

# بررسی تجربی جریان ناپایا حول یک مدل استوانه به همراه سه صفحه عمود بر آن

عیسوند حسن<sup>۱</sup>، اداوی حیات الله<sup>۲</sup>، شرفی احمد<sup>۳\*</sup>

۱- دانشیار دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، دانشکده مهندسی هوافضا

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، دانشکده تحصیلات تکمیلی

۳- مربی دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸)

## چکیده

در این تحقیق، به بررسی تجربی جریان ناپایا حول یک مدل استوانه به همراه سه صفحه عمود بر آن پرداخته شده است. این بررسی در سرعت‌ها، زوایای حمله اولیه و نسبت‌های طولی مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل مورد آزمایش در این بررسی، دارای الگوهای حرکتی نوسانی پایا، دورانی پایا، نوسانی ناپایا و دورانی ناپایا می‌باشد. این نوع رفتارها به مشخصات هندسی از جمله نسبت طولی، زاویه حمله اولیه جسم و سرعت جریان آزاد بستگی دارد. در نسبت‌های طولی کم و سرعت پایین، الگوی حرکتی حول زاویه ۶۰ درجه میرا می‌شود. بیشترین نوسان و یا دوران مربوط به زاویه حمله اولیه صفر درجه می‌باشد. در نسبت‌های طولی کم، رژیم حرکتی از نوع نوسانی است که با افزایش نسبت طولی و سرعت جریان آزاد، به رژیم حرکتی دورانی تغییر پیدا می‌کند. تغییرات سرعت زاویه‌ای نسبت به زمان در نسبت‌های طولی ۱ و ۴ با کاهش دامنه نوسان در هر رژیم حرکتی همراه است. همچنین با گذشت زمان، سرعت نوسانی جسم نیز کاهش می‌یابد. در ضمن نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز جریان، عدد استروهال دارای مقدار ثابتی می‌باشد.  
واژه‌های کلیدی: جریان ناپایا، آزمایشات تونل باد، ارتعاش آزاد، حرکت نوسانی و دورانی.

## Experimental investigation of unsteady flow over a cylinder model with three plates perpendicular to it

Hassan Isvand, Hayat Adavi, Ahmad Sharafi

### Abstract

In this research, the experimental investigation of unsteady flow around a cylinder model with three plates perpendicular to it has been discussed. This study has been done at different speeds, primary model angle of attacks and length ratios. The results show that the model has steady and unsteady oscillation and rotational motions. These types of behaviors depend on the plate's length ratio, primary object angle of attack, and free stream velocity. The model has damping motion around an angle of 60 degree, at low speed and length ratio. The greatest oscillational or rotational flow has appeared at initial angle of attack of 0 degree. In low length ratio, the regime of motion is oscillations that it changed to rotational motion when the length ratio and free stream velocity increase. The variation of angular velocity at length ratio of 1 and 4, with respect to time, are accompanied with reduction of vibrations range per motion. Also, over time, the vibrational velocity of the model is reduced. In addition, the results show that by increasing the Reynolds Number, Strouhal number becomes constant.

**Key words:** *Unsteady flow, Wind tunnel tests, Free vibration, Oscillational and rotational motion*

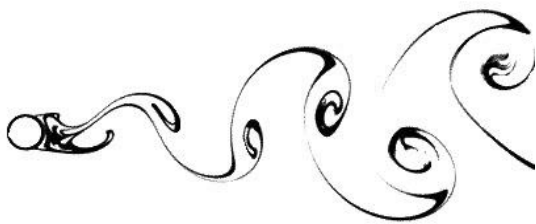
## مقدمه

بررسی رفتار حرکتی اجسام پرنده دارای بدنه با سطح مقطع استوانه‌ای و صفحات عمود بر آن از جمله در انواع موشک‌های هواپایه، زمین‌پایه، ماهواره‌بر و بالستیک که دارای مقاطع استوانه‌ای و صفحات عمود بر آن هستند وقتی تحت تأثیر جریان عرضی قرار می‌گیرند، با توجه به مقدار سرعت جریان عرضی و زاویه برخورد آن و همچنین نسبت طول صفحات به شعاع استوانه، رفتارهای حرکتی متنوعی (نوسانی پایا، دورانی پایا، نوسانی ناپایا و دورانی ناپایا) حول محور طولی پیدا می‌کنند که این رفتار حرکتی حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به سرعت و زاویه برخورد جریان، جنس و ابعاد بدنه و سطوح تعادلی-کنترلی، احتمال رفتارهای حرکتی مختلفی وجود دارد که بر عملکرد، کنترل و دینامیک پرواز جسم مؤثر است. بنابراین بررسی و تحلیل بنیادی اینگونه مسائل جهت طراحی مناسب پیکره و بهینه‌سازی بر اساس نوع مأموریت حائز اهمیت است. به نظر می‌رسد این تحقیق که در یکی از کشورهای پیشرفته نیز در حال انجام است در راستای اهداف علم و فناوری کشور بوده و به جامعه علمی و صنعتی کمک خواهد نمود.

در طبیعت تداخل جریان سیال با یک جسم جامد باعث اعمال نیرویی به سطح جسم می‌گردد. اگر جسم انعطاف‌پذیر باشد این نیرو سبب تغییر شکل در جسم می‌شود و در صورتی که جسم صلب باشد، این نیرو سبب تغییر مکان جسم از موقعیت اولیه خود متناسب با مقدار نیرو می‌گردد و به‌طور مشابه نیروی عکس‌العملی از سطح جسم جامد سبب تغییر شکل در الگوی جریان می‌شود. این مکانیسم عمل و عکس‌العملی بین جریان سیال و جسم جامد باعث می‌شود که هرگونه تغییرات کوچک در مشخصه‌های جریان، باعث تغییرات نسی در دیگر مشخصه‌های دینامیکی گردد. در سال‌های دور مکانیسم‌هایی گردابه در ناحیه دنباله<sup>۱</sup> پشت اجسام برای اولین بار توسط ون کارمن<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. این مطالعه بر پایه ارتعاشات القاشده توسط گردابه‌ها شروع شده و توسعه یافته است. ون کارمن تحلیل‌های خود را بر پایه روش‌های عددی در ناحیه دنباله پشت جسم و نیروهای برآ و پسای وارد شده بر اجسام و جدایی جریان بیان کرده است [۱]. در اوایل سال ۱۹۴۰ مشاهداتی از پاسخ اجسام به ارتعاشات ناشی از نیروی رهایی گردابه‌ها ارائه گردیده است. همچنین مهندسیین دریا و

اقیانوس‌شناسی این‌گونه مشاهدات را نیز تأیید کرده‌اند [۲]. آنها ارتعاشات و لرزش‌هایی را در خطوط انتقال نفت و گاز از کف اقیانوس‌ها و دریاها با دامنه زیاد مشاهده کرده‌اند. بعدها مهندسیین سازه پدیده‌های مشابهی را در پره‌های توربین بادی، گلایدرهای با بال‌های بلند و پایه‌های پل‌ها در برخی از محدوده‌های سرعت جریان‌ها مشاهده کردند. وقتی جسمی در یک جریان سیال قرار می‌گیرد، جدایش جریان از سطح جسم اتفاق می‌افتد. با افزایش عدد رینولدز<sup>۳</sup>، جدایش جریان باعث تغییر رژیم جریان از جریان پایا به جریان ناپایا می‌گردد. در اعداد رینولدز پایین، جریان احاطه‌شده حول جسم به‌صورت پایا می‌باشد و در صورتی که اولین جدایش جریان اتفاق افتد، عدد رینولدز افزایش یافته و به مقدار معینی رسیده و ناپایداری‌هایی در لایه برشی جریان سیال ایجاد گشته و این ناپایداری‌ها در جریان جداشده از سطح، توسعه می‌یابد. بنابراین، تداخلات غیرخطی بین لایه‌های جریان و جریان‌های برگشتی از ناحیه دنباله پشت جسم به‌طور متوالی و پی در پی به‌وجود آمده که باعث ایجاد خیابان گردابه‌ای (خیابان گردابه‌ای کارمن)<sup>۴</sup> پشت جسم می‌شود. گردابه‌ها در دو ردیف و در جهت چرخش مخالف سازماندهی شده‌اند که نمایی از این گردابه‌ها و ناحیه جریان آشفته پشت استوانه در شکل ۱ آورده شده است.

در حوزه فناوری‌های معاصر هوافضایی، مطالعه جریان ناپایا حول اجسام و صفحات در حال چرخش یا نوسان (آنتن‌ها، فرفره‌ها، اجسام دارای دم) از اهمیت خاصی برخوردار است. به‌منظور تأمین الزامات عملکردی اینگونه وسایل، لازم است که رفتار آنها تحت درجات آزادی مختلف با مشخصات هندسی گوناگون و جهت‌گیری آنها در جریان به‌دقت پیش‌بینی گردد. از ویژگی‌های اینگونه اجسام، تولید و ایجاد توزیع پیچیده گردابه‌های حاصل از جدایی جریان از لبه‌های تیز و همچنین ازدست دادن پایداری لایه‌های گردابه‌ای است.

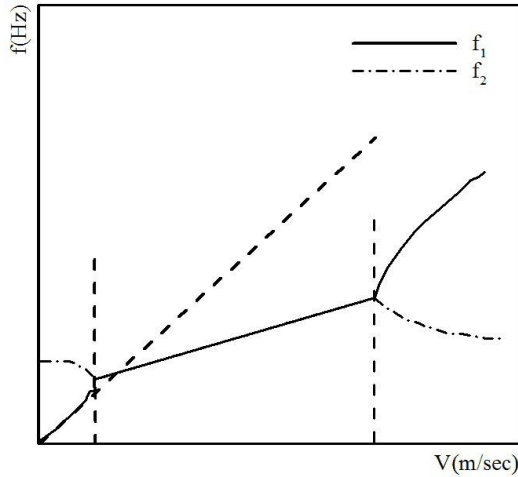


شکل ۱ - خیابان گردابه‌ای کارمن [۱].

