بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه یزد

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

بررسی تجربی جریان حول تک سیلندر و دو سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی در آرایش پشت سر هم

استاد راهنما:

دکتر احمد سوهانکار

اساتید مشاور:

دکتر علی اکبر دهقان

دکتر مجتبی دهقان منشادی

پژوهش و نگارش:

علیرضا موحدی

اسفند ماه ۸۹

تقدیم به:

بزرگ‌ترین پشتیبان‌هایم در زندگی:

پدر و مادر عزیزم...

قدردانی

خدای را سپاس که به من توان داد تا مراحل نگارش این پایان نامه را نیز به پایان برسانم. حال، در پایان مراحل انجام این پایان نامه، لازم می‌دانم تا از زحمات تمامی افرادی که به هر نحوی در انجام این کار یاری رسان من بوده اند تشکر نمایم. پیش از همه، بر خود لازم می‌دانم تا با نهایت ادب و فروتنی از زحمات استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر احمد سوهانکار که من را در تنظیم و آماده سازی پایان نامه حاضر، یاری و مساعدت نمودند، تقدیر و سپاسگزاری نمایم. هم‌چنین از زحمات جناب آقای دکتر علی اکبر دهقان و جناب آقای دکتر مجتبی دهقان منشادی که به عنوان اساتید مشاور، یاری‌گر من در طی مراحل مختلف انجام این پایان نامه بودند، نهایت سپاس-گزاری را دارم. در نهایت، بایستی از دوستان عزیزم، آقایان حبیب الله اشکفتی، حامد پرویزپور، علی سعیدی‌نژاد، علی جعفری‌زاده و احمدعلی محمودی که زحمات زیادی در طول انجام این پایان نامه متحمل شدند، تشکر نمایم.

چکیده

جریان حول اجسام جریان بند مثل سیلندرهای دو بعدی با مقاطع مربعی و دایره ای کاربرد گسترده‌ای در زمینه مهندسی دارد. مطالعه جریان حول تک سازه، به مدت زیادی به عنوان یک مورد پایه‌ای مورد مطالعه تجربی و عددی قرار گرفته‌است. این کار به‌دفعات، برای سیلندرهای دایره‌ای و به میزان کمتری برای سایر هندسه‌ها مثل: سیلندرهای مربعی، سیلندرهای مستطیلی، صفحات تخت و ... به هر دو روش عددی و تجربی انجام شده‌است. ولی وقتی یک سازه در ویک سازه دیگری قرار می‌گیرد، ویژگی‌های جریان و نیروهای آیرودینامیکی، به شدت وابسته به شکل، فاصله بین سازه ها، آرایش و نحوه قرار گیری سازه ها و جهت جریان می‌باشند. در این حالت اگر تاثیر اتصال سازه به دیوار نیز در نظر گرفته شود (سازه سه بعدی)، ساختار جریان پیچیده تر نیز می‌شود و در این شرایط، جریان بسیار متفاوت تر از جریان عبوری از یک سازه تنها و دو بعدی رفتار می‌نماید.

در تحقیق حاضر، با استفاده از جریان سنج سیم داغ جریان حول یک سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی و نیز دو سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی در آرایش پشت سر هم و متصل به کف تونل باد، در اعداد رینولدز مختلف بررسی شده است. با استفاده از نتایج تجربی، سرعت متوسط و شدت آشفتگی در جهت جریان، اثرات عدد رینولدز بر ویژگی‌های جریان و نیز تحلیل طیفی سیگنال‌های سرعت ارائه شده است.

در فصل‌های اول و دوم این پایان نامه، مقدمه‌ای بر جریان حول سازه ها و نیز مروری بر کارهای انجام شده در این زمینه ارائه گردیده است. در فصل سوم، تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق معرفی می‌گردند.

در فصل چهارم، نتایج مربوط به مطالعات انجام شده روی تک سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی متصل به کف و در فصل پنجم، نتایج مربوط به دو سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی متصل به کف در آرایش پشت سر هم ارائه می‌شوند. نتایج مربوط به سرعت متوسط، شدت توربولانس، تحلیل فرکانسی، مقدار نرخ استهلاک انرژی، مقیاس طولی کولموگروف و ... به تفکیک در این دو فصل ارائه می‌گردند. نهایتا در فصل ششم خطا و عدم قطعیت موجود در آزمایش ها مورد بررسی

قرار می گیرند.

