

بررسی تأثیر گرمایش موضعی بر نیروهای آیرودینامیکی جریان حول استوانه در رینولدز ۱۰۰۰

محمد مهدی فلاحي (دانشجوی کارشناسی ارشد)

نگار نباتیان* (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۲)
دوری ۳-۳۹، شماره ۱، ص. ۶۹-۷۷ (پژوهشی)

برهم‌کنش لایه‌ی مرزی حرارتی و سیالاتی حول استوانه در جریان هوای عبوری با رینولدز ۱۰۰۰ به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. تغییر دما در سطح استوانه موجب تغییر خواصی همچون چگالی، لزجت، گرمای ویژه و ضریب رسانش هوا می‌شود که باعث تغییر الگوی جریان پیرامون استوانه‌اند. افزایش لزجت هوا با کاهش عدد رینولدز و افزایش اصطکاک سطحی همراه است. با افزایش اصطکاک سطحی روی استوانه در حالت حرارت پایین‌دست، قدرت چرخش گردابه کاهش یافته و گردابه‌ها در پایین‌دست استوانه کشیده‌تر شده و تقارن بیشتری نسبت به محور افقی پیدا می‌کنند. در نتیجه لایه‌های برشی آزاد دیرتر یکدیگر را قطع کرده و توزیع متقارن‌تری از سرعت و فشار به وجود می‌آورند که موجب کاهش دامنه‌ی نوسان نیروهای آیرودینامیکی و کنترل جریان شده است. استفاده از المان حرارتی با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در پایین‌دست استوانه می‌تواند نیروی برا را تا ۸۷/۱٪ و نیروی پسا را تا ۲۵/۹٪ کاهش دهد.

واژگان کلیدی: کنترل جریان، انتقال حرارت، لایه‌ی مرزی حرارتی، لایه‌ی مرزی سیالاتی، نیروهای آیرودینامیکی.

mo.falahi@mail.sbu.ac.ir
n.nabatian@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

بررسی توزیع دما، سرعت و الگوی جدایش گردابه‌ها از سطح استوانه با شرط مرزی دما ثابت، برای جریان هوای عبوری از سطح استوانه در محدوده رینولدز ۵۰ تا ۱۸۰ و پراتل ۰/۷ پرداختند. در رابطه‌ی نیمه‌تجربی به دست آمده برای عدد ناسلت، با افزایش عدد رینولدز در عدد پراتل ثابت، مقدار ضریب ناسلت نیز افزایش پیدا کرد. سانیتجای و همکارانش^[۱] انتقال حرارت محلی و متوسط را برای جریانی با رینولدز در محدوده $10^3 \times 2$ تا $10^4 \times 9$ و پراتل ۰/۱۷۶ تا ۰/۷ مورد بررسی قرار دادند و روابطی میان عدد ناسلت متوسط با رینولدز و پراتل جریان ارائه کردند. رژیم جریان به سه ناحیه‌ی لایه‌ی مرزی آرام، ناحیه‌ی برگشتی لایه‌ی برشی و منطقه‌ی دنباله‌ی گردابه‌ها تقسیم شد. توزیع ناسلت موضعی بر سطح استوانه نشان داد که با رشد ضخامت لایه‌ی مرزی، عدد ناسلت کم‌تر شده و میزان انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در ناحیه‌ی لایه‌ی برشی آزاد و با جدایش جریان، انتقال حرارت بیشتر شده و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همراه با رشد لایه‌ی مرزی در سطح استوانه، مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد. به همین دلیل نقاط بالایی و پایینی مقطع استوانه که جدایش جریان در آن‌جا اتفاق می‌افتد، کم‌ترین ضریب انتقال حرارت در سطح استوانه ثبت شده است. پس از جدایش جریان، انتقال حرارت به تدریج افزایش

جریان عبوری از روی استوانه به دلیل کاربردهای فراوانی که در صنایع مختلف از جمله مبدل‌ها، انواع توربین‌ها، برج‌های خنک‌کننده، سازه‌های دریایی و ابزارهای اندازه‌گیری دارد از اهمیت خاصی برخوردار است.^[۱] توزیع غیریکمواخت فشاری حول استوانه منجر به ایجاد نیروهای آیرودینامیکی برا و پسا می‌شود که می‌تواند سازه را مرتعش کند. این امر باعث تخریب سازه و کاهش عمر آن و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. بنابراین کنترل جریان می‌تواند نقش مهمی در کنترل و کاهش این نیروها داشته باشد؛ این امر می‌تواند به صورت غیرفعال مانند تغییرات هندسی، اعمال مولد گردابه یا افزودن قطعات و تجهیزات اضافی به هندسه اصلی صورت گیرد. کنترل جریان به صورت فعال با اعمال یک منبع انرژی خارجی صورت می‌گیرد. مکش جریان، اعمال پلاسما یا کنترل جریان از طریق انتقال حرارت مثال‌هایی از کنترل فعال جریان هستند.^[۲] در زمینه‌ی بررسی اثرات متقابل لایه‌ی مرزی سرعت بر لایه‌ی مرزی حرارتی مطالعات متعددی انجام شده است. گولانی و دیمان^[۳] به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۱۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۱۹، پذیرش ۱۴۰۱/۶/۲۹.

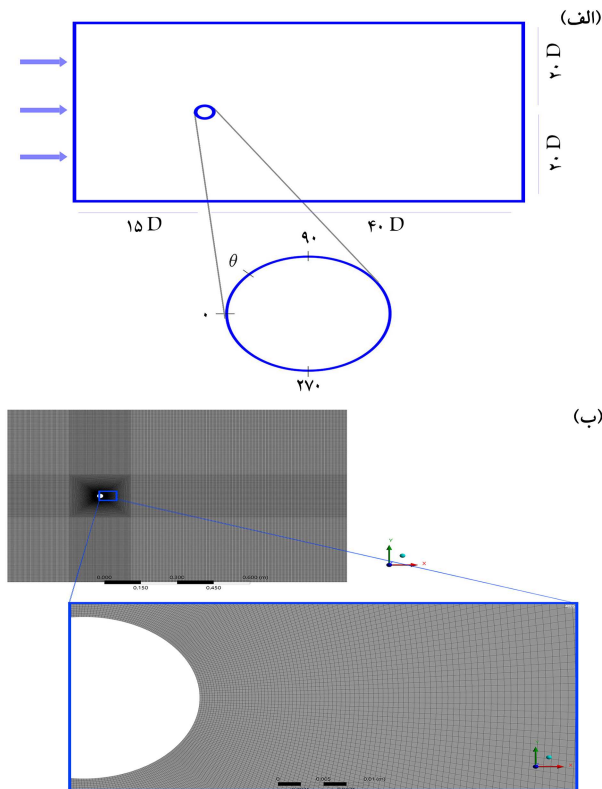
DOI:10.24200/J40.2022.60657.1647

استناد به این مقاله:

