شبیه‌سازی جریان ناپایا اطراف یک استوانه دایره‌ای چرخان در عدد رینولدز ۵۹۰۰

محمد جواد ایزدی یزدی [۱*] و عبدالامیر بک خوشنویس [۲]

[۱] مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا، تهران، ایران
[۲] دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

دریافت: پائیز ۹۶ پذیرش: زمستان ۹۶

چکیده

در این مقاله، جریان ناپایای عبوری از روی یک استوانه دایره‌ای چرخان با استفاده از مدل k-ω SST مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت چرخش استوانه از ۰ تا ۰/۴۲ تغییر می‌کند. تغییرات ضرایب برآ و پسای متوسط و ساختار گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه مطالعه شده است. مشخص شد که افزایش نسبت چرخش منجر به کاهش طول لایه برشی سطح بالایی استوانه و باعث افزایش در سطح پایینی استوانه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت چرخش استوانه، ضریب پسای متوسط کاهش و قدر مطلق ضریب برآی متوسط افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت چرخش، موقعیت نقطه سکون و جدایش جریان تغییر می‌یابند. نتایج به دست آمده با نتایج سایر شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده و همچنین نتایج تجربی مقایسه شده است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** javadezadi2014@gmail.com

کلمات کلیدی: استوانه چرخان، ضریب برآ، ضریب پسا، شبیه‌سازی عددی.

۱- مقدمه

بررسی‌های جریان تراکم ناپذیر اطراف یک استوانه دایره‌ای چرخان توسط محققان بسیاری با استفاده از روش‌های تئوری، تجربی و عددی انجام شده است. جریان حول استوانه چرخان از اهمیت زیادی در آیرودینامیک و در طراحی سازه‌های مهندسی برخوردار می‌باشد. همچنین استوانه‌های چرخان، ابزار خوبی برای کنترل جریان‌های لایه‌مرزی به حساب می‌آیند. مقالات پژوهشی زیادی وجود دارند که به کاربردهای استوانه‌های چرخان یا به کاربرد روش‌های کنترلی دیگر از قبیل، دمش، مکش، زبری سطح و ... اشاره کرده‌اند. در ارتباط با کاربردهای ذکر شده می‌توان به مقالات بیرمن[۱] [۱]، رادی[۲] و همکاران [۲]، هاک[۳] و بوشنل[۴] [۳]، مارتین[۵] و همکاران [۴]، گریفین[۶] و هال[۷] [۵]، رائو[۸] و همکاران [۶] و ناوارُس[۹] و همکاران [۷] اشاره کرد.

بسیاری از مقالات به بررسی پدیده پایداری و انتقال استوانه‌های دایره‌ای چرخان تمرکز کرده‌اند. اولین تلاش‌های تحقیقاتی عمدتاً به بررسی اثر شناخته شدهٔ مگنوس[۱۰] پرداخته شد. بسیاری از موارد بررسی شده نشان از یک میدان جریان تناوبی همراه با فعالیت ریزش گردابه‌ها بود. با این حال بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که ناپایداری جریان، شدیداً وابسته به یک مقدار بحرانی از نسبت بدون بعد $\alpha = U_\theta/U_\infty$ می‌باشد که تقریباً مستقل از عدد رینولدز است که در آن U_θ سرعت محیطی استوانه و U_∞ سرعت جریان آزاد است. یک مطالعه تجربی اولیه بر روی استوانه دایره‌ای چرخان توسط پرانتل[۱۱] [۸] انجام شد. با توجه به نتایج و عکس‌برداری‌های انجام شده از کار خود، برای سرعت‌های دورانی پایین، جدایش جریان در پایین‌دست استوانه مشاهده شد. پرانتل به این نتیجه رسید که ماکزیمم نیروی برآی تولید شده توسط یک استوانه چرخانی که در معرض یک جریان یکنواخت قرار دارد، نمی‌تواند از مقدار 4π بیشتر شود. با این حال نتایج گزارش شده از توکومارو[۱۲] و دیموتاکیس[۱۳] [۹]، در بین دیگر نتایج، در تناقض با عبارت بیان شده در بالا بود. محاسبات آن‌ها نشان داد که بیشینه نیروی برآ می‌تواند از حد 4π تجاوز کند. نتایج

[1] Bearman
[2] Radi
[3] Hak
[4] Bushnell
[5] Martín
[6] Griffin
[7] Hall
[8] Rao
[9] Navrose

[10] Magnus
[11] Prandtl
[12] Tokumaru
[13] Dimotakis

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]

محاسباتی آن‌ها در $Re = ۳/۸\times۱۰^{۳}$ و $\alpha=۰$ نشان داد که ضریب برآ ۲۰ درصد از مقدار ۴π بزرگ‌تر است.

جریان‌های اطراف استوانه چرخان در اعداد رینولدز پایین موضوع بسیاری از مطالعات بوده است. یک مطالعه عددی در ارتباط با این موضوع توسط اینگهام[1] و تانگ[2] [۱۰] انجام شد. در این مقاله معادلات ناویر-استوکس با استفاده از روش تفاضل محدود، به‌منظور بررسی جریان نامتقارن در یک سیالِ لزج یکنواخت، در اعداد رینولدز ۵ و ۲۰ و نسبت چرخش بدون بعد α از ۰ تا ۰/۵ حل شدند. علاوه بر این، جریان پایا و ناپایا در اعداد رینولدز پایین به‌صورت عددی توسط بَدِر[3] [۱۱] بررسی شدند. او یک روش عددی جدید همراه با جواب‌های بسط سری‌ها، به‌منظور جلوگیری از مشکلات در ارضای شرایط مرزی در نواحی دور از استوانه، معرفی کرد. بررسی‌های عددی در اعداد رینولدز ۵، ۲۰ و $\alpha \leq ۳$ ≤ ۰ انجام شد.

همچنین اینگهام و تانگ [۱۰]، شبیه‌سازی‌های عددی برای جریان پایا و دوبعدی، به‌منظور گسترش تحقیقات قبلی برای اعداد رینولدز ۶۰ و ۱۰۰ و $\alpha \leq ۱ \leq ۰$ انجام دادند. یکی دیگر از کارهای عددی در عدد رینولدز ۲۰۰ توسط چن[4] و همکاران [۱۲] انجام شد. از یک روش شبه طیفی صریح برای حل معادلات حاکم استفاده کردند. بر طبق نتایج آن‌ها، زمانی که α=۳/۲۵ بود، بیش از یک گردابه در پایین‌دست جریان جدا شد.

همچنین کانگ[5] [۱۳]، کمک قابل توجهی به این زمینهٔ تحقیقاتی کرده است. شبیه‌سازی‌های عددی متوالی در اعداد رینولدز ۴۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ و در محدوده نسبت چرخش بدون بعد $\alpha \leq ۲/۵ \leq ۰$ انجام داد. مشاهده شده که در $۶۰ \leq Re \leq ۱۶۰$ و بیشینه نسبت چرخش، ناپایداری جریان به‌صورت لگاریتمی برحسب عدد رینولدز تغییر می‌کند.

میتال[6] و کومار[7] [۱۴]، با پیروی از کار چن و پاتل[8] [۱۵]، شبیه‌سازی‌های عددی را برای $\alpha \leq ۵ \leq ۰$ و $Re = ۲۰۰$ انجام دادند. معادلات ناویر-استوکس تراکم ناپذیر، با استفاده از روش المان محدود حل شدند. همچنین تحلیل پایداری جریان با استفاده از یک روش جدید که منجر به نتایج تئوری بسیاری مهمی شد، انجام شد. جواب‌های منحصر به فرد، مربوط به طیف نسبت چرخش ذکر شده به دست آمد. با این حال، مهم‌ترین نتیجه کار آن‌ها، شناسایی یک محدوده جدیدی از α بود که در آن جریان به حالت ناپایدار باز می‌گشت. زمانی که $\alpha < ۱/۹۱$ بود، جریان وابسته به زمان (ناپایا) باقی ماند، سپس در سرعت‌های دورانی بالاتر جریان پایا شد، اما در $۴/۳۴ < \alpha < ۴/۷۰$ جریان دوباره ناپایا شد.

