



## کنترل جریان و کاهش ضریب پسای استوانه توسط سطوح متحرک با شبیه‌سازی دوبعدی

سید عرفان سلیمی پور\*

مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان  
\* قوچان، کدپستی 94771-67335، esalimipour@qiet.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 30 تیر 1395  
پذیرش: 26 مهر 1395  
ارائه در سایت: 24 آبان 1395

کلید واژگان:

استوانه

سطوح متحرک

لایه مرزی

ضریب توان

ضریب پسا

### چکیده

در این مقاله، به بررسی جریان آرام گذرنده از یک استوانه که در مقابل یک جریان تراکم ناپذیر یکنواخت قرار گرفته، به صورت عددی و در حالت دو بعدی پرداخته شده است. بخش‌هایی از سطح استوانه با سطوحی متحرک که قابلیت کنترل رشد لایه مرزی را دارند جایگزین شده‌اند. سپس اثرات موقعیت سطوح روی ضرایب توان و پسای استوانه تحت سرعت‌های مختلف سطوح در محدوده اعداد رینولدز بین 60 تا 180 مطالعه شده‌اند. برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال، معادلات ناویر-استوکس ناپایا به کمک یک روش کوپل سرعت-فشار موسوم به آر، کی-سیمپلر به روش حجم محدود و با دقت زمانی و مکانی مرتبه دو حل شده‌اند. به منظور اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری تدوین شده، پاسخ‌های حاصل با نتایج عددی موجود مقایسه گردید و تطابق بسیار خوبی به دست آمد. نتایج به دست آمده از این بررسی‌ها نشان می‌دهند که برخی از این سطوح متحرک، ضریب توان کل حرکت سیستم و ضریب پسا را کاهش می‌دهند. همچنین، موقعیت و سرعت بهینه سطوحی که موجب کمینه شدن ضریب توان شده‌اند، به دست آمده‌اند؛ با مشاهده نتایج می‌توان دریافت که در تمامی اعداد رینولدز، حداقل ضریب توان یا به عبارتی ضریب پسای بهینه در زاویه سطح 70 درجه رخ داده است.

## Flow control and drag reduction of circular cylinder using moving surfaces by two-dimensional simulation

Seyed Erfan Salimipour\*

Mechanical Engineering Department, Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran  
\* P.O.B. 94717-67335 Quchan, Iran, esalimipour@qiet.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 September 2016  
Accepted 17 October 2016  
Available Online 14 November 2016

#### Keywords:

Circular cylinder  
Moving surfaces  
Boundary layer  
Power coefficient  
Drag coefficient

### ABSTRACT

Flow around a circular cylinder placed in an incompressible uniform stream is investigated via two-dimensional numerical simulation in the present study. Some parts of the cylinder are replaced with moving surfaces, which can control the boundary layer growth. Then, the effects of the moving surfaces locations on the power and drag coefficients are studied at various surface speeds. The flow Reynolds number is varied from 60 to 180. To simulate the fluid flow, the unsteady Navier-Stokes equations are solved by a finite volume pressure-velocity coupling method with second-order accuracy in time and space which is called RK-SIMPLER. In order to validate the present written computer code, some results are compared with previous numerical data, and very good agreement is obtained. The results from this study show that some of these surfaces reduce the drag coefficients and the coefficient of the total power requirements of the system motion. The optimum location and the speed of the surfaces which cause the minimizing the power coefficient are also obtained. By observing the results it is found that in all Reynolds numbers, the minimum power coefficient or in other words, the optimum drag coefficient occurs at surface angle of 70°.

### 1- مقدمه

کنترل ریزش گردابه توسط محققان مختلف و با روش‌های متعددی مانند دمش و مکش جریان، زبری سطح، استوانه‌های چرخان و سطوح متحرک انجام شده است [1]. یکی از آزمایشات اولیه در زمینه کنترل جریان توسط فاور [2] صورت گرفته است؛ او به کمک یک تسمه متحرک و دو قرقه که روی سطح بالایی یک ایرفویل نصب کرده بود توانست رشد لایه مرزی را کنترل کند و جدایش جریان را تا زاویه حمله 55° به تأخیر بیندازد. استراکوویچ [3] اثرات چند ابزار کنترل جریان از قبیل ایجاد برآمدگی و پوشش روی سطح و همچنین استفاده از تثبیت کننده‌هایی در نزدیکی دنباله جریان را مقایسه نمود. مودی و همکاران [4-6] با ساخت یک تونل باد، اثرات استوانه‌های چرخان کوچک را که به عنوان سطوح متحرک استفاده شده

به دلیل کاربردهای گسترده مهندسی و توانایی مطالعه جنبه‌های مختلف علم دینامیک سیالات روی یک هندسه ساده، جریان گذرنده از استوانه یکی از مسائل مهم محسوب می‌شود. از طرف دیگر، کنترل جریان پیرامون اجسام به واسطه اهمیت آن در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها، مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد. محدود کردن ریزش گردابه‌ها یکی از کاربردهای کنترل جریان است که می‌تواند موجب کاهش نیروهای هیدرو/ایرودینامیکی و ارتعاشات اجسام گردد. از نمونه کاربردهای صنعتی این مسأله می‌توان به استفاده از استوانه در قسمت‌هایی از سطح ایرفویل برای تأخیر در جدایش جریان، خطوط لوله ساحلی، اسکله‌ها و پل‌ها اشاره کرد.

Please cite this article using:

S. E. Salimipour, Flow control and drag reduction of circular cylinder using moving surfaces by two-dimensional simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 12-20, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. E. Salimipour, Flow control and drag reduction of circular cylinder using moving surfaces by two-dimensional simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 12-20, 2016 (in Persian)

یک سیلندر با مقطع مربعی را در عدد رینولدز 100 مطالعه و با استفاده از مکش، ریزش گردابه را متوقف نمودند. چن و همکاران [24] با استفاده از یک دیوار موج‌دار موفق به کنترل ریزش گردابه حاصل از یک استوانه شدند.

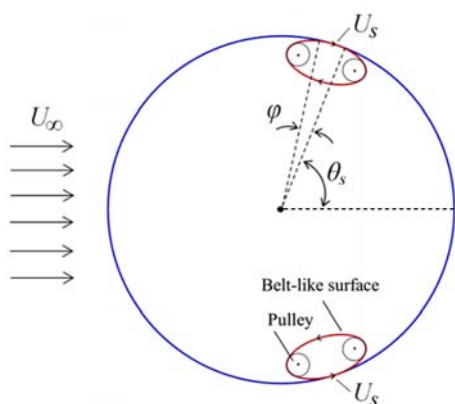
در پژوهش حاضر، کنترل جریان آرام پیرامون یک استوانه با استفاده از سطوح متحرک و در محدوده اعداد رینولدز بین 60 تا 180 مطالعه شده است. در هیچ‌یک از پژوهش‌های گذشته، مطالعه روی یافتن موقعیت و سرعت بهینه سطوح متحرک که موجب کمینه شدن توان مورد نیاز برای حرکت انتقالی استوانه می‌شود، انجام نشده است. چنانچه بر روی یک سطح متحرک، سرعت نسبی میان سطح و جریان به حداقل برسد، رشد لایه مرزی متوقف می‌گردد؛ به علاوه، حرکت سطح یک مومنتم اضافه به لایه مرزی تزریق می‌کند [25]. اهداف اصلی مطالعه حاضر به صورت زیر خلاصه می‌شود.

- شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی جریان گذرنده از استوانه
- استفاده از مفهوم کنترل لایه مرزی با سطوح متحرک (MSBC) برای کنترل جریان پیرامون استوانه
- بررسی اثرات موقعیت سطوح متحرک روی ضریب پسا، ضریب توان و وضعیت ریزش گردابه تحت سرعت‌های مختلف سطوح
- مینیمم‌سازی توان کل مورد نیاز برای حرکت سطوح و حرکت انتقالی استوانه
- به دست آوردن موقعیت و سرعت بهینه سطوح، متناظر با حداقل ضریب توان

به منظور اعمال سطوح متحرک روی استوانه، مطابق شکل 1 از دو سطح متقارن تسمه‌مانند که هر دو به سمت پایین دست جریان در حرکت هستند استفاده شده است.  $\varphi$  و  $\theta_s$  به ترتیب سرعت، زاویه و موقعیت سطح متحرک را نشان می‌دهند. برای دستیابی به اهداف بالا، معادلات ناویر-استوکس برای یک جریان ناپایا، تراکم‌ناپذیر، آرام و دوبعدی با تدوین یک برنامه کامپیوتری حل شده‌اند. به منظور اطمینان از صحت عملکرد حل‌کننده مذکور، نتایج به دست آمده اولیه با نتایج عددی موجود مقایسه شده و انطباق بسیار خوبی میان نتایج حاصل گردیده است.

## 2- روابط ریاضی و عددی

فرم انتگرالی معادلات پیوستگی و مومنتم در فرم بی‌بعد به صورت روابط (1) و (2) بیان می‌گردد.



**Fig. 1** Configuration of moving surfaces on the cylinder as boundary layer control surfaces with their independent variables

شکل 1 پیکربندی سطوح متحرک روی استوانه به عنوان سطوح کنترل کننده لایه مرزی به همراه متغیرهای مستقل مربوط به آنها

بودند، روی چند ایرفویل نظیر NACA 63-218 و جوکوفسکی بررسی کرد؛ نتایج آنها مشخص کرد که نصب استوانه چرخان در لبه حمله، ضریب برای بیشینه را افزایش داده و زاویه حمله واماندگی جریان را تا 48° به تأخیر می‌اندازد. استریکوفسکی و سرینوآسان [7] جریان پیرامون یک استوانه را با قرار دادن مناسب استوانه‌های کنترلی در نزدیکی استوانه اصلی مطالعه نمود و توانست ریزش گردابه را در محدوده‌ای از اعداد رینولدز کنترل کند. القرنی و همکاران [8] با استفاده از یک استوانه چرخان به عنوان یک سطح متحرک روی ایرفویل NACA 0024 موفق شدند ضریب برآ را از 0.85 به 1.63 افزایش دهند و زاویه حمله واماندگی جریان را تا 160% به تأخیر بیندازد. جریان پیرامون یک استوانه به همراه دو استوانه کنترلی چرخان توسط میتال [1] به طور عددی مطالعه شده است. او اثرات فاصله بین استوانه اصلی و استوانه‌های کنترلی را بررسی نمود و دریافت که این فاصله پارامتر بسیار مهمی در بهینه کردن سیستم کنترل جریان محسوب می‌شود. مودی [9] یک مقاله مروری در زمینه کنترل لایه مرزی با سطوح متحرک<sup>1</sup> (MSBC) روی ایرفویل‌ها ارائه داد و اثر موقعیت‌های مختلف المان‌های متحرک را با یکدیگر مقایسه کرد.

کمینه‌سازی ضریب پسا یکی از اهداف اصلی کنترل جریان به شمار می‌رود؛ اما اعمال مسأله کمینه‌سازی که معمولاً شامل قیدگذاری و اعمال شرایط مطلوب می‌باشد، از طریق حل عددی معادلات ناپایای ناویر-استوکس تقریباً غیر ممکن است؛ زیرا در مسائل زمان‌مند، نمی‌توان قیدی را برای پارامتر زمان در نظر گرفت. به همین منظور، چندین روش برای کنترل بهینه جریان ابداع شد [10-13]. کنترل و یا حذف ریزش گردابه در جریان‌هایی که با این پدیده همراه هستند یکی از روش‌های پرکاربرد کاهش پسا می‌باشد. پاتنایک و وی [14] حذف ریزش گردابه پشت یک سیلندر با مقطع D شکل را به کمک طرح تزریق مومنتم زاویه‌ای مطالعه کردند. مودادا و پاتنایک [15] به استفاده از دو مکانیزم دوار ساده توانستند دنباله جریان یک استوانه را برای اعداد رینولدز بین 100 تا 300 کنترل کنند. جهانمیری [16] در یک مقاله مروری روش‌های جدید کنترل جریان را که عموماً برای کاهش نیروی پسا، افزایش نیروی برآ، تعویق جدایش جریان و حذف نویز استفاده می‌شوند، معرفی نمود. ساهو و پاتنایک [17] با قراردادن اجزای دورانی در لبه حمله ایرفویل NACA 0012 مومنتم را به داخل ناحیه دنباله تزریق کردند. چن [18] دو تکنیک متفاوت برای کنترل و توقف ریزش گردابه در جریان آرام پیرامون اجسام ارائه نمود: (1) کنترل غیرفعال<sup>2</sup> با استفاده از صفحه نازک جداکننده که در پایین دست جسم واقع می‌شود؛ (2) کنترل فعال<sup>3</sup> به کمک یک جفت استوانه چرخان با جهت حرکت مخالف یکدیگر. شوکلا و آراکری [19] نیروی پسای یک استوانه را از طریق کمینه‌سازی توان مصرفی و با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیلی و عددی در محدوده اعداد رینولدز بین 1 تا 300 کاهش دادند. ردی و همکاران [20] با استفاده از دو استوانه کنترلی چرخان در دو جهت مختلف، جریان گذرنده از یک استوانه را بررسی کردند و توانستند موقعیت قدرت چرخش مناسب استوانه‌ها را به دست آورند. سلیمی پور و یزدانی [21] با استفاده از یک تیغه کنترل‌کننده حباب جدایش آرام، واماندگی دینامیکی ایرفویل NACA 0012 را کنترل نمودند. هسو و همکاران [22] به کمک یک میله کوچک، ریزش گردابه یک استوانه را در اعداد رینولدز پایین متوقف کردند. ساهو و شریواستاوا [23] جریان گذرنده از

<sup>1</sup> Moving Surface Boundary-layer Control

<sup>2</sup> Passive

<sup>3</sup> Active

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 D} \quad (5)$$

$$C_{d_{ms}} = \frac{F_{d_{ms}}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 D} \quad (6)$$

$$C_p = \frac{F_d U_\infty + F_{d_{ms}} U_s}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 D} = C_d + k C_{d_{ms}} \quad (7)$$

$$C_f = \frac{\tau_s}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (8)$$

که  $C_d$ ،  $C_{d_{ms}}$ ،  $C_p$  و  $C_f$  به ترتیب ضریب پسای استوانه (فشاری و اصطکاکی)، ضریب پسای سطح متحرک (اصطکاکی)، ضریب توان کل و ضریب اصطکاک سطح و همچنین  $F_d$  و  $F_{d_{ms}}$  به ترتیب نیروی پسای استوانه و سطح متحرک هستند. نسبت سرعت  $k = U_s/U_\infty$  به صورت نسبت سرعت سطح متحرک به سرعت جریان آزاد تعریف می‌شود و  $\tau_s$  تنش برشی سطح متحرک است.

### 3- تولید شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

در این پژوهش برای حل جریان، از یک شبکه ترکیبی O-C استفاده شده است. بخشی از این شبکه در شکل 3 مشاهده می‌گردد. بخش O باعث ایجاد یک شبکه متعامد در نزدیکی مرزهای جامد و بخش C برای تسخیر ریزش گردابه در پشت استوانه مناسب می‌باشد. با توجه به شبکه استفاده شده، یک مرز بیرونی دور دست و یک مرز داخلی منطبق بر سطح استوانه وجود دارد که در شکل 4 نشان داده شده است.

