



سازمان ملی هفت پژوهش و فناوری



دانشگاه بوعلی سینا
دانشکده مهندسی

کنترل پدیده ریزش گردابه های پشت استوانه به کمک کنترلر های دورانی

گروه آموزشی مکانیک،
دانشکده مهندسی،
دانشگاه بوعلی سینا،
همدان

- دانشجو: مسعود نجفی دانشجوی دکتری مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشگاه بوعلی سینا
- استاد راهنما: جناب دکتر محسن گودرزی دانشیار دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

هدف تحقیق، بررسی الگوهای مختلف جریان و نیرو های نوسانی القایی ناشی از برهم کنش کنترل کننده های دورانی و سیلندر مربعی با زاویه ۴۵ درجه بر اثر ریزش گردابه می باشد. شبیه سازی عددی ناپایدار برای میدان جریان آرام، غیر قابل تراکم و دو بعدی در رینولدز $Re = 150$ انجام شده است. در این تحقیق، حالت های مختلف کنترلی شامل تغییر در فاصله و زاویه قرارگیری کنترل کننده ها نسبت به مرکز سیلندر از صفر تا ۹۰ درجه بررسی شد. برطبق نتایج در برخی حالت های قرار گیری کنترل کننده ها، کاهش در ریزش گردابه، ضریب پسا، دامنه ضرایب برآ و پسا برای سیلندر مربعی و کنترل کننده ها نسبت به حالت بدون کنترل رخ می دهد. بررسی ها نشان داد در هر موقعیت قرار گیری کنترل کنند ها، الگوی نیرو های القایی ناشی از ریزش گردابه به سیلندر اصلی از نوع هارمونیک است. اما با توجه به موقعیت قرار گیری کنترل کننده ها الگوی نیرو های القایی به آن ها می تواند از نوع هارمونیک یا پریودیک باشد. نتایج نشان داد برای حالت کنترلی ($r/a = 1, \theta = 70^0, 80^0, 90^0$) حضور کنترل کننده ها سبب دور شدن محل ریزش گردابه از پشت سیلندر و از بین رفتن اثرات ریزش گردابه در ایجاد نیرو های نوسانی و کاهش ضریب پسا متوسط سیلندر اصلی و کنترل کننده ها می شود.

کلمات کلیدی: کنترل فعال، کنترل کننده های دورانی، سیلندر مربعی، ریزش گردابه

مقدمه

جریان سیال با گذر از اجسام عریض در اعداد رینولدز حدود ۵۰، سبب ایجاد پدیده ریزش گردابه و القای نیروهای نوسانی به سازه، کاهش عمر آن ها و ایجاد پیچیدگی های زیادی در طراحی سازه می گردد. اگر فرکانس ریزش گردابه با فرکانس طبیعی جسم برابر شود پدیده تشدید رخ می دهد. مطالعات بر روی ساختار ناحیه ویک و ریزش گردابه در پشت اجسام با سطح مقطع پهن و آنالیز جدایش جریان و ریزش گردابه و کنترل ناپایداری های جریان روی سازه ها با ساختار سیلندری از جمله موضوعات مورد توجه در آیرودینامیک، هیدرو دینامیک و کاربردهای مهندسی است. نمونه هایی از چنین کاربردی، لرزش خطوط لوله در کف دریا تحت نفوذ امواج شن جاری، پل ها، برهمکنش جریان و امواج با سازه های ساحلی، لوله ها و دودکش ساختمان های بلند، سازه هایی در لایه های مرزی جوی و لوله های زیر دریا هستند. صنعت سازه های دریایی به طور خاص بر توقف ارتعاشات القایی به سازه ها که می تواند منجر به تخریب آن ها و پیامدهای فاجعه بار محیطی شود، تمرکز می نماید [۱]. یافته های قبلی وجود مدهای مختلفی از ریزش گردابه در پشت اجسام پهن را نشان می دهد [۲].

روش های مورد استفاده جهت حذف و کاهش پدیده ریزش گردابه و نیروهای نوسانی القایی ناشی از آن به دلیل عبور جریان از روی اجسام، به دو دسته روش کنترل غیر فعال و کنترل فعال تقسیم بندی می شوند [۳]. نتایج تحقیق های مختلف نشان داد وقتی به وسیله روش های کنترلی فعال و غیر فعال ممنتوم ناحیه گردابه در پشت سیلندر را افزایش دهیم، شدت ریزش گردابه کاهش می یابد.

در روش کنترل غیر فعال عموماً با تغییر در شکل ظاهری جسم سعی در کاهش ریزش گردابه و نیروهای نوسانی وارد بر جسم می شود. این روش شامل ایجاد برجستگی های سطح (مانند زائده ها، مارپیچ ها، پره ها، سیم ها، حائل ها)، استفاده از میله های محوری، حائل های سوراخ دار و شکاف های محوری و همچنین پایدار کننده ناحیه و یک نزدیک اجسام (مانند خروج نرخ کمی از جریان اصلی از پشت جسم)، پره های هادی، صفحه های هادی جریان، صفحه های دندان دندانه، شیارهایی در عرض جسم و موج دار کردن سطح جسم است [۴-۸]. روش های کنترل غیر فعال به صورت موضعی و موقت میزان شدت ریزش گردابه را کاهش می دهند و به صورت نسبی می توانند در قسمتی از جریان سبب کاهش ریزش گردابه شوند اما ریزش گردابه را کاملاً متوقف نمی کنند [۹، ۱۰]. روش کنترل غیر فعال از نصب موانع در نزدیکی سیلندر نیز استفاده می کند [۲۶، ۲۷]. در کنترل غیر فعال یکی از روش های مؤثر و بسیار کاربردی برای کنترل مؤثر، تأخیر در جدایش جریان و کاهش ریزش گردابه و نیروهای القایی به اجسام، استفاده از اجسام کوچکی به نام کنترل کننده در اطراف سیلندر اصلی است. کنترل کننده ها باعث تغییر در الگوی جریان، کاهش ریزش گردابه، تأخیر در جدایش جریان و کاهش نیروهای نوسانی وارد بر سیلندر اصلی می شوند. این روش شامل استفاده از صفحه انعطاف پذیر در پشت سیلندر اصلی، نصب تیغه کنترلی یا استوانه با مقطع مربعی کوچک و میله در بالادست جریان و یا قرار دادن سیلندر کوچکی در ناحیه گردابه پشت سیلندر اصلی می باشد [۱۳-۱۷]. دومین روش کنترل جریان روش کنترل فعال است که نیازمند به صرف توان خارجی است. استفاده از روش های الکتریکی، کنترل بازخورد، میدان و نیروهای مغناطیسی، اثرات حرارتی، جریان های ثانویه (مانند: مکش، دمش و جت جریان) و نوسانات چرخشی از جمله این روش ها هستند [۱۸-۲۰].