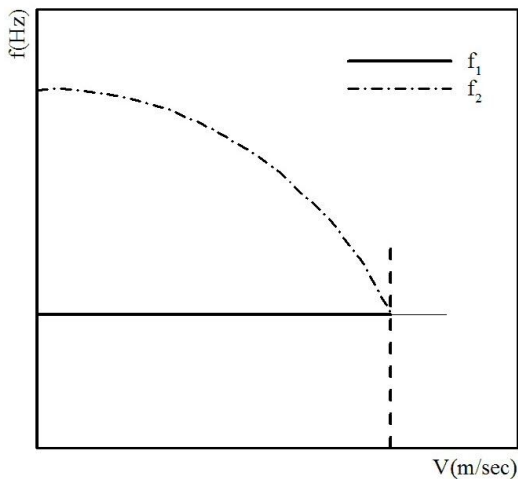
ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها، پدیده‌ای است که بر اثر گردابه‌های ایجاد شده ناشی از برخورد بین جریان سیال و سازه در پشت جسم جامد به‌وجود می‌آید و این پدیده علاوه بر حوزه هوافضایی در مواردی چون ساختمان‌های بلند، خطوط انتقال قدرت و لوله‌های استخراج مواد نفتی از اعماق دریاها قابل مشاهده می‌باشد. به عبارتی وقتی جریان یکنواختی از مجاورت یک جسم عبور می‌کند، این جریان شروع به تلاطم کرده و گردابه‌هایی با آرایش منظم در پشت جسم ایجاد می‌گردد. در صورتی که این گردابه‌ها با آرایش نامنظمی تشکیل شوند، باعث ایجاد نیروی برآی نوسانی بر جسم و نوسانات جسم می‌گردند. رفتار غیرقابل پیش‌بینی تداخل جریان و جسم صلب و به عبارتی جهت‌گیری جسم در جریان سبب می‌شود که در مواردی نوسانات با دامنه بالا و پی در پی در جسم ایجاد گردد و باعث تخریب جسم شود و به عبارتی می‌توان گفت که جسم خودش، خودش را از بین می‌برد. در این سیستم (جریان و جسم صلب) به‌منظور ساده‌سازی فقط دو درجه آزادی در نظر گرفته شده است. هر درجه آزادی دارای یک فرکانس طبیعی می‌باشد. یک سیستم در صورتی به سمت تخریب و نابودی می‌رود که این دو فرکانس بسته شوند یا به عبارتی یک فرکانس به فرکانس دیگر نزدیک شود. در این شرایط تغییرات سریع متغیرهای دینامیکی را شاهد خواهیم بود. به عبارتی در اثر نزدیک شدن این دو فرکانس به یکدیگر (فرکانس طبیعی جسم و فرکانس رها شدن گردابه‌ها) انرژی منتقل شده بین جسم و جریان افزایش یافته و نوسانات با دامنه بالا برای جسم صلب دیده می‌شود. افزایش دامنه نوسانات باعث تخریب در جسم و از بین رفتن آن می‌گردد. در یک سیستم تداخل جریان سیال و جسم صلب، متغیر دینامیکی عموماً متوسط سرعت جریان آزاد می‌باشد. اگر دو فرکانس طبیعی از یکدیگر فاصله داشته باشند هیچگونه تغییرات رفتاری در سیستم دیده نمی‌شود و به عبارتی سیستم (جریان سیال و جسم صلب) در حالت پایدار قرار دارند. تداخل فرکانس‌ها در سیستم دو درجه آزادی (جریان سیال و جسم صلب) می‌تواند به‌صورت یکی از حالت‌های موجود در شکل ۲ دیده شود. اولین نوع از مکانیزم تداخل فرکانس (شکل ۲-الف) در اجسام غوطه‌ور در جریان سیال به‌طور جزئی و یا به‌طور کامل، شایع می‌باشد. قسمتی از جسم در جریان آزاد، باعث ایجاد ناحیه پیچیده‌ای در جریان پایین‌دست جسم می‌گردد. که به آن ناحیه دنباله می‌گویند و

تولید و رهایی گردابه در این ناحیه صورت می‌گیرد. تولید و رهایی گردابه در جریان، در یک فرکانس طبیعی صورت می‌گیرد که این فرکانس، تابعی از متوسط سرعت جریان می‌باشد. این فرکانس در شکل ۲-الف با  $f_2$  نشان داده شده است. در صورت نزدیک بودن فرکانس  $f_2$  با فرکانس طبیعی جسم  $f_1$ ، نوسانات جسم و رهایی گردابه به پایین‌دست جریان شروع می‌گردد. در صورتی که این دو فرکانس روی هم ادغام شوند یا دارای مقدار یکسانی باشند (یکی شدن فرکانس‌ها)، دامنه نوسانات جسم افزایش یافته و سرعت متوسط جریان مطابق شکل ۲-الف به سمت دومین مقدار بحرانی نزدیک شده و بعد از آن، این فرکانس به دو نیم شده و هر یک مقدار خاص خود را دارا می‌شوند. از این رو آن را فرکانس ادغامی محدود شده می‌نامند. در صورت مجزا شدن فرکانس‌ها از یکدیگر، دوباره شدت دامنه نوسانات کاهش یافته و به‌صورت حالت اولیه در می‌آید و به عبارتی نوسانات جسم از بین می‌رود. همانطوری که در شکل ۲-ب نشان داده شده است، دو فرکانس دارای مقادیر مختلفی بوده و سپس در ناحیه‌ای دو فرکانس با یکدیگر ادغام شده و مقدارشان یکسان می‌گردد که این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که متوسط سرعت جریان به مقدار بحرانی خود می‌رسد در نتیجه دامنه نوسانات جسم افزایش می‌یابد ولی چون قبل از آن در محدوده پایداری می‌باشد، بنابراین هیچ‌گونه نوساناتی در جسم دیده نمی‌شود. اما بعد از ادغام شدن فرکانس‌ها محدوده ناپایدار اتفاق افتاده و دامنه نوسانات به شکل نمایی افزایش می‌یابد. از این رو به نوع دوم، فرکانس ادغام شده نامحدود می‌گویند که این نوع دوم به دو قسمت کلاس یک<sup>۶</sup> و کلاس دو<sup>۷</sup> تقسیم می‌شود. در کلاس یک (شکل ۲-ب)، فرکانس طبیعی جسم همواره مقدار ثابتی داشته و سپس فرکانس‌ها با یکدیگر ادغام شده و نوسانات با دامنه متغیر و افزایشنده در جسم ایجاد می‌گردد ولی در کلاس دو (شکل ۲-ج)، دو فرکانس به صورت عکس و مخالف یکدیگر بوده و سپس در سرعت بحرانی با یکدیگر ادغام گردیده و نوسانات با دامنه بالا را شکل می‌دهند [۲].

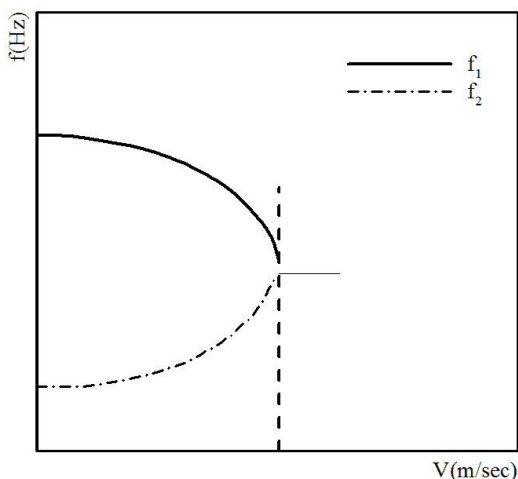
جریان غیردائم، هم به‌طور طبیعی و هم به‌طور اجباری ایجاد می‌گردد. در حالت طبیعی، جریان ناپایا ناشی از رشد ناپایداری‌ها در سیال و یا ساکن نبودن وضعیت اولیه سیال می‌باشد و جریان ناپایا اجباری، در اثر وابستگی زمانی شرایط مرزی و منابعی که در جریان حرکت می‌کنند، ایجاد می‌گردد.



الف- نوع یک، فرکانس ادغامی محدود شده



ب- فرکانس ادغام شده نامحدود، کلاس یک



ج- فرکانس ادغام شده نامحدود، کلاس دو

شکل ۲ - تداخل فرکانس‌ها در سیستم دو درجه آزادی (جریان سیال و جسم صلب) [۲].

ارتعاشات القاشده گردابه‌ای که در اثر تداخلات غیرخطی جسم با ناحیه دنباله پشت جسم ایجاد می‌گردد، به‌طورکلی از موضوعات بسیار مهمی بوده که مورد توجه افراد بسیاری در این رشته‌های مختلف مهندسی قرار گرفته است. افراد بسیاری در این زمینه هم به‌صورت تئوری و هم تجربی و نیمه‌تجربی فعالیت کرده‌اند. عمدتاً برای بررسی این موضوع، دو روش تجربی اصلی وجود دارد یکی روش ارتعاشات یا نوسانات آزاد<sup>۸</sup> و دیگری نوسانات واداشته یا اجباری<sup>۹</sup>.

عموماً آزمایشات بررسی ارتعاشات و نوسانات آزاد یک جسم قرار گرفته در جریان، در یک تونل باد و یا آب و با توجه به مکانیسم‌های خارجی دیگر انجام شده است. سازه و یا جسم مورد آزمایش به وسیله فنرها و میرا کننده‌ها و دیگر سیستم‌های الاستیک مورد حمایت قرار می‌گیرند. با توجه به طبیعت رهایی گردابه‌ها به سمت پایین‌دست جریان، هدف از این مطالعات فهمیدن مشخصه‌های پاسخی است که در طول زمان به شکل نوسانات و ارتعاشات در جسم بروز می‌کند.

فنگز<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۶۸ آزمایشاتی را بر روی استوانه تحت نوسانات آزاد در تونل باد انجام داده است. در این آزمایش‌ها، استوانه به وسیله چندین فنر پیچشی به بدنه محل آزمایش متصل شده است [۳]. آماندولس<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۱۰ آزمایشات مشابهی را بر روی استوانه با مقطع مربعی در تونل باد انجام داده است [۴].

