



بررسی اثر تغییر ارتفاع کانال ایزوترمال بر رفتار ارتعاشی و حرارتی سیلندر قرار گرفته بر روی بستر الاستیک تحت تأثیر جریان جت یکطرفه و دوطرفه

سمیه داودآبادی فراهانی، امیرمحمد زکی نیا، امیر حسین ربیعی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸

کلمات کلیدی:

ارتعاش القایی گردابه
جریان جت
کنترل جریان
ریزش گردابه‌ها
انتقال حرارت کانال

خلاصه: در این مقاله، کنترل فعال جریان ارتعاشات ناشی از جریان سیلندر دایروی قرار گرفته در داخل کانال ایزوترمال توسط روش تزریق جریان جت، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثر تزریق جریان بر انتقال حرارت داخل کانال نیز مورد بازمی‌رسی قرار گرفته است. برای این منظور، سه شیار بصورت متقارن در دیواره‌های بالایی و پایینی کانال در فواصل ۱۰ و ۴ برابر قطر استوانه می‌باشد از سطح کناری سیلندر جایگذاری شده‌اند. نوآوری اصلی مطالعه حاضر، بررسی اثربخشی روش ارائه شده بر حسب ارتفاع کانال می‌باشد. برای این منظور، ۶ کانال با ارتفاع‌های ۵/۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ برابر قطر استوانه برای انجام شبیه‌سازی‌های تعامل جریان-سازه‌ای در نظر گرفته شده است. برای حل معادلات جریان و انرژی از روش حجم محدود استفاده شده است. برای کوپلینگ حرکت استوانه با میدان جریان از روش دینامیک شبکه استفاده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که برای تمامی کانال‌ها با ارتفاع‌های مختلف، تزریق جت چه بصورت یکطرفه و چه دو طرفه، از شیار ۳، اثری در جابجایی ندارد چراکه فاصله جت از سیلندر زیاد می‌باشد. با افزایش ارتفاع کانال می‌بایست، برای کاهش کامل نوسانات سیلندر، سرعت تزریق را افزایش داد. علت اصلی کاهش کامل ارتعاشات توسط روش تزریق جریان جت، در توقف روند ریزش گردابه‌ها دیده می‌شود.

۱- مقدمه

بخش زیادی از انرژی جریان به سازه منتقل شده و دامنه ارتعاشات به شدت افزایش می‌یابد. ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه می‌تواند خسارات جبران ناپذیری را به بسیاری از سازه‌ها مانند لوله‌های مبدل‌های حرارتی، سازه‌ها و پل‌فرم‌های اقیانوسی و دریایی، لوله‌های انتقال نفت و گاز در بستر دریاها، کابل‌ها، ساختمان‌های بلند، دودکش‌ها و پل‌ها اعمال کند؛ به همین دلیل کاهش ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه ۲ توسط روش‌های مختلف کنترل ارتعاشات، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳].

از دو جنبه مختلف می‌توان روش‌های کنترل ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه‌ها را تقسیم بندی نمود. از جنبه اول، روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه به دو روش (۱) کنترل غیرفعال^۷ و (۲) کنترل فعال^۸ دسته‌بندی می‌شوند. در روش‌های کنترل غیرفعال ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه، با انجام اصلاحات سازه‌ای مانند اضافه کردن نوارهای ماریچ، صفحه جداساز، برآمدگی‌های سطحی و غیره، تغییراتی در میدان جریان حول سیلندر ایجاد می‌شود که می‌تواند باعث کاهش ارتعاشات ناشی از جدایش

ارتعاشات ناشی از جریان^۱ به ناپایداری‌ها و حرکات سازه‌ای اطلاق می‌شود که به واسطه عبور جریان ایجاد می‌شوند. ارتعاشات ناشی از جریان عمدتاً به ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه‌ها^۲، گالوپینگ^۳، فلاتر^۴، ارتعاشات ناشی از دنباله گردابه^۵ تقسیم بندی می‌شود که هر کدام شرایط و مکانیزم بخصوصی دارند [۱]. ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه به دلیل ریزش متناوب گردابه‌ها (که در اثر عبور جریان آزاد از جسم توپی شکل اتفاق می‌افتد) تولید می‌شود [۲]. این نوسانات هنگامیکه فرکانس ریزش گردابه‌ها با فرکانس طبیعی سازه برابر می‌شود به حداکثر مقدار خود می‌رسد. به ناحیه‌ای که پدیده تطابق فرکانسی اتفاق می‌افتد، ناحیه قفل^۶ گفته می‌شود. در این ناحیه

- 1 Flow-Induced Vibration (FIV)
- 2 Vortex-Induced Vibration (VIV)
- 3 Galloping
- 4 Flutter
- 5 Wake-Induced Vibration (WIV)
- 6 Lock-in

- 7 Passive control
- 8 Active control

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rabiee@arak.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



بسیار مهمی می‌باشد که اگر بطور مناسبی انتخاب نشود حتی می‌تواند باعث افزایش دامنه ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه گردد.

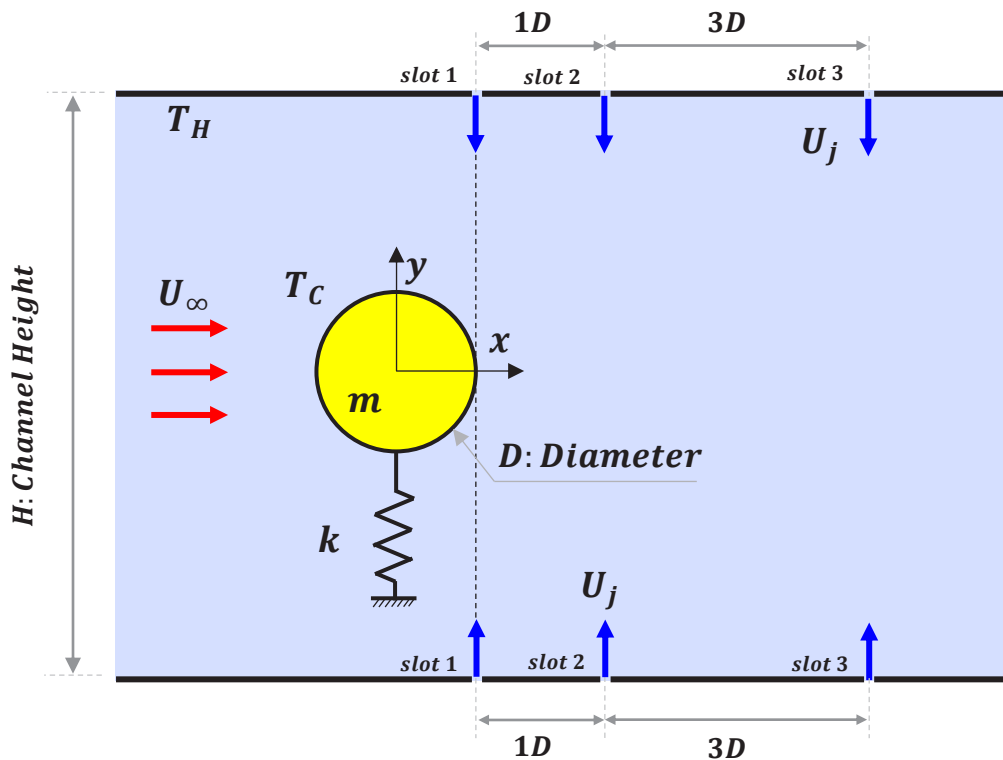
پرداختن به مشخصات حرارتی سیلندره‌های ثابت و نوسانی که تحت تأثیر جریان قرار دارند، یکی دیگر از علاقه‌های محققان در سال‌های گذشته، بوده است [۱۴]. به هر حال، بیشتر این تحقیقات بر انتقال حرارت از سیلندره‌های ثابت پرداخته شده است که از پارامترهای تأثیرگذار می‌توان به هندسه سیلندر و مشخصات جریان ورودی، اشاره نمود. به عنوان مثال، کومار و همکاران [۱۵] به مقایسه انتقال حرارت و میدان جریان پیرامون یک سیلندر نیم‌دایروی با یک سیلندر دایروی پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که دامنه ضریب پسای سیلندر نیم‌دایروی نسبت به دایروی بیشتر می‌باشد. همچنین دیده شد که متوسط عدد ناسلت سیلندر نیم‌دایره‌ای با افزایش عدد رینولدز و عدد پرانتل افزایش می‌یابد. چاتارجی و امیرالدین [۱۶] به بررسی انتقال حرارت سیلندره‌های مربعی متوالی پرداختند و دریافتند که انتقال حرارت و ضریب پسا با افزایش نسبت انسداد افزایش پیدا می‌کند. در زمینه بررسی انتقال حرارت از سیلندره‌های ارتعاشی، تحقیقات محدودی که عمدتاً در سال‌های اخیر انجام شده است، وجود دارد.

ترکیب مسئله ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه و انتقال حرارت در بعضی از کاربردهای مهندسی مانند لوله‌های مبدل‌های حرارتی، اجتناب ناپذیر می‌باشد [۱۷]. لین و همکاران [۱۷] نشان دادند که انتقال حرارت از سیلندر ارتعاشی در محدوده ناحیه تطابق فرکانسی که در آن فرکانس ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه به فرکانس طبیعی نوسانگر نزدیک می‌شود، به میزان ۱۳٪ افزایش می‌یابد. سان و همکاران [۱۸] به بررسی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه و انتقال حرارت سیلندره‌های دایروی، بیضی عمودی و بیضی افقی پرداختند و متوجه شدند که سیلندر بیضوی عمودی دامنه جابجایی و همچنین نرخ انتقال حرارت بالاتری نسبت به دو هندسه دیگر دارد. ایزدپناه و همکاران [۱۹] به بررسی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه یک درجه آزادی و انتقال حرارت سیلندر دایروی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش سرعت کاهش یافته، متوسط عدد ناسلت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به تازگی، یانگ و همکاران [۲۰] به بررسی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه و انتقال حرارت از سیلندر دایروی که آزادانه در دو جهت طولی و عرضی ارتعاش می‌کند پرداختند. آن‌ها نشان دادند که ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه دو درجه آزادی می‌تواند، متوسط عدد ناسلت را نسبت به سیلندر ارتعاشی یک درجه آزادی، به میزان ۲/۴۶٪ افزایش دهد. با توجه به مروری بر تحقیقات انجام شده، مشاهده می‌شود که اگر چه

گردابه شود [۴]. روش‌های غیرفعال، نیاز به منبع انرژی خارجی ندارند و نسبت به روش‌های کنترل فعال پیاده‌سازی ساده‌تری دارند. در نقطه مقابل، عملکرد این روش‌ها قابل تضمین نیست و در بعضی از شرایط حتی می‌تواند باعث افزایش دامنه ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه شوند. همچنین این روش‌های قابل تطبیق و تنظیم نیستند. روش‌های کنترل فعال ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با بهره‌گیری از منبع انرژی خارجی، می‌توانند تغییرات با قدرت بیشتری در سازه و جریان ایجاد کنند که باعث بهبود عملکرد این روش‌ها می‌شود [۵ و ۶].

از جنبه دوم، روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه به دو روش (۱) کنترل مستقیم ارتعاشات سازه‌ای و (۲) کنترل جریان، دسته‌بندی می‌شوند. در روش‌های کنترل مستقیم ارتعاشات که عمدتاً جزء روش‌های کنترل فعال می‌باشند، ابزارهای کنترلی بطور مستقیم به سیلندر متصل شده و نوسانات سازه‌ای را هدف می‌گیرند [۷ و ۸]. در روش‌های کنترل جریان، با اعمال تغییراتی در دنباله گردابه‌ها یا در روند ریزش گردابه‌ها، بطور غیرمستقیم، دامنه ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه کاهش پیدا می‌یابد [۹]. بهره‌گیری از جریان جت که تحت عناوین تزریق جریان، جریان جت یا دمش جریان شناخته می‌شود، یکی از روش‌های مؤثر به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از جریان می‌باشد که جزء روش‌های کنترل فعال جریان (کنترل فعال از دسته بندی اول + کنترل جریان از دسته بندی دوم) به حساب می‌آید [۱۰]. در این روش، با جت جریان، تغییرات اساسی در روند ریزش گردابه‌ها ایجاد می‌شود که به واسطه آن، نیروهای هیدرودینامیکی وارد به سیلندر کاهش یافته و در نهایت دامنه ارتعاشات کاهش می‌یابد. محققین متعددی در سال‌های گذشته، اثربخشی این روش را مورد بررسی قرار داده‌اند.

