



شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته سه بعدی جابجایی ترکیبی داخل محفظه دارای تهویه حاوی مانع و استخراج ساختارهای منسجم به روش تفکیک به مودهای متعامد

صابر یکانی مطلق^{۱*} و پریا سروری^۲

^۱ استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه

^۲ دانشجوی کاشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۱

چکیده

در مقاله حاضر جریان آشفته سه بعدی داخل محفظه دارای تهویه همراه با انتقال حرارت ترکیبی (آزاد-اجباری) به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) حل و با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود اعتبارسنجی شد. انتقال حرارت اجباری در کار حاضر به دلیل ورود سیال از سیستم تهویه به داخل محفظه و انتقال حرارت آزاد به دلیل اختلاف دمای قسمت کف و دیواره‌های محفظه است. به منظور بررسی اثر مانع بر مشخصه‌های جریان، شبیه‌سازی برای مانع با سه ارتفاع متفاوت انجام گرفته است. در ادامه با اعمال الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد (POD) بر میدان سرعت نوسانی در جهت x ، تاثیر موانع بر ساختارهای منسجم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشانگر این است که اولاً مانع سبب افزایش شدید انرژی ساختارهای منسجم جریان می‌شود، ثانیاً مانع با ارتفاع زیاد، ساختارهای منسجم جریان را کوچکتر و مانع با ارتفاع متوسط و کوچک، سبب بزرگتر شدن ساختارهای منسجم جریان می‌شوند.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ؛ محفظه دارای تهویه؛ مانع؛ ساختارهای منسجم؛ تفکیک به مودهای متعامد.

Large Eddy Simulation of Three Dimensional Mixed Convection Flow Inside the Ventilated Cavity Containing Obstacle and Extraction of Coherent Structures using Proper Orthogonal Decomposition (POD)

S. Yekani Motlagh¹, P. Sarvari^{2,*}

¹ Assist. Prof., Mech. Eng., Urmia Univ. of Tech. (UUT), Urmia, Iran.

² Ms.c. Student, Mech. Eng., Urmia Univ. of Tech. (UUT), Urmia, Iran.

Abstract

In the present paper, three dimensional turbulent mixed convection inside the ventilated cavity is solved using by Large Eddy Simulation (LES) and the results are validated with available numerical and experimental ones. In the present work, the forced convection and free convection are due to the injected flow from ventilation system and temperature difference among floor and other walls of cavity, respectively. The effects of obstacle on flow characteristics such as velocity, temperature and turbulent kinetic energy are investigated for cavity flow containing obstacle with three different height. In continuation, effect of obstacles on coherent structures are investigated by applying the proper orthogonal decomposition (POD) algorithm on velocity fluctuation field in x direction. From the results, firstly, obstacle causes to increase the energy of coherent structures, and secondly, obstacle with large height break the coherent structures to smaller ones, but for obstacles with medium and small height dominant structures are enlarged.

Keywords: Large Eddy Simulation (LES); Ventilated Cavity; Obstacle; Coherent Structures; Proper Orthogonal Decomposition (POD).

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۴۱۴۵۲۱۵۲

آدرس پست الکترونیک: syekani@yahoo.com; syekani@uut.ac.ir

۱- مقدمه

انتقال حرارت جابجایی ترکیبی داخل محفظه‌ها، یکی از زمینه‌هایی است که هم از نظر دینامیک سیالات محاسباتی و هم از جنبه‌ی کاربردهای صنعتی، طراحی سیستم‌های تهویه، ذخیره‌سازی انرژی و ... دارای اهمیت است. به علاوه جریان سه بعدی آشفته همراه با انتقال حرارت جابجایی ترکیبی هوا داخل اتاق تحت اثر نیروی بویانسی (جابجایی آزاد) و نیروی ناشی از دستگاه‌های تهویه هوا (جابجایی اجباری) مهم و به دلیل پیچیدگی که دارد، مورد بحث محققان است. در این نوع جریان‌ها، ساختارهای جریان دارای تنوع است. از این بین شناخت ساختارهای اصلی یا منسجم جریان آشفته می‌تواند کمک شایانی به کنترل و بهبود انتقال حرارت داشته باشد.

در مقالات مختلفی در سال‌های اخیر، مسأله محفظه بررسی شده است. از جمله‌ی آن‌ها، آلینیا و همکاران [۱] در ۲۰۱۱ است که در آن انتقال حرارت ترکیبی در یک محفظه که دیواره چپ و راست آن در دمای ثابتی است و دیواره بالایی و پایینی ایزوله می‌باشند و حرکت می‌کنند، بررسی شده است. رهنا نسرين [۲] در ۲۰۱۱، اثرات عددی رایلی و پرانتل روی محفظه دارای یک دیواره موج‌دار و یک دیواره را بررسی کرده است که با سرعت ثابت حرکت می‌کند. در مقاله فریدون و همکارانش [۳] مربوط به سال ۲۰۱۳ که در آن مسأله انتقال حرارت ترکیبی در یک محفظه با دو دیواره در حال حرکت مطرح است. در این مقاله، انتقال حرارت با وجود ذرات داخل آن‌ها در اعداد رینولدز و ریچاردسون مختلف، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در مقاله دیگری از ژانگ و همکارانش [۴] در ۲۰۱۳ که در آن مطالعه عددی دوبعدی روی محفظه دارای یک سیلندر دایره‌ای در اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۵۰۰ و $Re=100$ و گراش $Gr=10^5$ صورت گرفته است که دیواره بالایی حرکت می‌کند و دمای ثابتی دارد و دیواره پایین در حالت سکون است و دمای بالاتری از دیواره بالایی دارد. نتیجه‌ی به دست آمده از این بررسی، این بوده است که پارامترهای جریان سیال و انتقال حرارت همانطور که بستگی زیادی به جابه‌جایی آزاد و اجباری دارند، به طرز قرار گرفتن استوانه دایره‌ای نیز بستگی دارند. نتایج مطالعه محاسبات دوبعدی و سه بعدی عددی در مورد جریان با یک صفحه متحرک، در یک محفظه مربعی، در مقاله‌هایی از جنگ و تزنگ [۵] در ۲۰۰۸ و قاسمی و امین

الساداتی [۶] در ۲۰۰۸ و شریف [۷] در ۲۰۰۷ و ونگ [۸] در ۲۰۰۸ و لوو و یانگ [۹] در ۲۰۰۷ و خانافر [۱۰] در ۲۰۰۷ و ازتوپ [۱۱] در ۲۰۰۴ و شانکارو دشیپاند [۱۲] در ۲۰۰۰ و آیدین و یانگ [۱۳] در ۲۰۰۰ و آیدین [۱۴] در ۱۹۹۹ و محمد و ویسکانتا [۱۵] در ۱۹۹۵ می‌باشند.

مسأله انتقال حرارت ترکیبی داخل محفظه دارای تهویه، توسط مرگوئی [۱۶] به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین این جریان توسط محققان متعددی به روش‌های عددی میانگین رینولدز (RANS) و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) بررسی شده است [۱۷-۲۱]. زو و چن [۲۱]، توسط متد دو بعدی میانگین رینولدز، سازگاری خوبی مابین الگوی جریان حاصل از کار عددی و آزمایشگاهی مشاهده کرد. ژنگ و همکارانش [۱۸]، به مقایسه مدل‌های مختلف روش میانگین‌گیری رینولدز، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداخت. اخیراً مسأله انتقال حرارت ترکیبی دارای تهویه به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، توسط ایزوحرری [۲۲] مورد مطالعه قرار گرفت. وی نشان داد که محل ورودی سیستم تهویه تاثیر زیادی روی ساختارهای جریان داخل محفظه دارد.

