

(مقاله پژوهشی)

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته در یک مجرای مربعی*امین رسام^(۱) زینب پورانساری^(۲) محمدرضا زنگنه^(۳)

چکیده در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته با استفاده از مدل زیرشبکه‌ای اسماگورینسکی (DS) در یک مجرای مربعی در عدد رینولدز اصطکاکی $Re_\tau=180$ انجام و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مشخص شدن دقت شبیه‌سازی با مدل DS، نتایج با داده‌های مرجع حاصل از شبیه‌سازی عددی به روش مستقیم مقایسه شده‌اند. همچنین، برای بررسی تأثیر مدل DS، یک شبیه‌سازی عددی بدون مدل زیرشبکه‌ای نیز انجام شده و نتایج آن با مدل DS مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش حجم محدود و با دقت مرتبه دوم، برای گسسته‌سازی معادلات ناویر-استوکس، انجام شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که نتایج مدل زیرشبکه‌ای DS، در شبکه مورد استفاده، مطابقت خوبی با داده‌های شبیه‌سازی مستقیم، برای کمیت‌های سرعت متوسط و تنش‌های رینولدز، داشته و بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج شبیه‌سازی با مدل زیرشبکه‌ای DS نسبت به شبیه‌سازی بدون مدل زیرشبکه مشاهده می‌گردد.

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ؛ مدل اسماگورینسکی دینامیکی؛ جریان آشفته؛ مجرای مربعی.

Large-Eddy Simulation of Turbulent Square Duct Flow

A. Rasam Z. Pouransari M. R. Zangeneh

Abstract In this research, large-eddy simulation of a turbulent square duct flow is performed at the friction Reynolds number $Re_\tau = 180$, using the dynamic Smagorinsky (DS) subgrid-scale model and the results are discussed. To assess the accuracy of the DS model, the results are compared with the reference direct numerical simulation data. Moreover, to see the effect of the DS model, a numerical simulation without a subgrid-scale model is also performed and the results are compared with those of the DS model. Simulations are carried out using a second-order finite volume method for discretization of the Navier–Stokes equations. Results from the DS model simulations, for the grid used, are in good agreement with the direct numerical simulation data for the mean velocity and Reynolds stresses and an appreciable improvement is observed with respect to the no subgrid-scale model simulations.

Key Words Large-Eddy Simulation, Dynamic Smagorinsky Model, Turbulent Flow, Square Duct

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۱۰/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱/۲۹ می‌باشد. DOI:10.22067/fum-mech.v3i1.84947

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهیدبهشتی. a_rasam@sbu.ac.ir

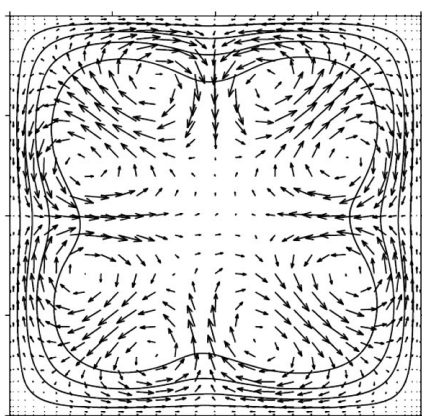
(۲) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی.

مقدمه

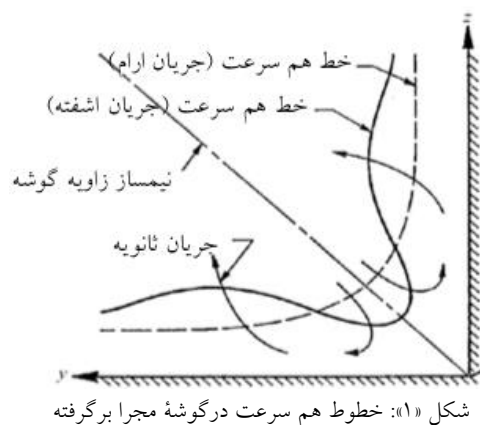
از جمله مهم‌ترین مطالعات در مورد اندرکنش جریان‌های ثانویه، سرعت متوسط و سرعت‌های نوسانی آشفتگی در مجراها می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط گسنر [2] و گسنر و جونز [3]، با استفاده از داده‌های تجربی اشاره نمود. بررسی‌های انجام شده در این تحقیقات بر روی معادله ورتیستی متوسط در راستای جریان اصلی، نشان می‌دهند که گردان‌های تنش برشی آشفتگی در راستای عمود بر نیمساز زاویه گوشه مجرا، باعث ایجاد جریان‌های ثانویه، در جهت عمود بر جهت جریان متوسط اصلی، به سمت گوشه‌ها می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۱) نیز نشان داده شده، این جریان‌های ثانویه باعث ایجاد انحنای متفاوتی در خطوط هم‌سرعت در جریان آشفته نسبت به جریان آرام می‌گردد.

