



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



بررسی اثرات نوسانی ناشی از جریان و بهبود انتقال حرارت حول استوانه ثابت فوق آبگریز

علیرضا قادری صانع^۱، مصطفی اسماعیلی^{۲*}

^۱ ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، کارشناسی ارشد

^۲ ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، دانشیار

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.esmaeili@khu.ac.ir

چکیده

ریزش گردابه یک پدیده نوسانی بوده و زمانی اتفاق می افتد که سیال با سرعت‌های معینی حول جسم بلاف مانند استوانه عبور کند. این پدیده می تواند منجر به ارتعاش ناشی از گردابه شده و خستگی سازه گردد. در مطالعه حاضر، شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی گذرا حول استوانه فوق آبگریز به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش ضریب برآ و پسا توسط نرم افزار انسیس فلونت مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور حل معادلات حاکم از روش حجم محدود مبتنی بر الگوریتم سیمپل استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی حل عددی، ابتدا نتایج عدد نوسلت برای استوانه با شرط عدم لغزش با نتایج مطالعات پیشین مقایسه و صحت سنجی گردید. سپس با اعمال شرط مرزی ناویر برای استوانه آبگریز با استفاده از تابع تعریف شده توسط کاربر (UDF)، نتایج با داده های عددی موجود در مطالعات پیشین صحت سنجی گردید. شبیه سازی ها برای عدد پرانتل ۰.۷ و اعداد رینولدز و طول لغزش های مختلف ارائه شده و اثر لغزش سطح استوانه روی ضرایب پسا و برآ، عدد استروهال و ضریب انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد، با آبگریز کردن استوانه در عدد رینولدز ۱۰۰ و طول لغزش ۰.۲، عدد ناسلت با افزایش ۲۱.۳ درصدی و ضریب پسا با کاهش ۵۰.۲۵ درصدی مواجه خواهد بود و ریزش گردابه حول استوانه کاملاً سرکوب و کنترل می شود. علاوه بر این توزیع نوسانی عدد ناسلت نیز در این طول لغزش کنترل شده است. همچنین مشاهده می گردد، در رینولدزهای مختلف با افزایش طول لغزش عدد ناسلت افزایش و ضرایب نیرو کاهش خواهند داشت.

کلمات کلیدی: ریزش گردابه؛ استوانه آبگریز؛ شرط مرزی ناویر؛ انتقال حرارت جابجایی.

۱- مقدمه

ارتعاشات ناشی از گردابه یک پدیده شناخته شده در اندرکنش سازه - سیال می باشد و زمانی رخ می دهد که یک سازه دچار نوسان شود که در کاربردهای گوناگون مهندسی مانند رایزرهای دریایی و خطوط لوله نفت، پل ها، دودکش ها، ساختمان های بلند و کابل های برق و حتی در اطراف لوله های مبدل حرارتی [۱]، مشاهده می شود. زمانی که بسامد ریزش گردابه نزدیک بسامد طبیعی سازه

باشد، ارتعاش عرضی استوانه شدیدتر شده که منجر به پدیده همگامی یا قفل شدگی می‌شود که این پدیده ممکن است منجر به خستگی ساختاری و حتی ناپایداری شود. با توجه به اینکه ارتعاش ناشی از گردابه یکی از مهم‌ترین عوامل آسیب‌های ناشی از خستگی و ناپایداری سازه‌ها است، بررسی راهکارهای کاهش و یا سرکوب ارتعاش‌ها، نظر بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. به طور کلی روش‌های کنترل ارتعاشات ناشی از گرداب به سه گروه روش‌های فعال، غیرفعال و روش‌های ترکیبی تقسیم می‌شوند. روش‌های فعال به روش‌هایی گفته می‌شود که در آن کنترل ارتعاشات با اتصال به یک منبع انرژی خارجی صورت می‌گیرد به عنوان مثال کنترل ارتعاشات جریان توسط نیروی مغناطیسی، در حالیکه روش‌های غیرفعال هیچ نیازی به منبع انرژی خارجی ندارند و معمولاً با ایجاد تغییر در هندسه یا اعمال شرط مرزی آگزیزی است که در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر آگزیزی سطوح بر ارتعاشات ناشی از گرداب در استوانه ساکن پرداخته خواهد شد. در روش ترکیبی که پیچیده‌تر از این دو روش است، روش‌هایی از هر دو گروه مذکور به طور همزمان برای کنترل ارتعاشات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در پژوهش ژیانگ و همکاران [۲]، یک شبیه‌سازی عددی برای مطالعه ویژگی‌های جریان و فرآیند انتقال حرارت سیال حول استوانه نوسانی در عدد رینولدز ۱۹۷،۲۴۸ و ۲۹۶ با دامنه، فرکانس و زاویه نوسان متفاوت، انجام شد. مشاهده شد که تغییر در دامنه تأثیر قابل توجهی بر تغییر میدان جریان دارد، اما در مورد فرکانس اینطور نیست. نتایج به طور کلی نشان داد که با افزایش دامنه و فرکانس، انتقال حرارت به طور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین مشاهده شد که عدد ناسلت ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. علاوه بر این، در بیشتر شرایط، زاویه بهینه شده در ۰ درجه یا ۹۰ درجه قرار داشت. همچنین در تحقیق عطارخان و همکاران [۳]، یک بررسی عددی جامع از اثر ترکیبی شناوری و زاویه حمله جریان بر ارتعاش ناشی از گرداب یک استوانه مربعی الاستیک نصب شده در عدد رینولدز ۱۰۰، عدد پراندتل ۷.۱ و نسبت جرم مختلف انجام شده است. آزمایش‌های عددی گسترده‌ای برای زوایای حمله مختلف جریان و برای سرعت‌های کاهش یافته مختلف (۲۵-۳) در عدد ریچاردسون ۰، ۰.۲۵ و ۰.۵۰ انجام شد. مشخص شد که رژیم قفل، برای تمام زوایای نزدیک جریان بدون توجه به ریچاردسون ثابت است. برای همه جریان‌ها به غیر از جریان عرضی، فرکانس کاهش یافته در هر دو جهت برابر است، اما در وضعیت عرضی، ($\alpha=90^\circ$)، فرکانس کاهش یافته در جهت X دو برابر جهت Y برای همه سرعت‌های کاهش یافته است. میانگین ضریب درگ و عدد ناسلت در زاویه حمله ۴۵ درجه برای همه سرعت‌های کاهش یافته به بیشینه خود رسید.