مطالعات دیگری نیز وجود دارند که در آن جنبه‌های مختلفی از جریان آرام اطراف یک استوانه چرخان بررسی شده است. کانگ [۱۳] به بررسی جریان آرام دوبعدی گذرنده از یک استوانه چرخان در معرض جریان برشی یکنواخت پرداخت. شبیه‌سازی‌های عددی در $Re = ۲۰۰$ و نسبت چرخش‌های بدون بعد α تا ۵/۵ انجام شد.

جریان اطراف استوانه در اعداد رینولدز متوسط ($Re > ۱۰۰۰$) برای حل بسیار مشکل‌تر می‌باشند، زیرا اثرات سه‌بعدی و آشفتگی غالب می‌شوند. بَدِر و همکاران [۱۶]، تأثیر حرکت چرخشی استوانه را در یک جریان ناپایا بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی و عددی برای $۱۰^{۳} \leq Re \leq ۱۰^{۴}$ و $۰/۵ \leq \alpha \leq ۳$ انجام شد. آن‌ها نشان دادند که نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق قابل قبولی دارند به غیر از $\alpha = ۳$ که در آن اختلافاتی مشاهده شد. یکی دیگر از کارهای عددی در $Re = ۱۰۰۰$ توسط چو[9] و همکاران [۱۷] با استفاده از روش گردابه ترکیبی[10] انجام شد. نسبت‌های چرخش بدون بعد α بین ۰ تا ۶ بررسی شدند. آن‌ها همانند سایر محققین به این نتیجه رسیدند که زمانی که نسبت چرخش به مقدار بحرانی خود یعنی ۲ نزدیک می‌شود، فرآیند ریزش گردابه متوقف می‌شود.

ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۱۸, ۱۹] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نسبت چرخش و عدد رینولدز بر روی ویژگی‌های دنباله جریان اطراف یک استوانه دایره‌ای چرخان پرداختند. در کار آن‌ها عدد رینولدز در محدودهٔ $۵۹۰۰ \leq Re \leq ۱۸۷۵۰$ و نسبت چرخش $۰/۵۲۵ \leq \alpha \leq ۰$ بود. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت چرخش، ضریب پسا کاهش می‌یابد، در حالی که فرکانس ریزش گردابه‌ها افزایش یافت. همچنین بک خوشنویس و همکاران [۲۰] به مطالعه ممان‌های مرتبه بالای سرعت در دنباله تخت پشت یک استوانه دایره‌ای پرداختند. آن‌ها روابط جدیدی برای ممان‌های مرتبه بالای سرعت نظیر چولگی و تختی ارائه دادند که نسبت به روابط تئوری موجود در مقالات سایر محققین دارای دقت بیشتری بود.آلجور[11] و همکاران [۲۱] با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم به بررسی تأثیر نسبت چرخش بر روی ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه پرداختند. آن‌ها نتایج خود را در عدد رینولدز ۵۰۰۰ و نسبت چرخش $۵ \leq \alpha \leq ۰$ ارائه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای سرعت‌های دورانی بالا، منطقه چرخشی تشکیل شده پشت استوانه ناپدید می‌شود.

سجودی و همکاران [۲۲] به بررسی جریان یک سیال غیر نیوتنی در رژیم آرام حول یک استوانه دایره‌ای چرخان پرداختند. شبیه‌سازی جریان سیال غیر نیوتنی با استفاده از مدل توانی انجام شد. آن‌ها به بررسی تغییرات پارامترهایی از قبیل رفتار جریان سیال غیر نیوتنی، سرعت چرخش استوانه و عدد رینولدز ورودی پرداختند. مشخص شد که پارامترهای مذکور وابستگی شدیدی به انتقال گرما و هیدرودینامیک جریان سیال دارند.

[1] Ingham
[2] Tang
[3] Badr
[4] Chen
[5] Kang
[6] Mittal
[7] Kumar
[8] Patel
[9] Chew
[10] Hybrid Vortex Method
[11] Aljure

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]

اسمیزن[1] و همکاران [۲۳]، به بررسی تجربی و تئوری اثر چرخش استوانه بر روی نیروهای برآ و پسا پرداختند. در کار آن‌ها اعداد رینولدز ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ و نسبت چرخش‌های بدون بعد $0 \le \alpha \le 6$ بود. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب پسا تا $\alpha = 4$ کاهش می‌یابد؛ اما به ازای $\alpha > 4$، ضریب پسا افزایش یافت. همچنین ضریب برآ با افزایش α، افزایش یافت.

اخیراً مبینی و نیازی [۲۴, ۲۵] به بررسی جریان ناپایا اطراف یک استوانه دایره‌ای چرخان با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در اعداد رینولدز و نسبت چرخش‌های مختلف پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش عدد رینولدز و نرخ چرخش منجر به افزایش طول گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه می‌گردد.

بسیاری از کارهای آزمایشگاهی که تاکنون انجام شده به مشاهده ویژگی‌های جریان در اعداد رینولدز و نسبت چرخش‌های مختلف متمرکز شده است. از سوی دیگر، تحقیقات عددی عمدتاً در رژیم آرام انجام شده است. تحقیقات عددی کمی در رژیم آشفته بررسی شده است. همچنین مطالعات کمی به بررسی ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه دایره‌ای چرخان در اعداد رینولدز متوسط پرداخته‌اند. از این رو، هدف از کار حاضر بررسی عددی تأثیر چرخش استوانه بر روی ویژگی‌های جریان، فرآیند ریزش گردابه و نیروهای اعمالی به استوانه در عدد رینولدز ۵۹۰۰ و نسبت چرخش $0 \le \alpha \le 0/42$ می‌باشد. در تحقیق حاضر نتایج جدیدی در ارتباط با تأثیر چرخش استوانه بر روی پروفیل‌های سرعت متوسط و ارتباط آن با الگوهای جریان بیان شده است. همچنین در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر نسبت چرخش بر روی مؤلفهٔ نوسانی سرعت و طول لایه‌های برشی تشکیل شده بر روی سطوح بالایی و پایینی استوانه پرداخته شده است. تغییرات در توپولوژی جریان هنگامی‌که نسبت چرخش افزایش می‌یابد، با استفاده از تجزیه و تحلیل ساختارهای منسجم لحظه‌ای مطالعه شده است.

