

تحلیل جریان آرام و درهم حول دو استوانه ی مدور با آرایش پشت سر هم

علی اسدی¹، امیر شیخی²، مجید ملک جعفریان³

¹دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه بیرجند، aliasadi450@gmail.com

²دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اراک، amir.ashk@gmail.com

³استادیار و عضو هیئت علمی گروه مکانیک دانشگاه بیرجند، mmjafarian@excite.com

چکیده

در سال های اخیر تحلیل جریان حول دو استوانه ی مدور با آرایش پشت سرهم¹ توسعه ی زیادی یافته است. در کار حاضر عدد رینولدز 100 بر اساس قطر استوانه برای تحلیل جریان آرام و همچنین عدد رینولدز $1/66 \times 10^5$ نیز بر اساس قطر استوانه برای تحلیل جریان درهم حول دو استوانه ی مدور با آرایش پشت سرهم و فواصل متفاوت در نظر گرفته شده است. فاصله ی استوانه ها 2 و 4 برابر قطر استوانه ها برای حالت جریان آرام و $1/435$ و $3/7$ برابر قطر استوانه ها برای حالت جریان درهم در نظر گرفته شده است. مقادیر متوسط ضریب فشار سطحی، ضرایب درگ و لیفت محاسبه گردید و اعتبار نتایج حل عددی با نتایج حل عددی سایر محققین و نیز با نتایج کار آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که در جریان آرام، فشار در عقب استوانه ی اول برای $S=2$ بیشتر از حالت $S=4$ است و این امر کاهش نیروی درگ روی استوانه ی اول را برای $S=2$ نشان می دهد. در هر دو حالت جریان آرام و درهم، ضریب درگ روی استوانه ی دوم کمتر از ضریب درگ روی استوانه ی اول است و این به دلیل جریان های گردابه ای رسیده از استوانه ی اول به استوانه ی دوم است.

واژه های کلیدی: استوانه های پشت سرهم، جریان های گردابه ای، نقطه ی جدایش، نقطه ی برگشت مجدد

1. مقدمه

برهم کنش جریان روی اجسام چندگانه به طور وسیعی در حال تبدیل شدن به یک زمینه ی تحقیق عمومی است. این قبیل ساختارها در مهندسی فراوان می باشند، از قبیل خطوط انتقال برق، دسته لوله های مبدل های حرارتی، برج های واکنش های شیمیایی، سکوها ی ساحلی و لوله های یک سکوی نفتی قرار گرفته در اقیانوس. هندسه های استوانه ای اغلب در ساختارهای مهندس ظاهر می شوند. آرایش های زیادی برای قراردادن استوانه ها در مجاورت یکدیگر وجود دارد. به منظور کاهش دادن تعداد شبیه سازی ها، فقط ترکیب هایی که یک استوانه مستقیماً پشت سر دیگری قرار می گیرد (آرایش پشت سرهم) اخیراً توسط محققین مورد توجه بوده است. در سال 1977، زدراوکویچ^[1] گوناگونی اندازه گیری های درگ روی دو استوانه ی مدور در آرایش پشت سرهم را خلاصه کرد. ایگاشی^[2] یک آزمایش با جزئیات از ساختار جریان حول دو استوانه ی پشت سرهم برای اعداد رینولدز 3300 و 6000 انجام داد.

به پیروی از زدراوکویچ و اعتبار گردآوری های در اعداد رینولدز در محدوده ی بالائی زیر بحرانی برای استوانه ی تک (تقریباً 30000- $Re=5000$)، جریان روی استوانه های پشت سرهم با فاصله های نسبی بین استوانه ها به شرح زیر تغییر می کند (حدود و ظاهر جریان به عدد رینولدز وابسته است):

$1/1 < S < 1$: دو استوانه به عنوان یک شیء تک عمل می کند.

سیال بین دو استوانه بدون حرکت است و جریان در استوانه ی پایین دست دوباره وصل می شود.

$1/6 < S < 1/1$: جریان به طور تناوبی به یک طرف و سپس به

طرف دیگر استوانه ی پایین دست جریان می رسد. یک مسیر جریان گردابی هنوز در پشت استوانه ی عقبی وجود دارد.

