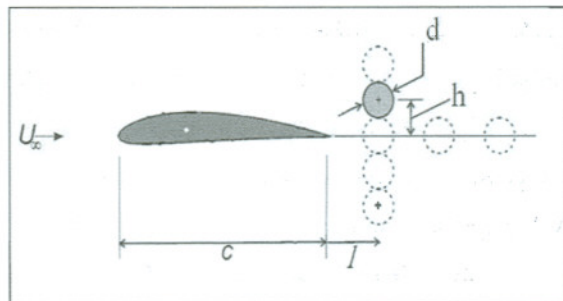
صورت تابع  $U=f(E)$ .



شکل (۳): منحنی خطای دو سنسور سیم‌داغ.

قبل از تحلیل نتایج حاصل از اندرکنش استوانه در پشت ایرفویل، مشخصه‌های آشفتگی اندازه‌گیری در دنباله مدل ایرفویل مجزا (بدون حضور استوانه) در شکل ۴ و درصد آشفتگی مؤلفه نوسانی سرعت در راستای جریان ( $u'$ ) برای استوانه مجزا (بدون حضور ایرفویل) در شکل ۵ نشان داده شده است.

خورده ایرفویل در زاویه حمله صفر و موقعیت‌های هندسی استوانه نشان داده شده است. برای سرعت جریان آزاد  $14/9\text{m/s}$ ، عدد رینولدز ( $Re$ ) مرتبط با آن براساس قطر استوانه  $Re_d=14,300$  می‌باشد. فرکانس داده‌برداری در این آزمایش  $2\text{KHz}$  در نظر گرفته شده است. زمان داده‌برداری در



شکل (۱): نمایی از قرارگیری ایرفویل و استوانه در تونل باد.

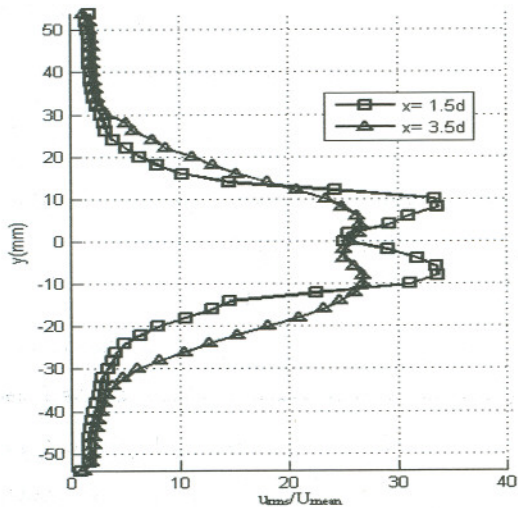
هر نقطه ۶ ثانیه بوده، که به تناسب فرکانس داده‌برداری، تعداد داده‌ای که در هر نقطه برداشت شده،  $12,000$  می‌باشد. پراب جریان سنج در جهت  $y$  از مرکز استوانه و در زیرفاصله‌های  $2\text{mm}$  توسط دستگاه تراورس جابجا شده و داده‌برداری می‌کند. پراب در جهت  $x$  از مرکز استوانه در مقاطع  $x/d=1/5, 3/5, 5/5$  از دستگاه مختصات قرار می‌گیرد.

۳- نتایج تجربی و بحث

آزمایش‌ها در دو حالت مختلف انجام شده است. برای هر آزمایش ابتدا پراب کالیبره شده در تونل باد قرار گرفته و جریان با سرعت مناسب با تنظیم دریچه‌های مخصوص برقرار شده است. فرکانس داده‌برداری  $2\text{KHz}$  و سرعت جریان یکنواخت ورودی  $14/9\text{m/s}$  برقرار شده است. در تحقیق حاضر بررسی کمی مشخصه‌های آشفتگی در دنباله نزدیک چنین ترکیبی در دو حالت ارائه شده است. پیش از بررسی و نشان دادن نتایج آزمایش‌ها ابتدا نتایج کالیبراسیون