فهرست مطالب

فصل۱ ..... ۱
مقدمه ۱
۱-۱. مقدمه ای بر جریان حول سازه ها ۱
۱-۲. لایه مرزی ۵
۱-۳. جدایی جریان و ریزش گردابه ۶
فصل۲ ..... ۹
۲-۱. مقدمه ۹
۲-۲. جریان حول یک سیلندر ۹
۲-۲-۱. جریان حول یک سیلندر دایره ای ۹
۲-۲-۲. جریان حول یک سیلندر مربعی ۱۱
۲-۳. جریان حول دو سیلندر ۱۸
۲-۳-۱. جریان حول دو سیلندر دایره ای ۱۹
۲-۳-۲. جریان حول دو سیلندر مربعی ۲۳
فصل۳ ..... ۳۰
۳-۱. مقدمه ۳۰
۳-۲. تونل باد ۳۰
۳-۳. جریان سنج سیم داغ ۳۲
۳-۴. مدلها ۳۶
فصل۴ ..... ۳۷
۴-۱. مقدمه ۳۷
۴-۲. معرفی آزمایشها ۳۷
۴-۳. نتایج، تحلیل و بررسی آنها ۴۴
۴-۳-۱. بررسی سرعت متوسط در صفحه Z=۰ ..... ۴۵
۴-۳-۲. بررسی سرعت متوسط در صفحات X ثابت ۵۲
۴-۳-۳. بررسی سرعت متوسط در صفحات Y ثابت ۷۱
۴-۳-۴. بررسی شدت توربولانس در صفحه Z=۰ ..... ۷۴
۴-۳-۵. بررسی شدت توربولانس در صفحات X ثابت ۷۹
۴-۳-۶. بررسی شدت توربولانس در صفحات Y ثابت ۹۰
۴-۳-۷. تحلیل فرکانسی ۹۳
۴-۳-۸. نرخ استهلاک انرژی (ε) و مقیاس طولی کولموگروف (η) ۱۰۱
فصل۵ ..... ۱۰۹
۵-۱. مقدمه ۱۰۹

۵-۲. معرفی آزمایشها ۱۰۹
۵-۳. نتایج و تحلیل و بررسی آنها ۱۱۰
۵-۳-۱. بررسی سرعت متوسط در صفحه Z=۰ ..... ۱۱۱
۵-۳-۲. بررسی سرعت متوسط در صفحه Y/D=۳/۵ ..... ۱۱۳
۵-۳-۳. بررسی سرعت متوسط در صفحات X ثابت ۱۱۵
۵-۳-۴. بررسی شدت توربولانس در صفحه Z=۰ ..... ۱۱۷
۵-۳-۵. بررسی شدت توربولانس در صفحه Y/D=۳/۵ ..... ۱۱۸
۵-۳-۶. بررسی شدت توربولانس در صفحات X ثابت ۱۱۹
۵-۳-۷. تحلیل فرکانسی ۱۲۰
۵-۳-۸. نرخ استهلاک انرژی (ε) و مقیاس طولی کولموگروف (η) ۱۲۶
فصل۶ ..... ۱۳۴
۶-۱. مقدمه ۱۳۴
۶-۲. عدم قطعیت پارامترهای مستقل ۱۳۴
۶-۳. خطای موجود در اندازه گیری داده های لحظه ای سرعت ۱۳۵
۶-۳-۱. عدم قطعیت جریان سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و ...) ... ۱۳۵
۶-۳-۲. عدم قطعیت کالیبراسیون ۱۳۵
۶-۳-۳. عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال ۱۳۷
۶-۳-۴. عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری پراب ۱۳۷
۶-۳-۵. عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما ۱۳۷
۶-۳-۶. عدم قطعیت ناشی از تغییرات فشار محیط ۱۳۸
۶-۳-۷. عدم قطعیت ناشی از تغییرات رطوبت ۱۳۹
۶-۳-۸. عدم قطعیت داده سرعت در یک نقطه ۱۳۹
۶-۴. عدم قطعیت عدد رینولدز ۱۴۱
۶-۵. عدم قطعیت سرعت متوسط (u) و سرعت نوسانی (urms) ۱۴۲
۶-۶. عدم قطعیت سایر کمیت های توربولانسی ۱۴۳
۶-۷. نتیجه گیری و جمع بندی ۱۴۴
۶-۸. پیشنهادها جهت ادامه کار ۱۴۵
پیوست الف. بخشی از نتایج تجربی ۱۴۶
پیوست ب. مقالات پذیرفته شده ۱۵۱