$2/4 < S < 1/6$: هر دو طرف جریان گردابه ای از استوانه ی

بالادست به استوانه ی پایین دست متصل می شود.

$2/4 < S < 3/4$: برگشت مجدد اتفاقی روی استوانه ی عقبی

گسسته می شود. گردابه ها از روی استوانه جلویی جاری نمی شوند.

$3/8 < S < 3/4$: بعضی گردابه ها قبل از برخورد با استوانه ی عقبی

می چرخند اما بقیه نمی چرخند. این حالت جریان دوپایا نامیده می شود.

$3/8 > S$: گردابه های جدا شده ی استوانه ی جلویی قبل از

برخورد با استوانه ی عقبی می چرخند و یک مسیر گردابه ای پشت هر دو استوانه شکل می گیرد. گردابه های جاری شده از استوانه ی جلویی با گردابه های استوانه ی عقبی متقابلاً اثر می کنند و باعث می شوند گردابه های استوانه ی عقبی به شدت قوی شوند.

اویا⁴ و همکارانش^[3] گردآوری زدراوکویچ را در سال 1989 به صورت امروزی درآوردند و اعداد رینولدز بین 80 و $3/2 \times 10^5$ و فاصله ی بین استوانه های حداکثر تا 30 برابر قطر استوانه را مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که نیروی درگ تا حد زیادی وابسته به عدد رینولدز و فاصله ی بین استوانه ها است.

شارمان^[4] در سال 2005 جریان آرام حول دو استوانه ی پشت سرهم را بررسی کرد و نشان داد که دو نقطه ی جدایش روی استوانه ی بالادست، یکی پایین و دیگری بالا ایجاد می شود.

محبوب علم⁶ و زو^[5] در مقاله ی خود در سال 2007 جریان در اطراف دو استوانه پشت سر هم را به سه رژیم اصلی طبقه بندی کردند که به شرح زیر است:

^۳ Igarashi

4 Ohya

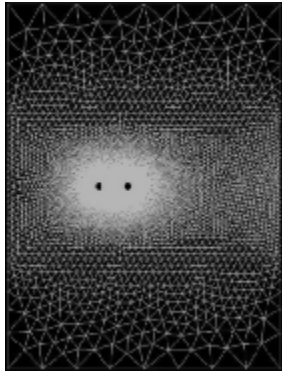
5 Sharman

6 Mahbub Alam

7 Zhou

^۱ Tandem

^۲ Zdravkovich



شکل 2: حوزه ی حل و مش بندی

3. نتایج

3-1-3. حالت جریان آرام

3-1-1-3. ضریب درگ

جدول 1 ضرایب درگ متوسط روی استوانه‌های اول و دوم را نشان می‌دهد.

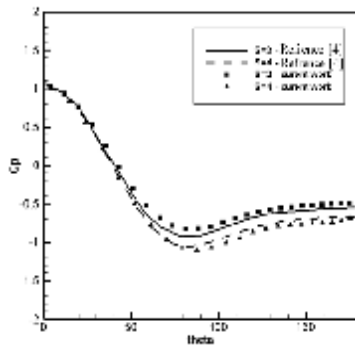
جدول 1: ضرایب درگ متوسط روی استوانه‌ی اول و دوم با $S=2$ و $S=4$

Mean Cp	S=2		S=4	
	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 1	Cylinder 2
Reference [4]	1/12	-0/0822	1/278	0/709
Current work	1/205	-0/096	1/246	0/707

ضریب درگ روی استوانه‌ی اول از ضریب درگ روی استوانه‌ی تک کمتر است و این به دلیل وجود استوانه‌ی دوم است، چون استوانه‌ی دوم فشار جریان‌های گردابه‌ای جدا شده در پشت استوانه‌ی اول را افزایش می‌دهد. ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم به دلیل جریان‌های گردابه‌ای رسیده از استوانه‌ی اول کمتر از ضریب درگ روی استوانه‌ی اول است. نکته جالب این است که ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم در آرایش $S=2$ منفی است. یعنی اینکه استوانه توسط سیال به سمت جلو هل داده می‌شود.