## Archive of SID

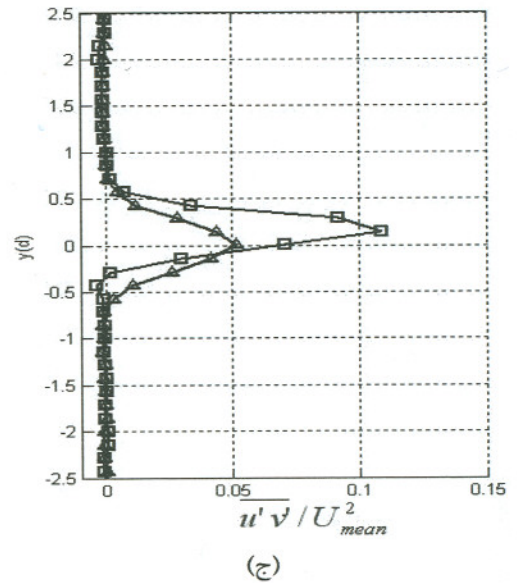
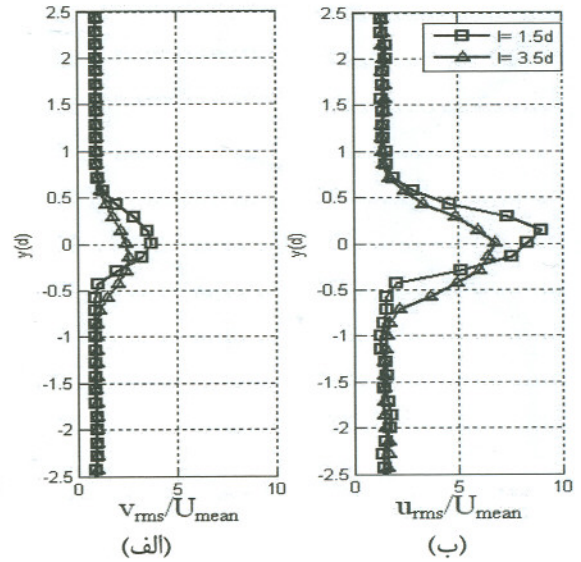
گرفته، و داده‌برداری پراب در مقاطع  $۳/۵$  و  $۱/۵$  انجام می‌گیرد. در حالت دوم استوانه در فواصل  $۵/۵$  و  $۳/۵$   $l/d=$  در وضعیت  $h/d=0$ ، و داده‌برداری پراب در مقاطع  $۵/۵$ ،  $۳/۵$ ،  $۱/۵$  انجام می‌گیرد.



شکل (۵): نمودار درصد آشفتگی در راستای جریان برای استوانه مجزا.

### ۳-۱- حالت اول

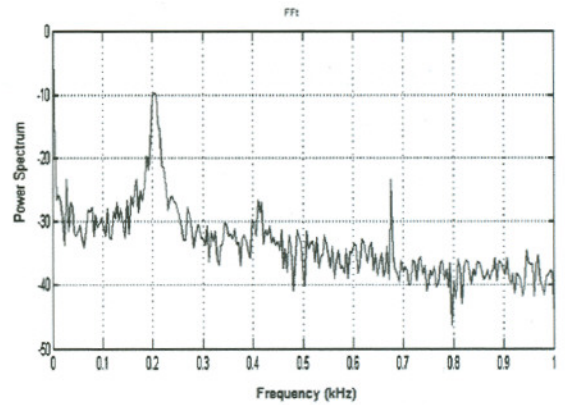
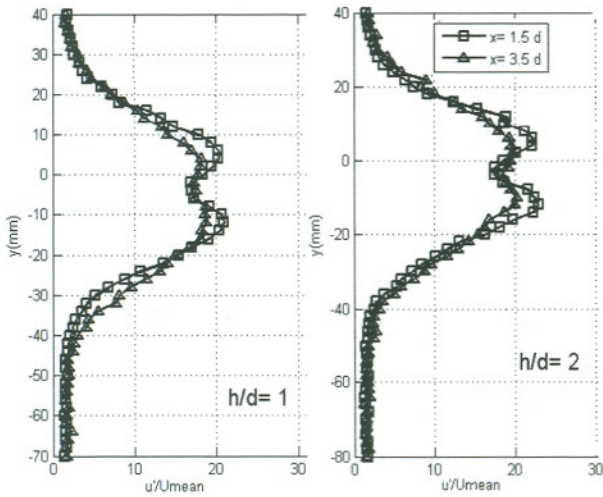
قبل از نشان دادن چگونگی مؤلفه‌های نوسانی سرعت و تنش‌های رینولدزی در وضعیت‌های مختلف، به عنوان اعتبارسنجی نتایج، تحلیل طیفی فرکانس ریزش گردابه‌ها در وضعیت  $h/d=0$  در مقطع اول در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل، در این حالت که فرکانس گردابه‌ها برابر با  $۲۰\text{ VHz}$  می‌باشد، عدد استروهمال که به صورت  $St=fd/U_\infty$  تعریف می‌شود، برابر با  $۰/۱۹۴$  بدست می‌آید. نتیجه تحقیق ژانگ و همکارانش [۴] در یک نقطه در بررسی پدیده موردنظر با شرایط مشابه، عدد استروهمال  $۰/۲$  را نشان می‌دهد. در شکل ۷ نمودار درصد آشفتگی مؤلفه نوسانی سرعت در راستای جریان ( $u'$ ) برای حالت اول در وضعیت‌های مختلف رسم شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که در وضعیت  $h/d=2$  حداکثر مؤلفه نوسانی سرعت نسبت به موقعیت‌های دیگر بیشترین مقدار را دارد. از طرفی