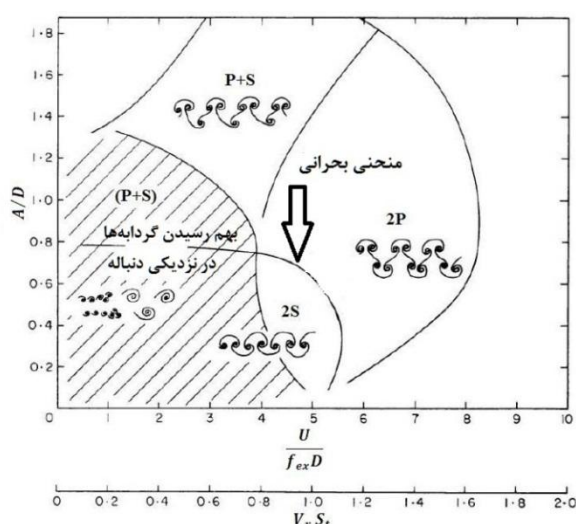
آمورا<sup>۱۲</sup> و همکارانش در سال ۱۹۷۱ در آزمایشاتی مشاهده کردند که فاکتور میرایی آیرودینامیکی<sup>۱۳</sup> برای یک استوانه تحت نوسانات آزاد به‌صورت یک نیروی میرایی منفی برای عدد استروهال ۰/۲ می‌باشد [۵]. آنها به‌طور تقریبی دریافتند که مشخصه‌های نوسانی یا ارتعاشی برای یک استوانه تنها زمانی که نیروی میرایی منفی باشد، ظاهر می‌گردد. بنابراین شرط اضافی را برای این حرکت خود القاشده<sup>۱۴</sup> به‌وجود می‌آورد [۵].

اگرچه سارپکایا<sup>۱۵</sup> در سال‌های ۱۹۷۹ و ۲۰۰۴ دیدگاه مخالفی را برای نوسانات خود القاشده جسم مطرح کرده است [۶].

نیرو سبب کنترل حرکت می‌شود و وقتی که جسم از حرکت باز می‌ایستد، این نیروی متناوب هم از بین می‌رود. اما این تعریف با نوسانات جسم صلب در تناقض می‌باشد. برای یک

آوردند. همان طوری که در شکل ۳ ملاحظه می شود، الگوی خاصی از رهایی گردابه ها در ناحیه دنباله پشت استوانه در اثر حرکت آن ایجاد می گردد [۱۱].

این الگوها شامل مود S۲ (دو گردابه منفرد در هر سیکل حرکتی) و مود P۲ (دو جفت گردابه در هر سیکل حرکتی) می باشند. البته اگر نوسانات و ارتعاشات اجباری بر جسم ایجاد گردد مود دیگری از رهایی گردابه تحت عنوان مود P+S (یک گردابه مجزا و یک جفت گردابه در یک سیکل حرکتی) ممکن است پیدا شود. مودهای 2S و 2P و P+S در شکل ۲ در نزدیکی ناحیه همزمانی فرکانسی مشاهده می شوند [۱۱].



شکل ۳ - الگوی گردابه‌های رها شده به دست آمده توسط ویلیامسون و روشکو [۱۱].

گرفین<sup>۲۱</sup> در سال ۱۹۷۶ نشان داد که مودهای 2P و P+S، کنترل کننده نوسانات و ارتعاشات جسم می باشند [۱۲]. مدل سازی عددی رفتار یک صفحه تخت در معرض جریان هوا و بررسی پدیده هیستریزس آیرودینامیکی<sup>۲۲</sup> آن توسط عیسوند و کشوری انجام شده است [۱۳]. در این بررسی از روش گردابه گسسته بهینه شده<sup>۲۳</sup> برای محاسبه ضریب نیروی عمودی و گشتاور آیرودینامیکی استفاده شده است. این مدل سازی در دو حالت دوران اجباری و آزاد صورت گرفته است. آنها دریافتند که در دوران اجباری، به دلیل تغییرات ساختاری در جریان گردابه‌ای، برای نیروی عمودی و همچنین گشتاور دورانی هیستریزس دینامیکی رخ می دهد که این هیستریزس با افزایش عدد استروهال تقویت می شود. همچنین اگر صفحه با

جسم صلب ثابت شده در جریان اگرچه هیچ گونه حرکتی در جسم وجود ندارد، اما نیروی برآی متناوب همچنان وجود دارد. ساریکایا دریافت زمانی که پدیده همزمانی یا قفل شدن<sup>۱۶</sup> (زمانی که فرکانس رهایی گردابه‌ها با فرکانس طبیعی جسم برابر گردد و به عبارتی هر دو فرکانس مقدار یکسانی داشته باشند این پدیده اتفاق می افتد و دامنه نوسانات جسم قرار گرفته در جریان افزایش می یابد) رخ می دهد، فرکانس رهایی گردابه‌ها و فرکانس نوسانات جسم به سمت فرکانس واحدی میل کرده و یا به عبارتی در فرکانس طبیعی جسم بسته یا یکی می شوند [۷].

ویژگی نوسانات خود القاشده اجسام که توسط آمورا مطرح شده بود، در سال ۱۹۶۸ مورد توجه اسکالان و روزنوم<sup>۱۷</sup> قرار گرفت [۸]. آنها نشان دادند که نیروهایی وجود دارد که انرژی اضافی را در سیستم (جریان سیال و جسم) به وجود می آورند که ممکن است به طور فیزیکی در ترمهای میرایی منفی تعبیر شوند. در پی به وجود آمدن میرایی منفی، انتقال انرژی باید صورت گیرد و برای یک سیستم با میرایی مثبت، نیروی میرایی کار منفی را انجام می دهد و در مورد میرایی منفی، نیروی میرایی کار مثبتی را روی سیستم انجام می دهد که نیازمند انتقال انرژی می باشد [۸].

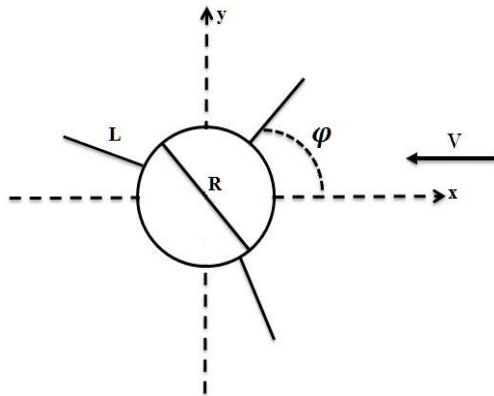
در سال ۱۹۶۸ پروتوس<sup>۱۸</sup> و همکارانش انرژی انتقال یافته از جریان سیال به استوانه‌ای که تحت نوسانات و ارتعاشات خود القاشده قرار گرفته را بدست آوردند [۹].

در سال ۱۹۸۲ بیرمن و اوباساجو<sup>۱۹</sup> مطالعاتی را بر روی یک مدل استوانه با مقطع مربعی در حالت ثابت شده در جریان و با نوسانات اجباری بدست آوردند [۱۰]. آنها دریافتند که ضریب برآی نوسانی برای استوانه با مقطع مربعی در ناحیه همزمانی فرکانسی، خیلی کمتر از استوانه چرخان با مقطع دایروی با همان شرایط آزمایش می باشد. به علاوه در سرعت‌های کاهنده پایین رهایی گردابه، ممکن است نوسانات استوانه میرا گشته و از بین برود و در قبل از ناحیه قفل شدن یا همزمانی، نوسانات اجباری استوانه بر حرکت آن چیره شده و نوسانات ناشی از رهایی گردابه از بین برود.

همچنین بیرمن در سال ۱۹۸۴ نوسانات ناشی از پدیده رهایی گردابه از سطح جسم را بازگو کرد [۱۰].

ویلیامسون و روشکو<sup>۲۰</sup> در سال ۱۹۸۸ مکانیسمی را برای تعیین موقعیت و شکل گردابه‌های رها شده در جریان، فراهم

لبه‌های تیز، اجسام نازک و پیکره‌های با هندسه پیچیده در زوایای حمله نسبتاً بالا، دارای میدان جریان گردابه‌ای پیچیده‌ای حول جسم و همچنین دنباله آن می‌باشند. عکس‌العمل گردابه‌ها با سطوح کنترلی از مسایل جدی در کنترل است. بنابراین مسئله مدل‌سازی جریان‌های گردابه‌ای از مسائل مهم علمی و قابل توجه است که بسیاری از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. در این حالت کاربرد مستقیم روش‌های مدل‌سازی عددی بسیار مشکل است و غالباً از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی استفاده می‌گردد. جسمی متشکل از استوانه و سه صفحه متصل به آن مطابق شکل ۴ در جریانی قرار گرفته که این جسم دارای درجه آزادی حرکتی حول محور استوانه می‌باشد.



شکل ۴ - شماتیک جسم مورد مطالعه به همراه پارامترهای هندسی آن

وقتی که جریان به جسم برخورد می‌نماید، از لبه تیز صفحات، لایه جریان جدا و نواحی گردابه‌ای ایجاد می‌گردد. این نواحی توزیع فشاری را اطراف جسم ایجاد می‌نماید که باعث تولید نیروهایی عمود بر صفحات و متعاقب آن گشتاوری حول مرکز می‌گردد. با توجه به مقدار گشتاور حاصله و ممان اینرسی جسم، امکان حرکت حول محور استوانه وجود دارد. متعاقب آن حرکت خود جسم نیز جریان را تحت تأثیر قرار داده و اندرکنشی بین جسم و جریان ایجاد خواهد شد که نهایتاً منجر به بروز حرکت‌های نوسانی، دورانی و یا تلفیق آنها خواهد شد. جهت بررسی این موضوع مدل‌هایی ساخته شده و در تونل باد آزمایش می‌گردد. مدل‌ها روی دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی قرار گرفته که می‌تواند آزادانه بچرخد. مکانیزم این زاویه‌سنج به‌گونه‌ای است که گشتاور مقاومی از طرف تکیه‌گاه به مدل

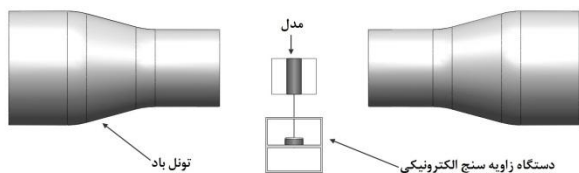
درجه آزادی چرخشی در معرض جریان قرار گیرد، ممکن است وارد رژیم دوران آزاد شود. برای صفحه تخت، این حالت در صورتی رخ می‌دهد که گشتاور لختی بی‌بعد در محدوده ۵-۱/۴۳ باشد و زاویه حمله نیز به اندازه کافی کوچک باشد. در سایر مقادیر گشتاور لختی، صفحه وارد رژیم نوسان آزاد می‌شود [۱۳].

