دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران
تهران، ۱۲- ۱۰ اسفند ماه ۱۳۸۹

شبیه‌سازی عددی جریان مغشوش حول استوانه دوبعدی در دو حالت جریان آزاد و جریان نزدیک سطح و ارائه رابطه‌ای کلی برای توزیع سرعت روی آن

محمدحسن جوارشکیان[۱]، احمد پارسانیا[۲]، مهدی نوروزی[۳]
۱و۲و۳- دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک

چکیده

در این مقاله، جریان مغشوش سیال بر روی استوانه دوبعدی در دو حالت جریان آزاد و جریان در نزدیک سطح شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده است. پس از همگرایی حل عددی و تکرار حل برای سرعت‌های مختلف، رابطه‌ای کلی برای توزیع سرعت لبه لایه مرزی جریان آزاد مغشوش روی استوانه (تا نقطه جدایش جریان) ارائه شده است. این رابطه برحسب عدد رینولدز و طول کمان طی‌شده روی استوانه می‌باشد. رابطه کلی ارائه شده برای توزیع سرعت جریان مغشوش در محدوده اعداد رینولدز $۵/۵\times۱۰^{۶}$ تا ۱۵×۱۰^{۶} قابل استفاده است. به‌منظور اعتبارسنجی حل، توزیع ضریب فشار جریان آزاد روی استوانه حاصل از پروفیل سرعت حاضر با حل عددی و نتایج تجربی مقایسه گردیده است. هم‌چنین در جریان حول استوانه نزدیک سطح در عدد رینولدز ۴×۱۰^{۴}، اثر فاصله از سطح استوانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل حاکی از انطباق مناسب حل عددی حاضر با نتایج تجربی و عددی دیگر دارد. مشاهده گردیده که با نزدیک شدن استوانه به سطح منطقه ویک پشت استوانه و همچنین طول آن افزایش می‌یابد.

واژه های کلیدی: *مغشوش-استوانه-توزیع سرعت-جریان آزاد- جریان نزدیک سطح*

مقدمه

جریان آزاد روی استوانه و نیز جریان روی استوانه در نزدیک سطح, به عنوان دو جریان پایه در مکانیک سیالات مطرح می‌باشند که از جنبه کاربردی نیز حائز اهمیت هستند. زمانی‌که پرنده‌ای در نزدیکی سطحی قرار می‌گیرد دو پدیده افزایش برآ و کاهش پسا به‌صورت هم‌زمان رخ می‌دهد. نتیجه این دو اثر, افزایش نسبت برآ به پسا, L/D, است. بدین ترتیب کاهش فاصله از دیواره موجب افزایش بازدهی پرنده می‌شود. لذا مطالعه پرنده نزدیک سطح از این منظر حائز اهمیت بوده و توجه و تحقیق بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. جریان در نزدیکی فین‌های خنک‌کن، لوله‌های مبدل حرارتی، زیردریایی‌های نزدیک سطح آب از نمونه‌های کاربردی این دو جریان می‌باشند. پژوهش‌های مختلفی در زمینه جریان آزاد روی استوانه و نیز استوانه نزدیک سطح انجام شده است. دانگ و همکارانش رابطه‌ای را برای ضریب برآ برحسب اعداد رینولدز ارائه داده‌اند [۱]. ماکچن اونگ و همکارانش نمودارهایی را برای تغییرات ضریب برآ و پسای جریان حول استوانه در اعداد رینولدز بالا ارائه نموده است [۲]. لی و همکاران[۳]، نیشینو و همکاران [۴و۵] نیز در زمینه جریان روی استوانه در نزدیکی سطح مطالعاتی را انجام داده‌اند و پس از مطالعات تجربی, دقت مدل‌های مختلف توربولنسی در پیش‌بینی جریان حول استوانه نزدیک سطح را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

با توجه به اهمیت پدیده اثر سطحی و گسترش آنها در حوزه‌های مختلف اعم از نظامی, حمل و نقل, گردشگری, لازم است که تأثیر شرایط مختلف هندسه بر روی این پدیده مورد بررسی قرار گیرد. مقاله حاضر شامل دو بخش است. در بخش اول، پس از حل عددی جریان مغشوش روی استوانه در جریان آزاد اجرای متعدد برنامه برای اعداد رینولدز مختلف در محدوده جریان مغشوش، رابطه‌ای برای توزیع سرعت جریان پتانسیل روی استوانه برحسب طول طی شده روی استوانه و عدد رینولدز ارائه گردیده و نتایج آن با یکدیگر نتایج تجربی و عددی دیگر مقایسه شده است. در بخش دوم پس از حل عددی جریان مغشوش حول استوانه نزدیک سطح و اطمینان از همگرایی و استقلال از شبکه‌بندی, اثرات تغییر فاصله استوانه از سطح بر محدوده و طول منطقه ویک پشت استوانه و نیز اثر تغییر فاصله بر ضرایب فشار حول استوانه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