روش تفکیک به موده‌های متعامد (POD)، یکی از روش‌هایی است که برای مطالعه ساختارهای منسجم و غالب جریان‌های آشفته استفاده می‌شود. این روش مجموعه‌ای از توابع ویژه (مودهای) مکانی متعامد را با استفاده از تابع همبستگی مرتبه دوم استخراج می‌کند (برکوز و همکاران [۲۳] و سیروویچ [۲۴]). در این روش موده‌های مکانی بر اساس میزان انرژی آن‌ها مرتب می‌شوند. ترکیب خطی موده‌های پرانرژی، نشانگر ساختارهای حاوی انرژی یا ساختارهای منسجم جریان است. آلفونسی و پریمورا در سال ۲۰۰۶ [۲۵]، جریان آشفته داخل کانال را به روش شبیه‌سازی مستقیم عددی (DNS) حل و ساختارهای غالب را توسط تکنیک تفکیک به موده‌های متعامد بدست آوردند. ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۲۶]، مکانیزم کاهش درگ و انتقال حرارت را با استفاده از نتایج حل شبیه‌سازی مستقیم عددی و استخراج ساختارهای چند مقیاسی توسط روش تفکیک به موده‌های متعامد پرداختند. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۲۷]، جریان نانو سیال آشفته را توسط روش شبیه‌سازی مستقیم عددی مدل‌سازی و با استفاده از آنالیز تفکیک به

مقیاس‌های مختلف شعله در احتراق پیش آمیخته توسط POD پرداختند. کافل و همکاران (۲۰۱۶) [۳۸]، به آنالیز POD اثر اغتشاش جانبی بر جت دیواره پرداختند. سرکار و همکاران (۲۰۱۶) [۳۹]، به بررسی اثر چرخش سیلندر بر ساختارهای جریان جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال مس-آب پشت استوانه دوار پرداختند. آنها دریافتند که تعداد موده‌های POD سازنده ساختارهای منسجم پشت استوانه با چرخش آن افزایش می‌یابد. ویلگاس و همکاران (۲۰۱۶) [۴۰]، توسط متد POD نشان دادند که ریزش گردابه پشت بال با زاویه حمله کوچک، سبب ایجاد نیروی لیفت و درگ پریدیک می‌شود. ساها و همکاران (۲۰۱۷) [۴۱]، به بررسی ساختارهای منسجم جریان داخل کانال حاوی مولد ورتکس طولی توسط POD پرداختند. آنها دریافتند که ساختارهای منسجم، مربوط به موده‌های پرنانژی POD است. لنگانی و همکاران (۲۰۱۷) [۴۲]، به مطالعه تجربی تولید تنش رینولدز در حباب جدایش با استفاده از روش POD پرداختند. آنها دریافتند که عدد رینولدز و شدت توربولانس جریان، اثر مستقیم بر تعداد موده‌های دخیل در تولید تنش رینولدز دارند. چن و کیا (۲۰۱۷) [۴۳]، جریان آشفته اطراف یک سیلندر مربعی را به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ حل و توسط روش POD فازهای فرآیند ریزش گردابه را در پشت سیلندر بدست آوردند. لنگانی و همکاران (۲۰۱۷) [۴۴]، با بررسی آزمایشگاهی و استفاده از روش POD، اثر آشفستگی جریان آزاد در گذار به جریان آشفته را مطالعه کرد که تحت اثر گردایان معکوس است و ناپایداری‌های جدی را در رگه‌های جریان داخل لایه مرزی مشاهده نمودند. بیسوئی و همکاران (۲۰۱۷) [۴۵]، توسط اعمال الگوریتم POD بر نتایج شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به بررسی ساختارهای منسجم جریان آشفته جت آزاد پرداختند. آنها دریافتند که ۹۰ درصد انرژی جنبشی نوسانات آشفته، در ۱۰۰ مود اول POD قرار دارد.

از آنجا که نقش اصلی در تولید و کنترل آشفستگی جریان بر عهده ساختارهای منسجم یا ادی‌های بزرگ و پرنانژی جریان است، کنترل مکانیزم تولید توربولانس، بهبود اختلاط و انتقال حرارت در جریانات آشفته با تغییر ساختارهای منسجم جریان میسر است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، ساختارهای منسجم جریان در محفظه‌های دارای

مودهای متعامد مکانیزم انتقال حرارت در آن را بررسی کردند. اخیراً یکانی مطلق و تقی‌زاده در سال ۲۰۱۶ [۲۸]، مکانیزم تولید توربولانس را در محیط متخلخل توسط تفکیک به موده‌های متعامد مورد مطالعه قرار دادند و متفاوت بودن فرآیند تولید آشفستگی در محیط‌های متخلخل و غیر متخلخل را مشاهده کردند. موسایی (۱۳۹۳) [۲۹]، ساختارهای منسجم جریان آشفته داخل کانال حاوی فیبر را بررسی کرد. نتایج او نشانگر این بود که ساختارهای منسجم جریان داخل کانال که به شکل نعل اسبی می‌باشند، بر اثر حضور فیبر به فواصل دورتر از دیواره منتقل می‌شوند. تهرانی و همکاران (۱۹۹۴) [۳۰]، ساختارهای جریان جنک‌کاری لبه جلویی پره توربین را به روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و شبیه‌سازی گردابه‌های مجزا، حل و مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشانگر این بود که روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به خصوص در نزدیکی دیواره، بهتر از روش شبیه‌سازی گردابه‌های مجزا مشخصه‌های جریان را پیش‌بینی می‌کند. رضائی و مغربی (۱۳۹۴) [۳۱]، به بررسی انتقال حرارت جابجایی آرام نانوسیال داخل یک محفظه بسته متخلخل پرداخته و ساختارهای آن را مورد بررسی قرار دادند. علوی و همکاران (۱۳۹۵) [۳۲]، ساختار جریان جابجایی آزاد نانوسیال را داخل یک محفظه بسته ال شکل دارای بافل، مورد بررسی قرار دادند. ژائویو و همکاران (۲۰۱۶) [۳۳]، با اعمال الگوریتم POD بر نتایج آزمایشگاهی جریان ناپایای روی هیدروفویل حاصل از روش PIV، به ساختارهای منسجم جریان در زوایای حمله مختلف پرداختند. گومز و همکاران (۲۰۱۶) [۳۴] با اعمال POD بر نتایج آزمایشگاهی میدان آشفته داخل محفظه احتراق توربین گازی، ساختارهای منسجم و آشوبناک آن را استخراج کردند. الهیمر و همکاران (۲۰۱۶) [۳۵]، با استفاده از الگوریتم POD و اعمال آن بر نتایج آزمایشگاهی اطراف دو سیلندر به این نتیجه رسیدند که ساختارهای منسجم اطراف استوانه‌ها و جریان مابین دو استوانه، کاملاً متفاوت می‌باشند. ماهاپاترا و همکاران (۲۰۱۶) [۳۶]، به بررسی ساختارهای تولید شده توسط دو منبع حرارتی داخل یک محفظه بسته که به صورت متناوب فعال می‌شوند، توسط POD پرداختند. آن‌ها محتوای انرژی موده‌های مختلف مربوط به ساختارهای منسجم را بررسی کردند. مائوریس و همکاران (۲۰۱۶) [۳۷]، به بررسی

سیال، T_h دمای دیواره گرم، U_{inj} سرعت جریان ورودی از سیستم تهویه به داخل محفظه، δ عدد دما، Pr عدد پرانتل سیال، Ra عدد رایلی و Re_H عدد رینولدز جریان می‌باشند. بر اساس پارامترهای بی بعد تعریف شده معادلات بی بعد جریان به فرم (۴-۶) نوشته می‌شوند.

معادله‌ی بی‌بعد پیوستگی:

$$\nabla^* \cdot \mathbf{V}^* = 0 \quad (۴)$$

معادله‌ی بی‌بعد مومنتم:

$$\frac{\partial \mathbf{V}^*}{\partial t^*} + \mathbf{V}^* \cdot \nabla^* \mathbf{V}^* = -\nabla^* p^* + \left(\frac{1}{Re_H}\right) \nabla^* \cdot \nabla^* \mathbf{V}^* + \left[\frac{1}{Pr} \cdot \frac{Ra}{Re_H^2} \cdot T^*\right] \cdot \mathbf{e}_g \quad (۵)$$

که $\mathbf{e}_g = \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|}$ بردار یکه شتاب گرانش می‌باشد.

معادله‌ی بی‌بعد انرژی:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + \mathbf{V}^* \cdot \nabla^* T^* = \frac{1}{(Pr + Pr_t)} \nabla^* \cdot \nabla^* T^* \quad (۶)$$

۲-۱-۱- مدل توربولانسی

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، برای مدل‌سازی ویسکوزیته توربولانسی مدل‌های بسیاری ارائه شده است. از این میان مدل اسماگرونیسکی دینامیکی ژرمانو و همکاران [۴۷] هم دارای هزینه محاسباتی پایین و هم دقت قابل قبول است. در این روش ضرایب ثابت مدل که عموماً وابسته به نوع جریان هستند، طی یک فرآیند دینامیکی از اطلاعات میدان سرعت حل شده بدست می‌آیند. در مدل استاندارد اسماگرونیسکی دینامیکی تانسور تنش زیر شبکه به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2c\Delta^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij}$$

که $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ تانسور نرخ کرنش میدان فیلتر شده و $|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2}$ اندازه آن می‌باشند. δ_{ij} دلتای کرونیکر، x_i و $\bar{u}_i \mathbf{e}_i$ مختصات و مولفه‌های بردار سرعت فیلتر شده در جهت i (۱، ۲ و ۳) می‌باشند. پهنای فیلتر شبکه به صورت $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ تعریف می‌شود که Δx ، Δy و Δz به ترتیب، اندازه شبکه در جهت x ، y و z می‌باشند. با در نظر گرفتن فیلتر تست با پهنای دو برابر فیلتر شبکه ($\bar{\Delta} = 2\Delta$)، ثابت مدل c به صورت دینامیکی از اطلاعات میدان جریان به شکل زیر به دست می‌آید:

