

آشکارسازی جریان اطراف دو استوانه با مقطع مربعی در آرایش اریب

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، aboueian@jahromu.ac.ir

جابر ابوبیان*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، asohankar@cc.iut.ac.ir

احمد سوهانکار

چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، مشخصات جریان اطراف دو استوانه‌ی مربعی بلند در آرایش اریب با زاویه $\alpha = 45^\circ$ در فواصل مختلف در عدد رینولدز $Re = 750$ به کمک آزمایش آشکارسازی جریان بررسی شده است. در کنار بررسی کیفی خطوط دود، نتایج کمی مانند زاویه‌ی جدایی جریان، عرض دنباله و فرکانس ریزش گردابه برای هر استوانه به دست آمد و رفتار جریان برای فواصل مختلف دو استوانه در سه الگوی جریان تک جسم، الگوی جریان شکافی متناوب و الگوی جریان متناوب دسته‌بندی شد. در الگوی جریان تک جسم، ریزش گردابه تنها از لایه‌های خارجی هر دو استوانه رخ می‌دهد و یک مکانیزم ریزش گردابه قابل تشخیص است. در الگوی جریان شکافی متناوب، ریزش گردابه از لایه‌های برشی خارجی هر دو استوانه هر کدام با دو فرکانس مشابه اتفاق می‌افتد. همچنین، ویژگی اصلی الگوی جریان متناوب این است که ریزش گردابه‌های کارمن و ناپایداری‌های کلونین هلمهولتز از لایه‌های برشی داخلی و خارجی هر استوانه فرکانسی یکسان و متفاوت با استوانه‌ی دیگر دارد.

واژه‌های کلیدی: جریان اطراف دو استوانه، آرایش اریب، ریزش گردابه، آشکار سازی به کمک دود، الگوهای جریان.

Flow visualization around two staggered square cylinders

J. Aboueian

Department of Mechanical Engineering, Jahrom University, Jahrom, Iran

A. Sohanekar

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

Smoke flow visualization tests in a vertical wind tunnel are carried out to investigate the flow characteristics around two infinite staggered square cylinders at a staggered angle ($\alpha = 45^\circ$) for different gap distances between cylinders at $Re = 750$. Quantitative results like separation angle, wake width and shedding frequency were obtained for each cylinder and consequently three distinct flow regimes were recognized, namely, single body, periodic gap flow and modulated periodic flow regime. In a single body flow regime, vortex shedding occurs only from the outer layers of both cylinders and a single vortex shedding mechanism can be detected. In the periodic gap flow regime, the vortices shed from the outer shear layers of both cylinders, each with two similar frequencies. In addition, in the modulated periodic flow regime, the main features are that the frequencies of Karmann vortices and the Kelvin Helmholtz instabilities are attributed to each cylinder and not to the shear layers (the frequencies of both inner and outer layers are the same for each cylinder), however, the frequency of each cylinder is different from the other one.

Keywords: Flow around two cylinders, Staggered configuration, Vortex shedding, Smoke visualization, Flow patterns.

۱- مقدمه

جریان آشفته در وزش باد اطراف دو سازه‌ی بلند مرتبه‌ی مجاور هم، جریان اطراف دو قطعه‌ی الکتریکی، جریان بین پره‌های مبادله‌کن گرمای لوله‌ای پره دار و یا جریان عرضی آب اطراف دو پایه‌ی نزدیک به هم یک پل را می‌توان با مدلسازی جریان اطراف دو استوانه‌ی مجاور هم بررسی نمود. از تحلیل الگوهای جریان اطراف این سازه‌ها به منظور محاسبه‌ی نیروهای وارده از طرف سیال، کاهش آلودگی‌های صوتی و یا کاهش پخش آلودگی ناشی از ذرات گرد و غبار، خنک کاری قطعات و ... استفاده می‌گردد. همچنین، بررسی جریان‌های پیچیده اطراف هندسه‌های ساده‌ی استوانه‌ای فرصت مناسبی جهت بررسی فیزیک جریان برای پژوهشگران ایجاد می‌کند و به همین دلیل از دیرباز از لحاظ آکادمیک حائز اهمیت بوده است و نتایج تجربی این جریان‌ها به عنوان معیاری جهت سنجش اعتبار روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گرفته است (به عنوان نمونه بررسی جریان اطراف استوانه‌های دوبعدی نامحدود در مراجع [۵]- [۱] مشاهده شود).

دو استوانه نسبت به هم در سه آرایش مختلف ممکن است قرار گیرند: آرایش پشت سرهم^۱، کنارهم^۲ و اریب^۳. آرایش اریب حالت قرارگیری دو استوانه نسبت به هم می‌باشد که برای مثال در بررسی وزش باد اطراف دو ساختمان بلند مرتبه با تغییر جهت باد این آرایش مشاهده می‌شود. در این آرایش، علاوه بر عدد رینولدز، زاویه‌ی بین خط واصل دو استوانه با جهت جریان آزاد (زاویه‌ی اریب^۴ α) و فاصله‌ی بین دو استوانه، دو پارامتر تاثیرگذار بر مسئله هستند. آرایش پشت سرهم و کنارهم را می‌توان همان آرایش اریب با زاویه‌ی اریب به ترتیب صفر و 90° درجه در نظر گرفت. علیرغم جامعیت آرایش اریب تاکنون مطالعات معدودی پیرامون جریان اطراف استوانه‌های مربعی نامحدود در این آرایش انجام شده است (برای نمونه مراجع [۱]- [۶]، [۲] و [۱]) و از میان آن‌ها تاکنون تنها در چند پژوهش اخیر ژو

¹ tandem

² side-by-side

³ staggered

⁴ staggered angle

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: aboueian@jahromu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۲/۱۹

و همکاران [8] در $Re = 100$ ، ابونیان و سوهانکار [2] در $Re = 150$ ، عالم و همکاران [7] در $Re = 1.3 \times 10^4$ و ابونیان و همکاران [1] در $Re = 6 \times 10^4$ به بررسی الگوهای مختلف جریان اطراف دو استوانه‌ی مربعی نامحدود در آرایش اریب پرداخته شده است.

عالم و همکاران [7] جریان اطراف دو استوانه‌ی مربعی بسیار بلند (هندسه دوبعدی) با آرایش اریب را برای زوایای اریب و فواصل بین مراکز استوانه‌های مختلف در $Re = 1.3 \times 10^4$ به صورت تجربی بررسی نمودند. آن‌ها برای دسته‌بندی الگوهای مختلف جریان از روش آشکارسازی LIF، روش PIV و همچنین از جریان سنج سیم داغ استفاده نمودند. در آن مطالعه رفتار جریان اطراف استوانه‌ها با فواصل مختلف در چهار گروه مختلف دسته‌بندی شد: دو مد تک مسیر S-I و S-II و دو مد دو مسیر T-I و T-II. مشخصه‌ی اصلی حالت S-I وجود تک مسیر گردابه‌ای یک در میان در دنباله‌ی پشت استوانه‌هاست که منجر به وجود یک عدد استروهل غالب یکسان در پشت هر دو استوانه می‌شود. در حالت S-II در ابتدا در نزدیک استوانه‌ها یک جریان شکافی و دو مسیر گردابه‌ای باریک و پهن قابل تشخیص است، اما با دور شدن از استوانه‌ی پایین دست این دو مسیر گردابه‌ای به هم می‌پیوندند و یک مسیر گردابه با عدد استروهل کوچک‌تر را پدید می‌آورند. مشخصه‌ی اصلی حالت T-I وجود دو مسیر گردابه‌ای باریک و پهن مشخص به ترتیب با اعداد استروهل غالب بزرگ و کوچک در پایین دست استوانه‌هاست. این حالت وقتی رخ می‌دهد که فاصله‌ی دو استوانه و زاویه‌ی اریب بین آن‌ها به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد و در نتیجه فاصله‌ی زیادی بین گردابه‌های با جهت چرخش مخالف هم در ناحیه‌ی جریان شکافی وجود داشته باشد. با افزایش فاصله‌ی بین دو استوانه اختلاف در اعداد استروهل مربوط به مسیرهای گردابه‌ای باریک و پهن از بین می‌رود؛ به این الگوی جریان حالت T-II گفته می‌شود. گردابه‌های کنده شده از استوانه‌ها در این حالت همگام (به صورت تصادفی هم‌فاز یا ناهم‌فاز) هستند.

