

مطالعه‌ی عددی کاهش ضریب پسای استوانه با بهره‌گیری از کنترل غیرفعال جریان

سید شهاب‌الدین صادقی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

نگار نباتیان* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۱)
دوری ۳-۲، شماره ۲، ص. ۷۷-۸۶، (پژوهشی)

در این مطالعه با بهره‌گیری از کنترل غیرفعال جریان ضریب پسای استوانه کاهش داده شده است. با نصب یک صفحه‌ی کنترل در دوارتفاع و در فواصل طولی مختلف در بالادست جریان، ممتوم جریان ورودی به استوانه و در نتیجه مقاومت جریان لایه‌ی مرزی در برابر گردان فشار نامطلوب افزایش می‌یابد که باعث تعویق در جدایش جریان، افزایش فشار در پشت استوانه و در نهایت باعث کاهش نیروی پسا می‌شود. در حالتی که جریان بین استوانه و صفحه از نوع حفره (کویتی) باشد، سطح بالادستی استوانه از سطح فشاری به سطح مکشی تغییر می‌یابد. در نتیجه فشار خالص روی استوانه و نیروی پسا بیشترین کاهش را پیدا می‌کند که در حالت پیکربندی بهینه، ضریب پسای استوانه تا ۹۰٪ درصد استوانه تنها در شرایط جریان یکسان، کاهش می‌یابد. کاهش ضریب پسا در رینولدزهای زیر بحرانی روند مشابهی دارد. در نهایت با بررسی ترمودینامیک سیال مشخص شد تولید آنتروپی با ضریب پسا رابطه‌ی مستقیم دارد.

واژگان کلیدی: ضریب پسا، کنترل غیرفعال، جاری شدن گردابه‌ها، تولید آنتروپی.

۱. مقدمه

به طور کلی اجسام غوطه‌ور در جریان سیال به دو دسته اجسام خط جریانی^۱ و غیر خط جریانی (بلاف بادی) تقسیم می‌شوند. بسیاری از سازه‌ها و تجهیزات مهندسی از قبیل مبدل‌های حرارتی، سکوهای دریایی و خشکی، برج‌های خنک‌کن، ساختمان‌ها، دودکش‌ها، پایه پل‌ها و خطوط انتقال برق در دسته این اجسام قرار دارند. جدایش جریان^۲، نیروی پسا^۳ بالا، ایجاد دنباله‌ی وسیع در پایین دست جسم و جاری شدن گردابه‌ها^۴ از جمله ویژگی‌های مهم جریان حول یک بلاف بادی است.^[۱] جریان سیال حول استوانه به دلیل نشان دادن پدیده‌های مهم فیزیکی و متعدد از قبیل جدایش جریان، جاری شدن گردابه‌ها و آشفتگی همواره مورد مطالعه‌ی محققان زیادی بوده است و در دو رژیم جریان آرام و آشفته به صورت شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری تجربی مورد مطالعه است.^[۲] همچنین تضعیف جاری شدن گردابه‌ها، تعویق جدایش جریان، کاهش نیروهای آیرودینامیکی و نیز صرفه‌جویی در هزینه‌ی سوخت و مصالح به ترتیب برای وسایل نقلیه و ساختمان‌ها، محققان را برآن داشته است تا راهکارهایی برای کنترل جریان اطراف یک بلاف بادی در نظر بگیرند. برای این منظور از دو روش کنترل جریان فعال و غیر فعال که به ترتیب نیاز به صرف انرژی خارجی و بدون نیاز به آن است استفاده می‌شود. در حالت کلی استفاده از روش‌های کنترل‌کننده فعال همچون دمش جت، چرخش جسم، استفاده از عملگرهای پلاسمایی از بازدهی بالاتری نسبت به روش‌های کنترل‌کننده

جیانگ و همکاران، کاهش ضریب پسای استوانه را به صورت عددی و تجربی با بهره‌گیری از کنترل غیرفعال جریان در یک مطالعه‌ی هیدرودینامیکی بررسی کردند. آنها با ایجاد شیرابه‌ی روی سطح استوانه، جریان لایه‌ی مرزی را آرام به آشفته تبدیل کرده و با تعویق در جدایش جریان، ضریب پسای استوانه را تا ۱۶ درصد کاهش دادند.^[۶] گائو و همکاران در یک اندازه‌گیری تجربی با قرار دادن یک میله‌ی کنترل در بالادست جریان به بررسی کاهش ضریب پسای استوانه پرداختند. آنها توانستند ضریب پسای استوانه را در حالتی که سیستم در پیکربندی بهینه‌ی خود قرار دارد تا بیش از ۴۰ درصد استوانه‌ی تنها در همان شرایط جریان کاهش دهند.^[۷] گوپتا با قرار دادن یک استوانه‌ی کنترل در فضای بین لایه‌های برشی جدا شده از استوانه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۳/۷، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۱۷

DOI: 10.24200/J40.2022.60014.1632

جریان آشفته به روش متوسط‌گیری رینولدز عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_P T u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \mu \varphi \quad (3)$$

$$k_{eff} = k_{lam} + k_{turb} \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی، φ اتلاف انرژی به واسطه‌ی لزجت، p فشار استاتیکی، t زمان، C_P ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، T دمای سیال، k_{eff} ضریب هدایت مؤثر، k_{lam} ضریب هدایت حرارتی سیال، k_{turb} ضریب هدایت حرارتی آشفتگی، u_i مؤلفه‌ی افقی سرعت و u_j سرعت در مؤلفه‌ی قائم است.

چنان‌که اشاره شد، برای حل عددی از معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده به روش رنژ^۵ استفاده می‌شود. عبارت تنش رینولدز $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ مطابق با معادلات ۵ و ۶ با استفاده از مدل آشفتگی دو معادله‌ی $k - \omega$ SST که قادر به شبیه‌سازی جریان با گردان فشار معکوس و جدایش جریان است، محاسبه شده است.^[۱۶، ۱۷]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

که در آن G_k تولید انرژی جنبشی آشفتگی، G_ω تولید گردابه، Γ_k و Γ_ω به ترتیب ترم نفوذ مؤثر برای k و ω ، Y_k و Y_ω به ترتیب ترم اتلاف برای k و ω به واسطه‌ی آشفتگی، D_ω ترم انتشار متقابل k و ω ، S_k و S_ω یک چشمه یا منبع که توسط کاربر قابل تعریف است.^[۱۸]

۲.۱.۲. معادلات حاکم برای محاسبه‌ی نرخ تولید آنتروپی

وجود برگشت‌ناپذیری‌ها و تلفات انرژی در فرایندهای صنعتی و ترمودینامیکی منجر به تولید آنتروپی می‌شود. تولید آنتروپی در جریان یک سیال ناشی از تلفات ناشی از لزجت و حرارت است.^[۱۹] در این راستا برای محاسبه‌ی نرخ تولید آنتروپی از معادله‌ی ۷ استفاده شد:^[۲۰]

$$\dot{S} = \left(\frac{k_{eff}}{T^2} (\nabla T)^2 \right) + \left(\frac{\mu}{T} \varphi + \frac{\mu}{T} \varphi' \right) \quad (7)$$

که در آن φ و φ' عبارت‌اند از:

$$\varphi = 2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial y} \right)^2 \quad (8)$$

$$\varphi' = 2 \left[\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u'_j}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x} + \frac{\partial u'_j}{\partial y} \right)^2 \quad (9)$$

عبارت $\left(\frac{k_{eff}}{T^2} (\nabla T)^2 \right)$ در معادله‌ی ۷ بیان‌گر نرخ تولید آنتروپی به واسطه‌ی انتقال حرارت است. از آن‌جا که این شبیه‌سازی در شرایط هم‌دماست، از تولید آنتروپی به