بررسی تجربی جریان ناپایا حول اجسام استوانه‌ای دارای چهار صفحه عمودی توسط عیسوند و همکارانش انجام شده است [۱۴]. آنها در این بررسی تجربی، از یک مدل استوانه به همراه صفحاتی با طول‌های مختلف عمود بر استوانه در سرعت‌های مختلف و در زوایای حمله اولیه متفاوت استفاده کرده‌اند. نتایج کار آنها نشان داد که رفتار جسم تابعی از سرعت جریان، تعداد صفحات متصل به استوانه، نسبت طول صفحه به شعاع استوانه و زاویه حمله اولیه صفحات نسبت به جریان است. این رفتارها به صورت دورانی، نوسانی، نوسانی میرا و یا ترکیبی از آنها می‌باشد [۱۴].

اثرات نسبت طولی و زاویه حمله بر رفتار حرکتی استوانه دارای دو صفحه عمود بر آن توسط عیسوند و همکارانش بصورت تجربی و عددی بررسی شده است [۱۵]. این بررسی‌ها در سرعت‌ها و زوایای حمله مختلف برای دو مدل استوانه با نسبت‌های طولی مختلف انجام شده است. آنها در بررسی‌های عددی، از روش گردابه گسسته استفاده کرده‌اند. نتایج کار آنها نشان داد که در این بررسی رفتارهای حرکتی دورانی و نوسانی و ترکیبی از آنها دیده می‌شود. آنها نشان دادند که این نوع رفتارها به مشخصات هندسی از جمله نسبت طول صفحات به شعاع استوانه، زاویه حمله اولیه جسم و سرعت جریان آزاد بستگی دارد. آنها دریافته‌اند که در زوایای حمله اولیه پایین، با افزایش نسبت طولی و سرعت جریان آزاد، حرکت دورانی اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش زاویه حمله اولیه، مدل تمایل به حرکت نوسانی حول زاویه‌ای خاص دارد. همچنین برای نسبت‌های طولی کوچک، مدل دارای حرکت نوسانی حول زاویه ۹۰ درجه است [۱۵].

تولید، توسعه و اثر متقابل لایه‌های گردابه آزاد از معضلات بسیاری از جریان‌های آیرودینامیکی حول بال‌ها، اجسام غیرآیرودینامیکی و اجزای آنهاست. لایه گردابه تولیدشده و به وجود آمده در دنباله اجسام با دهانه محدود در پرواز، نمونه‌ای از گردابه‌های حلقوی است. بال‌های با زاویه پسگرایی بالا<sup>۲۴</sup> و

دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی، می‌بایست قابلیت نگهداشتن مدل (استوانه به همراه صفحات) با درجه آزادی چرخشی را در جریان تونل باد داشته باشد و همچنین بتواند رفتار مدل را (نوسان یا دوران) طی یک پروسه معین جهت بررسی و ثبت نتایج به رایانه منتقل نماید. از این رو این دستگاه از دو بخش الکترونیکی و مکانیکی تشکیل گردیده است. بخش مکانیکی وظیفه نگهداشتن مدل با درجه آزادی چرخشی و انتقال رفتار آن را داشته و قسمت الکترونیکی وظیفه تبدیل رفتار و جابجایی مدل از حالت مکانیکی به الکترونیکی و انتقال داده‌ها را به رایانه دارد. در نهایت، داده‌ها در رایانه مورد آنالیز قرار می‌گیرد. شماتیکی از مدل مذکور به همراه دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی نصب‌شده در مقطع آزمون تونل باد در شکل ۶ دیده می‌شود.



شکل ۶ - مدل و تجهیزات به کار رفته برای بررسی تجربی

پس از آن که صفحات بر روی استوانه نصب گردید، مدل مذکور به همراه دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی در مقطع آزمون تونل قرار داده می‌شود. دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی شامل ترمزگیر مخصوصی بوده که می‌توان توسط آن مدل را در زوایای حمله اولیه مدنظر قرار داده و در جریان، ثابت نگهداشت. برای انتقال داده‌ها به رایانه از پورت سریال استفاده گردیده و همچنین به منظور ثبت داده‌ها و آنالیز آنها در رایانه از برنامه لب‌ویو<sup>۲۵</sup> استفاده می‌گردد. با اجرای برنامه مذکور، ابتدا سیگنالی جهت آزاد شدن ترمز درب بازکن آیفون به میکروکنترلر فرستاده شده و سپس مدل در جریان شروع به حرکت کرده و تغییرات حرکتی آن با توجه به گام زمانی که در برنامه قرار داده شده، ثبت می‌گردد. این گام زمانی برابر با ۰/۰۲ ثانیه می‌باشد. بدین ترتیب تغییرات زوایا در سرعت‌های جریان مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ متر بر ثانیه، زوایای حمله اولیه مختلف ۰، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۰ و ۶۴ درجه و نسبت‌های

وارد نمی‌شود. بنابراین در این مسئله سرعت جریان آزاد، هندسه جسم (نسبت طولی  $L/R$ )، ممان اینرسی دورانی ( $J$ ) و زاویه حمله اولیه ( $\phi_0$ ) آن در بروز رفتارهای حرکتی مؤثر است که اثرات این پارامترها در رفتار دینامیکی مدل بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.

## وسایل و تجهیزات و روش انجام آزمایش

تجهیزات مورد نیاز برای انجام این تحقیق مدل آزمایشگاهی، تونل باد مادون صوت و دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی است. در این آزمایشات، کلیه بررسی‌های صورت‌گرفته، برای نوسانات آزاد جسم در جریان یکنواخت بوده و رفتار دینامیکی جسم در جریان هوا مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه آزمایشات، در تونل باد مادون صوت صورت گرفته است. این تونل باد، مدار بسته بوده و حداکثر سرعت آن به ۵۰ متر بر ثانیه می‌رسد. مقطع آزمون این تونل باد دایره‌ای شکل بوده و دارای قطر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. فاصله بین دو دهانه تونل باد حدود ۱ متر می‌باشد. شدت اغتشاش این تونل برای تحقیق انجام‌شده در محدوده سرعت‌های کاری مقداری بین ۰/۱-۰/۵ درصد می‌باشد.

مدل آزمایشگاهی مورد نظر، یک استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر و از جنس پلکسی‌گلاس می‌باشد. بر روی بدنه استوانه و در راستای طولی شیارهایی با ضخامت ۲ میلی‌متر به منظور اتصال صفحات به آن ایجاد شده است. صفحاتی از جنس آلومینیوم با طول ۱۶ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر برای نصب روی بدنه استوانه انتخاب شده‌اند به گونه‌ای که در داخل شیارهای استوانه قرار گرفته و از داخل به هم متصل شده‌اند. این صفحات دارای عرض‌هایی بطول ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشند که نمایی از این صفحات در شکل ۵ دیده می‌شود. زاویه بین صفحات متصل‌شده به استوانه ۱۲۰ درجه می‌باشد.



شکل ۵- نمایی از صفحات به کار برده شده در آزمایش



طولی مختلف (عرض صفحه به شعاع استوانه  $L/R$ ) برابر با ۱، ۳ و ۴ ثبت می‌گردد.

## نتایج

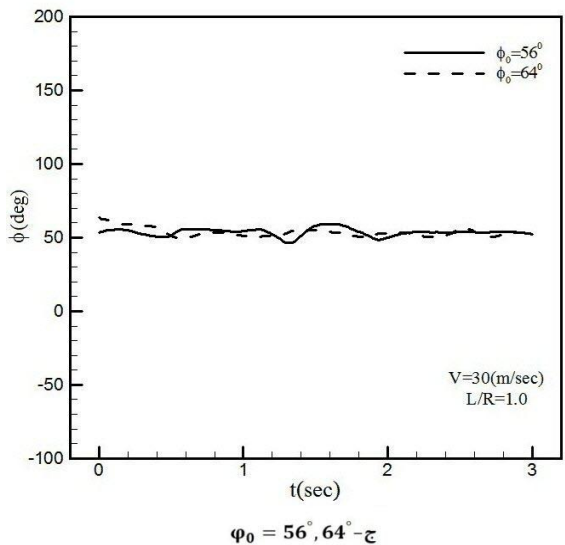
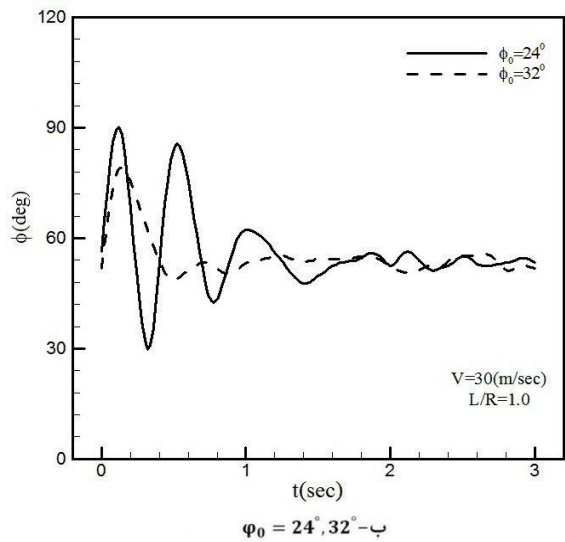
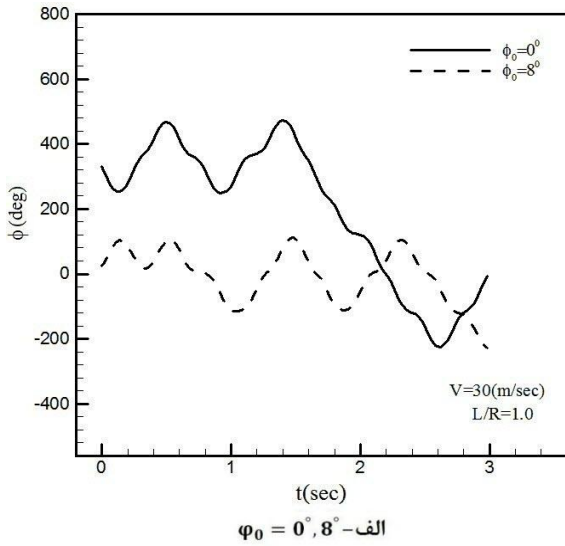
در این تحقیق آزمایشات متعددی بر روی مدل استوانه به همراه سه صفحه عمود بر آن در تونل باد مادون صوت انجام شده است. در این بررسی طول استوانه برابر با ۱۶ سانتی‌متر بوده صفحات مختلف به کار رفته در این آزمایش دارای نسبت‌های طولی (نسبت عرض صفحه به شعاع استوانه) برابر با ۱، ۳ و ۴ می‌باشند. آزمایشات در سرعت‌های مختلف جریان تونل باد در محدوده ۱۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه و تحت زوایای حمله اولیه ( $\phi_0$ ) مختلف انجام شده است.