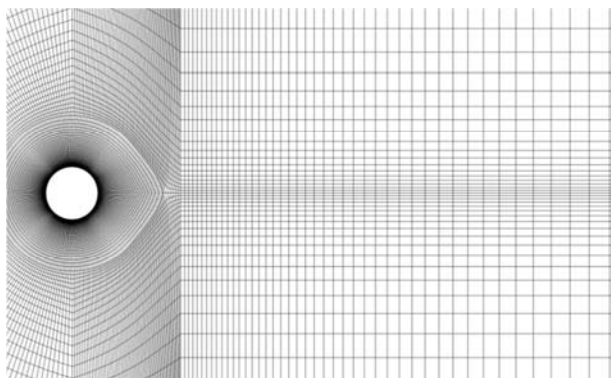


Fig. 3 A part of grid used in flow computations

شکل 3 بخشی از شبکه استفاده شده در محاسبات جریان

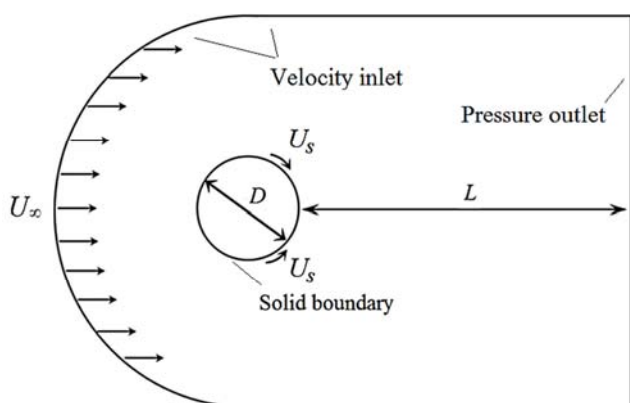


Fig. 4 Boundary conditions applied to flow equations

شکل 4 شرایط مرزی اعمال شده به معادلات جریان

$$\oint_{\partial\Omega} \rho V dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{\Omega} \vec{W} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \vec{j} dS = 0 \quad (2)$$

که  $\Omega$  حجم کنترل،  $\partial\Omega$  سطح محصورکننده حجم کنترل،  $\tau$  زمان،  $V$  سرعت جریان عمود بر سطوح کنترل و  $dS$  المان سطح می‌باشد. بردار متغیرهای بقایی و مجموع شارهای جابجایی و پخش است که طبق روابط (3) بیان می‌شوند.

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho v \end{bmatrix}, \vec{j} = \begin{bmatrix} \rho u V + n_x p - \frac{1}{\text{Re}} \left( n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \rho v V + n_y p - \frac{1}{\text{Re}} \left( n_x \frac{\partial v}{\partial x} + n_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

که  $\rho$  چگالی،  $p$  فشار و  $\text{Re}$  عدد رینولدز جریان بر مبنای قطر استوانه است. سرعت عمود بر سطوح کنترل به صورت حاصل ضرب نقطه‌ای بردار سرعت در بردار یکه عمود بر سطح مطابق رابطه (4) تعریف می‌شود.

$$V \equiv \vec{v} \cdot \vec{n} = n_x u + n_y v \quad (4)$$

در روابط بالا همه طول‌های هندسی نسبت به قطر استوانه ( $D$ )، سرعت‌های جریان نسبت به سرعت جریان آزاد ( $U_\infty$ )، زمان نسبت به  $D/U_\infty$  و فشار نسبت به  $\rho U_\infty^2$  بی‌بعد شده‌اند. معادلات حاکم (1) و (2) در یک دستگاه مختصات منحنی الخط و روی هر حجم کنترل دلخواه، مانند شکل 2 اعمال می‌شوند.

به منظور حل عددی معادلات (1) و (2) از یک روش جدید کوپل سرعت-فشار موسوم به آر، کی-سیمپلر که توسط راجاگوپالان و لستاری [26] معرفی گردیده، استفاده شده است. در این روش که دارای دقت زمانی و مکانی مرتبه دو می‌باشد، معادلات مومنت به صورت صریح و به کمک یک الگوریتم رانگ-کوتای مرتبه چهار حل شده‌اند. مزیت مهم روش مذکور این است که یک معادله دقیق برای میدان فشار ارائه می‌کند که تنها معادله ضمنی و غیرخطی مسئله است و هیچ تصحیحی برای فشار یا میدان سرعت صورت نمی‌گیرد. بنابراین، نیازی به حل معادله تقریبی تصحیح فشار نمی‌باشد. جزئیات بیشتر روش فوق در مرجع [26] آمده است. در این مقاله، معادله ضمنی فشار با الگوریتم اس‌آی‌پی که توسط استون [27] معرفی گردیده، حل شده است.

با حل معادلات فوق، کمیت‌های مورد نیاز از قبیل فشار و مؤلفه‌های سرعت محاسبه شده و سپس، خطوط جریان و ضرایب پسای، توان و اصطکاک سطح حاصل خواهند شد. این ضرایب طبق روابط (5) تا (8) تعریف می‌شود:

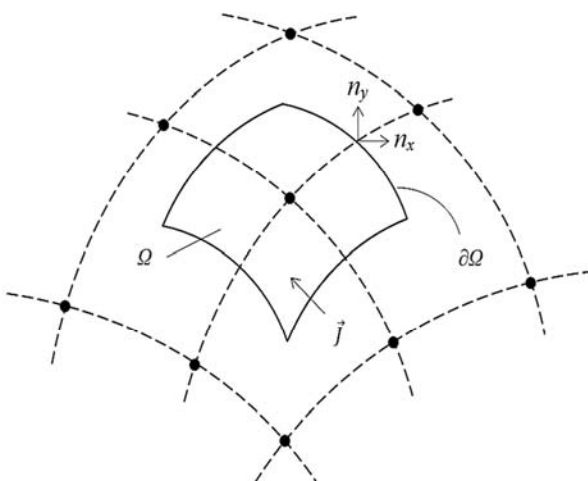
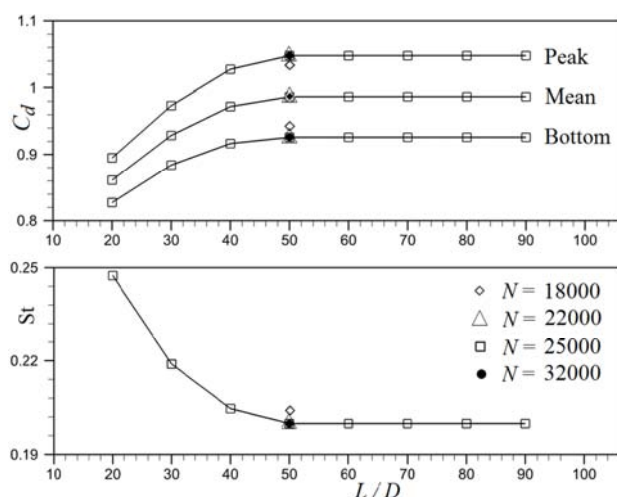


Fig. 2 Control volume for the curvilinear system

شکل 2 حجم کنترل سیستم منحنی الخط

بی‌بعد  $\tau$  در جریانی با عدد رینولدز 300 با نتایج دوبعدی میتال و همکاران [31] مقایسه و در شکل 6 نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که از نظر زمانی، مقدار جزئی اختلاف فاز بین دو منحنی در هر دو قسمت نوسانی و غیر نوسانی وجود دارد که اهمیت چندانی ندارد؛ زیرا شروع فرآیند ریزش گردابه پدیده‌ای تصادفی است و ممکن است در حل‌های عددی مختلف و یا نتایج تجربی، کاملاً یکسان نباشد؛ مسأله مهم، مقدار متوسط، دامنه و فرکانس در بخش نوسانی منحنی‌ها می‌باشد که نتایج قابل قبولی حاصل شده است. لازم به ذکر است که در عدد رینولدز 300 رفتار جریان در واقعیت سه‌بعدی می‌شود [31]؛ از این رو در این بررسی، فقط اعتبارسنجی حل‌کننده حاضر مد نظر بوده است.