اصلی به بررسی عددی کاهش ضریب پسا پرداخت. وجود استوانه‌ی کنترلی در پایین‌دست باعث کاهش جاری شدن گردابه‌ها از سطح استوانه اصلی و کاهش در ضریب پسا تا ۱۵ درصد شد.^[۸] تسوویی در یک اندازه‌گیری تجربی نشان داد قرار دادن یک استوانه‌ی کنترلی در بالادست استوانه‌ی اصلی، روشی ساده برای کاهش ضریب پسا و کنترل جریان اطراف استوانه است. وی به تأثیر تغییر عدد رینولدز و همچنین تغییر قطر استوانه‌ی کنترلی از ۱ تا ۱۲ میلی‌متر پرداخت و بیشترین کاهش در ضریب پسا را در حالتی که قطر استوانه‌ی کنترلی ۲۵/۰ قطر استوانه‌ی اصلی باشد مشاهده کرد.^[۹] استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرفعال در توربو ماشین‌ها باعث افزایش راندمان آنها می‌شود. از جمله این روش‌ها ایجاد یک شکاف زاویه‌دار در مقطع ایرفویل است. با این روش جریان سیال از سطح پرفشار به سطح مکش انتقال یافته و موجب تقویت مومنوم لایه‌ی مرزی و تضعیف در جدایش می‌شود. در این راستا شهابا با ایجاد یک شکاف زاویه‌دار در مقطع ایرفویل و تعیین زاویه‌ی بهیسه برای آن، باعث کاهش تولید آنتروپی، کاهش تولید نویز آیرودینامیکی و افزایش راندمان در توربین ولز تا ۱۵٪ شد.^[۱۰] در مطالعه‌ی دیگر دیانکار با قرار دادن یک استوانه‌ی کنترلی در مجاورت استوانه‌ی اصلی، دنباله‌ی پایین‌دست استوانه را کاهش داده و جاری شدن گردابه‌ها از طرفین استوانه را به نصف کاهش داد.^[۱۱] بوریسلی به منظور کنترل جاری شدن گردابه‌ها با ایجاد دو شکاف در طرفین بالا و پایین استوانه ضریب پسا را تا ۱۵٪ کاهش داد.^[۱۲] ایبا و همکاران در مطالعات‌شان با تغییر در ضریب انتقال حرارت استوانه جدایش جریان در لایه‌ی مرزی را به تعویق انداخته و موجب کاهش در ضریب پسا استوانه و تضعیف در جاری شدن گردابه‌ها شدند.^[۱۳] شنگ و همکاران با استقرار دو استوانه‌ی کنترلی چرخان در پایین‌دست و طرفین استوانه‌ی اصلی باعث تقویت مومنوم لایه‌ی مرزی و کاهش ضریب پسا استوانه‌ی اصلی شدند. آنها همچنین دریافته‌اند با افزایش سرعت چرخش استوانه‌های کنترل، ناسلت متوسط و در نتیجه نرخ انتقال حرارت از استوانه نیز افزایش می‌یابد.^[۱۴]

استفاده از صفحه‌ی تخت در بالادست جریان می‌تواند در جهت کاهش پسا برای کاربردهای مهندسی مفید واقع شود. به طور مثال قرار دادن صفحه‌ی تخت در جلو وسایل نقلیه موجب کاهش توان اتلافی و مصرف سوخت به دلیل کاهش پسا آیرودینامیکی می‌شود. همچنین تعبیه‌ی صفحه‌ی تخت در مکان مناسب مقابل پایه‌ی پل‌ها یا دریچه‌ی سد که جریان با رینولدز بالا وجود دارد، می‌تواند در جهت کاهش پسا کارآمد باشد.^[۱۵] در این مطالعه برای کاهش ضریب پسا استوانه‌ی دوبعدی از یک صفحه تخت قائم با ضخامت ناچیز در بالادست جریان استفاده شده است. بررسی عددی کاهش ضریب پسا در رینولدزهای مختلفی صورت پذیرفت. چهار حالت متفاوت برای محل استقرار صفحه از استوانه و همین‌طور دو حالت مختلف برای ارتفاع صفحه در نظر گرفته شد و بهیسه‌ترین پیکربندی از نظر بیشترین تأثیر بر کاهش ضریب پسا استوانه انتخاب و نتایج تحلیل شد. همچنین در این مطالعه به بررسی ترمودینامیک سیال و ارتباط تولید آنتروپی استوانه با ضریب پسا پرداخته شده است.

۲. حل عددی معادلات و شرایط مرزی

۲.۱.۲. معادلات حاکم

۲.۱.۱.۲. معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی حاکم بر جریان گذرا و دوبعدی، برای رژیم

استقلال از شبکه نسبت به متغیر بی بعد ضریب پسا بررسی شد. در نهایت شبکه با تعداد ۹۴۰۰۰ المان جهت انجام محاسبات انتخاب شد (جدول ۱). به دلیل وجود گرادیان‌های شدید در نزدیکی استوانه و صفحه، تراکم المان‌های شبکه در آن نواحی افزایش یافت که با دور شدن از صفحه و استوانه این تراکم کاهش می‌یابد. با توجه به نوع مدل آشفتگی جهت دستیابی به نتایجی دقیق از $y^+ \leq 1$ در نزدیکی دیواره‌ی استوانه استفاده شد و ارتفاع اولین سلول لایه مرزی از طریق معادلات زیر برابر با $y = 0.000221m$ به دست آمد.

$$C_f = (2 \log(Re_d) - 0.65)^{-2/3} \quad (12)$$

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (13)$$

$$u_* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (14)$$

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho u_*} \quad (15)$$

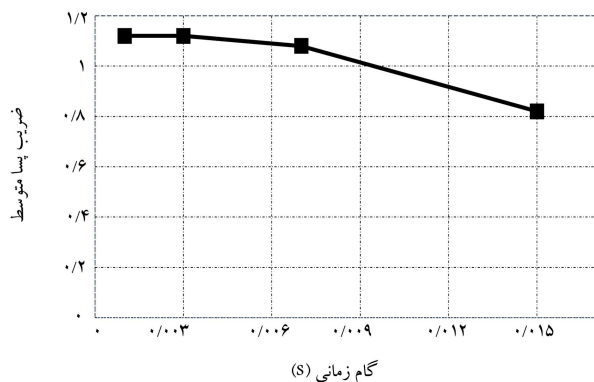
در این روابط C_f ، τ_w ، u_* و μ به ترتیب ضریب اصطکاک سطحی^۱، تنش برشی دیواره^{۱۱}، سرعت اصطکاک^{۱۲} و لزجت دینامیکی است.

۳.۲. شرایط مرزی

برای این مطالعه‌ی عددی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت و حل‌گر گدرا و فشار مینا استفاده شده است. شرط مرزی سرعت یکنواخت ($u = u_\infty = 12.5m/s, v = 0$) برای مرز ورودی و شرط مرزی فشار محیط ($p = p_\infty$) برای مرز خروجی در نظر گرفته شد. برای دیواره‌های استوانه و صفحه، شرط مرزی عدم لغزش و برای حدس اولیه روش ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور حل میدان جریان از الگوریتم عددی کوپل استفاده شد. گسسته‌سازی مرتبه دوم برای تمام معادلات انتخاب و از شرط همگرایی 10^{-6} برای باقی‌مانده‌ی تمام متغیرها استفاده شد. در نهایت مطابق با شکل ۳ جهت بررسی استقلال از گام زمانی، عدد $0.0003s$ به عنوان گام زمانی برای این مطالعه انتخاب شد.

جدول ۱. نتایج استقلال از شبکه برای استوانه‌ی تنها در رینولدز ۴۶۳۰۰.