ابونیان و سوهانکار [۲] جریان دوبعدی اطراف دو استوانه‌ی مربعی در آرایش اریب با زاویه اریب 45° را در $Re = 150$ به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. در آن پژوهش، کانتورهای مختلف جریان اطراف استوانه‌ها ترسیم شد و در نهایت با توجه به فاصله‌ی بین دو استوانه‌ها، جریان در پنج الگوی مختلف: الگوی جریان تک جسم، الگوی جریان شکافی متناوب، الگوی جریان غیرتناوبی، الگوی جریان متناوب مدوله‌شده و الگوی ریزش گردابه‌ی همگام دسته بندی گردید. در الگوی جریان تک جسم، به دلیل فاصله‌ی بسیار کم دو استوانه، ریزش گردابه‌ی مستقل از هر استوانه به صورت جداگانه رخ نمی‌دهد و گردابه‌ها همانند یک جسم در معرض جریان از استوانه‌ها کنده می‌شوند. با افزایش اندک فاصله‌ی بین دو استوانه از الگوی جریان تک جسم، لایه‌های برشی در ناحیه‌ی شکاف بین دو استوانه، بر مکانیزم ریزش گردابه تاثیر گذاشته و الگوی جریان شکافی متناوب را ایجاد می‌کنند. مشخصه‌ی قابل تمایز این الگوی جریان وجود دو فرکانس غالب ریزش گردابه برای هر کدام از استوانه‌هاست. در این الگوی جریان در حالت جریان لایه‌ای دوبعدی گردابه‌های هم علامت هر دو استوانه در یکدیگر ادغام شده و سپس گردابه‌ی با علامت مخالف لایه‌ی برشی داخلی به ترکیب آن‌ها برخورد می‌کند. تک مسیر گردابی بی‌نظمی در ناحیه‌ی دنباله تشکیل می‌شود. برای الگوی جریان غیرتناوبی آنالیز

تبدیل سریع فوریه برای نوسانات ضریب برآی هر دو استوانه نشان داد که در این الگوی جریان، دو عدد استروهل غالب تقریباً هم انرژی برای استوانه‌ی بالادست و تنها یک عدد استروهل مهم برای استوانه‌ی پایین دست وجود دارد. الگوی جریان متناوب مدوله‌شده، الگوی مهمی است که برای بازه‌های نسبتاً وسیعی از فواصل بین دو استوانه دیده شده است. علت استفاده از واژه‌ی مدوله شده در نامگذاری این الگوی جریان این است که دامنه‌ی سیگنال ضریب برآ به صورت منظم به نحوی تغییر می‌کند که انگار با سیگنال سینوسی با دوره‌ی زمانی بزرگتری مقید شده است و یا در اصطلاح الکترونیک، دامنه‌ی این سیگنال توسط سیگنال دیگری مدوله شده است. مشخصه‌ی فرکانسی این الگوی جریان وجود دو فرکانس غالب متفاوت است که فرکانس‌های بزرگتر و کوچکتر به ترتیب مربوط به ریزش گردابه از استوانه‌ی بالادست و پایین دست هستند. در این الگوی جریان، گردابه‌ها به صورت جداگانه ولی با دو فرکانس متفاوت از استوانه‌ها کنده می‌شوند. اختلاف در فرکانس‌ها منجر به اثرات متقابل متنوع و متناوب بین گردابه‌ها در پایین دست جریان می‌شود و سیگنال ضرایب نیروهای برآی استوانه‌ی پایین دست را مدوله می‌کند. با افزایش فاصله‌ی بین دو استوانه فرکانس ریزش گردابه‌ی دو استوانه به هم نزدیک می‌شوند تا آن‌جا که اثرات مدوله از بین رفته و الگوی ریزش گردابه‌ی همگام رخ می‌دهد. در این الگوی جریان، اثرات متقابل اندکی بین گردابه‌های کنده شده از استوانه‌ی بالادست و پایین دست مشاهده می‌شود و ریزش گردابه از هر کدام از استوانه‌ها با فرکانسی برابر با فرکانس تک استوانه‌ی مربعی در معرض جریان اتفاق می‌افتد.

همچنین، اخیراً ژو و همکاران [۸] الگوهای جریان دوبعدی اطراف دو استوانه‌ی مربعی در آرایش‌های مختلف را به روش عددی شبکه بولتزمن در $Re = 100$ در سه دسته‌ی کلی جریان تک جسم، جریان زاویه‌ی اریب کوچک و جریان زاویه‌ی اریب بزرگ طبقه‌بندی کردند. این دسته‌بندی‌ها مطابق پژوهش سامنر و همکاران [۱۱] برای استوانه‌های با مقطع دایره‌ای، بر اساس اتصال مجدد لایه‌های برشی، ریزش گردابه از یک یا دو استوانه، تقسیم، جفت شدن و یا ادغام گردابه‌ها، ریزش گردابه همگام و برخورد گردابه‌ها صورت گرفته است.

آشکار سازی جریان روشی به نسبت ارزان و سریع است که به وسیله‌ی آن می‌توان فیزیک جریان اطراف اجسام را مورد مطالعه قرار داد. تاکنون در مطالعات مختلفی از تکنیک آشکارسازی جریان به کمک دود جهت بررسی مشخصات جریان اطراف استوانه‌ها استفاده شده است (برای نمونه مراجع [۲۰]، [۱۲] و [۷]). سوهانکار و همکاران [۱۷] با استفاده از یک تونل دود عمودی سرعت پایین، الگوهای جریان اطراف تک استوانه مربعی و همچنین دو استوانه‌ی مربعی پشت سرهم را بررسی نمودند. در آن مطالعه با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر برخی از پارامترهای موثر جریان مانند نقاط جدایش جریان، زاویه جدایش جریان، طول دنباله، فرکانس ریزش گردابه و ... به صورت کمی محاسبه شد. در مطالعه‌ی دیگر، سوهانکار و همکاران [۱۸] جریان اطراف دو استوانه‌ی مربعی واقع بر سطح با ارتفاع محدود در آرایش کنارهم را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. با به دست آوردن توزیع فشار روی سطوح استوانه در محدوده‌ی $5.9 \times 10^4 \leq Re \leq 8.1 \times 10^4$ و همچنین آشکارسازی جریان به کمک دود در $Re = 2 \times 10^4$ ، جریان اطراف این استوانه‌ها در چهار الگوی

به دلیل پایین بودن سرعت حرکت سیال در تونل، برای سنجش سرعت باد در شرایط آزمایش امکان استفاده از لوله پیتوت استاتیکی برای اختلاف فشارهای بسیار کوچک تونل وجود نداشت. در مطالعه حاضر، جهت سنجش سرعت در ابتدا از فیلمبرداری از خطوط دود استفاده شد. بدین ترتیب که در هنگامی که مدل‌های آزمایش در تونل وجود نداشتند، خطوط دود وارد تونل شدند. با فیلمبرداری از خطوط دود و دنبال کردن میعان‌ات دود ایجاد شده بر خطوط در یک طول مشخص و با داشتن زمان فیلمبرداری سرعت حرکت باد در تونل به دست آمد. این روش با استفاده از سرعت سنج پره‌ای نیز مورد تأیید قرار گرفت. در مطالعه‌ی حاضر، جهت آشکارسازی مناسب جریان روش‌های مختلف تولید دود و نوردهی در تونل دود افقی و عمودی بررسی گردید و در نهایت بهترین روش آشکارسازی انتخاب شد. برای مکانیزم دوددهی دستگاه بخارساز و دود ساز و برای مکانیزم نوردهی استفاده از لیزر، نور فلش و نور پرژکتور بررسی گردید. جهت تصویربرداری در ابتدا از دوربین عکسبرداری حرفه‌ای همراه با دو فلاش که با استفاده از دو گیرنده و یک فرستنده رادیویی، با دوربین عکاسی هماهنگ شدند، استفاده شد. در ادامه، با استفاده از دوربین فیلم برداری سرعت بالا، از خطوط اثر ایجاد شده توسط دود با استفاده از دو پرژکتور نور، فیلم گرفته شد. دوربین مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، یک دوربین پرسرعت از شرکت PCO آلمان و با مدل 1200hs است. این دوربین با استفاده از نرم‌افزار مخصوص به کامپیوتر متصل می‌شود. در شکل ۲ تصویر این دوربین آورده شده است.