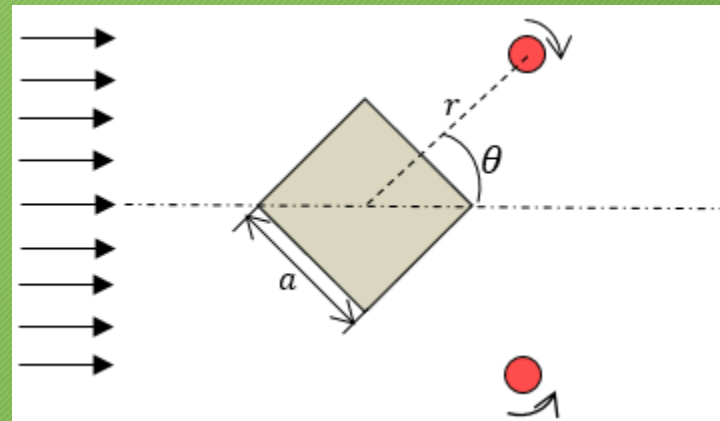
مقدمه

بررسی ها در زمینه استفاه از نوسانات چرخشی سیلندر اصلی (که یکی از روش های کنترل فعال است) نشان داد این روش توانایی مناسبی جهت اثر گذاری بر مکانیزم ریزش گردابه دارد. بنابراین محققان به بررسی زوایای مختلف اثر گذاری این روش بر ریزش گردابه و نیرو های نوسانی القایی ناشی از آن بر سازه پرداختند [۲۱ و ۲۲]. از مهم ترین معایب استفاه از روش نوسانات چرخشی سیلندر اصلی آن است که در بسیاری از کاربردهای مهندسی (مانند لوله های زیر دریا، پل ها و دودکش ساختمان های بلند و غیره) امکان استفاه از این روش و ایجاد نوسان اجباری روی سیلندر اصلی نیست. بنابراین در ادامه جهت افزایش بیشتر کاربرد این روش، محققان با توسعه روش های کنترل فعال و با توجه به اثرات مناسب نوسان چرخشی سیلندر در تزریق جریان با ممنتوم بالا به ناحیه دنباله و کاهش اثرات ریزش گردابه و همچنین با توجه به اثر بخشی مناسب استفاه از کنترل کننده های ثابت در بالادست یا پایین دست سیلندر اصلی، پیشنهاد دادند که از یک استوانه کوچک با مقطع دایروی و چرخان جهت کنترل جریان روی سیلندر اصلی استفاه شود [۲۳].

در تحقیق حاضر از کنترل کننده های چرخان در مجاورت سیلندر با مقطع مستطیلی تحت زاویه ۴۵ درجه استفاه شده است تا علاوه بر بررسی میزان کارایی این روش کنترل فعال در زمینه کاهش ریزش گردابه روی این مقاطع، الگوهای جریان ناشی از قرار گیری کنترل کننده ها در مختصات مکانی مختلف نسبت به سیلندر اصلی و نیروهای نوسانی القایی ناشی از ریزش گردابه بررسی گردد. در این مقاله یکی از هدفها پاسخ به این پرسش است که با تغییر زاویه سیلندر اصلی نسبت به جریان آزاد باز هم با استفاه از کنترل کننده ها می توان ریزش گردابه را کنترل و کاهش داد یا متوقف کرد؟ حضور کنترل کننده ها در مجاورت سیلندر چه اثری در تغییر نوع نیروهای نوسانی وارد بر سیلندر اصلی و کنترل کننده ها دارد؟ حضور کنترل کننده ها چه تأثیری بر الگوی جریان در پشت سیلندر اصلی دارد؟

بیان مسئله

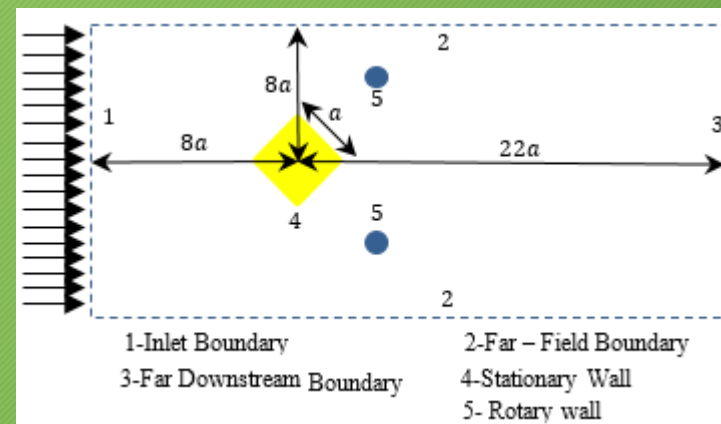
مطابق شکل ۱ مسئله جریان تراکم ناپذیر آرام عبوری از روی یک سیلندر با مقطع مربعی تحت زاویه ۴۵ درجه به همراه کنترل کننده های دورانی در نظر گرفته شده است. مکان هندسی قرار گیری کنترل کننده ها به وسیله مختصات مکانی شعاعی و زاویه ای مشخص می گردد. دو کنترل کننده نسبت به هم در میدان جریان به صورت متقارن قرار گرفته اند و جهت چرخش آن ها مخالف یکدیگر است. کنترل کننده بالایی چرخش ساعت گرد دارد. محل قرار گیری کنترل کننده ها با استفاده از مختصات قطبی نسبت به مرکز سیلندر مربعی تعیین می گردد. شکل ۱ شماتیک نحوه قرار گیری سیلندر مربعی و کنترل کننده های چرخان را در میدان جریان نمایش می دهد.