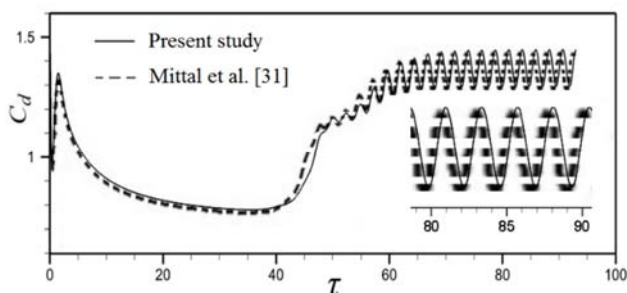
**Fig. 5** Variation of mean drag coefficient and the Strouhal number with respect to  $L/D$  for  $k=1$ ,  $Re=180$ ,  $\theta_s=70^\circ$  and  $\phi=10^\circ$

شکل 5 تغییرات ضریب پسای متوسط و عدد استروال بر حسب نسبت طول به قطر به ازای  $\phi=10^\circ$  و  $\theta_s=70^\circ$ ,  $Re=180$ ,  $k=1$

**جدول 1** مقایسه ضرایب پسا در حل حاضر با نتایج شبیه‌سازی دوبعدی گذشته

**Table 1** Comparison of mean drag coefficients with results from previous 2-D simulation

	Re			
	180	140	100	60
مطالعه حاضر	1.33	1.33	1.35	1.42
روشکو [29]	1.32	1.34	1.36	1.44
هندرسون [30]	1.33	1.33	1.35	1.42
میتال و همکاران [31]	-	-	1.35	-



**Fig. 6** Temporal variation of drag coefficient for  $Re = 300$  in 2-D simulation

شکل 6 مقایسه تغییرات زمانی ضریب پسا در  $Re = 300$  با شبیه‌سازی دوبعدی

روی مرز ورودی، مقادیر چگالی، فشار و سرعت‌ها به صورت روابط (9) در نظر گرفته شده‌اند:

$$\rho = \rho_\infty; p = p_\infty; u = U_\infty; v = 0 \quad (9)$$

که  $\infty$  نمایانگر جریان آزاد می‌باشد. در شرایط مرزی خروجی مطابق رابطه (10)، فشار برابر با فشار جریان آزاد و تغییرات سایر متغیرها برابر با صفر اعمال شده است.

$$p = p_\infty; \frac{\partial \rho}{\partial n} = \frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

روی مرز داخلی، با توجه به شرایط عدم لغزش سیال، سرعت جریان عمود بر سطح استوانه ( $V$ ) برابر با صفر خواهد بود. همچنین، مقادیر چگالی و فشار برابر با مقدار لایه سیال مجاور قرار داده می‌شود.

#### 4- نتایج

##### 4-1- مطالعه استقلال شبکه

با توجه به وجود ریزش گردابه، اثرات آن تا فواصل نسبتاً زیادی در پایین دست جریان انتقال پیدا می‌کند و به همین علت لازم است تا ابعاد مناسبی برای شبکه محاسباتی در نظر گرفته شود؛ بدین منظور، اثر نسبت طول‌های مختلف شبکه به قطر استوانه ( $L/D$ ، شکل 4 ملاحظه گردد) و تعداد سلول‌های شبکه ( $N$ ) بر روی نتایج مورد نظر مطالعه شده است. علاوه بر ضرایب آیرودینامیکی، فرکانس ریزش گردابه‌ها که معمولاً به صورت عدد بدون بعد استروال مطابق رابطه (11) بیان می‌شود، به شبکه محاسباتی وابستگی پیدا می‌کند.

$$St = \frac{fD}{U_\infty} \quad (11)$$

که  $f$  فرکانس ریزش گردابه‌ها است و از نوسانات منحنی ضریب برآ محاسبه می‌شود.

شکل 5 ضرایب پسا و عدد استروال را برای  $6000 \leq N \leq 36000$  متناظر با  $20 \leq L/D \leq 90$  برای  $Re=180$ ,  $\theta_s=70^\circ$ ,  $\phi=10^\circ$  و  $k=1$  نشان می‌دهد. با توجه به نوسانی بودن ضرایب برآ و پسا، مقادیر حداکثر، متوسط و حداقل آنها روی شکل نشان داده شده‌اند تا تأثیر شبکه بر دامنه نوسانات ضرایب فوق مشخص گردد. مشاهده می‌شود که برای  $L/D \geq 50$  که متناظر با  $N \geq 25000$  می‌باشد نتایج، مستقل از شبکه شده‌اند. همچنین برای بررسی اثر تعداد سلول‌ها، نتایجی با  $L/D = 50$  و تعداد سلول‌های 18000، 22000 و 32000 در شکل 5 ارائه شده‌اند که نشان می‌دهند به‌ازای  $N > 22000$  تغییری در نتایج حاصله ایجاد نشده است. به همین منظور، برای محاسبات از شبکه‌ای با  $N = 25000$  و  $L/D = 50$  استفاده شده است. ضخامت شعاعی سلول‌های نزدیک سطح بر اساس محاسبات میتال و کومار [28] برابر با 0.0025 قطر استوانه در نظر گرفته شده است. آنها از این مقدار برای حل جریان گذرنده از استوانه چرخان در عدد رینولدز 200 استفاده نموده‌اند.

##### 4-2- اعتبارسنجی

قبل از به‌کار بردن برنامه کامپیوتری تدوین شده برای تحلیل جریان گذرنده از استوانه به‌همراه سطوح متحرک، لازم است تا اعتبار نتایج حل‌کننده مذکور ارزیابی شود. در ابتدا جریان گذرنده از استوانه بدون سطح متحرک در اعداد رینولدز 60، 100، 140 و 180 شبیه‌سازی شده است. جدول 1 ضرایب پسای متوسط حاصل از حل حاضر و تطابق بسیار خوب آن را با نتایج تجربی روشکو [29]، عددی هندرسون [30] و عددی میتال و همکاران [31] گزارش می‌دهد. به‌عنوان بررسی بعدی، تغییرات ضریب پسای استوانه بر حسب زمان

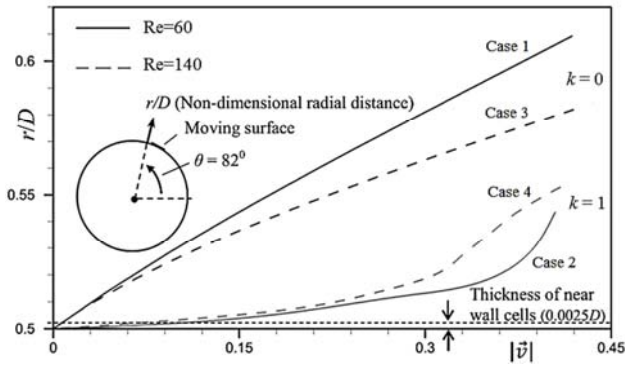


Fig. 8 Comparison of boundary layer growth for  $k=0,1$ ,  $\theta_s=70^\circ$  and  $\varphi=10^\circ$