بطور مثال، فنگ و وانگ [۱۱]، با آزمایش‌های انجام شده در کانال آب، با بهره‌گیری از تزریق جت از شیارهای قرار گرفته در نقطه رکود (نقطه ایستایی) عقبی، موفق شدند، تعاملات بین گردابه‌های بالا و پایینی ریخته شده از سیلندر را کاهش داده و به تبع آن نیروهای وارد بر آن را کاهش دهند. وانگ و همکاران [۱۲] بصورت عددی، اثر یک جفت جت که بصورت متقارن در سطح پشت سیلندر قرار گرفتند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که اگر محل قرارگیری شیارها نزدیک به نقاط جدایش جریان از سطح سیلندر باشد، اثربخشی بسیار خوبی در روش کنترل جریان قابل مشاهده می‌باشد. به تازگی وانگ و همکاران [۱۳] بصورت عددی، اثر زاویه خروج و اختلاف فاز جت نوسانی را بر کاهش ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه سیلندر دایروی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که زاویه جت پارامتر



شکل ۱. پیکره‌بندی کلی مساله حاضر

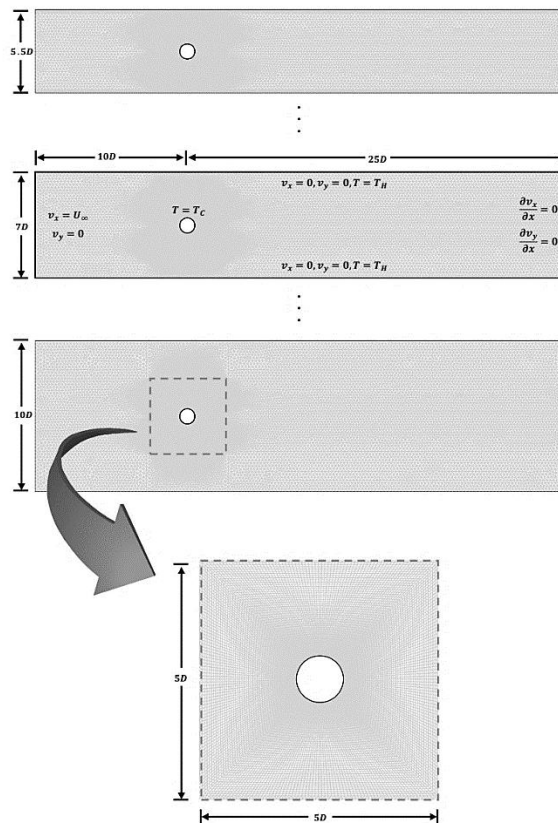
Fig.1. General configuration of the present problem

بر دامنه ارتعاشات استوانه، الگوی ریزش گردابه‌ها و عدد ناسلت بررسی شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند در بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی، گرمکن‌های خورشیدی و خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی استفاده گردد.

۲- مدل ریاضی

در این مطالعه به بررسی عددی اثر تزریق جت از دیواره‌های پایینی و بالایی کانال بر ارتعاشات القایی و انتقال حرارت از کانال با ارتفاع‌های مختلف ۵/۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ برابر قطر سیلندر، پرداخته شده است. شماتیکی از مسئله مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کانالی با شرط مرزی دما ثابت در ابعاد $35D \times H$ در نظر گرفته شده است. سیلندر بر اثر برخورد جریان و ریزش گردابه‌ها می‌تواند آزادانه در جهت y (جهت عرضی) نوسان کند. شیارها بر روی دیواره پایینی و بالایی کانال و در فواصل ۰، ۱ و ۴ برابر قطر استوانه از کنار سیلندر قرار دارند (شکل ۱ را ببینید).

تحقیقات زیادی در رابطه با کنترل ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه از طریق تزریق جت، انتقال حرارت سیلندر ثابت با هندسه‌های مختلف و همچنین انتقال حرارت سیلندره‌های ارتعاشی پرداخته شده است ولی اثر تزریق جت از دیواره‌های کانال بر ارتعاشات و انتقال حرارت سیلندر انجام نشده بود. به همین منظور، نویسندگان مقاله حاضر در قدم اول، اثر تزریق جت را بر پاسخ زمانی جابجایی و حرارتی سیلندر که آزادانه در جهت عرضی ارتعاش می‌کند، مورد مطالعه قرار دادند [۲۱]. همچنین ایشان در قدم دوم، اثر زاویه تزریق جت یکطرفه و دو طرفه نیز بر رفتار ارتعاشی/حرارتی استوانه قرار گرفته داخل کانال، مورد بررسی قرار دادند [۲۲]. از آنجایی که تاکنون اثر تغییر ارتفاع کانال بر ارتعاشات آزاد استوانه بررسی نشده است و در این زمینه کمبود دانش احساس می‌شود. بنابر این در این مطالعه، اثر تغییر ارتفاع کانال بر رفتار ارتعاشی و حرارتی سیلندر قرار گرفته در داخل کانال که تحت تأثیر جریان جت از دیواره‌ها می‌باشد، مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر میدان دما و جریان استفاده شده است. اثر تزریق جت یک طرفه و دو طرفه، فاصله جت از استوانه و تغییر ارتفاع کانال



شکل ۲. فضای محاسباتی، مش‌بندی و شرایط مرزی

Fig. 2. Computing domain, meshing and boundary conditions

که به ترتیب ρ چگالی سیال، T دما، t زمان، P فشار استاتیکی، μ ویسکوزیته دینامیکی، V سرعت، C_p ظرفیت گرمایی در فشار ثابت و λ ضریب رسانایی حرارتی، هستند. برای بیان انتقال حرارت از تعریف عدد ناسلت استفاده شده است.

$$Nu = -\frac{hD}{\lambda} \quad (4)$$

که h ضریب انتقال حرارت جابجایی است. شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای دیواره‌های کانال و سیلندر شرط مرزی عدم لغزش استفاده شده است. دمای دیواره کانال و سیلندر به ترتیب T_C و T_H در نظر گرفته شده است. سیال با سرعت و دمای یکنواخت U_∞ و T_∞ وارد کانال می‌شود. شرط مرزی خروجی برای مرز قائم سمت راست دامنه حل در نظر گرفته شده است. جت از شیارهای در نظر گرفته شده بر روی دیواره پایینی کانال با سرعت و دمای U_j و T_∞ به داخل کانال تزریق می‌شود.

۲-۱- معادلات جریان

میدان جریان دوبعدی و سیال آن نیوتنی هستند. رژیم جریان آرام و تراکم ناپذیر است. هیچ نیروی خارجی مانند نیروهای الکتریکی و مغناطیسی وجود ندارد. معادلات پیوستگی، ممتوم و انرژی برای جریان در کانال برای سیال تراکم ناپذیر نیوتنی و با صرف نظر از اتلافات حرارتی ویسکوزیته به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\nabla V = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (3)$$

۲-۲- معادلات ارتعاشی

کافی برای پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده در ناحیه جدایش جریان و دنباله استوانه است. از روش میانابایی مرکزی نیز برای تخمین شارهای پخش روی سطح سلول‌ها استفاده شده است. در حین حل گذرا، نیروی برآ بر سیلندر با توابع تعریف شده به وسیله کاربر^۱ با استفاده از ضریب بی بعد برآ طبق معادله (۶) به دست می‌آیند. با استفاده از آن، مقدار برآیند نیروی اعمالی از طرف فنر و دمپر و جریان بر سیلندر حاصل می‌شود، سپس مقدار شتاب سیلندر و سرعت حرکت در گام زمانی حل به دست می‌آید. با توجه به اینکه سرعت در گام زمانی جدید برابر صفر نیست، نرم افزار شرط مرزی سرعت را روی سلول‌های سطح سیلندر به روز رسانی می‌کند و میدان جریان با شرایط مرزی جدید و موقعیت جدید سیلندر، در شبکه‌ی تغییر شکل یافته برای آن گام زمانی حل می‌شود. برای حل کوپلینگ سرعت-فشار از روش پیرو^۲ و برای گسسته‌سازی گرادیان فشار از روش پرستو^۳ و برای گسسته‌سازی معادلات ممنوم از روش کوئیک^۴ استفاده شده است. برای شبیه سازی حرکت صلب‌گونه سیلندر از مش متحرک استفاده شده است. سلول‌های شبکه نزدیک به دیواره‌ها و در ناحیه پشت استوانه و در نزدیکی دیواره‌های کانال بسیار ریز شده‌اند تا متغیرهای وابسته که گرادیان شدید در این نواحی دارند، با دقت خوبی پیش‌بینی شوند. بدون توجه به شرایط اولیه، میدان جریان در این مسأله پس از گذشت زمان نسبتاً کافی به حالت پرئودیک دائمی می‌رسد. در تحقیق حاضر برای مقایسه لحظه به لحظه تمام حالت‌های هندسی مختلف شرط اولیه یکسانی استفاده شده است. به این منظور میدان جریان در ابتدای هر حل عددی ساکن در نظر گرفته شد. محاسبات در هر گام زمانی باید آنقدر تکرار شود تا تغییرات تمامی مانده‌های متغیرهای وابسته ناچیز شوند. در حل عددی اگر مانده‌ها طی تکرارهای عددی تغییر نکنند، همگرایی عددی کامل حاصل شده است. نمونه‌ای از نمودارهای تغییرات مانده‌ها را در مقابل تعداد تکرارهای در یک گام زمانی برای یکی از حل‌های عددی در شکل ۳ نشان می‌دهد.

۲-۴- بررسی استقلال از شبکه

برای حل عددی نیاز به داشتن شبکه محاسباتی دقیق است که نتایج مستقل از ابعاد شبکه باشد. چند شبکه مختلف با تعداد گره‌های متفاوت (از کم به زیاد) در نظر گرفته شده است. برای این منظور ضریب پسا و ضریب برآی ماکزیمم سیلندر ثابت در رینولدز ۱۰۰ برای چند شبکه به دست آورده

حضور استوانه در مسیر جریان در کانال باعث تغییر در میدان‌های سرعت و فشار توزیع شده در محدوده میدان جریان در کانال می‌شود. توزیع سرعت در مجاورت سطح استوانه باعث توزیع فشار و تنش برشی روی بدنه آن می‌شود. با انتگرال‌گیری نیروهای تنشی و فشاری توزیع شده روی سطح استوانه در هر لحظه می‌توان نیروی وارد شده از طرف سیال به آنها را محاسبه کرد. این نیرو دارای مؤلفه‌هایی در امتداد جریان و عمود بر آن است که به ترتیب نیروهای پسا و برآ نامیده می‌شوند. به واسطه اعمال این نیروها، اگر سیلندر بر روی بستر الاستیک قرار گرفته باشد، شروع به ارتعاش می‌کند. در این مطالعه، حرکت سیلندر دایروی در جهت y محدود شده است. برای مدل‌سازی ارتعاشی سیلندر قرار گرفته در معرض جریان، می‌توان از مدل کلاسیک جرم-فنر-میراگر با معادله دیفرانسیل مرتبه دو به شکل زیر بهره گرفت:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_L \quad (5)$$

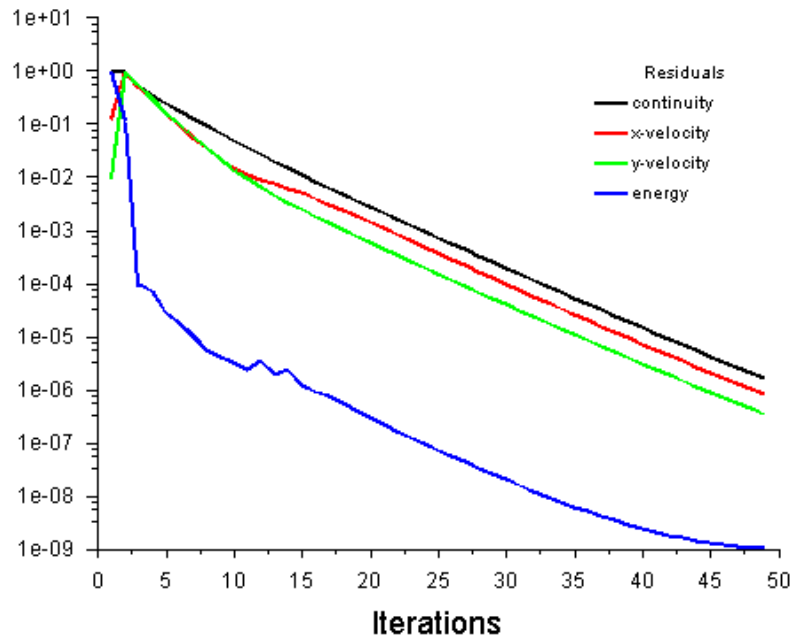
که در آن، m جرم سیلندر، k سختی فنر و c ضریب میرایی می‌باشند. همچنین F_L نیروی برآ، y جابجایی عرضی، \dot{y} و \ddot{y} به ترتیب مشتقات زمانی اول و دوم y که همان سرعت و شتاب عرضی هستند، می‌باشند. با دانستن عدد رینولدز $Re = \rho U_\infty D / \mu$ و جرم بی بعد شده $m^* = \rho m / (\pi \rho D^2)$ و همچنین فرکانس طبیعی بی بعد شده $f_n^* = \left(\frac{D}{2\pi U_\infty} \right) \sqrt{k/m}$ پارامترهای معادله (۵) محاسبه می‌شوند. برای به حداکثر رساندن دامنه ارتعاش سیلندر، مقدار میرایی برابر با صفر در نظر گرفته شده است. ضریب بی بعد برآ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2} \quad (6)$$