شکل ۲- دوربین پرسرعت PCO

اگرچه با استفاده از دوربین عکاسی ثابت می‌توان تصاویر با کیفیت بالاتر و بزرگنمایی بیشتری را تهیه نمود، اما استفاده از یک عکس تنها و یا یک مجموعه عکس جهت تحلیل مشخصه‌های دینامیکی جریان اطراف چند استوانه مناسب نمی‌باشد. با داشتن فیلم مناسب از حرکت جریان، می‌توان توصیف دقیق‌تری از مشخصات کیفی و کمی جریان غیردائم مانند ساختارهای جریان و حتی فرکانس ریزش گردابه ارائه داد. همچنین، فیلم انعطاف بیشتری جهت جداکردن عکس مناسب از ساختارهای خاص جریان دارد؛ هرچند در فیلم عکس‌ها به مراتب کیفیت پایین‌تری خواهند داشت. در این‌جا، فریم‌های خاصی از فیلم که مشخصه‌های کلیدی جریان را بهتر نشان می‌دهند، انتخاب شدند. بسیاری از تحلیل‌های جریان که در ادامه ارائه شده است بر پایه‌ی عکس‌های حاصل از این فیلم‌ها هستند. لازم به ذکر است که با توجه به ماهیت غیردائم جریان، جهت اندازه‌گیری پارامترهای غیردائم مانند زاویه‌ی جدایش و عرض دنباله در هر حالت ابتدا فرکانس ریزش گردابه محاسبه شده است. سپس با تقسیم سرعت تصویربرداری دوربین بر فرکانس محاسبه شده، تعداد مناسب عکس جهت میانگین‌گیری زمانی به دست آمده است. برای نمونه در یکی از حالت‌های مورد بررسی، فرکانس ریزش گردابه حدود 12 Hz به دست آمده و سرعت

مختلف دسته‌بندی شد.

همان‌طور که اشاره شد، تاکنون در هیچ پژوهش آزمایشگاهی، جریان اطراف دو استوانه‌ی دوبعدی در آرایش اریب مورد مطالعه قرار نگرفته است. از طرفی، در مطالعات آشکارسازی بیشتر رفتار جریان به صورت کیفی بررسی شده است و کمتر به ارائه‌ی مشخصه‌های کمی جریان با استفاده از تصاویر پرداخته شده است. بنابراین در کار حاضر، به کمک فیلم برداری از خطوط اثر دود، ویژگی‌های کمی و کیفی جریان اطراف دو استوانه‌ی مربعی بلند در آرایش اریب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه با استفاده از پردازش تصویر از فیلم‌های تهیه شده، پارامترهای غیردائمی مثل فرکانس ریزش گردابه نیز محاسبه می‌شود.

۲- روش آزمایشگاهی

۲-۱- تجهیزات آزمایش

در آزمایش آشکارسازی جریان از تونل دود عمودی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. کل دیواره‌های این تونل باز جنس پلکسی گلاس می‌باشد (شکل ۱). دود تولید شده در این دستگاه از تبخیر و سوختن ناقص گازوییل ایجاد می‌شود که دارای غلظت کافی برای مشاهده جریان می‌باشد. جریان هوای تونل به وسیله یک دمنده‌ی کوچک ایجاد می‌شود که سرعت آن قابل تنظیم بوده و به‌وسیله تغییر دادن آن می‌توان سرعت جریان هوا را از صفر تا ۴ متر بر ثانیه افزایش داد. محفظه آزمایش تونل دارای ابعاد ۱۱ سانتی متر (عمق) در ۲۱ سانتی متر (عرض) در ۳۳ سانتی متر (ارتفاع) است و جریان هوا در آن به صورت قائم و به طرف بالا برقرار می‌شود. مدل‌ها به دیواره پشتی محفظه آزمایش و در داخل آن بسته می‌شوند. دود از بین دنده‌های یک شانه که فاصله مرکزی آن‌ها ۷ میلی متر است و در زیر محفظه‌ی آزمایش نصب شده است به داخل تونل هدایت می‌شود. به منظور مشخص ساختن جزئیات میدان جریان می‌توان شانه را جابجا نمود.

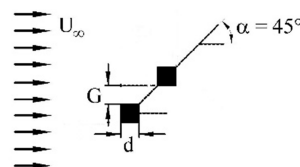


شکل ۱- تونل دود عمودی استفاده شده در کار حاضر

تصویربرداری 500 fps می‌باشد، بنابراین تعداد مناسب عکس جهت محاسبه پارامترهای کمی $500/12 = 42$ می‌باشد.

۲-۲- فیزیک حاکم بر مسئله

در آزمایش آشکارسازی، خطوط دود باید از غلظت کافی برخوردار باشند و به طور مناسبی استوانه‌ها را فرایگیرند تا تصاویری با کیفیت تولید گردد که این موجب ایجاد محدودیت در سرعت باد در تونل و ابعاد استوانه‌ها می‌شود. به عبارت دیگر، با توجه به ماهیت آزمایش عدد رینولدز در محدوده‌ی مشخصی قرار می‌گیرد. بنابراین در آزمایش حاضر، به منظور داشتن خطوط دود با غلظت کافی، سرعت تونل $U_\infty = 0.9$ m/s و همچنین با توجه به محدودیت نسبت انسداد تونل، طول اضلاع استوانه‌های مربعی $d = 1.5$ cm در نظر گرفته شده‌است که معادل عدد رینولدز $Re = 750$ و نسبت انسداد $BR = d/w = 1.5/21 = 0.07$ می‌باشد. مدل‌های مورد استفاده دو استوانه‌ی آلومینیومی با مقطع مربعی با لبه‌های کاملاً تیز هر کدام به ضلع $d = 1.5$ cm و ارتفاع استوانه‌ها $h = 11$ cm هستند (معادل نسبت منطری $AR = h/d = 7.3$) و دو طرف استوانه‌ها به کف و سقف تونل چسبیده‌اند. در این پژوهش، زاویه‌ی بین خط واصل دو استوانه با جهت جریان آزاد (زاویه‌ی اریب) $\alpha = 45^\circ$ و فاصله‌ی خالی بدون بعد $G^* = G/d$ بین دو استوانه 0.4، 1.1، 1.8، 2.5 و $G^* = 0$ در نظر گرفته شده است (شکل ۳).



شکل ۳- جریان اطراف استوانه‌های مربعی در آرایش اریب

۳-۲- عدم قطعیت نتایج

در جدول ۱ عدم قطعیت پارامترهای مورد بررسی در آزمایش آشکارسازی به کمک دود آورده شده است. مدل‌های استفاده شده در کلیه‌ی آزمایش‌ها با دستگاه لیزر با دقت 0.01 mm برش داده شده است، بنابراین همان‌طور که در این جدول آمده است در آزمایش آشکارسازی درصد عدم قطعیت نسبی طول ضلع استوانه‌ها برابر با $r_d = \delta_d/d = 0.07\%$ می‌باشد.