شکل ۱ نمایش هندسی قرار گیری سیلندر مربعی تحت زاویه و کنترل کننده های چرخان نسبت به میدان جریان.

معادلات حاکم، شرایط مرزی و اولیه

معادلات حاکم بر میدان جریان دو بعدی، تراکم ناپذیر و آرام با صرف نظر از نیروهای حجمی و شتاب گرانش وارد بر سیال، شامل معادله پیوستگی و معادله ممنتوم در دستگاه مختصات کارتزین می باشند. شکل ۲ میدان جریان را به همراه شرایط مرزی آن نمایش می دهد. در شبکه محاسباتی، مرز ورودی تا حد مناسبی از سیلندر مربعی دور در نظر گرفته شده است تا جریانی یکنواخت، وارد شود. برای مرزهای بالا و پایین، شرط مرزی دور دست، به طوری که تأثیری روی جریان نداشته باشند، در نظر گرفته شد. در این مرزها گرادیان متغیرهای وابسته در جهت عمود بر مرز صفر در نظر گرفته می شود. چون موقعیت مرز خروجی باید به گونه ای باشد که اثر بسیار کمی بر میدان جریان اطراف کنترل کننده ها و سیلندر مربعی داشته باشد و گردابه ها به راحتی از مرز خارج شده و تغییرات شدیدی در رژیم جریان و آرایش گردابه ها اتفاق نیفتد، این مرز بسیار دور از سیلندر مربعی و کنترل کننده های چرخان انتخاب می شود. سیلندر مربعی و استوانه ها، انعطاف ناپذیر، دیواره های آن نفوذ ناپذیر به همراه شرط عدم لغزش در نظر گرفته می شوند.



شکل ۲ هندسه مورد بررسی به همراه شرایط مرزی.

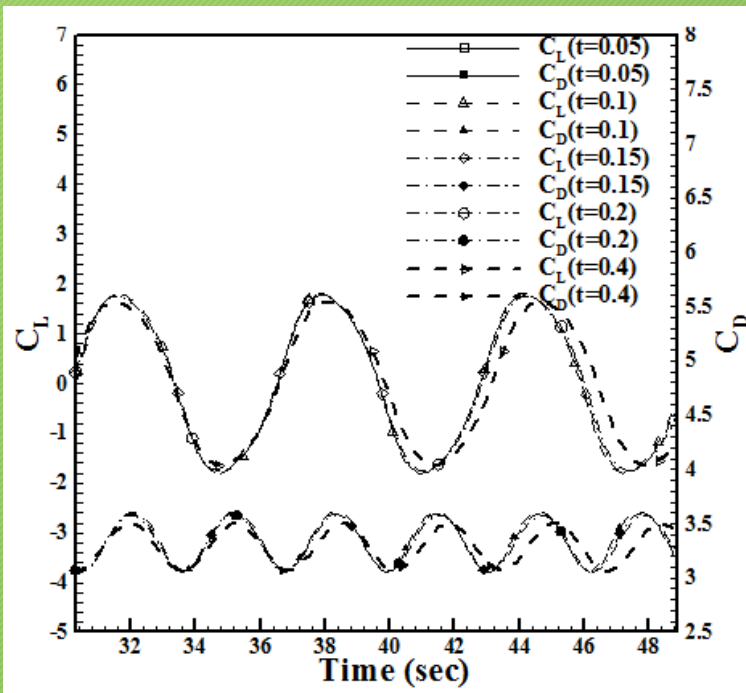
جزئیات حل عددی، مطالعه شبکه و گام زمانی

معادله های حاکم با استفاده از روش حجم محدود به صورت عددی حل شده اند. جهت درونیابی جملات شار روی سلول ها از طرح بالاوزش مرتبه دوم به دلیل توانایی و دقت بالا در پیش بینی پدیده های ناحیه جدایش و دنباله پشت سیلندر اصلی، استفاده شد. در تحقیق حاضر جهت حل میادین سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. در این تحقیق شبکه حل بدون سازمان و المان ها مثلثی می باشند. در نزدیکی سیلندر مربعی و کنترل کننده ها و در ناحیه دنباله سلول های شبکه به دلیل وجود گرادیان های شدید متغیرهای وابسته، بسیار ریز شده اند. تنظیم تعداد تکرار ها در هر گام زمانی باید به گونه ای باشد که قبل از رفتن به گام زمانی بعدی، همگرایی کامل در هر مرحله حاصل شود. معیار همگرایی هر قدر کوچک تر باشد، جواب های حاصل دقیق تر خواهند بود. حصول همگرایی به آن معناست که در هر گام زمانی، تعداد تکرار ها آن قدر ادامه یابند تا باقی مانده های معادلات پیوستگی و ممنتوم بدون تغییر باقی بمانند و سپس گام زمانی بعدی آغاز گردد.

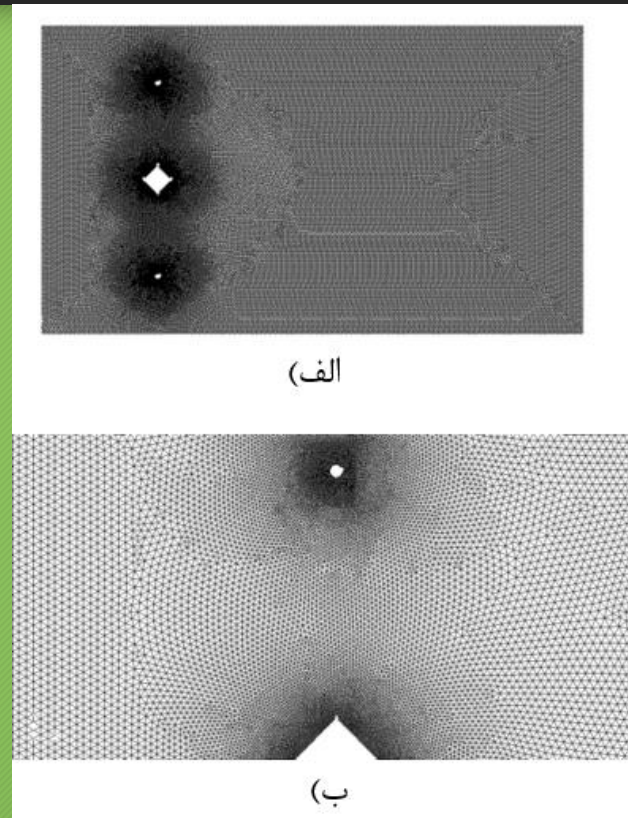
جهت مدل سازی جریان در اطراف سیلندر مربعی باید فاصله مرزها از آن به گونه ای مشخص شوند که محل قرار گیری آن ها بر الگوی جریان اطراف سیلندر و کنترل کننده ها تأثیر ناچیزی داشته باشد. بر طبق نتایج شکل ۳ با افزایش تعداد نقاط شبکه بعد از تعداد مشخصی ضرایب ائرو دینامیک سیلندر اصلی و کنترل کننده ها بدون تغییر باقی می ماند. این شبکه به عنوان شبکه مورد مطالعه انتخاب می گردد. نمونه ای از شبکه تولید شده در شکل ۴ ارائه شده است.