3-1-2-3. ضریب فشار

شکل‌های 3 و 4 توزیع فشار متوسط سطحی روی استوانه‌ی اول و دوم را برای $S=2$ و $S=4$ نشان می‌دهد. فشار در عقب استوانه‌ی اول برای $S=2$ بیشتر از $S=4$ است و این امر کاهش نیروی درگ روی استوانه‌ی اول را برای $S=2$ نشان می‌دهد.



شکل 3: نمودار ضریب فشار برای جریان حول استوانه‌ی اول با $S=2$ و $S=4$

1) رژیم توسعه یافته ($S < 0.7$)، که دو استوانه خیلی نزدیک به هم هستند و لایه‌های برشی آزاد جدا شده از استوانه بالادست در پایین دست دیگری پرت می‌شوند و جریان در فاصله‌ی دو استوانه بدون حرکت است.

2) رژیم اتصال مجدد ($0.7 < S < 3/5$)، که لایه‌های برشی جدا شده از استوانه بالادست دوباره در استوانه پایین دست به هم می‌رسند و جریان در فاصله‌ی بین دو استوانه هنوز ناچیز است.

3) رژیم ریزشی ($S > 3/5$) که لایه‌های برشی به طور تناوبی در فاصله‌ی بین استوانه‌ها روی هم جمع می‌شوند و بنابراین جریان در فاصله‌ی بین دو استوانه با اهمیت و قابل توجه است.

یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی چند فازه در تونل تحقیقاتی آیرودینامیک بنیادی در مرکز تحقیقاتی لانگلی ناسا در سال 2008 [6] بینش جدیدی را به سوی فعل و انفعالات جریان ناپایدار پیرامون استوانه‌های در آرایش پشت سرهم فراهم کرده است. فاز 1 مطالعه، جریان متوسط و جریان گذرا حول دو استوانه با قطر برابر را به کمک PIV¹ و یک جریان سنج سیم داغ مشخص می‌کند. این اندازه‌گیری‌ها بر حسب عدد رینولدز $1/66 \times 10^5$ بر اساس قطر استوانه و فاصله‌های $1/435$ و $3/7$ انجام شد.

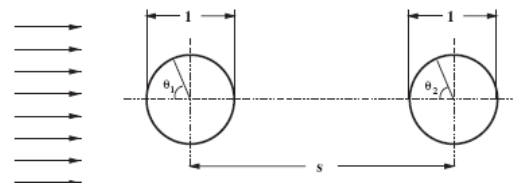
در کار حاضر جریان آرام و درهم حول دو استوانه در آرایش پشت سرهم بررسی می‌شود و نتایج ضرایب درگ و فشار و خطوط جریان ارائه می‌شود. اعتبار نتایج با نتایج مرجع‌های [4] و [6] که نتایجی عددی و آزمایشگاهی هستند، بررسی می‌شود.

2. حوزه و مش بندی

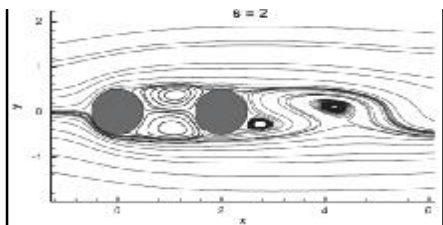
حالت جریان آرام برای استوانه‌های با قطر واحد و حالت جریان درهم برای استوانه‌های با قطر $0/04445 \text{ mm}$ انجام شده است. ورودی در جریان بالادست استوانه و به فاصله‌ی $12/5$ برابر قطر قرار داده شده است. مرزهای لغزش، $du/dy = 0$ و $v = 0$ در بالا و پایین استوانه در فاصله‌ی 25 برابر قطر و خروجی در پایین دست جریان 25 برابر قطر قرار داده شده است. استوانه‌ی دوم، پشت سر استوانه‌ی اول و به فاصله‌ی $S=2$ و $S=4$ برای جریان آرام و $S=1/435$ و $3/7$ برای جریان درهم قرار می‌گیرد.