فهرست اشکال

شکل۱-۱. دو سازه بلند در آرایش پشت سر هم. ۳
شکل۱-۲. توزیع سرعت در لایه مرزی روی صفحه تخت. ۶
شکل۱-۳. جدایی لایه مرزی و تشکیل گردابه روی یک ایرفویل. ۷
شکل۱-۴. تغییرات پروفیل سرعت در حین فرآیند جدایی جریان. ۷
شکل۱-۵. ریزش گردابه پشت یک سیلندر دایرهای. ۸
شکل۲-۱. میدان جریان در اطراف یک سیلندردایرهای [۲]. ۱۰
شکل۲-۲. خطوط جریان در اطراف سیلندر مربعی برای اعداد رینولدز مختلف.
(a) Re =۱؛ (b) Re =۳۰؛ (c) Re =۶۰؛ (d) Re =۲۰۰ [۱۰]. ۱۳
شکل۲-۳. (a) هندسه جریان؛ (b) دامنه حل در نزدیکی جسم [۱۲]. ۱۴
شکل۲-۴. عدد استروهال و ضریب نیروی پسای متوسط در مقابل عدد رینولدز، مقایسه با نتایج عددی و تجربی منتشر شده [۱۲]. ۱۵
شکل۲-۵. شکل شماتیک مدل مورد بررسی [۱۵]. ۱۶
شکل۲-۶. خطوط جریان در صفحه x-z در y=۰. (a) H/d=۳؛ (b) H/d=۵؛ (c) H/d=۷ [۱۴]. ۱۸
شکل۲-۷. ساختار جریان پشت یک سیلندر مربعی. (a) H/d =۳؛ (b) H/d ≥۵ [۱۴]. ۱۸
شکل۲-۸. نمایی ساده از الگوهای جریان حول دو سیلندر دایرهای پشت سر هم به فواصل مختلف. ۲۱
شکل۲-۹. آرایش مدل ها: (a) تک مدل؛ (b,c) دو مدل برای فواصل مختلف [۱۸]. ۲۱
شکل۲-۱۰. بردارهای سرعت و خطوط جریان برای $\mathbf{u}\infty = ۸m/s$.
(a) فاصله بین دو سیلندر=۰/۵h؛ (b) فاصله بین دو سیلندر=۲h [۱۸]. ۲۲
شکل۲-۱۱. دامنه محاسباتی برای جریان روی دو سیلندر پشت سر هم [۱۹]. ۲۳
شکل۲-۱۲. خطوط جریان لحظه ای وکانتورهای ورتیسیته برای سیلندرهای پشت سرهم در پنج لحظه زمانی در طول نیمی از دوره تناوب ریزش گردابه، Re=۱۰۰ و G=۵ [۱۹]. ۲۴
شکل۲-۱۳. دو سیلندر مربعی در آرایش پشت سر هم [۲۰]. ۲۴
شکل۲-۱۴. خطوط جریان مربوط به میدان سرعت متوسط در Re=۱۶۰۰۰ [۲۰]. ۲۵
شکل۲-۱۵. تغییرات ساختاری خطوط جریان برای نسبت فاصله ۲/۵ و سه رینولدز مختلف [۲۰]. ۲۶
شکل۲-۱۶. هندسه مورد بررسی و نام گذاری انجام شده [۲۳]. ۲۶
شکل۲-۱۷. عدد استروهال در مقابل فاصله بین دو سیلندر برای مطالعات دو و سه بعدی مختلف [۲۳]. ۲۷
شکل۳-۱. نمایی از تونل باد دانشگاه یزد. ۳۱
شکل۳-۲. اتاق آزمون اصلی تونل باد دانشگاه یزد. ۳۱
شکل۳-۳. شکل شماتیک اجزای مختلف جریان سنج سیم داغ و تجهیزات جانبی آن [۲۵]. ۳۳
شکل۳-۴. مکانیزم انتقال دهنده سنسوردر سه جهت X،Y و Z. ۳۵
شکل۳-۵. پراب یک بعدی با پایه های هم اندازه. ۳۶
شکل۴-۱. سیلندر مربعی قرار گرفته در اتاق آزمون اصلی تونل باد دانشگاه یزد. ۳۸
شکل۴-۲. دو نمونه از سنسور و نگه دارنده مورد استفاده برای جریان سنج سیم داغ.
(a) سنسور با زاویه؛ (b) سنسور عمودی. ۳۹
شکل۴-۳. یکی از پرابهای مورد استفاده در این مطالعه. ۳۹
شکل۴-۴. نمودار سرعت بر حسب درصد فن در مرکز اتاق آزمون برای دو سنسور مختلف. ۴۰
شکل۴-۵. نمودار شدت اغتشاشات بر حسب سرعت در مرکز اتاق آزمون برای دو سنسورمختلف. ۴۱