۲-۳- روش حل عددی

برای حل معادلات حاکم بر جریان و دما در دامنه محاسباتی از نرم افزار فلوئنت مبتنی روش حجم محدود استفاده شده است. از طرح بالاوزش مرتبه دوم برای درونابایی جملات شار روی سطوح سلول‌ها استفاده شده است. طرح بالاوزش مرتبه دوم دارای دقت

- 1 User Defined Function (UDF)
- 2 PISO
- 3 Presto!
- 4 Quick



شکل ۳- تغییرات مانده‌ها در یک گام زمانی

Fig. 3. Residue variations in one time-step

جدول ۱- اثر تغییر شبکه بر ضریب برا و پسا

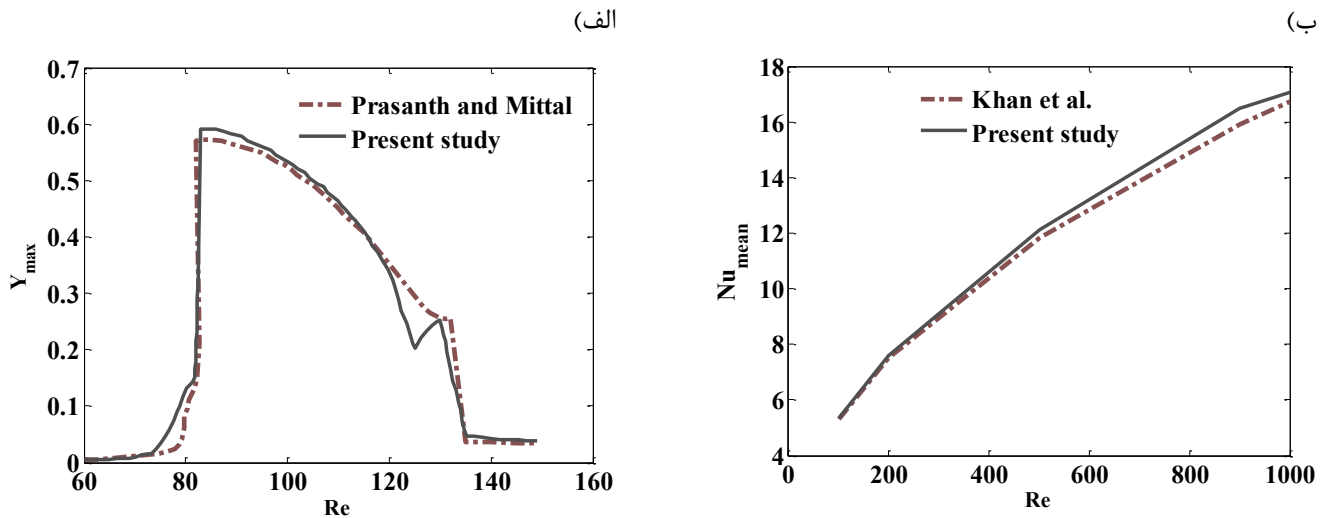
Table 1. The effect of Grid change on the lift and drag coefficients

ε_L	ε_D	C_L^{max}	\bar{C}_D	تعداد شبکه‌ها در بلوک مرکزی	تعداد کل شبکه‌ها	حالت
۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۴۲	۱/۴۵	۳۰۰۰	۸۹۰۰	حالت ۱
۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۴۱	۱/۴۳	۵۰۰۰	۱۵۶۰۰	حالت ۲
۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۴	۱/۴۲	۷۰۰۰	۱۷۰۰۰	حالت ۳
۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۳۸	۱/۳۹	۷۰۰۰	۲۱۰۰۰	حالت ۴
-	-	۰/۳۷۶	۱/۳۸۵	۹۰۰۰	۶۱۴۰۰	حالت ۵

۲-۵- اعتبارسنجی

برای اطمینان از دقت مدلسازی ارائه شده در پژوهش حاضر، مقایسه ای بین نتایج مطالعه حاضر و مطالعات پیشین انجام شده است. نتایج حاصل از ارتعاشات دو درجه آزادی برای پارامترهای ورودی $f_n^* = 16/4/Re$ ، $B = 0/05$ و $m^* = 10$ در شکل ۴ الف نشان داده شده است. همچنین درصد خطای نسبی بین نتایج نیز در بخش اول جدول ۲ ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که نتایج مطالعه حاضر با نتایج عددی ارائه شده با

شده است و نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین درصد خطای شبکه نیز با پارامترهای $\varepsilon_L = \left| \frac{C_{L,coarse}^{max} - C_{L,fine}^{max}}{C_{L,fine}^{max}} \right|$ و $\varepsilon_D = \left| \frac{\bar{C}_{D,coarse} - \bar{C}_{D,fine}}{\bar{C}_{D,fine}} \right|$ در جدول ۱ مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد حالت ۴ یک انتخاب مناسب برای ادامه بررسی‌ها است. با اندازه شبکه متوسط، انتخاب مناسبی برای شبیه‌سازی‌های پیش رو می‌باشد. این شبکه، مصالحه مناسبی بین دقت نتایج و هزینه محاسباتی برقرار کرده است. شکل ۲ شبکه بندی مسئله مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه تغییرات الف) ماکزیمم دامنه ارتعاشات عرضی استوانه الاستیک [۲۳] و ب) عدد ناسلت متوسط استوانه ساکن بر حسب عدد رینولدز [۲۴]

Fig. 4. Comparison of changes a) Maximum amplitude of transverse vibrations of an elastic cylinder [23] and b) Average Nusselt number of stationary cylinders in terms of Reynolds number [24]

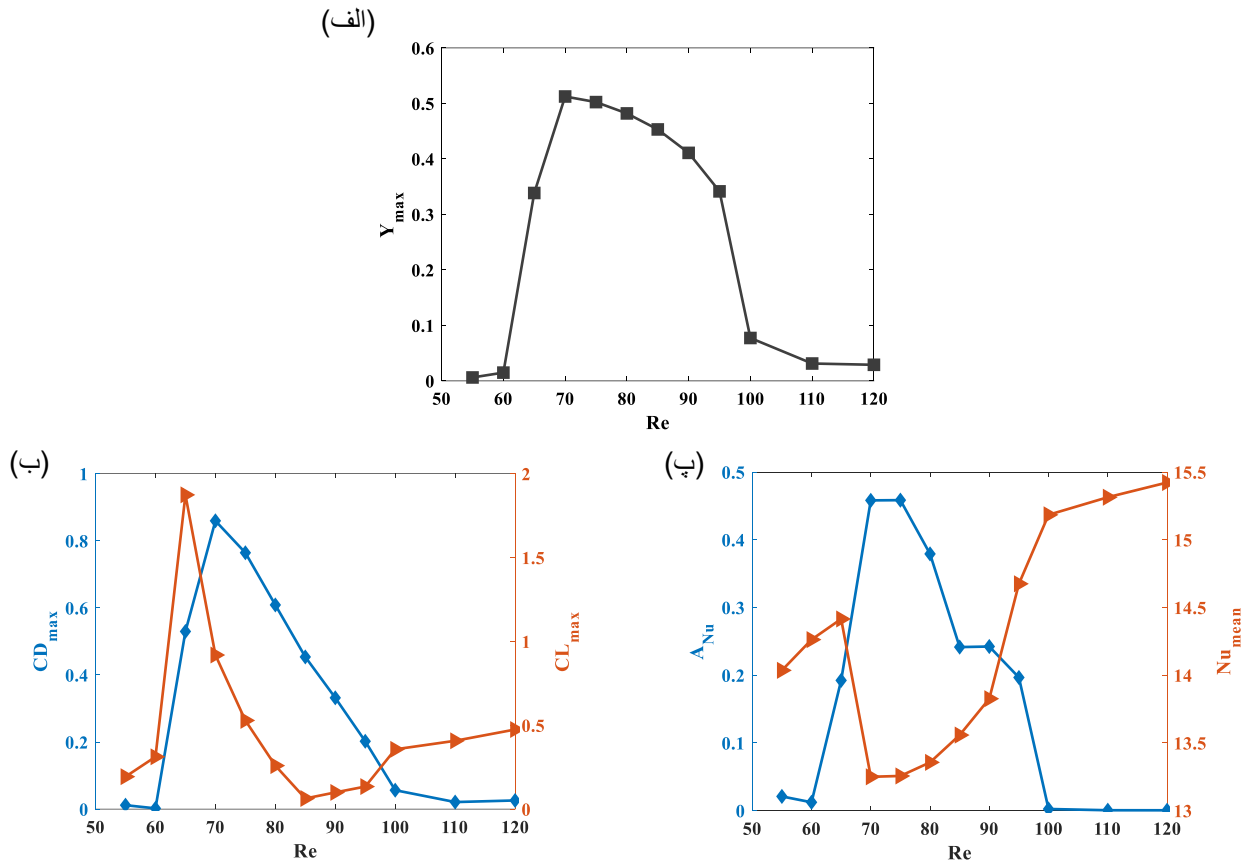
طرفه (بصورت همزمان از شیارهای بالایی و پایینی) انجام گرفته‌اند. در ادامه، نتایج عددی ارائه شده‌اند.

شکل ۵ الف، تغییرات ماکزیمم جابجایی سیلندر قرار گرفته در کانال با ارتفاع $7D$ را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. در همین شکل، تغییرات بیشینه دامنه ضرایب برآ و پسا و همچنین دامنه و بیشینه میانگین عدد ناسلت نیز آورده شده است. دیده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، جابجایی سیلندر به دلیل تطابق فرکانسی ایجاد شده در ناحیه قفل شدگی، دچار یک افزایش ناگهانی می‌شود. در همین راستا، جابجایی عرضی در عدد $Re = 70$ به بیشترین مقدار خود ($Y_{max} = 0.52$) رسیده است (شکل ۵ الف را ببینید). تطابق فرکانسی باعث انتقال انرژی از سیال به سازه و به تبع آن افزایش دامنه ضرایب هیدرودینامیکی می‌شود که در شکل ۵ ب دیده می‌شود. تغییرات دامنه عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در رینولدز ۷۰ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. رفتار تغییرات دامنه نوسانات عدد ناسلت (شکل ۵ پ) بر حسب رینولدز تقریباً مشابه با تغییرات جابجایی عرضی سیلندر است. در تغییرات میانگین عدد ناسلت با رینولدز، یک مقدار مینیمم در رینولدز ۷۰ مشاهده می‌شود، این مینیمم به دلیل تغییر فرکانس گردابه‌های تولید شده در پشت سیلندر و تطابق فرکانسی است که باعث می‌شود مقداری از انرژی سیال به سازه منتقل شود. بعد از رینولدز ۷۰ با افزایش رینولدز میانگین عدد ناسلت با افزایش گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه بیشترین دامنه

استفاده از روش ثابت شده فضا-زمان در مطالعه توسط پراسانتس و میتال [۲۳] مطابقت خوبی دارند. معمولاً تفاوت در نتایج در سه ناحیه شروع منطقه قفل شدگی فرکانسی که در آن بطور ناگهانی دامنه ارتعاشات استوانه افزایش پیدا می‌کند، منطقه قفل شدگی فرکانسی که در این ناحیه دامنه ارتعاشات به بیشترین مقدار خود رسیده است و منطقه پایانی که مجدداً دامنه ارتعاشات کاهش می‌یابد، دیده می‌شود. در این تحقیق تطابق بسیار خوبی در نواحی اول و دوم با نتایج مرجع [۲۳] دیده می‌شود. اما در ناحیه سوم در بعضی از اعداد رینولدز (اعداد رینولدز ۱۲۵ و ۱۳۵)، اختلاف در نتایج مشاهده می‌شود که این به دلیل روش‌های متفاوت حل عددی می‌باشد. در ادامه، ضریب انتقال حرارت سیلندر دایره‌ای در محدوده عدد رینولدز ۲۰۰-۱۰۰۰ برای سیالی با عدد پرانتل 0.7 محاسبه می‌شود و در شکل ۴ ب نشان داده شده است. درصد اختلاف بین نتایج و مرجع [۲۴] در حدود $1.1\% - 6.44\%$ است. شکل ۴ ب نشان دهنده سازگاری نتایج مطالعه حاضر با مرجع [۲۴] می‌باشد.

۳- بحث و نتایج

در این مطالعه اثر تزریق جریان از دیواره‌های بالا و پایینی و همچنین تغییر ارتفاع کانال بر رفتار ارتعاشی/حرارتی سیلندر ارتعاشی بررسی شده است. سه شیار در فواصل نزدیک، متوسط و دور از استوانه جایگذاری شده است. شبیه‌سازی‌های تعامل جریان سازه‌ای، یک بار برای تزریق جت بصورت یکطرفه (فقط از شیارهای پایینی) و بار دیگر برای تزریق جت دو



شکل ۵. (الف) تغییرات پاسخ سیلندر کنترل نشده در کانال با ارتفاع بر حسب عدد رینولدز، (ب) تغییرات بیشینه دامنه ضریب برآ و پسا، (پ) تغییرات دامنه و میانگین عدد ناسلت

Fig. 5. (a) The Response variations of uncontrolled cylinder in the channel with height 7D in terms of Reynolds number, (b) The variations of Maximum amplitude of lift and drag coefficient, (c) The variations of amplitude and mean Nusselt number

گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر و کاهش اختلاط در نواحی پشت سیلندر با افزایش ارتفاع کانال است.