تغییرات زاویه جسم نسبت به زمان برای نسبت‌های طولی مختلف و زوایای حمله اولیه متفاوت در سرعت جریان آزاد ۳۰ متر بر ثانیه در شکل ۷ آورده شده است. تغییرات زاویه جسم نسبت به زمان برای زوایای حمله اولیه صفر و ۸ درجه در شکل ۷-الف نشان داده شده است. همان طوری که در شکل ۷-الف دیده می‌شود، با رهايش جسم در جریان آزاد، جسم شروع به نوسان نموده پس از انجام نوسان ناپایا، جسم دچار دوران ناپایا می‌شود و سپس بعد از انجام دوران ناپایا دوباره حرکت نوسانی ناپایا انجام می‌دهد. در زاویه حمله اولیه ۸ درجه، ابتدا نوسانات ضعیف بوده و با شروع ثانیه دوم، نوسانات قوی‌تر می‌شوند و جسم حول زاویه تعادلی ۶۰ درجه نوسان می‌کند و با تاخیر زمانی نسبت به زاویه ۸ درجه وارد فاز دورانی شده و پس از انجام حرکت دورانی ناپایا دوباره وارد محدوده حرکت نوسانی می‌گردد. اختلاف زاویه تعادلی بین صفر و ۸ درجه بخاطر این است که شفت انکودر<sup>۲۶</sup> موجود در دستگاه زاویه‌سنج که بیانگر زوایای مختلف می‌باشد، بصورت دوار بوده و در آن، زوایای صفر و ۳۶۰ درجه بر روی یکدیگر منطبق می‌شوند. در زاویه صفر درجه شروع نوسان به صورت معکوس بوده که حول زاویه ۳۲۰ درجه، تعادل دارد که همان زاویه تعادلی ۶۰ درجه می‌باشد. با افزایش زاویه حمله اولیه جسم (شکل ۷-ب)، حرکت نوسانی جسم پس از انجام نوسان حول زاویه ۶۰ درجه تعادلی، میرا شده اما جسم دارای نوسانات بسیار ضعیفی می‌باشد. با افزایش زاویه حمله اولیه جسم (شکل ۷-ج)، دامنه و دوره تناوب نوسان کم می‌شود تا اینکه در زوایای حمله اولیه ۵۶ و ۶۴ درجه جسم حول زاویه تعادلی قرار گرفته و فاقد حرکت نوسانی می‌شود.

در شکل ۸، تغییرات زاویه جسم نسبت به زمان برای نسبت‌های طولی ۱، ۳ و ۴ در زاویه حمله اولیه صفر درجه و سرعت‌های مختلف جریان آزاد ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. با مطالعه این نمودار می‌توان دریافت که برای نسبت طولی ۱ (شکل ۸-الف)، جسم در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه یک نوسان انجام داده و به دلیل کم بودن سرعت، حرکت جسم بعد از نوسان، میرا شده و با افزایش سرعت، دامنه و تعداد نوسانات جسم افزایش می‌یابد تا اینکه در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه برای جسم، حرکت نوسانی پایا مشاهده می‌شود. حداکثر دامنه نوسانات برای زوایای حمله اولیه پائین، صفر و نزدیک به صفر می‌باشد که علت آن زیاد بودن نیروی وارده به صفحات در زوایای حمله اولیه پائین می‌باشد. مرز تبدیل حرکت نوسانی به حرکت دورانی را می‌توان برای این مدل در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه مشاهده کرد. به عبارتی این نوع حرکت، بصورت نوسانی توأم با دوران بوده که بصورت منظم تکرار می‌شود. با افزایش نسبت طولی (شکل ۸-ب)، در سرعت‌های پایین، جسم ابتدا با نوسان وارد محدوده دورانی می‌شود اما با افزایش سرعت، حرکت جسم از ابتدا دورانی خواهد بود. در این شکل برای نسبت طولی ۴ (شکل ۸-ج)، می‌توان دریافت که با افزایش نسبت طولی و همچنین افزایش سرعت جریان، حرکت جسم بصورت دورانی پایا می‌باشد. در این شکل با بررسی تغییرات سرعت جریان آزاد و همچنین تغییرات نسبت طولی، در زاویه حمله اولیه صفر درجه، رژیم‌های حرکتی نوسانی ناپایا، نوسانی پایا، دورانی ناپایا و دورانی پایا مشاهده می‌شود.

تغییرات زاویه جسم نسبت به زمان در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه برای نسبت‌های طولی مختلف و در زوایای حمله اولیه متفاوت در شکل ۹ دیده می‌شود. همان طوری که از شکل ۹ پیداست، در زاویه حمله اولیه صفر درجه و در نسبت طولی ۱ (شکل ۹-الف)، بدلیل زیاد بودن نیروی وارده به صفحات، حداکثر دامنه نوسانات در این نسبت طولی دیده می‌شود. اما چون مقدار سرعت کم است، بنابراین حرکت جسم بصورت نوسانی ناپایا و میرا شده دیده می‌شود. همچنین می‌توان مشاهده نمود که در زوایای حمله اولیه ۴۰ و ۶۴ درجه، بدلیل کاهش نیروی وارده به صفحات که ناشی از سرعت جریان آزاد و همچنین قرار گرفتن در زاویه تعادلی ۶۰ درجه می‌باشد، مدل مورد بررسی در این حالت فاقد نوسان می‌باشد. با افزایش



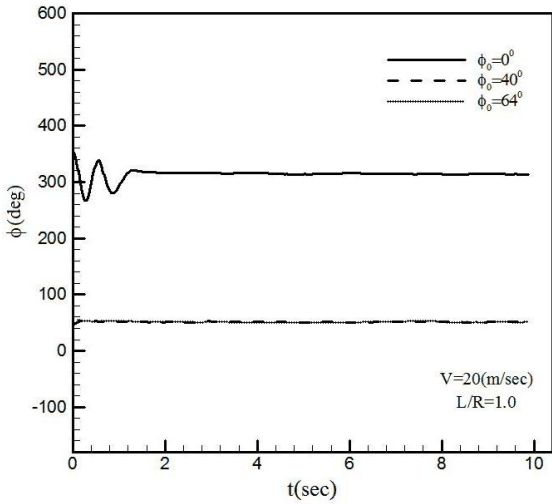


شکل ۷ - تغییرات زاویه جسم نسبت به زمان برای نسبت‌های طولی مختلف و زوایای حمله اولیه متفاوت در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه

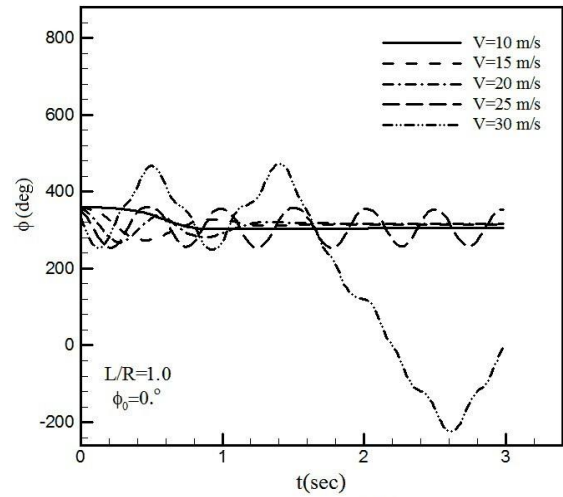
نسبت طولی (شکل ۹-ب)، در زاویه حمله اولیه صفر درجه، رژیم حرکتی دورانی پایا دیده می‌شود. در این حالت با افزایش زاویه حمله اولیه مدل، نیروی وارده به صفحات کاهش پیدا کرده و حرکت نوسانی همراه با دوران مشاهده می‌شود. برای نسبت طولی ۴ (شکل ۹-ج) در زوایای حمله اولیه صفر درجه، حرکت نوسانی جسم از نوع دورانی پایا می‌باشد.

عموما رژیم حرکتی نسبت‌های طولی ۳ و ۴ از نظر نوع حرکت در زوایای حمله و سرعت یکسان، شبیه به یکدیگر بوده و در این مورد از نوع دورانی و نوسانی - دورانی می‌باشد. اما به لحاظ این که در نسبت طولی ۴، طول صفحات افزایش پیدا کرده و بنابراین دوران در این نسبت طولی با قدرت بیشتری نسبت به صورت ۳ می‌گیرد.