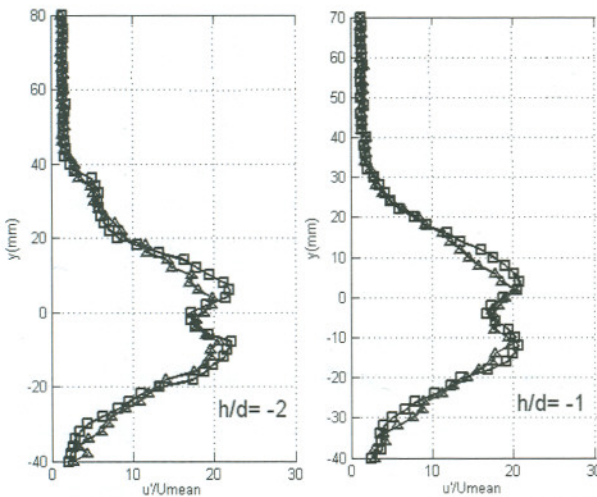
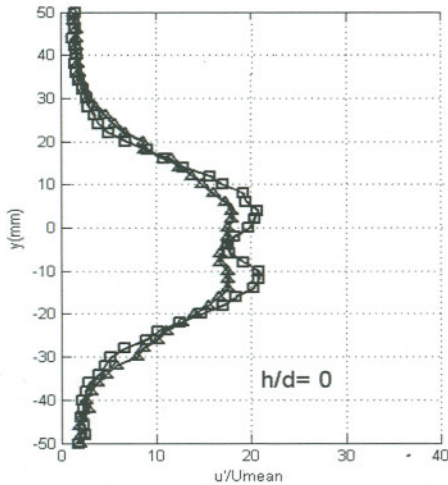
شکل (۴): نمودار توزیع مؤلفه‌های نوسانی سرعت برای ایرفویل مجزا (الف) درصد آشفتگی در راستای جریان (ب) درصد آشفتگی در راستای عمود بر جریان (ج) تنش رینولدز.

در ادامه، اندرکنش حاصل از حضور استوانه در وضعیت‌های مختلف بر مشخصه‌های مذکور به تفصیل شرح داده می‌شود. در حالت اول مرکز استوانه در فاصله  $l/d=1/5$  از لبه فرار ایرفویل در پنج وضعیت  $±۲$  و  $±۱$  و  $h/d=0$  قرار

## Archive of SID



شکل (۶): فرکانس گردابه‌ها در جریان دنباله نزدیک استوانه.



شکل (۷): نمودار درصد آشفتگی در راستای جریان برای

حالت اول ( $h/d = 1/5$ ).