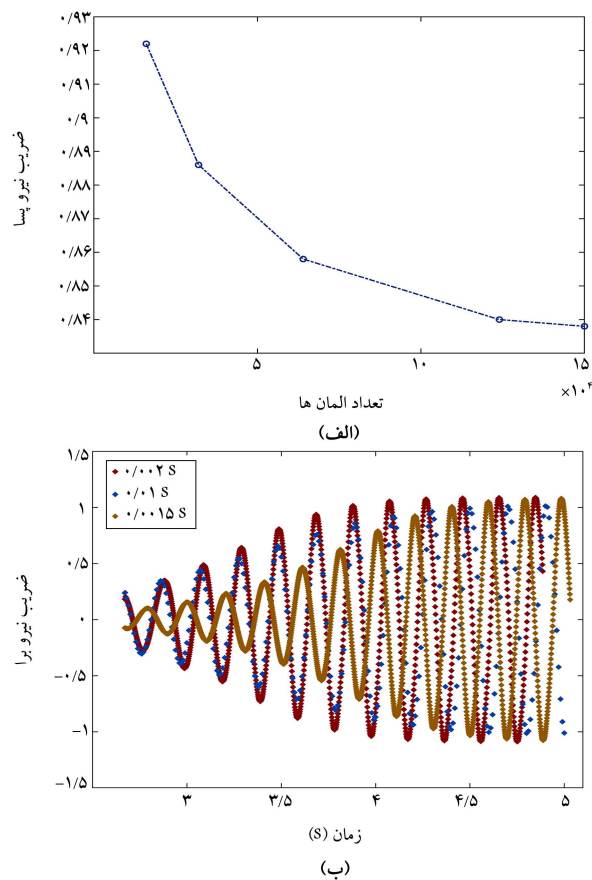
فلاحي، محمد مهدی و نباتیان، نگار (۱۴۰۲). «بررسی تأثیر گرمایش موضعی بر نیروهای آیرودینامیکی جریان حول استوانه در رینولدز ۱۰۰۰»، مهندسی مکانیک شریف، (۱) ۳-۳۹، ص. ۶۹-۷۷

می‌یابد. بیسواس و سارکار^[۵] زاویه‌ی جدایش و طول گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه را برای رینولدزهایی در محدوده‌ی ۱۰ تا ۴۵ بررسی و نتایج حاصله را با مطالعات پیشین مقایسه کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز موجب افزایش طول گردابه‌ها و زاویه جدایش جریان می‌شود. همچنین بررسی عدد ناسلت نشان داد که مقدار ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ی سکون بالادست استوانه بیشینه است و هرچه بر سطح استوانه پیش رویم، کاهش می‌یابد. همد و هی^[۶] اثر اعمال حرارت بر سطح استوانه را برای جریان دوفازی آب، هوا و روغن و ترکیبات آنها با نسبت‌های گوناگون مورد بررسی قرار دادند و ضریب انتقال کلی انتقال حرارت در این حالت‌ها را محاسبه کردند. طبق نتایج به دست آمده، ضریب انتقال حرارت برای مخلوط آب و هوا در مقایسه با مقادیر مربوط به آب، تغییر چندانی نداشت. اما مقادیر آن برای مخلوط هوا و روغن ۷۰٪ رشد کرد. بیشترین مقادیر به دست آمده ضریب انتقال حرارت برای مخلوط آب و روغن و به صورت تابعی از نسبت دو سیال حاصل شد. افزایش انتقال حرارت به دلیل کاهش ضخامت لایه‌ی مرزی و افزایش تلاطم جریان بوده است. مارکوارت و اندیکات^[۷] اثر سرمایش و گرمایش در سطح استوانه را بر روی جریان با دو مقدار رینولدز ۱۰^۴ و ۱۰^۵ برای دماهای متفاوت بررسی کردند و به محاسبه‌ی درصد تغییر مقدار متوسط ضرایب پسی اصطکاکی و فشاری پرداختند. آنها دریافتند که در جریان با رینولدز ۱۰^۴، سرمایش موجب کاهش هر دو ترم پسا می‌شود؛ اما در جریانی با رینولدز ۱۰^۵، سرمایش فقط پسی اصطکاکی را کاهش می‌دهد. فنگ و همکارانش^[۸] به بررسی اثر انتقال حرارت و خنک‌کاری موضعی جریان هوا در رینولدز پایین پرداختند. هدف مطالعه، کنترل جریان و کاهش نوسانات نیروی برا بوده است. نتایج نشان داد که محل قرارگیری المان حرارتی، اثرات متفاوتی بر الگوی جدایش جریان دارد. آنها دریافتند که انتقال حرارت در نزدیکی محل جدایش جریان می‌تواند اثرات ناپایدارکننده داشته باشد. در حالی که خنک‌کاری جریان از همان موضع، پایداری را افزایش می‌دهد و مدلی بر پایه‌ی ترکیب حرارت دادن و خنک‌کاری برای کنترل کامل نیروی برا توسعه دادند، هر چند که دلیلی برای تغییرات رفتار نیروهای وارد بر استوانه ارائه ندادند. جی. ام. شی و همکارانش^[۹] اثر انتقال حرارت بر نیروی پسی سطح استوانه و نیز نقش تنش‌های برشی و فشاری در نیروی پسا را بررسی کردند. جریان عبوری از سطح استوانه با رینولدز کم‌تر از ۱۷۰ مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر مختلفی برای نسبت دمای سطح استوانه به دمای جریان سیال در نظر گرفته شد و خواص سیال شامل چگالی، ضریب رسانش، گرمای ویژه و لزجت تابعی از دما در نظر گرفته شدند. مشاهده شد که اعمال حرارت بر سطح استوانه منجر به افزایش نیروی پسا می‌شود. همچنین تأثیر تغییرات لزجت و چگالی نسبت به دما بر نیروهای وارد بر جسم با یکدیگر مقایسه شد. پارک و همکارانش^[۱۰] به بررسی عددی و تجربی اثر انتقال حرارت از سطح لوله با مقطع دایروی و بیضوی پرداخته و نتایج عدد ناسلت و نقطه‌ی جدایش را در دو حالت با یکدیگر مقایسه کردند. سپس مطالعه‌ی فوق را بر روی مجموعه‌ی از استوانه‌های هم‌ردیف انجام داده و اثر آشفتگی جریان ناشی از استوانه بالادست را بر مشخصه‌های انتقال حرارت از استوانه پایین‌دست بررسی کردند. مشاهده شد که عدد ناسلت متوسط در استوانه‌ی بیضوی کم‌تر از دایروی است چرا که محل جدایش جریان در بازه زاویه‌ی ۱۴۰-۱۲۰ قرار دارد، در حالی که در استوانه با مقطع دایروی، جدایش جریان در محدوده ۱۰۰-۸۰ درجه رخ می‌دهد. همچنین ناسلت محلی برای دو هندسه‌ی مورد مطالعه، الگوی متفاوتی دارد. بررسی جریان حول استوانه‌های هم‌ردیف نشان داد که در رینولدزهای پایین، متوسط عدد ناسلت در استوانه‌های پایین‌دست در مقایسه با استوانه‌ی اول کاهش می‌یابد. در حالی که با افزایش عدد رینولدز، آشفتگی ایجاد شده پشت استوانه‌ی بالادست موجب