۲- بیان مسئله و توصیف روش شبیه‌سازی

۲-۱- معادلات حاکم و روش حل

همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، در این مطالعه به بررسی ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه چرخان در عدد رینولدز ۵۹۰۰ پرداخته شده است. شبیه‌سازی جریان به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس فلوئنت انجام شده است. جریان اطراف استوانه چرخان، دوبعدی، آشفته، غیر دائم و تراکم ناپذیر فرض شده است. جریان آشفته هوا، با معادلات ناویر-استوکس متوسط رینولدز[2] توصیف می‌شود که معادلات آن در روابط ۱ تا ۳ ارائه شده است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \qquad (۲)$$

$$-\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \qquad (۳)$$

جریان آشفته با مدل K-ω SST[3] مدل‌سازی شده است که معادلات اصلی آن در روابط ۴ و ۵ ارائه و جزئیات کامل در مرجع [۲۶] موجود است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - Y_k \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_\omega\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \qquad (۵)$$

k، انرژی جنبشی آشفتگی و ω، نرخ اضمحلال[4] ویژه انرژی آشفتگی است. در رابطه ۵، G_ω تولید انرژی جنبشی آشفته، Y_ω اضمحلال ناشی از آشفتگی، σ_ω عدد پرانتل آشفتگی و D_ω دیفیوژن عرضی مربوط به ω است. این مدل، یک مدل ترکیبی است که در ناحیهٔ کاملاً آشفته از مدل K-ω ویلکاکس[5] به مدل K-ε سوئیچ می‌کند تا از حساسیت به اغتشاشات جریان کاسته شود. این مدل با کم‌ترین هزینه محاسباتی برای جریان‌های با گرادیان فشار بزرگ و جدایش لایه‌مرزی مناسب‌تر است. هم‌چنین این مدل در پیش‌بینی قدرت و موقعیت گردابه‌ها مناسب‌تر است [۲۷]. معادلات حاکم بر جریان با استفاده از روش حجم محدود در نرم‌افزار فلوئنت[6] حل شده‌اند. روش گسسته‌سازی مرتبه دوم بالادست[7] برای معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال ویژه آشفتگی بکار برده شده است. الگوریتم سیمپل[8] جهت کوپل کردن سرعت و فشار استفاده شده است. حل گر فشار مبنا با دقت مضاعف به‌عنوان الگوریتم حل استفاده شده است. همگرایی حل هنگامی است که ضرایب برآ و پسا ثابت شوند.

برای تولید شبکه محاسباتی از نرم‌افزار ANSYS ICEM-CFD استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت‌های بسیار ویژه‌ای در تولید شبکه‌های محاسباتی، به‌خصوص شبکه‌های سازمان‌یافته[9] را دارا می‌باشد. این نوع از شبکه علاوه بر دقیق بودن در حل با استفاده از رویکرد حجم کنترل، دارای کیفیت بسیار بالا و همچنین تعداد المان‌های بسیار کمتر در مقایسه با شبکه سازمان نیافته[10] می‌باشد.

[1] Smaisim
[2] Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS)

[3] Shear stress transport
[4] Dissipation
[5] Wilcox
[6] Fluent
[7] Upwind
[8] Semi implicit method for pressure linked equations (SIMPLE)
[9] Structured
[10] Unstructured

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]

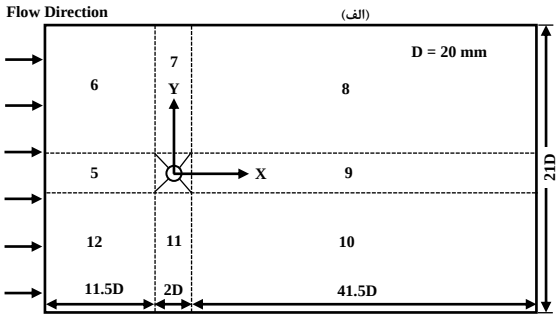
۲-۲- دامنهٔ محاسباتی و شرایط مرزی

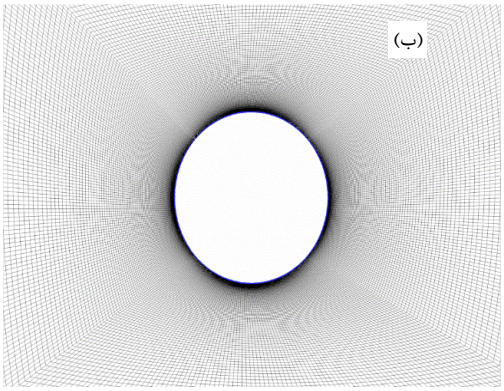
در شکل (۱) دامنه محاسباتی و جزئیات شرایط مرزی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌کنید قطر استوانه ۲۰ میلی‌متر است. فاصله از ورودی جریان به مرکز استوانه ۱۲٫۵D است. مقیاس دامنه محاسباتی به ترتیب در جهات X و Y، ۵۵D و ۲۰D است. به‌منظور اطمینان از جریان کاملاً توسعه‌یافته، به‌اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شد. استوانه خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. دامنه محاسباتی به ۱۲ قسمت تقسیم شده است. شبکه‌های ریز در نواحی ۱ تا ۴ نزدیک به استوانه استفاده شده است (شکل ۱ (ب)). به‌منظور جلوگیری از هر نوع توابع دیواره، شبکه‌های لایه‌مرزی در نزدیکی منطقه دیواره به‌شدت ریز است. طول شبکه با یک نسبت مشترک در جهت شعاعی برای بخش‌های ۵ تا ۱۲ افزایش می‌یابد که نسبت به بخش‌های ۱ تا ۴ نسبتاً درشت‌تر است. هدف از این کار (تقسیم‌بندی دامنه محاسباتی)، کاهش هزینه محاسباتی به‌وسیله‌ی شبکه‌های درشت‌تر در مناطق دور از جریان و اطمینان از دقت شبیه‌سازی با پالایش شبکه‌ها در منطقه نزدیک به دیواره است. تمامی سلول‌ها، سلول‌های ساختاریافته مربعی می‌باشند. تعداد کل سلول‌ها ۷۸۷۹۸ می‌باشد که از این تعداد سلول برای حل جریان استفاده شده است. شرایط مرزی با توجه به شرایط آزمایشگاهی مرجع [۱۸] تعیین شده‌اند.

شرط مرزی ورودی سرعت یکنواخت در نظر گرفته شده است. در خروجی شرط مرزی کاملاً توسعه‌یافته در نظر گرفته شده است. برای دیواره‌های بالا و پایین، شرط مرزی متقارن انتخاب شده است. در تمام میدان جریان، سرعت ورودی به‌عنوان سرعت اولیه در نظر گرفته شده است. فشار نسبی خروجی که برابر با صفر است به‌عنوان فشار اولیه در سرتاسر میدان محاسباتی در نظر گرفته شد. برای صحت سنجی مدل توربولانسی استفاده شده، باید از مقادیر y^+ بر روی دیواره استفاده کرد. از آنجایی که این مدل، از نوع رینولدز پایین[1] بوده و فاقد تابع دیواره می‌باشد، لذا باید شبکه اولیه در اطراف دیواره به حد کافی ریز باشد تا مقادیر y^+ به کمتر از یک برسند. همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌کنید، مقدار y^+ کمتر از یک می‌باشد. به‌منظور بررسی استقلال از شبکه، شبکه با اندازه‌های مختلفی در نظر گرفته شده است. پارامترهای اصلی شبکه‌های مذکور در جدول (۱) آورده شده است. مقادیر ضریب پسا برای حالت بدون چرخش، برای هر یک از شبکه‌ها محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند (جدول ۱).