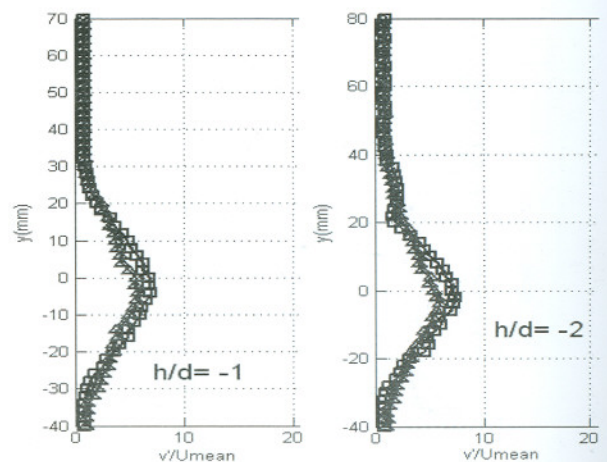
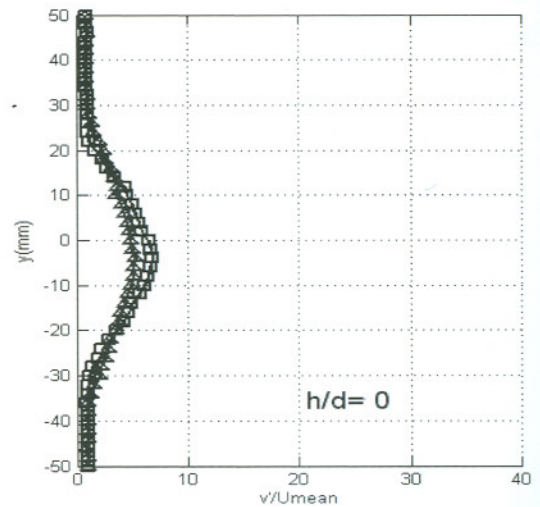
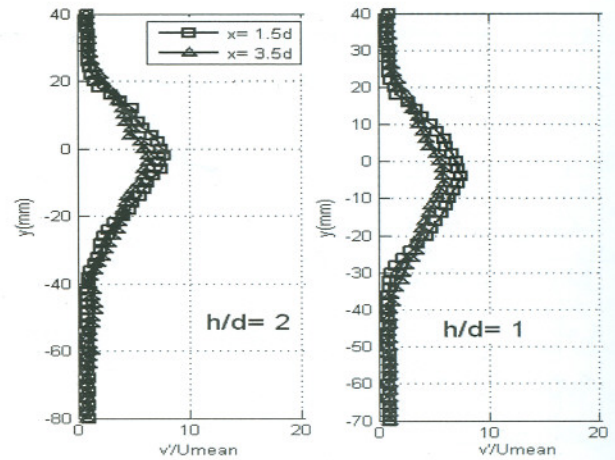
با توجه به تقارن کامل نمودار نسبت به خط مرکزی می‌توان نتیجه گرفت که استوانه در آستانه خروج از دنباله ایرفویل بوده و گردابه‌های ناشی از جریان حول آن تحت تأثیر ریزش گردابه‌های دنباله ایرفویل قرار نمی‌گیرد. در وضعیت  $h/d=0$  افزایش نوسانات سرعت در نیمه پایین دنباله استوانه ناشی از اندرکنش نیمه بالایی دنباله ایرفویل بر آن می‌باشد. جهت مخالف چرخش گردابه‌ها از پایین استوانه و گردابه‌های بزرگ بالای ایرفویل باعث تشدید آشفتگی در این ناحیه می‌شود. با افزایش  $h/d$  این اندرکنش کمتر شده تا اینکه دنباله‌های هرکدام مستقل از هم تشکیل می‌شوند. همچنین با دور شدن از استوانه کاهش نوسانات سرعت مشهود است. در حالتی که استوانه در قسمت زیرین ایرفویل قرار دارد ( $h/d < 0$ )، اندرکنش دنباله ایرفویل در میزان حداکثر این مؤلفه نوسانی تأثیر ندارد، لیکن، ریزش گردابه‌ها از سطح زیرین ایرفویل بر لبه بالایی ریزش گردابه‌ها از استوانه اندرکنش داشته و این تأثیر در فاصله  $h/d = -2$  بوضوح کامل تری مشهود است زیرا دنباله‌ها بصورت مجزا تشکیل شده و برهم اندرکنش دارند. مقایسه حداکثر مؤلفه نوسانی در وضعیت  $h/d=0$  با حداکثر مؤلفه نوسانی ایرفویل مجزا (شکل ۴ الف) دو برابر شدن این مشخصه را با حضور استوانه