ارتقاء انتقال حرارت و عدد ناسلت در استوانه‌های پایین‌دست می‌شود. همچنین ضریب اصطکاک سطحی روی استوانه‌ی بیضوی به شکل قابل توجهی کم‌تر از استوانه‌ی دایروی است. آشنیاح^[۱۱] به بررسی برهمکنش جریان و حرارت در جریان با رینولدزهایی در محدوده‌ی ۱۰^۴ × ۳ تا ۱۰^۶ × ۴ حول استوانه پرداخت و جدایش جریان، تنش برشی و توزیع فشار حول استوانه را مورد بررسی قرار داد. او با استناد به نتایج به دست آمده بیان کرد که افزایش عدد رینولدز جریان موجب تغییر در نقطه‌ی جدایش جریان می‌شود و سپس اثر آن را بر مشخصه‌های مختلف جریان و انتقال حرارت همچون اندازه‌ی گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه، نیروی پسا و عدد ناسلت مورد بحث قرار داد. درویش یادگاری و حسن‌زاده^[۱۲] به بررسی جریان سیال عبوری از روی دو استوانه‌ی مجاور با جهت‌های دورانی مخالف یکدیگر و عدد رینولدز ۲۰۰ پرداخته و اثر پارامترهایی همچون فاصله‌ی بین دو استوانه و سرعت زاویه‌ی آنها بر الگوی جریان، تغییرات انتقال حرارت از سطح استوانه‌ها، جدایش گردابه‌ها و نیروهای وارد بر استوانه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت دورانی استوانه‌ها، نرخ انتقال حرارت از آنها و نیروی پسی وارد بر آنها را کاهش می‌دهد. علت این پدیده، کاهش ناحیه‌ی جدایش جریان در سرعت‌های دورانی پایین و توقف جدایش گردابه‌ها در سرعت‌های دورانی بالاتر است. جینگ ژه‌ژیه و گنگ نان‌ژیه^[۱۳] جریان سیال کربن دی‌اکسید فوق بحرانی عبوری از روی یک استوانه را در رینولدزهای ۱۵-۱۵۰ مورد مشاهده قرار دادند. نتایج نشان داد که در رینولدزهای مشابه، فرکانس جدایش گردابه‌ها برای سیال فوق بحرانی در مقایسه با هوا افزایش می‌یابد. به علاوه برای درک بهتر تفاوت الگوهای جریان در دو سیال فوق، توزیع دقیق ضریب فشار محلی، ضریب اصطکاک سطحی و عدد ناسلت در امتداد محیط استوانه ارائه شده است. دیک کی و همکاران^[۱۴] جریان عبوری از روی کانال با مقطع مربعی و رینولدز ۱۰۰ را مورد مطالعه قرار دادند. سطح بالای مقطع مربعی به عنوان المان حرارتی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای المان حرارتی موجب افزایش عدد استروهل و نیروی پسا می‌شود. به علاوه مشاهده شد که متوسط نیروی برا به مقداری منفی کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر، جدایش گردابه‌ها به صورت غیرمستقیم اتفاق می‌افتد. برزویی و غضنفریان^[۱۵] به بررسی اثر استفاده از پره در سطح استوانه بر مشخصه‌های جریان با رینولدزهایی در محدوده ۲۰۰-۱۰۰۰ پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش طول پره موجب افزایش نیروی پسی وارد بر جسم می‌شود، حال آن که افزایش تعداد پره‌ها موجب کاهش نیروی پسا می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزایش تعداد پره‌ها، موجب کاهش عدد ناسلت متوسط سطح آنها می‌شود. وانگ و همکاران^[۱۶] مطالعه‌ی تجربی خود را برای جریان‌های گذرنده از استوانه با رینولدزهایی در محدوده‌ی ۱۸۰-۴۰ و دماهای مختلف در سطح جسم انجام دادند. افزایش دما در سطح استوانه، عدد رینولدز بحرانی که جدایش گردابه‌ها در آن رخ می‌دهد را افزایش می‌دهد. اس. آیا^[۱۷] در مطالعه‌ی خود اثر استفاده از المان‌های حرارتی با شار حرارتی ثابت بر سطح استوانه در رینولدزهای ۱۰^۴ × ۱/۲ تا ۱۰^۴ × ۵/۲ را مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که تأخیر در نقطه‌ی جدایش موجب کاهش عرض گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه می‌شود و این امر سبب تأثیر بر توزیع فشار حول استوانه و نیروهای وارد بر آن می‌شود. اریف و حسن^[۱۸] به بررسی اثر تغییر عدد ریچاردسون بر پدیده جدایش گردابه‌ها در جریان هوای عبوری از سطح مقطعی مربع شکل پرداختند و عدد ریچاردسون بحرانی را که در آن پدیده‌ی جدایش گردابه‌ها متوقف می‌شود، محاسبه کردند. مشاهده شد که متوسط نیروی پسا، عدد استروهل و عدد ناسلت با افزایش عدد ریچاردسون افزایش می‌یابد. با این حال دامنه‌ی نوسان نیروی برا و اندازه‌ی گردابه‌ها در پایین‌دست جسم کاهش می‌یابد. همسی و همکاران^[۱۹] در



شکل ۱. (الف) هندسه مورد مطالعه و ابعاد آن؛ (ب) شبکه‌ی محاسباتی.



شکل ۲. (الف) استقلال از شبکه؛ (ب) بررسی استقلال از گام زمانی برحسب ثانیه.

مطالعه‌شان به بررسی اثر انتقال حرارت بر گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه و فرکانس جدایش آنها در رینولدزهای کم‌تر از ۲۰۰ پرداختند. نتایج نشان داد که حرارت بر اندازه‌ی گردابه‌ها و فرکانس جدایش آنها مؤثر است، به شکلی که طول گردابه‌ها را افزایش و فرکانس جدایش را کاهش می‌دهد.

تاکنون مطالعات زیادی در مورد اثر تغییر در لایه‌ی مرزی سیالاتی با تغییر عدد رینولدز بر لایه‌ی مرزی حرارتی صورت گرفته است، اما اثر اعمال تغییر در لایه‌ی مرزی حرارتی بر مشخصه‌های لایه‌ی مرزی سیالاتی کم‌تر مورد توجه محققان بوده است. علاوه بر این، استفاده‌ی موضعی از حرارت برای کنترل جریان حول استوانه به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر تغییر لایه‌ی مرزی حرارتی بر روی لایه‌ی مرزی سیالاتی با استفاده از تقریب تشابه رینولدز بررسی شده و دلایل فیزیکی دینامیک جریان با استفاده از توزیع سرعت، فشار، تنش برشی و مشخصه‌های گردابه‌های تشکیل شده توضیح داده شده است. همچنین، تأثیر موقعیت و اندازه و دمای المان حرارتی در سطح استوانه مطالعه شده و در نهایت، چیدمان کنترلی جریان با بیشترین میزان کاهش در نوسانات نیروهای آیرودینامیکی مشخص شده است.

۲. شرح مسئله و روش حل

پدیده‌ی جدایش گردابه‌ها، حاصل در معرض جریان قرار گرفتن جسمی است که خطوط جریان قادر به دنبال کردن سطح آن نیستند. با عبور جریان از روی استوانه و تشکیل لایه‌ی مرزی، لزجت سیال سبب کاهش سرعت جریان در نزدیکی سطح جسم می‌شود. با جدایش جریان به علت گرادیان مثبت فشار در پایین دست استوانه گردابه‌ها تشکیل می‌شوند. به دلیل ایده‌آل نبودن سطح جسم، جدایش در یک سمت لحظه‌یی زودتر اتفاق می‌افتد. جدایش متناوب گردابه‌ها منجر به ایجاد نوسانات دوره‌یی فشار در جهت جریان و عمود بر آن می‌شود. فرکانس جدایش گردابه‌ها متناسب با سرعت جریان تغییر می‌کند.^[۴] چنان که اشاره شد، تغییر لایه‌ی مرزی سیالاتی بر لایه‌ی مرزی حرارتی تأثیرگذار است. روابط تشابه رینولدز برای جریان دارای گرادیان فشار با آشفته‌گی بالا نیز معتبر است. رابطه‌ی ۱ بیان می‌کند که ضریب اصطکاک سطح با عدد ناسلت ($Nu = \frac{hD}{k}$) رابطه‌ی مستقیم و با اعداد رینولدز ($Re = \frac{VD}{\nu}$) و پرانتل ($Pr = \frac{\nu}{\alpha}$) رابطه‌ی معکوس دارد.^[۴] در این روابط h ضریب انتقال حرارت جابجایی، D قطر استوانه، k ضریب انتقال حرارت رسانشی، V سرعت جریان، ν لزجت سینماتیکی و α نفوذ حرارتی را بیان می‌کنند.