سطوح آگزیز به دلیل زاویه تماس بالای قطرات آن که مطابق با گفته وانگ [۴] بیش از ۱۵۰ درجه بوده و لغزش سرعت روی این سطوح به عنوان یکی از روش‌های کاهش ضریب برآ و پسا در کاربردهای مهندسی توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. هوانگ و همکاران [۵] تأثیر فوق آگزیزی بر ضرایب درگ لزوج و فشار در طول‌های لغزش مختلف تا اعداد رینولدز ۱۸۰ را بررسی کردند. آنها دریافتند که در اعداد رینولدز کوچک ($Re \leq 100$) و طول‌های لغزش کوچک، درگ چسبناک غالب است، درحالی که در اعداد رینولدز و طول‌های لغزش بالاتر، کشش کل عمدتاً به پسا فشار بستگی دارد و کشش چسبناک سهم کمتری دارد. لجاندر و همکاران [۶] به صورت عددی جریان دوبعدی حول استوانه دایره ای با تأثیر یک شرایط مرزی لغزش عمومی را بر روی دینامیک پشت جریان بررسی کردند. آنها نشان دادند که شرایط لغزش به طور قابل توجهی شروع چرخش و ریزش گرداب را در پشت سیلندر به تاخیر می‌اندازد که با نتایج تجربی مطابقت دارد. در یک مطالعه آزمایشگاهی توسط دنیلو و همکاران [۷] تأثیر لغزش بر حرکت ناشی از گرداب یک استوانه فوق آگزیز بررسی شد و نتایج به اینگونه بود که با استفاده از تئوری کیسی بکستر در جریان حول کره و استوانه و ایجاد آگزیزی ضریب اصطکاک پوسته ای را کاهش دهند. آنها دریافتند ایجاد لغزش باعث کاهش نیروی لیفت و کاهش ۱۵ درصدی فرکانس ریزش گرداب می‌شود. مستروکالوس و همکاران [۸] در مورد اثر تثبیت کننده افزایش طول لغزش بی‌بعد در مطالعه عددی خود برای جریان کم رینولدز بر روی استوانه دایره‌ای گزارش کردند. آنها دریافتند که در رینولدز ۱۲۰ و مقدار طول لغزش بحرانی ۰.۲ خیابان گرداب کارمن به طور کامل سرکوب شده است. همچنین آنها دریافتند که در همان طول لغزش برای بخشی از استوانه که آگزیز شود نیز شاهد سرکوب کامل ارتعاشات خواهیم بود.

مسافری و همکاران [۹] در یک مطالعه عددی ارتعاش ناشی از گرداب و انتقال حرارت همرفتی را در اطراف یک استوانه فنی تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی یکنواخت جریانی و عرضی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میدان مغناطیسی By به طور کامل (۱۰۰٪) ارتعاشات عرضی و طولی را سرکوب می‌کند. برای هر دو میدان مغناطیسی، با افزایش عدد استوارت و سرکوب ریزش گرداب، عدد ناسلت کاهش یافته و برای میدان مغناطیسی جهت Y ریزش گرداب پشت سیلندر به طور کامل ناپدید شده و عدد ناسلت افزایش

یافته است. در پژوهش ایزدپناه و همکاران نیز [۱۰]، اثر ارتعاش ناشی از گرداب بر انتقال حرارت همرفتی از یک استوانه دایره‌ای در رینولدز ۱۰۰ به صورت عددی بررسی شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که کاهش سرعت و نسبت میرایی می‌تواند به طور قابل توجهی بر انتقال حرارت تأثیر بگذارد. پدیده قفل شدگی در سرعت کاهش یافته ۴ رخ می‌دهد که منجر به تغییرات گسترده در دامنه جابجایی و عدد ناسلت نسبت به زمان می‌شود که عدد ناسلت کل در مقایسه با یک استوانه ثابت کاهش می‌یابد. با توجه به مروری که بر پیشینه پژوهش انجام شد تا جایی که نویسندگان مطلع هستند مطالعه عددی بر روی افزایش ضریب انتقال حرارت و کنترل ضرایب نیروی جریان حول استوانه آبگریز انجام نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، موارد زیر به ترتیب مورد بررسی قرار گرفته و اثرات آبگریزی بر عدد ناسلت در جریان آرام گذرا حول استوانه بررسی می‌شود.