شکل۴-۶. دستگاه مختصات مربوط به سیلندر دو بعدی..... ۴۱
شکل۴-۷. نتایج مربوط به دو نوبت آزمایش روی خط Y=۰ در بالادست یک سیلندر مربعی دو بعدی:
(a) پروفیل سرعت متوسط؛ (b) پروفیل شدت توربولانس..... ۴۲
شکل۴-۸. دستگاه مختصات مورد استفاده در این مطالعه برای تک سیلندر مربعی..... ۴۲
شکل۴-۹. شبکه داده برداری شده در آزمایشهای تک سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی:
(a) صفحه Z=۰؛ (b) صفحات X ثابت..... ۴۳
شکل۴-۱۰. نمایی شماتیک از مدل آزمایشگاهی و تعریف محورهای مختصات [۱۵]..... ۴۴
شکل۴-۱۱. توزیع سرعت متوسط و نوسانی در محل قرارگیری مدل و در غیاب آن.
(a) مطالعه حاضر، Re=۲۰۰۰۰؛ (b) مطالعه وانگ و ژو ، Re=۹۵۰۰[۱۵]..... ۴۵
شکل۴-۱۲. پروفیل سرعت بدون بعد در صفحه Z=۰ در دو ناحیه در جهت X، برای Re=۱۱۰۰۰..... ۴۶
شکل۴-۱۳. نحوه قرار گیری مدل در تونل باد و محورهای مختصات [۲۵]..... ۴۷
شکل۴-۱۴. پروفیل سرعت بدون بعد در پایین دست مدل:
(a) مطالعه حاضر (Re=۱۱۰۰۰، A.R=۷)؛ (b) مطالعه پرویزپور[۲۵] (Re=۷۳۳۳/۳۳، A.R=۷/۴۵) ۴۸
شکل۴-۱۵. کانتور سرعت متوسط بدون بعد در صفحه Z=۰ : (a) Re=۱۱۰۰۰. (b) Re=۲۰۰۰۰..... ۴۹
شکل۴-۱۶. کانتورهای سرعت متوسط بدون بعد در صفحه Z=۰.
(a) مطالعه حاضر، Re=۱۱۰۰۰؛ (b) مطالعه وانگ و ژو ، Re=۹۳۰۰. مینیمم مقدار:۰/۱۴-، ماکزیمم مقدار:
۱/۱۴ وفاصله سطوح کانتور:۰/۱۴. خط پر رنگ مرز ناحیه جریان برگشتی را نشان می دهد[۱۵]..... ۵۰
شکل۴-۱۷. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد روی خط X/D= -۰/۵ از صفحه Z=۰ برای دو عدد رینولدز..... ۵۰
شکل۴-۱۸. پروفیل سرعت بدون بعد در صفحه Z=۰ و روی خط Y/D=۳/۵، برای Re=۹۳۰۰..... ۵۱
شکل۴-۱۹. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد در صفحه Z=۰ و روی خط Y/D=۷/۵ ، برای Re=۱۱۰۰۰..... ۵۲
شکل۴-۲۰. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد درصفحه X/D= -۳ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y... ۵۳
شکل۴-۲۱. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد درصفحه X/D= -۲ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y... ۵۴
شکل۴-۲۲. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد درصفحه X/D= -۱ و در Re=۲۰۰۰۰ دردوناحیه در جهت Y.... ۵۵
شکل۴-۲۳. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد در صفحه X/D= -۰/۵ و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y..... ۵۵
شکل۴-۲۴. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد در X/D= -۰/۵ : (a) Re=۱۱۰۰۰؛ (b) Re=۲۰۰۰۰..... ۵۶
شکل۴-۲۵. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد درصفحه X/D = ۰ و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه درجهت Y... ۵۷
شکل۴-۲۶. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد در X/D= ۰ : (a) Re=۱۱۰۰۰؛ (b) Re=۲۰۰۰۰..... ۵۸
شکل۴-۲۷. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد در صفحه X/D= ۰/۵ و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y.
..... ۵۸
شکل۴-۲۸. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۰/۵..... ۵۹
شکل۴-۲۹. وابستگی اندازه ناحیه جریان برگشتی به مقدار نسبت منظری (H/d)[۱۵]..... ۶۱
شکل۴-۳۰. پروفیل های سرعت متوسط بدون بعد در صفحه X/D= ۲ و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y..... ۶۱
شکل۴-۳۱. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۲..... ۶۲
شکل۴-۳۲. پروفیل های سرعت متوسط بدون بعد در صفحه X/D= ۳ و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y..... ۶۴
شکل۴-۳۳. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۳..... ۶۴