شکل 8 مقایسه رشد لایه مرزی در شرایط  $k=0,1$  و  $\theta_s=70^\circ$  و  $\varphi=10^\circ$

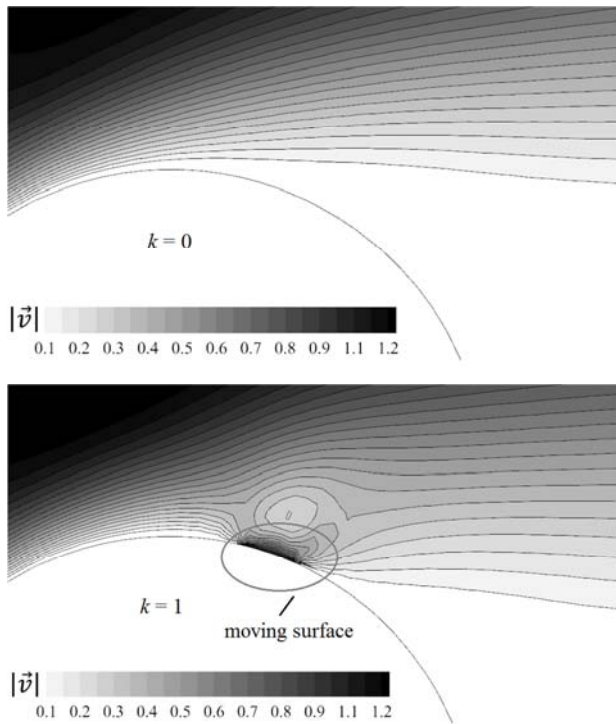


Fig. 9 contours of non-dimensional velocity magnitude for  $k=0, 1$ ,  $\theta_s=70^\circ$ ,  $\varphi=10^\circ$  and  $Re=60$

شکل 9 کانتورهای اندازه سرعت بی بعد در شرایط  $k=0,1$ ،  $\theta_s=70^\circ$  و  $\varphi=10^\circ$  و  $Re=60$

سطوح متحرک با اثری که بر تنش برشی می گذارند، رشد لایه مرزی را کنترل می کنند؛ ضمن اینکه تنش برشی خود تابعی از عدد رینولدز جریان می باشد. اثرات سرعت حرکت سطوح بر ضریب اصطکاک سطح متحرک ( $C_f$ ) تحت شرایط مذکور در شکل 11 ترسیم شده است. به عنوان قرارداد، علامت تنش برشی به سمت پایین دست جریان، مثبت و به سمت بالا دست جریان، منفی فرض شده است. مشاهده می شود که با افزایش نسبت سرعت، ضریب اصطکاک سطح متحرک افزایش یافته است؛ زیرا اختلاف سرعت سطح و سیال لایه مجاور آن بیشتر شده که موجب افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک شده است. این شکل همچنین بیان می کند که با بیشتر شدن عدد رینولدز، تنش های برشی و در نتیجه نیروی پسای اصطکاکی روی سطوح متحرک کمتر می گردد.

به منظور بررسی اعتبار حل کننده برای مسائل دارای سطح متحرک، ضرایب پسای متوسط استوانه چرخان در نسبت سرعت های بین 0 تا 4 و عدد رینولدز 200 محاسبه و با نتایج عددی میتال و کومار [28] مقایسه شده است. شکل 7 انطباق بسیار خوب نتایج را نشان می دهد. بر اساس اعتبارسنجی های ارائه شده، می توان گفت که برنامه کامپیوتری نوشته شده، برای بررسی های پژوهش حاضر قابل اطمینان می باشد.

### 3-4- اثرات سطح متحرک بر میدان جریان

همان طور که قبلاً بیان شد، سطوح متحرک می توانند از رشد لایه مرزی جلوگیری کنند. برای نشان دادن این موضوع، جریان گذرنده از یک استوانه به همراه دو سطح متحرک متقارن با زاویه  $\varphi=10^\circ$  و موقعیت  $\theta_s=70^\circ$  (مطابق شکل 1) در چهار مورد مختلف مطابق جدول 2 مطالعه شده که در شکل 8 تغییرات اندازه سرعت،  $|\vec{v}| = \sqrt{u^2 + v^2}$  نسبت به فاصله شعاعی بی بعد از سطح استوانه،  $r/D$  و در زاویه سطح استوانه  $\theta=82^\circ$  (قبل از سطح متحرک، شکل 8 ملاحظه گردد)، نشان داده شده است. مشاهده می شود که سطح متحرک ضخامت لایه مرزی را کاهش داده است. همچنین شکل فوق نشان می دهد که تغییرات ایجاد شده برای رینولدز 140 کمتر از رینولدز 60 می باشد؛ زیرا با افزایش عدد رینولدز اثرات مومنتم نسبت به اثرات لزجت تقویت می شوند. مورد 4 در شکل 8 با افزایش ناگهانی سرعت همراه می باشد؛ زیرا با افزایش عدد رینولدز، اثرات مومنتم بیشتر شده است؛ از طرفی افزودن سرعت به سطح به نوبه خود یک مومنتم اضافی به لایه مرزی تزریق می کند که در نتیجه موجب کاهش اثرات لزجت در این ناحیه و نهایتاً افزایش مازاد سرعت شده اند. کوچک شدن ناحیه دنباله و ریزش گردابه در پشت استوانه تحت شرایط مذکور که به واسطه تأثیر سطوح متحرک رخ داده است، در کانتورهای اندازه سرعت شکل های 9 و 10 به ترتیب برای اعداد رینولدز 60 و 140 قابل مشاهده می باشد.

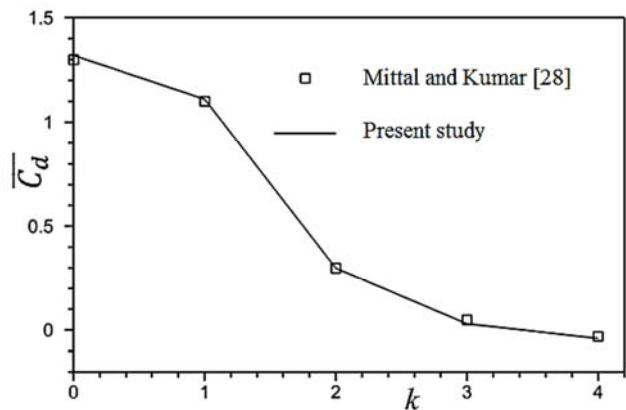


Fig. 7 Comparison of mean drag coefficients of rotating cylinder for  $k=0-4$  and  $Re=200$

شکل 7 مقایسه ضرایب پسای متوسط استوانه چرخان در  $Re=200$  و  $k=0-4$

جدول 2 اطلاعات متغیرهای مستقل برای موارد بررسی شده

مورد	Re	$k$	$\theta_s$ (deg)	$\varphi$ (deg)
1	60	0	70	10
2	60	1	70	10
3	140	0	70	10
4	140	1	70	10

نتیجتاً کاهش پسا می‌گردد و بنابراین، توان لازم برای غلبه بر پسا نیز کم خواهد شد. اما افزایش بیشتر نسبت سرعت، ضریب توان را افزایش داده است؛ زیرا در این حالت، پسای اصطکاکی سطح متحرک بیشتر شده و بنابراین، توان لازم برای حرکت سطح متحرک نیز ازدیاد خواهد یافت.

