

شبیه‌سازی جریان ناپایدار حول یک استوانه مدور چرخان در اعداد رینولدز مختلف

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
 کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

کامران مبینی
 مرتضی نیازی*

چکیده

در این مقاله، جریان ناپایدار عبوری از روی یک استوانه مدور چرخان به روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. آهنگ چرخش استوانه از ۰ تا ۲ تغییر می‌کند. تغییرات ضرایب برآ و پسای متوسط و ساختار گردابه‌های پشت استوانه، برای اعداد رینولدز مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی اعداد رینولدز مطالعه شده، با افزایش آهنگ چرخش استوانه، ضریب پسای متوسط کاهش و قدر مطلق ضریب برای متوسط افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز و افزایش آهنگ چرخش، طول گردابه‌های پشت استوانه افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده با نتایج سایر شبیه سازی‌های عددی انجام شده و همچنین نتایج تجربی مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: جریان ناپایدار، استوانه مدور چرخان، شبیه سازی گردابه‌های بزرگ.

Simulation of Unsteady Flow Around a Rotating Circular Cylinder at Various Reynolds Numbers

K. Mobini
 M. Niazi

school of mechanical engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran
 school of mechanical engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Abstract

In this study, unsteady flow around a rotating circular cylinder is investigated using Large Eddy Simulation method. The rotation rate varies between 0 and 2. Variation of the mean drag and lift coefficients, and the wake structure for different Reynolds numbers are studied. It was found that by increasing the rotation rate, the mean drag coefficient decreases and the mean lift coefficient increases. Length of the vortices behind the cylinder is also increased by increasing the rotation rate and by growing of Reynolds number. The results are compared with the other numerical simulation results and are also compared with the published experimental results.

Keywords: Large Eddy Simulation, Rotating circular cylinder, unsteady flow.

برای جریان عبوری از روی یک استوانه مدور ساکن، در عدد رینولدز ۳۹۰۰، مطالعات فراوانی صورت گرفته است. یکی از مهم ترین تحقیقات در این زمینه مربوط به بریر [۲] می باشد که با آزمایش پنج طرح با تعداد شبکه مختلف به بررسی تاثیر اندازه شبکه و مقیاس زیر شبکه‌ای در ضریب پسا و ضریب فشار پرداخته است.

بلک برن و اشمیت [۳] به بررسی و مقایسه دو روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ المان طیفی و شبیه سازی گردابه‌های بزرگ حجم محدود پرداخته‌اند و دقت آنها را با نتایج تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. فرانکا و فرانک [۱] نیز به بررسی دقت روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ پرداخته و نتایج را با روش شبیه سازی عددی مستقیم و نتایج تجربی مقایسه کرده‌اند. ترمبلی و همکاران [۴] با هر دو روش DNS و LES به شبیه سازی این جریان پرداخته و نتایج مشابهی را بدست آورده اگرچه در تحقیق او نتایج حاصل از روش حل عددی مستقیم تطابق بهتری را با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

تحقیقات ذکر شده در بالا همگی مربوط به مدل سازی جریان عبوری از استوانه مدور ساکن در عدد رینولدز ۳۹۰۰ است. برای جریان آشفته عبوری از روی استوانه مدور چرخان هنوز تحقیق جامعی صورت نگرفته است. البته لم [۵] جریان اطراف استوانه مدور چرخان را برای اعداد رینولدز بین ۳۶۰۰ تا ۵۰۰۰ و آهنگ چرخش ۰ تا ۲.۵ (آهنگ چرخش عبارت است از نسبت سرعت چرخش استوانه به

۱- مقدمه

جریان آشفته عبوری از روی اجسام توپی شکل به دلیل فیزیک پیچیده آن، سال‌های متمادی مورد توجه محققان بوده و در طی سال های گذشته تحقیقات فراوانی بر روی این مسئله انجام شده است. روش‌های عددی و مدل سازی های گوناگونی برای حل این نوع مسائل وجود دارد. به طور مثال مدل رینولدز متوسط (RANS) به سادگی تلاش می کند که آشفته‌گی را با انجام متوسط گیری زمانی مدل کند. تحت شرایط خاص این روش می‌تواند بسیار دقیق باشد اما برای جریان های گذرا و ناپایدار مناسب نیست. روش حل عددی مستقیم (DNS) همه مقیاس‌های کوچک و بزرگ از آشفته‌گی را حل می‌کند و می‌توان گفت کامل‌ترین مدل است، ولی چون باید شبکه های زمانی و مکانی آن بی نهایت کوچک باشد در نتیجه حل یک مسئله با تکنولوژی امروزی زمان و هزینه زیادی نیاز دارد. شبیه سازی گردابه‌های بزرگ (LES) یک روش مناسب برای حل اینگونه مسائل جریان است، زیرا تلاش می‌کند که مقیاس‌های بزرگ را به طور مستقیم حل کند (شبیه روش DNS) در حالی که مقیاس های کوچک تر را مدل نماید (شبیه روش RANS) (فرانکا و فرانک [۱]).

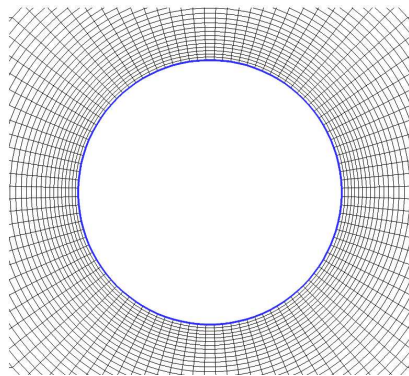
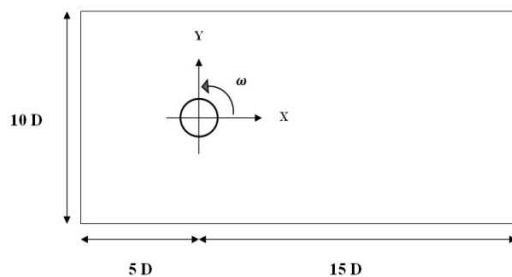
در روابط فوق، n بردار عمود بر سطح استوانه و n_x و n_y مولفه‌های آن می‌باشند. همچنین V_r مولفه سرعت مماس بر سطح استوانه است. عدد استروهال نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$St = \frac{fD}{U_\infty} \quad (5)$$

که در آن f فرکانس تشکیل گردابه است.