شکل۴-۳۴. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد در صفحه ۵ =X/D و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y. ۶۵
شکل۴-۳۵. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه ۵=X/D. ۶۶
شکل۴-۳۶. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد در صفحه ۱۰ =X/D و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y. ۶۷
شکل۴-۳۷. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه ۱۰=X/D. ۶۷
شکل۴-۳۸. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد در صفحه ۱۵ =X/D و در Re=۲۰۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y. ۶۸
شکل۴-۳۹. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه ۱۵=X/D. ۶۹
شکل۴-۴۰. کانتور سرعت بدون بعد در صفحات X ثابت در بالادست و پایین‌دست مدل برای Re=۲۰۰۰۰. ۷۰
شکل۴-۴۱. کانتور سرعت بدون بعد در صفحات X ثابت در کناره مدل برای Re=۲۰۰۰۰. ۷۰
شکل۴-۴۲. کانتورهای سرعت متوسط بدون بعد در صفحات Y ثابت. (a) کانتور سرعت متوسط بدون بعد برای مطالعه حاضر، Re=۱۱۰۰۰، Y/D=۶/۵؛ (b) کانتور سرعت متوسط بدون بعد برای مطالعه وانگ و ژو، Re=۹۳۰۰، Y/D=۶ (فاصله های کانتور:۰/۱)[۱۵]. ۷۲
شکل۴-۴۳. کانتورهای سرعت متوسط بدون بعد در صفحات Y ثابت. (a) کانتور سرعت متوسط بدون بعد برای مطالعه حاضر، Re=۱۱۰۰۰، Y/D=۳/۵؛ (b) کانتور سرعت متوسط بدون بعد برای مطالعه وانگ و ژو، Re=۹۳۰۰، Y/D=۳/۵ (فاصله های کانتور:۰/۱)[۱۵]. ۷۲
شکل۴-۴۴. شکل شماتیک ناحیه ویک سیلندر مربعی در صفحه Y/D=۳/۵ در۲۰۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ =Re. ۷۳
شکل۴-۴۵. کانتورهای سرعت متوسط بدون بعد در چند صفحه Y ثابت برای Re=۱۱۰۰۰. ۷۴
شکل۴-۴۶. الگوی شماتیک جریان متوسط حول سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی [۲۸] . ۷۴
شکل۴-۴۷. پروفیل شدت توربولانس در صفحه Z=۰ در دو ناحیه در جهت X، برای Re=۱۱۰۰۰. ۷۵
شکل۴-۴۸. کانتور شدت توربولانس در صفحه Z=۰ : (a) Re=۱۱۰۰۰؛ (b) Re=۲۰۰۰۰. ۷۶
شکل۴-۴۹. الگوی جریان حول یک سیلندر با سطح مقطع مستطیلی [۲۹]. ۷۷
شکل۴-۵۰. پروفیل شدت توربولانس در صفحه Z= ۰ روی خط Y/D =۳/۵ برای Re=۱۱۰۰۰. ۷۸
شکل۴-۵۱. پروفیل شدت توربولانس در صفحه Z= ۰ روی خط Y/D=۷/۵ برای Re=۱۱۰۰۰. ۷۸
شکل۴-۵۲. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= -۳ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۷۹
شکل۴-۵۳. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= -۱ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۸۰
شکل۴-۵۴. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= -۰/۵ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۸۱
شکل۴-۵۵. پروفیل‌های سرعت متوسط بدون بعد در X/D= -۰/۵ : (a) Re=۱۱۰۰۰؛ (b) Re=۲۰۰۰۰. ۸۱
شکل۴-۵۶. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= ۰ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۸۲
شکل۴-۵۷. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= ۰/۵ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۸۳
شکل۴-۵۸. پروفیلهای شدت توربولانس برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۰/۵. ۸۴
شکل۴-۵۹. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= ۲ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۸۵
شکل۴-۶۰. پروفیلهای شدت توربولانس برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۲. ۸۶
شکل۴-۶۱. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= ۳ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۸۶
شکل۴-۶۲. پروفیلهای شدت توربولانس برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۳. ۸۷
شکل۴-۶۳. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= ۱۰ و در Re=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y. ۸۸
شکل۴-۶۴. پروفیلهای شدت توربولانس برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۱۰. ۸۹
شکل۴-۶۵. کانتور شدت توربولانس در صفحات X ثابت در بالادست و پایین‌دست مدل برای Re=۲۰۰۰۰. ۹۰