بررسی‌های عددی متعددی در مورد جریان‌های آشفته در مجاری چهارگوش انجام شده است. این شبیه‌سازی‌ها را می‌توان با توجه به روش به‌کاررفته به سه دسته: شبیه‌سازی مستقیم [1, 4-7]، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان [8, 9] و شبیه‌سازی به روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز تقسیم نمود. نمونه‌هایی از مطالعات انجام شده با استفاده از روش شبیه‌سازی مستقیم و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان در ادامه به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل «۲»: بردارهای سرعت متوسط برگرفته از مرجع [2]

جریان آشفته در مجراهای چهارگوش دارای کاربردهای صنعتی متعددی است. از آن جمله می‌توان به کاربرد در صنایع گرمایشی، تهویه مطبوع، محفظه‌های احتراق و سیستم‌های انتقال آب اشاره نمود. به‌علاوه، علی‌رغم سادگی نسبی هندسی، وجود جریان‌های ثانویه باعث پیچیدگی فیزیکی این جریان‌ها می‌گردد. این جریان‌های ثانویه که در اثر آشفتگی به وجود می‌آیند، باعث انتقال مومنتوم از مرکز کانال به گوشه‌های مجرا و اختلاط جریان می‌گردند. این موضوع در شکل (۱) به‌روشنی دیده می‌شود. در این شکل خطوط هم‌سرعت برای جریان‌های آرام و آشفته در گوشه یک مجرا نشان داده شده‌اند. به دلیل پیچیدگی این جریان‌ها، شبیه‌سازی عددی آن‌ها، برای بررسی دقت مدل‌های آشفتگی مانند شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، حائز اهمیت است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، این جریان‌های ثانویه آشفته در مقاطع عمود بر جهت جریان متوسط شامل ۸ گردابه در گوشه‌ها می‌باشند. این گردابه‌ها دوجه‌دو بر خلاف جهت یکدیگر چرخیده و نسبت به قطرهای مقطع مربعی مجرا متقارن می‌باشند [2, 3].



از مرجع [1]

از میان مطالعات انجام شده به روش شبیه سازی مستقیم، می توان به بررسی های انجام شده توسط ژنگ و همکاران [7] در اعداد رینولدز اصطکاکی، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ اشاره نمود. در این تحقیق، تأثیر عدد رینولدز بر دینامیک جریان مورد بررسی قرار گرفته است. وینوئسا و همکاران [1] به بررسی تأثیر نسبت ابعاد مجرا بر روی گردابه های ثانویه در مجراهای مستطیلی در اعداد رینولدز اصطکاکی ۱۸۰ و ۳۳۰ پرداخته اند. هوسر و برینگن [4] جریان آشفته در یک کانال مربعی در عدد رینولدز اصطکاکی ۶۰۰ را مورد بررسی قرار دادند. از مهم ترین یافته های ایشان می توان به برقراری ارتباط بین ناهمسانگردی تنش رینولدز در گوشه ها با ساختارهای جریان آشفته اشاره کرد. پینلی و همکاران [5] نقش ساختارهای جریان در شکل گیری جریان های ثانویه را با استفاده از شبیه سازی عددی به روش مستقیم در یک مجرای مربعی مورد بررسی قرار دادند. از میان مطالعات انجام شده به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ نیز می توان به تحقیق انجام شده به وسیله زو و پولارد [9] با استفاده از مدل زیرشبکه اسماغورینسکی اشاره کرد. نتایج حاصل از این شبیه سازی ها در عدد رینولدز اصطکاکی ۲۰۰ در یک مجرای مربعی تطابق مناسبی با نتایج شبیه سازی های مستقیم نشان می دهد.