شکل ۶، کانتورهای دما و تاوایی را در وضعیت توسعه یافته (به وضعیت ماندگار رسیده) را به ازای کانال‌ها با ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. از کانتورهای ورتیسیت به خوبی مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع کانال حالت ریبی شکل لایه مرزی اطراف دیواره کانال کاهش می‌یابد. همچنین اندازه گردابه‌ها نیز کاهش می‌یابد. در نهایت، کانتور تاوایی برای کانال‌ها با ارتفاع ۹ و ۱۰ نشان دهنده‌ی مُد گردابه‌ای S2 می‌باشد که در آن یک گردابه تکی از بالا و سپس گردابه تکی دیگری از پایین، بصورت متناوب، جدا می‌شود. تغییرات کانتورهای دما نیز مشابه تغییرات کانتورهای ورتیسیت است. با افزایش ارتفاع کانال، اختلاط در پشت سیلندر کاهش یافته است و میانگین دمای سیال در کانال کاهش یافته است.

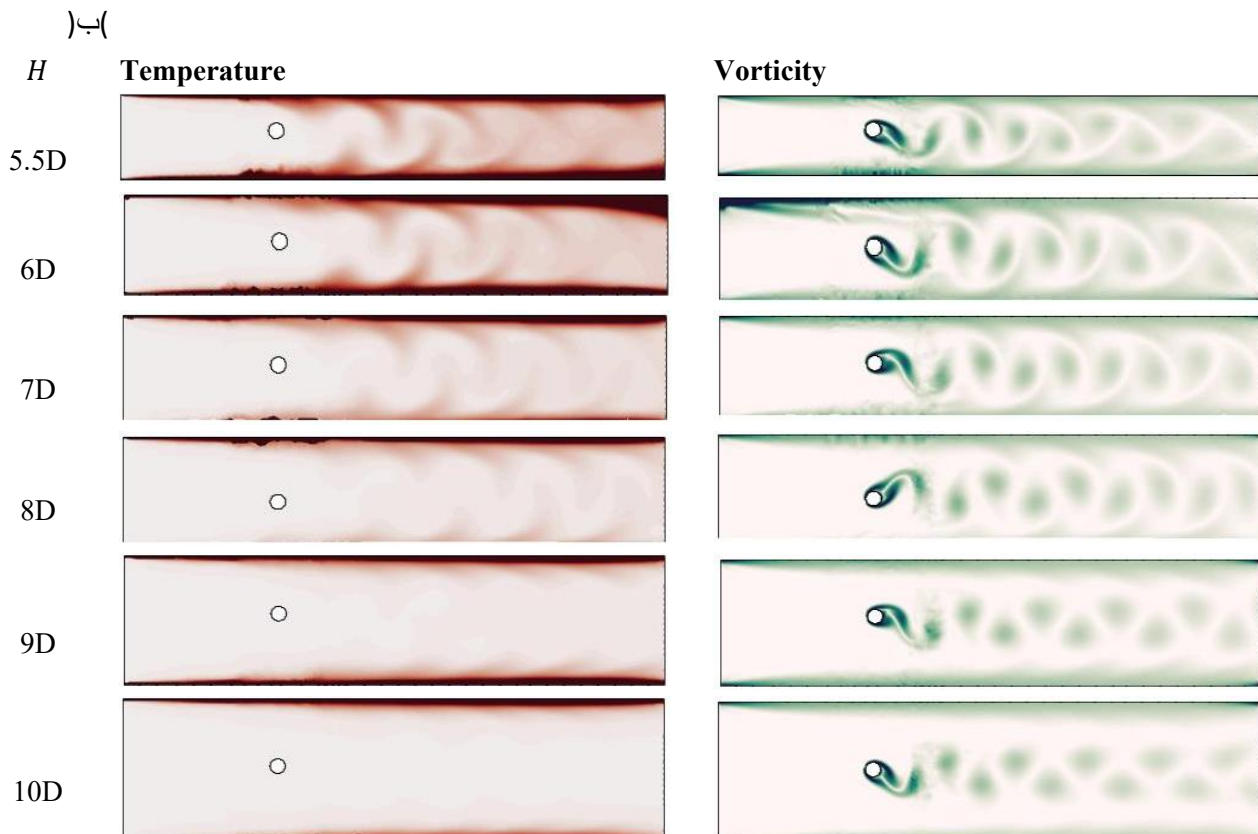
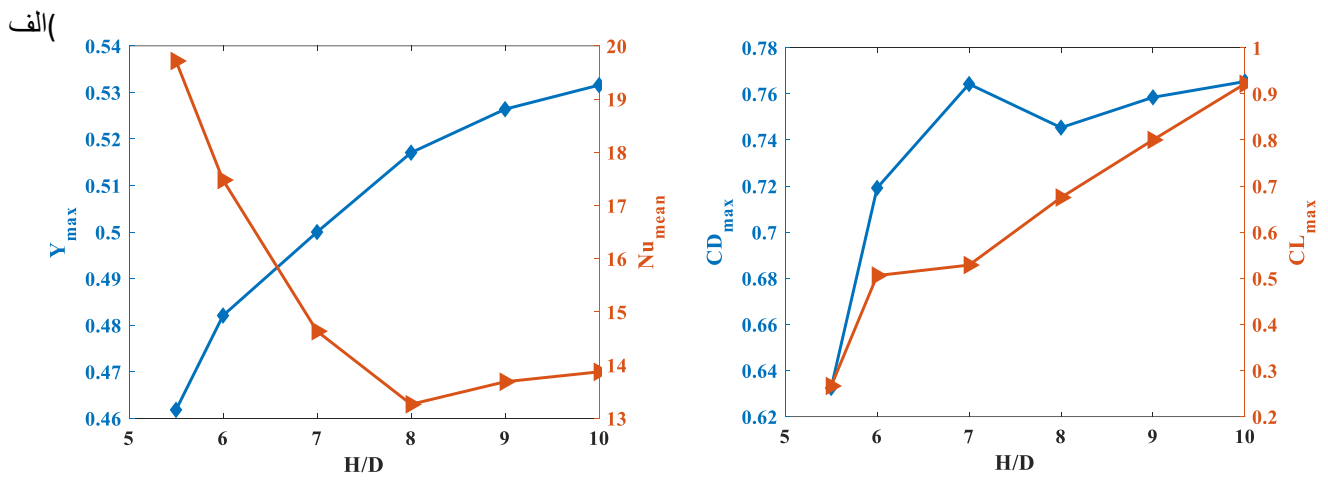
جابجایی سیلندر در حدود $Re = 70$ اتفاق می‌افتد، ادامه نتایج برای این عدد رینولدز آورده شده است.

شکل ۶الف، تغییرات بیشینه جابجایی، میانگین عدد ناسلت، ضریب پسا و برآ را بر حسب ارتفاع کانال در $Re = 75$ نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع کانال، بیشینه جابجایی سیلندر نیز افزایش پیدا می‌کند بطوریکه با افزایش ارتفاع کانال از ۵/۵ تا ۱۰، بیشینه جابجایی به میزان ۱۵٪ افزایش پیدا کرده است. با افزایش ارتفاع کانال، اثر دیواره‌های کانال و لایه مرزی ایجاد شده بر روی دیواره‌های کانال بر جدایش گردابه‌ها در پشت سیلندر کاهش می‌یابد و دامنه توسانات عرضی سیلندر در کانال افزایش می‌یابد. بطور مشابه، بیشینه دامنه ضرایب برآ و پسا نیز افزایش پیدا کرده است. در نقطه مقابل، دیده می‌شود که میانگین عدد ناسلت، با افزایش ارتفاع کانال، کاهش پیدا کرده است. منشأ این رفتار حرارتی به کاهش اندازه

جدول ۲. درصد اختلاف نتایج بدست در مطالعه حاضر با نتایج بدست آمده در مراجع [۲۳] و [۲۴]

Table 2. Percentage difference between the results obtained in the present study and the results obtained in Refs. [23] and [24]

درصد اختلاف	عدد رینولدز
درصد تغییرات نتایج بدست آمده با مرجع [۲۳]	
۰	۶۰
۵/۶۶	۶۵
۷/۵۲	۷۰
۳۳/۳۳	۷۵
۱۸/۰۱	۸۰
۳/۵۲	۸۵
۳/۰۲	۹۰
۲	۹۵
۱/۱۴	۱۰۰
۱/۶۳	۱۰۵
۱/۱۰	۱۱۰
۰/۴۸	۱۱۵
۳/۹۵	۱۲۰
۲۸/۶۲	۱۲۵
۶/۶۶	۱۳۰
۲۷/۰۲	۱۳۵
۱۷/۱۴	۱۴۰
۶/۹۵	۱۴۵
۵/۵۵	۱۵۰
درصد تغییرات با نتایج مرجع [۲۴]	
۳/۰۳	۱۰۰۰
۲/۷۶	۸۵۰
۳/۰۶	۷۰۰
۶/۴	۳۰۰
۰/۹	۲۰۰



شکل ۶. الف) تغییرات بیشینه جابجایی، میانگین عدد ناسلت، ضریب پسا و برآ بر حسب ارتفاع کانال در، (ب) کانتورهای دما و تاوایی به ازای کانال‌ها با ارتفاع‌های مختلف

Fig. 6. (a) Maximum displacement variations, mean Nusselt number, drag and lift coefficient in terms of channel height at $Re = 75$, (b) Temperature and vorticity counters for channel with different heights

شکل ۸، پاسخ ارتعاشی/حرارتی سیلندر کنترل شده (با تزریق جت) برای $H = 6D$ را نشان می‌دهد. روند کلی تغییرات مشابه قبل، قابل تشخیص می‌باشد. کاهش کامل ارتعاشات سیلندر توسط تزریق جت از شیارهای ۱ و ۲ و بی تأثیر از شیار ۳ است. البته در اینجا دیده می‌شود که حداقل سرعت تزریقی که کاهش کامل ارتعاشات اتفاق می‌افتد نسبت به $H = 5/5D$ بخصوص برای شیار ۲ یکطرفه، افزایش یافته است. همچنین برهم خوردگی جریان در سرعت‌های جریان بالا نیز، در اینجا، کاهش یافته است. مشاهده می‌شود در مقایسه با $H = 5/5D$ ، مقدار تغییر دامنه عدد ناسلت افزایش و مقدار میانگین عدد ناسلت کاهش یافته است. افزایش میانگین عدد ناسلت در $U_j = 10$ نسبت به $U_j = 1$ در حدود ۱۸٪ است.

در ادامه، شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نتایج مشابه را برای کانال‌ها با ارتفاع‌های $7D$ و $10D$ نشان می‌دهند. برای کانال با ارتفاع $H = 7D$ تغییر محسوسی در روند تغییرات Y_{max} دیده نمی‌شود در حالیکه برای $H = 8D$ ، شیار ۲ یکطرفه نیز، دیگر قادر به کاهش کامل ارتعاشات نمی‌باشد (شکل ۱۳ را ببینید). رفته رفته با افزایش ارتفاع کانال به $H = 10D$ مشاهده می‌شود که توانایی کاهش ارتعاشات توسط تزریق جت از شیار ۱ یکطرفه نیز به شدت افت می‌کند؛ جاییکه کاهش کامل ارتعاشات تنها از طریق شیارهای ۱ و ۲ دوطرفه آن هم در حداقل سرعت تزریق ۴ و $U_j = 3$ اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع کانال، تغییرات دامنه عدد ناسلت کاهش یافته است. همچنین اثر جت بر میانگین عدد ناسلت با افزایش ارتفاع کانال کاهش می‌یابد.