تهویه به روش POD تا بحال صورت نگرفته است؛ لذا در کار حاضر ابتدا جریان سه بعدی آشفته داخل محفظه دارای تهویه در حضور مانع سه‌بعدی و بدون آن به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ حل می‌شود و برای اولین بار با استفاده از روش تفکیک به موده‌های متعامد بر اساس اسنپ شات که دارای هزینه محاسباتی پایینی است (سیروویچ و همکاران [۴۶]، سیروویچ و رودریگز [۲۴])، ساختارهای منسجم جریان در هر دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معادلات حاکم و الگوریتم POD

۲-۱- معادلات حاکم

اساس روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ فیلتراسیون مکانی، گردابه‌ها و متعاقباً معادلات جریان است. معادلات فیلتر شده پیوستگی، مومنتم و انرژی حاکم بر مساله با فرض جریان تراکم‌ناپذیر، ناپایا، سه بعدی، آشفته و فرض بوزینیسکی برای نیروی شناوری در معادله مومنتم به ترتیب به صورت معادلات ۱، ۲ و ۳ می‌باشند:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \left((v_f + v_t) \nabla \mathbf{V} \right) + \beta_f (T - T_c) \mathbf{g} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot \left(\left(\alpha_f + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \nabla T \right) \quad (۳)$$

در روابط (۱-۳)، \mathbf{V} میدان برداری سرعت فیلتر شده یا گردابه‌های بزرگ جریان، t زمان، p میدان فشار فیلتر شده، T میدان دمای فیلتر شده، v_f ویسکوزیته سینماتیکی سیال، v_t ویسکوزیته توربولانسی، β_f ضریب انبساط حجمی، T_c دمای سیال ورودی و دیواره‌های سرد، \mathbf{g} میدان برداری شتاب گرانش، α_f ضریب نفوذ حرارتی، Pr_t عدد پرانتل توربولانسی و اپراتور نابلا یا عملگر دل نام دارند. در کار حاضر به منظور بی‌بعد سازی معادلات پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده شده است.

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, Z = \frac{z}{H}, \nabla^* = H \nabla, \mathbf{V}^* = \frac{\mathbf{V}}{U_{inj}},$$

$$t^* = \frac{t U_{inj}}{H}, p^* = \frac{p}{\rho_f U_{inj}^2}, T^* = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \delta = \frac{T_c}{T_h - T_c},$$

$$Ra = \frac{g \beta_f (T_h - T_c) H^3}{\alpha_f \nu_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, Re_H = \frac{U_{inj} H}{\nu_f}$$

در عبارات بالا، بلانویس (*) نشانگر پارامتر بی‌بعد شده متغیرهای جریان است. به‌علاوه، H ارتفاع محفظه، ρ_f چگالی

که u' نشانگر نوسانات سرعت در جهت x (u_1)، y (u_2) یا z (u_3) است. Ω نشانگر میدان سه بعدی حل، \bar{X} مختصات بی بعد و N تعداد اسپش‌ها است.

۲- از طریق تفکیک به مقادیر منفرد (SVD) تانسور C ، مقادیر و بردارهای ویژه بدست می‌آیند:

$$CA = \lambda A$$

که λ مقدار ویژه و A بردار ویژه مربوط به آن است.

۳- مدهای ویژه POD با استفاده از بردارهای ویژه و میدان نوسانات سرعت به شکل زیر بدست می‌آیند:

$$\phi_k(\bar{X}) = \sum_{i=1}^N A_{ki} F'(\bar{X}, t_i^*)$$

k نشانگر k امین مود ویژه POD (ϕ_k) است.

۴- استخراج ساختارهای مختلف جریان بر اساس آنالیز مدهای ویژه POD

انرژی کل میدان نوسانات می‌تواند توسط مجموع مقادیر ویژه بدست آید.

$$E = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

به علاوه، نسبت انرژی مود n ام (λ_n) به انرژی کل به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\xi_n = \lambda_n / E$$

همچنین، انرژی تجمعی N مود اول (ζ_n) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\zeta_n = \sum_{i=1}^N \lambda_i / E$$

۳- هندسه و شرایط مرزی

هندسه محفظه مورد نظر، در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتفاع و عرض محفظه برابر ۱/۰۴ متر و عمق محفظه برابر ۰/۳ متر است. هوای سرد در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد از یک ورودی با ارتفاع ۰/۱۸ متر در بالاترین قسمت دیواره سمت چپ وارد محفظه می‌شود، همچنین خروجی با ارتفاع ۰/۲۴، در بخش پایین دیوار سمت راست قرار دارد. مشتق دما در جهت عمود بر سطح خروجی برابر با صفر، به عنوان شرط مرزی دمایی در خروجی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲]. این ورودی و خروجی، در طول عمق محفظه گسترش

$$c = \frac{\langle l_{ij} m_{ij} \rangle_{x_i, hom}}{\langle m_{kl} m_{kl} \rangle_{x_i, hom}}$$

که l_{ij} و m_{ij} از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$l_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \hat{u}_i \hat{u}_j$$

$$m_{ij} = -2(\hat{\Delta}^2 |\hat{S}| \hat{S}_{ij} - \Delta^2 |S| S_{ij})$$

که $(\hat{\cdot})$ نشانگر متغیرهایی است که روی فیلتر تست محاسبه می‌شوند و $\langle \cdot \rangle_{x_i, hom}$ میانگین‌گیری در جهت هموزن است. در کار حاضر میانگین‌گیری در جهت محور y که شرط مرزی در این جهت پریودیک است و جهت هموزن محسوب می‌شود صورت گرفته است، شکل ۱.

۲-۱-۲- تنظیمات عددی

در مقاله حاضر برای حل معادلات حاکم، کد باز با نام OpenFOAM استفاده شده است. گسسته‌سازی معادلات در OpenFOAM، بر اساس روش حجم محدود است. در کار حاضر الگوریتم پیروزو برای کوپلینگ سرعت و فشار، مورد استفاده قرار گرفته است. درونبایی ترم‌های غیرخطی ادوکنش به روش مرتبه دو بالادستی و گسسته‌سازی ترم‌های نفوذ به روش مرتبه دو اختلاف مرکزی صورت گرفته است. به علاوه برای ترم زمانی روش مرتبه یک ضمنی استفاده شده است. خروجی‌های حل عددی وارد کد جداگانه‌ای شد که در OpenFoam به منظور اعمال الگوریتم POD توسعه یافته است.

۲-۲- الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد (POD)

جزئیات الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد را می‌توان در کار برکوز (۱۹۹۳) یافت. داده‌هایی که در کار حاضر به منظور آنالیز استفاده شده‌اند، مربوط به نوسانات سه بعدی سرعت یعنی (u_1, u_2, u_3) در کل میدان سه بعدی محفظه است. میدان نوسانات سرعت توسط کم کردن سرعت میانگین زمانی از سرعت لحظه‌ای در تک تک گام‌های زمانی بدست می‌آید. در کار حاضر الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد ارائه شده توسط سیروویچ [۴۶] مورد استفاده قرار گرفته که به شرح زیر است.

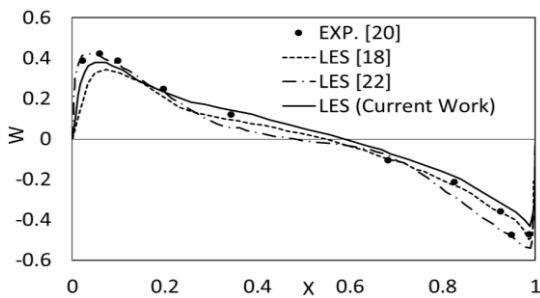
۱- ابتدا ضرب داخلی در فضای هیلبرت بدست می‌آیند:

$$C_{ij} = \frac{1}{N} \int_{\Omega} u'(\bar{X}, t_i^*) u'(\bar{X}, t_j^*) d\Omega, \\ (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N)$$

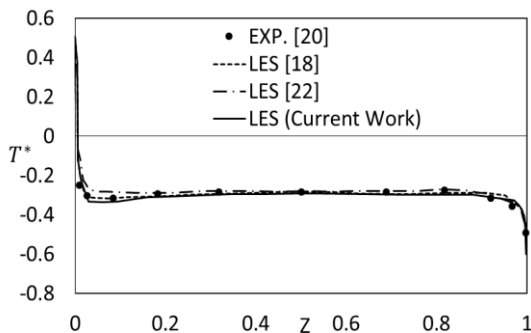
۴- اعتبارسنجی نتایج

در این بخش نتایج کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی و سایر نتایج عددی در حالت محفظه بدون مانع مقایسه شده است. در شکل ۲، نتایج متوسط زمانی مولفه سرعت بی‌بعد شده توسط U_{inj} در جهت محور Z (W)، روی محور مرکزی موازی محور X ($X=x/H$) با نتایج تجربی بلای [۲۰، ۲۱]، نتایج شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ژنگ [۱۸] و ازوری [۲۲] مقایسه شده است. به علاوه، نتایج توزیع دما و انرژی جنبشی توربولانس روی خط مرکزی موازی محور Z ($Z=z/H$) رسم و با نتایج تجربی و عددی مذکور به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴، مورد مقایسه قرار گرفته است.

همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج کار حاضر همخوانی نسبتاً خوبی با نتایج تجربی دارد؛ همچنین نتایج کار حاضر پیش‌بینی نسبتاً بهتری نسبت به سایر نتایج عددی دارد. نتایج مربوط به توزیع دما، نشانگر این است که هسته محفظه هم دما باقی می‌ماند.



شکل ۲- مقایسه ی پروفیل مولفه عمودی سرعت میانگین بی بعد شده کار حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود بر روی خط مرکزی موازی محور X



شکل ۳- مقایسه پروفیل دمای بی بعد کار حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود روی خط مرکزی موازی محور Z

یافته‌اند. دمای صفحه گرم زیرین (کف محفظه) برابر ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. سایر دیوارها در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد هستند. در جهت عمق (y) شرط مرزی پریودیک استفاده شده است. ویژگی‌های هوا در دمای مرجع T_{mean} (۲۹۸ درجه کلوین) عبارتند از:

چگالی (ρ_{air}) برابر با: $1/2$ کیلوگرم بر متر مکعب

ویسکوزیته سینماتیکی (ν_{air}) برابر با: $5 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$

و ضریب نفوذ گرمایی (α_{air}) برابر با: $2/1 \times 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$

که بر اساس پارامترهای بالا مقادیر اعداد بی‌بعد عبارتند از:

عدد رایلی بر اساس ارتفاع محفظه: $Ra_H = 2/4 \times 10^9 - 9$

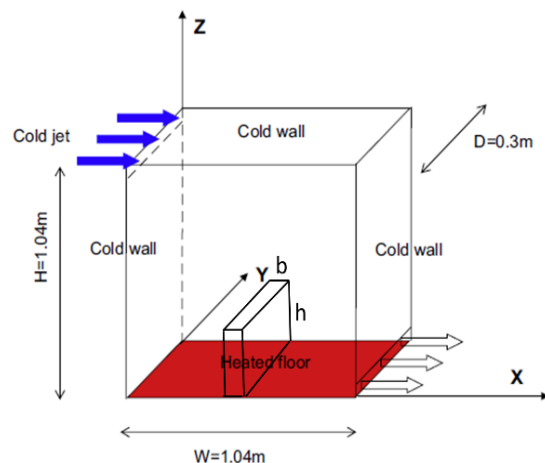
عدد رینولدز بر اساس ارتفاع ورودی هوای سرد: $Re_h = 684$

عدد فرود: $Fr_h = \frac{U_{inj}}{\sqrt{g\beta h\Delta T}} = 5/24$

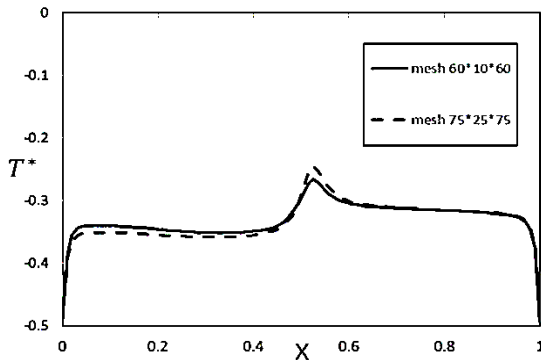
سرعت در بخش ورودی سیستم تهویه محفظه برابر $U_{inj} = 0.57 \frac{m}{s}$ است.

در کار حاضر در مقابل جریان مانعی قرار داده شده است و اثرات این امر با قرار دادن سه مانع با ضخامت یکسان، ولی ارتفاع‌های متفاوت بررسی شده است. محل مانع درست در وسط محفظه، مطابق شکل ۱ است. ارتفاع مانع و b ضخامت آن است. مشخصات سه مانع مختلف به صورت زیر است:

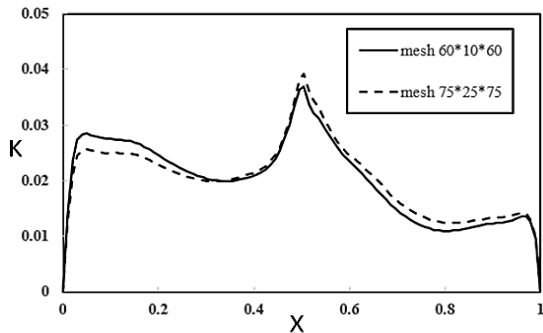
- | | | |
|---------------------|----------------------|-------------------------|
| $\frac{b}{H} = 0.1$ | $\frac{he}{H} = 0.4$ | مانع حالت اول (case 1): |
| $\frac{b}{H} = 0.1$ | $\frac{he}{H} = 0.2$ | مانع حالت دوم (case 2): |
| $\frac{b}{H} = 0.1$ | $\frac{he}{H} = 0.1$ | مانع حالت سوم (case 3): |



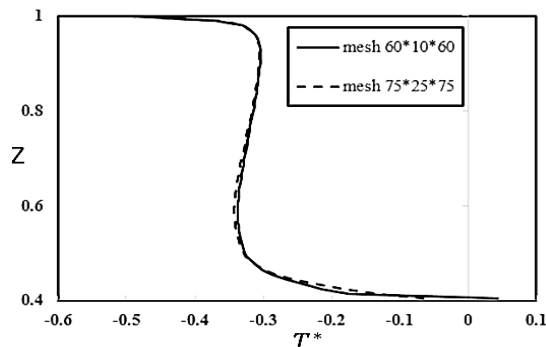
شکل ۱- شماتیکی از هندسه ی محفظه دارای مانع



شکل ۵- پروفیل دمای بی‌بعد شده روی خط مرکزی موازی محور Z در مش‌های مختلف برای حالت مانع اول



شکل ۶- پروفیل انرژی جنبشی بی‌بعد در مش‌های مختلف برای حالت مانع اول بر روی خط مرکزی موازی محور X



شکل ۷- پروفیل دمای بی‌بعد شده در مش‌های مختلف برای حالت مانع اول بر روی خط مرکزی موازی محور Z

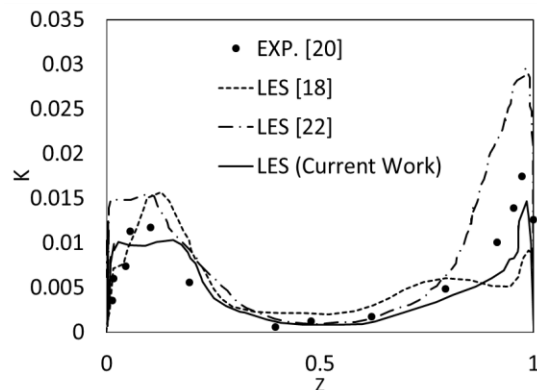
۶- نتایج

در این بخش ابتدا نتایج مشخصه‌های جریان مانند، سرعت، دما و انرژی جنبشی توربولانس حاصل از شبیه‌سازی عددی برای حالت محفظه بدون مانع با حالت با مانع مقایسه شده

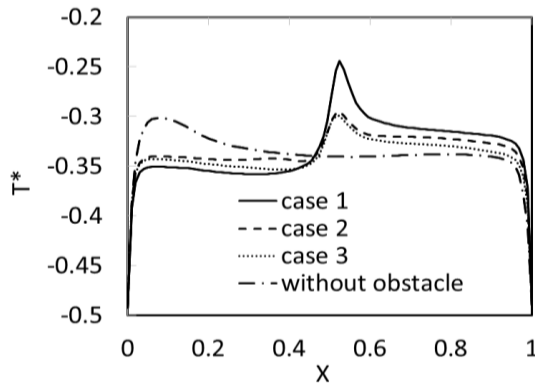
نتایج کار حاضر، نشانگر این است که مقدار توربولانس در وسط محفظه بسیار ناچیز است، در حالی که در نزدیکی دیواره‌ها محسوس است که این موضوع نشانگر جریانی است که به دور یک هسته عایق می‌گردد.