در این مطالعه، محاسبه‌ی اکثر پارامترهای مهم جریان بر پایه‌ی فیلم‌ها و عکس‌های گرفته شده از خطوط دود است. در حالت کلی برای پارامترهای غیردائم که نیاز به محاسبه‌ی زمان برای چند تصویر پشت سرهم است، محاسبه‌ی عدم قطعیت با خطای یک عکس در نظر گرفته می‌شود که با توجه به فرکانس تصویربرداری درصد عدم قطعیت مشخص می‌گردد. همان‌طور که توضیح داده شد، سرعت جریان آزاد هوا در تونل با استفاده از فیلم‌برداری از میعانات موجود در خطوط دود محاسبه گردید. سرعت جریان آزاد تحت تاثیر خطای چشمی طول در نظر گرفته شده بر تصاویر و سرعت فیلم‌برداری است. با افزایش فرکانس فیلم‌برداری به ۵۰۰ فریم بر ثانیه و بررسی دقیق تصاویر، عدم قطعیت سرعت جریان آزاد با در نظر گرفتن خطای یک عکس کمتر از

2.8% تخمین زده می‌شود.

جدول ۱- عدم قطعیت پارامترهای جریان

پارامتر	رابطه	عدم قطعیت
طول ضلع مدل	$d = 15$ mm	0.07%
ارتفاع مدل	$L = 90$ mm	0.01%
دما	$T = 20^\circ\text{C}$	0.3%
فشار بارومتر	$P_{atm} = 82.5$ kPa	0.12%
چگالی	$\rho = P_{atm}/RT = 0.98$	0.3%
لزجت	$\mu = 1.81\text{E-}05$ N.s/m ²	0.6%
لزجت سینماتیکی	$\nu = \mu/\rho = 1.85\text{E-}05$ m ² /s	0.7%
سرعت جریان آزاد	$U_\infty = 0.02$ m/s	2.8%
عدد رینولدز	$Re = U_\infty d/\nu = 750$	2.9%
عدد استروهل	$St = fd/U_\infty \cong 0.1$	3.8%
عرض دنباله	W^*	± 0.1
زاویه‌ی جدایش		± 2 deg

خطای ثابت ناشی از فاصله‌ی بین دو استوانه نیز با اندازه گیری دقیق توسط کولیس در محدوده‌ی ± 0.025 mm می‌باشد. خطای ناشی از محاسبه‌ی لزجت سینماتیکی نیز 0.7% می‌باشد. بنابراین، عدم قطعیت عدد رینولدز معادل 2.9% خواهد شد. همچنین، در آزمایش آشکارسازی جریان، عدم قطعیت فرکانس ریزش گردابه که پارامتری غیردائم است همانند سرعت برابر با 2.8% خواهد بود و از آن‌جا خطای عدد استروهل، در حدود 3.8% محاسبه می‌شود. علاوه بر این، برای محاسبه‌ی عدم قطعیت پارامترهای فیزیکی استخراج شده از یک تصویر، مانند زاویه‌ی جدایش، عرض دنباله و ... برای هر حالت چندین تصویر مورد بررسی قرار می‌گیرد و از آن‌جا انحراف معیار هر پارامتر مشخص می‌گردد.

۳- نتایج

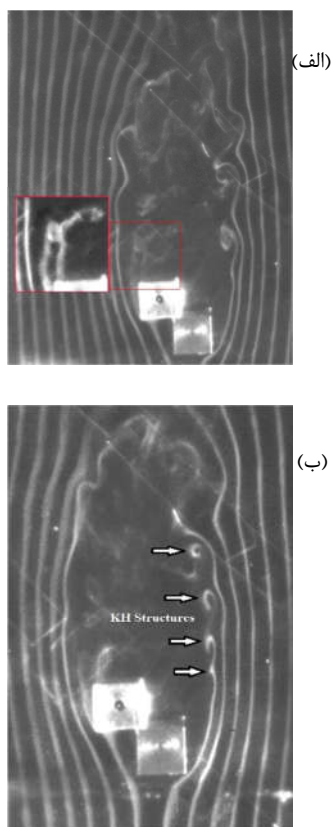
هدف اصلی در مطالعه حاضر، بررسی کیفی و کمی الگوهای مختلف جریان و طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس تغییرات فاصله‌ی بین دو استوانه می‌باشد. علاوه بر این، در این مطالعه مشخصات فیزیکی جریان مثل عدد استروهل، عرض دنباله^۱ و زاویه جدایش^۲ جریان نیز بررسی شده است. همان‌طور که ذکر شد، جهت آشکار سازی جریان شانه دود در بالادست جریان به کار رفته است. به علاوه، جهت ثبت تصاویر الگوهای جریان از دوربین عکس‌برداری سرعت بالا همراه با فلش و همچنین برای تعیین پارامترهای غیردائم از دوربین فیلم‌برداری همراه با پروژکتور نور استفاده شده است. آزمایش‌ها در عدد رینولدز ثابت $Re = 750$ و برای شش فاصله‌ی بدون بعد بین دو استوانه $G^* = 0, 0.4,$

¹ Wake Width

² Separation Angle

الف) الگوی جریان تک جسم

هنگامی که دو استوانه در تماس با هم باشند، در $G^* = 0$ (شکل ۵)، الگوی جریان در اطراف استوانه‌ها به ساختار جریان اطراف یک تک جسم شباهت دارد. ناحیه‌ی دنباله‌ی نزدیک، در پشت جفت استوانه‌ها شامل دو لایه‌ی برشی آزاد است که درست همانند یک تک استوانه‌ی مربعی تنها، گردابه‌ها به صورت تناوبی و با فرکانس یکسان از این لایه‌های برشی کنده می‌شوند. همچنین، در پایین‌دست جریان تک مسیر گردابه با دو ردیف گردابه که در جهات مخالف هم می‌چرخند، مشاهده می‌شود. تصاویر آشکار سازی جریان در این الگو در دو حالت مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. جدایش جریان از استوانه‌ی بالادست در شکل ۵-الف بزرگنمایی شده است.



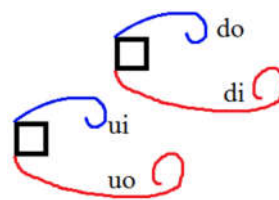
شکل ۵- خطوط دود در اطراف استوانه‌ها برای الگوی جریان تک جسم ($G^* = 0$) در عدد رینولدز $Re = 750$

همان‌طور که در شکل بزرگنمایی شده به وضوح مشخص است در این الگو، جدایش جریان برای لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی پایین‌دست (do) از گوشه‌ی پایین‌دستی رخ می‌دهد. برای تک استوانه‌ی مربعی نامحدود در معرض جریان، در $Re \leq 100$ جدایش از گوشه‌ی پایین‌دست و در $Re \geq 150$ جدایش از گوشه‌ی بالادست اتفاق می‌افتد [۲۳]. در این‌جا برای دو استوانه‌ی متصل به هم در زاویه‌ی اریب $\alpha = 45^\circ$ در عدد رینولدز $Re = 750$ ، لایه‌ی برشی جدا شده از گوشه‌ی داخلی استوانه‌ی بالادست (ui) به ناحیه‌ی پرفشار در جلوی استوانه‌ی پایین‌دست نزدیک شده و با کاهش سرعت مواجه می‌شود و عدد رینولدز محلی آن کاهش می‌یابد و بنابراین جدایش جریان برای

2.5, 1.8, 1.1 انجام شده است. این محدوده‌ی مورد بررسی فاصله‌های بین دو استوانه $0 \leq G^* \leq 2.5$ معادل فاصله‌ی بین مراکز دو استوانه $1.4 \leq P^* \leq 4.9$ می‌باشد. لازم به ذکر است که در عدد رینولدز $Re = 750$ ، هیچ داده‌ی مشابهی در مقالات جهت مقایسه نتایج جریان اطراف استوانه‌ها در آرایش اریب موجود نبود. بنابراین جهت اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده، عدد استروهل ریزش گردابه اطراف تک استوانه‌ی مربعی تحت شرایط مسئله‌ی حاضر (روش تصویربرداری از خطوط دود در عدد رینولدز $Re = 750$) به‌دست آمد و نتایج با آزمایش‌های سیم داغ نوربرگ [۲۱] و اوکاجیما [۲۲] در حدود همین عدد رینولدز مقایسه گردید. عدد استروهل در مسئله حاضر $St = 0.14$ و در مطالعه نوربرگ [۲۱] و اوکاجیما [۲۲] به ترتیب 0.12 و 0.13 گزارش شده‌اند که با توجه به تفاوت در شرایط آزمایش (نسبت انسداد و نسبت منظری مدل در تونل باد) اختلاف در نتایج قابل قبول برآورد می‌شود.