شبکه	تعداد المان	$\overline{C_D}$
تراکم ۱	۴۷۰۰۰	۱/۱۱۶
تراکم ۲	۹۴۰۰۰	۱/۱۲۴
تراکم ۳	۱۴۱۰۰۰	۱/۱۴۲
تراکم ۴	۲۱۵۰۰۰	۱/۱۴۰



شکل ۳. استقلال از گام زمانی برای استوانه‌ی تنها در رینولدز ۴۶۳۰۰.

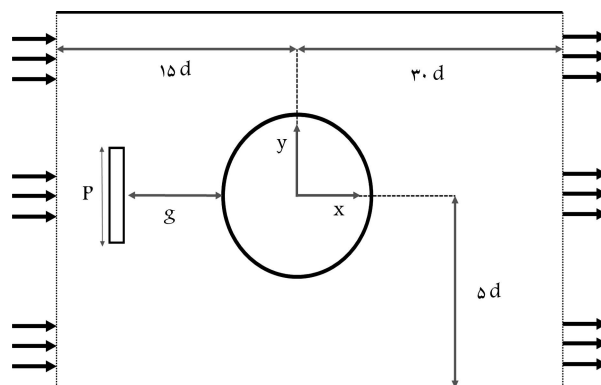
واسطه‌ی انتقال حرارت صرف‌نظر می‌شود. در عبارت دوم $\frac{\mu}{T} \varphi$ بیان‌گر تولید آنتروپی به واسطه‌ی اثرات لزجت جریان و $\frac{\mu}{T} \varphi'$ مربوط به تولید آنتروپی به واسطه‌ی نوسانات آشفتگی^۷ است. حل‌گرهای عددی رنژ قادر به محاسبه‌ی مستقیم نوسانات آشفتگی نیستند. از این جهت برای محاسبه‌ی نرخ تولید آنتروپی به واسطه‌ی نوسانات آشفتگی در مطالعات مختلفی از دو رابطه‌ی $\dot{S}_{turb} = \frac{\rho \varepsilon}{T} = \frac{\mu \varphi}{T}$ استفاده شده است.^[۲۱] که در آن ε و μ_t به ترتیب نرخ اتلاف آشفتگی^۸ و لزجت آشفتگی^۹ است. بنابراین معادله‌ی نرخ تولید آنتروپی به شکل رابطه‌ی ۱۰ ساده می‌شود و با وارد کردن معادله‌ی مربوطه در نرم‌افزار انسیس محاسبات مربوطه انجام می‌گیرد. همچنین تولید آنتروپی کل از طریق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه شد.

$$\dot{S} = \frac{\mu}{T} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_j}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial y} \right)^2 + \frac{\rho \varepsilon}{T} \quad (10)$$

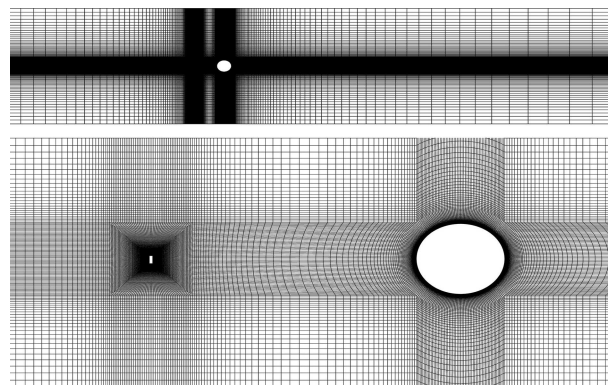
$$S_{tot} = \int \int \dot{S} dy dx \quad (11)$$

۲.۲. استقلال از شبکه

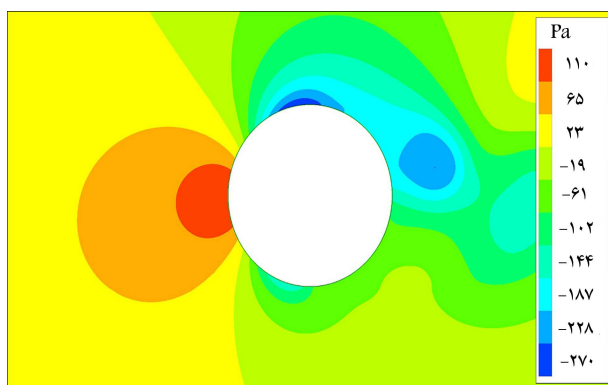
برای این مطالعه‌ی عددی از یک دامنه مستطیلی به ابعاد $10d \times 40d$ استفاده شد به طوری که دامنه‌ی محاسباتی حداقل تأثیر را بر نتایج حاصله داشته باشد؛ قطر استوانه $d = 0.0554m$ است. در شکل ۱ مشخصات ابعادی شبکه‌ی محاسباتی جریان حول استوانه و صفحه نشان داده شده است. در شکل ۲ شبکه‌ی سازمان یافته‌ی چندبُلُکی اطراف استوانه و صفحه نشان داده شده است. برای انتخاب شبکه‌ی مناسب، چندین شبکه با تراکم مختلف در رینولدز $Re_d = 46300$ بررسی و



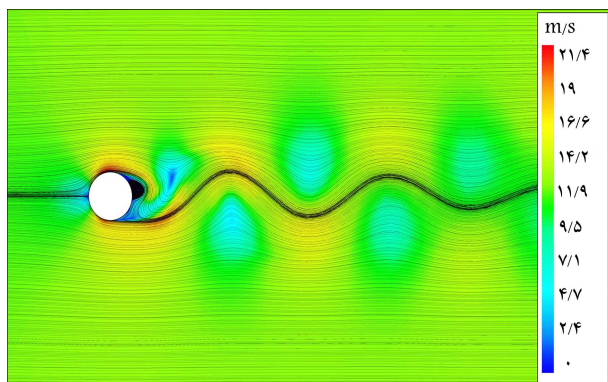
شکل ۱. ابعاد هندسی شبکه محاسباتی.



شکل ۲. شبکه‌ی محاسباتی چندبُلُکی و سازمان یافته برای حل جریان.



شکل ۶. اختلاف فشار گسترده در طرفین استوانه در رینولدز ۴۶۳۰.



شکل ۷. کانتور سرعت و خطوط جریان برای استوانه در رینولدز ۴۶۳۰.

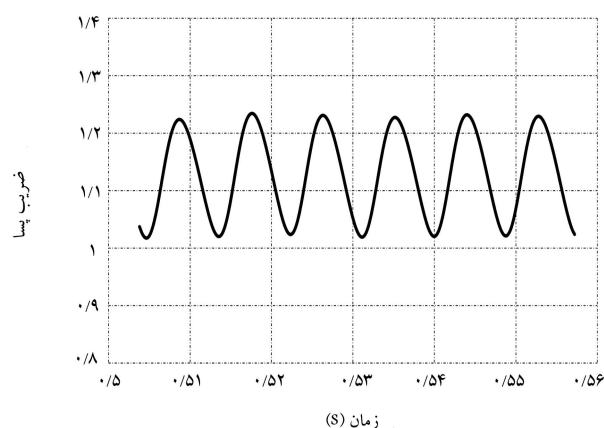
۲.۳. استوانه به همراه صفحه‌ی کنترل در بالادست

در این مطالعه دو حالت مختلف $P/d = 0/34, 0/11$ برای ارتفاع صفحه و چهار حالت $g/d = 0/5, 1/5, 3/0, 5/0$ به منظور فاصله‌ی طولی صفحه از استوانه بررسی شده است. همچنین به منظور بررسی اثر تغییرات رینولدز بر روند تغییرات ضریب پسا، این مطالعه‌ی عددی در پنج رینولدز ۳۱۴۸۴، ۳۸۸۹۲، ۴۶۳۰۰، ۵۳۷۰۸ و ۶۱۱۱۶ به بررسی روند کاهش ضریب پسا پرداخته است.