## Archive of SID

در شکل ۸ نمودار درصد آشفتگی مؤلفه نوسانی سرعت در راستای عمود بر جریان ( $v'$ ) برای حالت اول رسم شده است. مطابق این شکل حداکثر مؤلفه نوسانی سرعت در جهت  $y$  در امتداد وسط استوانه، یا به عبارت دیگر محل تماس ریزش گردابه‌ها از دو طرف استوانه چندان متأثر از موقعیت استوانه نمی‌باشد. در این حالت با فاصله گرفتن پراب از استوانه در امتداد جریان از میزان حداکثر این مؤلفه کاسته می‌شود. مادامی که استوانه در بالای ایرفویل قرار دارد ( $h/d > 0$ ) با کاهش فاصله  $h/d$  از میزان حداکثر این مؤلفه نوسانی کاسته می‌شود و در حالت  $h/d=0$  استوانه بطور کامل در دنباله ایرفویل مستغرق است. وقتی استوانه در قسمت زیرین ایرفویل قرار دارد ( $h/d < 0$ )، اندرکنش دنباله ایرفویل در میزان حداکثر این مؤلفه تأثیری ندارد، لیکن، ریزش گردابه‌ها از سطح زیرین ایرفویل بر لبه بالایی ریزش گردابه‌ها از استوانه اندرکنش داشته و این تأثیر در فاصله  $h/d = -2$  دامنه وسیع‌تری را نشان می‌دهد. مقایسه حداکثر مؤلفه نوسانی سرعت در این شکل با نتیجه حاصل برای ایرفویل تنها (شکل ۴ ب) تأثیر حضور استوانه را نشان می‌دهد.

تغییرات تنش‌های رینولدزی برای مقاطع مختلف حالت اول در شکل ۹ نشان داده شده است. از مقایسه نمودارهای تغییرات تنش رینولدز در این شکل، مشاهده می‌شود که وقتی استوانه در بالای ایرفویل قرار می‌گیرد، کشیدگی تنش‌های رینولدزی مشهود است.

سکون جلوی استوانه سریعاً ناپدید شده و گردابه‌های کوچک رها شده از آن در گردابه‌های دنباله استوانه ادغام می‌شود. در این حالت کمترین دامنه عرضی دنباله اندرکنش رخ می‌دهد. در حالیکه در  $h/d = -2$  گردابه‌های برخاسته از لایه برشی سطح فوقانی ایرفویل در مسیر طولانی‌تری خود را حفظ نموده و در نهایت با گردابه‌های منفی از سطح فوقانی استوانه اندرکنشی قوی‌تر و در نتیجه دنباله کشیده‌تری دارد. این نتایج با تفاسیر حاصل از تصاویر ارائه شده در مرجع [۵]. در زاویه حمله صفر تطابق خوبی را نشان می‌دهد. در هر کدام از حالات فوق با دور شدن پراب از استوانه در جهت