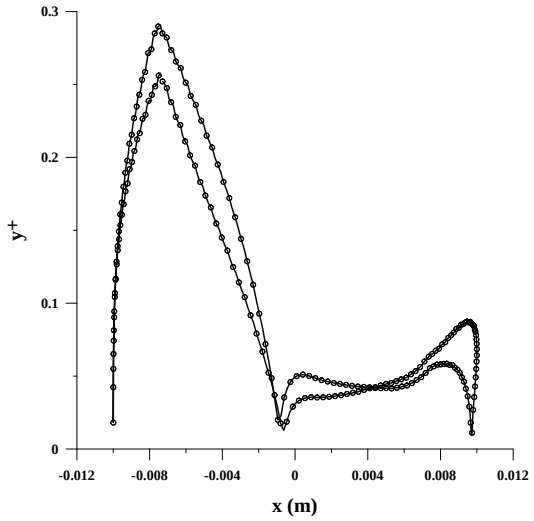
جدول ۱: پارامترهای اصلی شبکه‌های انتخاب شده

تعداد سلول‌ها	اندازهٔ سلول‌ها در نزدیکی دیواره‌ها (mm)	ضریب رشد در نزدیکی دیواره‌ها	ضریب پسا (C_D)
۴۵۹۳	۱	۱/۱	۱/۰۲۰
۲۳۸۴۸	۰/۱	۱/۱	۱/۰۰۸
۷۸۷۹۸	۰/۰۱	۱/۰۵	۱/۰۰۳
۹۷۸۶۲	۰/۰۱	۱/۰۵	۰/۹۹۳





شکل ۱: نمای شماتیکی از دامنه محاسباتی و جزئیات شبکه
(الف) مقیاس دامنهٔ محاسباتی (ب) جزئیات شبکه در نزدیکی استوانه



شکل ۲: تغییرات y^+ بر روی سطح استوانه ساکن

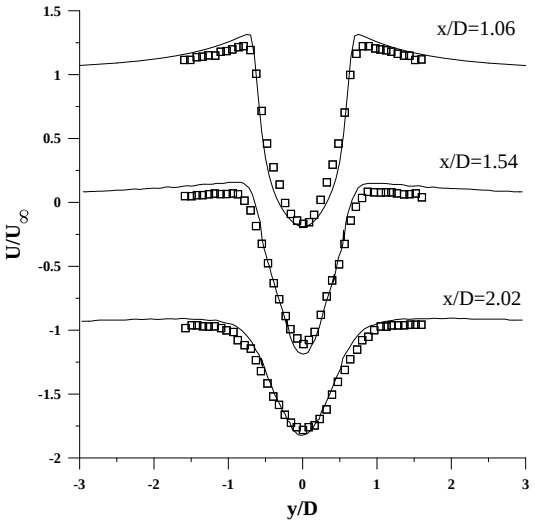
[1] Low Reynolds

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]

۲-۳- اعتبارسنجی نتایج عددی

نتایج عددی برای استوانه چرخان در مقالات منتشر شده، کمیاب است. با این حال به‌منظور بررسی دقت شبیه‌سازی عددی نتایج مطالعه حاضر، نتایج برای استوانه ساکن ($\alpha = ۰$) با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است.

در شکل (۳) پروفیل‌های سرعت در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانیِ مطالعه حاضر در $Re = ۳۹۰۰$، با داده‌های آزمایشگاهی لورنسو[1] و شی[2] [۲۸] (داده‌ها از مرجع [۲۹] گرفته شده‌اند) برای منطقهٔ دنباله خیلی نزدیک ($x/D < ۳$) مقایسه شده است. مشاهده می شود که پروفیل‌های سرعت در تطابق خیلی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی است. مشاهده می‌شود که پروفیل‌های سرعت در منطقهٔ چرخشی بلافاصله پشت استوانه در $x/D = ۱/۵۴$ و $x/D = ۱/۰۶$ به شکل V می‌باشند. پروفیل سرعت در جهت جریان تمایل دارد که در پایین‌دست منطقه چرخشی در $x/D = ۲/۰۲$ به شکل U برسد.



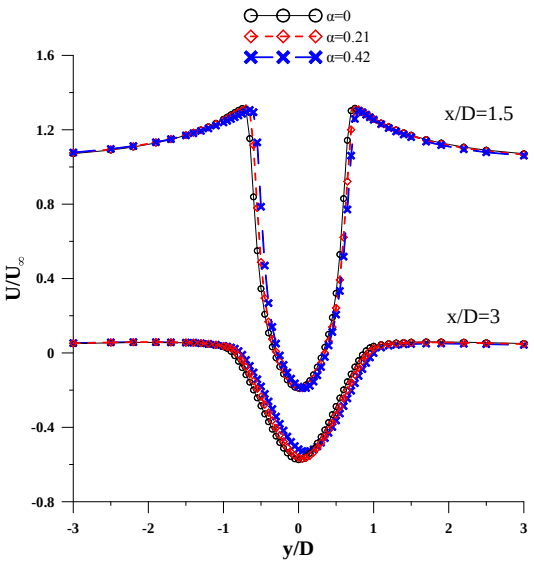
شکل ۳: سرعت در جهت جریان متوسط گیری شده زمانی در موقعیت‌های طولی مختلف برای جریان حول یک استوانه دایره‌ای در $Re = ۳۹۰۰$: – مطالعه حاضر، □ نتایج تجربی [۲۸].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پروفیل و کانتورهای سرعت در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانی

در شکل (۴) تأثیر نسبت چرخش بر روی پروفیل‌های سرعت در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانی در دو موقعیت طولی ۳ و $x/D = ۱/۵$ نشان داده شده است. علت انتخاب این دو موقعیت طولی، نشان دادن تغییرات پروفیل سرعت در داخل منطقه چرخشی و خارج از منطقه چرخشی است. مشاهده می‌شود که پروفیل‌های سرعت در منطقه چرخشی بلافاصله پشت استوانه در $x/D = ۱/۵$، رفتاری V شکل دارند. در این موقعیت رفتار پروفیل‌های سرعت در نسبت چرخش‌های مختلف مشابه یکدیگر می‌باشند، با این تفاوت که با افزایش نسبت چرخش α، به علت تغییر در نقطه سکون و نقاط جدایش جریان، پروفیل‌های سرعت به سمت مثبت محور y جابجا می‌شوند. با افزایش فاصله از استوانه ($x/D = ۳$)، پروفیل‌های سرعت رفتاری U شکل دارند. پروفیل U شکل در منطقهٔ ریزش گردابه را می‌توان به رشد آشفتگی نسبت داد. در $x/D = ۳$، انتقال پروفیل‌های سرعت به سمت مثبت محور y مشهودتر است. همچنین با افزایش نسبت چرخش، منطقه کاهش سرعت تشکیل شده پشت استوانه نیز کاهش‌یافته است.

برای نشان دادن گردابه‌های تشکیل شده و همچنین سایر خصوصیات جریان اطراف استوانه از کانتورهای سرعت حول استوانه استفاده شده است. در شکل (۵)، کانتورهای سرعت در جهت جریان متوسط گیری شده زمانی برای نسبت چرخش‌های مختلف نشان داده شده است. در $\alpha = ۰$، چون استوانه ساکن است، سرعت جریان عبوری در بالا و پایین استوانه کاملاً متقارن است و نقطه سکون دقیقاً در مرکز استوانه ($\theta = ۰$) قرار گرفته است. نقاط جدایش گردابه‌های پشت استوانه بر روی سطوح بالایی و پایینی نیز کاملاً مشابه یکدیگر می‌باشند. در این جریان گردابه‌های فون کارمن به‌صورت متناوب از سطوح بالایی و پایینی جدا شده و در امتداد خط مرکزی استوانه حرکت می‌کنند.