۳- شبکه محاسباتی و روش عددی

برای حل این مسئله از یک شبکه محاسباتی نوع C به ابعاد $20D \times 10D \times \pi D$ استفاده شده است. در نزدیکی استوانه مدور، شبکه از نوع O به قطر $2D$ است. استوانه در فاصله $5D$ از قسمت ورودی جریان قرار دارد و فاصله آن از دیواره‌های بالایی و پایینی یکسان می‌باشد. شرط مرزی ورودی به صورت سرعت ثابت و شرط مرزی خروجی توسعه یافته در نظر گرفته شده است. برای دیواره‌های بالایی و پایینی شرط مرزی تقارن و برای دیواره‌های جلویی و عقبی شرط مرزی پرئودیک انتخاب شده است (شکل ۱).



شکل ۱- ناحیه محاسباتی و نمایی از شبکه سازمان یافته

مقدار سرعت ورودی به عنوان شرط مقدار اولیه به کل میدان حل اعمال شده است تا روند همگرایی تسریع شود. میزان فشار اعمالی بر روی شرط مرزی خروجی و شرط اولیه برابر صفر در نظر گرفته شده است. در نزدیکی دیواره استوانه که نیاز به دقت محاسباتی بالاتری می‌باشد، شبکه ریزتری به کار رفته است و هر چه از استوانه به سمت دیواره‌ها پیش می‌رویم شبکه محاسباتی درشت‌تر می‌شود. در این مطالعه از معادلات ناویر-استوکس سه بعدی برای جریان تراکم ناپذیر استفاده شده و جریان به مدت ۶۰ ثانیه حل شده است.

سرعت جریان آزاد) مورد مطالعه قرار داده ولی او در تحقیقش فقط به بررسی جاری شدن گردابه‌ها در پشت استوانه پرداخته. در ناحیه جریان آرام کارهای گوناگونی در این زمینه صورت پذیرفته است. یکی از تحقیقات اولیه بر روی جریان عبوری از استوانه مدور چرخان توسط پرائتل انجام پذیرفت (میتل و کومار [۶]). او با تحقیقات آزمایشگاهی استدلال کرد که ماکزیمم برای ایجاد شده توسط استوانه چرخان در جریان یکنواخت ۱۲.۶ می‌باشد. بادر [۷] جریان ناپایدار عبوری از روی استوانه مدور چرخان را هم به صورت عددی و هم به صورت آزمایشگاهی برای عدد رینولدز ۱۰۰۰ آهنگ چرخش ۰.۵ تا ۳ مورد مطالعه قرار داد. هدف از تحقیق او بررسی تاثیر افزایش سرعت چرخشی بر ساختار جریان بود. استاجکویک و همکاران [۸] تاثیر آهنگ چرخش‌های بالا بر فشارهای متوسط را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین او ناحیه دوم ناپایداری را نیز بدست آورد، چیزی که بعداً میتل و کومار [۶] نیز آن را اثبات نمودند.

دو مقاله ارزشمند در این زمینه و در ناحیه جریان آرام مربوط به میتل و کومار [۶] و پادینو و جوزف [۹] است که هر دو این مقالات فیزیک جریان آرام عبوری از روی استوانه چرخان برای آهنگ‌های چرخش مختلف را تحلیل کرده و ضرایب برآ، پسا و فشار را محاسبه نموده‌اند. برای مقاله اول عدد رینولدز ۲۰۰ و آهنگ چرخش بین ۰ تا ۵ است و برای مقاله دوم عدد رینولدز ۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ و آهنگ چرخش بین ۳ تا ۶ می‌باشد.

هدف از مقاله حاضر، بررسی جریان عبوری از روی استوانه مدور چرخان در اعداد رینولدز ۳۹۰۰، ۵۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ و برای آهنگ چرخش ۰ تا ۲ می‌باشد. همچنین ضرایب برآ و پسا در آهنگ چرخش مختلف محاسبه شده و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی و نتایج سایر روش‌های شبیه‌سازی مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

نقطه شروع برای هر شبیه‌سازی آشفته، معادلات ناویر-استوکس غیر قابل تراکم است و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} = \frac{\partial (v 2S_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن S_{ij} تانسور آهنگ کرنش و τ_{ij} تنش مقیاس زیر شبکه‌ای بوده و ناشی از غیر خطی بودن ترم جابجایی است. ضرایب برآ و پسا را می‌توان با انتگرال گیری بر روی سطح استوانه بدست آورد:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U_\infty^2 D} \quad F_D = \int_s (v \frac{\partial v_L}{\partial n} n_x + P_{n_x}) ds \quad (3)$$

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U_\infty^2 D} \quad F_L = \int_s (v \frac{\partial v_L}{\partial n} n_y + P_{n_y}) ds \quad (4)$$

جدول ۱- آزمایش استقلال شبکه

اندازه شبکه	ضریب درگ
۹۰۹۰۰	۱.۰۳۲
۱۰۸۸۰۰	۱.۰۲۴
۱۳۴۷۰۰	۱.۰۲۲
۱۹۲۰۰۰	۱.۰۲۰

۴- اعتبارسنجی برنامه محاسباتی

هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثرات چرخشی تحت شرایط بدون لغزش روی سطح استوانه مدور در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد. دلیل انتخاب عدد رینولدز ۳۹۰۰ برای اعتبارسنجی برنامه محاسباتی، وجود داده‌های تجربی و عددی است که از محققان دیگر در این عدد رینولدز وجود دارد و امکان مقایسه نتایج بدست آمده و بررسی صحت آنها را فراهم می‌سازد.