۵- مطالعه مش

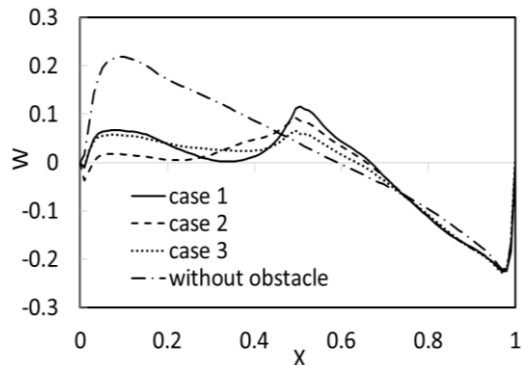
شبکه محاسباتی مورد استفاده در کار حاضر از نوع سازمان‌یافته است. مش‌بندی در جهت عمق y (جهت هموزن)، یکنواخت است، اما در جهت x و y از تراکم بیشتری در نزدیکی دیواره جامد برخوردار است. اولین مش در نزدیکی دیواره دارای $y^+ = \frac{\nu u_\tau}{\nu_f} < 1$ کمتر از یک است. در این رابطه u_τ سرعت اصطکاکی است. به منظور بررسی استقلال از مش مساله برای حالت محفظه دارای مانع با بیشترین ارتفاع برای تعداد شبکه‌های متفاوت حل شد. نتایج دمای میانگین بی‌بعد و انرژی جنبشی توربولانس روی محور مرکزی محفظه موازی محور x به ترتیب، در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده‌اند. به علاوه تغییرات دمای میانگین بی‌بعد در امتداد خط مرکزی محفظه موازی محور z در شکل ۷ رسم شده است. نتایج مش بندی $60 \times 10 \times 60$ و $75 \times 25 \times 75$ به هم نزدیک است و نتایج مش $96 \times 34 \times 96$ کاملاً منطبق بر مش $75 \times 25 \times 75$ است؛ به همین دلیل در نمودارها نشان داده نشده‌اند. با توجه به نتایج، مش $75 \times 25 \times 75$ به عنوان شبکه با نتایج مستقل در شبیه‌سازی‌ها، مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۸- مقایسه ی انرژی جنبشی بی بعد کار حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود بر روی خط مرکزی موازی محور Z



شکل ۸- مقایسه‌ی پروفیل دمایی بی‌بعد شده روی خط مرکزی موازی محور X برای حالت بدون مانع و حالت‌های با مانع



شکل ۹- مقایسه‌ی مولفه سرعت میانگین در جهت محور Z بر روی خط مرکزی موازی محور X برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار

آن، نشانگر وجود یک گردابه بزرگ در بخش میانی محفظه در حالت بدون مانع است. نتایج برای حالت‌های مانع‌دار، آشکار کننده اثرگذاری مانع بر گردابه و شکستن آن است. به خصوص سمت چپ مانع ساختار گردابه، کاملاً تحت تاثیر مانع متلاشی شده است.

شکل ۱۰ مقایسه پروفیل انرژی جنبشی بی‌بعد شده در جهت محور Z برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار را نشان می‌دهد. نمودار انرژی جنبشی حالت بدون مانع، تخت‌تر از حالت‌های با مانع است. همانند نمودارهای قبلی در محل مانع مورد نظر، یک مقدار ماکزیمم ایجاد شده است که مقدار این ماکزیمم با افزایش ارتفاع مانع، افزایش می‌یابد. در قسمت قبل اشاره شد که در حالت بدون مانع در وسط محفظه مقدار انرژی جنبشی بسیار ناچیز است و فقط در

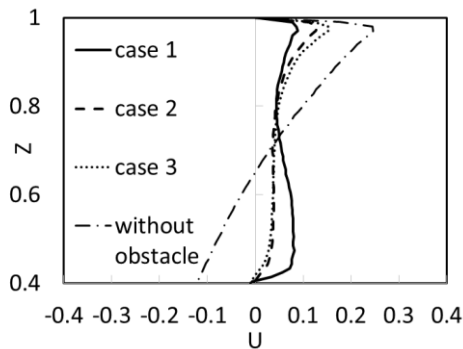
است. سپس با اعمال روش تفکیک به مودهای متعامد بر نتایج مربوط به نوسانات سرعت، به بررسی ساختارهای منسجم جریان پرداخته شده است.

۱-۶- مقایسه‌ی مشخصه‌های جریان حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار

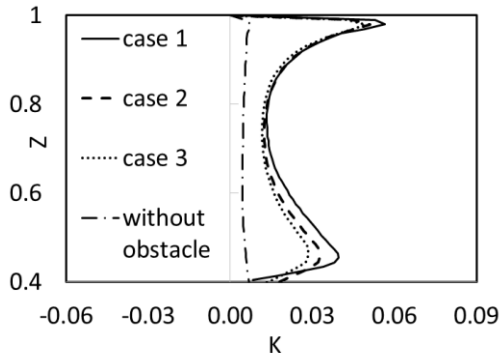
در این قسمت از کار حاضر، به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت بدون مانع با هر سه حالت با مانع پرداخته شده است. شکل ۸ مقایسه پروفیل دمایی بی‌بعد شده در جهت محور X برای حالت بدون مانع و حالت‌های با مانع را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در محل مانع، یک ماکزیمم ایجاد می‌شود. همانطور که از شکل هم مشخص است، هرچه مقدار ارتفاع مانع بیشتر می‌شود، مقدار این ماکزیمم بیشتر می‌شود در واقع قرار دادن مانع باعث شده است که هسته محفظه هم دما باقی نماند. علت این موضوع، می‌تواند این باشد که چون مانع هم دما با کف محفظه و دما بالا است، لذا علاوه بر اینکه سبب تغییر ساختارهای جریان می‌شود، همانند فین عمل کرده و دمای سیال مجاور خود را بالا می‌برد؛ همچنین همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است، مانع سبب افزایش آشفته‌گی جریان در بخش میانی محفظه می‌شود، لذا این آشفته‌گی میزان انتقال حرارت را افزایش داده، سبب بالا رفتن هر چه بیشتر دما در محل مانع می‌شود. علاوه بر این در $X < 0.5$ (سمت چپ مانع) دمای سیال حالت مانع دار، کمتر از حالت بدون مانع است، اما در $X > 0.5$ این روند بر عکس شده، دمای سیال در حالت محفظه مانع‌دار، بیشتر از حالت بدون مانع شده است.

شکل ۹ مقایسه مولفه سرعت میانگین در جهت محور X برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع دار را نشان می‌دهد. روند تغییرات برای هر سه حالت مانع دار یکسان است. در محل مانع مورد نظر، یک ماکزیمم (پیک) ایجاد شده است که با افزایش ارتفاع مانع، این مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. در $X < 0.5$ مقدار سرعت در حالت‌های مانع‌دار بسیار کمتر از حالت بدون مانع شده است؛ در فاصله $0.5 < X < 0.8$ مقدار سرعت در حالت‌های با مانع، بیشتر از حالت بدون مانع است و در $X > 0.8$ مقدار سرعت در حالت بدون مانع، بیشتر از حالت‌های با مانع است. تغییرات علامت سرعت از مثبت، در قسمت سمت چپ محفظه، به منفی، در بخش سمت راست

شکل ۱۳ مقایسه پروفیل انرژی جنبشی بی‌بعد شده در جهت محور X برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار را نشان می‌دهد. در هر چهار حالت، مقدار انرژی جنبشی در وسط محفظه، بسیار کمتر از دیواره هاست؛ اما در حالت‌های با مانع مقدار انرژی جنبشی در وسط محفظه، بیشتر از مقدار آن در حالت بدون مانع است. همانطور که از شکل هم مشخص است، در نزدیکی دیواره‌ها پیک ایجاد شده است که با افزایش ارتفاع مانع، مقدار آن افزایش می‌یابد. این ناحیه در واقع لایه بافر از پروفیل سرعت نزدیک دیواره است که در واقع محل تولید و نگهداری آشفتگی جریان است. با توجه به شکل حضور مانع، ساختارهای نزدیک دیواره را تقویت می‌کند که مستقیماً بر تولید و حفظ توربولانس موثر هستند و سبب افزایش انرژی توربولانس در این ناحیه می‌شود.