شکل ۴: تأثیر نسبت چرخش بر روی پروفیل‌های سرعت در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانی در دو موقعیت طولی مختلف در $Re = ۵۹۰۰$

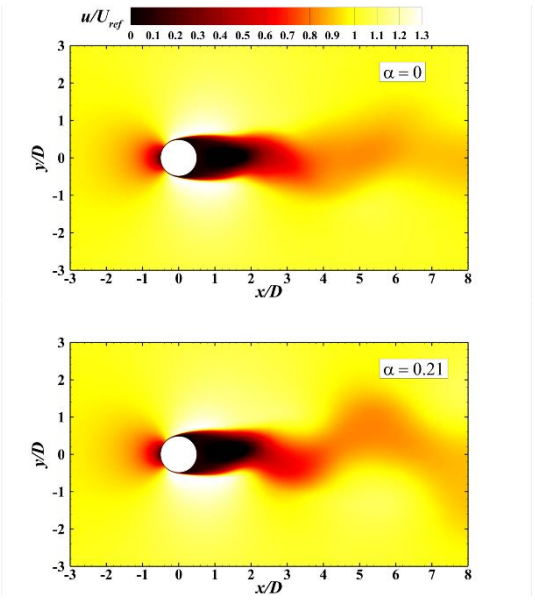
با چرخش استوانه، الگوی جریان کاملاً متفاوت می‌باشد. وقتی که استوانه شروع به چرخش می‌کند این چرخش نظم جریان حول استوانه را بر هم زده و خصوصیات اطراف استوانه را تغییر می‌دهد. دوران استوانه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت باعث ایجاد یک جریان مخالف با جهت جریان اصلی در سطح بالای استوانه و ایجاد یک جریان موافق در سطح پایینی استوانه می‌شود. در نتیجه در سطح بالایی سرعت جریان کاهش و فشار افزایش می‌یابد، ولی در سطح پایینی سرعت جریان افزایش‌یافته و

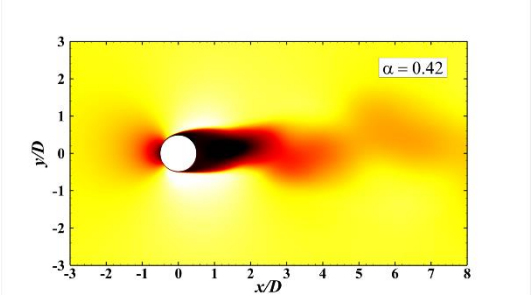
[1] Lourenco
[2] Shih

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]

به‌عکس فشار کاهش می‌یابد. در نتیجه این اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین، نیروی برآ به سمت پایین بر استوانه وارد می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود برای نرخ چرخش ۰٫۲۱ نقطه سکون دیگر در وسط قرار ندارد بلکه در خلاف جهت چرخش استوانه به سمت بالا جابجا شده است. گردابه‌های پشت استوانه نیز دیگر در جهت چرخش استوانه به سمت بالای استوانه حرکت نمی‌کنند. در واقع 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 استوانه و نقطه سکون در جلوی استوانه می‌باشد. افزایش سرعت جریان در سطح پایینی استوانه باعث می‌شود جریان مدت بیشتری به دیواره استوانه متصل باشد و لذا عمل جدایش گردابه از سطح پایینی در نقطه دورتری رخ می‌دهد. عکس همین عمل برای قسمت بالایی استوانه اتفاق می‌افتد، یعنی کاهش سرعت جریان در بالای استوانه باعث می‌شود جریان سریع‌تر از سطح استوانه جدا شده و نقطه جدایش در موقعیت نزدیک‌تری نسبت به حالت قبلی قرار گیرد. گردابه‌های فون کارمن جدا شده از پشت استوانه چرخان نیز دیگر نسبت به خط مرکزی استوانه متقارن نخواهد بود و نسبت به خط مرکزی اندکی به سمت بالا متمایل می‌شوند.

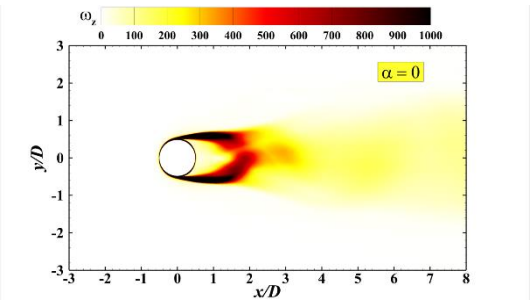
در نرخ چرخش ۰٫۴۲ نیز همانند حالت قبلی موقعیت نقطه سکون و نقاط جدایش دستخوش تغییر شده است؛ اما این تغییرات نسبت به حالت قبلی بیشتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، نقطه سکون در جلوی استوانه نسبت به نرخ چرخش ۰٫۲۱ بالاتر رفته و از خط مرکزی استوانه دور شده است. نقاط جدایش در سطوح بالایی و پایینی استوانه نیز در جهت چرخش استوانه به سمت بالا متمایل شده‌اند. در این حالت شکل گردابه‌های پشت استوانه نیز کمی با حالت قبلی متفاوت می‌باشد. علاوه بر این که طول گردابه‌ها در پشت استوانه اندکی افزایش‌یافته است، شکل ظاهری آن‌ها نیز قدری به هم ریخته است.





شکل ۵: تأثیر نسبت چرخش بر روی کانتورهای سرعت در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانی

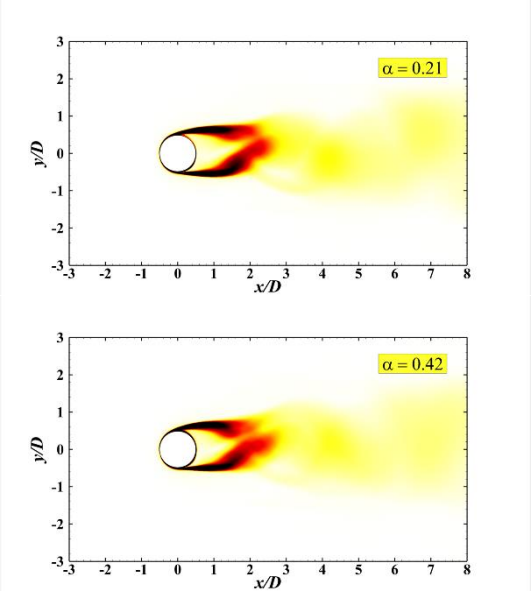
همچنین به‌منظور تأثیر دوران استوانه بر روی تغییر طول و شکل لایه‌های برشی، به بررسی کانتورهای ورتیسیته متوسط گیری شدهٔ زمانی پرداخته شده است. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که خمیدگی لایه‌های برشی سطح بالایی استوانه به سمتی با گرادیان فشار بالاتر متمایل می‌شوند، در حالی که لایه‌های برشی سطح پایینی، تحت تأثیر جریان ورودی[1] است و سطح بالایی که مخالف با جهت جریان اصلی است، کاملاً سریع‌تر نسبت به سطح پایینی منتشر می‌شود. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو لایه‌های برشی نامتقارن می‌شوند و دارای طول‌های مختلفی می‌باشند. به‌منظور بررسی اختلاف در لایه‌های برشی در اثر افزایش نسبت چرخش استوانه، به تجزیه و تحلیل کمی طول لایه‌های برشی L_{SL} پرداخته شده است. این طول، مطابق با تعریف مرجع [۲۱] محاسبه شده است که در اینجا به‌عنوان فاصله از نوک خط کانتور ورتیسیته متوسط گیری شدهٔ زمانی در $x/D = ۰$ تعریف شده است ($\omega_x^* = ۰/۵۵\ \omega_{max}^*$). با استفاده از این معیار، طول لایه‌های برشی در جدول (۲) برحسب نسبت چرخش استوانه به دست آمده است. در جدول (۲)، طول هر دو لایه برشی بالا و پایین آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، طول لایه برشی سطح بالایی استوانه با افزایش α کاهش می‌یابد، در حالی که طول لایه برشی سطح پایینی استوانه با افزایش α افزایش می‌یابد. برای $\alpha = ۰$، هر دو لایه طول یکسانی دارند ($L_{SL} = ۰/۸۵D$) که برای $\alpha = ۰/۲۱$ به طول $L_{SL} = ۰/۷۸D$ در بالا کاهش و به طول $L_{SL} = ۰/۹۰D$ در پایین افزایش می‌یابد که به ترتیب در حدود ٪ ۸٫۲۴ و ٪ ۵٫۸۸ می‌باشد. این روند در $\alpha = ۰/۴۲$ برجسته‌تر است.