در عدد رینولدز ۳۹۰۰ لایه مرزی روی استوانه هنوز آرام می‌باشند، اما جریان سیال آشفته گشته و ناپایدار است. سیال حین عبور از روی استوانه شتاب گرفته و لایه مرزی آرام، جدا می‌شود. پس از مدت زمان کوتاهی این لایه مرزی آشفته می‌شود.

از آنجایی که داده‌های موجود برای استوانه بدون چرخش می‌باشند، ضروری است برای اعتبارسنجی روش عددی ابتدا آن را برای حالت بدون چرخش حل نمود. این کار با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تجربی نوربرگ [۱۰] و لارنکو و شیه [۱۱]، و همچنین نتایج شبیه سازی عددی بریر [۲]، بلک برن و اشمیت [۳]، ترمبلی [۴] و فرلی و رودی [۱۲] انجام می‌شود. در جدول ۱ نتایج مقاله حاضر به همراه سایر نتایج تجربی و عددی ارائه شده است.

برای گسسته سازی مکانی معادلات از روش اختلاف مرکزی با دقت مضاعف استفاده شده و گسسته سازی زمانی، برای همه محاسبات انجام شده نیز کاملاً ضمنی و با دقت مضاعف می‌باشد. پله زمانی برای محاسبات برابر ۰/۰۷ در نظر گرفته شده و در هر پله زمانی، معادله پواسون برای تصحیح فشار بوسیله الگوریتم SIMPLEC حل شده است. برای مدل مقیاس زیر شبکه ای از مدل اسماکورینسکی با ثابت اسماکورینسکی ۰/۱ استفاده شده است.

شبکه محاسباتی بوسیله نرم افزار گمبیت ورژن ۲.۳.۱۶ ایجاد شده است. برای بررسی استقلال شبکه محاسباتی، شبکه‌های مختلف با اندازه‌های ۹۰۹۰۰، ۱۰۸۸۰۰، ۱۳۴۷۰۰ و ۱۹۲۰۰۰ تولید و برای حل جریان عبوری از روی استوانه ساکن در عدد رینولدز ۳۹۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. ضریب درگ برای هر شبکه محاسبه شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیدند (جدول ۱). با توجه به نتایج بدست آمده شبکه محاسباتی با تعداد نقاط ۱۰۸۸۰۰ به عنوان شبکه مناسب انتخاب گردید و برای ادامه کار مورد استفاده قرار گرفت. برای حل جریان از نرم افزار فلوئنت نسخه ۶.۳.۲۶ استفاده گردید. محاسبات برای هر مورد بوسیله لپ تاپ با پردازنده Double core 2.66GHz به طور متوسط حدود ۶ ساعت به طول انجامید.

جدول ۲- مقایسه نتایج تجربی و عددی سایر مقالات با نتایج مقاله حاضر

Method	SGS model	C_d	St
Norberg [۱۰]	EXP	-	0.99
Tremblay (2001)[۴]	DNS	-	1.03
Black burn and Schmidt (2001) [۲]	LES	Smag $C_s = 0.1$	1.07
Frohlich and Rodi (1998) LRUN2[۱۲]	LES	Smag $C_s = 0.1$	1.08
Breure (1998) B5 [۲]	LES	Smag $C_s = 0.1$	1.07
Present work	LES	Smag $C_s = 0.1$	1.02

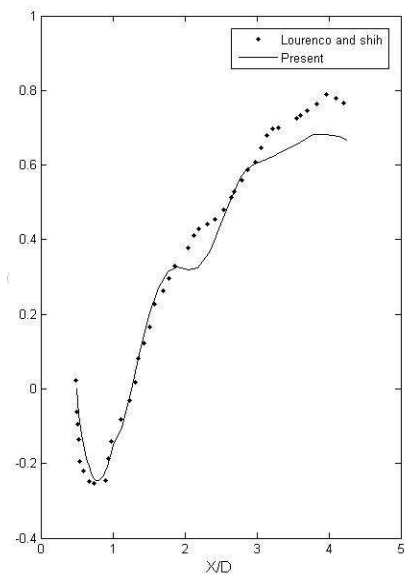
مستقیم (DNS) به ضریب پسای حاصل از نتایج تجربی نزدیک‌تر است که این امر به دلیل دقیق‌تر بودن این روش عددی نسبت به روش‌های عددی دیگر است. سایر شبیه سازی‌های انجام شده به

همان طور که از جدول ۲ مشخص است، بین نتایج مقاله حاضر و نتایج آزمایشگاهی انطباق خوب و قابل قبولی وجود دارد. در بین شبیه سازی‌های انجام شده، ضریب پسای حاصل از شبیه سازی عددی

روش گردابه‌های بزرگ، ضریب پسای بزرگتری را نشان می‌دهند. اگرچه این تفاوت چندان زیاد نیست. ضریب پسای بدست آمده در کار حاضر نسبت به مطالعات قبلی انطباق بسیار بهتری با داده‌های تجربی و حتی با نتایج روش DNS دارد.

مقایسه عدد استروهل با مقادیر تجربی و سایر نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که این مقدار کاملاً منطبق بر داده های تجربی است. بررسی تمامی نتایج فوق نشان می دهد که برای جریان حول یک استوانه ساکن در عدد رینولدز ۳۹۰۰، نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نسبت به سایر شبیه سازی های مقایسه شده از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند.