- بررسی اثر طول لغزش‌های مختلف بر جریان و انتقال حرارت جابجایی حول استوانه آبگریز
- بررسی طول لغزش در رینولدزهای مختلف بر جریان و انتقال حرارت جابجایی حول استوانه آبگریز

۲- معادلات حاکم و حل عددی

در این بخش معادلات حاکم بر جریان آرام مطرح شده و در ادامه اعداد بی‌بعد مهم در این مقاله بررسی می‌شوند. معادلات حاکم بر مسئله، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت و انرژی برای جریان آرام و تراکم‌ناپذیر سیال نیوتنی می‌باشد. این معادلات در مختصات کارتزین و به شکل برداری مطابق زیر می‌باشند که منظور از \vec{u} ، T ، ρ ، p ، μ و α به ترتیب بیانگر بردار سرعت، دما، چگالی، فشار، ویسکوزیته دینامیک و ضریب نفوذ گرمایی است.

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (۱)$$

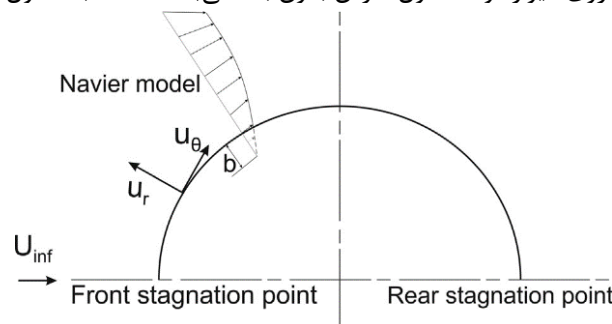
$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T \quad (۳)$$

در مطالعه حاضر از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر جریان گذرا و انتقال حرارت سیال نیوتنی حول استوانه ساکن توسط نرم افزار انسیس فلونت استفاده شده است. دقت گسسته سازی جملات پخش و شارهای جابجایی از مرتبه دوم آپویند بوده و میانمایی فشار از طریق الگوریتم استاندارد انجام پذیرفته و کوپلینگ سرعت و فشار از طریق الگوریتم سیمپل انجام شده است. ضمناً گسسته سازی زمانی نیز از طریق روش مرتبه دوم ضمنی محدود شده صورت پذیرفته است. به منظور ایجاد شرط مرزی فوق آبگریزی سطح، از یک شرط مرزی نوع سوم (رابین) مطابق رابطه (۴) استفاده می‌شود [۸]. مدلسازی این شرط مرزی به شرط مرزی لغزش‌ناویر معروف است. عبارت شرط مرزی فوق آبگریزی به این شرط مرزی اطلاق می‌شود و برای استوانه فوق آبگریز می‌بایست معادلات حاکم با توجه به شرط مرزی حل شوند.

$$\vec{u}_{slip} = b^* \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial n} \right) \Big|_{wall} \quad (۴)$$

در این فرمول u_{slip} سرعت جریان سیال روی دیواره و b^* طول لغزش بدون بعد می‌باشد که نسبت طول لغزش به قطر استوانه است.

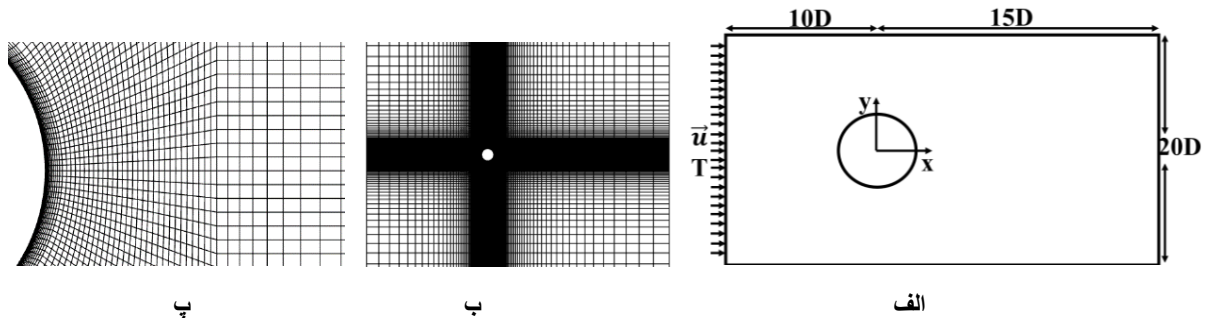


شکل ۱. پروفیل سرعت لغزش مدل ناویر. [۸]

اعدد بی بعد مهم در این شبیه سازی عدد رینولدز، عدد استروهال و عدد ناسلت می‌باشد که به ترتیب $Re = \frac{UD}{\nu}$ و $St = \frac{fD}{v}$

می‌باشند. در این روابط U, D, ν, f, h, k به ترتیب بیانگر سرعت مشخصه، قطر استوانه، ویسکوزیته سینماتیک، فرکانس ریزش گرداب، ضریب انتقال حرارت جابجایی، ضریب هدایت سیال هستند. در مقاله حاضر جریان آرام و تراکم ناپذیر سیال نیوتنی حول استوانه در دو حالت بدون لغزش و فوق‌آگریز در رینولدز ۱۰۰ و عدد پرانتل ۰.۷ با شرایط مرزی گرمایی استوانه دما ثابت بررسی شده است.