شکل ۱۲- مقایسه‌ی پروفیل مولفه سرعت میانگین بی بعد در جهت محور X بر روی خط مرکزی موازی محور Z برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار

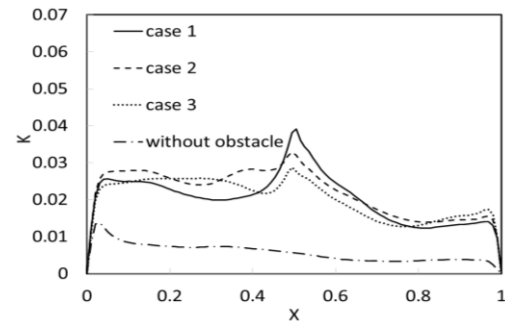


شکل ۱۳- مقایسه‌ی پروفیل انرژی جنبشی بی‌بعد بر روی خط مرکزی موازی محور Z برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار

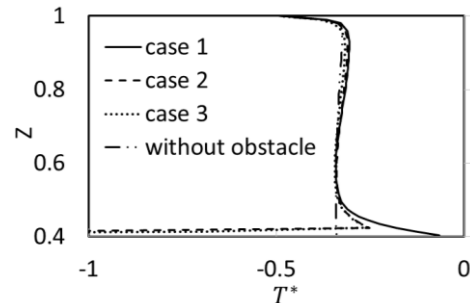
دیواره‌ها مقدار محسوسی دارد، اما مشاهده می‌شود که در حالت‌های مانع‌دار در وسط محفظه، هم مقدار انرژی جنبشی مقادیر محسوسی دارد و دارای پیک‌هایی در دیواره‌ها و در محل مانع است. علت افزایش انرژی جنبشی توربولانس در محل مانع، می‌تواند شکسته شدن ساختار تک گردابه‌ای اصلی جریان توسط مانع و تبدیل آن به ادی‌های کوچک و در نتیجه افزایش نوسانات سرعت و آشفتگی جریان باشد.

شکل ۱۱، مقایسه پروفیل دمای بی‌بعد شده روی محور X برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار را نشان می‌دهد. مانند نمودار دمای بی‌بعد روی محور Z در محل مانع یک ماکزیمم ایجاد می‌شود که علت آن قبلاً توضیح داده شد.

شکل ۱۲ مقایسه پروفیل مولفه سرعت میانگین بی‌بعد شده در جهت محور X برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، سرعت منفی تبدیل به سرعت مثبت شده است؛ لذا از بین رفتن گردابه اصلی جریان توسط مانع که قبلاً توضیح داده شد، از این نمودار نیز مشهود است.

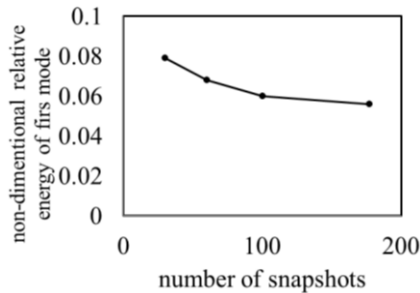


شکل ۱۰- مقایسه پروفیل انرژی جنبشی بی‌بعد روی خط مرکزی موازی محور X برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار

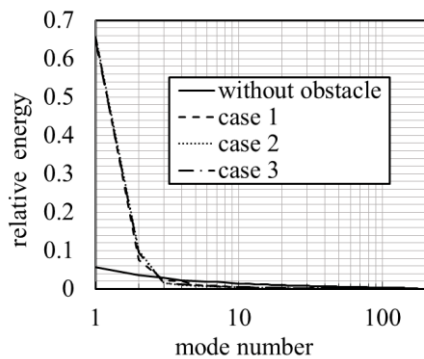


شکل ۱۱- مقایسه پروفیل دمای بی‌بعد بر روی خط مرکزی موازی محور Z برای حالت بدون مانع با حالت‌های مانع‌دار

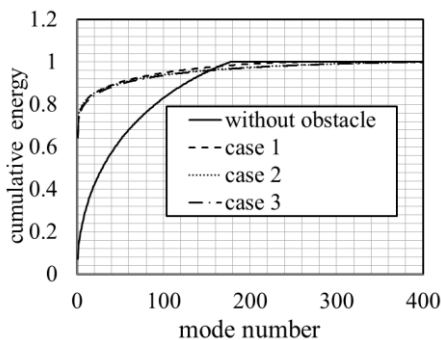
مانع و تبادل مومنتم با دیواره مانع ساختارهای بزرگ پر انرژی ایجاد می‌شود. همچنین تعداد مود های لازم برای بازسازی میزان مشخصی از انرژی آشفته‌گی جریان در حالت بدون مانع بیشتر از حالت های با مانع می‌باشد. که این موضوع نشانگر این است که بر اثر برخورد جریان به مانع تعداد گردابه‌های بیشتری نسبت به حالت بدون مانع ایجاد می‌شود.



شکل ۱۴- بررسی استقلال از تعداد اسنپشات برای حالت بدون مانع



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- انرژی نسبی مودهای مختلف برای مولفه نوسانی سرعت در جهت محور x (الف) مجزا و (ب) تجمعی

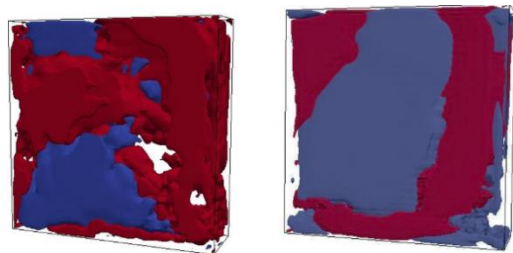
برای بررسی علت دقیق تغییرات نمودارهای فوق الذکر در ادامه روش تفکیک به مودهای متعامد به کار گرفته شده است.

۲-۶- تفکیک به مودهای متعامد مولفه نوسانی سرعت در جهت محور X

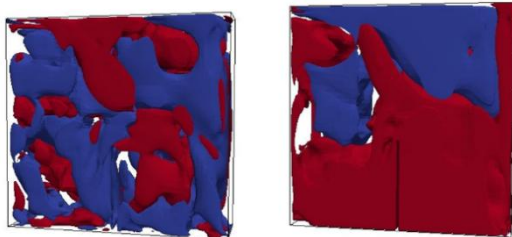
برای بررسی عمیقتر چگونگی تاثیر مانع بر جریان آشفته محفظه، الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد به مولفه‌ی نوسانی سرعت در جهت محور x اعمال شده است و تاثیر مانع بر جریان آشفته مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت نوسانی از تفریق سرعت میانگین از سرعت لحظه‌ای بدست می‌آید. الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد به نتایج حاصل از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ آشفته اعمال می‌شود. برای اینکه تحلیل بدست آمده از اعمال تفکیک به مودهای متعامد قابل اعتماد باشد ابتدا استقلال از تعداد اسنپشات ها بررسی شود. برای این منظور انرژی نسبی اولین مود بدست آمده از الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد بر حسب تعداد اسنپشاتها برای محفظه آشفته بدون مانع بررسی شده است که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۱۴ تعداد اسنپشات ۱۷۷ برای اعمال الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد به عنوان اسنپشات بهینه در نظر گرفته شده است. حال نتایج بدست آمده از اعمال الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد به جریان محفظه با موانع مختلف بررسی می‌شود.

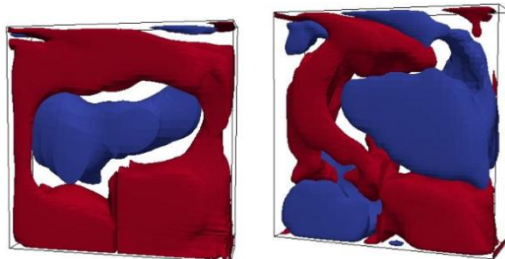
باید توجه داشت که مودهای با شماره پایین نشانگر ساختارهای بزرگ و مودهای با شماره بزرگ نشانگر ساختارهای کوچک جریان می‌باشند. شکل ۱۵ الف انرژی نسبی مودها را به صورت جداگانه برای هر مود نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که انرژی مودهای با شماره پایین یا ساختارهای بزرگ برای حالت مانع‌دار بیشتر از حالت بدون مانع است. علاوه بر این، همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد مود، انرژی نسبی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۱۵ ب، مشاهده می‌شود که سرعت همگرایی نمودار انرژی تجمعی حالت‌های مانع‌دار بیشتر از حالت بدون مانع می‌باشد که نشان دهنده‌ی بالا بودن انرژی مودهای غالب و ساختارهای بزرگ جریان در حالت با مانع نسبت به محفظه بدون مانع است. این بدین دلیل است که با برخورد جریان به



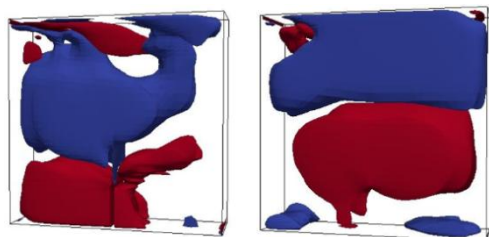
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۱۶- کانتور هم‌سطح مولفه نوسانی سرعت در جهت محور x داخل محفظه، ستون راست مود اول، ستون چپ مود دوم، (الف) محفظه بدون مانع، (ب) محفظه با مانع حالت اول، (پ) محفظه با مانع حالت دوم و (ت) محفظه با مانع حالت سوم

مانع و دیواره فوقانی محفظه ایجاد می‌شوند؛ ولی برای حالت اول که ارتفاع مانع بیشترین است، ساختارهای پیرانرژی کوچک‌تر و نامنظم‌تر است که نشانگر انرژی جنبشی بالاتر در این حالت است.