۳-۲- اثر تغییر ارتفاع کانال بر پاسخ زمانی جابجایی و عدد ناسلت

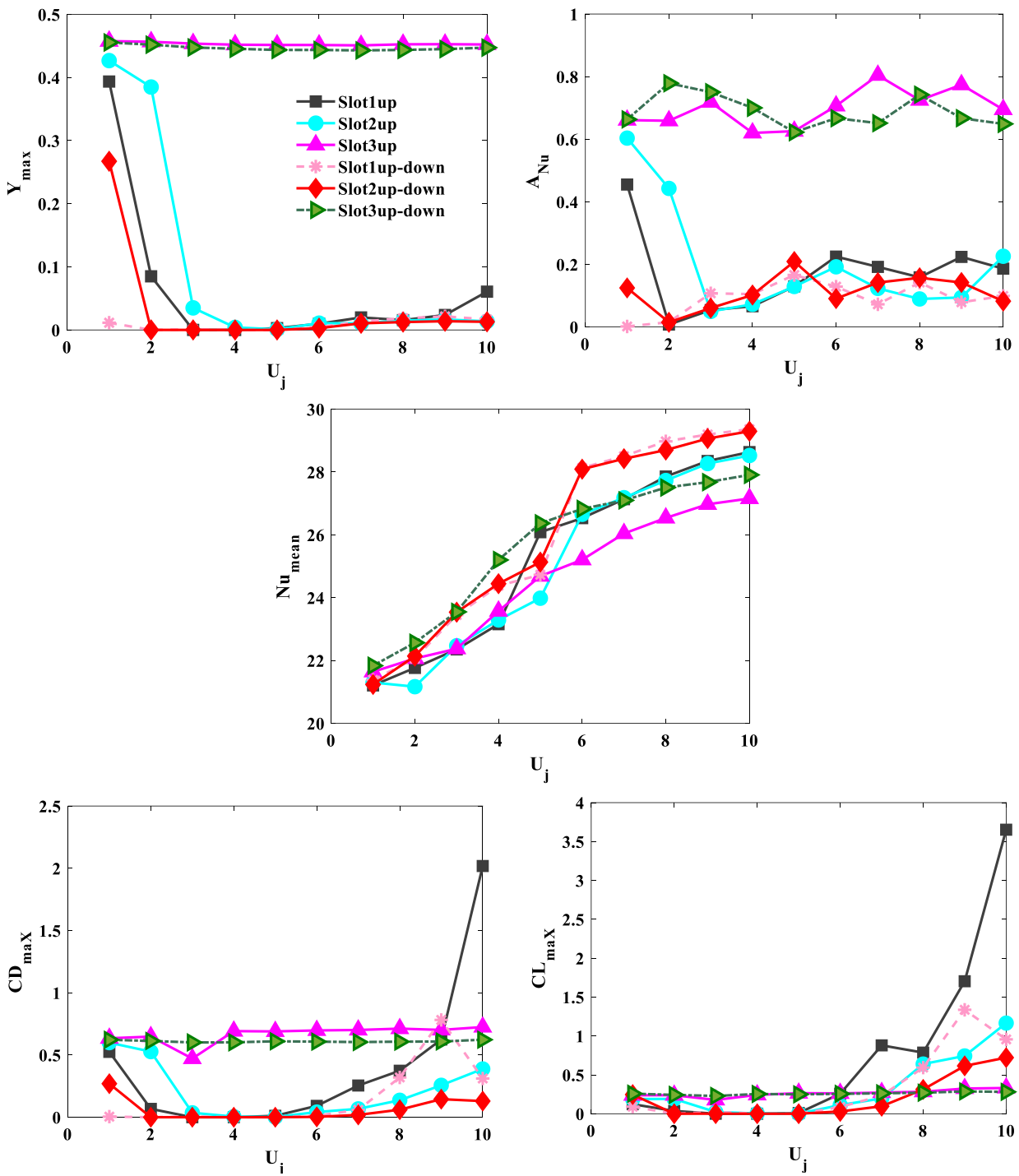
برای بازبینی بهتر، شکل ۱۱، تغییرات زمانی جابجایی و عدد ناسلت را برای سرعت تزریق ۳ و کانال‌ها با ارتفاع ۵/۵، ۷ و پس از آن، شکل ۱۲ برای ارتفاع کانال ۸ و ۱۰ را نشان می‌دهند. دیده می‌شود که بیشینه جابجایی هارمونیک برای شیار ۳ چه بصورت جت یکطرفه و چه بصورت جت دوطرفه، در تمامی کانال‌ها، به مقدار مشابه برای سیلندر کنترل نشده در آن کانال می‌رسد؛ چراکه، تزریق جت از شیار ۳، تأثیری در جابجایی سیلندر نمی‌گذارد. در اینجا، تزریق جریان از شیار ۲ یکطرفه با سرعت $U_j = 3$ ، منجر به ترتیب منجر به کاهش ۹۲، ۳۱، ۲۴، ۱۷، ۱۶ و ۱۲ درصدی برای سیلندر در کانال‌های با ارتفاع ۵/۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ شده است. درصدهای مشابه برای تزریق جریان از شیار ۱ یکطرفه برابر با ۹۹، ۹۹، ۹۸، ۴۸، ۲۸ و ۲۱ می‌باشند.

۳-۱- اثر تغییر ارتفاع کانال بر دامنه جابجایی، ضرایب برآ و پسا، دامنه و میانگین عدد ناسلت

شکل ۷، بیشینه جابجایی عرضی، دامنه و میانگین عدد ناسلت برای سیلندر قرارگرفته در کانال با ارتفاع ۵/۵ بر حسب سرعت جت را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات بیشینه دامنه ضرایب برآ و پسا نیز آورده شده است. همانطور که پیش‌تر گفته شد، اثر جت از شیارهای ۱، ۲ و ۳ با فواصل مختلف تا سیلندر چه بصورت یکطرفه چه بصورت دوطرفه، مورد بازبینی قرار گرفته است. تزریق جت چه بصورت یکطرفه و چه دو طرفه، از شیار ۳، اثری در جابجایی ندارد چراکه فاصله جت از سیلندر نسبتاً زیاد می‌باشد. در نقطه مقابل، با افزایش سرعت تزریق جریان از شیارهای ۱ و ۲ هم در حالت یکطرفه و هم دوطرفه، بیشینه جابجایی سیلندر به شدت کاهش می‌یابد. دیده می‌شود، کاهش جابجایی برای شیار ۱ نسبت به شیار ۲، در سرعت جت پایین‌تری اتفاق می‌افتد. همچنین اثربخشی جت دوطرفه نسبت به جت یکطرفه بسیار بیشتر می‌باشد. کمترین سرعت تزریق که باعث کاهش کامل ارتعاشات سیلندر می‌شود، برای شیارهای ۱ و ۲ دوطرفه، شیار ۱ یکطرفه و شیار ۲ یکطرفه، به ترتیب، $U_j = 2, 3, 4$ می‌باشد.

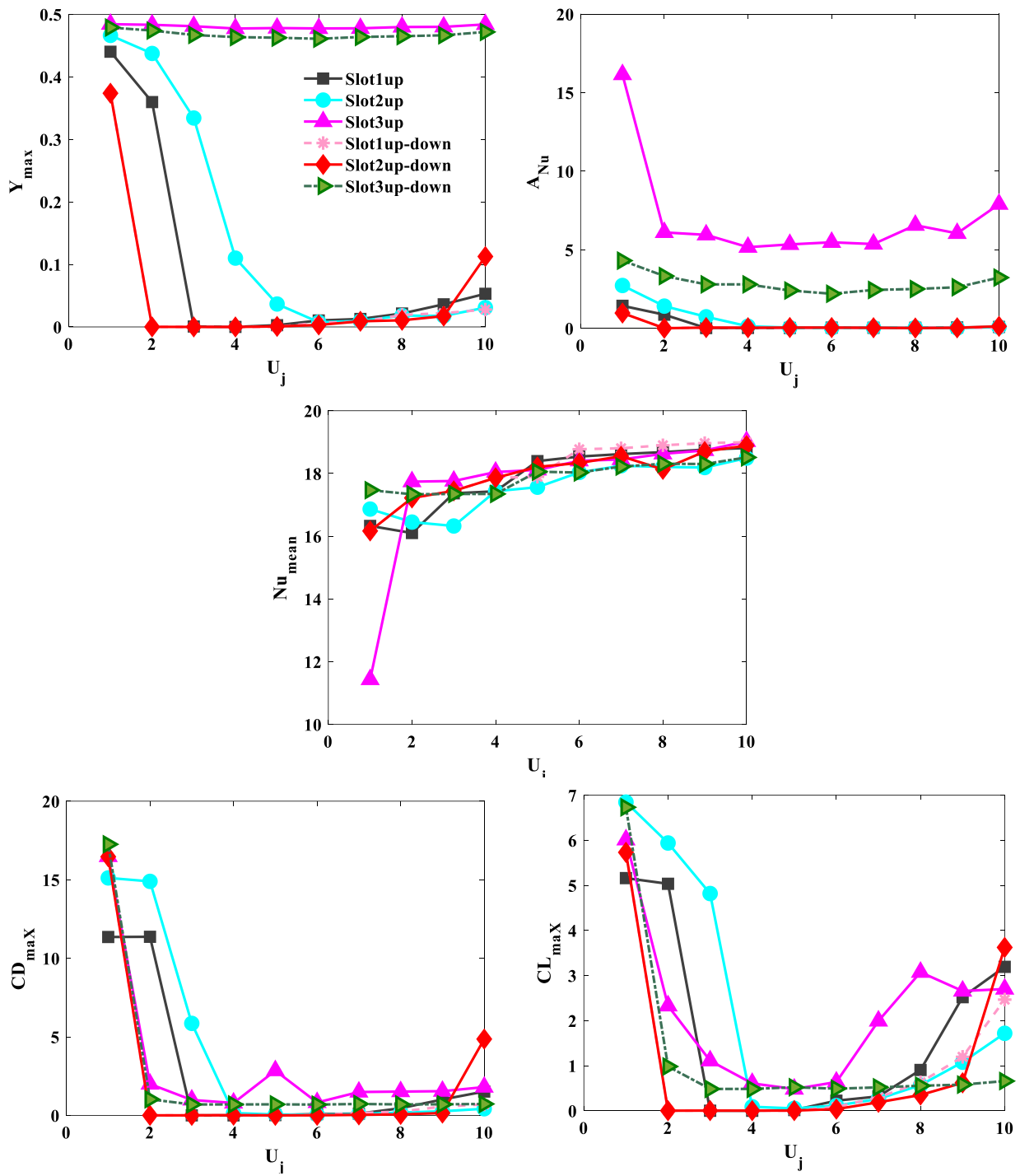
تغییرات دامنه عدد ناسلت با افزایش سرعت جت کاهش می‌یابد. تزریق جت از شیار ۳ به صورت یکطرفه و دو طرفه اثر چندانی بر دامنه عدد ناسلت ندارد. نوسانات عرضی بر سرعت و میانگین دامی سیال پشت سیلندر اثر می‌گذارد. دامنه عدد ناسلت تابعی از نوسانات عرضی سیلندر است و مشابه دامنه نوسانات عرضی تغییر می‌کند. میانگین عدد ناسلت نیز با افزایش سرعت جت در همه حالت‌ها افزایش می‌یابد. جت باعث افزایش میانگین سرعت در پشت سیلندر می‌شود.

تزریق جت از دیواره‌های کانال باعث تخریب لایه مرزی تشکیل شده بر روی دیواره و تغییر مکانیزم تشکیل گردابه در پشت سیلندر می‌شود؛ که این تغییرات در حالت جت‌های دوتایی بیشتر است. درصد افزایش عدد ناسلت میانگین در حالت جت‌های دو طرفه بیش از جت‌های یکطرفه است. افزایش میانگین عدد ناسلت در $U_j = 10$ نسبت به $U_j = 1$ در حدود ۶۰٪ است. روند تغییرات برای ضرایب برآ و پسای سیلندر نیز، مشابه تغییرات جابجایی می‌باشد. در سرعت‌های تزریق بالا ($U_j > 8$) بخصوص برای شیارهای نزدیک‌تر به سیلندر دیده می‌شود که دامنه ضرایب برآ و پسا، و میانگین عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند، که به تبع آن، اندکی افزایش در جابجایی سیلندر نیز مشاهده می‌شود. این می‌تواند به دلیل برهم خوردن جریان حول سیلندر به دلیل جت با سرعت بالا، مرتبط باشد.