۳-۱- الگوهای جریان

مطابق شکل ۴ لایه‌های برشی جدا شده از سطوح خارجی و داخلی برای استوانه‌ی بالادست به ترتیب با uo و ui و برای استوانه‌ی پایین‌دست به ترتیب با do و di نامگذاری شده است.



شکل ۴- معرفی علائم: گردابه‌های داخلی (i) و خارجی (o) استوانه‌های بالادست (u) و پایین‌دست (d)

با تغییر فاصله‌ی بین دو استوانه، اثرات متقابل لایه‌های برشی، گردابه‌های جدا شده، جریان شکافی و ... بر هم موجب ایجاد ساختارها و الگوهای مختلفی در دنباله‌ی استوانه‌ها در پایین‌دست جریان می‌گردند. در ادامه، الگوهای مختلف جریان بر اساس رفتار جریان اطراف دو استوانه و با توجه ویژه به ویژگی‌های فرکانسی ریزش گردابه از استوانه‌ها مطابق کارهای قبلی نویسندگان (مراجع [۱] و [۲])، در سه الگوی مختلف به نام‌های الگوی جریان تک جسم ($G^* = 0$)، الگوی جریان شکافی متناوب ($G^* = 0.4$) و الگوی جریان متناوب مدوله شده ($G^* = 1.1, 1.8, 2.5$) دسته‌بندی و نامگذاری شده‌اند. لازم به ذکر است که همان‌طور که در خطوط دود نشان داده شده در شکل‌های ۵ تا ۷ مشخص است در ناحیه دنباله‌ی استوانه‌ها خطوط دود پخش شده و قابل آشکار سازی نیستند که این موضوع می‌تواند نشانی از آشفته بودن جریان در ناحیه‌ی دنباله باشد. همچنین، چنان‌که در ادامه توضیح داده خواهد شد، ناپایداری‌های کلون-هلمهولتز^۱ تشکیل شده بر لایه‌های برشی اطراف استوانه‌ها نشان دیگری از آشفته بودن جریان در ناحیه‌ی دنباله است.

¹ Kelvin-Helmholtz(KH)

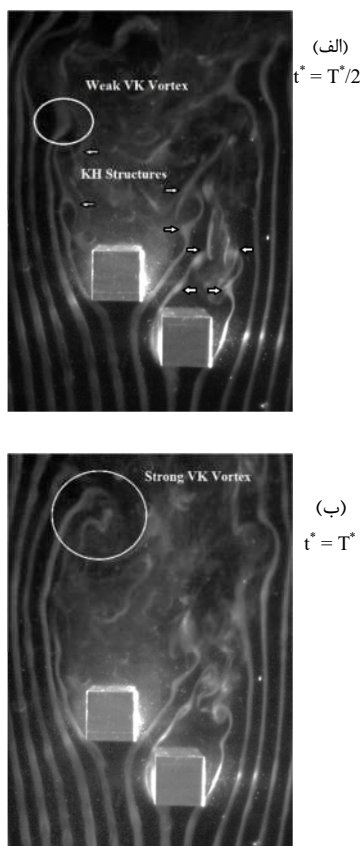
لایه‌ی برشی do در گوشه‌ی پایین‌دست رخ دهد. در این الگو بر روی لایه‌های برشی خارجی هر دو استوانه ناپایداری‌هایی ایجاد می‌گردند که این ناپایداری‌ها همان گردابه‌های معروف کلون هلمهولتز هستند. در شکل ۵-ب تشکیل این گردابه‌ها بر لایه‌ی uo نشان داده شده است. افزایش عرض دنباله و کشیدگی لایه‌های برشی در راستای جریان به همراه ناپایداری‌های کلون هلمهولتز موجب می‌گردند که تشخیص گردابه‌های ون کارمن و محاسبه‌ی فرکانس ریزش آن‌ها عملاً با روش حاضر امکان‌پذیر نباشد.

ب) الگوی جریان شکافی متناوب^۱

این الگوی جریان در آزمایش آشکارسازی دود برای فواصل مورد بررسی در کار حاضر تنها در فاصله‌ی $G^* = 0.4$ دیده شد. در این الگوی جریان، گردابه‌های کنده شده از هر دو لایه‌ی برشی داخلی استوانه‌های بالادست و پایین‌دست (di و ui) به گردابه‌ی لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی بالادست (uo) برخورد کرده و هر سه گردابه در هم ادغام می‌گردند و موجب درهم ریختگی دنباله در دوردست می‌شوند (شکل ۶). ریزش گردابه برای لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی پایین‌دست (do) نیز به صورت مجزا اتفاق می‌افتد. بررسی دقیق عکس‌ها و فیلم‌های گرفته شده نشان می‌دهد که برای این الگو، در تمامی زمان‌ها تنها یک مسیر گردابه‌ی نامنظم در پشت استوانه‌ها وجود دارد. همانند الگوی تک جسم (شکل ۵)، در این الگوی جریان نیز گردابه‌های کلون هلمهولتز بر روی هر چهار لایه‌ی برشی مشاهده می‌شوند (شکل ۶). به‌دلیل در هم ریختگی گردابه‌های داخلی در ناحیه‌ی دنباله‌ی نزدیک استوانه‌ها امکان دنبال کردن گردابه‌های ون کارمن و محاسبه‌ی فرکانس ریزش آن‌ها از لایه‌های برشی داخلی وجود نداشت. اما، در مورد لایه‌های برشی خارجی می‌توان ریزش گردابه‌های ون کارمن را تا حدودی از فیلم‌های به‌دست آمده تشخیص داد. این گردابه‌ها به شکل‌های مختلفی از لایه‌های برشی در حال کنده شدن هستند. دو شکل مختلف از تشکیل گردابه‌های ون کارمن در لایه‌ی خارجی استوانه‌ی پایین‌دست در زمان‌های $t^* = T^*/2$ و $t^* = T^*$ را در شکل ۶ الف و ب می‌توان مشاهده نمود. در شکل الف گردابه‌ای کوچک و در شکل ب گردابه‌ای به مراتب بزرگتر در لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی پایین‌دست ایجاد شده است.

با بررسی دقیق عکس‌ها برای لایه‌های برشی خارجی هر دو استوانه، دو دوره‌ی زمانی متناوب و منظم تشخیص داده شد که در آن، دوره‌ی زمانی کوچک‌تر تقریباً برابر با نصف دوره‌ی زمانی بزرگ‌تر (T^*) است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در دوره‌ی زمانی کوچک ($T^*/2$) گردابه‌ی ون کارمن تشکیل شده بر لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی پایین‌دست به مراتب، اندازه و قدرت کمتری نسبت به گردابه‌ی ون کارمن در دوره‌ی زمانی بزرگ‌تر (T^*) دارد. با معکوس کردن این دوره‌های زمانی می‌توان دو فرکانس ریزش گردابه‌ی مختلف را به این الگوی جریان نسبت داد. بنابراین می‌توان گفت که ریزش گردابه از هر لایه‌ی برشی مشخص با دو فرکانس غالب رخ می‌دهد. به‌عبارت دیگر، در این الگوی جریان می‌توان منشأ فرکانس‌های غالب را خود استوانه دانست. لازم به ذکر است که این حالت، با الگوی جریان

متناوب مدوله‌شده [۲] که در آن فرکانس غالب هر لایه‌ی برشی متفاوت با لایه‌ی برشی دیگر است، تفاوت دارد. همانند الگوی جریان شکافی متناوب، در پژوهش سامنر و همکاران [۱۱] در بررسی الگوهای جریان اطراف دو استوانه‌ی دایره‌ای نامحدود در $Re = 850-1900$ برای حالت‌های مورد بررسی در الگوهای با دو فرکانس غالب نیز وجود فرکانس‌های غالب متفاوت در لایه‌های برشی گزارش شده است. این الگوی جریان در کار قبلی نویسندگان [۲] در بررسی عددی جریان دوبعدی در عدد رینولدز $Re = 150$ اطراف دو استوانه مربعی در آرایش اریب نیز برای فواصل $0.25 \leq G^* \leq 0.75$ گزارش شده است و در آن مطالعه، مشخصه‌ی فرکانسی این الگوی جریان وجود دو فرکانس غالب یکسان برای هر استوانه ذکر شده است.