هندسه مورد مطالعه مطابق شکل (۲) (الف) می‌باشد. شبکه ایجاد شده سازمان یافته با المان‌های مستطیلی بوده و نماهایی از شبکه بندی مطابق شکل (۲) (ب) و (پ) ملاحظه می‌شود. همچنین جریان حول استوانه به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. (الف) میدان حل دو بعدی، (ب) شبکه تولید شده در نمای دور از استوانه، (پ) شبکه تولید شده در نمای نزدیک استوانه

۳- صحت سنجی

در این بخش نتایج بدست آمده برای استوانه در دو حالت صحت سنجی می‌شود. در حالت اول نتایج عدد ناسلت و ضرایب نیرو برای استوانه با سطح بدون لغزش در رینولدز ۱۰۰ و پرانتل ۰.۷ با نتایج پیشین صحت سنجی شده و در حالت دوم نتایج ضرایب نیرو در رینولدز ۹۰ و ۱۲۰ و در طول لغزش‌های مختلف برای صحت سنجی کد نوشته شده برای استوانه آگریز با مقادیر پژوهش‌های گذشته مقایسه می‌شود. پارامترهای مورد بررسی شامل $\langle C_d \rangle$ ، $\langle C_l \rangle$ ، $\langle C_l \rangle_{Rms}$ ، $\langle St \rangle$ و $\langle Nu \rangle$ که به ترتیب ضریب پسا، ضریب برآ، ریشه میانگین مربعات ضریب برآ، عدد استروهال و عدد ناسلت می‌باشند. برای استقلال از شبکه از سه نوع شبکه درشت، متوسط و ریز استفاده شده است که مطابق با نتایج جدول (۱) و (۲) که نتایج استقلال از شبکه و حساسیت به گام زمانی برای استوانه با سطح بدون لغزش می‌باشد، همانطور که مشخص است با تغییر اندازه شبکه از شبکه متوسط به ریز با تقریب خوبی نتایج به یکدیگر نزدیک بوده و همچنین با ریز تر شدن گام زمانی از ۰.۵ به ۰.۲۵ نتایج تغییر محسوسی نخواهند داشت پس جهت صرف هزینه و زمان محاسبات، شبکه متوسط و گام زمانی ۰.۰۵ برای شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است.

جدول ۱. نتایج همگرایی استقلال از شبکه استوانه بدون لغزش در رینولدز ۱۰۰ و پرانتل ۰.۷

اندازه شبکه بندی	تعداد المان	$\langle Nu \rangle$	$\langle St \rangle$	$\langle C_d \rangle$	$\langle C_l \rangle$
شبکه درشت	۹۸۶۰	۵.۹۸۱	۰.۱۷۳	۱.۴۱۳	۰.۳۶۷
شبکه متوسط	۲۱۷۸۱	۵.۱۶۹	۰.۱۷۰	۱.۳۸۱	۰.۳۵۳
شبکه ریز	۴۰۹۰۱	۵.۱۶۸	۰.۱۷۰	۱.۳۸۰	۰.۳۵۳

جدول ۲. نتایج همگرایی حساسیت به گام زمانی استوانه بدون لغزش در رینولدز ۱۰۰ و پرانتل ۰.۷

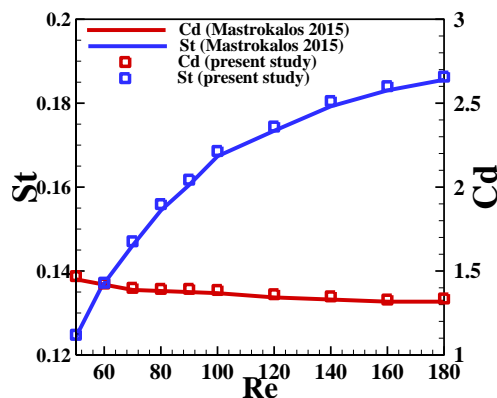
اندازه گام زمانی	$\langle Nu \rangle$	$\langle St \rangle$	$\langle C_d \rangle$	$\langle C_l \rangle$
۰.۲	۶.۱۲۹	۰.۱۷۶	۱.۶۵۷	۰.۳۸۳
۰.۱	۵.۸۳۲	۰.۱۷۳	۱.۴۶۵	۰.۳۴۳
۰.۰۵	۵.۱۶۹	۰.۱۷۰	۱.۳۸۱	۰.۳۵۳

۰.۳۵۱ ۱.۳۸۰ ۰.۱۷۰ ۵.۱۶۷ ۰.۰۲۵

مطابق با نتایج جدول (۳) و شکل (۳)، صحت سنجی نتایج با مطالعات پیشین انجام شده و با توجه به مقادیر گزارش شده این مطالعه برای ضریب پسا، ضریب برآ، عدد ناسلت و استروهال، همانطور که مشاهده می‌شود میانگین خطا بین مقدار محاسبه شده در این مقاله و مطالعات پیشین، کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد و تطابق بسیار خوبی بین نتایج این مطالعه و مطالعات پیشین برقرار است.