از لحاظ تئوری بهترین نتایج تحلیل جریان ناپایدار، با کوچک ترین بازه زمانی ممکن به دست می آیند. اما این موضوع زمان مورد نیاز و در پی آن هزینه محاسبات را بشدت افزایش می دهد. بنابراین منطقی است که جهت حل میدان جریان ناپایدار از بازه زمانی صحیحی که منجر به نتایج مناسب با کمترین زمان محاسباتی می گردد استفاده شود. بنابراین جهت حل عددی میدان جریان با توجه به توضیحات بالا بازه زمانی $\Delta t = 0.1$ جهت به دست آوردن نتایج، انتخاب می گردد.

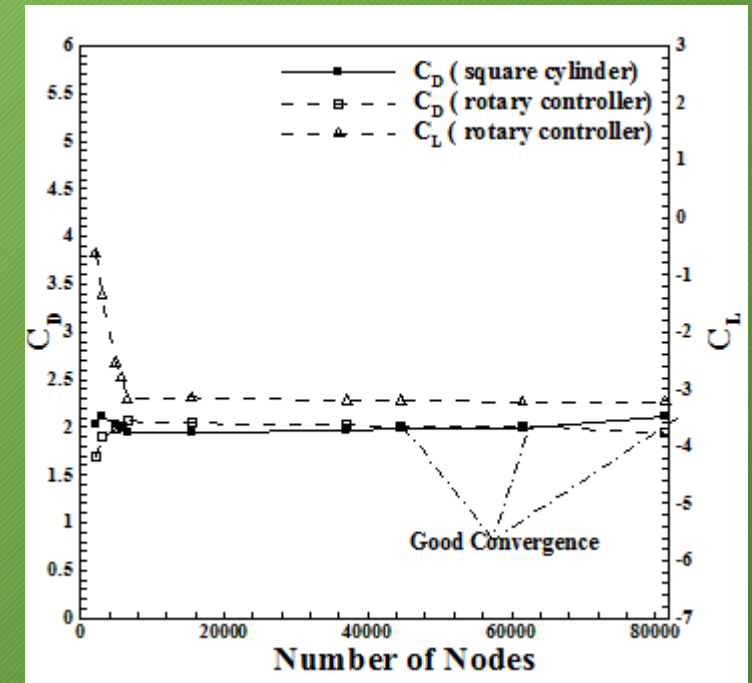
جزئیات حل عددی، مطالعه شبکه و گام زمانی



شکل ۵ مقایسه نتایج بدست آمده از بازه‌های زمانی متفاوت جهت تعیین گام زمانی بهینه.



شکل ۴ الف) نمایش شبکه بندی کل میدان حل ب) ناحیه بزرگ شده نزدیک دیواره روی سیلندر مربعی و کنترل کننده ها.



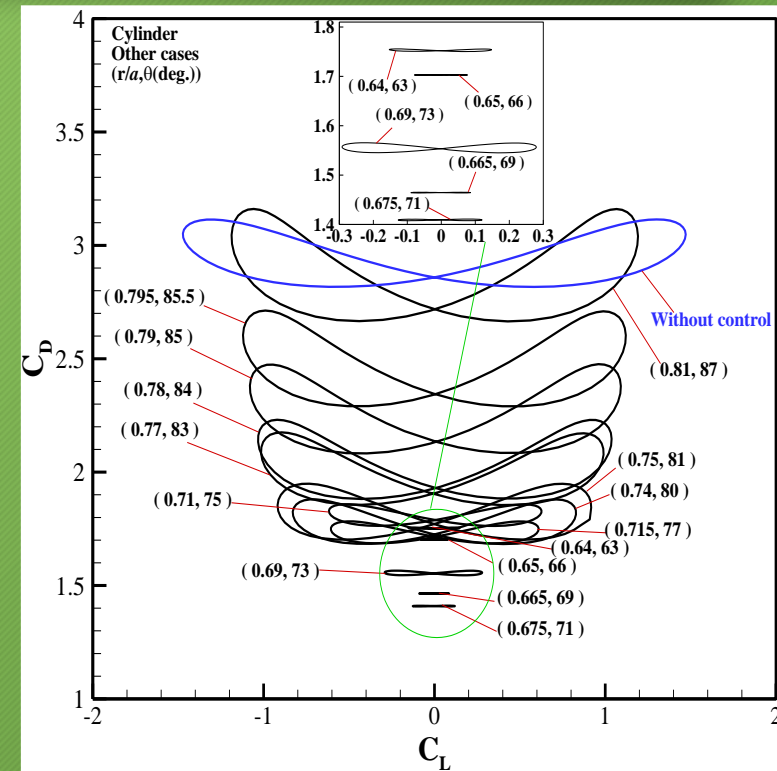
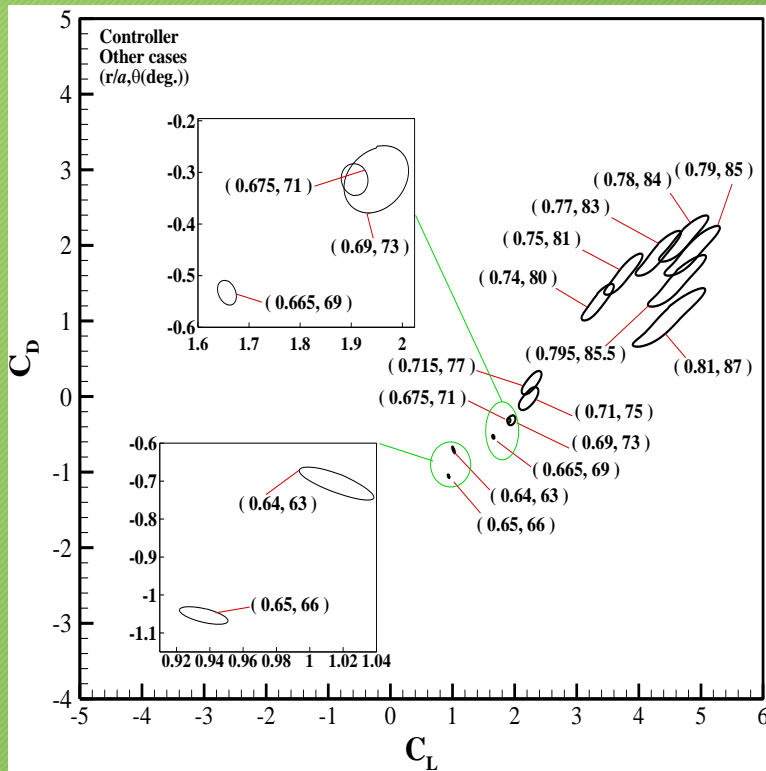
شکل ۳ ضرایب برآ و پسا سیلندر مربعی و کنترل کننده های دورانی در جهت مطالعه شبکه در یکی از حالت های مورد بررسی.