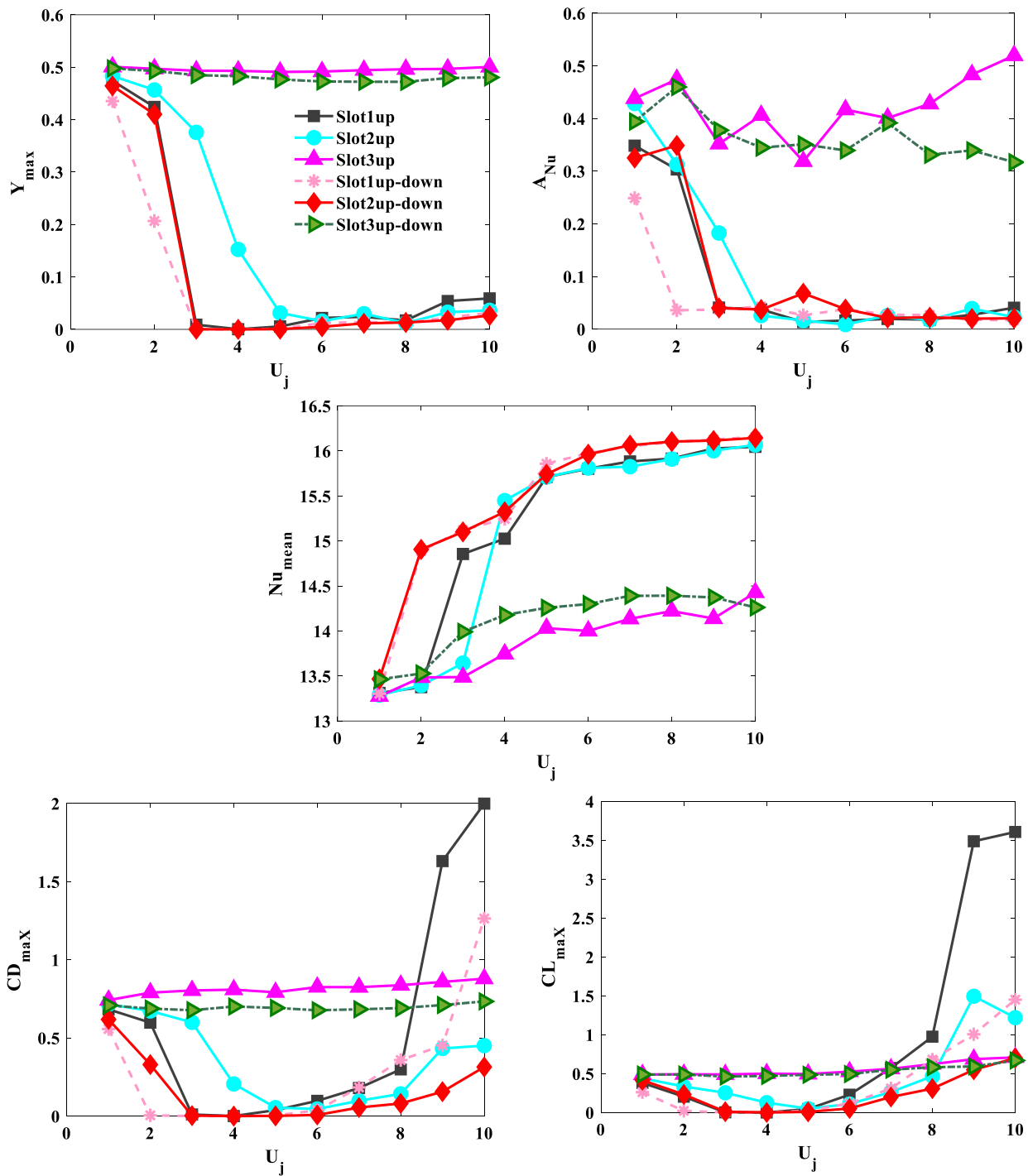
شکل ۷. تغییرات بیشینه جابجایی، دامنه و میانگین عدد ناسلت، بیشینه ضریب برآ و پسای سیلندر برای کانال با ارتفاع $H = 5.5D$

Fig. 7. Changes in maximum displacement, amplitude and mean Nusselt number, maximum amplitude of lift and drag coefficient for channel with height $H = 5.5D$



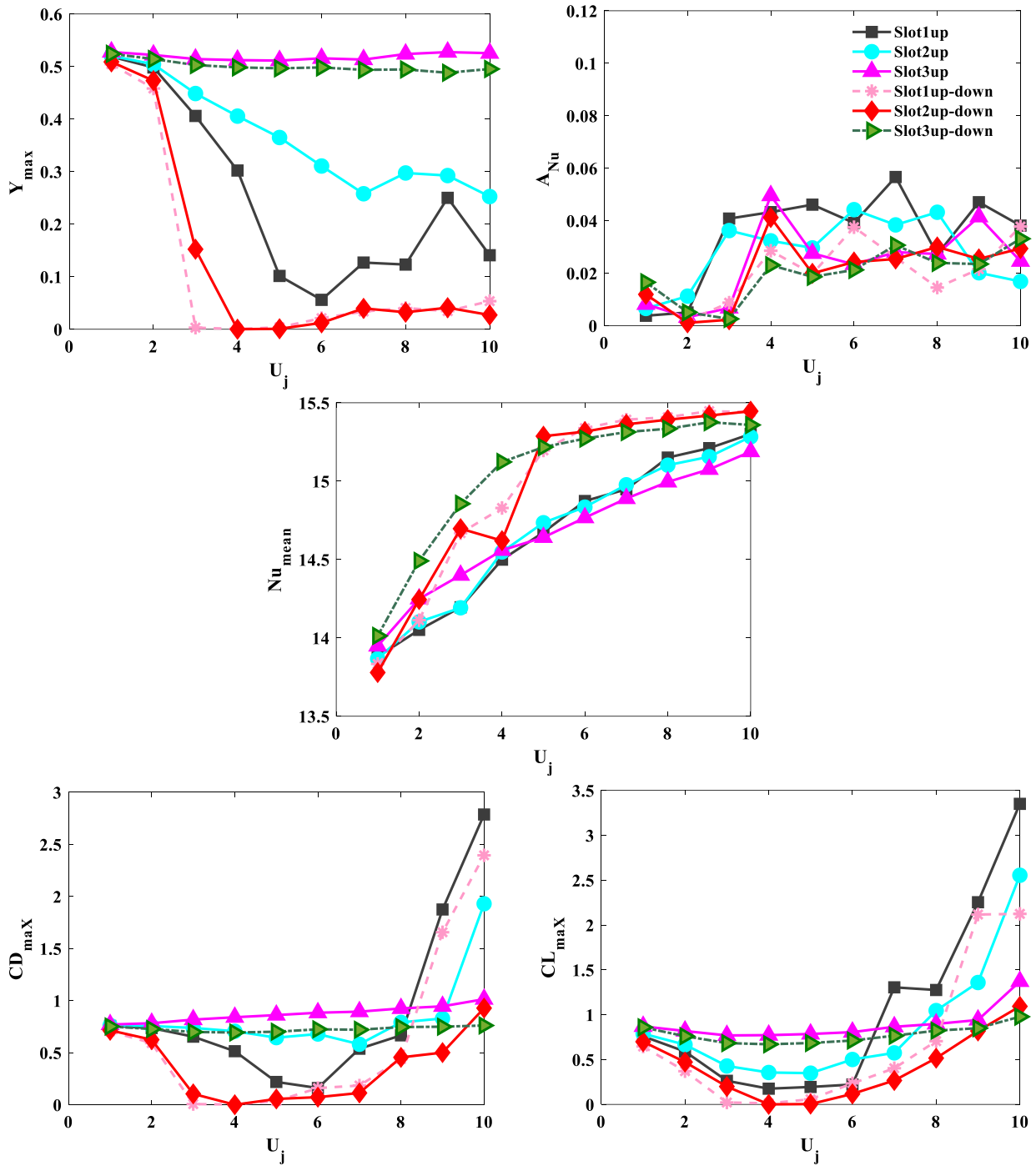
شکل ۸. تغییرات بیشینه جابجایی، دامنه و میانگین عدد ناسلت، بیشینه ضریب برآ و پسای سیلندر برای کانال با ارتفاع $H = 6D$

Fig. 8. Changes in maximum displacement, amplitude and mean Nusselt number, maximum amplitude of lift and drag coefficient for channel with height $H = 6D$



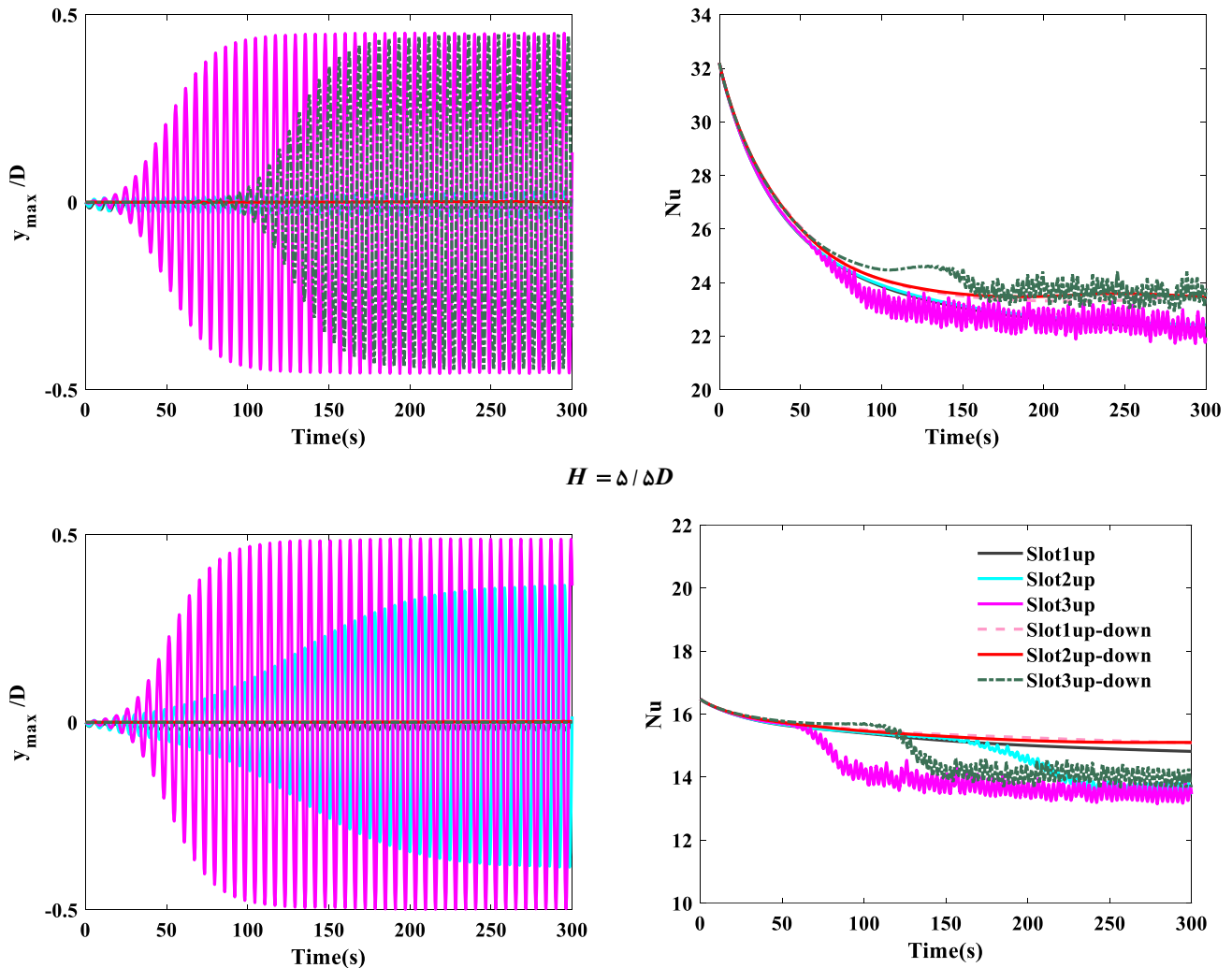
شکل ۹. تغییرات پیشبینه جابجایی، دامنه و میانگین عدد ناسلت، پیشبینه ضریب برآ و پسای سیلندر برای کانال با ارتفاع $H = 7D$

Fig. 9. Changes in maximum displacement, amplitude and mean Nusselt number, maximum amplitude of lift and drag coefficient for channel with height $H = 7D$



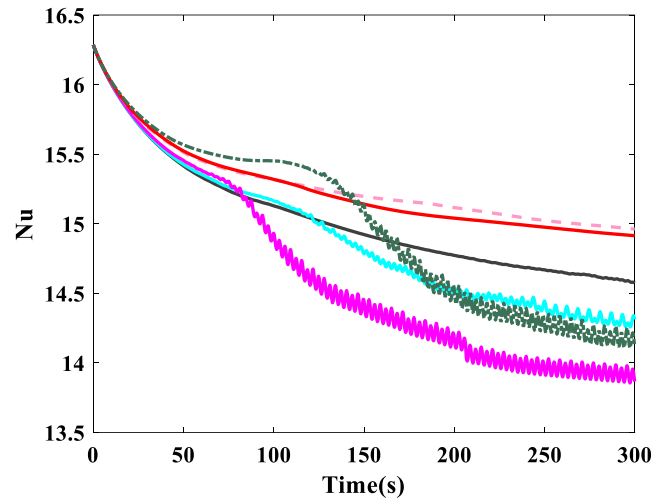
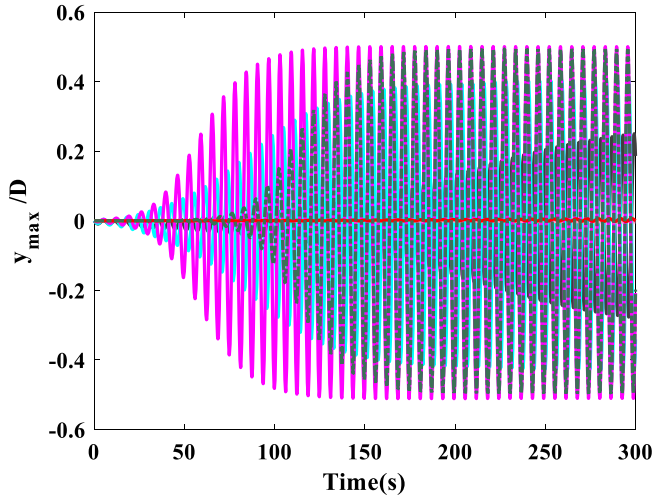
شکل ۱۰. تغییرات بیشینه جابجایی، دامنه و میانگین عدد ناسلت، بیشینه ضریب برآ و پسای سیلندر برای کانال با ارتفاع $H = 10D$

Fig. 10. Changes in maximum displacement, amplitude and mean Nusselt number, maximum amplitude of lift and drag coefficient for channel with height $H = 10D$