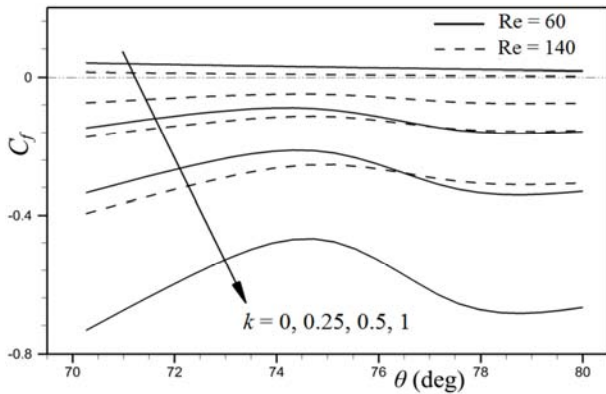


Fig. 11 Skin friction coefficients on the moving surface for some speed ratio and  $\theta_s=70^\circ$ ,  $\varphi=10^\circ$  and  $Re=60, 140$

شکل 11 ضرایب اصطکاک سطح متحرک در چند نسبت سرعت در شرایط  $\theta_s=70^\circ$ ،  $Re=60, 140$  و  $\varphi=10^\circ$

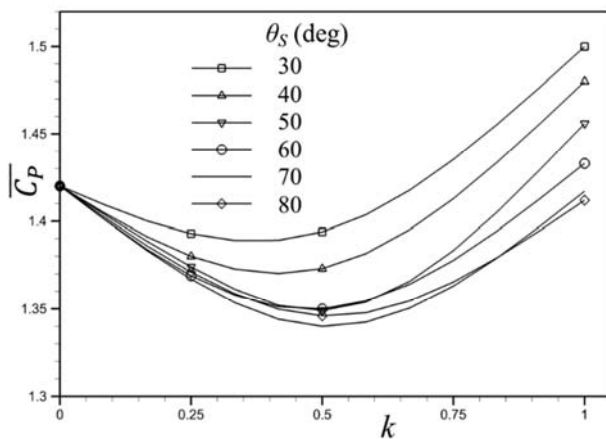


Fig. 12 Power coefficients for various  $k$  and  $\theta_s$  and  $Re=60$

شکل 12 ضرایب توان با مقادیر مختلف  $k$  و  $\theta_s$  و  $Re=60$

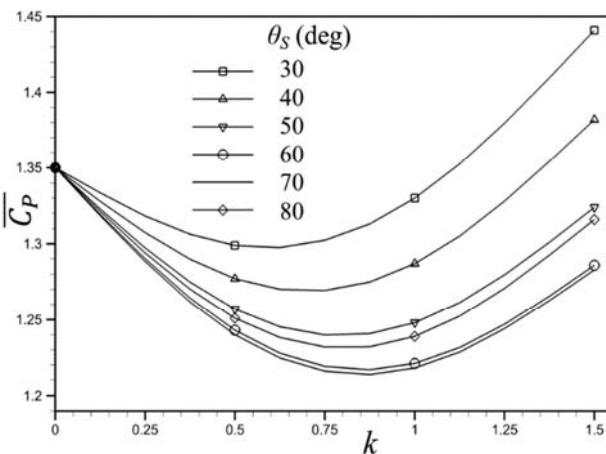


Fig. 13 Power coefficients for various  $k$  and  $\theta_s$  and  $Re=100$

شکل 13 ضرایب توان با مقادیر مختلف  $k$  و  $\theta_s$  و  $Re=100$

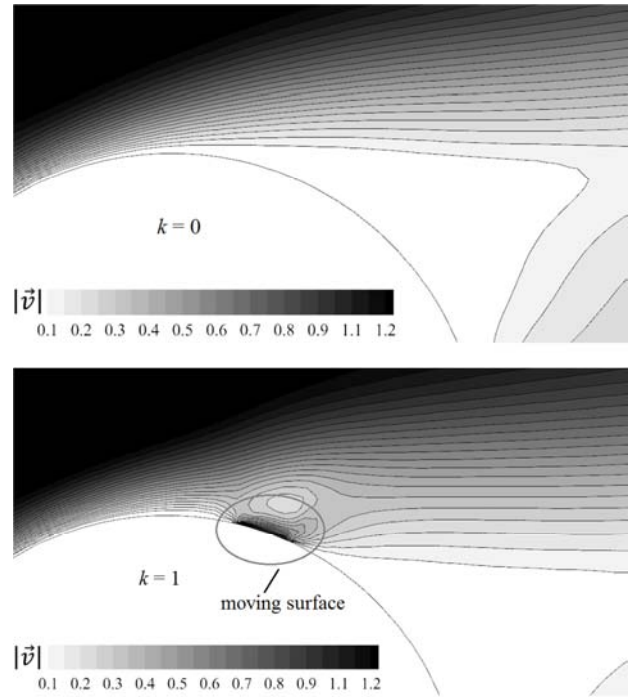


Fig. 10 contours of non-dimensional velocity magnitude for  $k=0, 1$ ,  $\theta_s=70^\circ$ ,  $\varphi=10^\circ$  and  $Re=140$

شکل 10 کانتورهای اندازه سرعت بی‌بعد در شرایط  $\theta_s=70^\circ$ ،  $\varphi=10^\circ$  و  $Re=140$

#### 4-4- اثرات سطح متحرک بر ضرایب توان و پسا

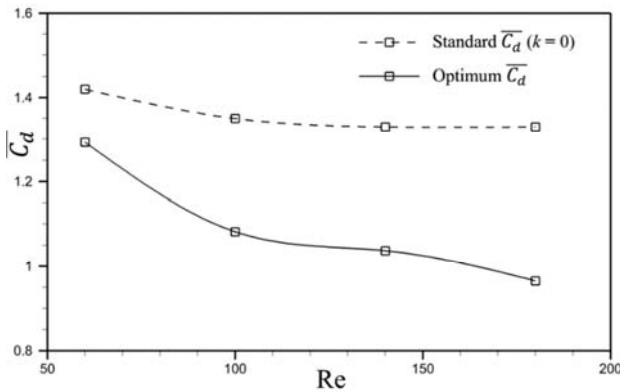
یکی از اهداف پژوهش حاضر، کمینه کردن توان کل سیستم است که شامل: (1) توان مصرفی برای حرکت سطوح متحرک و (2) توان مصرفی برای حرکت انتقالی استوانه و غلبه بر نیروی پسا می‌باشد. بنابراین لازم است تا برای دستیابی به توان کمینه، موقعیت و سرعت سطوح متحرک بررسی و مقادیر بهینه آنها مشخص شود. به منظور مطالعه اثرات سطح متحرک بر ضرایب توان و پسا، جریان‌هایی با اعداد رینولدز بین 60 تا 180 از روی استوانه‌هایی که شامل سطوح متحرک با نسبت سرعت‌های مختلف می‌باشند، عبور داده شده‌اند. سپس مقادیر و روند تغییرات ضرایب توان و پسا بحث و ارزیابی گردیده‌اند. در این بررسی‌ها زاویه سطح متحرک ( $\varphi$ ) ثابت و برابر با 10 درجه در نظر گرفته شده است. شکل‌های 12 تا 15 ضرایب توان متوسط ( $\bar{C}_p$ ) را بر حسب نسبت سرعت به ترتیب برای اعداد رینولدز 60، 100، 140 و 180 نشان می‌دهند. علایم همه منحنی‌ها در شکل‌های فوق یکسان و همانند علایم شکل 12 می‌باشند. ملاحظه می‌گردد که در هر چهار عدد رینولدز،  $\theta_s=70^\circ$  بهترین موقعیت برای قرارگیری سطح متحرک می‌باشد که موجب کمینه شدن ضریب توان شده است. قرار دادن سطح متحرک در زاویه بالاتر موجب دور شدن آن از مرکز گردابه شده و نمی‌تواند مومنتم کافی به لایه مرزی جدا شده تزریق کند و به همین دلیل با افزایش ضریب توان همراه شده است. همچنین با قرارگیری سطح متحرک در زاویه‌های پایین‌تر، مومنتم تزرقت شده در ناحیه وسیع‌تری پخش می‌شود و بنابراین به نسبت سرعت بیشتری نیاز است؛ اما افزایش نسبت سرعت موجب افزایش تنش برشی سطح و در نتیجه افزایش ضریب توان شده است.