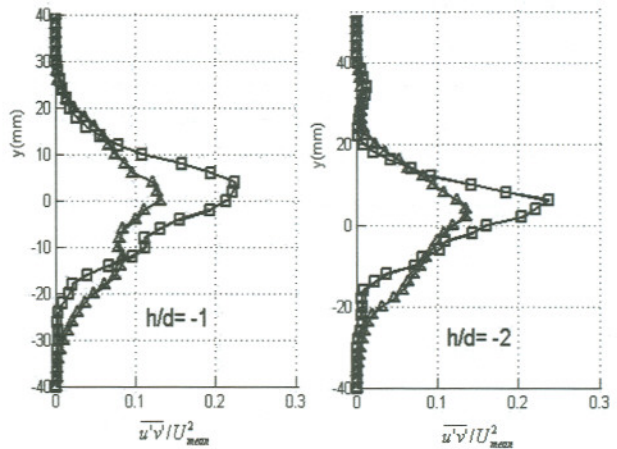
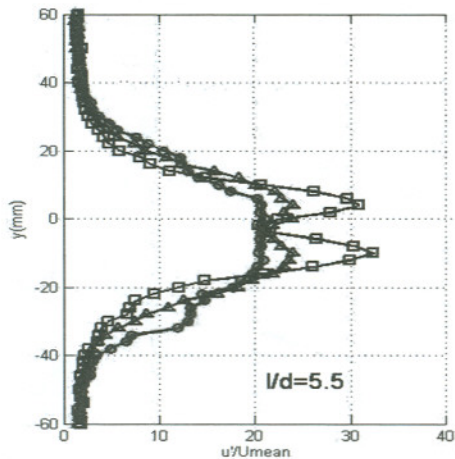
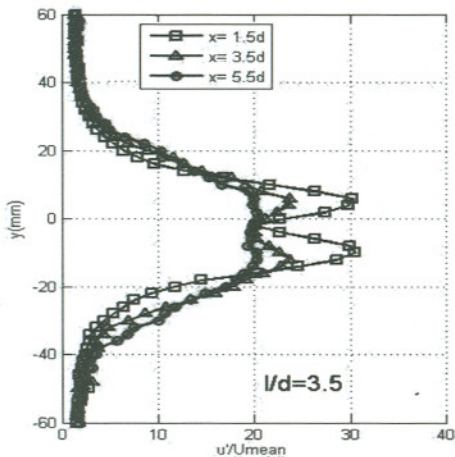
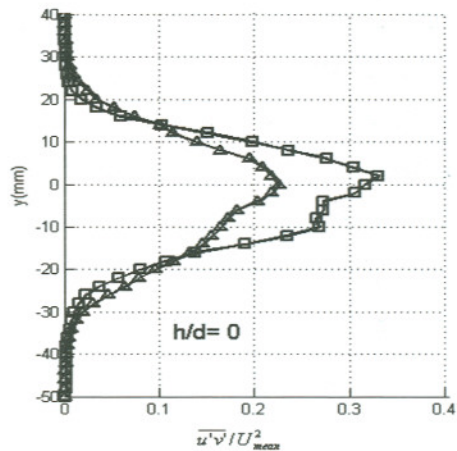
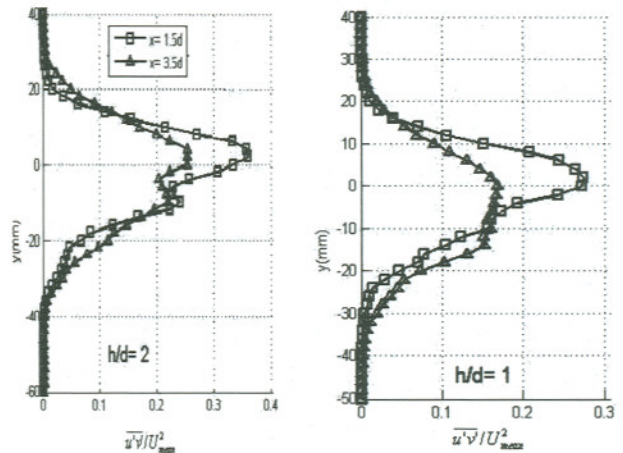
شکل (۸): نمودار درصد آشفتگی در راستای عمود بر جریان برای حالت اول ( $l/d=1/5$ ). [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

Archive of SID

حرکت اثرات اندرکنش و از حداکثر مؤلفه تنش رینولدزی کاسته می‌شود.

۳-۲- حالت دوم

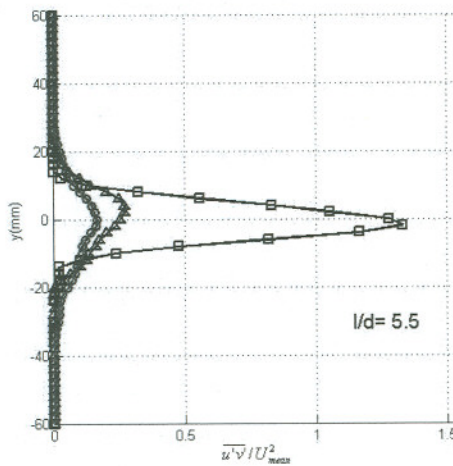
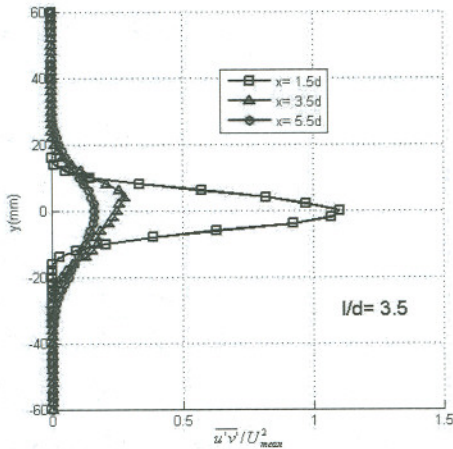
در شکل ۱۰ نمودارهای درصد آشفتگی مؤلفه نوسانی سرعت در راستای جریان  $u'$  در عرض سه مقطع برای فواصل مختلف استوانه از ایرفویل رسم شده است. دقت شود که  $x$  فاصله از مرکز استوانه و  $h/d=0$  می‌باشد. در فاصله نزدیک استوانه به ایرفویل به علت عدم تشکیل گردابه‌های کامل دنباله ایرفویل اندرکنش دنباله‌ها کمتر می‌باشد. در حالی که قرارگیری استوانه در فاصله دورتری از امتداد ایرفویل باعث



شکل (۱۰): نمودار درصد آشفتگی در راستای جریان برای حالت دوم.