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه الگوی جریان روی سیلندر مربعی تحت زاویه ۴۵ درجه در حضور یک جفت کنترل کننده چرخان پرداخته شد. در ابتدا با بررسی الگوی جریان، نیروهای نوسانی وارد به سیلندر اصلی و کنترل کننده ها دسته بندی شدند و در سرعت دورانی بدون بعد ۱.۲ برای عدد رینولدز ۱۵۰ به جست و جوی نقاطی جهت قرار گیری کنترل کننده های چرخان پرداخته شد که با حضور آن ها محل شروع ریزش گردابه از پشت سیلندر مربعی دور شده و در نتیجه اثرات ریزش گردابه در ایجاد نیرو های نوسانی روی سیلندر مربعی و کنترل کننده ها حذف می گردد. سپس مکانیزم عملکرد کنترل کننده ها در این نقاط بررسی و توجیه شد. مهم ترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

۱- نتایج نشان داد که با تغییر مختصات کنترل کننده ها ماهیت هارمونیک بودن نیروهای نوسانی وارد به سیلندر اصلی تغییر نمی کند و در فاصله بین سیلندر اصلی تا کنترل کننده ها ریزش گردابه به صورت هارمونیک است. اما با عوض شدن محل قرار گیری کنترل کننده ها ماهیت نیروهای نوسانی وارد بر آن ها می تواند هارمونیک یا پریودیک باشد. در شکل ۶ نمونه ای از نمودار فازی ضرایب اُترودینامیکی سیلندر مربعی و کنترل کننده ها (کنترل کننده بالایی) در عدد رینولدز ۱۵۰ آمده است.