یکی دیگر از پارامترهایی که می‌تواند برای بررسی بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد، میدان سرعت متوسط زمانی جریان در پشت استوانه است. شکل ۲ پروفیل سرعت متوسط زمانی جریان در پشت استوانه را نسبت به خط مرکزی تا فاصله $x/D=4.2$ نشان می‌دهد. در این شکل نتایج حاصل از مقاله حاضر با نتایج تجربی لارنکو و شیو [۱۱] برای عدد رینولدز ۳۹۰۰ مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در فاصله بین انتهایی استوانه تا $x/D=2$ بین نتایج عددی و تجربی انطباق بسیار خوبی وجود دارد. در فاصله بین $x/D=2$ تا $x/D=3$ نتایج عددی ابتدا کمی از نتایج تجربی فاصله گرفته ولی پس از مسافتی دوباره همگرا شده و به نتایج تجربی نزدیک می‌شود. از $x/D=3$ به بعد نتایج عددی به تدریج از داده‌های تجربی فاصله گرفته و از شدت شیب آن کاسته می‌شود.



شکل ۲- سرعت متوسط زمانی جریان در پشت استوانه در طول خط مرکزی

۵- نتایج و بحث

ماهیت جریان آشفته عبوری از روی استوانه مدور چرخان با جریان عبوری از روی استوانه مدور ساکن متفاوت است. چرخش

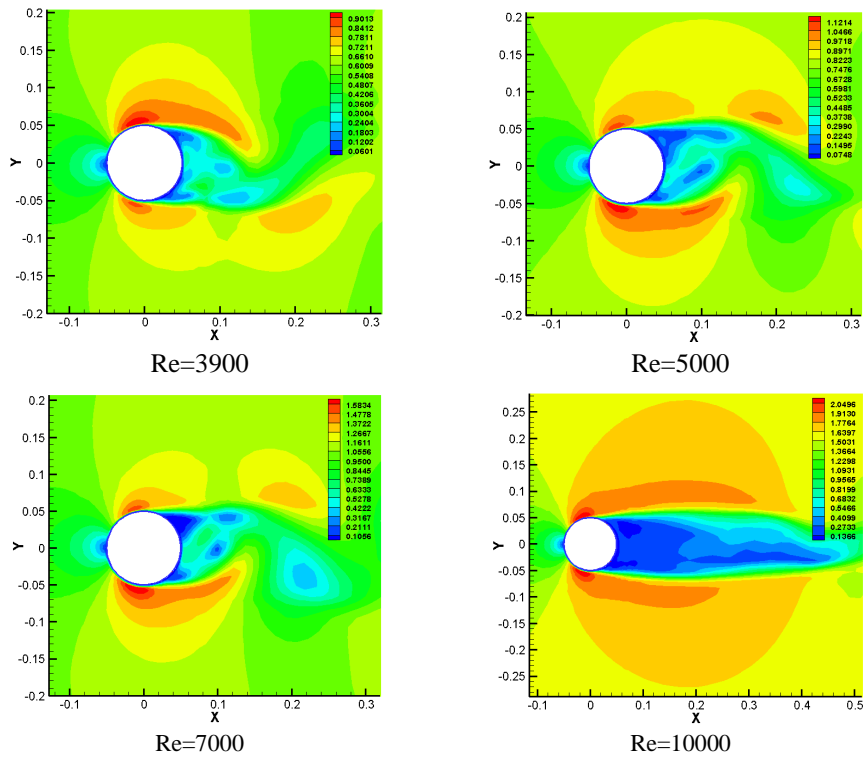
استوانه باعث تغییر سرعت جریان در اطراف استوانه شده و این تغییر سرعت اثراتی را به دنبال خواهد داشت. در مقاله حاضر ۵ آهنگ چرخش با فواصل یکسان بین ۰ تا ۲ برای اعداد رینولدز ۳۹۰۰، ۵۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ بررسی شده است.

در شکل ۳ کانتورهای سرعت اطراف استوانه مدور برای اعداد رینولدز مختلف در آهنگ چرخش صفر نشان داده شده است. در آهنگ چرخش صفر، چون استوانه ساکن است، سرعت جریان عبوری در بالا و پایین استوانه تقریباً یکسان است و نقطه سکون دقیقاً در وسط سطح استوانه قرار گرفته است. در این حالت نقطه جدایش گردابه‌های پشت استوانه بر روی سطح بالایی و پایینی در یک امتداد قرار گرفته‌اند. گردابه‌های فن‌کارمن به صورت متناوب از سطوح بالایی و پایینی جدا شده و نسبت به خط مرکزی متقارن می‌باشند. طول گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه برای اعداد رینولدز ۳۹۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ تقریباً با هم برابرند، ولی برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰، طول گردابه‌های پشت استوانه بسیار بلندتر و کشیده‌تر از سه حالت قبلی است.