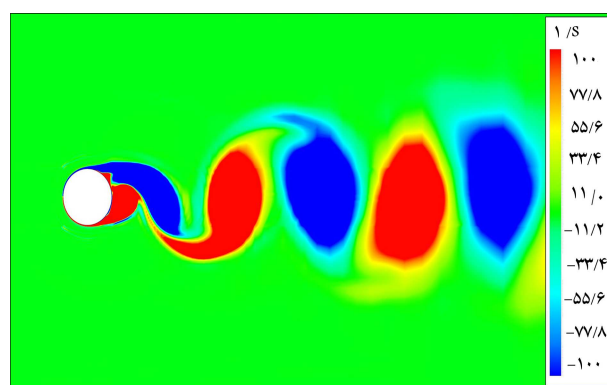
در جریان حول استوانه دو الگوی متفاوت برای جریان مشاهده شد که مرتبط با محل استقرار صفحه نسبت به استوانه است. در واقع دنباله‌ی ایجاد شده در پایین‌دست صفحه‌ی کنترل نقش اساسی در ساختار جریان بین صفحه و استوانه را ایفا می‌کند. در الگوی اول و تا زمانی که نسبت طولی $g/d \leq 1/5$ برقرار باشد، پدیده‌ی جاری شدن گردابه‌ها از سطح صفحه اتفاق نخواهد افتاد و یک دنباله از سطح صفحه تا دو طرف بالا و پایین استوانه تشکیل می‌شود. این نوع جریان بین استوانه و صفحه که با ایجاد یک دنباله‌ی پیوسته از سطح صفحه تا طرفین استوانه ادامه می‌یابد و میدان گردابه‌ی فون کارمن در آن اتفاق نمی‌افتد اصطلاحاً جریان حفره (کویتی)^{۱۳} نامیده می‌شود (شکل ۸ الف). با افزایش فاصله‌ی طولی به $g/d = 3/0$ به وضوح پدیده‌ی جاری شدن گردابه‌ها از سطح صفحه مطابق شکل ۸ ب و ج قابل مشاهده است. در این حالت گردابه‌ها از سطح صفحه‌ی کنترل به سوی استوانه جاری می‌شوند. این در حالی است که در جریان حفره (کویتی)، مجاورت استوانه در کنار دنباله‌های کم فشار گردابه‌های ناشی از صفحه منجر به کاهش بیشتر ضریب فشار در پیشانی استوانه نسبت به حالت تداخل دنباله‌ها می‌شود. چنان که در شکل

جدول ۲. ضریب پسا متوسط در جریان حول استوانه در رینولدز ۴۶۳۰.

مطالعه	C_D
عددی (کار حاضر)	۱/۱۲
تجربی	۱/۲۱



شکل ۴. نوسانات ضریب پسا در جریان حول استوانه در رینولدز ۴۶۳۰.

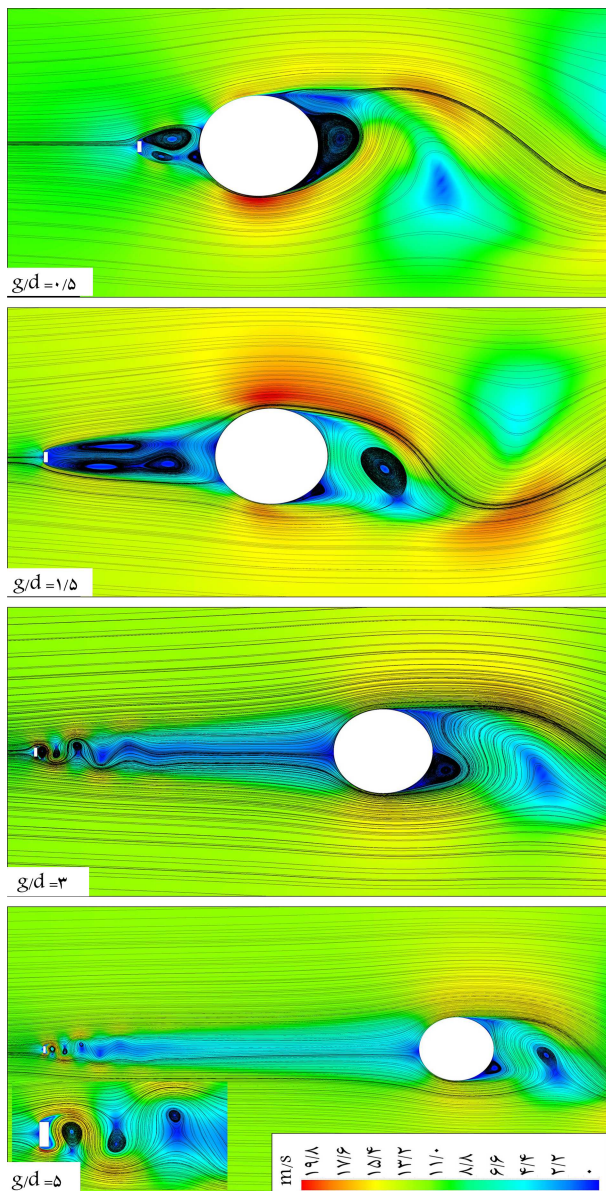


شکل ۵. کانتور گردابه برای استوانه در رینولدز ۴۶۳۰.

۳. ارائه‌ی نتایج و اعتبارسنجی

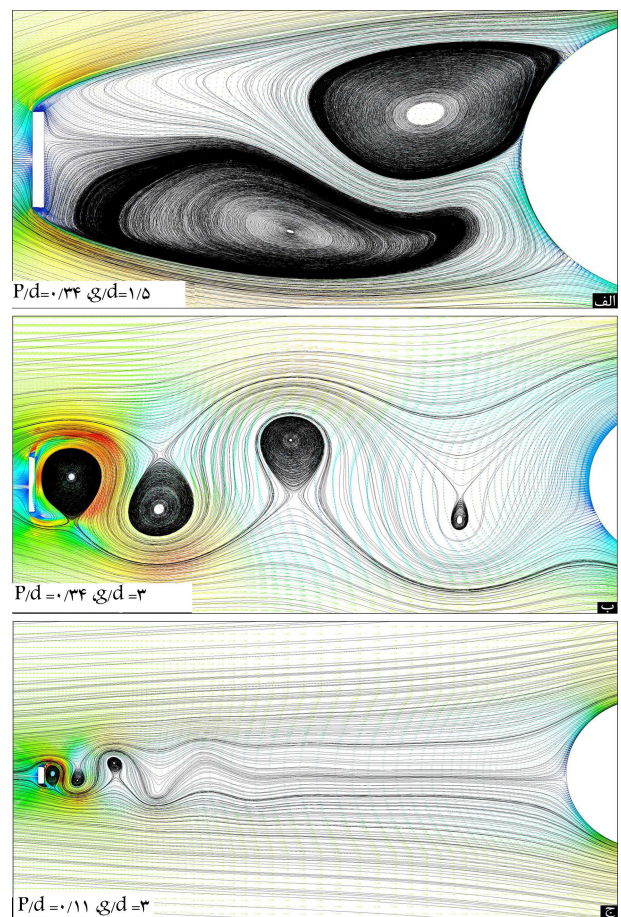
۳.۱. استوانه‌ی تنها

به منظور کسب اطمینان از نتایج حل عددی، اعتبارسنجی با نتایج تجربی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج عددی مطابق با جدول ۲ در تطابق خوبی با نتایج تجربی قرار دارند.^[۱۵] در ابتدا جریان هوای گذرنده از روی سطح استوانه در عدد $Re_d = 4630$ مورد بررسی قرار گرفت. ضریب نیروی پسا متناوب در شکل ۴ ناشی از جدا شدن تناوبی لایه‌های برشی از طرفین استوانه باعث جاری شدن گردابه‌ها مطابق با شکل ۵ می‌باشد. شکل ۶ کانتور فشار در رینولدز مذکور حول استوانه را نشان می‌دهد. در پیشانی استوانه که نقطه سکون است فشار در حالت بیشینه و در سطح پایین‌دست استوانه مقدار منفی و بسیار کمتری دارد. این اختلاف فشار بالا در سطوح فشار و مکش استوانه مسبب ایجاد نیروی پسا فشاری قابل ملاحظه‌ی است. در شکل ۷ کانتور سرعت به همراه کانتور جریان برای استوانه‌ی تنها نشان داده شده است.