شکل ۶- خط اثر دود اطراف استوانه‌ها در فاصله‌ی $G^* = 0.4$ در عدد رینولدز $Re = 750$ در دو زمان مختلف

ج) الگوی جریان متناوب مدوله شده^۲

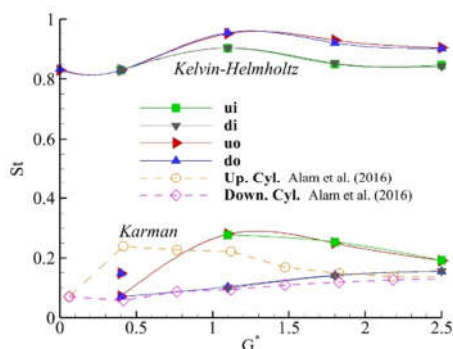
در مطالعه‌ی آشکارسازی حاضر این الگو در فواصل $G^* = 1.1, 1.8$ مشاهده شد. شکل ۷ الگوهای متفاوت خط اثر دود در پایین‌دست دو استوانه را در $Re = 750$ برای $G^* = 1.8$ نشان می‌دهد. با افزایش فاصله‌ی بین دو استوانه در الگوی جریان متناوب مدوله شده، جریان شکافی می‌تواند به راحتی از بین دو استوانه عبور کند. آزادی حرکت جریان شکافی در این الگوی جریان موجب می‌شود که ریزش گردابه

² Modulated periodic flow pattern

¹ Periodic gap flow pattern

عموماً دو نوع گردابه ایجاد می‌شود که شامل گردابه‌های تشکیل شده بر روی لایه‌ی برشی (گردابه‌ی کلون-هلمهولتز) و گردابه‌ی جدا شده از استوانه‌ها (گردابه‌ی ون کارمن) می‌باشند. روش کار جهت تخمین فرکانس ریزش گردابه بدین صورت است که ناظر تعداد گردابه‌های عبوری از یک نقطه‌ی خاص و تعداد عکس مربوط به آن را می‌شمارد. با تقسیم تعداد کل عکس‌ها بر تعداد گردابه‌ها، تعداد عکس‌های متوالی تشکیل یک گردابه محاسبه می‌شود. سپس با تقسیم کردن تعداد این عکس‌ها بر سرعت تصویربرداری دوربین (با واحد فریم بر ثانیه fps)، دوره‌ی زمانی تشکیل گردابه (T) بدست خواهد آمد. با معکوس کردن این زمان می‌توان فرکانس ریزش گردابه ($f = 1/T$) و از آن‌جا عدد استروهال ($St = fd/U_m$) را محاسبه نمود. در مطالعه‌ی حاضر سرعت تصویربرداری بر روی 500 فریم بر ثانیه تنظیم شده است.

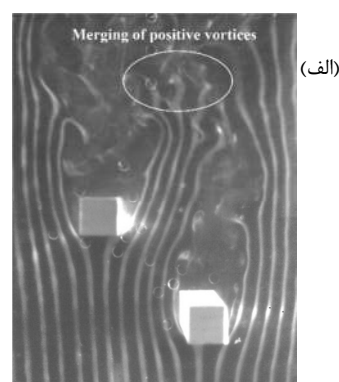
شکل ۸ تغییرات عدد استروهال مربوط به گردابه‌های ون کارمن و کلون-هلمهولتز را در فاصله‌های مختلف بین دو استوانه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در فاصله‌های $G^* = 0$ و $G^* = 0.4$ که به ترتیب معادل الگوهای جریان تک جسم و جریان شکافی متناوب هستند، فرکانس ریزش گردابه‌های کلون-هلمهولتز از تمامی لایه‌های برشی یکسان است. با افزایش فاصله و تغییر الگوی جریان به جریان متناوب مدوله شده، گردابه‌های کلون-هلمهولتز از لایه‌های برشی داخلی با فرکانس یکسان کنده می‌شوند. فرکانس ریزش این گردابه‌ها برای لایه‌های برشی خارجی نیز با هم برابرند و این فرکانس‌ها از فرکانس مربوط به لایه‌های برشی داخلی کمی بیشتر هستند. فرکانس ریزش گردابه‌های کلون-هلمهولتز در این الگوی جریان با تغییر فاصله چندان تغییر نمی‌کند.



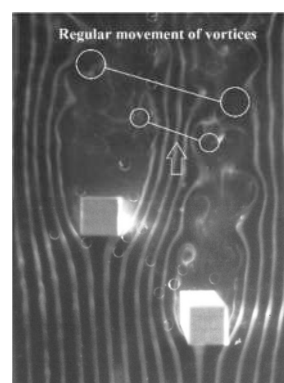
شکل ۸- تغییرات عدد استروهال با فاصله در کار حاضر در $Re = 750$ و کار تجربی عالم و همکاران [۷] در $Re = 13000$

همان‌طور که در الگوی جریان تک جسم ذکر شد، محاسبه‌ی دقیق ریزش گردابه‌های ون کارمن در فاصله‌ی $G^* = 0$ به دلیل عرض زیاد دنباله‌ی پشت استوانه‌ها و کشیدگی لایه‌های برشی با روش حاضر عملاً ممکن نبود. همچنین، در فاصله‌ی $G^* = 0.4$ نیز به دلیل نزدیکی دو استوانه به هم امکان تشخیص گردابه‌های ون کارمن برای لایه‌های برشی داخلی وجود نداشت. همین‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در این فاصله (الگوی جریان شکافی متناوب) ریزش گردابه‌های ون کارمن برای هر لایه‌ی برشی خارجی دو عدد استروهال دارد. اعداد استروهال ریزش این گردابه‌ها برای هر دو لایه‌ی خارجی با هم یکسان هستند و فرکانس یکی تقریباً برابر با نصف فرکانس دیگری است. اما،

برای هر دو استوانه به صورت مجزا اتفاق بیفتد؛ هر چند اندازه‌ی فرکانس‌های ریزش گردابه‌ها متفاوت هستند. تغییرات کمی اعداد استروهال در این الگو به تفصیل در بخش بعد بررسی گردیده است. اختلاف در فرکانس‌های ریزش گردابه موجب می‌شود که گردابه‌های هر دو استوانه هنگام عبور از کنار هم در پایین‌دست جریان با الگوهای مختلفی بر هم اثر گذارند. بررسی دقیق تصاویر گرفته شده در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که عبور پیوسته‌ی گردابه‌ها با فرکانس‌های مختلف باعث می‌شود که در دنباله‌ی پایین‌دست استوانه‌ها گاهی گردابه‌های هم‌علامت مربوط به لایه‌های برشی هر دو استوانه کنار هم قرار گرفته و در هم ادغام می‌شوند (شکل ۷ الف) و گاهی گردابه‌های با علامت متفاوت به شکل منظم در کنار هم به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند (شکل ۷ ب). مطابق مدل‌سازی عددی قبلی نویسندگان [۲] در الگوی متناوب مدوله شده، این اثرات متقابل گردابه‌ها باعث ایجاد تغییرات پیوسته در اندازه‌ی دامنه‌ی نوسانات نیروهای برای وارد بر استوانه‌ی پایین‌دست می‌گردد یا در اصطلاح، دامنه‌ی نوسان آن نیروها را مدوله می‌کنند. محدوده‌ی الگوی جریان متناوب مدوله شده در بررسی عددی دوبعدی برای $Re = 150$ در فاصله‌ی $1.5 \leq G^* \leq 3.5$ گزارش شده است [۲].