شکل (۹): نمودار درصد تنش رینولدز برای حالت اول ( $l/d=1/5$ ).

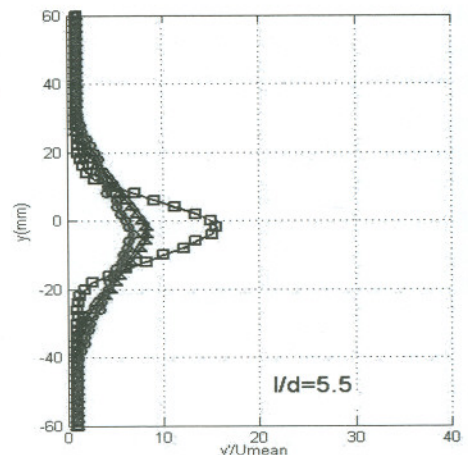
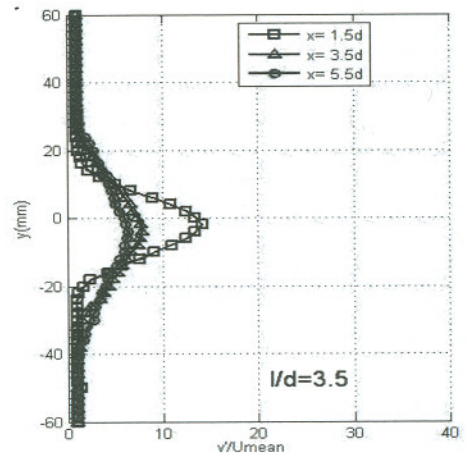




شکل (۱۲): نمودار درصد تنش رینولدز برای حالت دوم.

در شکل ۱۱ نمودار درصد آشفتگی مؤلفه نوسانی سرعت در راستای عمود بر جریان ( $v'$ ) برای حالت دوم نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار نوسانات در راستای عمود بر جریان ( $v'$ ) در مقاطع  $3/5$  و  $l/d=5/5$  می‌باشد. این امر بیانگر آن است که محل تماس ریزش گردابه‌ها از دو طرف استوانه در این مقاطع متأثر از موقعیت قرارگیری استوانه و اندرکنش گردابه‌های ایرفویل نمی‌باشد. مقایسه این شکل با شکل ۸ ( $h/d=0$ ) نشان می‌دهد که با دور شدن استوانه از ایرفویل مقدار حداکثر مؤلفه  $v'$  افزایش و دامنه عرضی آن کمتر می‌شود.

می‌شود که استوانه به‌طور کامل در جریان دنباله نزدیک ایرفویل قرار گرفته، و در اثر افزایش برخورد کامل میان گردابه‌های ناشی از اندرکنش دنباله ایرفویل و استوانه اندازه مؤلفه نوسانی سرعت افزایش می‌یابد. همچنین، اندرکنش در نیمه پایینی دنباله کل بیشتر می‌شود. از مقایسه میان حداکثر مؤلفه  $v'$  این نمودارها و شکل ۵ ملاحظه می‌شود که با دور شدن استوانه در امتداد افقی از ایرفویل، جریان دنباله نزدیک پشت آن به جریان دنباله نزدیک پشت یک استوانه تنها نزدیک‌تر می‌شود. همانند حالت اول با دور شدن از استوانه کاهش نوسانات سرعت مشهود بوده، و حداکثر شدت نوسانات سرعت در مقطع  $x/d=5/5$  در مقدار  $20\%$  ثابت می‌ماند.



شکل (۱۳): نمودار درصد آشفتگی در راستای عمود بر جریان برای حالت دوم.