شکل ۹. کانتور هم‌تراز سرعت برای استوانه به همراه صفحه کنترل در حالت‌های مختلف طولی در $P/d = 0/11$.

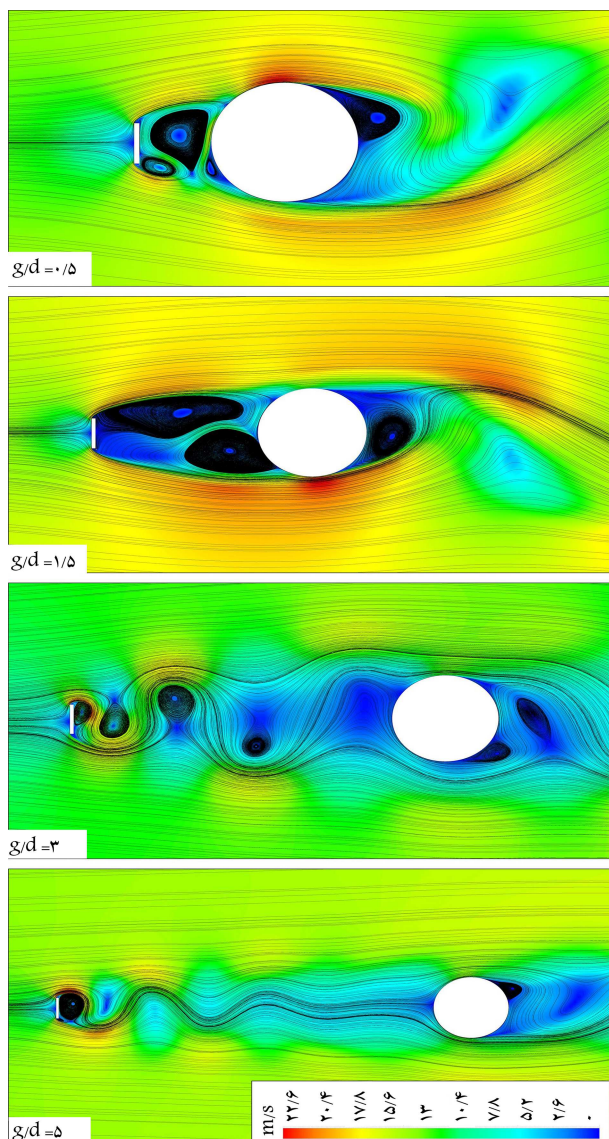
توزیع ضریب فشار روی سطح استوانه نهایتاً باعث کاهش نیروی فشاری خالص روی استوانه در جهت جریان و در نتیجه کاهش ضریب پسا استوانه می‌شود. هر چند کاهش ضریب پسا برای صفحه‌ی کنترل با ارتفاع $P/d = 0/11$ با شدت کم‌تری اتفاق می‌افتد. به این دلیل که اغتشاشات کم‌تری مابین صفحه و استوانه ایجاد می‌شود و گردابه‌های جاری شده به واسطه‌ی صفحه‌ی بالادست استوانه در طول مسیر میرا شده و به جریان یکنواخت در نزدیکی استوانه تبدیل می‌شوند. شکل‌های ۸ ب و ج آشفتگی جریان برای دو حالت ارتفاع متفاوت صفحه برای فاصله طولی یکسان را نشان می‌دهند. چنان‌که در ادامه اشاره خواهد شد ضریب پسا استوانه در حالت استفاده از صفحه‌ی بزرگ‌تر تا چند برابر کاهش می‌یابد. طبق نتایج تجربی در این رینولدز جدایش جریان برای استوانه‌ی تنها در سطح بالادست استوانه و در محدوده $\theta = 75^\circ$ اتفاق می‌افتد. درحالی که با ایجاد اغتشاش در جریان ورودی به استوانه جدایش جریان به تعویق افتاده و در سطح پایین‌دست استوانه رخ می‌دهد.



شکل ۸. حالت‌های متفاوت جریان بین استوانه و صفحه‌ی کنترل در بالادست.

۹ برای حالت $P/d = 0/11$ دیده می‌شود، در $g/d = 0/5$ گردابه‌ها متقارن نیستند، اما زمان برای جدایش کافی نیست. در حالت $g/d = 1/5$ گردابه‌های پایینی رشد کرده و جریان متقارن‌تر می‌شود. هرچند که به دلیل فاصله‌ی کم صفحه‌ی کنترلی با استوانه، زمان جدایش جریان فراهم نیست و همچنان در ناحیه‌ی حفره (کویتی) قرار دارد. کانتور هم‌تراز گردابه برای استوانه با صفحه کنترل در حالت‌های مختلف طولی در شکل ۹ نشان داده شده است. برای حالت $P/d = 0/34$ مطابق با شکل ۱۱، در $g/d = 1/5$ ابعاد گردابه‌های تشکیل شده به دلیل ارتفاع بیشتر سطح کنترلی، بزرگ‌تر بوده و خطوط جریان و توزیع فشاری تقارن بیشتری در بالادست و پایین‌دست جریان نسبت به حالت $P/d = 0/11$ دارند. چنان‌که در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ از میزان گردابه هم مشخص است، در $P/d = 0/34$ قدرت گردابه‌ی بیشتری نسبت به حالت $P/d = 0/11$ وجود دارد. درحالی که در $P/d = 0/11$ در فواصل بیشتر سطح کنترلی با استوانه، گردابه‌ها میرا شده و تقریباً جریان به حالت جریان یکنواخت در بالادست استوانه نزدیک می‌شود (شکل ۸ ب، ج).

مطابق با شکل ۱۳ در جریان حفره‌ی، ضریب فشار در محدوده‌ی مهم $\theta \leq 30^\circ$ به نسبت استوانه‌ی تنها با شیب زیادی کاهش پیدا می‌کند و ناحیه‌ی مذکور به ناحیه‌ی مکش تبدیل می‌شود. به طور کلی، در حالت استفاده از صفحه‌ی کنترل، ضریب فشار در سطح بالادستی استوانه به شدت کاهش می‌یابد و دارای مقادیر منفی می‌شود. این در حالی است که ضریب فشار در سطح پایین‌دستی استوانه به علت تعویق بیشتر در جدایش جریان افزایش می‌یابد. این تغییرات در