با توجه به اندازه ساختارهای آشفته موجود در جریان داخل مجرا، در نظر گرفتن یک دامنه محاسباتی بزرگ برای شبیه سازی های عددی ضروری است. به همین دلیل، شبیه سازی این نوع جریان ها به روش های مستقیم و گردابه های بزرگ از نظر محاسباتی پرهزینه است. به تبع آن، در مقایسه با دیگر جریان های آشفته، شبیه سازی های عددی کمتری در این مورد وجود داشته و نیازمند بررسی های بیش تری است.

در این تحقیق، از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ جریان برای شبیه سازی عددی جریان آشفته داخل یک مجرای مربعی با عدد رینولدز اصطکاکی

$$Re_{\tau} = \frac{hu_{\tau}}{u} = 180, \quad u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_{\text{دیوار}}}{\rho}} \quad (1)$$

در این روابط، h نصف ارتفاع مجرا، u ویسکوزیته سینماتیکی سیال، ρ چگالی سیال و $\tau_{\text{دیوار}}$ تنش برشی بر روی دیواره مجرا است. به منظور بررسی اثر مدل زیرشبکه، یک شبیه سازی عددی بدون مدل نیز انجام و نتایج حاصل از آن ها با یکدیگر و هم چنین داده های شبیه سازی مستقیم مرجع [1] مقایسه می شوند.

معادلات حاکم و مدل زیرشبکه

معادلات حاکم بر گردابه های بزرگ جریان، در حالت تراکم ناپذیر، با اعمال فیلتر بر معادلات ناویر- استوکس غیرقابل تراکم و معادله پیوستگی به صورت زیر به دست می آیند [10]:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

در این معادلات، از قاعده جمع بر روی اندیس های تکراری استفاده شده، $\tilde{\cdot}$ نشان دهنده یک کمیت فیلتر شده، \tilde{u}_i بردار سرعت، \tilde{p} فشار، F_i بردار نیروی حجمی و τ_{ij} تانسور تنش زیرشبکه است که به صورت زیر تعریف می شود [10]:

$$\tau_{ij} = \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (4)$$

جدول (۱): مشخصات شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، شامل فاصله نقاط شبکه و عدد رینولدز اصطکاکی. شبیه‌سازی مستقیم مربوط به مرجع [1] است.

شبیه‌سازی	مدل	Δx^+	Δy^+	Δz^+	Re_τ
DS-SGS	DS	۳۵	۹	۹	۱۴۲/۱
No-SGS	--	۲۸	۱۱	۱۱	۱۵۴/۸
DNS	--	۱۰	۵	۹	۱۴۸/۳

اندازه دامنه حل در جهت جریان، با توجه به ساختارهای جریان آشفته در این جهت تعیین می‌گردد. برای شبیه‌سازی مناسب گردابه‌های بزرگ، دامنه حل در این شبیه‌سازی‌ها 25h در نظر گرفته شده است. اندازه مجرای مربعی در دو جهت دیگر نیز 2h است. شایان یادآوری است که دامنه حل مشابه دامنه حل در مرجع [1] است. دامنه حل، به همراه کانتور سرعت آنی در یک مقطع x-z در مجرای مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است. شرط مرزی روی دیواره‌های مجرا، عدم لغزش و شرط مرزی در ورودی و خروجی، تناوبی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین جریان متوسط در راستای x کاملاً توسعه یافته خواهد بود. برای برقراری جریان، نیروی حجمی F_i در معادله (۲)، در هر گام زمانی از شبیه‌سازی به گونه‌ای محاسبه می‌شود که دبی حجمی ورودی مقدار ثابتی باشد. لذا، شبیه‌سازی‌های عددی با سرعت میانگین ورودی ثابت انجام شده و عدد رینولدز، بر مبنای سرعت میانگین ورودی (U_b) ، $Re_b = U_b h / \nu = 2500$ و مطابق با شبیه‌سازی مستقیم مرجع [1] است.