## مراجع

1. Tennekes, H. and Lumley, J.L., "A First Course in Turbulence", The MIT Press, Massachusetts, 1972.
2. Wang, J.J., Zhang, P.F., Lu, S.F., and Wu, K., "Drag Reduction of a Circular Cylinder Using an Upstream Rod", Int. J. Flow, Turbulence, and Combustion, Vol. 76, No. 10, pp. 83-101, 2006.
3. Hiramotoa, R. and Higuchib, H., "Vortex Shedding Behind a Non-parallel Pair of Circular Cylinders", Int. J. Fluids and Structures, Vol. 18, No. 6, pp. 131-143, 2003.
4. Zhang, H.J., Huang, L., and Zhou, Y., "Aerodynamic Loading on a Cylinder Behind an Airfoil", Int. J. Experiments in Fluids, Vol. 38, No. 10, pp. 588-593, 2005.
5. Yildirim, I., Cetiner, O., and Unal, M.F., "PIV Measurements of the Wake Interactions for a Circular Cylinder Behind an Airfoil", The 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, USA, September 21-23, 2005.
6. Diasinos, S., Baerber, T.J., Leonardi, E., and Hall, S.D., "A Two-dimensional Analysis of the Effect of a Rotating Cylinder on an Inverted Aerofoil in Ground Effect", The 15<sup>th</sup> Australasian Fluid Mech. Conf., The Univ. of Sydney, Sydney, Australia, December 13-17, 2004.
7. Zhou, C.Y., Sun, C.W., Zhou, Y., and Huang, L., "A Numerical Study of a Circular Cylinder in the Wake of an Airfoil", The 15<sup>th</sup> Australasian Fluid Mech. Conf., The Univ. of Sydney, Sydney, Australia, December 13-17, 2004.
8. Tropea, C., Yarin, A.L., and Foss, J.F., "Handbook of Experimental Fluid Mechanics", Springer, pp. 1047-1060, 2007.
9. Utsunomiya, H., Nagao, F., Ueno, Y., and Noda, M., "Basic Study of Blockage Effects on Bluff Bodies", Int. J. Wind Eng. and Indust. Aerody., Vol. 49, No. 9, pp. 247-256, 1993.
10. Turki, S., Abbassi, H., and Nasrallah, S.B., "Effect of the Blockage Ratio on the Flow in a Channel with a Built-in Square Cylinder", Int. J. Comp. Mech., Vol. 33, No. 11, pp. 22-29, 2003.

تغییرات تنش‌های رینولدزی برای حالت دوم در مقاطع مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که با دور شدن استوانه از ایرفویل به علت اندرکنش قوی گردابه‌های پشت ایرفویل با ریزش گردابه‌ها در دنباله استوانه حداکثر تنش رینولدزی به میزان ۲۲٪ افزایش می‌یابد. از طرفی در مقطعی که پراب دور از ایرفویل و استوانه قرار دارد، گردابه‌های بزرگ ناشی در لایه برشی ایرفویل به گردابه‌های ریزتر تبدیل و در گردابه‌های استوانه ادغام شده و اندرکنش آن‌ها در دنباله دور از استوانه چندان تأثیری در حداکثر تنش رینولدزی ندارد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار مشخصه‌های آشفتگی جریان دنباله نزدیک حاصل از اندرکنش دنباله ایرفویل با استوانه‌های در پشت آن در عدد رینولدز ۱۴,۳۰۰ بر اساس قطر استوانه در دو حالت مورد بررسی تجربی قرار گرفت. در حالت اول با جابجایی عمودی استوانه در یک مقطع پشت ایرفویل، دامنه عرضی محدوده اندرکنش در بالا و پایین دنباله ایرفویل و تأثیر حضور استوانه بر مؤلفه‌های نوسانی سرعت و تنش رینولدزی بطور کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج نشان داده شده در حالت اول که استوانه در دنباله نزدیک ایرفویل قرار دارد، مادامی که استوانه در راستای وتر آن می‌باشد، جریان شبه کارمن در پشت ایرفویل به طور کامل تشکیل نشده و اندرکنش ناشی از ریزش گردابه‌ها از سطوح بالا و پایین ایرفویل می‌باشد. با دور شدن استوانه در امتداد عمودی چگونگی اندرکنش لبه‌های دنباله ایرفویل با لبه بالا و پائین استوانه مورد بحث قرار گرفت. در حالت دوم با دور شدن استوانه از لبه فرار ایرفویل در راستای وتر، به علت تشکیل کامل‌تر جریان گردابه‌ای در پشت ایرفویل اندرکنش قوی‌تر مشاهده می‌شود. به علت متلاشی شدن گردابه‌های بزرگ در دنباله ایرفویل و اندرکنش گردابه‌های ریز [www.SID.ir](http://www.SID.ir) گردابه‌های استوانه حداکثر تنش رینولدزی در دنباله نزدیک افزایش می‌یابد.