[1] Oncoming flow

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]



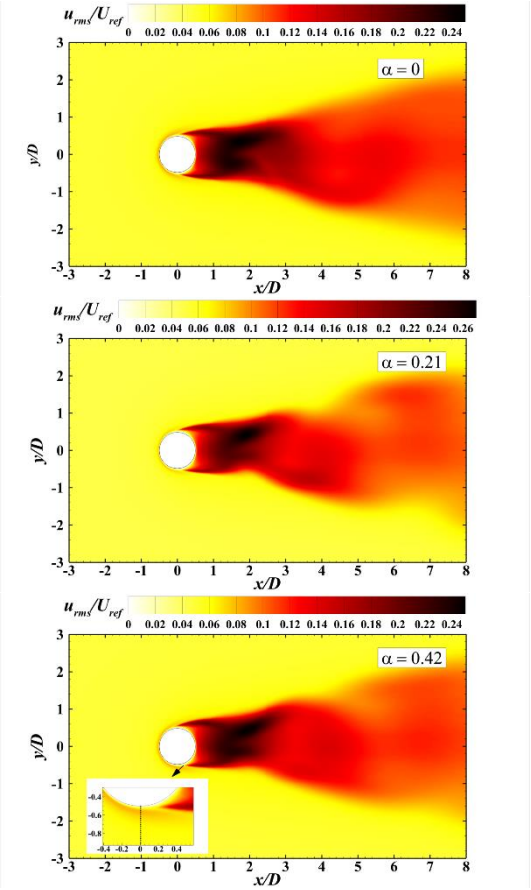
شکل ۶: تأثیر نسبت چرخش بر روی کانتورهای ورتیسیته در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانی

جدول ۲: تغییرات طول لایه‌های برشی با α

α	طول لایهٔ برشی سطح بالایی استوانه	طول لایهٔ برشی سطح پایینی استوانه
۰	۰٫۸۵ D	۰٫۸۵ D
۰٫۲۱	۰٫۷۸ D	۰٫۹۰ D
۰٫۴۲	۰٫۷۰ D	۰٫۹۵ D

۳-۲- کانتورهای سرعت نوسانی در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانی

در این بخش به بررسی تأثیر چرخش استوانه بر روی مؤلفه نوسانی سرعت پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، در $\alpha = 0$ مؤلفه نوسانی به‌صورت متقارن در پشت استوانه تشکیل می‌شود. با افزایش نسبت چرخش ($\alpha = 0.21$)، مؤلفه نوسانی سرعت در جهت مثبت محور y جابجا می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که از شدت نوسانات سرعت در لایه برشی سطح پایینی استوانه کاسته می‌شود و بر شدت نوسانات سرعت در لایه برشی سطح بالایی استوانه افزوده می‌شود. نوسانات سرعت در لایه برشی سطح بالایی استوانه در $\alpha = 0.21$ نسبت به $\alpha = 0$ بیشتر می‌باشد. در $\alpha = 0.42$ نیز مشاهده می‌شود که نوسانات سرعت به سمت مثبت محور y جابجا شده‌اند. همان‌طور که در شکل با بزرگنمایی نشان داده شده است، افزایش سرعت دورانی باعث تغییر در نقطه جدایش می‌شود. در این نسبت چرخش، نوسانات سرعت در لایه برشی سطح پایینی استوانه نسبت به $\alpha = 0.21$ افزایش می‌یابد.



شکل ۷: تأثیر نسبت چرخش بر روی کانتورهای سرعت نوسانی در جهت جریان متوسط گیری شدهٔ زمانی

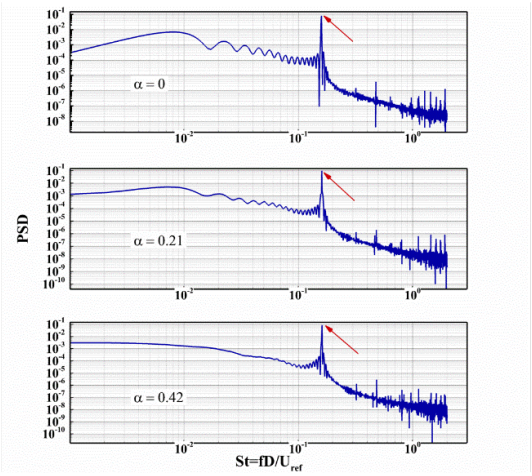
۳-۳- رفتار تناوبی

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، دوران استوانه بر روی ساختار دنباله تشکیل شده در پشت استوانه و فرآیند ریزش گردابه تأثیر می‌گذارد. این تغییرات را به‌آسانی می‌توان با بررسی برآ لحظه‌ای مورد بررسی قرار داد. در شکل (۸) به بررسی آنالیز طیفی تغییرات فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب α پرداخته شده است. لازم به ذکر است که نتایج شکل (۸) با استفاده از تبدیل سریع فوریه[1] و استفاده از تغییرات ضریب برآ لحظه‌ای به دست آمده است. عدد استروهال با استفاده از ماکزیمم فرکانس ریزشِ گردابه در آنالیز طیفی محاسبه می‌شود. مشاهده می‌شود که فرکانس ریزش گردابه و متعاقباً عدد استروهال در رژیم زیربحرانی، با افزایش α به میزانی جزئی افزایش می‌یابد.

[1] Fast Fourier Transform

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

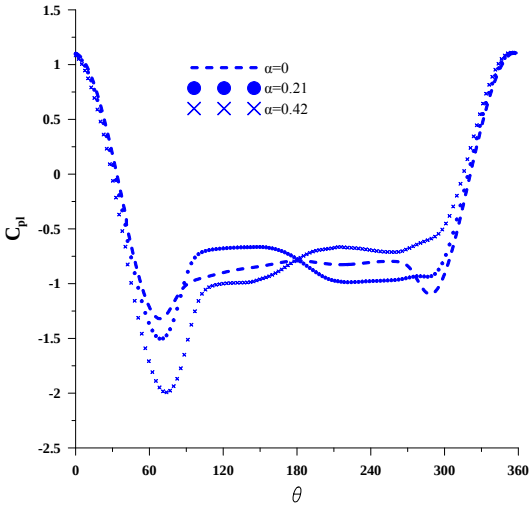
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]



شکل ۸: توزیع PSD بر حسب عدد استروهال در $Re = ۵۹۰۰$

۳-۴- ضرایب نیرویی

هنگامی‌که استوانه دوران می‌کند، سرعت سیال بر روی سطح پایینی افزایش می‌یابد که منجر به افت فشار می‌شود. اندازه این منطقه کم‌فشار بر روی سطح پایینی استوانه افزایش می‌یابد و هنگامی‌که نسبت چرخش افزایش می‌یابد، مقدار آن کاهش می‌یابد و بر ضرایب نیرویی اعمالی بر روی سطح استوانه اثر می‌گذارد. در شکل (۹) توزیع ضریب فشار موضعی در امتداد محیط استوانه برای نسبت چرخش‌های مختلف رسم شده است. برای حالت بدون چرخش، همان‌طور که انتظار می‌رود توزیع فشار متقارن است که متناظر با ساختار دنباله متقارن اطراف استوانه می‌باشد. فشار مرجع p_∞ شرط $C_p = ۱$ را ارضا می‌کند، در حالی که برای مقادیر بالاتری از α، نتیجتاً نقطه سکون حرکت می‌کند. کاهش فشار استاتیکی بر روی سطح پایینی به‌وضوح آشکار است که در آن ضریب فشار تقریباً ۲- می‌باشد. موقعیتِ کمینه مقدار C_{pl} به سمت سطح پایینی جابجا می‌شود، هنگامی‌که نسبت چرخش α افزایش می‌یابد. به‌طور مشابه، موقعیتِ ماکزیمم مقدار C_{pl} هنگامی‌که نسبت چرخش α افزایش می‌یابد، به سمت سطح بالایی استوانه حرکت می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک‌های ضریب فشار موضعی در نقطهٔ سکون در این بازه از نسبت چرخش تقریباً یکسان است (که در تطابق با نتایج به دست آمده توسط سایر محققین می‌باشد). در این نسبت‌های چرخش پایین، کاهش قابل توجهی در ضریب پسا وجود دارد (شکل ۱۰).