شبکه محاسباتی در جهت جریان یکنواخت بوده و توزیع نقاط شبکه در دو جهت دیگر، به صورت تابع تانژانت هذلولوی است [16]. فواصل نقاط شبکه در جدول (۱) در مقیاس‌های دیواره داده شده‌اند. این مقیاس‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

این تنش‌ها ناشی از مقیاس‌های زیر شبکه بوده و نیازمند مدسازی می‌باشند. از مدل اسمگورینسکی دینامیکی [11] با اصلاحات لی لی [12] برای مدل‌سازی τ_{ij} در معادلات حاکم بر گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. این مدل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau_{ij} - \frac{2}{3} K^{SGS} \delta_{ij} = -2\nu_T \tilde{S}_{ij}, \nu_T = C\bar{\Delta}|\tilde{S}| \quad (5)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

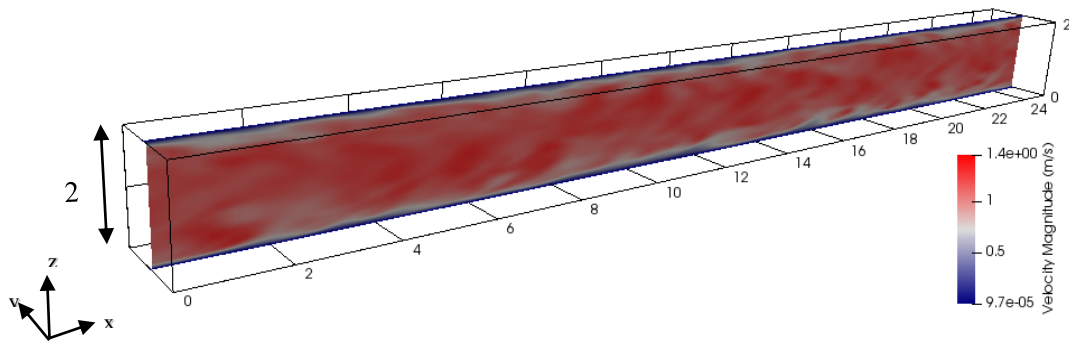
$$|\tilde{S}| = \sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}}.$$

در این روابط ν_T ویسکوزیته گردابه‌ای، δ_{ij} دلتای کرونکر، K^{SGS} انرژی جنبشی آشفتگی زیرشبکه، $\bar{\Delta} = 2\sqrt[3]{\Omega}$ (حجم یک سلول محاسباتی است)، \tilde{S}_{ij} تانسور نرخ کرنش و C ضریب اسمگورینسکی است، که به صورت دینامیکی محاسبه می‌شود.

روش حل عددی، دامنه حل و شبکه‌بندی

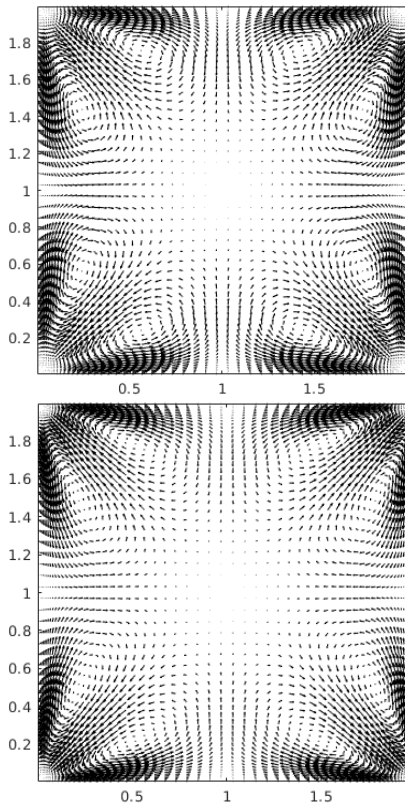
شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز code Saturne نسخه ۵ [13] به روش حجم محدود هم‌مکان انجام گرفته است. در این روش، شکل پایستار معادلات ناویر-استوکس با استفاده از روش مرکزی با دقت مرتبه دو گسسته‌سازی و از روش مرتبه دوم کرنک-نیکولسون نیز برای گسسته‌سازی زمانی استفاده شده است.