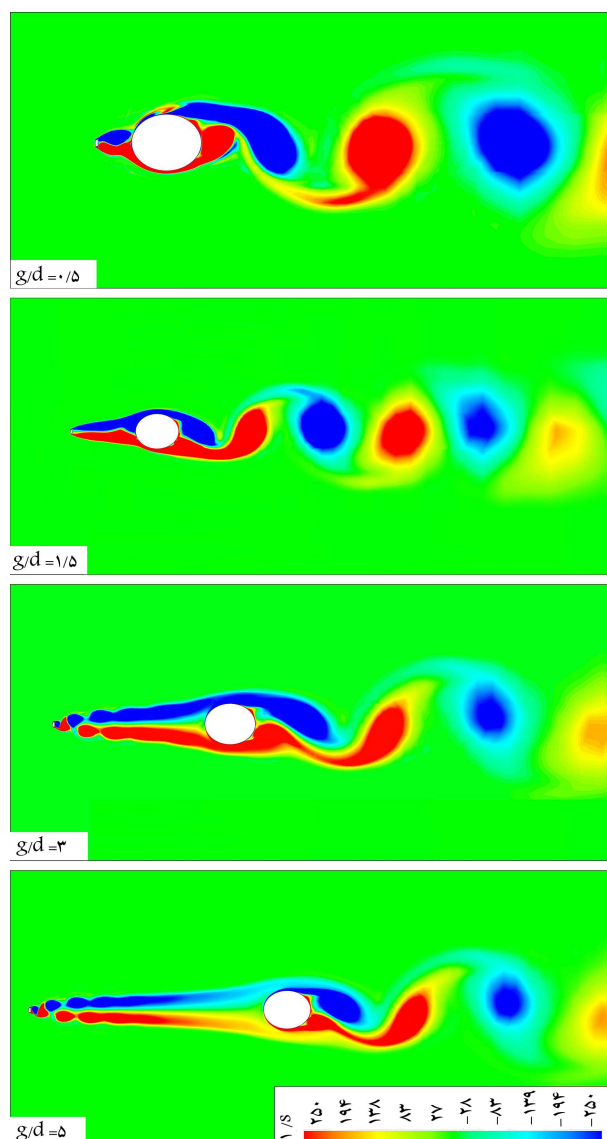
شکل ۱۱. کانتور هم‌تراز سرعت برای استوانه به همراه صفحه کنترل در حالت‌های مختلف طولی در $P/d = 0/34$.

جدول ۳. مقایسه‌ی جدایش جریان بر روی استوانه در $Re=4630$.

g/d	زاویه‌ی جدایش در	
	$P/d = 0/11$	$P/d = 0/34$
0	75°	75°
0.5	101°	101°
1.5	102°	105°
3/0	94°	101°
5/0	93°	104°

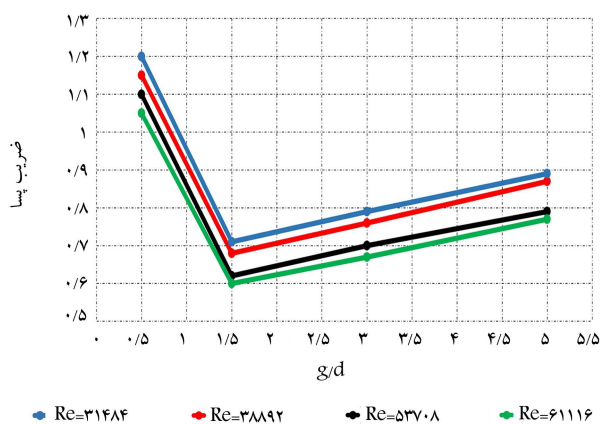
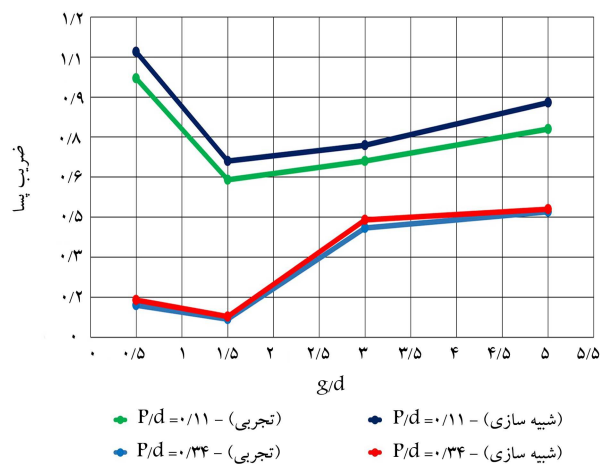
صفحه ارائه شده است. در محدوده‌ی رینولدزهای زیر بحرانی 3000 تا 6000 به دلیل ثابت بودن الگوی جریان و مطابق با جداول ۳ تا ۵ در عدم تغییر ویژه زاویه جدایش، محدوده‌ی تغییرات ضریب پسا با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶ اندک و از همان الگوی کاهشی اولیه پیروی می‌کند.

چنان که از نتایج جدول‌ها مشخص است در $P/d = 0/11$ جدایش جریان



شکل ۱۰. کانتور هم‌تراز گردابه برای استوانه به همراه صفحه کنترل در حالت‌های مختلف طولی در $P/d = 0/11$.

مطابق با جدول ۳ و شکل ۱۴ در بهینه‌ترین حالت جدایش تا $\theta = 105^\circ$ به تعویق می‌افتد که منجر به کاهش بیشتر ضریب پسا می‌شود. بیشترین کاهش در ضریب پسا برای دو حالت مختلف ارتفاع صفحه $0/11$ و $0/34$ در فاصله‌ی طولی $g/d = 1/5$ ایجاد شد و نوع جریان نیز حفره‌یی است. ضریب پسا برای استوانه در این حالت به ترتیب $0/68$ و $0/59$ به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۱۱ آمده است، تقارن جریان نسبت به محور افقی و بزرگتر بودن گردابه‌ها باعث رسیدن به کم‌ترین ضریب پسا در $P/d = 0/34$ مطابق با شکل ۱۴ می‌شود. در $g/d = 3/0$ ، $5/0$ به دلیل فاصله‌ی زیاد، برای جاری شدن گردابه‌ها زمان کافی وجود دارد و ناحیه‌ی حفره در بالادست استوانه ایجاد نمی‌شود که این امر باعث افزایش ضریب پسا می‌شود. مطابق با شکل ۱۴ نتایج در حالت وجود صفحه‌ی کنترل با نتایج تجربی در رینولدز 4630 مورد بررسی قرار گرفت. سایر رینولدزها مربوط به بررسی اثر رینولدز روی رژیم جریان در این کار بررسی شده است و مقادیر ضریب پسا و زاویه‌ی جدایش برای حالات مختلف ترکیب استوانه و

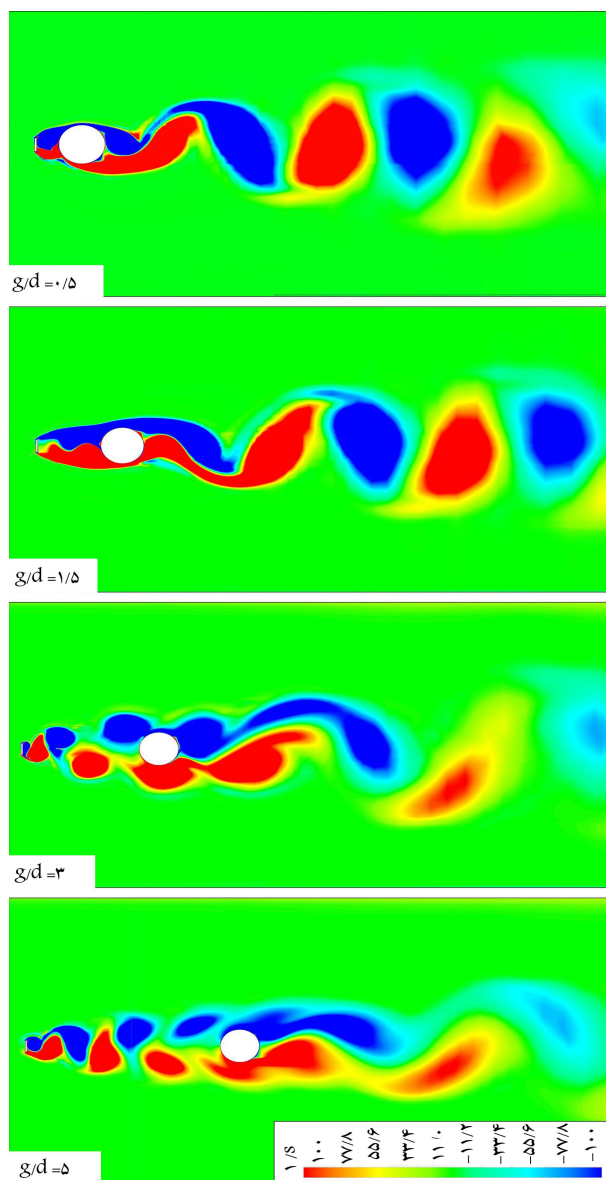


جدول ۴. مقایسه ی جدایش جریان بر روی استوانه در $Re = 31484$.