جدول ۳. نتایج صحت سنجی استوانه بدون لغزش در رینولدز ۱۰۰ و پراتنل ۰.۷ با مطالعات پیشین

نویسنده	<C _d >	<C _l >	<St>	<Nu>
ایزدپناه [۱۳]	۱.۳۷۳	۰.۳۳۹	۰.۱۶۹	۵.۱۵۹
مهیر [۱۴]	۱.۳۶۸	۰.۳۴۳	۰.۱۷۲	۵.۱۷۹
مقاله حاضر	۱.۳۸۱	۰.۳۵۳	۰.۱۷۰	۵.۱۶۹



شکل ۳. مقایسه نتایج صحت سنجی ضریب پسا و استروهال برای استوانه بدون لغزش در رینولدزهای مختلف با نتایج مستروکالوس و همکاران [۸]

حال جهت صحت سنجی حالت دوم و اعمال شرط مرزی لغزش به سطح استوانه باید ابتدا کد یو دی اف نوشته شده را با نتایج بدست آمده از پژوهش مستروکالوس و همکاران مقایسه کنیم. پس از صحت سنجی کد، طبق جدول (۴) که مقایسه نتایج صحت سنجی اثر طول لغزش بر دینامیک جریان در پژوهش پیشین با مطالعه حاضر است، انطباق خوبی بین نتایج نشان داده می‌شود.

جدول ۴. مقایسه نتایج صحت سنجی کد شرط مرزی لغزش استوانه آبگریز در رینولدز ۹۰ و ۱۲۰ و طول لغزشهای مختلف

نویسنده	<Re>	<b* >	<St>	<C _l > _{Rms}	<C _d >	شرایط مرزی بدون لغزش	شرط مرزی لغزش ناویر
						<C _d > _{slip}	<C _l > _{slip}
مستروکالوس [۱۳]	۹۰	۰.۱۷	۰.۱۵۸	۰.۲۰۲	۱.۳۸۰	۰.۸۲۶	۰.۰
مقاله حاضر	۹۰	۰.۱۷	۰.۱۶۰	۰.۲۱۸	۱.۳۹۳	۰.۸۲۴	۰.۰
مستروکالوس [۱۳]	۱۲۰	۰.۱	۰.۱۷۱	۰.۲۹۴	۱.۳۳۴	۰.۸۹۵	۰.۱۳۵
مقاله حاضر	۱۲۰	۰.۱	۰.۱۷۴	۰.۳۰۹	۱.۳۶۸	۰.۹۰	۰.۱۳۵
مستروکالوس [۱۳]	۱۲۰	۰.۲	۰.۱۷۱	۰.۲۹۴	۱.۳۳۴	۰.۶۸۴	۰.۰
مقاله حاضر	۱۲۰	۰.۲	۰.۱۷۴	۰.۳۰۹	۱.۳۶۸	۰.۶۶۲	۰.۰