از الگوریتم SIMPLEC برای وابستگی معادلات سرعت-فشار و میانگینی Rhie-Chow به منظور جلوگیری از نوسانات استفاده شده است. صحت عملکرد نرم‌افزار به کاررفته در این تحقیق، برای انجام شبیه‌سازی به روش گردابه‌های بزرگ، توسط رسام و همکاران [14,15] مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده و همچنین شبیه‌سازی مستقیم مرجع [1] در جدول (۱) آمده است.



شکل «۳»: شماتیکی از دامنه حل به همراه کانتورهای اندازه سرعت لحظه‌ای در مقطع میانی مجرا برای شبیه‌سازی DS-SGS

بودن مدت زمان متوسط‌گیری‌ها را برای سرعت متوسط نشان می‌دهد.



شکل «۴»: بردارهای سرعت متوسط در یک مقطع y-z برای شبیه‌سازی DS-SGS (بالا) و شبیه‌سازی No-SGS (پائین).

سرعت متوسط

پروفیل‌های سرعت متوسط در راستای x به صورت زیر محاسبه و در مقیاس دیواره در مرکز مجرا در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.

$$\begin{aligned} \Delta x^+ &= \frac{u_\tau^* \Delta x}{\nu}, & \Delta y^+ &= \frac{u_\tau^* \Delta y}{\nu}, \\ \Delta z^+ &= \frac{u_\tau^* \Delta z}{\nu}, & u_\tau^* &= \left\langle \sqrt{\frac{\tau_{\text{دیواره}}}{\rho}} \right\rangle \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta x^+ &= \frac{u_\tau^* \Delta x}{\nu}, & \Delta y^+ &= \frac{u_\tau^* \Delta y}{\nu}, \\ \Delta z^+ &= \frac{u_\tau^* \Delta z}{\nu}, & u_\tau^* &= \left\langle \sqrt{\frac{\tau_{\text{دیواره}}}{\rho}} \right\rangle \end{aligned} \quad (7)$$

در این روابط، u_τ^* سرعت اصطکاکی متوسط‌گیری شده روی تمام دیواره‌ها است. مقادیر Δx^+ ، Δy^+ و Δz^+ متناسب با مقادیر توصیه‌شده در مرجع [17] در نظر گرفته شده است.

بردارهای سرعت

بردارهای سرعت متوسط برای یک مقطع عمود بر جهت جریان (y-z) در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. شکل‌ها ساختارهای جریان در این مقطع را نشان می‌دهند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، ۸ گردابه در گوشه‌های مجرای مربعی دیده می‌شود که کاملاً متقارن می‌باشند.

گردابه‌های بردارهای سرعت در دو شبیه‌سازی مشابه بوده و تنها اختلافات جزئی بین نتایج دو شبیه‌سازی مشاهده می‌گردد.

تقارن موجود در شکل‌ها و شباهت با نتایج شبیه‌سازی مستقیم مرجع، صحت شبیه‌سازی‌ها و کافی

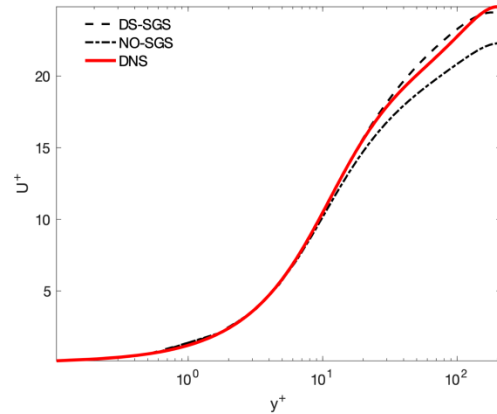
شبیه‌سازی‌های No-SGS ناشی از نبود مدل زیرشبکه است چراکه وظیفه مدل زیرشبکه، مدل‌سازی مناسب اثر گردابه‌های کوچک بر جریان است که بر اساس نظریه آشپار انرژی، انرژی جنبشی آشفتگی را مستهلک می‌کنند.