روابط و معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان آزاد و نزدیک سطح بر روی استوانه باید معادلات اساسی حاکم بر میدان جریان حل شود که شامل معادلات بقای جرم، ممنتوم و اسکالر می باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{\mathbf{V}}) = S_m \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{\mathbf{V}})}{\partial t} + div(\rho \vec{\mathbf{V}} \otimes \vec{\mathbf{V}} - \vec{\mathbf{T}}) = \vec{\mathbf{S}}_{\mathbf{v}} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + div(\rho \vec{\mathbf{V}} \phi - \vec{\mathbf{q}}) = \vec{\mathbf{S}}_{\mathbf{\Phi}} \qquad (۳)$$

که ρ چگالی، $\vec{\mathbf{V}}$ سرعت، ϕ متغیر بدون بعد، $\vec{\mathbf{T}}$ تنسور تنش و $\vec{\mathbf{q}}$ بردار شار پخشی است. روش مورد استفاده برای حل معادلات فوق، روش حجم محدود می باشد که با انتگرال گیری از معادلات فوق روی حجم کنترل و استفاده از قضیه گوس و دیورژانس، معادلات گسسته شده و ترم نفوذ، از طرح تفاضل مرکزی و ترم جابه‌جایی از طرح اختلاف بالادست به‌دست آمده است. هندسه مورد بررسی، استوانه‌ای دوبعدی به قطر واحد است که پس از شبکه بندی سازمان‌یافته لایه مرزی آن و اطمینان از استقلال از شبکه، با استفاده از حل عددی ضمنی و نیز اعمال شرایط مرزی مناسب، تحلیل شده است. مدل اغتشاشی مورد استفاده، مدل استاندارد $k-\varepsilon$ می‌باشد. روابط مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k - \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) = G - \rho \varepsilon \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon - \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۵)$$

که ضرایب و ثوابت روابط (۵) و (۶) بر اساس مدل استاندارد $k-\varepsilon$ می‌باشد.

نتایج

به منظور اعتبارسنجی حل عددی, در شکل (۱) توزیع فشار در خارج لایه مرزی جریان آزاد بر روی استوانه, از نقطه سکون تا نزدیک نقطه جدایش در عدد رینولدز مغشوش $۸/۴\times۱۰^{۶}$ با نتایج تجربی و عددی مرجع [۶] مقایسه

۱- دانشیار گروه مکانیک
۲- کارشناس ارشد هوافضا (آیرودینامیک)، ۰۹۱۷۷۷۱۴۴۱۸،
ahmad.parsania@yahoo.com (نویسنده مخاطب)
۳- دانشجوی دکتری مکانیک

شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج حل عددی حاضر با نتایج تجربی و عددی سازگاری مناسبی دارد؛ لذا می‌توان به صحت حل عددی اطمینان پیدا کرد. در شکل ۲ چگونگی توزیع سرعت مماس بر استوانه در نزدیکی نقطه جدایش در رینولدزهای مختلف نشان داده شده است. با بی‌بعدسازی این نمودار با سرعت ماکزیمم لبه لایه مرزی در هر رینولدز، چندجمله‌ای درجه پنج زیر برای توزیع سرعت لبه لایه مرزی استخراج می‌گردد:

$$\frac{U_e}{U_{\max}} = 0.0362x^5 - 0.0109x^4 - 0.1004x^3 - 0.0173x^2 + 1.0946x - 0.0009 \qquad (۱)$$

که در آن x طول کمان طی شده روی استوانه است. این طول با شعاع استوانه بی‌بعد شده است. با پیشنهاد رابطه‌ای برای $U_{\max}/U_\infty$ به صورت:

$$\frac{U_{\max}}{U_\infty} = 6.21\times10^{15}\,\mathrm{Re}^{-2.472}+1.595 \qquad (۲)$$