شرایط حوزه و مش‌بندی در نرم‌افزار گمبیت برای جریان آرام و درهم در ورودی به صورت Velocity inlet و در بالا، پایین و خروجی به صورت Pressure outlet در نظر گرفته شد.

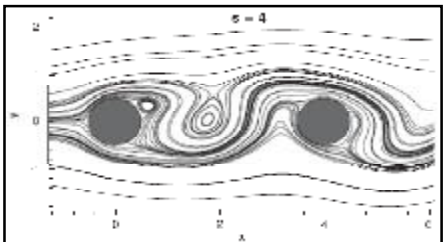
شبه‌سازی‌ها برای هر آرایش با سه مش‌بندی از نوع مثلثی با تعداد 15000، 20000 و 25000 برای جریان آرام و 20000، 30000 و 40000 برای جریان درهم انجام شد. شکل‌های 1 و 2 به ترتیب هندسه و حوزه‌ی حل را نشان می‌دهند.



شکل 1: هندسه‌ی مسئله



شکل 7: خطوط جریان دو استوانه‌ی مدور با $S=2$ (مرجع [4])



شکل 8: خطوط جریان حول دو استوانه‌ی مدور با $S=4$ (مرجع [4])

3-2-3. حالت جریان درهم

3-2-2. ضریب درگ

جدول 2 ضرایب درگ متوسط روی استوانه‌های اول و دوم را

نشان می‌دهد.

جدول 2: ضرایب درگ متوسط روی استوانه‌ی اول و دوم با $S=1/435$ و $3/7$

C_d	$S=1/435$		$S=3/7$	
	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 1	Cylinder 2
Reference [6]	0/601	-0/172	0/612	0/307
Current work	0/521	-0/100	0/690	0/598

ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم به دلیل جریان‌های گردابه‌ای

رسیده از استوانه‌ی اول کمتر از ضریب درگ روی استوانه‌ی اول

است. در اینجا نیز همانند جریان آرام حول دو استوانه در آرایش

پشت سرهم، ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم (برای $S=1/435$) منفی

است. یعنی استوانه توسط سیال به سمت جلو هل داده می‌شود.

3-2-2. ضریب فشار

مطالعات جریان درهم این مطلب را می‌رساند که y^+ اولین گره از

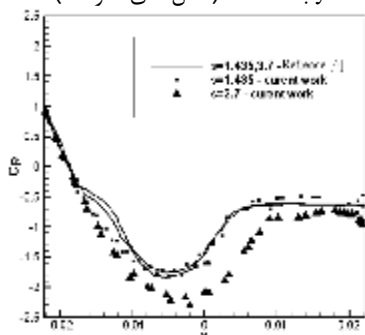
سطح باید کمتر 10 باشد. هر چه y^+ کوچکتر باشد زمان حل نیز

طولانی‌تر خواهد شد. ابتدا سه مش‌بندی 25000، 30000 و 40000

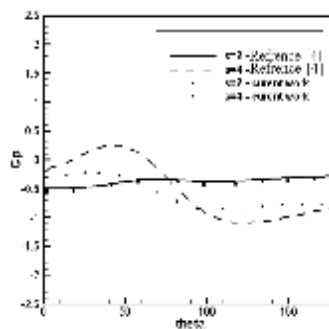
بدون در نظر گرفتن محدودیت فوق‌الذکر در مورد y^+ بررسی گردید

که نتایج قابل قبول حاصل نشد. نتایج مناسب برای مش بندی

40000 و $y^+=10$ بدست آمد (شکل‌های 9 و 10).



شکل 9: نمودار ضریب فشار متوسط سطحی حول استوانه‌ی اول



شکل 4: نمودار ضریب فشار برای جریان حول استوانه‌ی دوم با $S=2$ و $S=4$

نوسانات ضریب فشار روی استوانه‌ی دوم (شکل 4) در حالت

$S=4$ بیشتر از حالت $S=2$ است. به این دلیل که گردابه‌های پشت

استوانه بالادست در $S=2$ به استوانه‌ی دوم چسبیده اند و یک حالت

پایدار را ایجاد کرده‌اند و جریان بر روی استوانه‌ی دوم جاری می

شود (شکل 5 را مشاهده کنید) اما در حالت $S=4$ گردابه‌ها در پشت

هر دو استوانه‌ی اول و دوم جاری شده و در نتیجه نوسانات ضریب

فشار زیاد خواهد بود.