(الف)

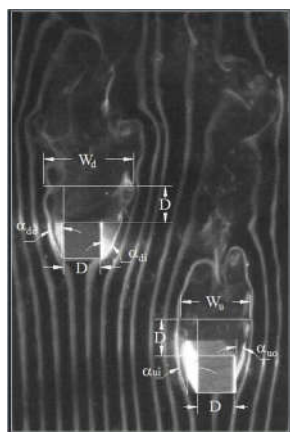


(ب)

شکل ۷- الگوی حرکت گردابه‌های ون کارمن در فاصله‌ی $G^* = 1.8$ در عدد رینولدز $Re = 750$ در دو زمان مختلف

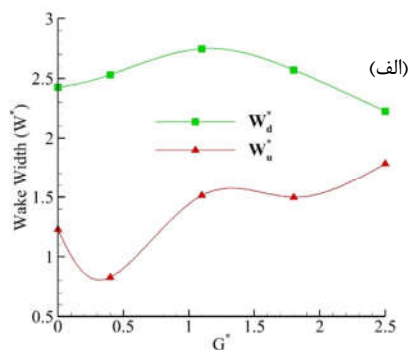
۳-۲- فرکانس ریزش گردابه

در این پژوهش از فیلم‌های تهیه‌شده از آشکارسازی جریان جهت تخمین فرکانس ریزش گردابه‌های ون کارمن و کلون-هلمهولتز در میدان جریان استفاده گردیده است. در بررسی جریان اطراف استوانه‌ها،



شکل ۹- معرفی عرض دنباله و زوایای جدایش

در شکل ۱۰ اثرات تغییر فاصله بر عرض دنباله و زوایای جدایش جریان از لایه‌های برشی مختلف در عدد رینولدز $Re = 750$ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با استفاده از خط اثر دود لحظه‌ای این پارامترها در زمان‌های مختلف به‌دست آمده و سپس متوسط‌گیری زمانی شده‌اند. برای فاصله‌ی بین دو استوانه‌ی $G^* = 0$ عرض دنباله به صورت فاصله‌ی عرضی محل اتصال دو استوانه تا لبه‌ی لایه‌ی برشی خارجی هر استوانه تعریف شده است. به دلیل چیدمان دو استوانه در حالت $G^* = 0$ ، فضای ایجاد شده در جلوی استوانه‌ی پایین‌دست منطقه‌ای به مراتب پرفشار را ایجاد کرده که این ناحیه موجب کاهش سرعت و کاهش زاویه‌ی جدایش لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی پایین‌دست (α_{di}) نسبت به زاویه‌ی جدایش لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی بالادست (α_{do}) شده است (شکل ۱۰ ب). اما، به دلیل کشیدگی بیشتر لایه‌ی برشی خارجی جدا شده از استوانه‌ی بالادست، علیرغم زاویه‌ی جدایش بزرگتر این لایه‌ی برشی، عرض دنباله‌ی مربوط به استوانه‌ی بالادست نسبت به استوانه‌ی پایین‌دست کوچکتر است (شکل ۱۰ الف).



در الگوی جریان متناوب مدوله شده (در فاصله‌های $G^* = 1.1, 1.8, 2.5$)، فرکانس ریزش گردابه‌ی ون کارمن برای لایه‌های برشی هر استوانه با هم برابرند یعنی برخلاف الگوی جریان شکافی متناوب می‌توان به هر استوانه یک عدد استروهل نسبت داد. اعداد استروهل استوانه‌ها با هم متفاوت هستند و برای الگوی جریان متناوب مدوله شده فرکانس ریزش گردابه استوانه‌ی بالادست بیشتر از استوانه‌ی پایین‌دست می‌باشد. با افزایش فاصله و کاهش اثرات جریان اطراف استوانه‌ها برهم، اعداد استروهل هر دو استوانه به سمت هم میل می‌کنند. تغییرات اعداد استروهل در اثر تغییر فاصله‌ی بین دو استوانه از کار عالم و همکاران [۷] مستخرج و در شکل ۸ نشان داده شده است. عالم و همکاران [۷] در یک کار تجربی با استفاده از جریان سنجی سیم داغ در نقاطی مشخص، فرکانس‌های غالب جریان در اطراف دو استوانه‌ی مربعی نامحدود در آرایش اریب در $Re = 13000$ را به‌دست آوردند. کار حاضر در $Re = 750$ و مطالعه‌ی عالم و همکاران [۷] در $Re = 13000$ انجام شده است و ارائه‌ی همزمان نتایج در یک نمودار تنها جهت بیان روند تغییرات و نمایش ویژگی‌های قابل مقایسه‌ی الگوهای مختلف جریان علیرغم محدوده‌ی متفاوت این الگوها در اثر تغییر عدد رینولدز می‌باشد. اثر عدد رینولدز بر محدوده‌ی وقوع الگوهای مختلف جریان پیرامون دو استوانه با مقطع دایره در مطالعه‌ی دیگر توسط ونگ و همکاران [۲۴] بررسی شده است و آن‌ها نیز متذکر شدند که تغییر در عدد رینولدز از $Re = 1500$ تا $Re = 20000$ موجب تغییر قابل ملاحظه‌ای در مرز بین الگوهای مختلف جریان می‌شود.

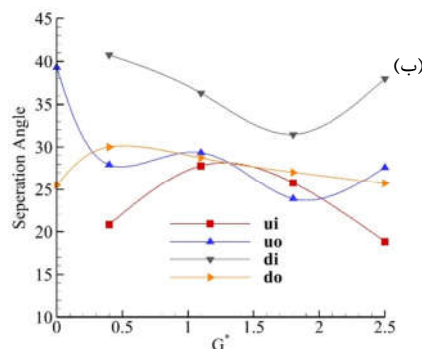
۳-۳- عرض دنباله و زاویه جدایش لایه‌های برشی

در شکل ۹ عرض دنباله برای هر دو استوانه‌ی بالادست و پایین‌دست و همچنین زاویه‌ی جدایش در لایه‌های برشی مختلف معرفی شده‌اند. در این شکل، W_d و W_u به ترتیب عرض دنباله‌ی استوانه‌ی بالادست و پایین‌دست هستند که با استفاده از مقیاس طول ضلع استوانه ($W^* = W/d$) بدون بعد می‌شوند. محل اندازه‌گیری عرض دنباله در پشت استوانه‌ها و به فاصله یک برابر ضلع استوانه می‌باشد. همچنین، α_{di} و α_{do} به ترتیب زاویه‌ی جدایش لایه‌ی برشی داخلی و خارجی استوانه‌ی بالادست و α_{di} و α_{do} زاویه‌ی جدایش لایه‌ی برشی داخلی و خارجی استوانه‌ی پایین‌دست می‌باشند. زاویه‌ی جدایش لایه برشی زاویه‌ای است که لایه برشی پس از جدایش از لبه‌ی استوانه با راستای جریان ورودی می‌سازد.

صورت جداگانه رخ نمی‌دهد و گردابه‌ها همانند یک جسم در معرض جریان از استوانه‌ها کنده می‌شوند. عدد استروهال در این حالت تقریباً برابر با نصف عدد استروهال مربوط به تک استوانه ی مربعی برای هر دو استوانه است. با افزایش اندک فاصله ی بین دو استوانه از الگوی جریان تک جسم، لایه‌های برشی در ناحیه ی شکاف بین دو استوانه، بر مکانیزم ریزش گردابه تاثیر گذاشته و الگوی جریان شکافی متناوب ($G^* = 0.4$) را ایجاد می‌کنند. مشخصه ی قابل تمایز این الگوی جریان وجود دو فرکانس غالب ریزش گردابه برای هر کدام از استوانه‌هاست. در این الگوی جریان در حالت جریان لایه‌ای دوبعدی گردابه‌های هم علامت هر دو استوانه در یکدیگر ادغام شده و سپس گردابه‌ی با علامت مخالف لایه‌ی برشی داخلی به ترکیب آن‌ها برخورد می‌کند. در این الگو، تک مسیر گردابه‌ای بی‌نظمی در ناحیه‌ی دنباله مشاهده می‌شود. الگوی جریان متناوب مدوله‌شده، الگوی مهمی است که در بازه‌ی وسیعی از فواصل بین دو استوانه ($1.1 \leq G^* \leq 2.5$) دیده شد. مشخصه ی فرکانسی این الگوی جریان وجود دو فرکانس غالب متفاوت است که فرکانس‌های بزرگتر و کوچکتر به ترتیب مربوط به ریزش گردابه از استوانه‌ی بالادست و پایین‌دست هستند.