$$C_f \sim \frac{Nu}{Re Pr} \quad (1)$$

عدد پرانتل نسبت لزجت سینماتیکی به نفوذ حرارتی را بیان می‌کند. در شبیه‌سازی‌ها از اثر گرانش بر حرکت سیال چشم پوشی شده است. استوانه با قطر ۰٫۲۵۴ متر در دامنه‌ی حل مستطیلی شکلی مطابق شکل ۱ الف قرار دارد. زاویه‌ی θ نشان دهنده‌ی موقعیت المان حرارتی در دستگاه مختصات استوانه‌یی است، به نحوی که مقدار آن در نقطه‌ی سکون بالادست استوانه صفر است. شبکه‌ی ساختاریافته‌ی دامنه‌ی محاسباتی در شکل ۱ ب نشان داده شده است. نتایج حاصل از استقلال از گام زمانی و شبکه‌بندی برای پارامترهای بی‌بعد ضریب برا $C_l = \frac{L}{\sqrt{\rho V^2 A}}$ و ضریب پسا $C_d = \frac{D}{\sqrt{\rho V^2 A}}$ در شکل ۲ نشان داده شده است. در این روابط L نیرو برا، D نیرو پسا، ρ چگالی سیال، V سرعت جریان و A سطح مقابل جریان جسم هستند. استقلال از شبکه و گام زمانی مطابق شکل ۲ انجام و در نهایت شبکه‌یی با تعداد ۱۴۸۰۰۰ المان و گام زمانی ۰٫۰۰۲ ثانیه انتخاب شده است. نرم‌افزار فلوئنت

جدول ۱. ضرایب چند جمله‌یی استفاده شده برای توصیف خواص هوا برحسب دما.

چگالی ($Kg.m^{-3}$)	لزجت دینامیکی ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$)	گرمای ویژه ($m^2.s^{-2}.K^{-1}$)	رسانش ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
a_0	$3/111722$	$1/470237 \times 10^{-6}$	$1103/508$
a_1	$-0/01007669$	$6/994188 \times 10^{-8}$	$-0/7594331$
a_2	$1/510452 \times 10^{-5}$	$-5/108853 \times 10^{-11}$	$0/001831453$
a_3	$-1/05849 \times 10^{-8}$	$2/814313 \times 10^{-14}$	$-1/41685 \times 10^{-6}$
a_4	$2/800991 \times 10^{-12}$	$-6/672494 \times 10^{-18}$	$3/817016 \times 10^{-10}$
			$6/322844 \times 10^{-15}$

جدول ۲. مقایسه ضریب نیروی پسا و عدد استروهال در جریان سرد و مطالعات پیشین در رینولدزهای ۱۰۰ و ۱۰۰۰.

$Re = 1000$		$Re = 100$		
St	$C_{d,mean}$	St	$C_{d,mean}$	
۰/۲۱۸	۱/۳۴۱۲	۰/۱۶۲۸	۱/۳۴۲۲	کار حاضر
-	-	۰/۱۶۳۶۶	۱/۳۲۵	همسی و همکاران [۱۹]
۰/۱۹۷-۰/۲۰۱	۱/۲۷-۱/۳۱	۰/۱۶۵	۱/۳۹	لین و همکاران [۲۴]
(عددی)	(عددی)	(عددی)	(عددی)	
۰/۲۱	۱	۱/۶۴	۱/۲۵-۱/۴	
(تجربی)	(تجربی)	(تجربی)	(تجربی)	
-	-	۰/۱۶۱۳	۱/۳۹۱۸	صالحی و همکاران [۲۳]

عدد رینولدز جریان، ضریب اصطکاک سطحی می‌باشد. [۲۳]

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3)$$

$$C_f = [2 \log Re_x - 0/65]^{-\frac{1}{4}} \quad (4)$$

از روابط ۱ و ۴ می‌توان دریافت که افزایش عدد ناسلت با افزایش ضریب اصطکاک سطح و کاهش رینولدز جریان همراه است. همچنین افزایش دما منجر به افزایش لزجت هوا و عدد پرانتل می‌شود. تغییرات تنش برشی بر محل جدایش جریان مؤثر است و از این رو مورد بررسی قرار می‌گیرد. اعداد بی‌بعد ضریب فشار و استروهال به ترتیب مطابق رابطه‌های ۵ و ۶ برای بررسی توزیع فشار روی سطح استوانه و فرکانس جدایش گردابه‌ها برای بررسی اثرات متقابل لایه‌ی مرزی حرارتی و سرعتی استفاده شده است.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (5)$$

$$St = \frac{fD}{V} \quad (6)$$

در معادله‌ی ۶، f فرکانس جدایش گردابه‌هاست.

۳. تحلیل نتایج

مقایسه‌ی نتایج مطالعاتی حاضر با مطالعاتی که پیش از این برای جریان حول استوانه در رینولدز ۱۰۰ و ۱۰۰۰ انجام شده، نشان از تطابق قابل قبول مدل استفاده شده دارد (جدول ۲). چنان که اشاره شد، تغییر دما بر مشخصه‌های فیزیکی هوا مؤثر

به عنوان حل‌گر معادلات نویر - استوکس شامل پایداری، مومنتوم و انرژی مطابق رابطه‌ی ۲ به عنوان معادلات حاکم بر رفتار سیال مورد استفاده قرار گرفته است. از مدل آشفتگی میانگین رینولدز SST- $k-\omega$ برای محاسبه‌ی ترم تنش رینولدز و از روش کوپل شده برای جفت‌سازی میدان سرعت و فشار استفاده شده است.

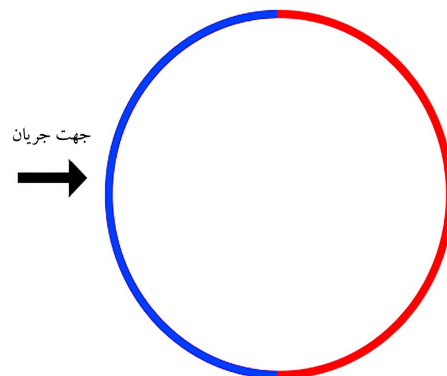
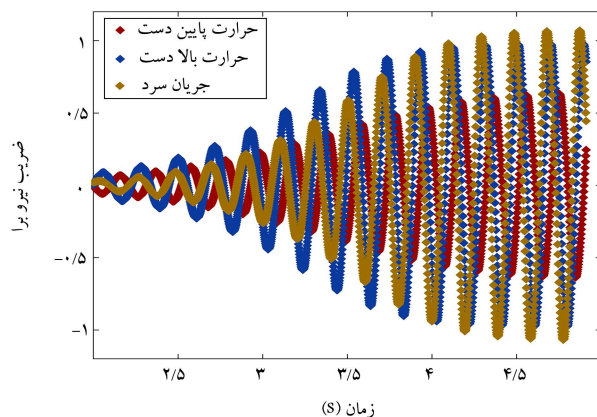
$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} &= \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j e)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

در این روابط u سرعت، p فشار، T دما و e انرژی ویژه هستند. سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده و از اثر گرانش صرف نظر شده است. همچنین اثر تغییر دما بر خواص هوا شامل چگالی، لزجت، گرمای ویژه و رسانش با استفاده از یک چند جمله‌یی درجه ۵ برای مدل‌سازی استفاده شده است. ضرایب چند جمله‌یی استفاده شده برای هر یک از خواص وابسته به دما در جدول ۱ ارائه شده است. این ضرایب با استفاده از اطلاعات موجود در جداول مرجع [۲۲] تهیه شده‌اند. سرعت جریان در ورودی ۰/۶ متر بر ثانیه و فشار نسبی در مرز خروجی صفر در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش بر روی سطح استوانه اعمال شده است. دیواره‌ی جانبی به صورت لغزش آزاد و دیواره‌های کناری متقارن در نظر گرفته شده‌اند. دمای جریان آزاد ثابت و ۲۵ درجه سانتی‌گراد است.