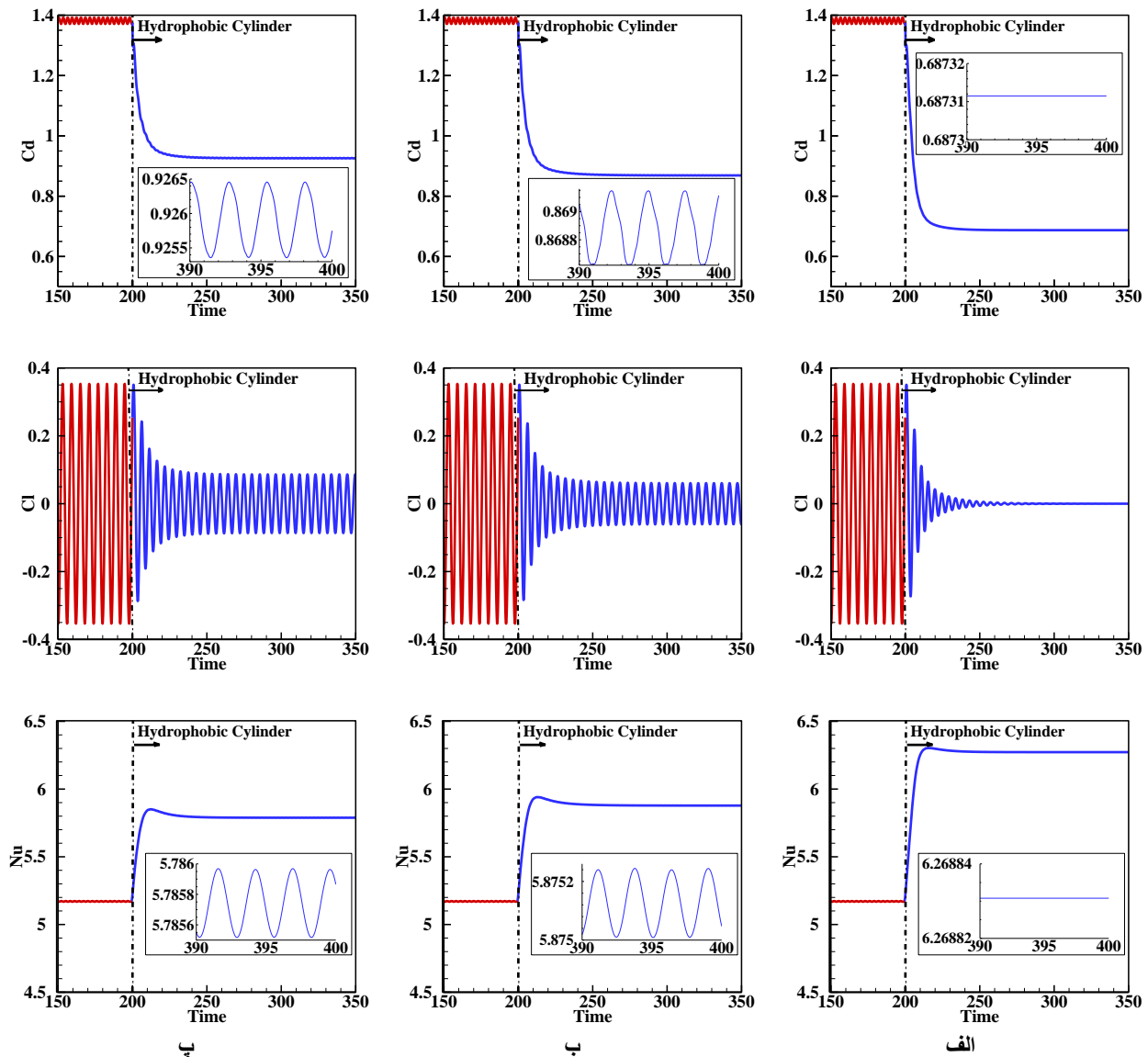
۴- نتایج

در این بخش به بررسی نتایج به دست آمده برای استوانه در دو حالت بدون لغزش و آبگریز پرداخته می‌شود. پارامترهای مهم در این حالت، ضریب برآ و پسا، عدد استروهال و توزیع عدد ناسلت حول استوانه می‌باشند. همچنین برای حالت فوق آبگریز، ضریب آبگریزی ۰.۱، ۰.۱۵ و ۰.۲ اتخاذ شده‌اند. در جدول (۵) مقادیر پارامترهای مربوط به جریان در حالت آبگریز در عدد رینولدز ۱۰۰ گزارش شده‌اند.

همانطور که مشاهده می‌شود، آبگریزی در بیشترین حالت منجر به کاهش ۵۰.۲۵ درصدی ضریب پسا و افزایش ۲۱.۳ درصدی عدد ناسلت می‌شود. همچنین در رینولدز ثابت، افزایش طول لغزش با کاهش ضریب برآ و پسا و همچنین افزایش عدد ناسلت همراه است.

جدول ۵. نتایج ضریب انتقال حرارت و ضرایب نیرو برای استوانه آبگریز در رینولدز ۱۰۰ و طول لغزش های مختلف

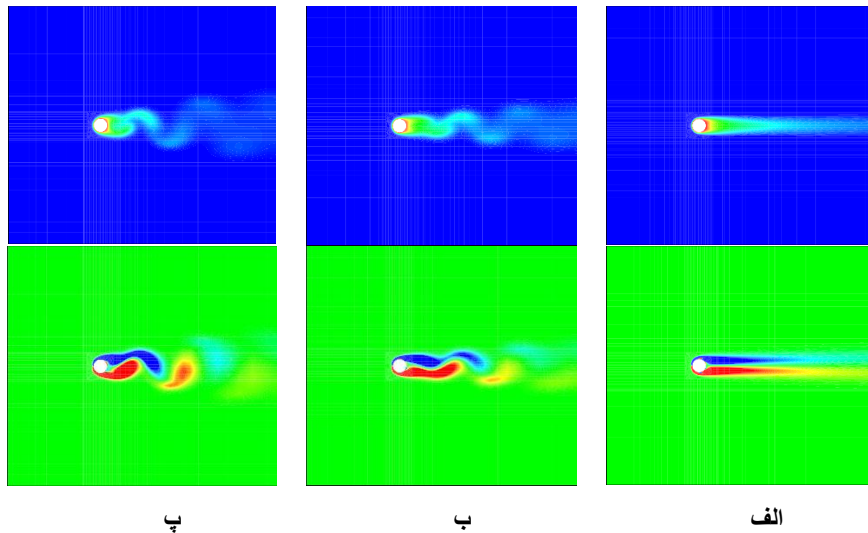
$\langle C_d \rangle$	$\langle C_l \rangle$	$\langle Nu \rangle$	$\langle b^* \rangle$
۱.۳۸۱	۰.۳۵۳	۵.۱۶۹	۰.۰
۰.۹۲۶	۰.۸۵	۵.۷۸۵	۰.۱۰
۰.۸۶۹	۰.۶۵	۵.۸۷۵	۰.۱۵
۰.۶۸۷	۰.۰۰	۶.۲۶۸	۰.۲۰