شکل۴-۶۶. کانتور شدت توربولانس در صفحات X ثابت در کناره مدل برای Re=۲۰۰۰۰ ..... ۹۰
شکل۴-۶۷. کانتور توان دوم سرعت نوسانی بدون بعد (a) مطالعه حاضر، Re=۱۱۰۰۰، Y/D=۶/۵؛
(b) مطالعه وانگ و ژو، Re=۹۳۰۰، Y/D=۶، (فاصله های کانتور:۰/۰۰۴)[۱۵]..... ۹۱
شکل۴-۶۸. کانتور توان دوم سرعت نوسانی بدون بعد در صفحه Y/D=۳/۵
(a) مطالعه حاضر، Re=۱۱۰۰۰؛ (b) مطالعه وانگ و ژو، Re=۹۳۰۰، (فاصله های کانتور:۰/۰۰۴)[۱۵]..... ۹۲
شکل۴-۶۹. الگوی جریان پشت یک سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی[۱۵]..... ۹۴
شکل۴-۷۰. تابع چگالی طیفی توانی Eu از سرعت نوسانی u برای y*=۲ [۱۵]..... ۹۶
شکل۴-۷۱. سرعت در حوزه فرکانسی (FFT) برای Z/D=۲ در Re=۱۱۰۰۰ ..... ۹۷
شکل۴-۷۲. نقاط داده برداری در آزمایشهای مربوط به تحلیل فرکانسی..... ۹۹
شکل۴-۷۳. سرعت در حوزه فرکانسی روی خط Y/D=۳/۵ برای ۲و۱/۳۳،۰/۶۷، ۰ =Z/D در Re=۱۱۰۰۰. ۱۰۰
شکل۴-۷۴. نمودار Re-St برای سیلندر مربعی سه بعدی..... ۱۰۱
شکل۴-۷۵. شکل شماتیک جانمایی مدل آزمایشگاهی [۳۴]..... ۱۰۷
شکل۴-۷۶. نتایج مربوط به جریان روی کره: (a) کانتور نرخ استهلاک انرژی، $\boldsymbol{\varepsilon}(\frac{\mathbf{m2}}{\mathbf{s3}})$ به فاصله ۱۱/۲۵d در پایین دست کره در سرعت بالادست ۵m/s؛ (b) کانتور مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، به فاصله ۱۱/۲۵d در پایین دست کره در سرعت بالادست ۵m/s؛ (c) تغییرات نرخ استهلاک انرژی، $\boldsymbol{\varepsilon}(\frac{\mathbf{m2}}{\mathbf{s3}})$ با سرعت بالادست در محل مرکز صفحه داده برداری؛ (d) تغییرات مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، با سرعت بالادست در محل مرکز صفحه داده برداری [۳۴]..... ۱۰۸
شکل۵-۱. شکل شماتیک دو سیلندر مربعی سه بعدی در آرایش پشت سرهم..... ۱۱۰
شکل۵-۲. پروفیلهای سرعت متوسط در صفحه Z=۰ برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰... ۱۱۱
شکل۵-۳. (a) آرایش مدل ها؛ (b) بردارهای سرعت و خطوط جریان برای $\mathbf{u}\infty = 8\text{m/s}$
(فاصله بین دو سیلندر=۲h) [۱۸]..... ۱۱۲
شکل۵-۴. کانتور سرعت متوسط در صفحه Z=۰ برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰..... ۱۱۳
شکل۵-۵. پروفیل سرعت متوسط در صفحه Y/D=۳/۵ برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰:
(a) کناره مدل بالادست؛ (b) بین دو مدل؛ (c) کناره مدل پایین دست؛ (d) پایین دست مدل پایین دست..... ۱۱۴
شکل۵-۶. کانتور سرعت متوسط در صفحه Y/D=۳/۵ برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰. ۱۱۵
شکل۵-۷. کانتور سرعت متوسط در صفحات X ثابت واقع در بین دو سیلندر، برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰..... ۱۱۶
شکل۵-۸. کانتور شدت توربولانس در صفحه Z=۰ برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰. ..... ۱۱۸
شکل۵-۹. کانتور شدت توربولانس در صفحه Y/D=۳/۵ برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰.
..... ۱۱۹
شکل۵-۱۰. کانتور شدت توربولانس در صفحات X ثابت واقع در بین دو سیلندر، برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم در Re=۲۰۰۰۰..... ۱۲۰
شکل۵-۱۱. سرعت در حوزه فرکانسی (FFT) برای فضای بین دو سیلندر پشت سرهم در Z/D=۲/۳۳ و Re=۲۰۰۰۰ ..... ۱۲۲
شکل۵-۱۲. سرعت در حوزه فرکانسی (FFT) در پایین دست سیلندر پایین دست برای دو سیلندر پشت سرهم در Z/D=۲/۳۳ و Re=۲۰۰۰۰ ..... ۱۲۴
شکل۵-۱۳. نمودار Re-St برای هر دو سیلندر مربعی سه بعدی پشت سرهم..... ۱۲۵
شکل ۱. پروفیل سرعت بدون بعد در صفحه Z=۰ در دو ناحیه در جهت X، برای Re=۲۰۰۰۰..... ۱۴۷
شکل ۳. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد در صفحه X/D= ۱ و در Re=۱۱۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y.... ۱۴۸

شکل ۴. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد درصفحه X/D= ۲۰ و در Re=۱۱۰۰۰دردوناحیه در جهت Y..۱۴۸
شکل ۵. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= -۲ و درRe=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y.....۱۴۹
شکل ۶. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= ۰ و درRe=۱۱۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y.....۱۴۹
شکل ۷. پروفیلهای شدت توربولانس در پایین دست تک سیلندر مربعی برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۱۵.....۱۵۰
شکل ۸. تاثیر حضور مدل در اتاق آزمون بر مشخصات جریان آزاد:.....۱۵۰
(a) نمودار شدت اغتشاشات بر حسب سرعت متوسط؛ (b) نمودار درصد فن بر حسب سرعت متوسط.....۱۵۰