به منظور بررسی تأثیر استفاده از المان حرارتی بر نقطه‌ی جدایش جریان، از مقدار ضریب اصطکاک سطحی استفاده می‌شود. رابطه‌ی ۳ ضریب اصطکاک سطحی را تعریف می‌کند که مقدار آن در نقطه‌ی جدایش صفر است. τ_w تنش برشی در سطح دیواره را نشان می‌دهد. رابطه‌ی تجربی ۴ نشان می‌دهد که با افزایش

جدول ۳. درصد تغییرات نیروهای وارد بر استوانه در اثر اعمال المان حرارتی با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در موقعیت‌های مکانی مختلف.

درصد تغییر نیروی پسا	درصد تغییر نیروی برا	
-	-	جریان سرد
+۱۰/۶	-۷/۸	المان حرارتی در نیمه‌ی بالادست استوانه
-۵	-۴۱/۴	المان حرارتی در نیمه‌ی پایین‌دست استوانه

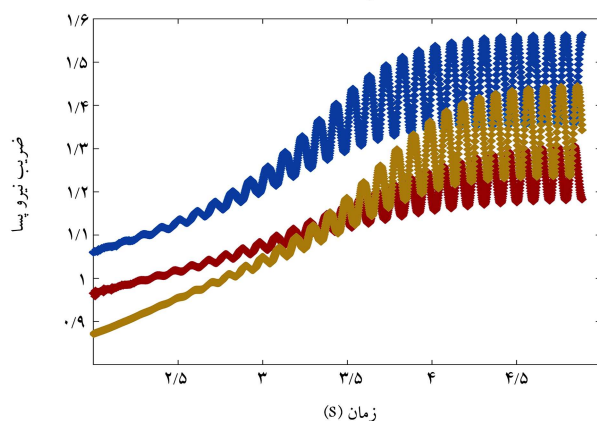


شکل ۳. نیمه‌ی بالادست استوانه (آبی) و نیمه‌ی پایین‌دست استوانه (قرمز).

است. چگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد در حالی که لزجت افزایش پیدا می‌کند و باعث افزایش پایداری میدان کلی جریان می‌شود. زمان هم‌گرایی هریک از مدل‌ها ۲۶ هسته ساعت است. ثابت ماندن دامنه نوسانات نیروهای آیرودینامیکی به عنوان معیار هم‌گرایی مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا نتایج حاصل از استفاده از المان حرارتی به بزرگی ۱۸۰ درجه در نیمه‌ی بالادست و پایین‌دست استوانه بررسی شده و سپس با استفاده از المان‌هایی با دماهای ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر تغییرات دما مورد بررسی قرار گرفته است.

در نهایت با کاهش عرض المان حرارتی و تغییر موقعیت آن، عرض و موقعیتی که منتج به بیشترین کاهش در نیروهای وارد بر استوانه می‌شود، تعیین شده است. محل قرارگیری المان‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. در جدول ۳ میزان تغییرات متوسط نیروهای برا و پسا در دو حالت استفاده از المان حرارتی با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در بالادست و پایین‌دست استوانه در مقایسه با جریان سرد نشان داده شده است.

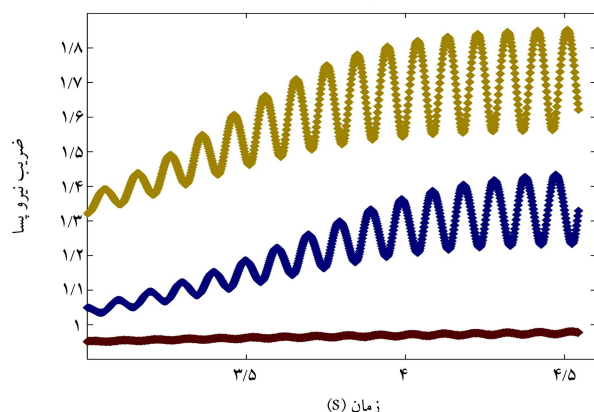
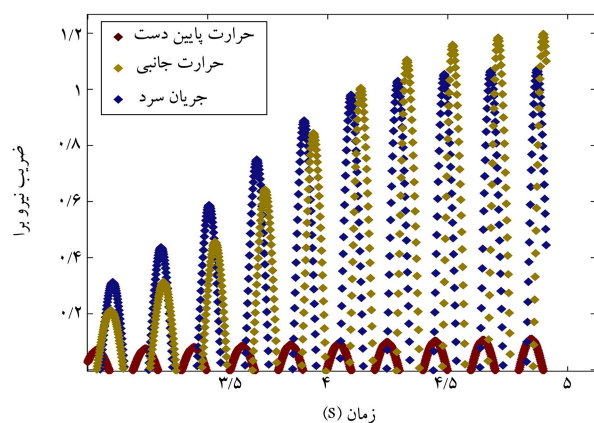
شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی تغییرات نیروهای برا و پسای بی‌بعد در حالت‌های مختلف است. از این نمودار می‌توان دریافت که استفاده از المان حرارتی در نیمه‌ی پایین‌دست استوانه در کنترل جریان مؤثرتر است و به همین دلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. با افزایش دمای المان حرارتی نصب شده در پایین‌دست استوانه مطابق شکل ۵ دامنه‌ی نوسان نیروها کاهش یافته و حتی به سمت صفر میل می‌کند. همچنین مقدار متوسط نیروی پسا به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. عرض المان حرارتی متناسب با میزان مصرف انرژی و در نتیجه افزایش هزینه روش کنترلی است. به همین دلیل، کاهش تدریجی عرض المان نیز مطالعه شده است. المان حرارتی پایین‌دست استوانه با قسمت‌های قرمز رنگ پایین و المان حرارتی جانبی با قسمت‌های آبی رنگ در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۷ تأثیر تغییر ضرایب آیرودینامیکی، برای حالت‌های حرارت پایین‌دست و جانبی با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با جریان سرد، نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از المان حرارتی در جوانب استوانه موجب افزایش دامنه‌ی نوسان نیروهای برا و پسا شده و منجر به ناپایداری می‌شود. در



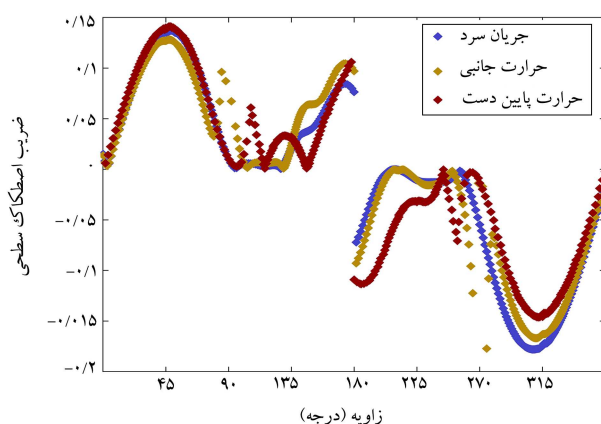
شکل ۴. نمودار نیروی پسا و نیروی برا در حالت استفاده از المان حرارتی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد.