بحث و نتیجه گیری

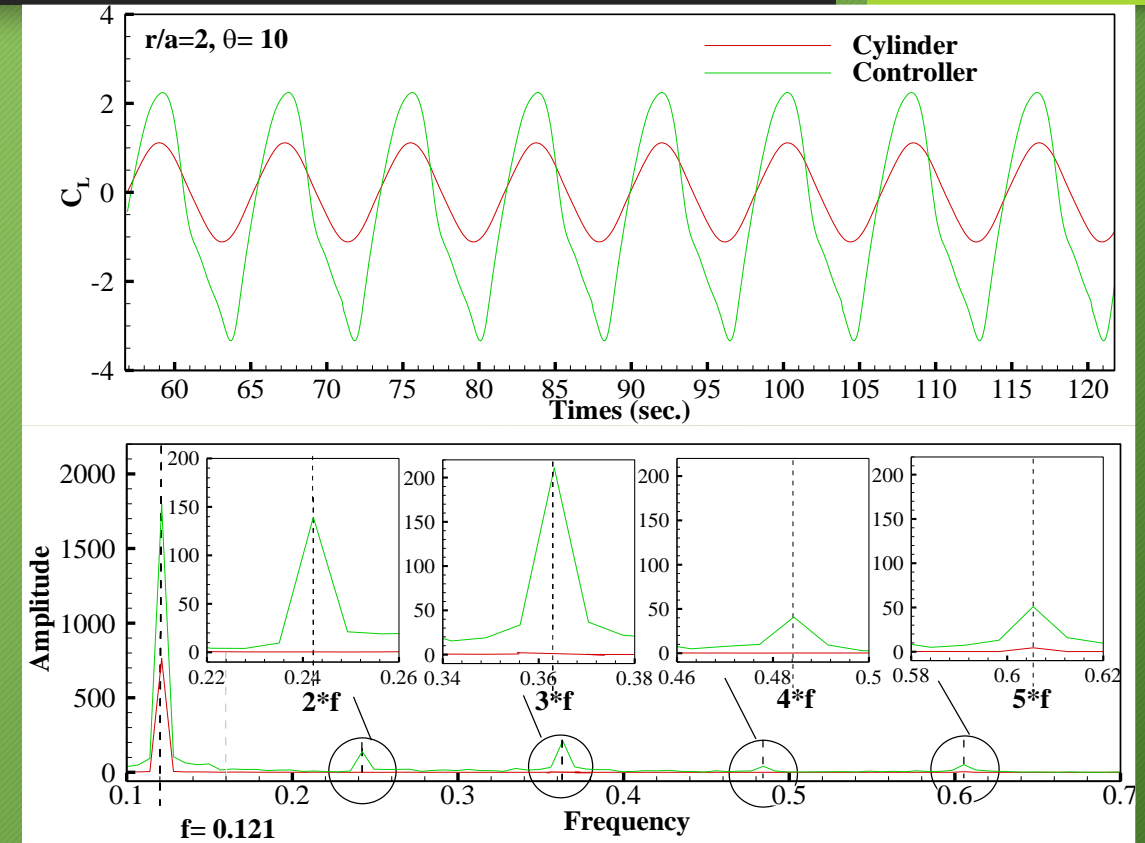
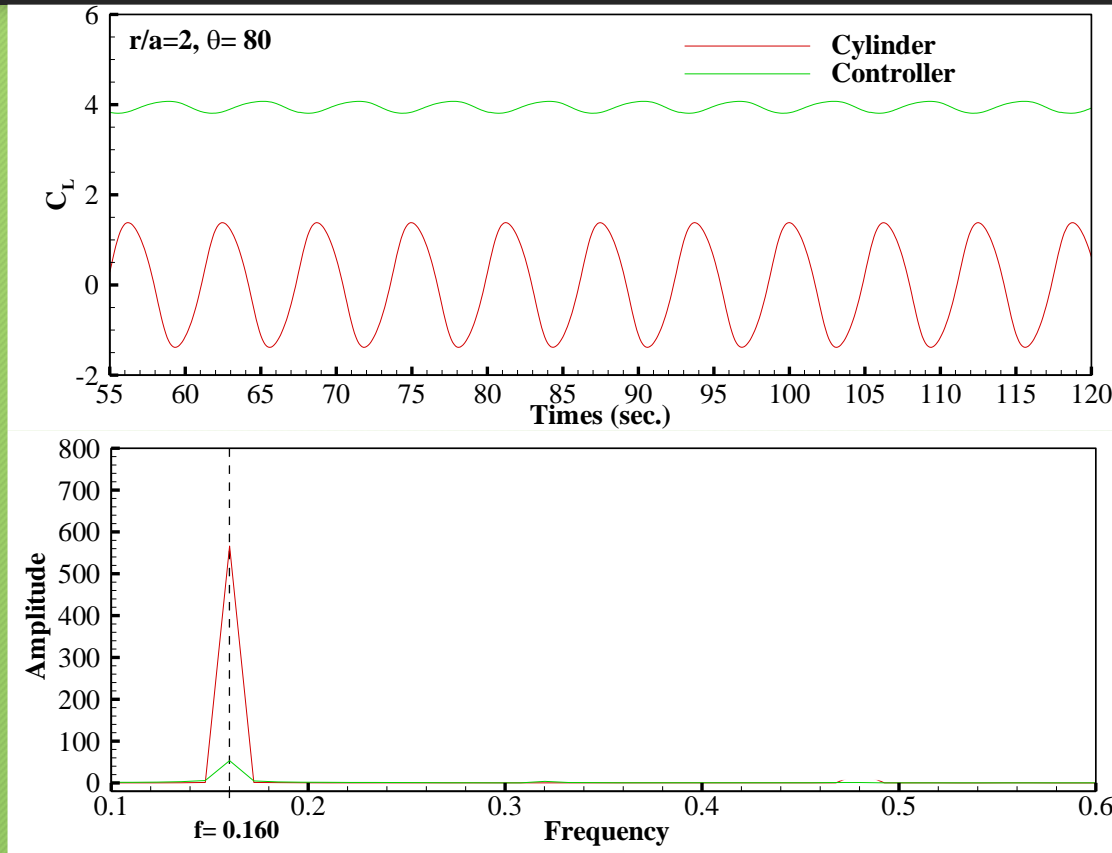


شکل ۶ نمونه ای از نمودار فازی ضرایب آئرو دینامیکی سیلندر مربعی و کنترل کننده‌ها (کنترل کننده بالایی) برای حالت‌های مختلف قرار گیری در عدد رینولدز ۱۵۰.

بحث و نتیجه گیری

بر طبق نتایج در همه حالت های مورد بررسی فرکانس نوسانات ضریب پسا سیلندر اصلی دو برابر فرکانس نوسانات ضریب برآ می باشد. استفاده از تبدیل سریع فوریه روی ضریب برآ کنترل کننده ها نشان داد که در همه حالت های مورد بررسی چه ماهیت نیروهای نوسانی وارد به کنترل کننده ها از نوع هارمونیک باشد یا پریودیک، فرکانس اصلی نوسان ضریب برآ کنترل کننده ها با فرکانس اصلی نوسان ضریب برآ سیلندر اصلی یکسان و در حالتی که نیروهای وارده به کنترل کننده ها پریودیک باشند سایر فرکانس های نوسانی بدست آمده از تبدیل سریع فوریه ضریب برآ آن ها مضرب صحیحی از فرکانس اصلی ضریب برآ کنترل کننده ها و در نتیجه سیلندر اصلی می باشند.