مطالعه انرژی تجمعی موده‌ها، نشانگر این است که انرژی تجمعی ۲۰ مود اول برای حالت بدون مانع حدود $0.42/18$ ، برای مانع اول حدود $0.84/30$ ، برای مانع دوم حدود $0.85/32$ و برای مانع سوم $0.85/34$ است که در واقع نشان‌دهنده دوبرابر شدن انرژی تجمعی برای حالت‌های مانع‌دار نسبت به حالت بدون مانع است. این اتفاق بیانگر این است که ساختارهای بزرگ ایجاد شده در حالت با مانع، مجموعاً انرژی بیشتری نسبت به ساختارهای بزرگ حالت بدون مانع دارند و در نتیجه توربولانس در حالت مانع‌دار قویتر است.

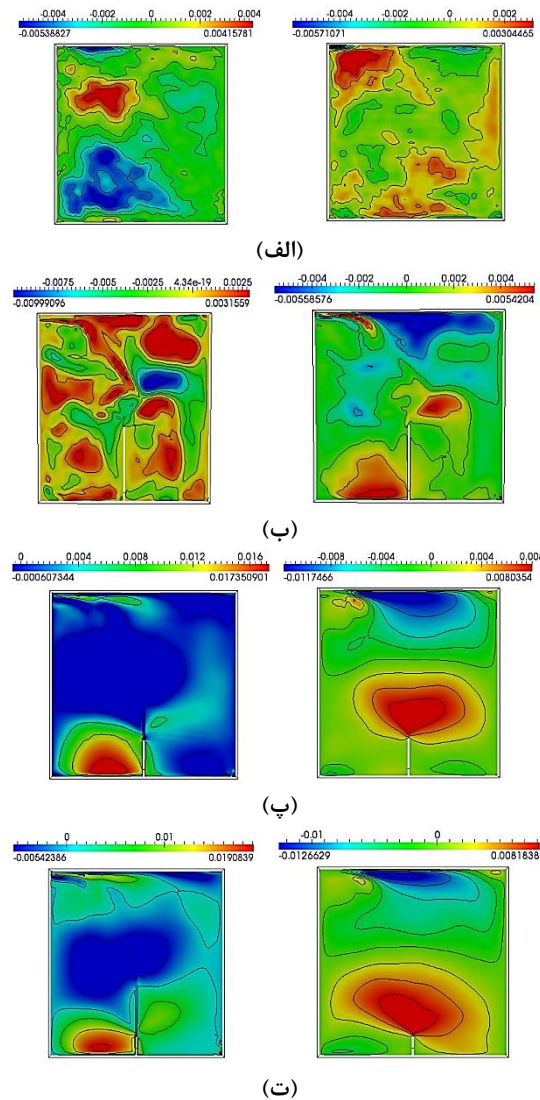
برای بررسی و تفسیر ساختارهای بزرگ پیرانرژی، ۲ مود اول پیرانرژی به صورت جداگانه برای هر ۴ حالت، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۱۶، کانتورهای هم‌سطح موده‌های اول و دوم حاصل از نتایج اعمال الگوریتم تفکیک به موده‌های متعامد بر مولفه نوسانی سرعت در جهت محور x ، برای هر چهار حالت بدون مانع و مانع‌دار را نشان می‌دهد. در این شکل، ساختارهای آبی رنگ مربوط به نوسانات منفی و ساختارهای قرمز، نوسانات مثبت را نشان می‌دهند. با توجه به این کانتورها این موضوع برداشت می‌شود که برای حالت بدون مانع (شکل ۱۵-الف)، شکل ساختارهای منسجم مثبت و منفی کل محفظه را پر می‌کنند؛ در صورتی‌که برای مانه‌های دوم (ارتفاع متوسط) شکل ۱۵-پ و سوم (ارتفاع کوچک) شکل ۱۵-ت ساختارهای منسجم مثبت و منفی به هم پیوسته و بزرگتر می‌شوند؛ اما برای مانع اول (ارتفاع زیاد) در شکل ۱۵-ب مشاهده می‌شود که ارتفاع مانع، مانع از به هم پیوستن ساختارهای مثبت و منفی می‌شود و بالعکس ساختارهای پیرانرژی جریان کوچکتر شده‌اند. این نتایج در واقع نشان‌دهنده علت نتایج مشاهده شده در بخش قبل است؛ به این صورت که در بخش قبل مشاهده شد که با قرار دادن مانع، انرژی جنبشی آشفتنگی افزایش می‌یابد و این افزایش با کمتر شدن ارتفاع مانع کاهش می‌یابد. در واقع بزرگتر شدن ساختارها با افزایش اندازه مانع، منجر به کاهش ماکزیمم مقدار انرژی جنبشی آشفتنگی در محفظه مانع‌دار می‌شود.

به منظور بدست آوردن اطلاعات دقیق و بیشتر از ساختارهای نوسانی، موده‌های ویژه سرعت نوسانی در جهت محور x روی صفحه $x-z$ در وسط محور y ، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. طبق شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که برای مانع‌های دوم و سوم ساختارهای غیر هم جهت بزرگ، در فضای بین

جریان برای حالت بدون مانع و حالت‌های با مانع نشان داد که دمای سیال مرکز محفظه از حالت هم‌دمای خارج و در محل مانع یک ماکزیمم ایجاد می‌شود؛ همچنین مشاهده شد که هرچه ارتفاع مانع بیشتر می‌شود، مقدار این ماکزیمم افزایش می‌یابد. به علاوه انرژی جنبشی توربولانس با قرار دادن مانع افزایش می‌یابد. در ادامه کار با اعمال الگوریتم تفکیک به مودهای متعامد (POD) به میدان سرعت نوسانی در جهت x ، ساختارهای منسجم استخراج شدند. نتایج نشانگر این بود که انرژی ساختارهای بزرگ (با شماره کوچک)، با وجود مانع، شدیداً افزایش می‌یابد؛ همچنین برای حالت بدون مانع، ساختارهای منسجم مثبت و منفی کل محفظه را پر می‌کنند؛ اما برای مانع‌های با ارتفاع متوسط و کوتاه ساختارهای منسجم مثبت و منفی به هم پیوسته و بزرگتر می‌شوند؛ در صورتی که برای مانع با ارتفاع زیاد مشاهده شد که ارتفاع مانع نه تنها از پیوستن ساختارها جلوگیری می‌کند، بلکه سبب کوچکتر شدن ساختارهای پرانرژی جریان می‌شود.

۸- مراجع

- [1] Alinia M, Ganji DD, Gorji-Bandpy M (2011) Numerical study of mixed convection in an inclined two sided lid driven cavity filled with nanofluid using two-phase mixture model. *Int J Heat Mass Transf* 38(10): 1428-1435.
- [2] Nasrin R (2011) Rayleigh and Prandtl number effects on free and forced magnetoconvection in a lid driven enclosure with wavy bottom wall. *Int J Energ and Tech* 3(23): 1-8.
- [3] Fereidoon A, Saedodin S, Hemmat Esfe M, Noroozi MJ (2013) Evaluation of mixed convection in inclined square lid-driven cavity filled with Al₂O₃/water nano-fluid. *Eng Appl Comp Fluid Mech* 7(1): 55-65.
- [4] Zheng GF, Ha MY, Yoon HS, Park YG (2013) A numerical study on mixed convection in a lid-driven cavity with a circular cylinder. *J Mech Sci Tech* 27(1): 273-286.
- [5] Jeng TM, Tzeng SC (2008) Heat transfer in a lid-driven enclosure filled with water-saturated aluminum foams. *Numer. Heat Trans A* 54(2): 178-196.
- [6] Ghasemi B, Aminossadati SM (2008) Comparison of mixed convection in a square cavity with an oscillating versus a constant velocity wall. *Numer Heat Trans A* 54(7): 726-743.
- [7] Sharif MAR (2007) Laminar mixed convection in shallow inclined driven cavities with hot moving lid on top and cooled from bottom. *Appl Therm Eng* 27(5): 1036-1042.



شکل ۱۷- مودهای ویژه مولفه نوسانی سرعت در جهت محور x ، روی صفحه $x-z$ در وسط محور y ، ستون راست مود اول، ستون چپ مود دوم (الف) محفظه بدون مانع، (ب) محفظه با مانع حالت اول، (پ) محفظه با مانع حالت دوم و (ت) محفظه با مانع حالت سوم.