حالی که به کارگیری المان در پایین‌دست استوانه موجب کنترل نیروها می‌شود. به کارگیری المان حرارتی با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در زاویه ۲۵۵ تا $\theta = 105^\circ$ ، دامنه تغییرات نیروی برا را ۸۷/۱٪ و متوسط نیروی پسا را ۲۵/۹٪ در مقایسه با جریان سرد کاهش می‌دهد. افزایش لزجت هوا در محل المان حرارتی، موجب افزایش تنش برشی بر سطح استوانه شده و جدایش را به تأخیر می‌اندازد.

در نمودار شکل ۸ توزیع ضریب اصطکاک سطحی روی استوانه در حالت جریان سرد، حرارت جانبی و پایین‌دست با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بر سطح استوانه را نشان می‌دهد. از نتایج می‌توان دریافت که در حالت گرمایش جانبی، نقطه‌ی جدایش بالا ۹/۲ درجه و نقطه‌ی جدایش پایین ۵/۴ درجه در مقایسه با جریان سرد به تأخیر افتاده است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در حالت حرارت از پایین‌دست به علت افزایش لزجت هوا، ضریب اصطکاک سطحی در پایین‌دست استوانه افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. همچنین، عدد بی‌بعد استروهل در حالت حرارت پایین‌دست به ۰/۲۱۱ کاهش یافته، در حالی که در حالت حرارت جانبی، زودتر جدا شدن گردابه‌ها و کاهش طول آنها سبب شده که عدد استروهل

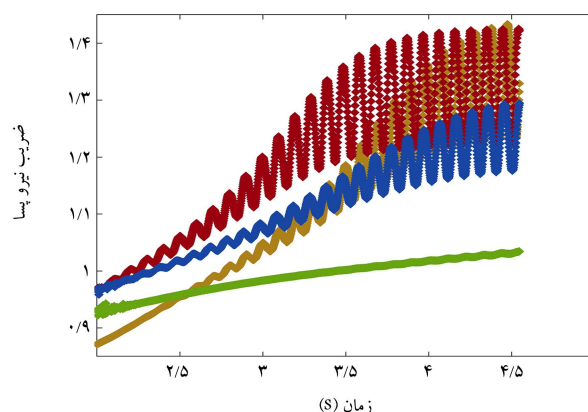
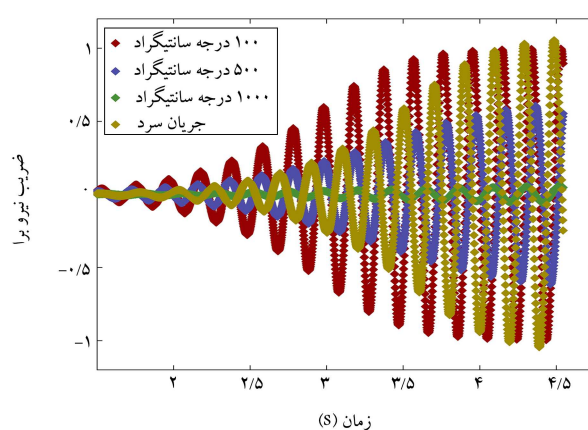


شکل ۷. بررسی ضرایب آیرودینامیکی در جریان سرد و استفاده از المان حرارتی با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد پایین دست و جانبی.

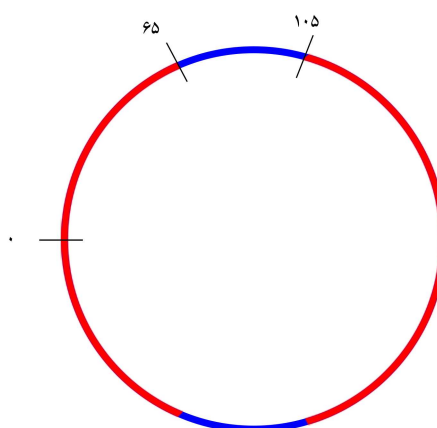


شکل ۸. تغییر ضریب اصطکاک سطحی در حالت گرمایش جانبی و پایین دست با المان حرارتی با دمای ۱۰۰۰ درجه در مقایسه با جریان سرد.

عامل باعث می‌شود که میزان چرخش گردابه کاهش یافته و گردابه‌ها در پایین دست استوانه کشیده‌تر شده و تقارن بیشتری نسبت به محور افقی پیدا کنند و در نتیجه لایه‌های برشی آزاد دیرتر یکدیگر را قطع کنند و توزیع متقارن‌تری از سرعت و فشار به وجود آید. توزیع فشار در شکل ۹ ب نشان می‌دهد که مقدار کمی به پشت در پشت استوانه در حالت حرارت جانبی به مقدار قابل توجهی بیشتر از حالت حرارت از پایین دست است. بردار سرعت جریان در شکل ۹ ج و خطوط جریان در شکل ۹ د محل‌های جدایش جریان و تشکیل حباب جدایش بر سطح استوانه را نشان می‌دهند. کاهش چرخش جریان سبب پایداری میدان جریان و کنترل فرایند

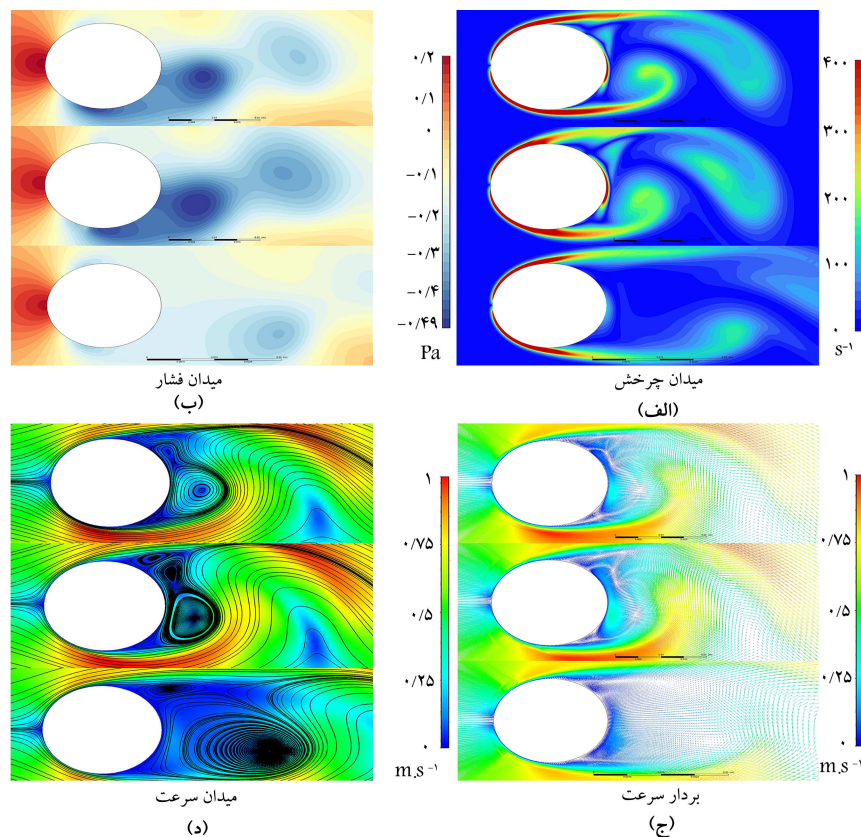


شکل ۵. تغییر ضرایب آیرودینامیکی با به کارگیری المان حرارتی در پایین دست استوانه و دماهای ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در مقایسه با جریان سرد.