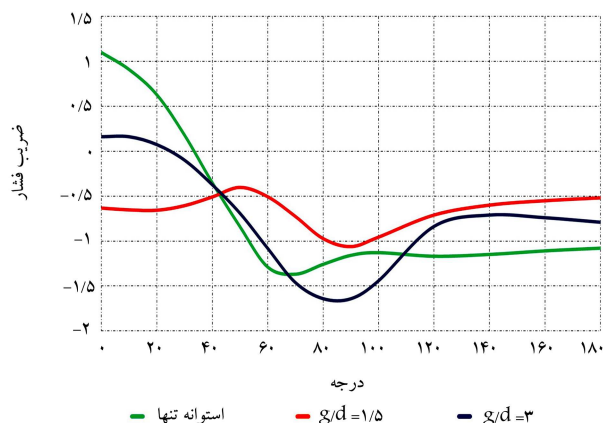
g/d	زاویه ی جدایش در	
	$P/d = 0/11$	$P/d = 0/34$
0/5	۹۹°	۱۰۰°
۱/5	۱۰۱°	۱۰۵°
۳/۰	۹۳°	۱۰۱°
۵/۰	۹۳°	۱۰۴°

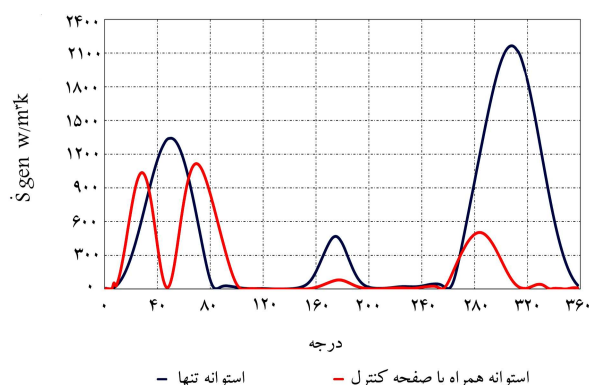
جدول ۵. مقایسه ی جدایش جریان بر روی استوانه در $Re = 61116$.

g/d	زاویه ی جدایش در	
	$P/d = 0/11$	$P/d = 0/34$
0/5	۱۰۲°	۱۰۳°
۱/5	۱۰۲°	۱۰۱°
۳/۰	۹۴°	۹۹°
۵/۰	۹۵°	۱۰۴°

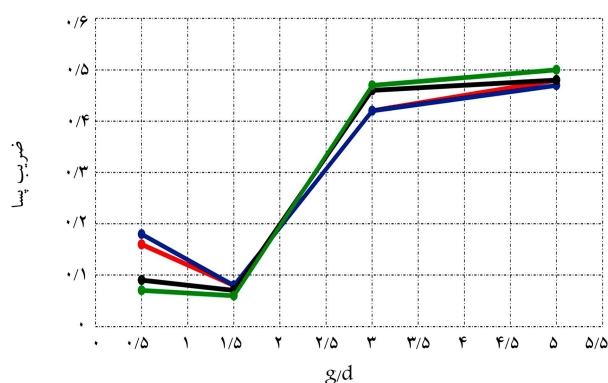


شکل ۱۲. کانتور هم تراز گردابه برای استوانه به همراه صفحه کنترل در حالت های مختلف طولی در $P/d = 0/34$.

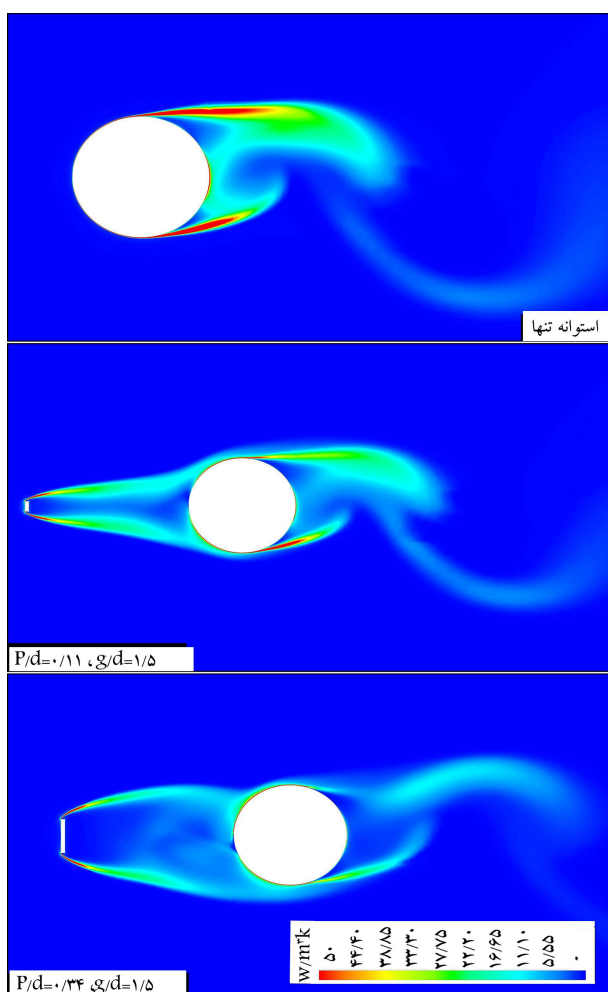




شکل ۱۸. نرخ تولید آنتروپی روی سطح استوانه‌ی تنها و استوانه‌ی با کم‌ترین ضریب پسا.

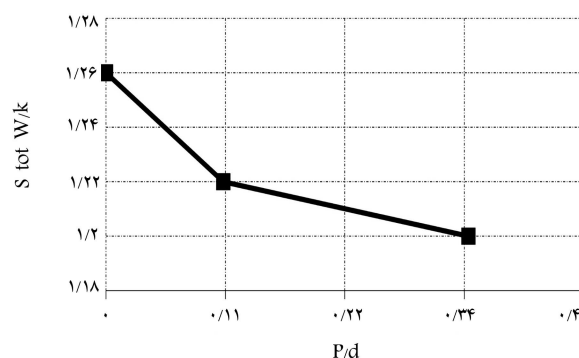


شکل ۱۶. مقایسه ضریب پسای متوسط استوانه با صفحه‌ی کنترل در رینولدزهای مختلف برای حالت‌های متفاوت طولی در $P/d = 0/34$.



شکل ۱۹. کانتور هم‌تراز تولید آنتروپی برای استوانه‌ی تنها و استوانه‌ی همراه با صفحه کنترل.

با قرار دادن یک صفحه‌ی کنترل هر چند کوچک در بالادست جریان، ضریب پسای استوانه به شدت کاهش می‌یابد. وجود صفحه‌ی کنترل در بالادست استوانه باعث افزایش مومنتوم جریان ورودی به استوانه و در نتیجه مقاومت بیشتر جریان لایه‌ی مرزی در برابر گرادین فشار نامطلوب و در نهایت تأخیر در جدایش جریان از سطح استوانه می‌شود. این تأخیر در جدایش جریان موجب افزایش فشار در



شکل ۱۷. تولید آنتروپی کل برای ۳ وضعیت استوانه‌ی تنها و استوانه‌ی همراه با صفحه کنترل در $g/d=1/5$.

در زاویه‌ی کم‌تری اتفاق می‌افتد که یک عامل مهم برای افزایش ضریب پسای فشاری نسبت به حالت $P/d = 0/34$ است.