همچنین در همه منحنی‌ها می‌توان دید که با افزایش نسبت سرعت، ضریب توان در ابتدا روند کاهشی دارد؛ زیرا همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، سطح متحرک موجب کوچک شدن لایه مرزی و ناحیه ریزش گردابه و

جدول 3 شرایط بهینه متناظر با ضرایب توان کمینه

**Table 3** Optimum conditions corresponding to the minimum power coefficients

$\bar{C}_d$	$\bar{C}_{P min}$	$\theta_s$ (deg.)	$k$	Re
1.285	1.340	70	0.5	60
1.082	1.214	70	0.9	100
1.037	1.142	70	1.1	140
0.965	1.084	70	1.3	180



**Fig. 16** comparison of the optimum and standard mean drag coefficients

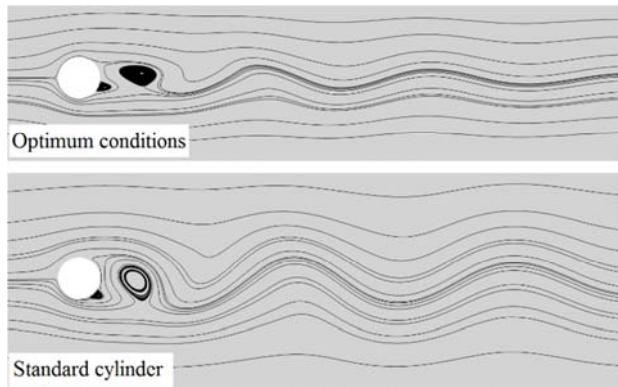
شکل 16 مقایسه ضرایب پسای متوسط بهینه و استاندارد

خطوط جریان نشان داده شده در شکل 17 تأثیر سطوح متحرک بر ریزش گردابه‌های پشت استوانه را در عدد رینولدز 180 و تحت شرایط بهینه (گزارش شده در جدول 3) با حالت استاندارد مقایسه می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رود، نواحی ریزش گردابه و دامنه نوسانات جریان نسبت به استوانه استاندارد کوچکتر شده است.

### 5- جمع‌بندی

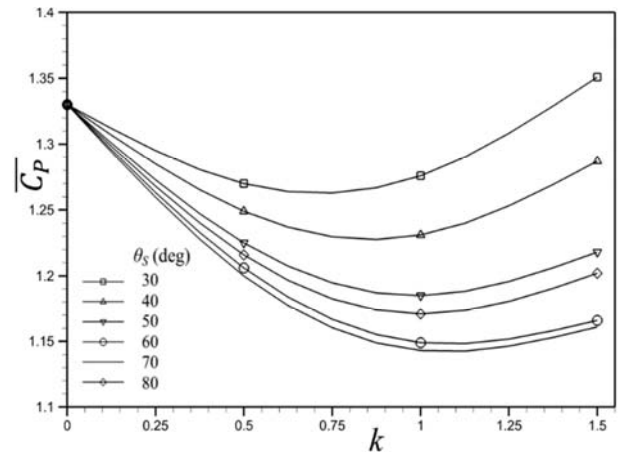
در پژوهش حاضر، جریان ناپایای لزج پیرامون یک استوانه به صورت عددی شبیه‌سازی شد و سپس از تعدادی سطح متحرک برای کنترل رشد لایه مرزی و ریزش گردابه جریان استفاده شد. معادلات جریان به کمک یک روش عددی جدید کوپل فشار-سرعت موسوم به آر-کی-سیمپلر حل و نتایج زیر حاصل شدند:

- سطوح متحرک می‌توانند موجب کاهش ضخامت لایه مرزی و کوچک شده ناحیه دنباله و ریزش گردابه پشت استوانه شوند.



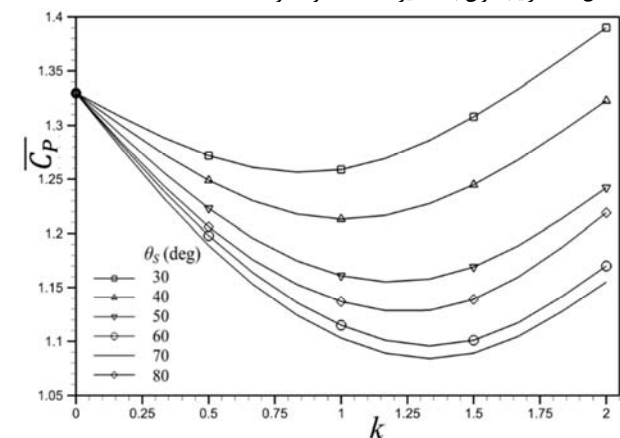
**Fig. 17** comparison of vortex shedding for optimum and standard conditions, Re= 180

شکل 17 مقایسه ریزش گردابه برای شرایط بهینه و استاندارد در Re= 180



**Fig. 14** Power coefficients for various  $k$  and  $\theta_s$  and Re=140

شکل 14 ضرایب توان با مقادیر مختلف  $k$  و  $\theta_s$  و Re=140



**Fig. 15** Power coefficients for various  $k$  and  $\theta_s$  and Re=180

شکل 15 ضرایب توان با مقادیر مختلف  $k$  و  $\theta_s$  و Re=180

نتایج بالا بیان می‌کنند که به‌ازای هر عدد رینولدز، یک موقعیت و نسبت سرعت بهینه وجود دارد که منجر به کمینه شدن ضریب توان می‌شود. این مقادیر بهینه به‌همراه ضرایب توان متوسط کمینه ( $\bar{C}_{P min}$ ) و ضرایب پسای متوسط متناظر با آن ( $\bar{C}_d$ ) برای اعداد رینولدز مذکور، در جدول 3 ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، ضریب توان متوسط در نسبت سرعت‌های بیشتری به مقدار کمینه خود می‌رسد؛ ضمن اینکه مقدار آن با افزایش نسبت سرعت و رینولدز، کاهش یافته است. در حقیقت، اعداد رینولدز بیشتر، توان مصرفی کل کمتری نیاز دارند.

شکل 16 مقایسه ضرایب پسای متوسط در شرایط بهینه و استاندارد (استوانه بدون سطح متحرک) را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. دیده می‌شود که سطوح متحرک، کاهش خوبی را در ضریب پسای سبب شده‌اند، به طوری که استوانه در شرایط بهینه، به ترتیب 10، 20، 22 و 28 درصد کاهش ضریب پسای نسبت به حالت استاندارد در اعداد رینولدز 60، 100، 140 و 180، داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، ضریب پسای متوسط کاهش و درصد بهبود آن افزایش یافته است. زیرا افزایش رینولدز، تنش‌های برشی و در نتیجه پسای اصطکاکی سطوح متحرک را کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که سطوح متحرک در اعداد رینولدز بیشتر، کارایی بهتری دارند؛ البته باید توجه داشت که در اعداد رینولدز بزرگتر از 180، جریان در دنباله پشت استوانه، سه‌بعدی و آشفتگی می‌شود [32] و احتمال دارد که روی عملکرد سطوح متحرک تأثیر بگذارد.