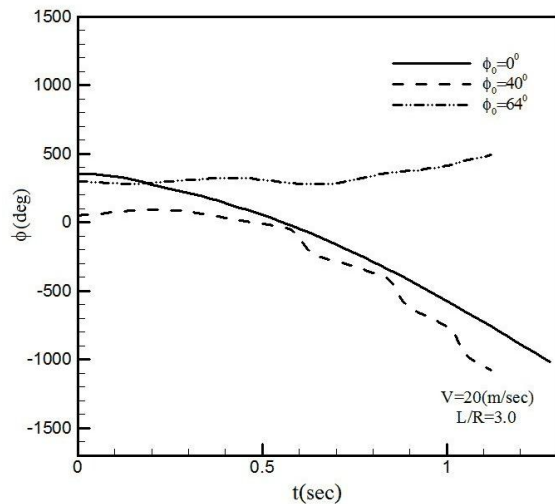
الگوی رفتار دینامیکی یا به عبارتی جهت‌گیری مدل‌ها در جریان تونل باد با سرعت‌های مختلف و نسبت طولی متفاوت در اشکال ۱۰ تا ۱۲ دیده می‌شود. شکل ۱۰، برای استوانه با نسبت طولی ۱ می‌باشد. همان‌طوری که اشاره شد در نسبت طولی ۱، بدلیل کاهش سطح مقطع جسم و همچنین کاهش نیروی وارده از جریان آزاد به صفحات، حرکت در سرعت‌های پائین بصورت نوسانی بوده که با افزایش سرعت رژیم حرکتی از نوسانی ناپایا به نوسانی پایا و سپس به دورانی پایا تغییر پیدا می‌کند. در شکل ۱۱، با افزایش نسبت طولی صفحات جسم، در زوایای حمله اولیه صفر و نزدیک به آن، نیروی وارده به صفحات زیاد بوده و باعث می‌شود تا جسم دوران کند. با افزایش زوایای حمله اولیه به تدریج حرکت جسم، نوسانی همراه با دورانی خواهد شد تا اینکه در زوایای حمله اولیه نزدیک به زاویه تعادلی ۶۰ درجه، بصورت نوسانی ناپایا میراشده حول زاویه تعادل در می‌آید. با افزایش سرعت جریان، رفتار حرکتی مدل به صورت نوسانی درآمده و حول زاویه ۶۰ درجه میرا می‌گردد که این نوع رژیم حرکتی در نسبت طولی ۳، در تمامی سرعت‌های جریان آزاد دیده می‌شود. در نسبت طولی ۴ (شکل ۱۲)، به دلیل افزایش طول صفحات، در تمامی سرعت‌ها و زوایای حمله اولیه صفر تا ۵۶ درجه، جسم پس از رهایش دارای سرعت دورانی پایا می‌باشد اما در محدوده زوایای ۵۶ تا ۶۴ درجه، چون محدوده زاویه تعادلی می‌باشد، بنابراین برای جسم حرکتی به صورت نوسانی ناپایا همراه با دورانی پایا مشاهده می‌شود.



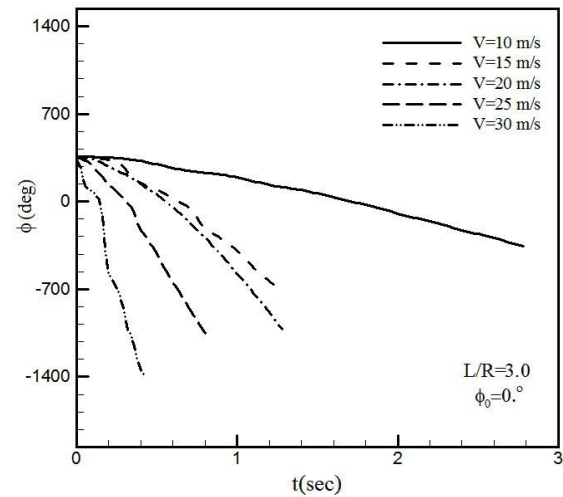
الف-  $L/R = 1$



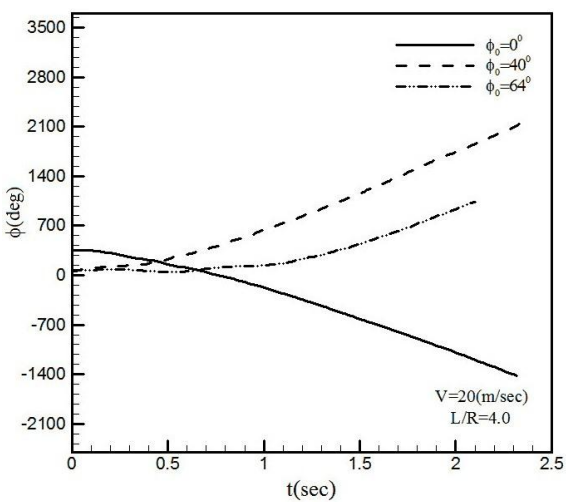
الف-  $L/R = 1$



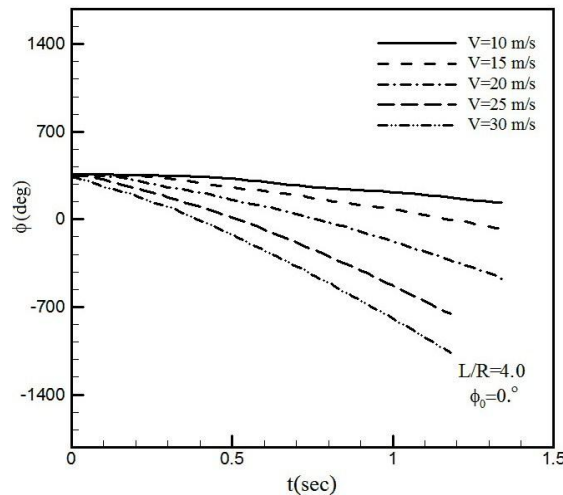
ب-  $L/R = 3$



ب-  $L/R = 3$



ج-  $L/R = 4$



ج-  $L/R = 4$

شکل ۹ - تغییرات زاویه‌ای جسم نسبت به زمان برای نسبت‌های طولی مختلف و زوایای حمله اولیه متفاوت

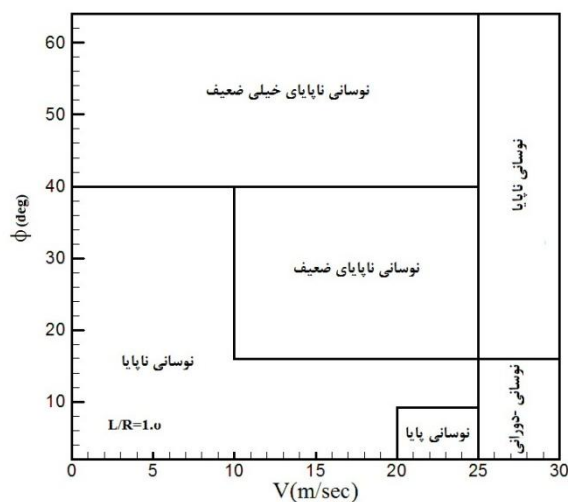
شکل ۸ - تغییرات زاویه جسم نسبت به زمان برای نسبت‌های طولی مختلف و سرعت‌های متفاوت در زاویه حمله اولیه صفر درجه

تغییرات سرعت زاویه‌ای نسبت به زمان برای نسبت‌های طولی مختلف و سرعت‌های متفاوت در زاویه حمله اولیه صفر درجه در شکل ۱۳ آورده شده است. برای نسبت طولی ۱ (شکل ۱۳-الف)، در سرعت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه حرکت جسم بصورت نوسانی ناپایا بوده که پس از یک نوسان، میرا می‌شود. در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه نیز جسم دارای نوسانی ناپایا بوده که در رژیم حرکتی نوسانی تغییرات سرعت زاویه‌ای مدل به صورت نوسانات منظم با کاهش دامنه نوسان مشاهده می‌شود همچنین در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه، حرکت جسم به صورت نوسانی ناپایا توام با دورانی ناپایا است. در این نسبت طولی، جسم پس از رهايش، نوسان نموده سپس دامنه نوسان زیاد شده و وارد فاز دورانی می‌شود و پس از انجام چند دوران مجدداً وارد فاز نوسانی می‌گردد. در رژیم حرکتی نوسانی، تغییرات سرعت زاویه‌ای مدل به صورت نوسانات نامنظم البته با کاهش دامنه نوسان دیده می‌شود. علامت منفی سرعت زاویه‌ای، نشان دهنده تغییر جهت حرکت مدل می‌باشد، بدین صورت که علامت مثبت برای حرکت پادساعتگرد بوده و علامت منفی برای حرکت ساعتگرد مدل می‌باشد. با افزایش نسبت طولی (شکل‌های ۱۳-ب و ۱۳-ج)، چون جسم در زاویه حمله اولیه صفر درجه و سرعت‌های مختلف دارای حرکت دورانی پایا بوده، لذا تغییرات سرعت زاویه‌ای آن نسبت به زمان به صورت موج سینوسی همراه با کاهش دامنه نوسان خواهد بود که در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه این موضوع بخوبی دیده می‌شود.

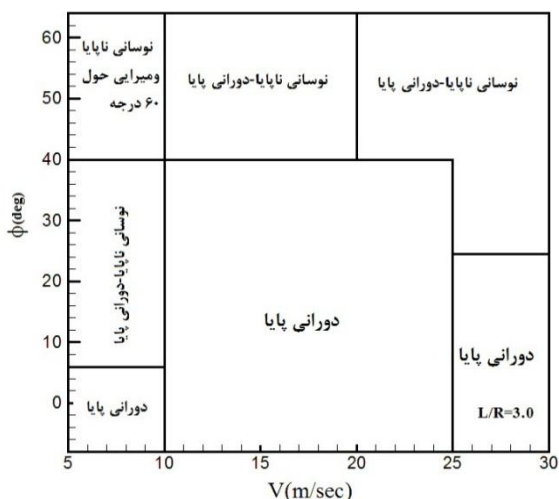
عدد بی‌بعد استروهاال  $S_t$ ، بیانگر نوسانات جریان می‌باشد. این عدد با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید

$$S_t = \frac{f l}{V_\infty} \quad (1)$$

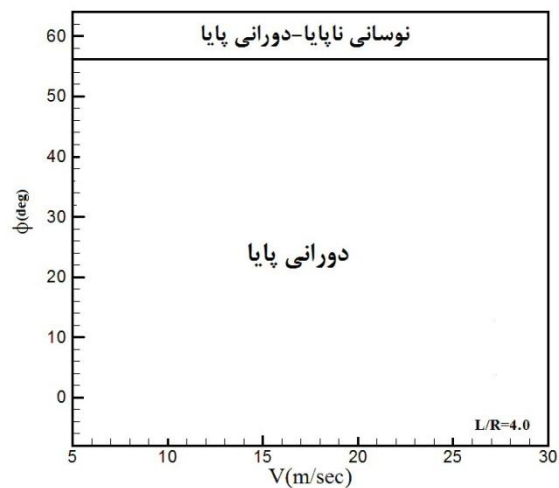
که در آن  $f$  فرکانس نوسانات جریان،  $l$  طول مشخصه و  $V_\infty$  سرعت جریان آزاد می‌باشد. سارپکایا بیان نمود هنگامی که دامنه نوسان جسم شدید باشد یا به عبارتی جسم دارای رژیم حرکتی دورانی باشد، در این ناحیه فرکانس نوسانات جریان با فرکانس نوسان یا دورانی جسم برابر می‌باشد [۶]. از آن رو در این حالت، برای محاسبه عدد استروهاال در رژیم حرکتی دورانی پایا به جای فرکانس نوسانات جریان از فرکانس دورانی جسم استفاده می‌شود. تغییرات عدد استروهاال نسبت به عدد بی‌بعد رینولدز برای نسبت‌های طولی ۳ و ۴ در شکل ۱۴