تنش‌های رینولدز

شکل (۶) تنش‌های متوسط رینولدز را در مختصات دیواره نشان می‌دهد. این تنش‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \langle u'u' \rangle^+ &= \frac{\langle u'u' \rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle u^2 \rangle^+ - \langle u \rangle^{2+} \\ \langle v'v' \rangle^+ &= \frac{\langle v'v' \rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle v^2 \rangle^+ - \langle v \rangle^{2+} \\ \langle w'w' \rangle^+ &= \frac{\langle w'w' \rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle w^2 \rangle^+ - \langle w \rangle^{2+} \\ \langle u'v' \rangle^+ &= \frac{\langle u'v' \rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle uv \rangle^+ - \langle u \rangle^+ \langle v \rangle^+ \end{aligned} \quad (9)$$

در این روابط، (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت می‌باشند. مؤلفه نرمال تنش رینولدز در جهت جریان در مختصات دیواره، $\langle u'u' \rangle^+$ به درستی در شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل زیرشبکه DS پیش‌بینی شده است. درحالی‌که در شبیه‌سازی بدون مدل زیرشبکه، نتیجه بسیار کم‌تر از مقدار پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی مرجع است. این اختلاف نیز به دلیل عدم وجود استهلاك مربوط به مدل زیرشبکه بوده که باعث شده تا در مختصات دیواره این اختلاف به وجود بیاید. شایان‌ذکر است که این رویه برخلاف آن چیزی است که در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان در کانال‌ها دیده می‌شود [17]. همچنین، محل بیشینه $\langle u'u' \rangle^+$ در شبیه‌سازی DS-SGS مشابه نتیجه شبیه‌سازی مرجع و در $y^+ = yu_\tau^*/\nu \approx 19$ است، درحالی‌که در شبیه‌سازی No-SGS محل بیشینه تنش در y^+ کوچک‌تری قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده کوچک‌تر بودن مقیاس‌های جریان در نزدیکی دیواره،



شکل «۵»: پروفیل‌های سرعت متوسط U^+ بر حسب y^+ در مقیاس دیواره در مرکز مجرا. داده‌های DNS برگرفته از مرجع [2] است.

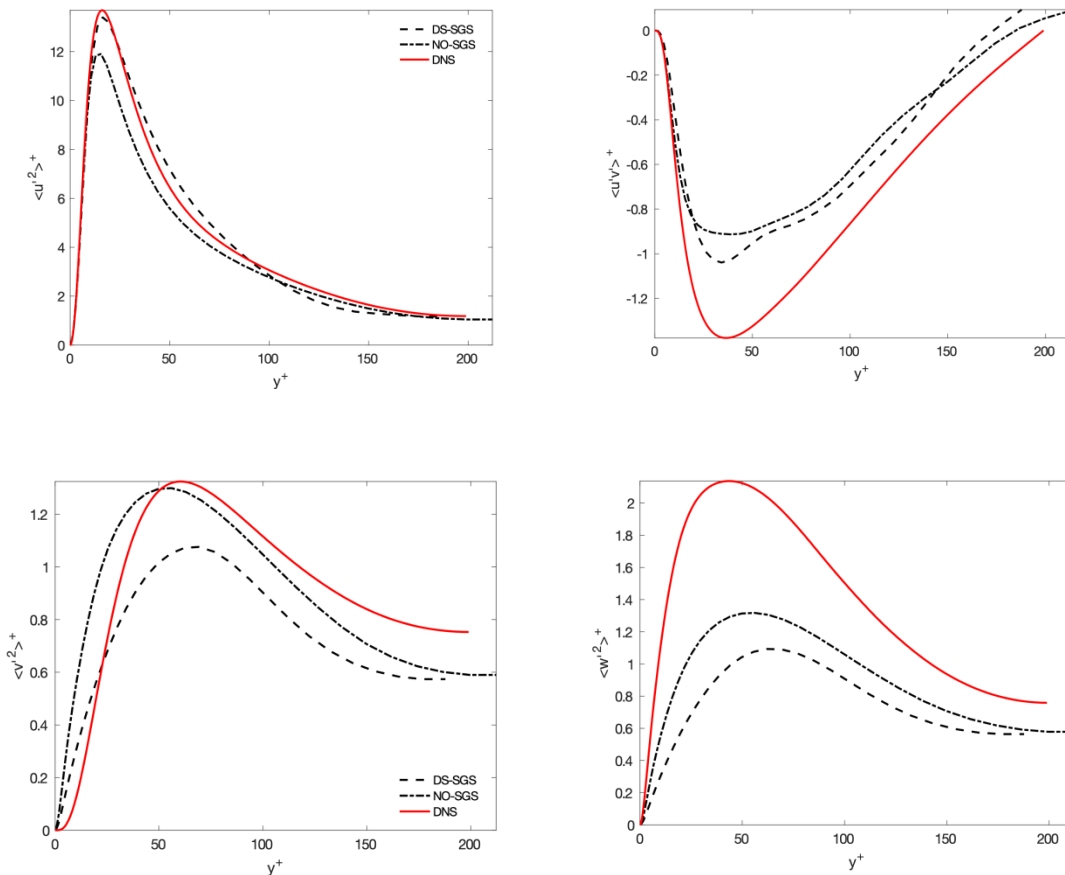
$$U^+ = \frac{\langle u \rangle}{u_\tau^+}, \quad \langle u \rangle = \frac{1}{T} \langle \int_0^T u(x, y, z, t) dt \rangle_x \quad (8)$$