- [5] V. J. Modi, F. Mokhtarian, M. S. U. K. Fernando, P. Lake, T. Yokomizo, Moving surface boundary-layer control as applied to two-dimensional airfoils, *Journal of Aircraft*, Vol. 28, No. 2, pp. 104–112, 1991.
- [6] V. J. Modi, E. Shih, B. Ying, T. Yokomizo, Drag reduction of bluff bodies through momentum injection, *Journal of Aircraft*, Vol. 29, No. 1, pp. 429–436, 1992.
- [7] P. J. Strykowski, K. R. Sreenivasan, On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 218, No. 1, pp. 71–107, 1990.
- [8] A. Z. Al-Garni, A. M. Al-Garni, S. A. Ahemd, A. Z. Sahin, Flow control for an aerofoil with leading edge rotation: An experimental study, *Journal of Aircraft*, Vol. 37, No. 4, pp. 617–622, 2000.
- [9] V. J. Modi, Moving surface boundary-layer control: A review, *Journal of fluids and structures*, Vol. 11, No.1, pp. 627–663, 1997.
- [10] M. Gad-El-Hak, Modern developments in flow control, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 49, pp. 365–379, 1996.
- [11] F. Abergel, R. temam, On some control problems in fluid mechanics, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 1, No. 6, pp. 303–325, 1990.
- [12] T. T. Medjo, R. temam, M. Ziane, Optimal and robust control of fluid flows: some theoretical and computational aspects, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 61, No. 1, pp. 010802-1-010802-23, 2008.
- [13] C. Homescu, I. M. Navon, Z. Li, Suppression of vortex shedding for flow around a circular cylinder using optimal control, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 38, No. 1, pp. 43–69, 2002.
- [14] B. S. V. P. Patnaik, G. W. Wei, Controlling wake turbulence, *Physical Review Letters*, Vol. 88, No. 5, pp. 054502-1-054502-4, 2002.
- [15] S. Muddada, B. S. V. Patnaik, An active flow control strategy for the suppression of vortex structures behind a circular cylinder, *European Journal of Mechanics B – Fluids*, Vol. 29, No.1, pp. 93–104, 2010.
- [16] M. Jahanmiri, Active Flow Control: A Review, *Research report 2010:12*, Göteborg, Sweden, 2010.
- [17] R. Sahu, B.S.V. Patnaik, CFD simulation of momentum injection control past a streamlined body, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid*, Vol. 21, No. 8, pp. 980–1001, 2011.
- [18] A. S. Chan, *Control and suppress the laminar vortex shedding off two-dimensional bluff bodies*, Ph.D. thesis, Stanford university, USA, 2012.
- [19] R. K. Shukla, J. H. Arakeri, Minimum power consumption for drag reduction on a circular cylinder by tangential surface motion, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 715, No.1, pp. 597–641, 2013.
- [20] M. S. Reddy, S. muddada, B. S. V. Patnaik, Flow past a circular cylinder with momentum injection: Optimal control cylinder design, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 45, No.1, pp. 1–27, 2013.
- [21] S. E. Salimipour, Sh. Yazdani, Dynamic stall control of a low reynolds number airfoil with a separation bubble control blade, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 393–401, 2015. (in Persian)
- [22] L. C. Hsu, D. C. Lai, j. Z. Ye, Suppression of vortex shedding of circular cylinder by a small control rod, *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vol. 477–478, No.1, pp. 265–270, 2013.
- [23] A. K. Saha, A. Shrivastava, Suppression of vortex shedding around a square cylinder using blowing, *Indian Academy of Sciences*, Vol. 40, No. 3, pp. 769–785, 2015.
- [24] W. Chen, Y. Liu, H. Hu, Suppression of vortex shedding from a circular cylinder by using a traveling wave wall, *52nd Aerospace Sciences Meeting*, 13–17 January 2014, National Harbor, Maryland, 2014.
- [25] M. Gad-El-Hak, D. M. bushnell, Separation Control: Review, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, No. 1, pp. 5–30, 1991.
- [26] R. G. Rajagopalan, A. D. Lestari, RK-SIMPLER: Explicit Time-Accurate Algorithm for Incompressible Flows, *AIAA Journal*, Vol. 54, No. 2, pp. 616–624, 2016.
- [27] H. L. Stone, Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations, *SIAM Journal of Numerical Analysis*, Vol. 5, No. 3, pp. 530–538, 1968.
- افزایش عدد رینولدز و نسبت سرعت به ترتیب اثرات سطح متحرک را کاهش و اصطکاک سطح را افزایش می‌دهند.
- با افزایش نسبت سرعت، ضریب توان در ابتدا روند کاهشی دارد؛ اما افزایش بیشتر نسبت سرعت، ضریب توان را افزایش داده است.
- به‌ازای هر عدد رینولدز، یک موقعیت و نسبت سرعت بهینه برای سطوح متحرک وجود دارد که منجر به کمینه شدن ضریب توان می‌شود.
- استفاده از سطوح متحرک در محدوده اعداد رینولدز بین 60 تا 180، کاهش خوبی را در ضریب پسا نسبت به استوانه استاندارد نتیجه می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، ضریب پسای متوسط کاهش و درصد بهبود آن افزایش می‌یابد.
- سطوح متحرک موجب کوچکتر شدن نواحی ریزش گردابه و کاهش نوسانات خطوط جریان نسبت به استوانه استاندارد می‌شوند که این نوسانات به‌واسطه تغییرات نیروهای آیرودینامیکی حاصل از ریزش گردابه به‌وجود می‌آیند.

## 6- فهرست علائم

$C_d$  ضریب نیروی پسا ( $2F_d/\rho U_\infty^2 D$ )

$C_p$  ضریب توان ( $2P/\rho U_\infty^3 D$ )

$D$  قطر استوانه (m)

$k$  نسبت سرعت سطح متحرک به سرعت جریان آزاد

$p$  فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )

Re عدد رینولدز جریان

$U_\infty$  سرعت جریان آزاد ( $\text{ms}^{-1}$ )

$U_s$  سرعت سطح متحرک ( $\text{ms}^{-1}$ )

$u$  مؤلفه افقی سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )

$v$  مؤلفه عمودی سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )

## علائم یونانی

$\theta$  زاویه نقاط سطح استوانه نسبت به مرکز آن (deg.)

$\theta_s$  موقعیت سطح متحرک (deg.)

$\tau$  زمان بی‌بعد ( $2U_\infty t/D$ )

$\phi$  زاویه سطح متحرک (deg.)

## بالا نویس

– مقدار متوسط

## زیر نویس

$\infty$  جریان آزاد

## 7- مراجع

- [1] S. Mittal, Control of flow past bluff bodies using rotating control cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15, No. 1, pp. 291–326, 2001.
- [2] A. Favre, *Contribution a l'étude expérimentale des mouvements hydrodynamiques à deux dimensions*. Ph.D. thesis presented to the University of Paris, France, 1938.
- [3] M. M. Zdravkovich, Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 7, No. 1, pp. 145–189, 1981.
- [4] V. J. Modi, J. L. C. Sun, T. Akutsu, P. Lake, K. McMillan, P. G. Swinton, D. Mullins, Moving-surface boundary-layer control for aircraft operation at high incidence, *Journal of Aircraft*, Vol. 18, No. 11, pp. 963–968, 1981.



- [31] R. Mittal, H. Dong, M. Bozkurtas, F. m. Najjar, A. Vargas, A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No.1, pp. 4825–4852, 2008.
- [32] S. P. Singh, S. Mittal, Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 47, No.1, pp. 75–98, 2005.
- [28] S. Mittal, B. Kumar, Flow past a rotating cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 476, No.1, pp. 303-334, 2003.
- [29] A. Roshko, Experiments on the flow past a circular cylinder at very high reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, No.1, pp. 345–356, 1961.
- [30] R.D. Henderson, Details of the drag curve near the onset of vortex shedding, *Phys. Fluids*, Vol. 7, No. 9, pp. 2102–2104, 1995.