شکل ۴. نمودار ضریب پسا (ردیف اول)، نمودار ضریب برآ (ردیف دوم)، نمودار ضریب انتقال حرارت (ردیف سوم)، برای استوانه آبگریز در رینولدز ۱۰۰ در (الف) طول لغزش ۰.۲، (ب) طول لغزش ۰.۱۵، (پ) طول لغزش ۰.۱

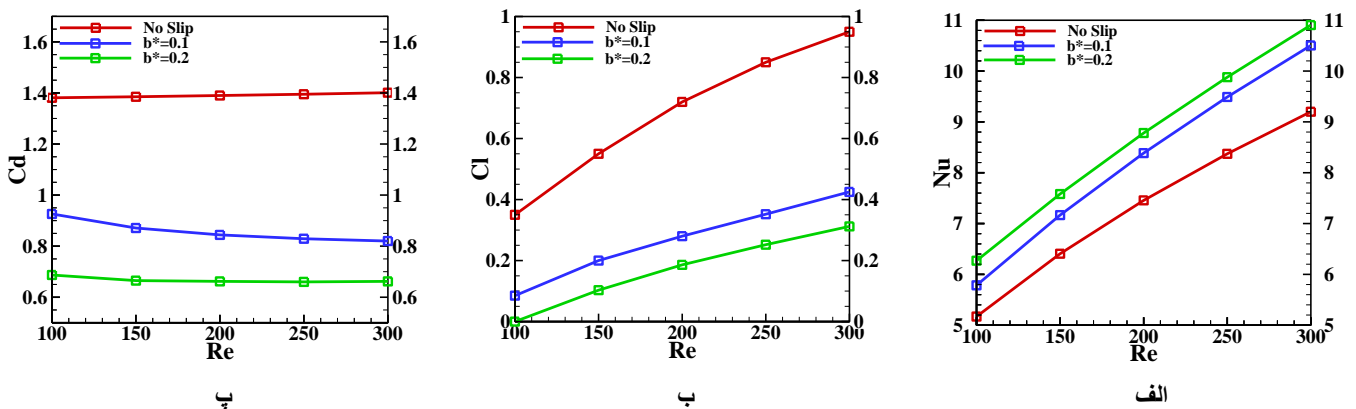
همانطور که از نتایج شکل (۴) مشخص است، با آبگریز کردن استوانه در طول لغزش ۰.۲ عدد ناسلت افزایش ۲۱.۳ درصدی داشته و مقدار ضریب پسا با کاهش ۵۰.۲۵ درصدی مواجه خواهد بود و خیابان گرداب کارمن کاملاً سرکوب و کنترل می‌شود. از طرف دیگر،

توزیع نوسانی عدد ناسلت نیز کنترل شده است. در طول لغزش ۰.۱ نیز درصد کاهش ضریب پسا ۳۳ درصد و مقدار ضریب برآ کاهش ۶۲.۸ درصدی خواهد داشت، همچنین مقدار عدد ناسلت افزایش ۱۱.۹ درصدی را تجربه می‌کند و هنوز حالت نوسانی خود را با دامنه مشخص شده در نمودار بالا دارد. علت این کاهش ضرایب نیرو و افزایش عدد ناسلت را می‌توان اینگونه توجیه کرد که با اعمال شرط مرزی لغزش سرعت، مقدار گرادیان سرعت بر روی دیواره استوانه ایجاد شده و نیروی وارده بر استوانه در جهت افقی و عمودی کاهش خواهد یافت و ضرایب نیرو نیز متناسب با کاهش نیرو و افزایش طول لغزش کاهش خواهند داشت. از طرف دیگر با آبگریز کردن سطوح استوانه، افزایش سرعت لغزشی روی سطح باعث افزایش روند انتقال حرارت از سطح استوانه به سیال شده و افزایش عدد ناسلت را شاهد خواهیم بود. همچنین در رینولدز ثابت با افزایش طول لغزش سرکوب خیابان گرداب کارمن مشاهده است.



شکل ۵. نتایج کانتور دما (ردیف اول) و کانتور ورتیسیتیه (ردیف دوم) در (الف) طول لغزش ۰.۲، (ب) طول لغزش ۰.۱، (پ) شرط عدم لغزش

با توجه به نتایج شکل (۵) همانطور که از کانتور ورتیسیتیه و دما مشخص است، با افزایش طول لغزش تا ۰.۲ به دلیل افزایش سرعت لغزش روی سطح، توده سیال مجاور سطح با سرعت بیشتری حرکت کرده و نیروهای وارده بر استوانه کاهش یافته و انتقال گرما از سطح استوانه به سیال تسریع گشته و همه این عوامل باعث کنترل خیابان گرداب کارمن و توزیع عدد ناسلت شده و دیگر این دو پارامتر فرم نوسانی نخواهند داشت.