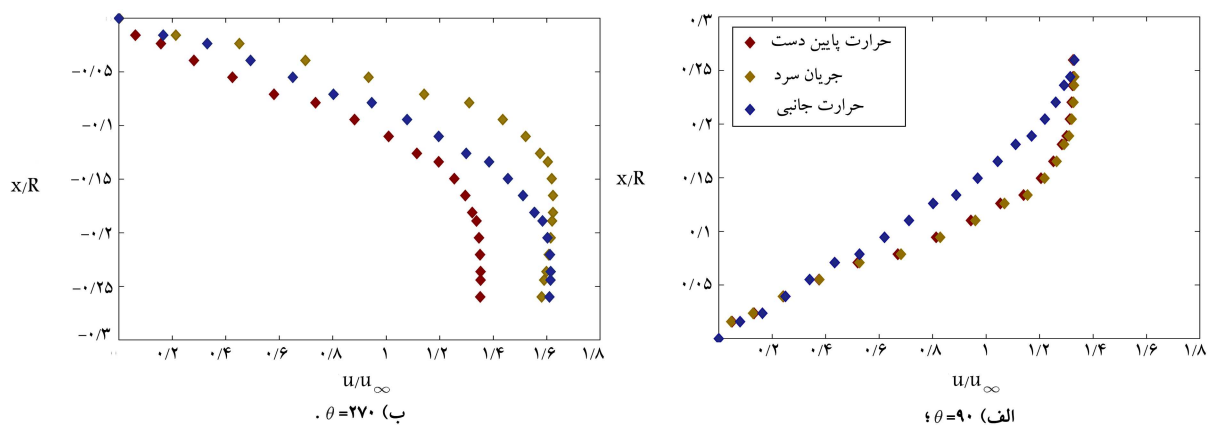


شکل ۶. محل قرارگیری المان حرارتی در موقعیت‌های مختلف.

به ۰/۲۳ افزایش یابد. عدد استروهال برای جریان سرد ۰/۲۱۸ است. شکل ۹ به ترتیب توزیع چرخش، توزیع فشار، خطوط جریان و توزیع سرعت در اطراف استوانه را در کم‌ترین نیروی برا نشان می‌دهد. در جریان سرد و حرارت جانبی مطابق شکل ۹ الف ناحیه‌ی باریک با مقدار نسبتاً بزرگ چرخش جریان چسبیده به پشت استوانه وجود دارد، در حالی که این ناحیه در حالت حرارت از پایین دست ناپدید شده است. علت آن است که در حالت حرارت از پایین دست مطابق رابطه‌ی ۱ با افزایش عدد ناسلت، اصطکاک سطحی افزایش و طبق معادله‌ی ۳ عدد رینولدز محلی کاهش می‌یابد و در نتیجه گردایان سرعت در این ناحیه کاهش می‌یابد. این



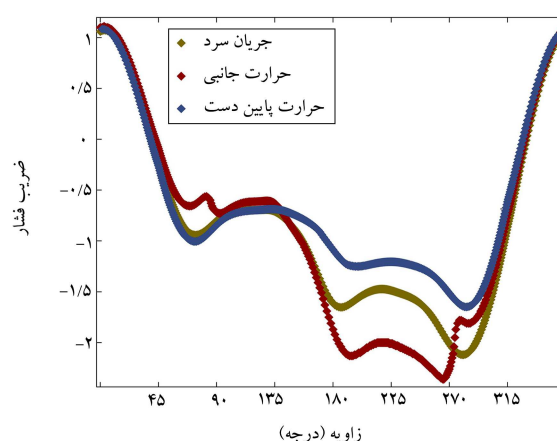
شکل ۹. (الف) توزیع چرخش؛ (ب) توزیع فشار؛ (ج) میدان بردار سرعت؛ (د) خطوط جریان در اطراف استوانه، تصویر بالایی مربوط به جریان سرد، تصویر میانی مربوط به حالت حرارت جانبی و تصویر پایینی برای حالت حرارت از پایین دست است.



شکل ۱۰. پروفیل سرعت جریان عبوری از روی استوانه برای حالات مختلف. (الف) $\theta = 90^\circ$ و (ب) $\theta = 270^\circ$.

کاهش اختلاف فشار بالادست و پایین دست استوانه با کاهش نیروی پسا همراه شده است. نکته‌ای قابل توجه دیگر تقارن توزیع فشار در نزدیکی نواحی جدایش جریان (زوایای 90° و 270° درجه) است که از تقارن توزیع فشار پشت استوانه نشأت گرفته است. کاهش رینولدز موضعی در نواحی جدایش جریان برای حالت حرارت جانبی به معنی کاهش سرعت جریان و افزایش فشار در مقایسه با جریان سرد است، به طوری که در زمان جدایش گردابه‌ی بالایی، فشار در محل تشکیل آن، در مقایسه با جریان سرد، اندکی افزایش داشته است. شکل ۱۰ پروفیل سرعت بی‌بعد جریان در زوایای $\theta = 90^\circ$ و $\theta = 270^\circ$ را روی استوانه نشان می‌دهد. از تصاویر می‌توان دریافت که در حالت حرارت پایین دست، خلاف دو حالت دیگر، پروفیل سرعت در

جدایش گردابه‌ها شده است. در جریان سرد و حرارت جانبی در زمان تشکیل گردابه پایینی و ایجاد فشار منفی، گردابه‌ی بالایی از قبل جدا شده و فشار در محل آن افزایش یافته، به طوری که همزمانی این دو رویداد موجب ایجاد اختلاف فشار قابل توجهی در محل تشکیل دو گردابه شده است. اما در حالت حرارت از پایین دست با افزایش طول گردابه و تأخیر در جدایش، در زمان جدایش گردابه بالایی، مرکز گردابه زیرین هم از سطح استوانه فاصله گرفته و فشار به تدریج در حال افزایش است. این توزیع متقارن میدان سرعت و فشار، عاملی بر کاهش دامنه‌ی نوسان نیروی برا است. در حالت حرارت پایین دست با افزایش لزجت هوا و پایداری میدان جریان، سرعت جریان کاهش و فشار پشت استوانه افزایش پیدا کرده است؛ به نحوی که



شکل ۱۱. توزیع ضریب فشار در حالات جریان سرد، حرارت جانبی و پایین دست برای المان حرارتی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد.

زوایای مذکور تقریباً متقارن است که به معنی تقارن میدان سرعت و فشار در اطراف استوانه است و با نتایج به دست آمده همخوانی دارد.