شکل ۱۰ - الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۱

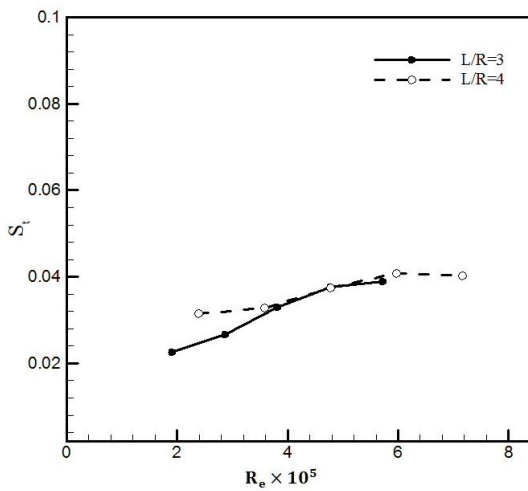


شکل ۱۱ - الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۳



شکل ۱۲ - الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۴

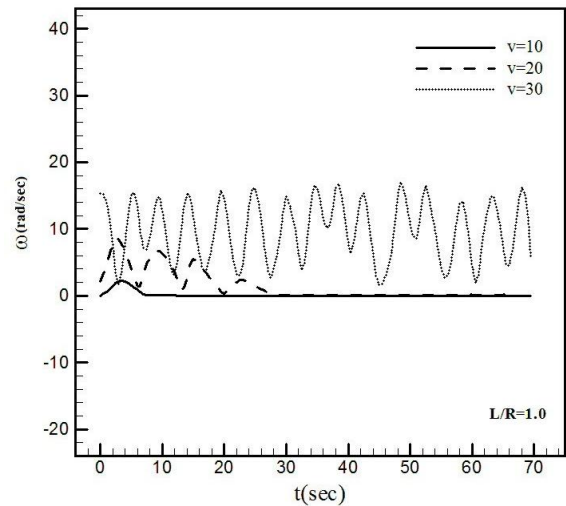
نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۴ پیداست، با افزایش عدد رینولدز، عدد استروهل تقریباً ثابت می‌باشد. همان‌طوری که بلوینز در آزمایشات خود نشان داده است که برای استوانه چرخان تغییرات عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز مقدار ثابتی حدود ۰/۲ دارد، برای مدل مورد بررسی در این تحقیق متوسط عدد استروهل با نسبت طولی ۳ و ۴ مقدار ثابتی حدود ۰/۳ می‌باشد.



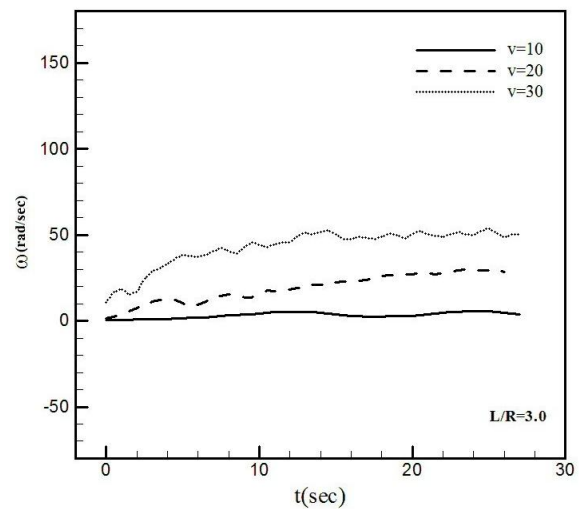
شکل ۱۴- تغییرات عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز در نسبت‌های طولی مختلف

### عدم قطعیت جواب‌ها

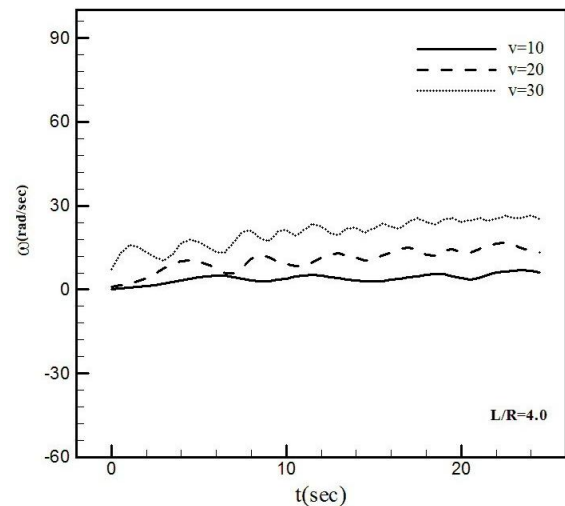
در یک آزمایش منابع خطاهای مختلفی وجود دارد که تقریب و تخمین نحوه و میزان این خطا جهت اطمینان به نتایج حاصل از آزمایش، بخشی از آزمایش به حساب می‌آید. اندازه‌گیری عدم قطعیت در یک آزمایش را می‌توان در جریان یک آزمایش معرفی کرد تا کیفیت نتایج حاصل از آزمایش مشخص گردد. با توجه به هدف انجام آزمایش، اطلاعات مشخصی مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش‌های مختلفی دنبال می‌شود. هدف نهایی از آنالیز عدم قطعیت، پیدا کردن تقریبی حداکثر پارامترهای خطای تصادفی<sup>۲۸</sup> و خطای بایاس<sup>۲۹</sup> (خطای وسایل اندازه‌گیری) سیستماتیک است. با ترکیب دو پارامتر ذکر شده می‌توان خطای نهایی آزمایش و میزان عدم قطعیت نتایج آزمایش را تعیین نمود. در خصوص خطای بایاس، دستگاه ساخته‌شده از قسمت‌های متنوعی برخوردار بوده که هر یک از این بخش‌ها خطایی را وارد سیستم و نتایج حاصله از آزمایش می‌نماید. اولین قسمت مورد بررسی، صفحات تخت بوده که از



الف-  $L/R = 1$



ب-  $L/R = 3$



ج-  $L/R = 4$

شکل ۱۳ - تغییرات سرعت زاویه‌ای نسبت به زمان در زاویه حمله اولیه صفر درجه و برای نسبت‌های طولی مختلف

اندازه‌گیری جهت این صفحه بنا به روابط (۲) و (۳) به صورت زیر است:

$$\%E_L = \frac{0.1}{16} \times 100 = \%0.625$$

$$\%E_W = \frac{0.1}{5} \times 100 = \%2$$

پس درصد خطای اندازه‌گیری در بدترین شرایط ممکن ۲ درصد می‌باشد. بدترین حالت ممکن در زاویه حمله صفحات با بیشترین خطا، اولین گام چرخ‌دنده و به عبارتی زاویه حمله ۸ درجه است. دقت و درصد خطای این زاویه مطابق با رابطه (۴) به صورت ذیل می‌باشد:

$$\phi = (8.00 \pm 0.35) \text{ deg}$$

$$\%E_\phi = \frac{0.35}{8.00} \times 100 = \%4.3$$

زمان اندازه‌گیری آزمایش با صفحه  $5 \times 16$  به مدت ۴ ثانیه بوده است. لذا دقت و درصد خطای محاسبه‌شده جهت زمان مورد نظر بنا به رابطه (۵) به صورت زیر می‌باشد:

$$t = (4.000 \pm 0.001) \text{ sec}$$

$$\%E_t = \frac{0.001}{4.000} \times 100 = \%0.025$$

خطاهای محاسبه‌شده فوق در بدترین حالت ممکن بوده لذا در شرایط دیگر نیز مقدار خطا می‌بایست محاسبه گردد تا میانگین خطای وارده بر کلیه آزمایشات محاسبه گردد. بهترین حالت موجود در صفحات مورد آزمایش از نظر حداقل خطا و بیشترین دقت مربوط به بزرگترین صفحه با ابعاد  $20 \times 16$  سانتی‌متر می‌باشد. لذا دقت و خطای اندازه‌گیری آن بنابه روابط (۲) و (۳) به صورت زیر است:

$$L = (24.0 \pm 0.1) \text{ cm}$$

$$W = (16.0 \pm 0.1) \text{ cm}$$

$$\%E_L = \frac{0.1}{24.0} \times 100 = \%0.417$$

$$\%E_W = \frac{0.1}{16.0} \times 100 = \%0.625$$

همان‌طور که دیده می‌شود حداقل خطای موجود در اندازه‌گیری و برش صفحات  $0.417\%$  درصد است. هر چه زاویه حمله صفحه افزایش یابد لذا دقت آن افزایش یافته و خطای وارده کاهش

جنس آلومینیوم می‌باشند. این صفحات با دستگاه برش صنعتی (کاتر) بریده شده‌اند. دقت این دستگاه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. در نتیجه درصد خطای برش به صورت روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌گردد:

$$\%E_L = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (۲)$$

$$\%E_W = \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (۳)$$

که در آن  $L$  طول و  $W$  عرض صفحه می‌باشد. چرخ‌دنده ۴۵ دندانه مورد استفاده در آزمایش که فاصله مابین دندانه‌های آن ۸ درجه می‌باشد نیز دارای یک دقت معینی بر حسب تکنولوژی طراحی و ساخت آن می‌باشد. قطعه دیگر موتور شفت انکودر بوده که تأثیر زیادی بر روی نتایج دارد. این قطعه همانگونه که ذکر گردید دارای وضوح  $30 \times 1024$  می‌باشد. بدین معنی که یک دوران کامل ( $360^\circ$  درجه) را به  $1024$  قسمت تقسیم کرده و جابجایی شفت به ازاء  $0.35^\circ$  درجه می‌باشد. لذا دقت موتور انکودر برابر است با:

$$\phi = (1.00 \pm 0.35) \text{ deg} \quad (۴)$$

زمان و میزان داده‌برداری دستگاه نیز از جمله مسائل مهم در بررسی دقت و خطای آزمایش می‌باشد. در هر ثانیه تعداد ۲۵۰ عدد نمونه‌برداری صورت می‌گیرد، لذا به‌ازای هر  $0.04$  ثانیه یک نمونه توسط دستگاه گرفته می‌شود. دقت زمان نمونه‌برداری به صورت رابطه (۵) است:

$$t = (0.004 \pm 0.001) \text{ sec} \quad (۵)$$

تونل باد نیز دارای یک دقت معین در شارش جریان در یک سرعت مشخص می‌باشد. تونل باد استفاده شده، از نوع مدار بسته با مقطع آزمون باز می‌باشد. خطای تونل باد با توجه به افزایش سرعت و کاهش اغتشاشات، دارای حداقل مقدار  $0.05$  درصد و حداکثر  $0.1$  درصد می‌باشد.