پیوست الف

شکل ۱. پروفیل سرعت بدون بعد در صفحه Z=۰ در دو ناحیه در جهت X، برای Re=۲۰۰۰۰.....۱۴۷
شکل ۲. پروفیل سرعت بدون بعد در صفحه Z=۰ و روی خط Y/D=۳/۵، برای Re=۱۱۰۰۰.....۱۴۷
شکل ۳. پروفیل سرعت متوسط بدون بعد در صفحه X/D= ۱ و در Re=۱۱۰۰۰ در دو ناحیه در جهت Y.....۱۴۸
شکل ۴. پروفیلهای سرعت متوسط بدون بعد درصفحه X/D= ۲۰ و در Re=۱۱۰۰۰دردوناحیه در جهت Y..۱۴۸
شکل ۵. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= -۲ و درRe=۲۰۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y.....۱۴۹
شکل ۶. پروفیل شدت توربولانس درصفحه X/D= ۰ و درRe=۱۱۰۰۰ دردو ناحیه درجهت Y.....۱۴۹
شکل ۷. پروفیلهای شدت توربولانس در پایین دست تک سیلندر مربعی برای ۲۰۰۰۰و۱۱۰۰۰=Re در صفحه X/D=۱۵.....۱۵۰
شکل ۸. تاثیر حضور مدل در اتاق آزمون بر مشخصات جریان آزاد:.....۱۵۰

فهرست جداول

جدول۲-۱. تعدادی از مطالعات انجام شده بر روی جریان حول یک سیلندر دایره ای. ۱۱
جدول۲-۲. رژیم های جریان حول سیلندر مربعی [۱۰] و [۱۱] ۱۳
جدول۴-۱. مقدار فرکانس متناظر با ماکزیمم دامنه در نمودار FFT در نقاط مختلف مورد بررسی در Z/D=۲. ۹۸
جدول۴-۲. مقدار نرخ استهلاک انرژی، $\varepsilon(\frac{m2}{s3})$ و مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، برای چند نقطه در پایین دست سیلندر مربعی (Re=۱۱۰۰۰). ۱۰۳
جدول۴-۳. مقدار نرخ استهلاک انرژی، $\varepsilon(\frac{m2}{s3})$ و مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، برای چند نقطه در پایین دست سیلندر مربعی در X/D=۰/۵ (Re=۲۰۰۰۰) ۱۰۴
جدول۴-۴. مقدار نرخ استهلاک انرژی، $\varepsilon(\frac{m2}{s3})$ و مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، برای چند نقطه در پایین دست سیلندر مربعی در X/D=۵ (Re=۲۰۰۰۰). ۱۰۵
جدول۵-۱. مقدار نرخ استهلاک انرژی، $\varepsilon(\frac{m2}{s3})$ و مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، برای چند نقطه در صفحه X/D=۱ (Re=۲۰۰۰۰). ۱۲۷
جدول۵-۲. مقدار نرخ استهلاک انرژی، $\varepsilon(\frac{m2}{s3})$ و مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، برای چند نقطه در صفحه X/D=۲ (Re=۲۰۰۰۰). ۱۲۹
جدول۵-۳. مقدار نرخ استهلاک انرژی، $\varepsilon(\frac{m2}{s3})$ و مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، برای چند نقطه در صفحه X/D=۷ (Re=۲۰۰۰۰). ۱۳۱
جدول۵-۴. مقدار نرخ استهلاک انرژی، $\varepsilon(\frac{m2}{s3})$ و مقیاس طولی کولموگروف، $\eta(mm)$، برای چند نقطه در صفحه X/D=۸ (Re=۲۰۰۰۰). ۱۳۳
جدول۶-۱. مقادیر $\boldsymbol{a_{cal}}$ و $\boldsymbol{b_{cal}}$ در محاسبه عدم قطعیت کالیبراسیون [۳۴]. ۱۳۶
جدول۶-۲. منابع خطا و عدم قطعیت در اندازه گیری سرعت در یک نقطه [۳۴] ۱۴۰

فهرست علایم

طول ضلع سطح مقطع سیلندر	D
ارتفاع سیلندر	H
نسبت منظری	AR
عدد رینولدز	Re
سرعت لحظه ای	u_{ins}
سرعت متوسط محلی	u
سرعت متوسط جریان بالادست	U
شدت توربولانس	TI
عدد استروهال	St
ضخامت لایه مرزی	
نرخ استهلاک انرژی	
ویسکوزیته سینماتیکی سیال	υ
مقیاس طولی کولموگروف	