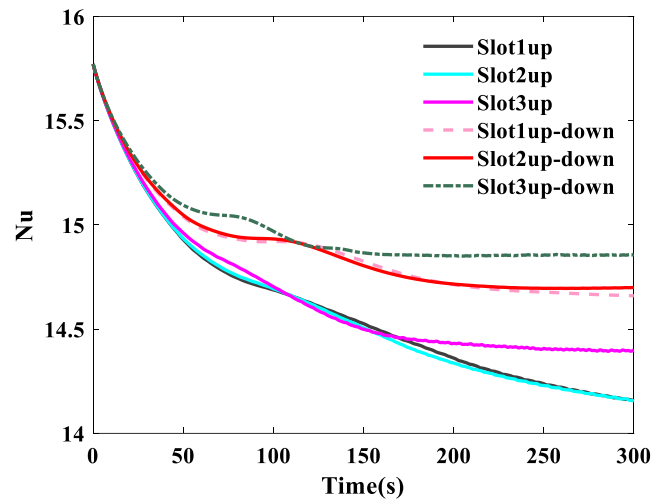
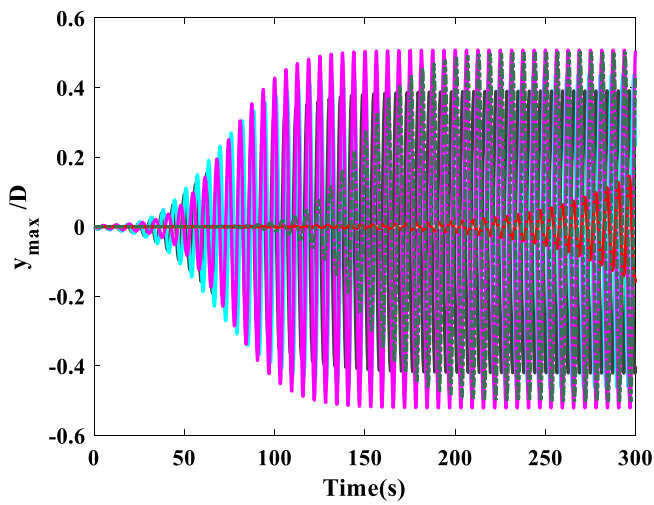


شکل ۱۱. تغییرات زمانی جابجایی و عدد ناسلت را برای سرعت تزریق $U_j = 3$ و کانال‌ها با ارتفاع $H = 5.5D, 7D$

Fig. 11. Time histories of displacement and Nusselt number for injection velocity $U_j = 3$ and channels with height $H = 5.5D, 7D$



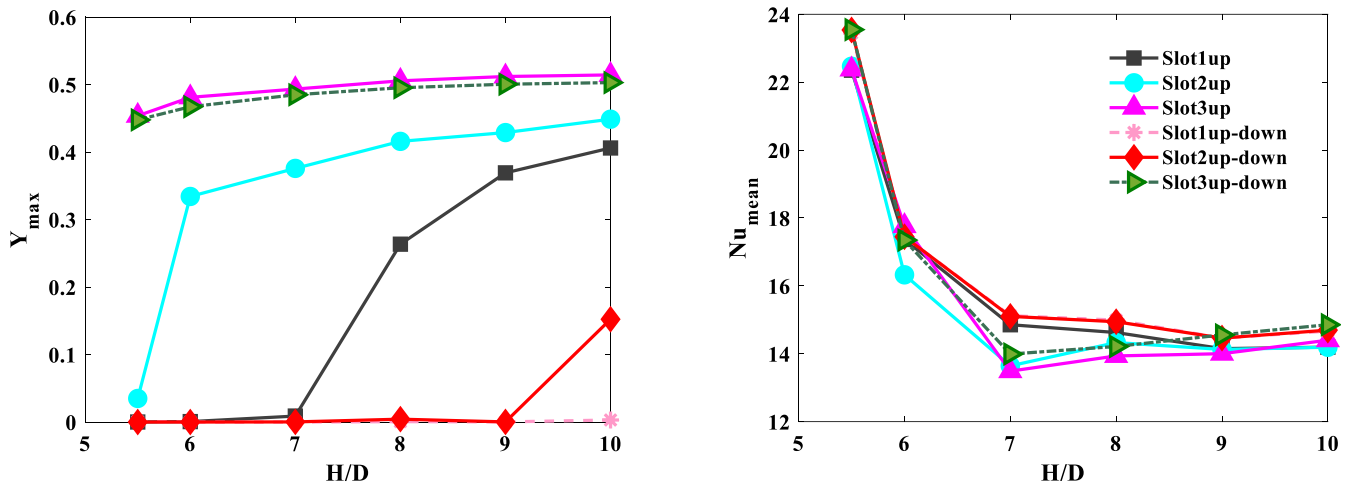
$H = 8D$



$H = 10D$

شکل ۱۲. تغییرات زمانی جابجایی و عدد ناسلت را برای سرعت تزریق $U_j = 3$ و کانال‌ها با ارتفاع $H = 8D, 10D$

Fig. 12. Time histories of displacement and Nusselt number for injection velocity $U_j = 3$ and channels with height $H = 8D, 10D$



شکل ۱۳. تغییرات Y_{max} و Nu_{mean} بر حسب ارتفاع کانال در $U_j = 3$

Fig. 13. Variations of Y_{max} and Nu_{mean} in terms of channel height at $U_j = 3$

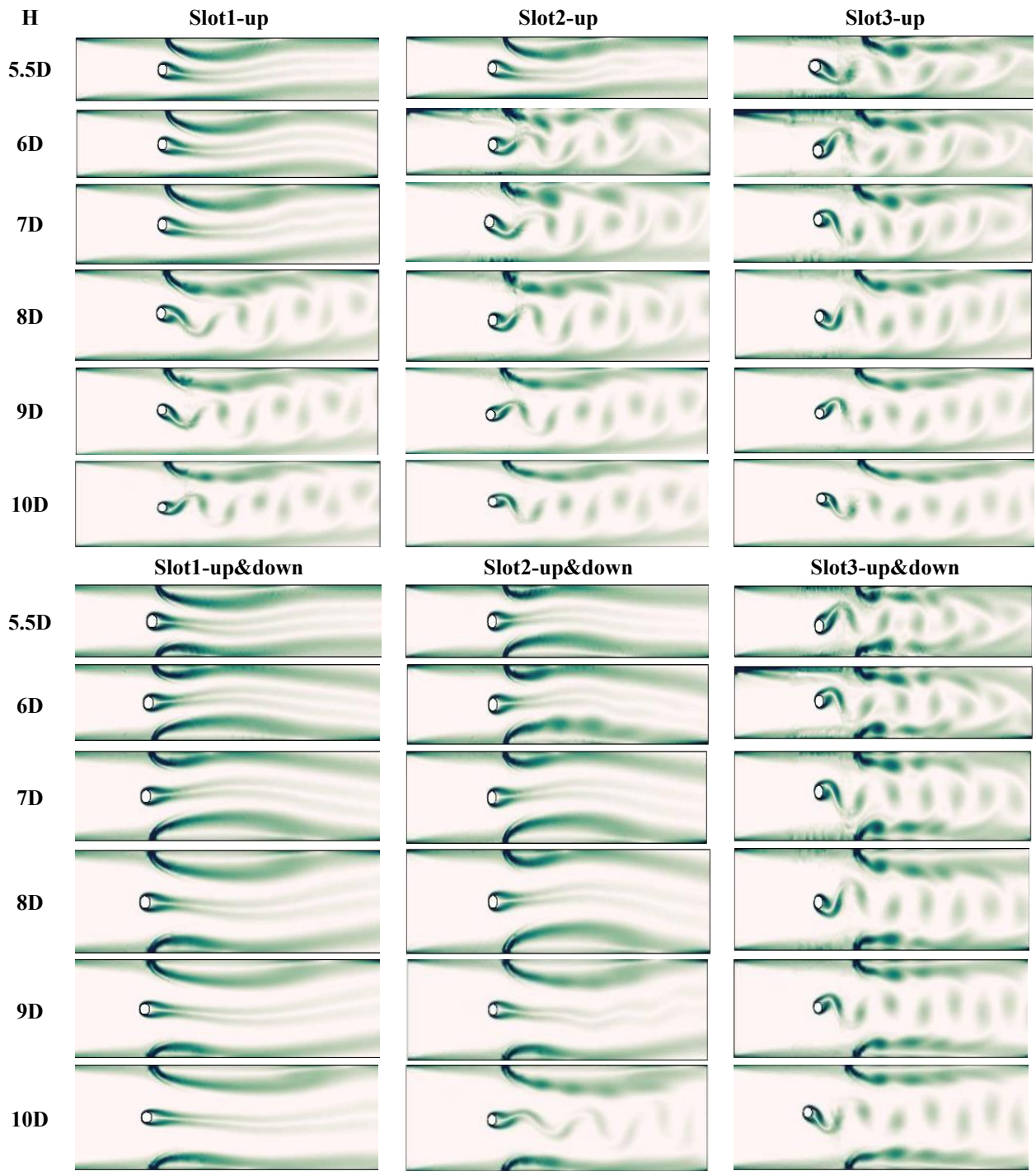
۳-۳- اثر تغییر ارتفاع کانال بر کانتورهای تلاویی و دما

در نهایت شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب تغییرات کانتورهای تلاویی و دما را در وضعیت توسعه یافته برای شیارهای مختلف و کانال با ارتفاع‌های متفاوت را به ازای تزریق با سرعت $U_j = 3$ نشان می‌دهد (برای مقایسه بهتر با سیلندرهایی کنترل نشده، شکل ۵b را در نظر داشته باشید). با توجه به کانتورهای ورتیسیتی، دیده می‌شود که، در هر حالتی که کاهش کامل ارتعاشات اتفاق افتاده است، تزریق جت باعث توقف ریزش گردابه‌ها شده که در نتیجه آن یک دنباله متقارن در پشت سیلندر دیده می‌شود. این توقف ریزش گردابه‌ها با تزریق جت از شیار ۱ دوطرفه با سرعت $U_j = 3$ در تمامی ارتفاع‌ها دیده می‌شود در حالیکه در هیچ یک از کانتورهای مرتبط با شیار ۳ چه یکطرفه و چه دوطرفه دیده نمی‌شود. همچنین برای سایر شیارها، از یک ارتفاعی به بالا، تزریق جت با سرعت $U_j = 3$ ، قادر به توقف روند ریزش گردابه‌ها نمی‌باشد. با افزایش ارتفاع، تغییرات کانتورهای دما مشابه با کانتورهای ورتیسیتی است.

با افزایش ارتفاع کانال از ۶ به ۷ و ۸ عدد ناسلت کاهش یافته است. علت این رفتار حرارتی این است که با افزایش ارتفاع به افزایش ضخامت لایه مرزی حرارتی بر روی صفحات بالایی و پایینی کانال بر می‌گردد. مشاهده می‌شود، در ارتفاعات پایین‌تر جت باعث می‌شود قسمتی از لایه مرزی تشکیل شده بر روی دیواره کانال از سطح جدا شده و به سمت مرکز کانال رانده شود. از طرف دیگر در پشت سیلندر سیال به صورت گردابه‌هایی از سیلندر جدا شده است.