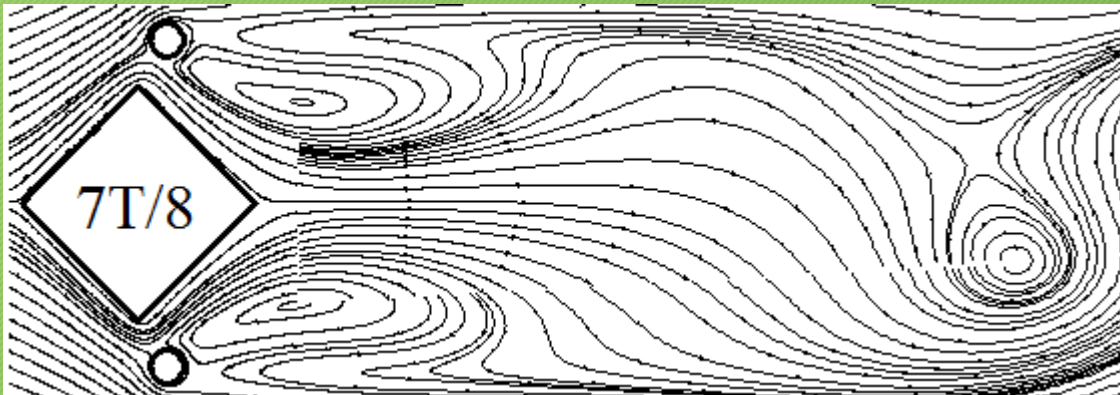
بحث و نتیجه گیری



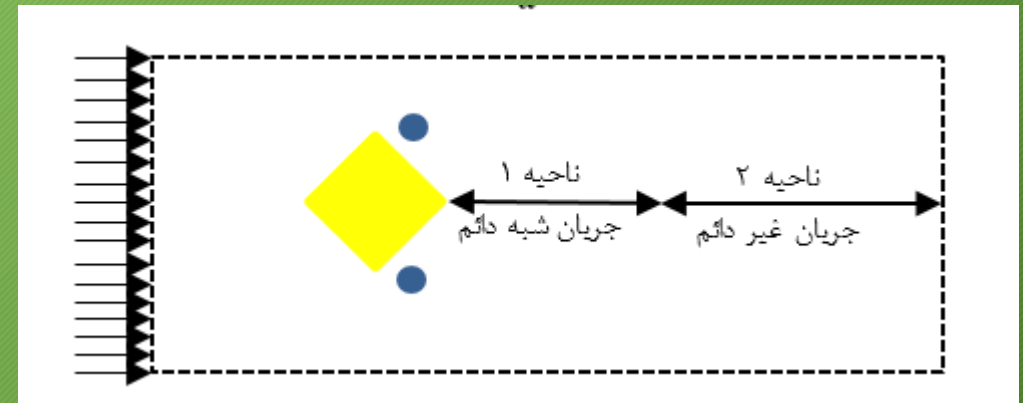
شکل ۷، نمونه ای از نمودار ضرایب برآ سیلندر اصلی و کنترل کننده‌ها بر حسب زمان و تبدیل سریع فوریه آن‌ها برای برخی حالت‌های کنترلی در عدد رینولدز ۱۵۰.

بحث و نتیجه گیری

مطابق شکل های ۸ و ۹ در برخی مختصات مکانی مقارن با کمترین دامنه ضریب برآ برای سیلندر اصلی، حضور کنترل کننده ها سبب می شود ناحیه جریان پایین دست سیلندر اصلی به دو ناحیه جریان شبه دائم که در آن ریزش گردابه وجود ندارد و ناحیه جریان غیر دائم که طول آن از محل شروع ریزش گردابه تا پایین دست جریان می باشد تقسیم شود.



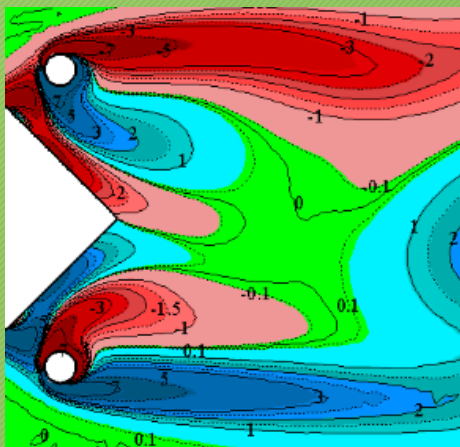
شکل ۹ نمونه ای از کانتور خطوط جریان لحظه ای برای حالت کنترلی $\theta = 80, \frac{r}{a} = 1$ در عدد رینولدز ۱۵۰.



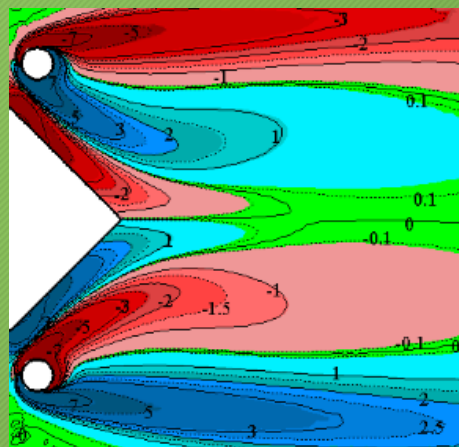
شکل ۸ شماتیک تقسیم میدان جریان پایین دست سیلندر مربعی با حضور کنترل کننده های چرخان.

بحث و نتیجه گیری

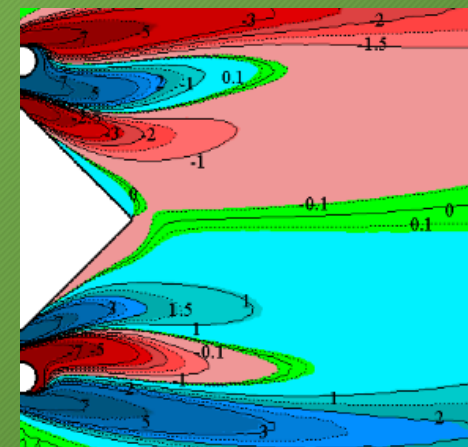
نقاط مناسبی وجود دارند که در جریان با رینولدز 150 و سرعت بدون بعد کنترلی $2/1$ ، حضور کنترل کننده‌ها در آن نقاط سبب دور شدن محل شروع ریزش گردابه از پشت سیلندر مربعی و کاهش بیش از 90 درصدی اثر ریزش گردابه در ایجاد نیروهای نوسانی روی سیلندر مربعی می‌گردد. این نقاط عبارتند از $(\frac{r}{a} = 1.0, \theta = 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ)$ و $(\frac{r}{a} = 0.65, \theta = 66^\circ)$ و $(\frac{r}{a} = 0.665, \theta = 69^\circ)$. که حداکثر مقدار کاهش در ضریب پسا برای نقاط واقع در شعاع $\frac{r}{a} = 1$ نسبت به حالت بدون کنترل $42/32$ درصد و دو نقطه دیگر به میزان $56/52$ درصد نسبت به حالت بدون کنترل می‌باشد.