و ضرب آن در رابطه (۱) ، توزیع سرعت کلی جریان آزاد خارج لایه مرزی مغشوش برحسب رینولدز و طول کمان طی‌شده روی استوانه، به‌دست می‌آید:

$$\frac{U_e}{U_\infty} = [0.0362x^5 - 0.0109x^4 - 0.1004x^3 - 0.0173x^2 + 1.0946x - 0.0009]\times[6.21\times10^{15}\,\mathrm{Re}^{-2.472}+1.595] \qquad (۳)$$

این رابطه با حداکثر ٪۴ خطا، برای رینولدزهای مختلف در حوزه جریان مغشوش قابل استفاده است. با توجه به در دسترس نبودن نتایج تجربی توزیع سرعت در این حوزه از سیال –چنان‌چه در مرجع [۴] بدان اذعان شده است– به‌منظور راستی‌آزمایی نتایج، در جدول (۱)، نقطه جدایش حاصل از حل عددی حاضر، با نقطه جدایش حاصل از معیار تقریبی استردفورد مقایسه شده که نتایج حاکی از انطباق مناسب حل عددی حاضر با نتایج این معیار دارد.

در شکل (۳) استوانه نزدیک دیواره و نحوه شبکه‌بندی روی آن نشان داده شده است. به‌منظور دقت حل در نزدیک دیواره‌های سطح و استوانه، شبکه به قدری ریز شده است که y^+ در نزدیک دیواره از عدد ۳۰ تجاوز نکند. با در نظر گرفتن این محدوده برای y^+ ، می‌توان از دقت روابط نزدیک در پیش‌بینی خواص نزدیک دیواره‌ها اطمینان حاصل کرد.

شکل (۴) نمایش توزیع سرعت در لایه مرزی حول استوانه نزدیک سطح در حوالی نقطه جدایش سطح زیرین استوانه را نشان می‌دهد. پروفیل مشابهی برای سطح بالایی استوانه نزدیک به سطح حاصل می‌شود.

هم‌چنین شکل (۵) خطوط جریان حول استوانه نزدیک سطح نشان می‌دهد. فشردگی خطوط جریان در قسمت زیرین استوانه در نزدیکی سطح زمین در این شکل مشهود است. علت این فشردگی خطوط جریان را می‌توان به شکل‌گیری منطقه‌ای به صورت شیپوره همگرا–واگرا حاصل از سطح زیرین استوانه و سطح دیواره نسبت داد که باعث سرعت‌گرفتن جریان در منطقه همگرا و کند شدن سرعت در منطقه واگرا شده است.

جدول۱- مقایسه بین نقطه جدایش پیش‌بینی‌شده جریان روی استوانه با نقطه جدایش حاصل از معیار استردفورد در رینولدزهای مختلف.

Re	$\varphi_{sep.Stradford}$	$\varphi_{sep.Numerical}$
5.6×10^6	106.8°	105.8°
7.3×10^6	107.3°	106.6°
11.3×10^6	108.5°	107.2°
15×10^6	109.1°	107.4°

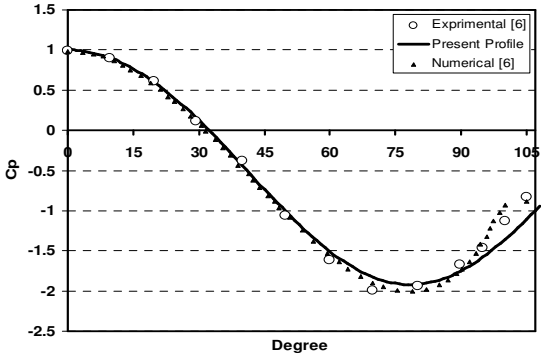
در شکل (۶) کانتورهای سرعت حول استوانه نزدیک سطح در فواصل مختلف از سطح با یکدیگر مقایسه گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به سطح (H/d کوچک‌تر)، کانتور سرعت حول استوانه تقارن خود را از دست می‌دهد و منطقه ویک پشت استوانه افزایش خواهد یافت؛ تا جایی که در $H/d = 0.1$ ، منطقه ویک پشت استوانه به سطح زمین برخورد می‌کند. در شکل (۷) طول منطقه غیرچرخشی پشت استوانه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن استوانه به سطح، طول منطقه غیرچرخشی و کم‌سرعت پشت استوانه افزایش می‌یابد و منطقه ویک تقارن خود را از دست داده و به دیواره متمایل می‌شود. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده از حل عددی حاضر با نتایج تجربی مرجع [۷] و نتایج حل عددی به روش DNS ارائه شده در مرجع [۵] مقایسه شده است که تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج حل حاضر با حل عدی DNS و نتایج تجربی مشاهده می‌شود. علت به‌وجود آمدن اختلاف بین حل حاضر با نتایج تجربی در