شکل ۹: اثر نسبت چرخش بر روی ضریب فشار موضعی.

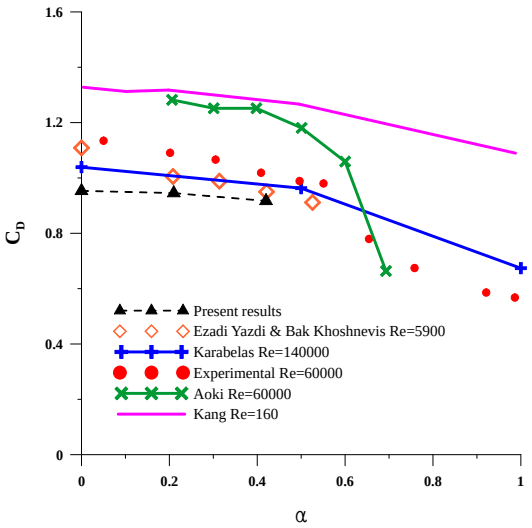
در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، تغییرات ضریب پسا و برآ بر حسب نسبت چرخش رسم شده است. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج برخی از تحقیقات دیگر مقایسه شده است. تحقیقاتی که بدین منظور انتخاب شده‌اند، عبارت‌اند از: نتایج کانگ [۱۳] برای عدد رینولدز ۱۶۰، کاربلاس[1] [۳۰] برای $Re = ۶۰۰۰۰$، آکوی[2] و ایتو[3] [۳۱] برای $Re = ۶۰۰۰۰$، نتایج تجربی ذکر شده در مرجع [۳۲] برای $Re = ۶۰۰۰۰$. تحقیقات مقایسه شده، شامل هر دو رژیم جریان آرام و آشفته می باشد.

در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ چرخش، ضریب پسا کاهش می‌یابد. دلیل کاهش ضریب پسا آن است که با افزایش نرخ چرخش نقطه سکون در جلوی استوانه در جهت خلاف چرخش استوانه جابجا می‌شود و در نتیجه فشار بیشینه که بیشترین سهم را در نیروی پسا ایفا می‌کند، دارای مؤلفه‌ای به سمت پایین می‌شود و از مقدار آن در جهت افقی کاسته می‌شود. حال هرچه نقطه سکون بالاتر برود، مؤلفهٔ افقی نیرو که همان نیروی پسا است، کوچک‌تر می‌شود. نتایج مطالعهٔ حاضر با نتایج سایر تحقیقات ذکر شده در تطابق قابل قبولی است.

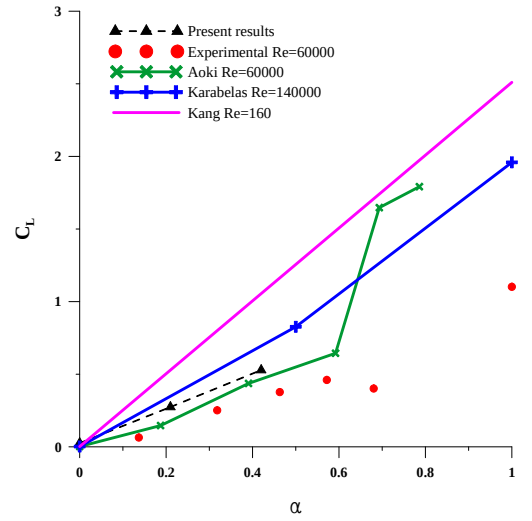
در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که مقدار ضریب برآ با افزایش نرخ چرخش به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. علت آن است که با افزایش نرخ چرخش، جریان سیال در سطح زیرین استوانه شتاب می‌گیرد و در سطح بالایی از سرعت آن کاسته می‌شود. در نتیجه فشار در سطح پایینی کاهش و در سطح بالایی افزایش می‌یابد (نتایج شکل ۹) که این امر باعث افزایش ضریب برآ در جهت منفی، یعنی رو به پایین می‌شود. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با سایر محققین، تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

[1] Karabelas
[2] Aoki
[3] Ito

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]



شکل ۱۰: تغییرات ضریب پسا بر حسب α، محاسبات حاضر در $Re = ۵۹۰۰$ (خط‌چین سیاه با ▲)، محاسبات آکوی ذکر شده در مرجع [۳۲] در $Re = ۶۰۰۰۰$ (خط سبز با ×) و اندازه‌گیری‌های تجربی ذکر شده در مرجع [۳۲] در $Re = ۶۰۰۰۰$ (●)، نتایج تجربی ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۱۸] در $Re = ۵۹۰۰$ (◊)، نتایج عددی کانگ [۱۳] در $Re = ۱۶۰$ (خط صورتی) و نتایج عددی کاربلاس [۳۰] در $Re = ۶۰۰۰۰$ (خط آبی با +).



شکل ۱۱: تغییرات قدر مطلق ضریب برآ بر حسب α. برای جزئیات، زیرنویس شکل ۱۰ را ببینید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی جریان ناپایا اطراف یک استوانه دایره‌ای در $Re = ۵۹۰۰$ و نسبت چرخش‌های بدون بعد $۰ \leq \alpha \leq ۰/۴۲$ انجام شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

برای نسبت چرخش‌های پایین $\alpha < \alpha_{crit}$، دینامیک دنباله به‌شدت تغییر نمی‌کند، اما لایه‌های برشی با یکدیگر تداخل می‌کنند و فرآیند ریزش گردابه‌ها شکل می‌گیرد. همچنین چرخش استوانه باعث می‌شود که دنباله در جهت سرعت محیطی منحرف شود و لایه‌های برشی کوچک‌تر گردند.

علاوه بر این به علت چرخش استوانه، تقارن دنباله از بین می‌رود و لایه‌های برشی بر روی سطوح استوانه دارای طول‌های متفاوتی خواهند بود. برای $\alpha = ۰/۴۲$ نسبت به حالت بدون چرخش، طول لایه برشی سطح بالایی استوانه ٪۱۷٫۶۵ کاهش یافت، درحالی‌که طول لایه برشی سطح پایینی ٪۱۱٫۷۶ افزایش یافت. همچنین با افزایش نسبت چرخش، نقطه سکون و نقاط جدایش جریان تغییر یافتند. با افزایش نسبت چرخش، نقطه سکون از $\theta = ۰$ در حالت استوانه ساکن به $\theta > ۰$ تغییر یافت.

تغییرات در میدان جریان با تغییرات در ضرایب نیرو همراه است. مشاهده شد، زمانی که نسبت چرخش افزایش می‌یابد، ضریب پسا کاهش می‌یابد. در $\alpha = ۰/۴۲$، ضریب برآ $C_L = ۰/۵۲۸۷$ است، درحالی‌که نسبت به حالت بدون چرخش ($\alpha = ۰$)، ضریب پسا ٪۵ کاهش‌یافته است.

نتایج نشان داد که با افزایش α، فرکانس ریزش گردابه افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ چرخش، طول گردابه‌های تشکیل در پشت استوانه اندکی افزایش می‌یابد.