در روابط بالا، T بیان‌گر مدت زمان متوسط‌گیری است. همان‌طور که در رابطه (۸) نشان داده شده، تمام کمیت‌های متوسط‌گیری شده، هم در زمان و هم در راستای x که جریان آشفته در آن راستا همگن آماری است، متوسط‌گیری شده‌اند [18]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت متوسط برای شبیه‌سازی DS-SGS که از مدل DS استفاده می‌کند، با نتایج شبیه‌سازی مرجع در تمام نقاط مطابقت بسیار خوبی دارد؛ اما در شبیه‌سازی No-SGS پروفیل سرعت در لایه میانی و ناحیه قانون لگاریتمی کم‌تر از مقدار شبیه‌سازی مرجع است. این اختلاف، ناشی از پیش‌بینی بیش‌تر از مقدار واقعی تنش برشی دیواره، τ دیواره است. این موضوع در پیش‌بینی‌های مربوط به مقادیر Re_τ در جدول (۱) نیز مشهود است. بزرگ بودن تنش برشی دیواره نیز نشان می‌دهد که آشفتگی جریان در شبیه‌سازی‌های عددی No-SGS بیشتر از مقدار شبیه‌سازی مرجع است. از آنجایی‌که نقش مدل زیر شبکه حذف بخشی از انرژی جنبشی آشفتگی (مربوط به مقیاس‌های زیرشبکه) است [18]، بیش‌تر بودن آشفتگی در

شایان یادآوری است که علت این نادرستی مدل‌سازی ویسکوزیته گردابه‌ای به صورت یک کمیت اسکالر و به صورت همسانگرد (مقدار یکسان برای تمام مؤلفه‌های تنش زیرشبکه) است.

تنش برشی رینولدز در شبیه‌سازی No-SGS، مطابقت نسبتاً بهتری با نتایج شبیه‌سازی مرجع دارد. نبود استهلاك انرژی زیرشبکه در این شبیه‌سازی باعث بیشتر شدن آشفتگی جریان و افزایش این مؤلفه تنش نسبت به شبیه‌سازی DS-SGS است.

به‌خاطر آشفتگی بیش‌تر جریان است. سایر تنش‌های نرمال ($\langle v'v' \rangle^+$ و $\langle w'w' \rangle^+$) در شبیه‌سازی عددی No-SGS مطابقت بهتری نسبت به DS-SGS با نتایج مرجع دارند؛ اما در ناحیه نزدیک دیواره، هیچ‌کدام از شبیه‌سازی‌ها پیش‌بینی درستی از رفتار این تنش‌ها ندارند. این اختلاف در دقت پیش‌بینی مؤلفه‌های کوچک‌تر تنش‌های نرمال رینولدز به‌وسیله مدل زیرشبکه، درحالی‌که مؤلفه $\langle u'u' \rangle^+$ با دقت مناسبی پیش‌بینی شده است، نشان‌دهنده مدل‌سازی نادرست ویسکوزیته گردابه‌ای در معادله (۵) است.