در شکل (۸) نمودارهای ضریب فشار حول استوانه نزدیک به سطح در فواصل مختلف استوانه از سطح با یکدیگر مقایسه شده است. منطقه تقریباً تخت میانی نمودار (۸) معرف منطقه ویک می‌باشد. این منطقه برای استوانه نزدیک‌تر به دیواره ($H/d = 0.1$) وسیع‌تر است. به بیان دیگر، مطابق شکل، با نزدیک شدن استوانه به دیواره، جدایش جریان در بالای استوانه زودتر رخ می‌دهد اما در قسمت زیرین استوانه تغییر چندانی در نقطه جخ نداده است.

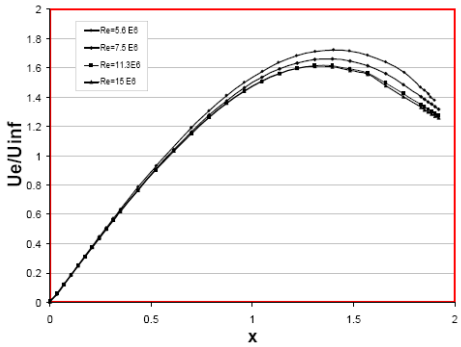
نتیجه گیری

در این پژوهش جریان مغشوش آزاد و جریان مغشوش نزدیک سطح حول استوانه دو بعدی به‌صورت عددی شبیه‌سازی و مشخصات جریان در این دو استخراج گردید. در جریان مغشوش آزاد، رابطه‌ای کلی برای پروفیل سرعت لبه لایه مرزی بر حسب عدد رینولدز و طول کمان طی شده روی استوانه ارائه شد. در جریان مغشوش نزدیک سطح، اثر فاصله از سطح بر محدوده و طول منطقه پشت استوانه بررسی شد. مقایسه نتایج این تحلیل با نتایج تجربی و عددی حاکی از دقت این تحلیل در پیش‌بینی مشخصات جریان دارد.

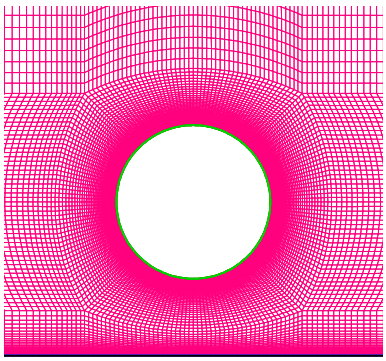
شکل‌ها و نمودارها



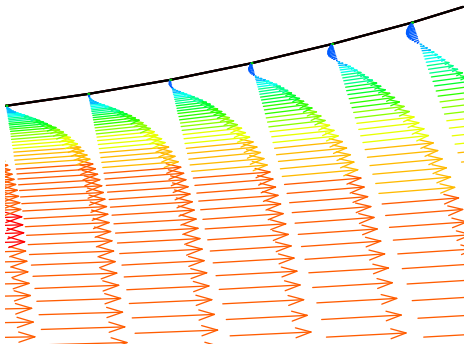
شکل ۱- نمودار توزیع ضریب فشار روی سطح استوانه برحسب زاویه (از نقطه سکون پشت استوانه تا نقطه جدایش جریان) در عدد رینولدز ۸/۴×۱۰^۶.



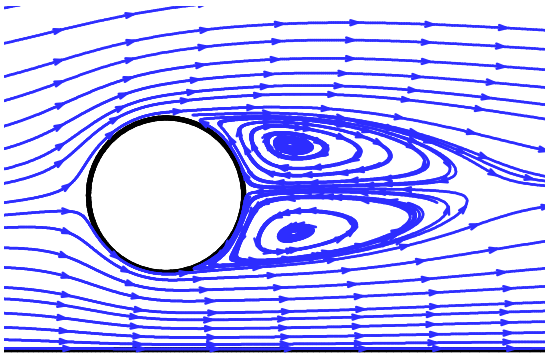
شکل ۲- توزیع سرعت لبه لایه مرزی جریان مغشوش روی استوانه در چهار عدد رینولدز مختلف.