$$\frac{r}{a} = 1, \theta = 70$$

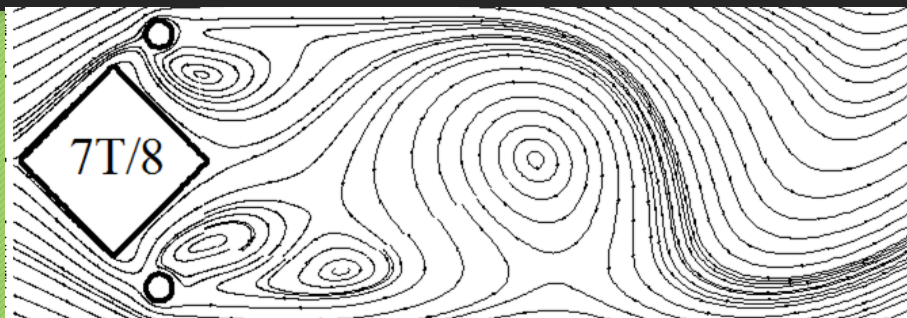


$$\frac{r}{a} = 1, \theta = 80$$

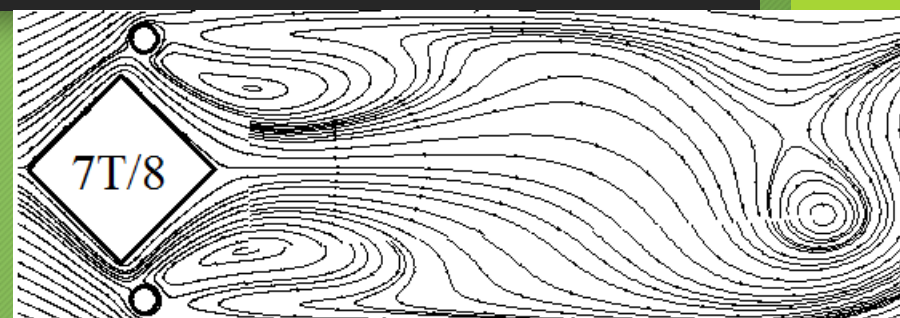


$$\frac{r}{a} = 1, \theta = 90$$

بحث و نتیجه گیری



$$\frac{r}{a} = 1, \theta = 70$$



$$\frac{r}{a} = 1, \theta = 80$$



$$\frac{r}{a} = 1, \theta = 90$$

تقدیر و تشکر



با کمال فروتنی، ادب و احترام از استاد بزرگم جناب دکتر محسن گودرزی
که با لطف و مهربانی همیشگی از هیچ کمکی در این عرصه بر بنده حقیر
دریغ ننمودند، تشکر و قدردانی می نمایم.

منابع



- [1] S. Rashidi, M. Bavand, J. A. Esfahani, “Vortex shedding suppression and wake control: A review”, *Ocean Engineering*, Vol.126, pp. 57-80, 2016.
- [2] F. M. White, “Fluid Mechanics 7th edn University of Rhode Island,” *Publication company: Mc Graw Hill*, 2010.
- [3] M. M. Zdravkovich, *Flow around circular cylinders: Volume 2: Applications*: Oxford university press, 1997.
- T. Igarashi, “Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 69, pp. 141-153, 1997.
- [4] R. Darekar, and S. Sherwin, “Flow past a bluff body with a wavy stagnation face,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 15, no. 3-4, pp. 587-596, 2001.
- [5] H. Hangan, and J. Kim, “Aerodynamic slot-control for 2D square prisms,” *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, vol. 91, no. 12-15, pp. 1847-1857, 2003.
- [6] J.-Y. Hwang, and K.-S. Yang, “Drag reduction on a circular cylinder using dual detached splitter plates,” *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, vol. 95, no. 7, pp. 551-564, 2007.
- [7] S. Shukla, R. Govardhan, and J. Arakeri, “Flow over a cylinder with a hinged-splitter plate,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 25, no. 4, pp. 713-720, 2009.

- [8] M. Zdravkovich, “Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders,” *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, vol. 33, no. 1-2, pp. 53-62, 1990.
- [9] H. Park, D. Lee, W.-P. Jeon, S. Hahn, J. Kim, J. Kim, J. Choi, and H. Choi, “Drag reduction in flow over a two-dimensional bluff body with a blunt trailing edge using a new passive device,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 563, pp. 389-414, 2006.
- [10] S. Mittal, and A. Raghuvanshi, “Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers,” *International journal for numerical methods in fluids*, vol. 35, no. 4, pp. 421-447, 2001.
- [11] A. Dipankar, T. Sengupta, and S. Talla, “Suppression of vortex shedding behind a circular cylinder by another control cylinder at low Reynolds numbers,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 573, pp. 171-190, 2007.
- [12] M. Pasandidefard, and A. Hashempour, "Drag reduction on a cylinder by installing a rod at the upstream."
- [13] S. Malekzadeh, and A. Sohankar, “Reduction of fluid forces and heat transfer on a square cylinder in a laminar flow regime using a control plate,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 34, pp. 15-27, 2012.
- [14] Y. J. Chen, and C. P. Shao, “Suppression of vortex shedding from a rectangular cylinder at low Reynolds numbers,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 43, pp. 15-27, 2013.

- [15] D. K. Maiti, and R. Bhatt, “Vortex shedding suppression and aerodynamic characteristics of square cylinder due to offsetting of rectangular cylinders towards a plane,” *Ocean engineering*, vol. 82, pp. 91-104, 2014.
- [16] J. Wu, C. Shu, and N. Zhao, “Numerical study of flow control via the interaction between a circular cylinder and a flexible plate,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 49, pp. 594-613, 2014.
- [17] J. H. Fransson, P. Konieczny, and P. H. Alfredsson, “Flow around a porous cylinder subject to continuous suction or blowing,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 19, no. 8, pp. 1031-1048, 2004.
- [18] A. Sevilla, and C. Martínez-Bazán, “Vortex shedding in high Reynolds number axisymmetric bluff-body wakes: Local linear instability and global bleed control,” *Physics of Fluids*, vol. 16, no. 9, pp. 3460-3469, 2004.
- [19] Z. Chen, and N. Aubry, “Active control of cylinder wake,” *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, vol. 10, no. 2, pp. 205-216, 2005.
- [20] N. Fujisawa, Y. Asano, C. Arakawa, and T. Hashimoto, “Computational and experimental study on flow around a rotationally oscillating circular cylinder in a uniform flow,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, no. 2, pp. 137-153, 2005.

- [21] M. Brocchini, and F. Trivellato, *Vorticity and Turbulence Effects in Fluid Structure Interaction: An Application to Hydraulic Structure Design*: WIT press, 2006.
- [22] A. Maurel, and P. Petitjeans, *Vortex Structure and Dynamics: Lectures of a Workshop Held in Rouen, France, April 27-28, 1999*: Springer, 2008.
- [23] M. Goodarzi, and E. K. Dehkordi, “Geometrical parameter analysis on stabilizing the flow regime over a circular cylinder using two small rotating controllers,” *Computers & Fluids*, vol. 145, pp. 129-140, 2017.