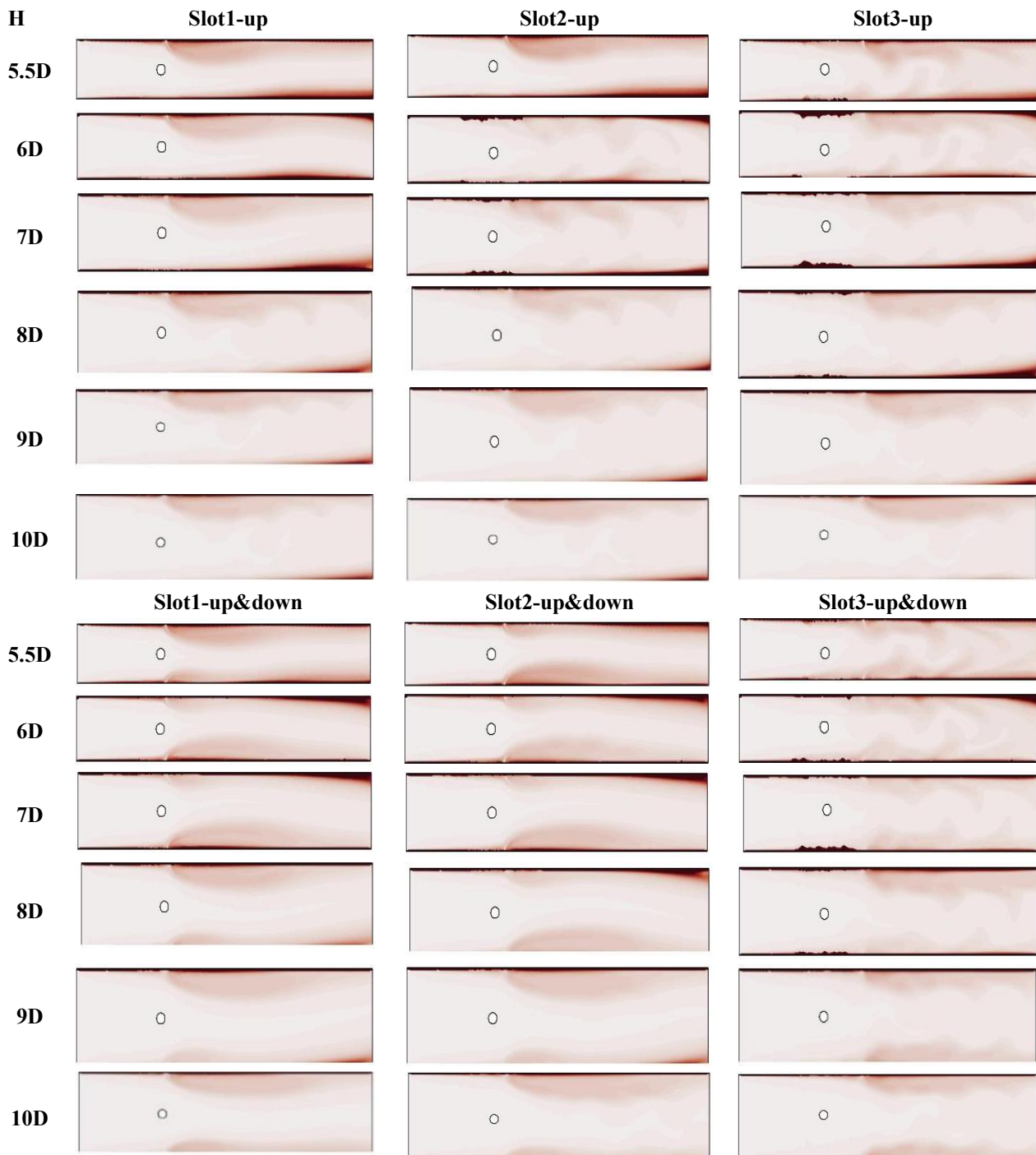
همچنین شاهد کاهش ۹۹ درصدی برای شیار ۱ دوطرفه و شیار ۲ دوطرفه می‌باشیم. تأیید کننده این می‌باشند که با افزایش ارتفاع کانال، به شدت اثربخشی تزریق جریان در کاهش ارتعاشات، برای شیارهای ۱ و ۲ دوطرفه افت می‌کند. این تضعیف برای شیارهای ۱ و ۲ دوطرفه خیلی کمتر می‌باشد بخصوص برای شیار ۱ دوطرفه که نزدیک‌ترین به سیلندر قرار گرفته است. نوسانات در عدد ناسلت با زمان مشاهده می‌شود. این نوسانات بخاطر ریزش گردابه و نوسانات القا شده توسط سیال به سیلندر است. مقدار این نوسانات با افزایش ارتفاع کانال کاهش می‌یابد. مقدار میانگین عدد ناسلت در حالت جت دو طرفه نسبت به جت یک طرفه بیشتر است.

شکل ۱۳، تغییرات Y_{max} و Nu_{mean} را بر حسب ارتفاع کانال در $U_j = 3$ را نشان می‌دهد. بخوبی تشخیص داده می‌شود که با افزایش ارتفاع کانال، توانایی کاهش ارتعاشات توسط تزریق جت، بطور عمومی، کاهش می‌یابد. یا به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع کانال می‌بایست، برای کاهش کامل نوسانات سیلندر، سرعت تزریق را افزایش داد. به عنوان مثال، سرعت تزریق $U_j = 3$ از شیار ۱ یکطرفه، اگرچه برای کانال با ارتفاع‌های ۵/۵، ۶ و ۷ مؤثر می‌باشد ولی کارایی لازم در کاهش نوسانات را برای ارتفاع‌های بزرگتر ندارد. با افزایش ارتفاع کانال مقدار میانگین عدد ناسلت کاهش می‌یابد. سرعت کاهش عدد ناسلت از ارتفاع ۵/۵، ۶ و ۷ زیاد است. این پاسخ حرارتی در حقیقت معلول تغییر مکانیزم جدایش گردابه‌ها و اختلاط سیال در پشت سیلندر است.



شکل ۱۴. تغییرات کانتورهای تاورهای تاوایی در وضعیت توسعه یافته برای شیارهای مختلف و کانال با ارتفاعهای مختلف برای سرعت

Fig. 14. Changes in the vorticity contours in the fully developed condition for different slots and channels with different heights for velocity $U_j = 3$



شکل ۱۵. تغییرات کانتورهای دما در وضعیت توسعه یافته برای شیارهای مختلف و کانال با ارتفاعهای مختلف برای سرعت $U_j = 3$

Fig. 15. Changes in the temperature contours in the fully developed condition for different slots and channels with different heights for velocity $U_j = 3$

(۷) تزریق جت از دیواره‌های کانال و افزایش سرعت تزریق باعث افزایش عددناسلت می‌شود. افزایش ارتفاع کانال باعث ضعیف شدن اثر مثبت تزریق جت بر بهبود عدد ناسلت می‌شود. هنگامی که از جت دوطرفه استفاده می‌شود عدد ناسلت در مقایسه با جت یک طرفه بیشتر است.

منابع

- [1] R.D. Blevins, Flow-induced Vibration, Krieger Publishing Company, 2001.
- [2] P. Bearman, On vortex street wakes, Journal of Fluid Mechanics, 28(04) (1967) 625-641.
- [3] A.H. Rabiee, Galloping and VIV control of square-section cylinder utilizing direct opposing smart control force, Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics, 5(1) (2019) 69-84.
- [4] W. Xu, Y. Yu, E. Wang, L. Zhou, Flow-induced vibration (FIV) suppression of two tandem long flexible cylinders attached with helical strakes, Ocean Engineering, 169 (2018) 49-69.
- [5] A.H. Rabiee, M. Esmaili, The effect of externally applied rotational oscillations on FIV characteristics of tandem circular cylinders for different spacing ratios, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, (2020).
- [6] A.H. Rabiee, Numerical Study on Vibration Attenuation of Cylinder using Active Rotary Oscillating Controller, International Journal of Engineering, 34(1) (2021) 202-211.
- [7] M. Esmaili, A.H. Rabiee, Active feedback VIV control of sprung circular cylinder using TDE-iPID control strategy at moderate Reynolds numbers, International Journal of Mechanical Sciences, (2021) 106515.
- [8] M. Sarmaeili, H.R. Ashtiani, A. Rabiee, Nonlinear energy sinks with nonlinear control strategies in fluid-structure simulations framework for passive and active FIV control of sprung cylinders, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 97 (2021) 105725.
- [9] S. Farahani, A.H. Rabiee, Transverse FIV suppression of square cylinder using two control rods of varying size and distance in lock-in and galloping regions, International

ترکیب این دو اثر باعث افزایش دمای میانگین سیال در پشت سیلندر می‌شود که می‌تواند افزایش ضریب انتقال حرارت را به همراه داشته باشد. با افزایش ارتفاع کانال، اثر اختلاط ناشی از جدایش لایه مرزی از دیواره‌های کانال و گردابه‌های ایجاد شده در پشت کانال کمتر شده است و میانگین دمای سیال کاهش می‌یابد. بنا بر این ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، توانایی روش تزریق جت چه بصورت یکطرفه و چه بصورت دو طرفه از شیارهای بالایی و پایینی کانال که در فواصل مختلف از استوانه، جایگذاری شده‌اند، بر حسب ارتفاع کانال مورد بررسی قرار گرفته‌است. با بازبینی نمودارهای جابجایی، ضرایب برآ و پسا، دامنه و میانگین عدد ناسلت و کانتورهای تاوایی و دما، مشاهدات زیر بدست آمده است:

- (۱) دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع کانال، بیشینه جابجایی سیلندر نیز افزایش پیدا می‌کند بطوریکه با افزایش ارتفاع کانال از ۵/۵ تا ۱۰، بیشینه جابجایی به میزان ۱۵٪ درصد افزایش پیدا کرده است.
- (۲) برای تمامی کانال‌ها با ارتفاع‌های مختلف، تزریق جت چه بصورت یکطرفه و چه دو طرفه، از شیار ۳، اثری در جابجایی ندارد چراکه فاصله جت از سیلندر زیاد می‌باشد. همچنین برای شیارهای ۱ و ۲ دیده می‌شود، اثربخشی جت دوطرفه نسبت به جت یکطرفه بسیار بیشتر می‌باشد.
- (۳) برای کانال‌ها با ارتفاع کم (۵/۵ و ۶)، کاهش کامل جابجایی برای شیار ۱ نسبت به شیار ۲ چه بصورت جت یکطرفه و چه بصورت جت دوطرفه، در سرعت جت پایین‌تری اتفاق می‌افتد.
- (۴) برای کانال با ارتفاع ۸، شیار ۲ یکطرفه نیز، دیگر قادر به کاهش کامل ارتعاشات نمی‌باشد. رفته رفته با افزایش ارتفاع کانال به ۱۰ مشاهده می‌شود که توانایی کاهش ارتعاشات توسط تزریق جت از شیار ۱ یکطرفه نیز به شدت افت می‌کند؛ جاییکه کاهش کامل ارتعاشات تنها از طریق شیارهای ۱ و ۲ دوطرفه آن هم در حداقل سرعت تزریق ۳ و ۴ اتفاق می‌افتد.
- (۵) با افزایش ارتفاع کانال، توانایی کاهش ارتعاشات توسط تزریق جت، بطور کلی، کاهش می‌یابد. یا به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع کانال می‌بایست، برای کاهش کامل نوسانات سیلندر، سرعت تزریق را افزایش داد.
- (۶) با توجه به کانتورهای ورتیسیتیه، دیده می‌شود که، در هر حالتی که کاهش کامل ارتعاشات اتفاق افتاده است، تزریق جت باعث توقف ریزش گردابه‌ها شده که در نتیجه آن یک دنباله متقارن در پشت سیلندر دیده می‌شود.

- [17] E. Izadpanah, A. Ashouri, M. Liravi, Y. Amini, Effect of vortex-induced vibration of finned cylinders on heat transfer enhancement, *Physics of Fluids*, 31(7) (2019) 073604.
- [18] 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, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 104 (2019) 8-14.
- [19] E. Izadpanah, Y. Amini, A. Ashouri, A comprehensive investigation of vortex induced vibration effects on the heat transfer from a circular cylinder, *International Journal of Thermal Sciences*, 125 (2018) 405-418.
- [20] Z. Yang, L. Ding, L. Zhang, L. Yang, H. He, Two degrees of freedom flow-induced vibration and heat transfer of an isothermal cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 154 (2020) 119766.
- [21] A.H. Rabiee, S.D. Farahani, Effect of synthetic jet on VIV and heat transfer behavior of heated sprung circular cylinder embedded in a channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 119 (2020) 104977.
- [22] S.D. Farahani, A.H. Rabiee, The effect of injection angle and jet flow velocity into an isothermal channel on the heat transfer and fluid-induced vibrations: unilateral versus bilateral injection, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(6) (2021) 1-13.
- [23] T. Prasanth, S. Mittal, Vortex-induced vibrations of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 594 (2008) 463-491.
- [24] W. Khan, J. Culham, M. Yovanovich, Fluid flow and heat transfer from a cylinder between parallel planes, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 18(3) (2004) 395-403.
- Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, (2021).
- [10] A. Rabiee, M. Barzan, A. Mohammadebrahim, Flow-induced vibration suppression of elastic square cylinder using windward-suction-leeward-blowing approach, *Applied Ocean Research*, 109 (2021) 102552.
- [11] L.H. Feng, J.J. Wang, Circular cylinder vortex-synchronization control with a synthetic jet positioned at the rear stagnation point, *Journal of Fluid Mechanics*, 662 (2010) 232.
- [12] C. Wang, H. Tang, F. Duan, C. Simon, Control of wakes and vortex-induced vibrations of a single circular cylinder using synthetic jets, *Journal of Fluids and Structures*, 60 (2016) 160-179.
- [13] H. Wang, L. Ding, L. Zhang, Q. Zou, R.N. Sharma, Control of two-degree-of-freedom vortex induced vibrations of a circular cylinder using synthetic Jets: Effect of synthetic jet orientation angle and phase difference, *Ocean Engineering*, 217 (2020) 107906.
- [14] A.H. Rabiee, S. Farahani, A comprehensive study of heat transfer characteristic and two-dimensional FIV for heated square-section cylinder with different damping ratios, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116 (2020) 104680.
- [15] A. Kumar, A. Dhiman, L. Baranyi, CFD analysis of power-law fluid flow and heat transfer around a confined semi-circular cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82 (2015) 159-169.
- [16] D. Chatterjee, S. Amiroudine, Two-dimensional mixed convection heat transfer from confined tandem square cylinders in cross-flow at low Reynolds numbers, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(1) (2010) 7-16.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. D. Farahani, A. M. Zakinia, A. H. Rabiee, *Investigating the Effect of Isothermal Channel Height on the Vibrational and Thermal Behavior of Elastically-Mounted Cylinder Affected by Unilateral and Bilateral Jet Flow*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(3) (2022) 703-724.

DOI: 10.22060/mej.2021.20112.7171