۳.۳. تولید آنتروپی

همان‌طور که اشاره شد، در این شبیه‌سازی با توجه به هم بودن جریان سیال و استوانه از تولید آنتروپی به واسطه‌ی انتقال حرارت صرف‌نظر شده است. همچنین تولید آنتروپی کل و نرخ تولید آنتروپی روی سطح استوانه برای ۳ وضعیت استوانه‌ی تنها و استوانه‌ی همراه با صفحه کنترل در دو حالت $P/d = 0/11$ و $0/34$ در شرایطی که صفحه در فاصله طولی $g/d=1/5$ قرار دارد بررسی شده است. در این فاصله‌ی طولی که جریان حفره مابین صفحه و استوانه تشکیل شده است، کم‌ترین ضریب پسا برای استوانه در هر دو حالت ارتفاع صفحه به دست آمده بود. تولید آنتروپی کل و نرخ تولید آنتروپی روی سطح استوانه در شرایطی که ضریب پسای استوانه کم‌ترین مقدار را دارد کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۷ و ۱۸). بنابراین نیروی پسای استوانه به شکل مستقیم از طریق تلفات انرژی به تولید آنتروپی وابستگی دارد. کانتور هم‌تراز تولید آنتروپی برای ۳ وضعیت مذکور در شکل ۱۹ قرار داده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه‌ی عددی با بهره‌گیری از کنترل غیرفعال جریان مشخص شد که

در وضعیت $P/d=0/34-g/d=1/5$ به وقوع پیوست و ضریب پسای استوانه تا 90% کاهش پیدا می‌کند. روند کاهشی ضریب پسای استوانه در جریان با رینولدزهای مختلفی با توجه به یکسان بودن الگوی جریان و عدم تغییر ویژه در زاویه‌ی جدایش، یکسان است. با کاهش ضریب پسا تولید آنتروپی نیز کاهش پیدا کرد و مشخص شد نیروی پسای استوانه به شکل مستقیم به تولید آنتروپی وابستگی دارد.

سطح پایین‌دست استوانه و کاهش فشار خالص استوانه در جهت جریان و نهایتاً کاهش پسای استوانه می‌شود. در حالت تشکیل جریان حفره (کویتی)، لایه‌ی برشی دو جسم به هم متصل شده و شکل آیرودینامیکی بهتری را ایجاد می‌کنند. در این حالت، فشار سطح بالادستی استوانه کاهش بیشتری پیدا می‌کند و متعاقباً ضریب پسا با شدت بیشتری افت پیدا می‌کند. در چیدمان بهینه‌ی صفحه‌ی کنترلی با استوانه که جریان حفره تشکیل می‌شود، بیشترین کاهش در ضریب پسا

پانوشته‌ها

1. streamlined body
2. flow separation
3. drag force
4. vortex shedding
5. Reynolds averaged navier–stokes (RANS)
6. cross diffusion term
7. turbulent fluctuations
8. turbulent dissipation rate
9. turbulence viscosity
10. skin friction
11. wall shear stress
12. velocity friction
13. Cavity flow

منابع (References)

1. Ogunremi, A.R. and Sumner, D. "The effect of a splitter plate on the flow around a finite prism," *In Journal of Fluids and Structures*, **59**, pp. 1-22 October (2015).
2. Bimbato, A.M., Alcântara Pereira, L.A. and Hirata, M.H. "Study of the vortex shedding flow around a body near a moving ground," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **99**(1), pp. 7-17 (2011). DOI: 10.1016/j.jweia.2010.10.003.
3. Ashill, P.R. "Flow control: passive, active, and reactive flow management M. gad-el-hak cambridge university press, the edinburgh building, cambridge CB2 2RU, UK. 2000. 421pp. Illustrated. £60. ISBN 0-521-77006-8," *The Aeronautical Journal*, **105**(1045), pp. 150 (2001). DOI: 10.1017/s000192400009206x.
4. Sakamoto, H., Tan, K. and Haniu, H. "An optimum suppression of fluid forces by controlling a shear layer separated from a square prism," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, **113**(2), pp. 183-189 (1991). DOI: 10.1115/1.2909478.
5. Bhattacharya, R., Moshfegh, A. and Jabbarzadeh, A. "Effect of slit inclusions in drag reduction of flow over cylinders," *Applied Mechanics and Materials*, **846**(1), pp. 18-22 (2016). DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.846.18.
6. Qi, J., Qi, Y., Chen, Q. and et al. "A study of drag reduction on cylinders with different v-groove depths on the surface," *Water (Switzerland)*, **14**(1), pp. 1-21 (2022). DOI: 10.3390/w14010036.
7. Gao, D., Chang, X., Tursuntohti, T. and et al "Modification of subcritical cylinder flow with an upstream rod," *Physics of Fluids*, **34**(1). (2022). DOI: 10.1063/5.0075167.
8. Gupta, A. and Saha, A.K. "Suppression of vortex shedding in flow around a square cylinder using control cylinder," *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, **76**, pp. 276-291 (2019). DOI: 10.1016/j.euromechflu.2019.03.006.
9. Tsutsui, T. and Igarashi, T. "Enhancement of heat transfer and reduction of drag of a circular cylinder (flow control using a small rod)," *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B*, **62**(597), pp. 1802-1809 (1996). DOI: 10.1299/kikaib.62.1802.
10. Shehata, A.S., Xiao, Q., Kotb, M.A. and et al. "Effect of passive flow control on the aerodynamic performance, entropy generation and aeroacoustic noise of axial turbines for wave energy extractor," *Ocean Engineering*, **157** December 2017, pp. 262-300 (2018). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.053.
11. Song, L.W. and Wu, S.P. "Suppression of vortex shedding around main circular cylinder by another small control cylinder using immersed boundary method," *Hangkong Dongli Xuebao/Journal of Aerospace Power* (2014). DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2014.06.028.
12. Bourisli, R.I. "Passive drag reduction techniques for modulating the effects of vortex shedding," **2**(1), pp. 2-5 (2014). DOI: 10.7763/IJMMM.2014.V2.107.
13. Aiba, S., Ota, T. and Tsuchida, H. "Heat transfer and flow around a circular cylinder with tripping-wires," *Wärme-und Stoffübertragung*, **12**(3-4), pp. 221-231 (1979) DOI: 10.1007/BF00997314.
14. Wang, J., Xu, Y. and Tian, Y. "Active control of circular cylinder flow by affiliated rotating cylinders," *Science China Technological Sciences*, **56**(5), pp. 1186-1197 (2013). DOI: 10.1007/s11431-013-5208-3.
15. Raghuraman, N., Govardhan, "Wake interference and drag reduction," (1998).
16. Vu, H.C., Ahn, J. and Hwang, J.H. "Numerical investigation of flow around circular cylinder with splitter plate," *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**(6), pp. 2559-2568 (2016) DOI: 10.1007/s12205-015-0209-3.

17. Chou, P.Y. "On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation," *Quarterly of Applied Mathematics*, **3**(1), pp. 38-54 (1945). DOI: 10.1090/qam/11999.
18. Jaramillo, R. "Ansys fluent," *Dynamic Meshes*, **12**, November, pp. 724-746 (2009) [Online]. Available: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/tg/node208.htm>.
19. Bejan, A. "A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer," *Journal of Heat Transfer*, **101**(4), pp.718-725 (1979), DOI: 10.1115/1.3451063.
20. Kock, F. and Herwig, H. "Local entropy production in turbulent shear flows: A high-Reynolds number model with wall functions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**(10-11), pp.2205-2215 (2004). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.025.
21. Asinari, P., Fasano, M. and Chiavazzo, E. "A kinetic perspective on k- ϵ turbulence model and corresponding entropy production," *Entropy* (2016). DOI: 10.3390/e18040121.