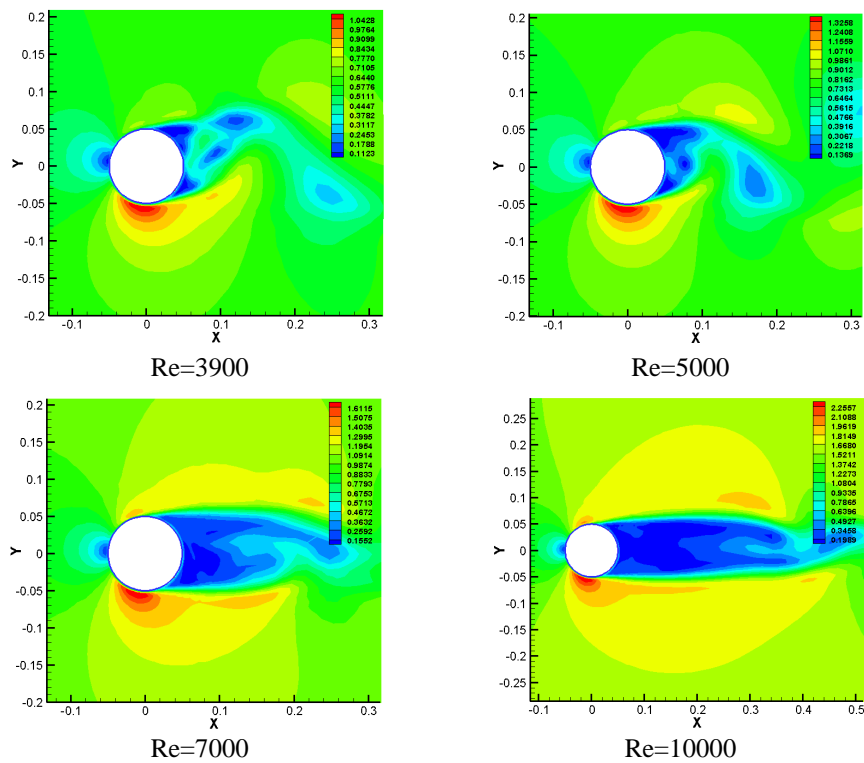
با چرخش استوانه، الگوی جریان کاملاً متفاوت می‌شود. چرخش در خلاف جهت عقربه‌های ساعت باعث اعمال یک جریان مخالف جهت اصلی در سطح بالای استوانه و یک جریان همسو با جریان اصلی در سطح پایینی استوانه می‌شود. در نتیجه در سطح بالایی سرعت کاهش و فشار افزایش می‌یابد و در سطح پایینی سرعت جریان افزایش و فشار کاهش می‌یابد. این اختلاف فشار باعث ایجاد نیروی برای منفی می‌گردد.

چنانکه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای استوانه چرخان، قسمت آبی رنگ جلوی استوانه که معرف نقطه سکون است، دیگر در وسط قرار ندارد و به سمت بالا جابجا شده است. علت این جابجایی ایجاد یک مولفه رو به پایین برای بردار سرعت جریان برخورد کننده با سطح استوانه است که در نتیجه آن بردار عمود بر سطح در قسمت‌های بالاتر قرار می‌گیرد. گردابه‌های پشت استوانه نیز دیگر نسبت به خط مرکزی متقارن نیستند و متمایل به سمت سطح بالای استوانه می‌باشند.

حرکت چرخشی استوانه که باعث کند شدن سرعت جریان در سطح بالای استوانه و افزایش سرعت در سطح پایینی استوانه می‌شود، عامل این جابجایی در محل تشکیل گردابه‌های پشت است. افزایش سرعت در سطح پایینی استوانه باعث افزایش آشفتگی جریان می‌شود. در نتیجه عمل جدایش جریان از روی سطح به تعویق افتاده و در نقطه بالاتری رخ می‌دهد. تغییر موقعیت نقطه سکون در جلوی استوانه و نقاط جدایش در دو طرف استوانه با به چرخش در آمدن استوانه در تمامی اعداد رینولدز مشاهده می‌شود ولی همان گونه از شکل مشهود است، با افزایش عدد رینولدز مقدار جابجایی این نقاط کمتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، طول گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش سرعت جریان و کشیده شدن گردابه های پشت استوانه است.



شکل ۳- کانتورهای سرعت اطراف استوانه مدور برای آهنگ چرخش صفر



شکل ۴- کانتورهای سرعت اطراف استوانه مدور برای آهنگ چرخش $1/5$

نمایانگر نقطه سکون و گردابه‌های پشت استوانه است، به سمت بالا حرکت می‌کند. بطور کلی هر چه آهنگ چرخش بیشتر می‌شود، جابجایی نقطه سکون و گردابه‌های پشت نیز افزایش می‌یابد. همچنین

در شکل های ۵، ۶ و ۷ کانتورهای سرعت اطراف استوانه مدور برای آهنگ‌های چرخش ۱، $1/5$ و ۲ رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش، ناحیه آبی رنگ که

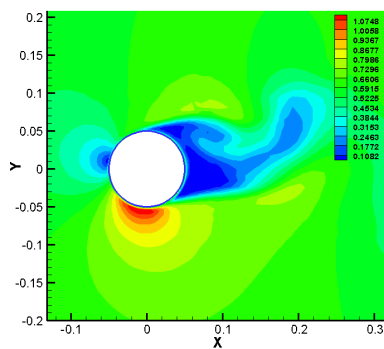
می‌دهند ولی هر چه به سمت عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ می‌رویم فاصله این دو نقطه از هم بیشتر می‌شود. علاوه بر این مشاهده می‌شود که هم با افزایش عدد رینولدز و هم با افزایش آهنگ چرخش استوانه، طول گردابه‌های پشت استوانه افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات ضرایب برآ و پسا برای اعداد رینولدز مورد بحث، بر حسب آهنگ چرخش‌های مختلف رسم گردیده و با نتایج تحقیقات کانگ و همکارانش [۱۳] برای اعداد رینولدز ۴۰ و ۱۶۰ و میتل و کومار [۶] برای عدد رینولدز ۲۰۰ مقایسه شده است. اگرچه تحقیقات مقایسه شده در اینجا همگی در ناحیه آرام می‌باشد، ولی مقایسه نتایج آنها با نتایج مقاله حاضر که در ناحیه آشفتگی است می‌تواند جالب توجه باشد.