3-1-3. خطوط جریان

خطوط جریان حول هندسه‌ی مذکور برای $S=2$ و $S=4$ در اشکال 5

تا 8 نشان داده شده‌است. شکل‌های 5 و 6 نتایج کار حاضر و شکل

های 7 و 8 نتایج مرجع [4] می‌باشند. برای $S=2$ به نظر می‌رسد

جریان گردابه‌ای تشکیل شده روی استوانه‌ی اول به استوانه‌ی دوم

چسبیده است و یک الگوی جریان متقارن بین دو استوانه دیده می

شود. گردابه‌های بزرگ ایجاد شده‌ی پشت استوانه‌ی دوم، به صورت

پریودیک جاری می‌شوند.

برای $S=4$ گردابه‌های استوانه‌ی اول به علت فاصله‌ی زیاد بین

دو استوانه، در پشت آن جاری شده و مجدداً روی استوانه‌ی دوم

متصل می‌شوند. این گردابه‌های نوسانی نقطه‌ی برگشت مجدد را

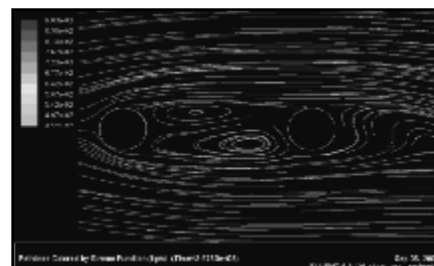
حرکت داده و به سیال انرژی می‌دهند تا اینکه حول استوانه‌ی دوم

جاری شود. مقایسه‌ی نتایج با نتایج مرجع [4] حاکی از دقت خیلی

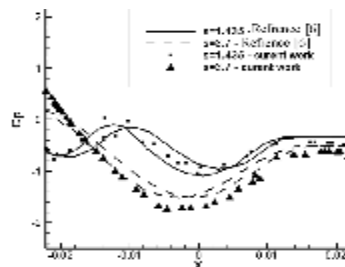
خوب نتایج کار حاضر می‌باشد.



شکل 5: خطوط جریان حول دو استوانه‌ی مدور با $S=2$ (کار حاضر)



شکل 6: خطوط جریان حول دو استوانه‌ی مدور با $S=4$ (کار حاضر)



شکل 10: نمودار ضریب فشار متوسط سطحی حول استوانه‌ی دوم

2-3- خطوط جریان

شکل‌های 11 تا 14 تصویر لحظه‌ای از خطوط جریان را برای $S=1/435$ و $S=3/7$ نشان می‌دهد. به ازای $S=1/435$ جریان گردابه‌ای تشکیل شده روی استوانه‌ی اول به استوانه‌ی دوم چسبیده است و یک الگوی جریان نامتقارن بین دو استوانه دیده می‌شود. گردابه‌های بزرگ ایجاد شده‌ی پشت استوانه‌ی دوم به صورت نوسانی جاری می‌شوند و این مشابه الگوی بدست آمده از مرجع [6] است.

برای $S=3/7$ گردابه‌های استوانه‌ی اول به علت فاصله‌ی زیاد بین دو استوانه و تاثیر کم استوانه‌ی عقبی روی استوانه‌ی جلویی، در پشت این استوانه جاری شده و روی استوانه‌ی دوم نقطه‌ی برگشت مجدد ایجاد می‌کنند. این گردابه‌های نوسانی نقطه‌ی اتصال مجدد را حرکت داده و به سیال انرژی می‌دهند تا روی استوانه‌ی دوم جاری شود و این جاری شدن مقدار زیاد سیال روی استوانه‌ی دوم بر بزرگ بودن نیروی لیفت تاکید می‌کند. خطوط جریان بدست آمده از مرجع [6] به ازای $S=3/7$ (شکل 14) پشت استوانه‌ی اول متقارن است که به نظر می‌رسد صحیح نیست. زیرا نتایج کار حاضر و خلاصه‌ی نتایج ارائه شده‌ی محققین دیگر در مقدمه ($3/8 < S < 3/4$) نشان می‌دهند که گردابه‌ها در پشت استوانه‌ی اول به صورت نوسانی جاری می‌شوند.