نمودار شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی توزیع ضریب فشار حول استوانه برای سه حالت جریان سرد، گرمایش پایین دست و جانبی است. مشاهده می‌شود که در حالت گرمایش پایین دست، اختلاف فشار در بازه‌ی زاویه‌ی ۲۷۰ تا ۹۰ (محل تشکیل گردابه‌های بالا و پایین) کاهش یافته است و این امر موجب کاهش نیروی بر می‌شود که منطبق با نتایج توزیع فشار شکل ۹ است. همچنین اختلاف فشار بین نقطه‌ی سکون بالادست و پایین دست استوانه کاهش یافته است که کاهش نیروی پسا را به همراه دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر تغییر در لایه‌ی مرزی حرارتی بر لایه‌ی مرزی سرعت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور اثر استفاده از المان حرارتی در سطح یک استوانه دو

بعدی بر روی نیروهای آیرودینامیکی در معرض جریان هوا با رینولدز ۱۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که موقعیت مکانی، اندازه و دمای المان حرارتی بر مقادیر نیروها و کنترل جریان مؤثر است. به نحوی که استفاده از المان حرارتی با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در زاویه ۲۵۵ تا ۱۰۵، دامنه‌ی نوسان نیروی برا را ۸۷/۱٪ و متوسط نیروی پسا را ۲۵/۹٪ کاهش داد. همچنین اندازه‌ی گردابه‌ها، فرکانس جدایش و بزرگی چرخش آنها و نیز توزیع فشار حول استوانه و تنش برشی در سطح آن با استفاده از المان حرارتی بر روی استوانه تغییر می‌کند. به طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت:

- افزایش عدد ناسلت در سطح استوانه سبب کاهش رینولدز جریان و افزایش لزجت هوا در محل المان حرارتی می‌شود. این امر افزایش تنش برشی وارد بر سطح استوانه را به همراه داشته و جدایش جریان را به تأخیر می‌اندازد؛
- استفاده از المان حرارتی در نیمه‌ی پایین دست استوانه (۲۵۵ تا ۱۰۵) بیشترین تأثیر را در کاهش دامنه نوسان نیروهای برا و پسا و نیز متوسط نیروی پسا دارد؛
- افزایش دمای المان حرارتی میزان تغییرات در نیروهای وارد بر استوانه را شدت می‌بخشد؛
- اگرچه افزایش لزجت هوا در اثر افزایش دما ماهیتی پایدارکننده برای سیال دارد، استفاده از المان حرارتی در جوانب استوانه موجب ناپایداری جریان می‌شود. علت این پدیده کاهش موضعی سرعت جریان در اثر افزایش لزجت هوا در محل نصب المان حرارتی است که منجر به افزایش فشار می‌شود و در نتیجه، اختلاف فشار در بالا و پایین استوانه افزایش می‌یابد؛
- تغییر در لایه‌ی مرزی حرارتی موجب تغییر در مشخصه‌های گردابه‌ها می‌شود. به طوری که در حالت حرارت از پایین دست، افزایش لزجت هوا سبب می‌شود که قدرت گردابه‌ها کاهش و خطوط جریان متقارن تر شده و به دلیل به تأخیر افتادن قطع لایه‌های برشی آزاد دو طرف، جدایش گردابه‌ها در فاصله‌ی دورتر از استوانه اتفاق افتاده و طول آنها افزایش یابد. با کاهش گردایان‌های سرعت و فشار در پایین دست استوانه، توزیع فشار در اطراف آن تقارن بیشتری پیدا کرده و سبب کاهش اندازه و دامنه‌ی نوسان نیروهای وارد بر استوانه می‌شود.

منابع (References)

1. Sumner, D. "Two circular cylinders in cross-flow: A review", *Journal of Fluids and Structures*, **26**(6), pp. 849-899 (2010).
2. Muddada, S. and Patnaik, B.S. "An active flow control strategy for the suppression of vortex structures behind a circular cylinder", *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, **1;29**(2), pp. 93-104 (2010).
3. Golani, R. and Dhiman, A. "Fluid flow and heat transfer across a circular cylinder in the unsteady flow regime", *Int. J. Eng.Sci.*, **3**(3), pp. 8-19 (2014).
4. Sanitjai, S. and Goldstein, R.J. "Forced convection heat transfer from a circular cylinder in crossflow to air and

liquids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**(22), pp. 4795-4805 (2004).

5. Biswas, G. and Sarkar, S. "Effect of thermal buoyancy on vortex shedding past a circular cylinder in cross-flow at low reynolds numbers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**(7-8), pp. 1897-1912 (2009).
6. Hamad, F. and He, S. "Heat transfer from a cylinder in cross-flow of single and multiphase flows", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, **11**(3), pp. 386-390 (2017).
7. Marquart, J., Endicott, D. and Dear, C. "CFD investigation of the drag effects of heating and cooling cylinders in crossflow", *In 6th AIAA Flow Control Conference* (2012).

8. Xiao-Feng, X. and et al. "Local heating effect of flow past a circular cylinder", *Chinese Physics Letters*, **27**(4), p. 044701 (2010).
9. Shi, J.M. and et al. "Heating effect on steady and unsteady horizontal laminar flow of air past a circular cylinder", *12 Physics of Fluids*, **16**(12), pp. 4331-4345 (2004).
10. Park, J.M. and et al. "Heat transfer characteristics of circular and elliptic cylinders in cross flow", *Advances in Mechanical Engineering*, **7**(11), p.1-8 (2015). DOI:10.1177/1687814015619553.
11. Achenbach, E. "Total and local heat transfer from a smooth circular cylinder in cross-flow at high reynolds number", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **18**(12), pp. 1387-1396 (1975).
12. Darvishyadegari, M. and Hassanzadeh, R. "Analysis of the convective heat transfer and flow behavior around two counter rotating side by side cylinders", *Heat Transfer-Asian Research*, **47**(6), pp. 835-854 (2018).
13. Xie, J. and Xie, G. "Vortex dynamics of supercritical carbon dioxide flow past a heated circular cylinder at low Reynolds numbers", *Physics of Fluids*, **34**(1), p. 017111 (2022).
14. Deepak, K. and et al. "Numerical investigation on laminar cross-flow around a top surface heated square cylinder", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, (2021).
15. Bouzari, S. and Ghazanfarian, J. "Unsteady forced convection over cylinder with radial fins in cross flow", *Applied Thermal Engineering*, **112**, pp. 214-225 (2017).
16. Wang, A.B., Trávníček, Z. and Chia, K.C. "On the relationship of effective reynolds number and strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder", *Physics of Fluids*, **12**(6), pp. 1401-1410 (2000).
17. Aiba, S., Ota, T. and Tsuchida, H. "Heat transfer and flow around a circular cylinder with tripping-wires", *Wärme-und Stoffübertragung*, **12**(3), pp. 221-31 (1979).
18. Arif, M.R. and Hasan, N. "Effect of thermal buoyancy on vortex-shedding and aerodynamic characteristics for fluid flow past an inclined square cylinder", *Int. J. Heat Technol*, **38**(2), pp. 463-471 (2020).
19. Homsy, R., Islam, M.D., Fatt, Y.Y. and et al. "Flow dynamics over a heated cylinder subjected to high temperature ratios", *Case Studies in Thermal Engineering*, **27**, p. 101357 (2021).
20. Morris, A.S. and Langari, R., *Measurement and Instrumentation: Theory and Application*, Academic Press (2011).
21. Schlichting, H. and et al., *Boundary Layer Theory Springer*, Eighth Revised and Enlarged Edition (2000).
22. Ghiaasiaan, S.M., *Convective Heat and Mass Transfer*. CRC Press (2018).
23. Salehi, M.A., Mazaheri, S. and Kazeminezhad, M.H. "Study of flow characteristics around a near-wall circular cylinder subjected to a steady cross-flow", *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, **1**(4), pp. 45-55 (2018).
24. Lin, L., Zhong, X. and Wu, Y. "The drag, lift and strouhal number of a circular-section cylinder with a conic disturbance at subcritical reynolds numbers", In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, (Vol. **45400**, p. V002T08A001). American Society of Mechanical Engineers (2014).