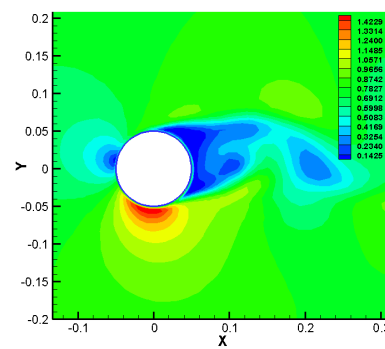
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش آهنگ چرخش، ضریب پسا کاهش می‌یابد. دلیل کاهش ضریب پسا آن است که با افزایش آهنگ چرخش، نقطه سکون در جلوی استوانه در جهت خلاف چرخش استوانه جابجا می‌شود. در نتیجه فشار سکون که همان فشار پیشینه است نیز جابجا شده و دارای یک مولفه عمودی می‌شود.

ناحیه کم فشار روی سطح پایینی استوانه و ناحیه پر فشار روی سطح بالایی آن با افزایش آهنگ چرخش بیشتر شده و در نتیجه نیروی برآ افزایش می‌یابد. نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد، تغییر طول گردابه‌ها با افزایش آهنگ چرخش می‌باشد. با افزایش آهنگ چرخش استوانه و نیز با افزایش عدد رینولدز، طول گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه افزایش می‌یابد. این مطلب به خوبی برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ مشهود است.

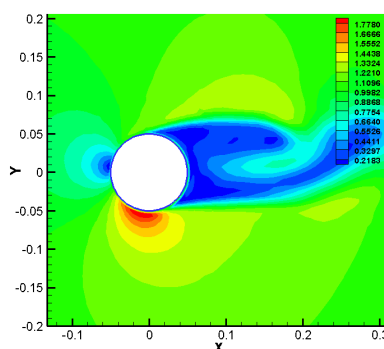
با مقایسه کانتورهای سرعت اطراف استوانه در اعداد رینولدز مختلف و آهنگ‌های چرخش متفاوت مشاهده می‌شود که برای تمام اعداد رینولدز مطالعه شده، با افزایش آهنگ چرخش استوانه نقطه سکون در جلوی استوانه و نقاط جدایش در سطوح بالا و پایین آن به سمت بالای استوانه متمایل می‌شود به طوری که هر چه سرعت چرخش استوانه افزایش می‌یابد موقعیت نقطه سکون و نقطه جدایش در سطح فوقانی استوانه به هم نزدیک‌تر می‌شود. همچنین مشاهده گردید که با افزایش عدد رینولدز، مقدار جابجایی این نقاط به سمت سطح بالای استوانه کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در آهنگ چرخش ۲ و در عدد رینولدز ۳۹۰۰ موقعیت وقوع این دو نقطه بسیار به هم نزدیک می‌باشد به طوری که ناحیه مشترکی را تشکیل



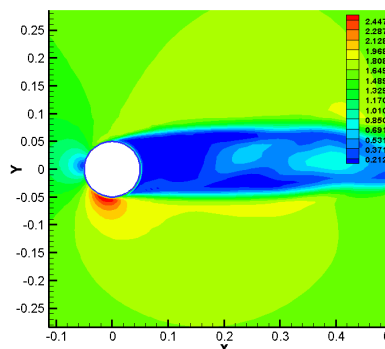
Re=3900



Re=5000

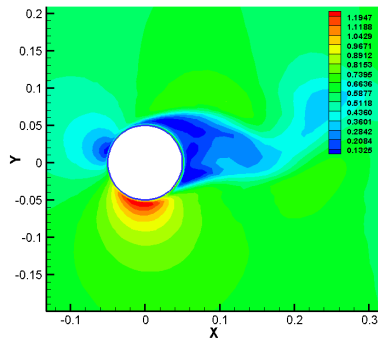


Re=7000

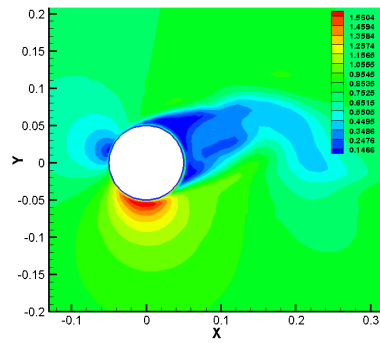


Re=10000

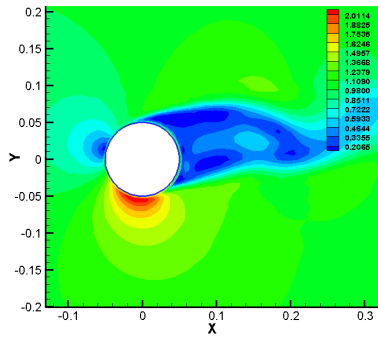
شکل ۵- کانتورهای سرعت اطراف استوانه مدور برای آهنگ چرخش ۱



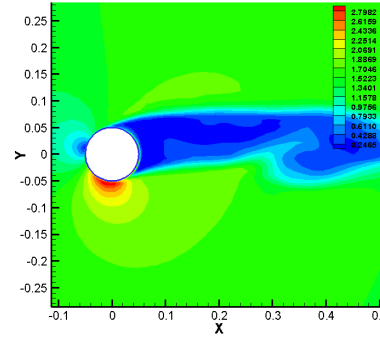
Re=3900



Re=5000

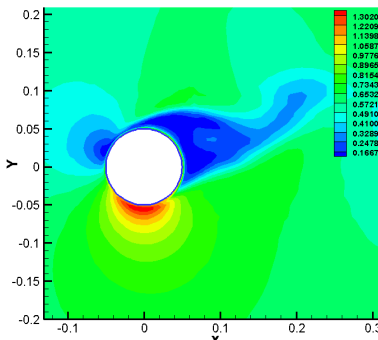


Re=7000

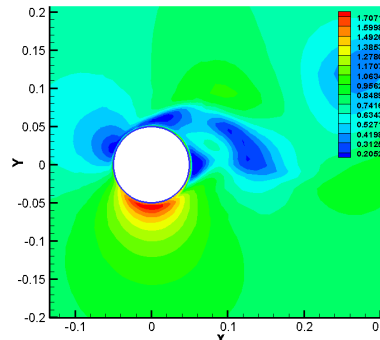


Re=10000

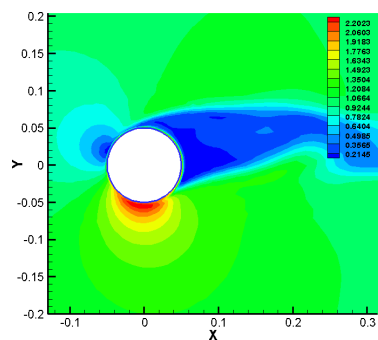
شکل ۶- کانتورهای سرعت اطراف استوانه مدور برای آهنگ چرخش ۱/۵