فصل۱

مقدمه

۱-۱. مقدمه ای بر جریان حول سازه ها

وقتی یک سازه در ویک[۱] سازه دیگری قرار می‌گیرد، ویژگی‌های جریان و نیروهای آیرودینامیکی، به شدت وابسته به شکل، فاصله بین سازه ها، آرایش و نحوه قرار گیری سازه ها و جهت جریان می‌باشند. در این حالت، ساختار جریان پیچیده بوده و جریان به خاطر اثر متقابل دو سازه، متفاوت از جریان عبوری از یک سازه تنها رفتار می‌نماید. بنابراین بررسی این ویژگی‌ها از دیدگاه عملی و تجربی مفید خواهد بود. از آنجایی که بسیاری از سازه‌های بلند تحت تاثیر سایر سازه‌های مجاور خود قرار می‌گیرند، در طراحی آنها بایستی نیروهای آیرودینامیکی وارد بر سازه‌ها نیز لحاظ گردد. هم چنین این نکته مهم است که ویژگی‌های ریزش گردابه[۲] که در تداخل جریان در اطراف چند سازه مهم می‌باشد، بررسی گردد، چرا که می تواند منجر به برخی مشکلات ارتعاشی‌گردد. مثلا مشابه اتفاقی که برای پل تاکوما[۳]رخ داد، اگر نیروی نوسانی وارد بر سازه با فرکانسی نزدیک به یکی از فرکانس‌های طبیعی سازه داشته باشد، پدیده تشدید رخ داده و ممکن است حتی منجر به تخریب سازه نیز گردد.

غالبا در صنعت و طبیعت هرگاه مانعی در معرض عبور سیالی قرار بگیرد، جدایش جریان رخ می‌دهد. در این گونه موارد، مطالعه ناحیه ویک ایجاد شده در پشت اجسام و جدایش جریان اهمیت پیدا می‌کند. آگاهی از جریان در این ناحیه که عموما ماهیت آشفته و غیردائم دارد، برای فهم انتقال حرارت و نیروی وارد بر جسم لازم می‌باشد.

بررسی میدان جریان و مسائل اساسی مربوط به دینامیک سیالات حول یک سازه تنها به

---

[۱] ناحیه کم فشار به وجود آمده در پشت جسمی که در مقابل جریان قرار می‌گیرد را اصطلاحا ناحیه ویک (Wake) می‌نامند.

[2] Vortex Shedding

[3] Takoma

میزان قابل توجهی صورت گرفته‌است. بررسی جریان هوا حول سازه‌ها به منظور تعیین نیرو و احیانا گشتاور وارد بر سازه‌ها و نیز نحوه چرخش هوا در این سازه‌ها و اطراف آنها صورت می‌گیرد. توزیع هوا در اطراف ساختمان می‌تواند منجر به ورود خود به خودی گرد و غبار و سایر آلودگی‌ها به ساختمان شده و در نتیجه آسایش را از ساکنین ساختمان سلب نماید. سازه‌ها با شکل‌های مختلف، از جمله سیلندرهای مربعی و مستطیلی مدل می‌گردند. مطالعه جریان حول تک سازه، به مدت زیادی به عنوان یک مورد پایه‌ای مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌است. این کار به‌دفعات، برای سیلندرهای دایره‌ای و به میزان کمتری برای سایر هندسه‌ها مثل: سیلندرهای مربعی، سیلندرهای مستطیلی، صفحات تخت و ... به هر دو روش عددی و تجربی انجام شده‌است. جریان آشفته عبوری از تک سیلندر با مقطع مربعی نیز مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌است، چرا که بسیاری از سازه های واقعی مثل ساختمان ها، پایه و بدنه پل‌ها و ... مقاطع مربعی یا مستطیلی دارند. مهم‌ترین تفاوتی که بین اجسامی مانند سیلندرهای مربعی که لبه‌های تیز دارند و اجسامی مثل سیلندرهای دایره‌ای که لبه‌های هموار دارند، نقطه جدایی می‌باشد. در مورد سیلندرهایی که لبه‌های هموار دارند، نقطه جدایی، ثابت و مشخص نیست، در حالی‌که برای سیلندرهایی که لبه‌های تیز دارند، این نقطه ثابت و منطبق بر لبه‌های جسم می‌باشد. این مطلب، دینامیک جریان را به نحو قابل توجهی تغییر می‌دهد.

در شرایط محیطی واقعی، معمولا سازه‌ها و ساختمان‌ها به صورت تکی دیده نمی شوند. این مطلب منجر به انجام تحقیقاتی در مورد هندسه هایی با بیش از یک سیلندر شده است. یکی از آرایش‌های متعددی که برای قرار گرفتن دو سیلندر نسبت به جهت جریان ممکن است، آرایش پشت سر هم می‌باشد که نسبتا به آن کمتر توجه شده است و هنوز نتایج کافی برای جریان روی سیلندرهای پشت سرهم[1]، به ویژه با سطح مقطع مربعی وجود ندارد. وضعیتی که یک سازه مثل یک سیلندر، در پایین دست و دقیقا پشت سر سازه دیگری قرار گیرد، آرایش پشت سر هم نامیده

[1] Tandem Arrangement