مشاهده شد که با افزایش α، قدر مطلق ضریب برآ افزایش و ضریب پسا کاهش می‌یابد. مشخص شد که با افزایش α، سرعت نوسانی در داخل دنباله کاهش می‌یابد.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی	
C_L	ضریب پسا
C_L	ضریب برآ
C_p	ضریب فشار موضعی
D	قطر استوانه (mm)
f	فرکانس ریزش گردابه (s^{-1})
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهال
u	سرعت در جهت جریان (ms^{-1})
U_r	سرعت جریان آزاد (ms^{-1})
U_∞	سرعت جریان آزاد (ms^{-1})
u_i	مؤلفه‌های متوسط زمانی سرعت (ms^{-1})
$\acute{u}_i$	مؤلفه‌های نوسانی سرعت (ms^{-1})
u_r	مربع نوسانات سرعت (ms^{-1})
X	مختصات در جهت جریان
Y	مختصات در جهت عمود بر جریان
y^+	فاصله بی‌بعد اولین المان تا دیواره
علائم یونانی	
α	نسبت چرخش (نسبت سرعت محیطی به سرعت جریان آزاد)
δ_{ij}	دلتای کرانکر
Δ	نمو نیرو در اثر سطح نسبت به جریان آزاد
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]

μ_t	لزجت آشفته ($kgs^{-1}m^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

مراجع

[1] P.W. Bearman, Vortex shedding from oscillating bluff bodies, Annual review of fluid mechanics, 16 (1984) 195-222.

[2] A. Radi, M., Thompson, A., Rao, K., Hourigan, J., Sheridan, Experimental evidence of new three-dimensional modes in the wake of a rotating cylinder, Journal of Fluid Mechanics, 734 (2013) 567-594.

[3] M. Gad el Hak, D.M., Bushnell, Separation control: review, Journal of fluids engineering, 113 (1991) 5-29.

[4] A. Martin-Alcantara, E., Sanmiguel-Rojas, R., Fernandez-Feria , On the development of lift and drag in a rotating and translating cylinder, Journal of Fluids and Structures, 54 (2015) 868-885.

[5] O.M. Griffin, M., Hall, Review—vortex shedding lock-on and flow control in bluff body wakes, Journal of fluids engineering, 113 (1991) 526-537.

[6] A. Rao, A., Radi, J.S., Leontini, M.C., Thompson, J., Sheridan, K., Hourigan, The influence of a small upstream wire on transition in a rotating cylinder wake, Journal of Fluid Mechanics, 769 (2015) R2.

[7] J. Meena, S., Mittal, Three-dimensional flow past a rotating cylinder, Journal of Fluid Mechanics, 766 (2015) 28-53.

[8] L. Prandtl, The Magnus effect and wind powered ships, Naturwissenschaften, 13 (1925) 93-108.

[9] P. Tokumaru, P., Dimotakis, Rotary oscillation control of a cylinder wake, Journal of Fluid Mechanics, 224 (1991) 77-90.

[10] D. Ingham, T., Tang, A numerical investigation into the steady flow past a rotating circular cylinder at low and intermediate Reynolds numbers, Journal of Computational Physics, 87 (1990) 91-107.

[11] H. Badr, S., Dennis, P., Young, Steady and unsteady flow past a rotating circular cylinder at low Reynolds numbers, Computers & Fluids, 17 (1989) 579-609.

[12] Y.-M. Chen, Y.-R., Ou, A.J., Pearlstein, Development of the wake behind a circular cylinder impulsively started into rotatory and rectilinear motion, Journal of Fluid Mechanics, 253 (1993) 449-484.

[13] S. Kang, Laminar flow over a steadily rotating circular cylinder under the influence of uniform shear, Physics of fluids, 18 (2006) 047106-1–047106-12.

[14] S. Mittal, B., Kumar, Flow past a rotating cylinder, Journal of Fluid Mechanics, 476 (2003) 303-334.

[15] H .Chen, V., Patel, Near-wall turbulence models for complex flows including separation, AIAA Journal, 26 (1988) 641-648.

[16] H. Badr, M., Coutanceau, S., Dennis, C., Menard, Unsteady flow past a rotating circular cylinder at Reynolds numbers 10^3 and 10^4, Journal of Fluid Mechanics, 220 (1990) 459-484.

[17] Y. Chew, M., Cheng, S., Luo, A numerical study of flow past a rotating circular cylinder using a hybrid vortex scheme, Journal of Fluid Mechanics, 299 (1995) 35-71.

[18] M.J. Ezadi Yazdi, A., Bak Khoshnevis, Experimental investigation of the characteristics of the wake of a rotating circular cylinder at different Reynolds numbers and speed ratios, Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal, 4 (2016) 51-64. (In Persian)

[19] A. Bak Khoshnevis, M.J., Ezadi Yazdi, Experimental investigation effect of the rotational cylinder on the reducing of the drag coefficient by hot-wire anemometry, Journal of Mechanical Engineering, 46 (2016) 19-30. (In Persian)

[20] A. Bak Khoshnevis, M.J., Ezadi Yazdi, E., Gholiepour Asrami, Introducing new relationship between high-order moments in the turbulent plain wake behind a circular cylinder, Journal of Mechanical Engineering, 45 (2015) 39-49. (In Persian)

[21] D. Aljure, I., Rodriguez, O., Lehmkuhl, C.D., Pérez-Segarra, A., Oliva, Influence of rotation on the flow over a cylinder at Re= 5000, International Journal of Heat and Fluid Flow, 55 (2015) 76-90.

[22] A. Sojoudi, F., Talati kalasar, R., Neyshapouri, Numerical investigation of non-newtonian laminar flow over rotating cylinder, Journal of Mechanical Engineering, 41 (2011) 53-58. (In Persian)

[23] G. Smaism, O., Fatla, A., Valera Medina, A., Rageb, N., Syred, Experimental and theoretical investigation of the effect of rotating circular cylinder speed on the lift and drag forces, International Journal of Energy and Environment, 7 (2016) 23-36.

[24] K. Mobini, M., Niazi, Large Eddy Simulation of the flow across a rotating circular cylinder, International Journal of Fluid Mechanics Research, 41 (2014).

[25] K. Mobini, M., Niazi, Simulation of unsteady flow around a rotating circular cylinder at various Reynolds numbers, Journal of Mechanical Engineering, 46 (2016) 249-257.

[26] A.L.J. Pang, M., Skote, S.Y., Lim, Modelling high Re flow around a 2D cylindrical bluff body using the k-ω (SST) turbulence model, Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, 16 (2016) 48-57.

[27] M. Allan, A CFD investigation of wind tunnel interference on delta wing aerodynamics, Ph.D Thesis, University of Glasgow, (2002).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]

[28] L. Lourenco, C., Shih, Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder, a particle image velocimetry study, private communication (Data taken from Ref. [29]), (1993).

[29] D. Luo, C., Yan, H., Liu, R., Zhao, Comparative assessment of PANS and DES for simulation of flow past a circular cylinder, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 134 (2014) 65-77.

[30] S. Karabelas, B., Koumroglou, C., Argyropoulos, N., Markatos, High Reynolds number turbulent flow past a rotating cylinder, Applied mathematical modelling, 36 (2012) 379-398.

[31] K. Aoki, T., Ito, Flow characteristics around a rotating cylinder, Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, 26 (2001) 29-34.

[32] A. Elmiligui, K., Abdol-Hamid, S., Massey, S., Pao, Numerical study of flow past a circular cylinder using RANS, Hybrid RANS/LES and PANS formulations, In Proceeding of 22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit, Rhode Island, (2000)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.5.7]