جهت برآورد خطا در آزمایش می‌بایست بدترین شرایط ممکن را در نظر گرفت. بیشترین خطا در صفحات مورد آزمایش با توجه به مطالب فوق کوچکترین آنها می‌باشد. لذا صفحه با ابعاد  $5 \times 16$  سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. درصد خطای

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار دینامیکی یک مدل استوانه با سه صفحه متصل به‌آن به‌صورت تجربی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل قرارگرفته در جریان یکنواخت، تحت تأثیر نسبت طولی مختلف (L/R)، زوایای حمله اولیه مختلف و سرعت‌های جریان آزاد مختلف دارای الگوی‌های حرکتی متفاوتی همچون نوسانی پایا، دورانی پایا، نوسانی ناپایا و دورانی ناپایا می‌باشد. در نسبت‌های طولی کم و سرعت جریان آزاد پایین، به‌علت کوچک‌بودن نیروهای عمودی وارد بر صفحات متصل به جسم، الگوی حرکتی میراشده حول زاویه تعادلی ۶۰ درجه دیده می‌شود. دلیل وجود الگوی حرکتی متفاوت نوسانی و دورانی یا ترکیب آنها به‌لحاظ کاری است که جریان بر روی جسم انجام می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بیشترین نوسان و یا دوران مربوط به زوایای حمله اولیه کم به‌ویژه در زاویه صفر درجه است که دلیل آن زیاد بودن نیروی وارد بر صفحات در این زاویه می‌باشد. در نسبت طولی کم، رژیم حرکتی، عموماً از نوع نوسانی بوده که با افزایش نسبت طولی، رژیم حرکتی از نوسانی به دورانی تغییر می‌کند. در نسبت‌های طولی کم با افزایش سرعت، رژیم جریان تغییر می‌کند که در سرعت جریان آزاد ۳۰ متر بر ثانیه این تغییرات بخوبی دیده می‌شود. درضمن مشخص گردید که تغییرات سرعت زاویه‌ای نسبت به زمان در نسبت‌های طولی ۱ و ۴، با کاهش دامنه نوسان در هر رژیم حرکتی همراه است. همچنین در حرکت نوسانی با گذشت زمان، سرعت نوسانی جسم نیز کاهش می‌یابد. در رژیم حرکتی دورانی، کمترین عدد استروهمال برابر با ۰/۰۲۲۶ می‌باشد که با افزایش عدد رینولدز، عدد استروهمال دارای مقدار ثابتی می‌گردد که برای نسبت طولی ۳ و ۴، مقدار متوسط آن در حدود ۰/۰۳ می‌باشد.

## پی‌نوشت‌ها

- ۱ Wake
- ۲ Von Karman
- ۳ Reynolds Number
- ۴ Karman vortex street
- ۵ vortex induced vibration
- ۶ Class I
- ۷ Class II

می‌یابد. با توجه به اینکه این صفحه در حداکثر زاویه حمله ۶۴ درجه مورد آزمایش قرار گرفته است، لذا دقت و خطای وارده بنابه رابطه (۴) به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\phi = (64.00 \pm 0.35) \text{ deg}$$

$$\%E_{\phi} = \frac{0.35}{64.00} \times 100 = \%0.547$$

البته شرایط فوق در بهترین موقعیت جهت حداقل خطا نبوده است. لذا جهت بررسی ضریب خطای موجود در عدد استروهمال مورد بررسی قرار گرفته است. مسلماً هر چقدر مدت زمان آزمایش افزایش یابد دقت آن نیز متعاقباً افزایش یافته و خطای وارده کاهش می‌یابد. زمان مورد آزمایش ۲۰ ثانیه بوده است بنابراین دقت و درصد خطای وارده بر آن بنابه رابطه (۵) بدین صورت می‌باشد:

$$t = (20.000 \pm 0.001) \text{ sec}$$

$$\%E_t = \frac{0.001}{20.000} \times 100 = \%0.005$$

سرعت جریان نیز شرایط مشابه با زمان را داشته و با افزایش آن اغتشاشات کاهش خواهد یافت. حداقل اغتشاشات تونل باد ۰/۰۵ درصد می‌باشد. عدد استروهمال برای استوانه به‌همراه ۳ صفحه و نسبت طولی ۳ در سرعت جریان ۲۰ متر بر ثانیه در حدود ۰/۰۴۵۴۴ می‌باشد. حال دقت و درصد خطای عدد استروهمال بصورت زیر است:

$$S_t = \frac{f l}{V_{\infty}}$$

$$T = (0.208 \pm 0.001)$$

$$\%E_T = \frac{0.001}{0.208} \times 100 = \%0.481$$

$$\%E_L = \%0.625$$

$$\%E_{V_{\infty}} = \%0.25$$

حال حداقل و حداکثر میزان عدد استروهمال می‌بایستی محاسبه گردد.

$$S_{t \min} = 0.0226$$

$$S_{t \max} = 0.0504$$

لذا دقت عدد استروهمال برابر است با:

$$S_t = (0.04544 \pm 0.001)$$

Mechanical Engineering, Volume 14, No. 75, pp. 929-936, 1971.

- [6].Sarpkaya, T., "Vortex-induced vibrations, A selective review", Journal of Applied Mechanics, Volume 46, No. 2, pp. 241-258, 1979.
- [7].Sarpkaya, T., "A critical review of the intrinsic nature of vortex induced vibration", Journal of Fluids and Structures, Volume 19, No. 4, pp. 389-447, 2004.
- [8].Scanlan, R. H., Rosenbaum, R., "Introduction to the study of Aircraft Vibration and Flutter", Mineola: Dover, 1968.
- [9].Protos, A., Goldschmidt, V. W., Toebes, G. H., "Hydroelastic forces on bluff cylinders", ASME Journal of Basic Engineering, Volume 90, No. 3, pp. 378-386, 1968.
- [10].Bearman, P. W., Obasaju, E. D., "An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating Square-Section cylinders", Journal of Fluid Mechanics, Volume 119, No. 1, pp. 297-321, 1982.
- [11].Williamson, C. H. K., Roshko, A., "Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder", Journal of Fluids and Structures, Volume 2, No. 4, pp. 355-381, 1988.
- [12].Griffin, O. M., Skop, R. A., "The vortex wake of vibrating cylinders", Journal of Fluid Mechanics, Volume 66, No. 3, pp. 553-576, 1974.
- [13].Isvand, H., Keshvari, R., "Numerical Modeling of the Plate Behavior with Rotational Degree of Freedom and the Study of the Aerodynamic Hysteresis Phenomenon", Journal of Aeronautical Engineering, Volume 12, No. 2, pp. 13-22, 2011 (in Persian)
- [14].Isvand, H., Salmaninejad, A., Sharafi, A., "Experimental study of unsteady flow over cylinder with plates perpendicular it with Rotational Degree of Freedom", Proceeding of the 14th International conference of Iranian Aerospace Society, 2001 (in Persian)
- [15].Isvand, H., Salmaninejad, A., Sharafi, A., "Experimental and numerical investigation of the length ratio and angle of attack effects on dynamic behavior of two plates perpendicular to the Cylinder", Modares Mechanical Engineering, Volume 16, No. 7, pp. 121-132, 2016 (in Persian)

- ۸ Free vibration
- ۹ Forced vibration
- ۱۰ Fengs
- ۱۱ Amandoles
- ۱۲ Umemura
- ۱۳ Aerodynamic Damping Factor
- ۱۴ Self-Excited Motion
- ۱۵ Sarpkaya
- ۱۶ Lock in
- ۱۷ Scalan and Rosenbaum
- ۱۸ Protos
- ۱۹ Bearman and Obasaju
- ۲۰ Williamson and Roshko
- ۲۱ Griffin
- ۲۲ Aerodynamic Hysteresis
- ۲۳ Modified Discrete Vortex Method
- ۲۴ High Sweep Angle
- ۲۵ Lab view
- ۲۶ Shaft Encoder
- ۲۷ Strouhal Number
- ۲۸ Precision Error
- ۲۹ Systematic or Fixed Bias Error
- ۳۰ Resolution

#### منابع و مراجع

- [1].Van Dyke, M., "An Album of Fluid Motion", 10th Edition, pp. 56-57, California: Parabolic, 1982.
- [2].Shehryar, M., "Transient Instability Mechanisms by Frequency Coalescence in Fluid Structure Systems", PhD Thesis, Laboratoire d'Hydrodynamique (LadHyX) Ecole Polytechnique Palaiseau, France, 2010.
- [3].Feng, C. C., "The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and d-section cylinders", Master's Thesis, The University of British Columbia, Canada, 1968.
- [4].Amandolese, X., Hemon, P., "Vortex-induced vibration of a square cylinder in wind tunnel", Journal of Comptes Rendus Mecanique, Volume 338, No. 1, pp. 12-17, 2010.
- [5].Umemura, S., Yamaguchi, T., Shiraki, K., "On the vibration of Cylinders caused by Karman Vortex", Bulletin of Japan Society of