شکل 11: خطوط جریان حول دو استوانه‌ی مدور با $S=1/435$ (کار حاضر)

شکل 12: خطوط جریان حول دو استوانه‌ی مدور با $S=3/7$ (کار حاضر)

شکل 13: خطوط جریان حول دو استوانه‌ی مدور با $S=1/435$ (مرجع [6])

شکل 14: خطوط جریان حول دو استوانه‌ی مدور با $S=3/7$ (مرجع [6])

4. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در کار حاضر شبیه‌سازی‌های جریان حول دو استوانه با آرایش پشت سرهم برای حالت آرام با عدد رینولدز 100 و فاصله‌های استوانه‌ی 2 و 4 و برای حالت جریان درهم با عدد رینولدز $1/66 \times 10^5$ و فاصله‌های استوانه‌ی 1/435 و 3/7 انجام شد.

در حالت جریان آرام ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم به دلیل جریان‌های گردابه‌ای رسیده از استوانه‌ی اول کمتر از ضریب درگ روی استوانه‌ی اول است. ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم در آرایش $S=2$ منفی است و استوانه توسط سیال به سمت جلو هل داده می‌شود. فشار در عقب استوانه‌ی اول برای $S=2$ بیشتر از حالت $S=4$ است و این امر کاهش نیروی درگ روی استوانه‌ی اول را برای $S=2$ نشان می‌دهد.

در حالت جریان درهم برای $S=1/435$ به نظر می‌رسد جریان گردابه‌ای تشکیل شده روی استوانه‌ی اول به استوانه‌ی دوم چسبیده است و یک الگوی جریان نامتقارن بین دو استوانه دیده می‌شود. برای $S=3/7$ گردابه‌های استوانه‌ی اول به علت فاصله‌ی زیاد بین دو استوانه و تاثیر کم استوانه‌ی عقبی روی استوانه‌ی جلویی، در پشت این استوانه جاری شده و روی استوانه‌ی دوم نقطه‌ی برگشت مجدد ایجاد می‌شود. ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم به دلیل جریان‌های گردابه‌ای رسیده از استوانه‌ی اول، کمتر از ضریب درگ روی استوانه‌ی اول است. ضریب درگ روی استوانه‌ی دوم (برای $S=1/435$) منفی است، یعنی اینکه استوانه توسط سیال به سمت جلو هل داده می‌شود.

مراجع

- [1] Zdravkovich M. M., "Flow Around Circular Cylinders— Volume, ". Fundamentals, Oxford University Press: Oxford, 1997.
- [2] Igarashi T., "Characteristics of the Flow around two Circular Cylinders of Different Diameters arranged in Tandem". *Bulletin of the JSME* 1981; 24:323–331
- [3] Ohya Y. O., Okajima A., Hayashi M., "Wake Interference and Vortex Shedding". *Aerodynamics and Compressible Flow*, vol. 8. Gulf Publishing Company: Houston, TX, 1989; 322–389.
- [4] Sharman B., Lien F. S., Davidson L., Norberg C., "Numerical predictions of low Reynolds number flows over two tandem circular cylinders". 2004 *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2005, 47:423–447
- [5] Mahbub Alam Md., Zhou Y., "Dependence of Strouhal Number, Drag and Lift on the Ratio of Cylinder Diameters in a Two-Tandem Cylinder Wake". *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Crown Plaza, Gold Coast, Australia 2-7 December 2007.
- [6] Jenkins L. N., Neuhart D. H., McGinley C. B., Choudhari M. M., Khorrami M. R., "Measurements of Unsteady Wake Interference Between Tandem Cylinders". *NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, 23681*, 2008.