۷- نتیجه گیری نهایی

در این مقاله در ابتدا جریان آشفته داخل محفظه سه‌بعدی با روش شبه‌سازی گردابه‌های بزرگ حل و با نتایج تجربی و عددی موجود مقایسه شد. در ادامه در مقابل جریان داخل محفظه، ۳ مانع با ارتفاع‌های متفاوت، ولی ضخامت یکسان قرار داده شد. مقایسه پروفیل دمای بی بعد شده در جهت

- [23] Berkooz G, Holmes P, Lumley JL (1991) Intermittent dynamics in simple models of the turbulent wall layer. *J Fluid Mech* 230: 75-95.
- [24] Sirovich L (1987) Turbulence and the dynamics of coherent structures part I: coherent structures. *Q Appl Math* 45(3): 561-571.
- [25] Alfonsi G, Primavera L (2007) The structure of turbulent boundary layers in the wall region of plane channel flow. *Proc Royal Soci London A: Math Phys Eng Sci* 463, 2078, 593-612.
- [26] Wang Y, Yu B, Wu X, Wei J, Li F, Kawaguchi Y (2011) POD study on the mechanism of turbulent drag reduction and heat transfer reduction based on Direct Numerical Simulation. *Prog Comput Fluid Dyn* 11(3-4): 149-159.
- [27] Yang JC, LiF C, Cai WH, Zhang HN, Yu B (2014) On the mechanism of convective heat transfer enhancement in a turbulent flow of nanofluid investigated by DNS and analyses of POD and FSP. *Int J Heat Mass Trans* 78: 277-288.
- [28] Motlagh SY, Taghizadeh S (2016) POD analysis of low Reynolds turbulent porous channel flow. *Int J Heat Fluid Flow* 61: 665-676.
- [۲۹] موسائی ا (۲۰۱۴) مطالعه ساختمان‌های گردابه‌ای در جریان آشفته کانال حاوی میکرو فیبر با استفاده از شبیه سازی مستقیم عددی. *مهندسی مکانیک مدرس* ۹۳-۸۵: (۳)۱۴.
- [۳۰] بازدید تهرانى ف، موسوى س م، جدید م (۲۰۱۵) تحلیل خنک‌کاری لایه‌ای لبه جلویی پره توربین مدل توسط دو رهیافت DES و LES. *مهندسی مکانیک مدرس* ۲۷۸۰-۲۶۰: (۸)۱۵.
- [۳۱] رضائی م، مغربی م (۲۰۱۵) مطالعه ی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی مزدوج در محفظه ی بسته متخلخل به روش شبکه بولتزمن. *مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۲۳۱-۲۱۷: (۲)۵.
- [۳۲] علوی ن، ارمغانی ط، ایزد پناه ب (۲۰۱۶) انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نانوسیال در محفظه L شکل بافلدار. *مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۳۲۱-۳۱۱: (۳)۶.
- [33] Wei Z, Zang B, New TH, Cui YD (2016) A proper orthogonal decomposition study on the unsteady flow behaviour of a hydrofoil with leading-edge tubercles. *Ocean Eng* 121: 356-368.
- [34] Gomez-Ramirez D, Ekkad SV, Moon HK, Kim Y, Srinivasan R (2017) Isothermal coherent structures and turbulent flow produced by a gas turbine combustor lean pre-mixed swirl fuel nozzle. *Exp Therm Fluid Sci* 81: 187-201.
- [35] Elhimer M, Harran G, Hoarau Y, Cazin S, Marchal M, Braza M (2016) Coherent and turbulent processes in the bistable regime around a tandem of cylinders including reattached flow dynamics by means of high-speed PIV. *J Fluid Struc* 60: 62-79.
- [36] Mahapatra PS, Chatterjee S, Mukhopadhyay A, Manna NK, Ghosh K (2016) Proper orthogonal
- [8] Wong JCF (2007) Numerical simulation of two-dimensional laminar mixed-convection in a lid-driven cavity using the mixed finite element consistent splitting scheme. *Int J Numer Method Heat Fluid Flow* 17(1): 46-93.
- [9] Luo WJ, Yang RJ (2007) Multiple fluid flow and heat transfer solutions in a two-sided lid-driven cavity. *Int J Heat Mass Trans* 50(11): 2394-2405.
- [10] Khanafer KM, Al-Amiri AM, Pop I (2007) Numerical simulation of unsteady mixed convection in a driven cavity using an externally excited sliding lid. *European J Mech B* 26(5): 669-687.
- [11] Oztop HF, Dagtekin I (2004) Mixed convection in two-sided lid-driven differentially heated square cavity. *Int J Heat Mass Trans* 47(8): 1761-1769.
- [12] Shankar PN, Deshpande MD (2000) Fluid mechanics in the driven cavity. *Annu Rev Fluid Mech* 32(1): 93-136.
- [13] Yang OAWJ (2000) Mixed convection in cavities with a locally heated lower wall and moving sidewalls. *Numer. Heat Trans A* 37(7): 695-710.
- [14] Aydm O (1999) Aiding and opposing mechanisms of mixed convection in a shear-and buoyancy-driven cavity. *Int Commun Heat Mass Trans* 26(7): 1019-1028.
- [15] Mohamad AA, Viskanta R (1995) Flow and heat transfer in a lid-driven cavity filled with a stably stratified fluid. *Appl Math Model* 19(8): 465-472.
- [16] Mergui S (1993) Caractérisation expérimentale des écoulements d'air de convection naturelle et mixte dans une cavité fermée, thèse de l'Université de Poitiers, France.
- [17] Chen WZQ (2000) Large eddy simulation of natural and mixed convection airflow indoors with two simple filtered dynamic subgrid scale models. *Numer Heat Trans A* 37(5): 447-463.
- [18] Zhang Z, Zhang W, Zhai ZJ, Chen QY (2007) Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2—Comparison with experimental data from literature. *Hvac&R Research* 13(6): 871-886.
- [19] Blay D, Mergui S, Niculae C (1993) Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet. *ASME-PUBLICATIONS-HTD* 213: 65-65.
- [20] Blay D, Mergui S, Tuhault JL, Penot F (1993) Experimental turbulent mixed convection created by confined buoyant wall jets. In: *First Eur Heat Trans Conf UK* 821-828.
- [21] Xu W, Chen Q (2001) A two-layer turbulence model for simulating indoor airflow: Part I. Model development. *Ener Build* 33(6): 613-625.
- [22] Ezzouhri R, Joubert P, Penot F, Mergui S (2009) Large Eddy simulation of turbulent mixed convection in a 3D ventilated cavity: Comparison with existing data. *Int J Therm Sci* 48(11): 2017-2024.

- channel with built-in longitudinal vortex generators. *Int J Heat Mass Trans* 104: 178-198.
- [42] Lengani D, Simoni D, Ubaldi M, Zunino P, Bertini F (2017) Analysis of the Reynolds stress component production in a laminar separation bubble. *Int J Heat Fluid Flow* 64: 112-119.
- [43] Chen X, Xia H (2017) A hybrid LES-RANS study on square cylinder unsteady heat transfer. *Int J Heat Mass Trans* 108: 1237-1254.
- [44] Lengani D, Simoni D, Ubaldi M, Zunino P, Bertini F (2017) Experimental study of free-stream turbulence induced transition in an adverse pressure gradient. *Exp Therm Fluid Sci* 84: 18-27.
- [45] Bisoi M, Das MK, Roy S, Patel DK (2017) Large eddy simulation of three-dimensional plane turbulent free jet flow. *Euro J Mech B*.
- [46] Sirovich L, Ball KS, Handler RA (1991) Propagating structures in wall-bounded turbulent flows. *Theor Comput Fluid Dyn* 2(5-6): 307-317.
- [47] Germano M, Piomelli U, Moin P, Cabot WH (1991) A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics Fluid A: Fluid Dynamic* (1989-1993) 3(7): 1760-1765.
- decomposition of thermally-induced flow structure in an enclosure with alternately active localized heat sources. *Int J Heat Mass Trans* 94: 373-379.
- [37] Maurice G, Thiesset F, Halter F, Mazellier N, Chauveau C, Gökalp I, Kourta A (2016) Scale analysis of the flame front in premixed combustion using Proper Orthogonal Decomposition. *Exp Therm Fluid Sci* 73: 109-114.
- [38] Kaffel A, Moureh J, Harion JL, Russeil S (2016) TR-PIV measurements and POD analysis of the plane wall jet subjected to lateral perturbation. *Exp Therm Fluid Sci* 77: 71-90.
- [39] Sarkar S, Ganguly S, Biswas G, Saha P (2016) Effect of cylinder rotation during mixed convective flow of nanofluids past a circular cylinder. *Comput Fluids* 127: 47-64.
- [40] Villegas A, Diez FJ (2016) Effect of vortex shedding in unsteady aerodynamic forces for a low Reynolds number stationary wing at low angle of attack. *J Fluid Struc* 64:138-148.
- [41] Saha P, Biswas G, Mandal AC, Sarkar S (2017) Investigation of coherent structures in a turbulent