شکل ۶. (الف) نمودار ضریب انتقال حرارت، (ب) نمودار ضریب برآ، (پ) نمودار ضریب پسا برای استوانه آبگریز در رینولدزها و طول لغزش های مختلف

با توجه به نتایج شکل (۶) مشخص می‌شود با افزایش طول لغزش در رینولدزهای مختلف، مقادیر ضرایب برآ و پسا کاهش و عدد ناسلت افزایش خواهد یافت. از طرفی برای سرکوب گردابه‌های پشت استوانه در رینولدزهای بالاتر باید طول لغزش را افزایش داد.

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی گذرا حول استوانه فوق‌آبگریز در رینولدز ۱۰۰ و طول‌های لغزش مختلف و پرانتل ۰.۷ به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش ضریب برآ و پسا مورد بررسی قرار گرفت. اعتبار سنجی حل عددی از مقایسه مطالعه حاضر با نتایج مطالعات مختلف ارزیابی گردید. نتایج حل عددی نشان داد که شرایط آبگریزی با افزایش طول لغزش ناویر، به طور قابل توجهی روی ضرایب نیرو و عدد ناسلت تأثیرگذار است. در بیشترین طول لغزش (۰.۲) در رینولدز ۱۰۰، کاهش ۵۰.۲۵ درصدی ضریب پسا و ۲۱.۳ درصدی عدد ناسلت مشاهده شد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که شرایط آبگریزی، به طور کامل، خیابان گرداب کارمن در دنباله پشت استوانه را کنترل می‌کند و توزیع نوسانی عدد ناسلت را تنظیم می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سطوح فوق‌آبگریز می‌تواند به طور موثری انتقال حرارت را افزایش داده و نیروی پسا را کاهش دهد. این امر می‌تواند در کاربردهای مختلفی مانند طراحی سیستم‌های انتقال حرارت، توربین‌های بادی و ریزرهای دریایی مفید باشد. مطالعات آینده می‌تواند به بررسی اثر شرایط آبگریزی در رینولدزهای بالاتر و جریان آشفته، هندسه‌های مختلف و سیالات غیر نیوتنی بپردازد.

مراجع

1. Y. Su, L. Gao, L. Li, X. Li, C. Zhang, A study of the vortex-induced lateral vibration and heat transfer characteristics of elastic supported single tubes with different cross-sectional shapes, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 104 (2019) 8–14.
2. Xiangyu Luo, Weichen Zhang, Haitao Dong, Amrit Kumar Thakur, Bing Yang, Wensheng Zhao, Numerical analysis of heat transfer enhancement of fluid past an oscillating circular cylinder in laminar flow regime, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 139, 2021, 103853, ISSN 0149-1970,
3. Mohammad Athar Khan, Saif Masood, Syed Fahad Anwer, Saleem Anwar Khan, Md. Reyaz Arif, Vortex induced vibration for mixed convective flow past a square cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 202, 2023, 123722, ISSN 0017-9310,
4. Wang, Shutao, and Lei Jiang. "Definition of superhydrophobic states." *Advanced Materials* 19.21 (2007): 3423-3424 W. Barthlott, C. Neinhuis, "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces", *Planta* 202(1), 1–8 (1997).
5. H. Huang, M. Liu, H. Gu, X. Li, X. Wu, F. Sun, Effect of the slip length on the flow over a hydrophobic circular cylinder, *Fluid Dyn Res.* 50 (2018).
6. D. Legendre, E. Lauga, J. Magnaudet, Influence of slip on the dynamics of two-dimensional wakes, *J. Fluid Mech.* 633 (2009) 437447.
7. Robert Daniello, Pranesh Muralidhar, Nicholas Carron, Mark Greene, Jonathan P. Rothstein, Influence of slip on vortex-induced motion of a superhydrophobic cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 42, 2013, Pages 358-368, ISSN 0889-9746
8. M.E. Mastrokalos, Ch. I. Papadopoulos, L. Kaiktsis, Optimal stabilization of a flow past a partially hydrophobic circular cylinder, *Comput Fluids* 107 (2015) 256-271
9. Amir Arslan Mosaferi, Mostafa Esmaeili, Amir Hossein Rabiee, Effect of aligned magnetic field on the 2DOF VIV suppression and convective heat transfer characteristics of a circular cylinder, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 130, 2022, 105807, ISSN 0735-1933, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105807>.
10. Izadpanah, E., Amini, Y. and Ashouri, A., 2018. A comprehensive investigation of vortex induced vibration effects on the heat transfer from a circular cylinder. *International Journal of Thermal Sciences*, 125, pp.405-418.
11. Zhi Cheng, Fue-Sang Lien, Eugene Yee, Guang Chen, Vortex-induced vibration of a circular cylinder with nonlinear restoring forces at low-Reynolds number, *Ocean Engineering*, Volume 266, Part 5, 2022, 113197, ISSN 0029-8018,

12. Mostafa Esmaeili, Amir Hossein Rabiee, Active feedback VIV control of sprung circular cylinder using TDE-iPID control strategy at moderate Reynolds numbers, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volumes 202–203, 2021, 106515, ISSN 0020-7403,
13. Kumar, A., Ray, R. K., and Mittal, H. V. R. (May 11, 2022). "Heat Transfer Past a Rotationally Oscillating Circular Cylinder in Linear Shear Flow." *ASME. J. Heat Transfer*. July 2022; 144(7): 071802.