۵- مراجع

- [1] Aboueian J., Sohankar A., Rastan M. R., and Ghodrati M., An experimental study on flow over two finite wall-mounted square cylinders in a staggered arrangement. *Ocean Engineering*, Vol. 240, pp. 109954, 2021.
- [2] Aboueian J. and Sohankar A., Identification of flow regimes around two staggered square cylinders by a numerical study. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 295-315, 2017.
- [3] Aboueian-Jahromi J., Hossein Nezhad A., and Behzadmehr A., Effects of blockage ratio and Prandtl number on steady flow and heat transfer around an inclined square cylinder. *Heat Transfer Research*, Vol. 46, No. 6, pp. 541-562, 2015.
- [4] Aboueian-Jahromi J., Hossein Nezhad A., and Behzadmehr A., Effects of inclination angle on the steady flow and heat transfer of power-law fluids around a heated inclined square cylinder in a plane channel. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 166, No. 23-24, pp. 1406-1414, 2011.
- [5] بک خوشنویس ع، عباسقرانی ن. و ایزدی یزدی م، بررسی تجربی ضرب پسای دو سیلندر دایره ای پشت سرهم با چیدمان متناوب در جریان آشفته. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۰، ش. ۲، ص ۸۳-۹۱، ۱۳۹۹.
- [6] Niu J. and Zhu Z., Numerical study of three-dimensional flows around two identical square cylinders in staggered arrangements. *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 4, pp. 044106, 2006.
- [7] Alam M. M., Bai H., and Zhou Y., The wake of two staggered square cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 801, pp. 475-507, 2016.
- [8] Zhou Y., Wang Z., Qian Y., Yang H., and Wei Y., Numerical simulation of the flow around two square cylinders using the lattice Boltzmann method. *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 3, pp. 037110, 2021.
- [9] Niu J., Zhu Z., and Huang S., Numerical Study of Convective Heat Transfer from Two Identical Square Cylinders Submerged in a Uniform Cross Flow. *Numerical Heat Transfer Part A Applications*, Vol. 50, No. 1, pp. 21-44, 2006.
- [10] Sarkar S., Dalal A., and Biswas G., Mixed convective heat transfer from two identical square cylinders in cross flow at



شکل ۱۰- اثرات تغییر فاصله‌ی بین دو استوانه (G^*) بر (الف) عرض دنباله (W^*) و (ب) زاویه‌ی جدایش جریان (α) هر دو استوانه در لایه‌های برشی مختلف در $Re = 750$

کوچکتر بودن عرض دنباله‌ی استوانه‌ی بالادست در تمامی فاصله‌های بین دو استوانه‌ی بررسی شده در این بخش حفظ شده است. با افزایش فاصله از $G^* = 0$ به $G^* = 0.4$ و فعال شدن جریان شکافی (الگوی جریان شکافی متناوب)، به دلیل شکل قرارگیری استوانه‌ها، جریان متوسط شکافی به سمت استوانه‌ی بالادست منحرف می‌شود که این موجب می‌شود زاویه‌ی جدایش خارجی و عرض دنباله‌ی مربوط به استوانه‌ی بالادست و پایین‌دست به ترتیب کاهش و افزایش یابند (شکل ۱۰ الف). در الگوی جریان شکافی متناوب، لایه‌های برشی داخلی هر دو استوانه تاثیر متقابل زیادی بر هم دارند و هر دو به لایه‌ی برشی خارجی استوانه‌ی بالادست برخورد و در آن ادغام می‌شوند. با افزایش فاصله و تغییر الگو از جریان شکافی متناوب به جریان متناوب مدوله شده تاثیرات متقابل لایه‌های برشی داخلی بر هم کمتر شده و ریزش گردابه برای هر استوانه با استقلال بیشتری رخ می‌دهد. این تغییر الگوی جریان باعث می‌شود که با افزایش فاصله از $G^* = 0.4$ به $G^* = 1.1$ عرض دنباله‌ی هر دو استوانه افزایش یابد و زوایای جدایش داخلی هر دو استوانه به سمت هم میل کنند. به عبارت دیگر، زاویه‌ی جدایش داخلی استوانه‌ی بالادست و پایین‌دست به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. در الگوی جریان متناوب مدوله شده، با افزایش فاصله‌ی بین دو استوانه اثرات متقابل لایه‌های برشی داخلی بر هم کم شده و مشخصه‌های جریان اطراف هر کدام از استوانه‌ها به مشخصه‌های تک استوانه‌ی مربعی در معرض جریان نزدیک می‌شود. در نتیجه در این الگوی جریان (برای فاصله‌های $G^* = 1.1, 1.8, 2.5$) در حالت کلی با افزایش فاصله عرض دنباله‌های هر دو استوانه به هم نزدیک می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه‌ی حاضر، شناسایی الگوهای مختلف جریان اطراف دو استوانه‌ی مربعی دوبعدی در آرایش اریب برای فواصل مختلف در $Re = 750$ به کمک آشکارسازی جریان با دود می‌باشد. علاوه بر بررسی رفتار خطوط اثر به صورت کیفی، داده‌های کمی مانند فرکانس ریزش گردابه، زاویه جدایش جریان، عرض دنباله و ... نیز استخراج و به کمک آن نتایج، رفتار جریان در سه الگوی مختلف بر اساس فاصله‌ی بین استوانه‌ها دسته‌بندی شد. در الگوی جریان تک جسم ($G^* = 0$) به دلیل فاصله‌ی بسیار کم دو استوانه، ریزش گردابه‌ی مستقل از هر استوانه به

Re=100. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2628-2642, 2010.

- [11] Sumner D., Price S. J., and Paidoussis M. P., Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 411, pp. 263-303, 2000.
- [12] Dutta S., Panigrahi P. K., and Muralidhar K., Effect of orientation on the wake of a square cylinder at low Reynolds numbers. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 11, No. 6, pp. 447-459, 2004.
- [13] Wang H. F. and Zhou Y., The finite-length square cylinder near wake. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 638, pp. 453-490, 2009.
- [14] Yen S. C. and Liu J. H., Wake flow behind two side-by-side square cylinders. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No. 1, pp. 41-51, 2011.
- [15] Sakamoto H. and Arie M., Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 126, pp. 147-165, 1983.
- [16] Yen S. C. and Yang C. W., Flow patterns and vortex shedding behavior behind a square cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 8, pp. 868-878, 2011.
- [17] Sohankar A., Mohagheghian S., Dehghan A. A., and Dehghan Manshadi M., A smoke visualization study of the flow over a square cylinder at incidence and tandem square cylinders. *Journal of Visualization*, Vol. 18, No. 4, pp. 687-703, 2015.
- [18] Sohankar A., Abbasi M., Nili-Ahmadabadi M., Mahbub Alam M. D., and Zafar F., Experimental study of the flow around two finite square cylinders. *Archives of Mechanics*, Vol. 70, No. 5, pp. 457-480, 2018.
- [19] Dutta S., Muralidhar K., and Panigrahi P. K., Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties. *Experiments in Fluids*, Vol. 34, No. 1, pp. 16-23, 2003.
- [20] Liu C. H. and Chen J. M., Observations of hysteresis in flow around two square cylinders in a tandem arrangement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 9, pp. 1019-1050, 2002.
- [21] Norberg C., Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49, No. 1-3, pp. 187-196, 1993.
- [22] Okajima A., Strouhal numbers of rectangular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 123, pp. 379-398, 1982.
- [23] Sohankar A., Norberg C., and Davidson L., Low-Reynolds-number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 26, No. 1, pp. 39-56, 1998.
- [24] Wong C. W., Zhou Y., Alam M. M., and Zhou T. M., Dependence of flow classification on the Reynolds number for a two-cylinder wake. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 49, pp. 485-497, 2014.