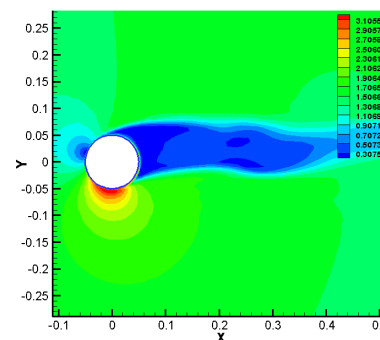
Re=3900



Re=5000



Re=7000



Re=10000

شکل ۷- کانتورهای سرعت اطراف استوانه مدور برای آهنگ چرخش ۲

تفاوت در ماهیت جریان دانست که در اینجا آشفته و در سایر مقالات آرام است و نمی توان بر روی دقت محاسبات قضاوت نمود.

۶- نتیجه گیری

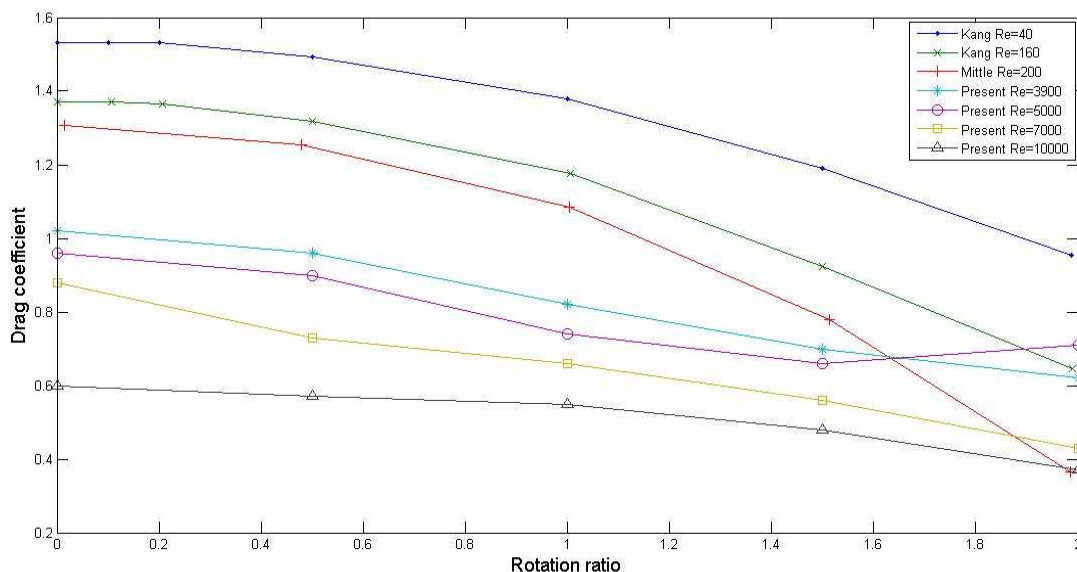
جریان عبوری از روی یک استوانه مدور، که در خلاف جهت عقربه های ساعت می چرخد و در یک جریان آشفته قرار دارد، برای آهنگ چرخش بین ۰ تا ۲ و اعداد رینولدز مختلف توسط روش LES با مدل اسماگورینسکی شبیه سازی شد. نتایج محاسبات حاکی از آن است که با افزایش آهنگ چرخش، نقطه سکون در جلوی استوانه، در خلاف جهت چرخش استوانه و گردابه های پشت استوانه در جهت چرخش استوانه، به سمت سطح بالایی استوانه جابجا می شوند. این تغییرات باعث افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا می شوند. همچنین با افزایش آهنگ چرخش و افزایش عدد رینولدز، طول گردابه های تشکیل شده در پشت استوانه افزایش می یابد. مقایسه نتایج محاسبات فعلی برای استوانه چرخان با نتایج مربوط به جریان آرام نشان داد که تا آهنگ چرخش ۱ انطباق خوبی بین نتایج حاضر و نتایج مقالات مقایسه شده وجود دارد. ولی از آهنگ چرخش ۱ به بعد این انطباق کاهش می یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا و قدر مطلق ضریب برآ کاهش می یابد و این کاهش در تمام آهنگ چرخش استوانه رخ می دهد.

پس مولفه افقی آن که در امتداد نیروی پسا است کوچک شده و در واقع مقدار پسای فشاری که بیشترین سهم را در ضریب پسا ایفا می کند، کاهش می یابد.