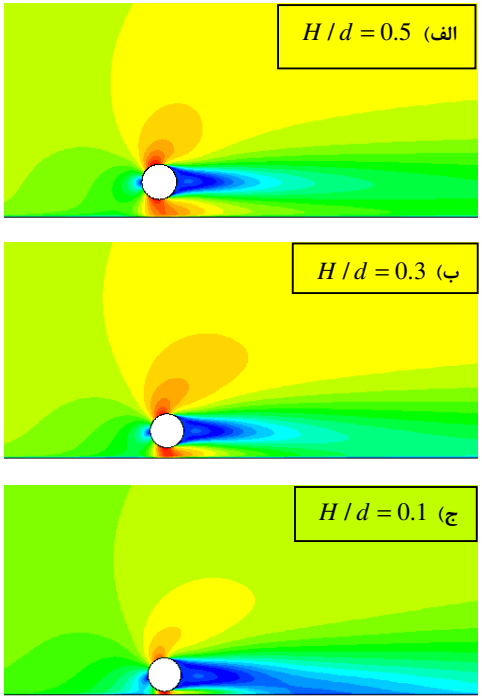
شکل ۳- نحوه مش‌بندی روی استوانه نزدیک سطح.



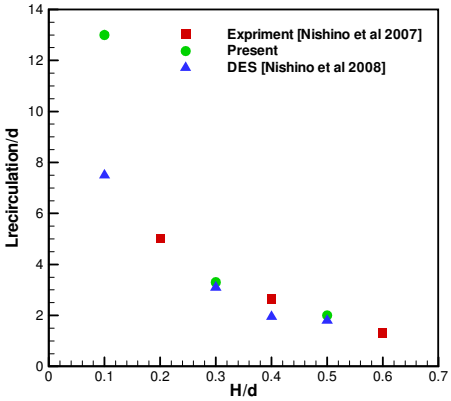
شکل ۴- چگونگی توزیع سرعت مماس بر استوانه در نزدیکی نقطه جدایش در عدد رینولدز $۳/۵\times۱۰^{۶}$.



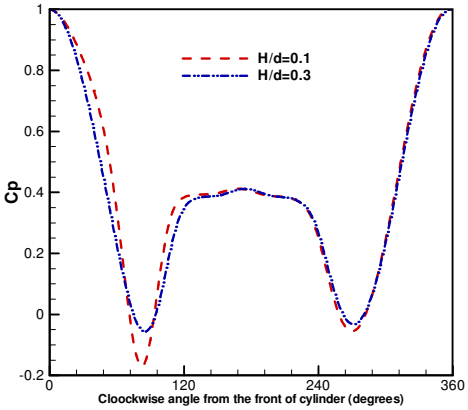
شکل ۵- خطوط جریان حول استوانه در نزدیکی سطح.



شکل ۶- توزیع سرعت روی استوانه نزدیک سطح در سه حالت الف) $H/d=0.5$ ، ب) $H/d=0.3$ و ج) $H/d=0.1$



شکل ۷- طول منطقه ویک بر حسب فاصله استوانه از سطح.



شکل ۸- ضریب فشار حول استوانه بر حسب فاصله استوانه از سطح (زاویه ساعتگرد از نقطه سکون جلوی استوانه)

مراجع

1- Dong S. and Karniadakis G.E., DNS of flow past a stationary and oscillating cylinder at Re=10000, *Journal of flouids and structuers*, Vol. 20, PP.519-531, 2005.

2- Muk C. O., Torjorn U., Lars E. H.,Dag M. and Bjornar P., Numerical simulation of flow around a smooth circular cylinder at very high Reynolds numbers*, Marine structures*, Vol. 22, pp.142-153, 2009.

3- Chang Lin, Wei-Jung Lin, Sing-Shing Lin,FLOW CHARACTERISTICS AROUND A CIRCULAR CYLINDER NEAR A PLANE BOUNDARY, 16TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TRANSPORT PHENOMENA, PRAGUE, ISTP-16, 2005.

4- Nishino .T, Roberts .G.T, Zhang .X. Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect, *Journal of Fluids and Structures,* 24, 18–33, 2008.

5- Nishino. T, , Roberts .G.T, Absolute and convective instabilities of two-dimensional bluff body wakes in ground effect, *European Journal of Mechanics B/Fluids* 27, pp 539–551, 2008.

6- Roy. A., Bandyopadhyay. G., Numerical calculation of separated flow past a circular cylinder using panel technique, *Jornal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, vol.94, pp131-149, 2006.

7- Nishino, T., Roberts, G.T., Absolute and convective instabilities of two-dimensional bluff body wakes in ground effect. *European Journal of Mechanical B/Fluids*, 2007.