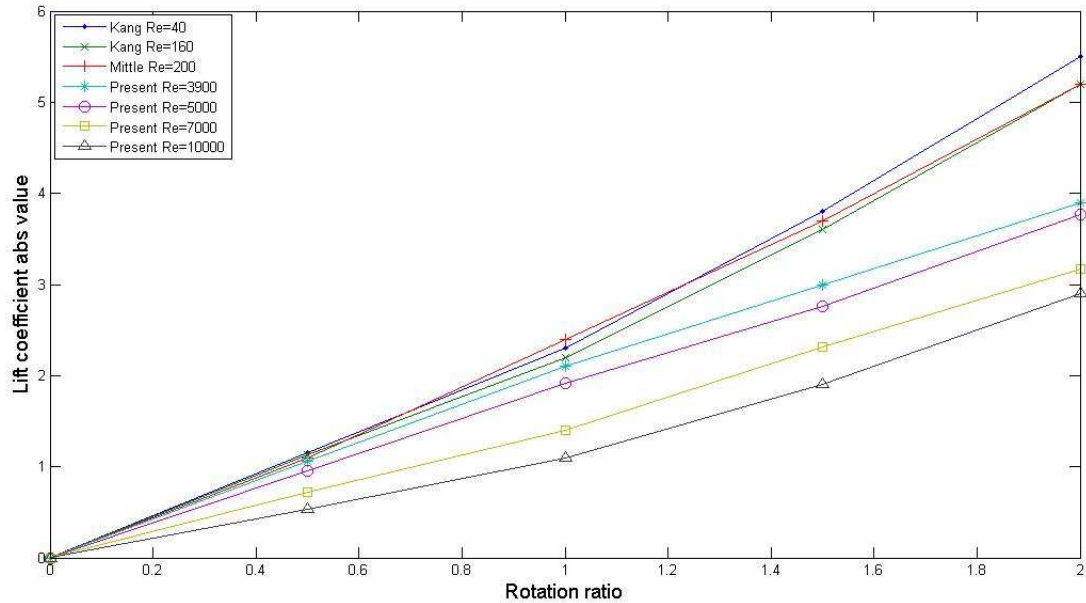
با افزایش عدد رینولدز، که در اینجا همان افزایش سرعت است، نیروی پسا افزایش می یابد. ولی ضریب پسا به علت تناسب با عکس مجذور سرعت کاهش می یابد. در شکل ۸ برای آهنگ چرخش بین ۰ تا ۱ روند کاهش ضریب پسا با عدد رینولدز برای تمامی نتایج تقریباً یکسان است. اما از آهنگ چرخش ۱ به بعد، نتایج کار فعلی روند متفاوتی را طی می کند و ضریب پسا در اعداد رینولدز مطالعه شده کاهش مورد انتظار را ندارد.

با توجه به نمودار ضریب برآ در شکل ۹، در آهنگ چرخش های کوچکتر از ۱، روند افزایش قدر مطلق ضریب برآ تقریباً برای تمام اعداد رینولدز یکسان است. ولی در آهنگ چرخش های بزرگتر نتایج کار فعلی فاصله زیادی با نتایج جریان آرام پیدا می کند. همچنین مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز قدر مطلق ضریب برآ حول استوانه کاهش می یابد.

بنابراین همان طور که مشاهده شد، هم برای ضریب برآ و هم برای ضریب پسا از آهنگ چرخش ۱ به بعد، بین نتایج مقاله پیش رو و نتایج سایر مقالات بررسی شده اختلاف وجود دارد. شاید بتوان دلیل آن را



شکل ۸- تغییرات ضرایب پسا نسبت به آهنگ چرخش استوانه در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۹- تغییرات ضرایب برآ نسبت به آهنگ چرخش استوانه در اعداد رینولدز مختلف

۷- مراجع

- [1] Breuer M.. Large eddy simulation of the sub-critical flow past a circular cylinder: numerical and modeling aspects, *Int. J. Numerical Methods Fluids* 28, 1281–1302, 1998.
- [2] Blackburn H. M., Schmidt S. Large Eddy Simulation of Flow Past a Circular Cylinder, 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia, 2001.
- [3] Franke J., Frank W. Large eddy simulation of the flow past a circular cylinder at $Re_D=3900$, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, PP. 1191-1206, 2002.
- [4] Tremblay F., Manhart F., Friedrich M. DNS of flow around a circular cylinder at a subcritical Reynolds number with cartesian grids, In: *Proceedings of the Eighth European Turbulence Conference, Barcelona, Spain, EUROMECH, CIMNE*, 27–30, pp. 659–662, 2000.
- [5] Lam K.M. Vortex shedding flow behind a slowly rotating circular cylinder, *J. Fluids and Structures* 25 (2009) 245–262, 2007.
- [6] Mittal S., Kumar B. Flow past a rotating cylinder, *J. Fluid Mech.* 476, 303–334, 2003.
- [7] Badr H. M., Coutanceau M., Dennis S. C. R. & Menard C. Unsteady flow past a rotating cylinder at Reynolds numbers 10^3 and 10^4 , *J. Fluid Mech.* 220, 459-484, 1990.
- [8] Stojkovic D., Schon P., Breuer M., Durst F. On the new vortex shedding mode past a rotating circular cylinder, *Physics of Fluids*, 15(5), pp. 1257–1260, 2003.
- [9] Padrino J.C., Joseph D.D. Numerical study of the steady-state uniform flow past a rotating cylinder, *J. Fluid Mech.* 557, 191–223, 2006.
- [10] Norberg C. An Experimental Investigation of the Flow Around a Circular Cylinder: Influence of Aspect Ratio, *J. Fluid Mech.*, 258, 287-316, 1994.
- [11] Lourenco L. M. and Shih C. Characteristics of the Plane Turbulent near Wake of a Circular Cylinder; a Particle Image Velocimetry Study, (data taken from Beaudan & Moin 1994).
- [12] Frohlich, J., Rodi, W., Kessler, Ph., Parpais S., Bertoglio J.P., Laurence D. Large eddy simulation of flow around circular cylinders on structured and unstructured grids, In: E.H. Hirschel (Ed.), *Numerical flow simulation: CNRS DFG collaborative research programme*, Vol. 66, Vieweg, Braunschweig, 319–338, 1998.
- [13] Kang S., Choi H., Lee S. Laminar flow past a rotating circular cylinder, *Physics of Fluids* 11, 3312–3321, 1999.