شکل «۶»: پروفیل‌های تنش متوسط رینولدز $\langle u'u' \rangle^+$ ، $\langle v'v' \rangle^+$ ، $\langle w'w' \rangle^+$ و $\langle uv' \rangle^+$ برحسب y^+ داده‌های DNS

برگرفته از مرجع [2] است.

نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه سازی گردابه های بزرگ جریان آشفته در داخل مجرای مربعی با استفاده از روش حجم محدود انجام شد. شبیه سازی ها، یک مرتبه با استفاده از مدل زیرشبکه اسماغورینسکی دینامیکی و یک مرتبه بدون استفاده از مدل زیرشبکه انجام شد تا اثر مدل زیرشبکه در شبیه سازی ها مشخص گردد. در ضمن، با مقایسه نتایج حاصل از این دو شبیه سازی با نتایج حاصل از یک شبیه سازی عددی مستقیم، دقت نتایج شبیه سازی ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

از بررسی نتایج مشخص شد که در شبیه سازی بدون مدل، آشفتگی جریان و در نتیجه تنش برشی دیواره بیشتر است. این موضوع باعث شد تا کمیت های سرعت متوسط و تنش $\langle u'u' \rangle^+$ در مختصات دیواره نسبت به نتایج شبیه سازی مرجع کوچک تر باشند.

برخلاف نتایج شبیه سازی بدون مدل، شبیه سازی عددی با مدل اسماغورینسکی دینامیکی، مطابقت خوبی با نتایج شبیه سازی مرجع برای کمیت های سرعت متوسط و تنش $\langle u'u' \rangle^+$ داشت. نتایج در مورد سایر تنش های نرمال درست برعکس بود و شبیه سازی بدون مدل عملکرد بهتری داشت.

تنش های نرمال $\langle v'v' \rangle^+$ و $\langle w'w' \rangle^+$ به دست آمده از هر دو شبیه سازی در ناحیه نزدیک دیواره رفتار مجانبی نادرستی داشتند. بهبود در پیش بینی تنش برشی $\langle u'v' \rangle$ نیز که نقش بسیار مهمی در تولید انرژی جنبشی آشفتگی در جریان دارد، در شبیه سازی با مدل اسماغورینسکی دینامیکی نسبت

به شبیه سازی بدون مدل مقدار قابل ملاحظه ای نبود. با توجه به پیچیدگی جریان داخل مجاری چهارگوش، به نظر می رسد که تحقیقات بیش تری برای مدل سازی مناسب این نوع از جریان ها مورد نیاز باشد.

تقدیر و سپاس گزاری

از پشتیبانی و در اختیار گذاشتن منابع مرکز محاسباتی پیشرفته دانشگاه شهید بهشتی ایران در این پروژه صمیمانه قدردانی می شود.

واژه نامه

Collocated finite volume method	روش حجم محدود هم مکان
Statistically homogeneous	همگن آماری
Buffer layer	لایه میانی
Log-law region	ناحیه قانون لگاریتمی
Large-Eddy Simulation (LES)	شبیه سازی گردابه های بزرگ
Direct Numerical Simulation (DNS)	شبیه سازی مستقیم
Subgrid-scale	زیرشبکه
Friction Reynolds number	رینولدز اصطکاکی
Anisotropy	ناهمسانگردی
Open source	متن باز
Wall units	مقیاس دیواره

مراجع

1. Vinuesa, R., Noorani, A., Lozano-Durán, A., Khoury, G.K.E., Schlatter, P., Fischer, P.F. and Nagib, H.M., "Aspect ratio effects in turbulent duct flows studied through direct numerical simulation", *Journal of Turbulence*, 15(10), pp. 677-706, (2014).
2. Gessner, F., "The origin of secondary flow in turbulent flow along a corner", *Journal of Fluid Mechanics*, 58(1), pp. 1-25, (1973).
3. Gessner, F. and Jones, J., "On some aspects of fully-developed turbulent flow in rectangular channels", *Journal of Fluid Mechanics*, 23(4), pp. 689-713, (1965).
4. Huser, A. and Biringen, S., "Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct", *Journal of Fluid Mechanics*, 257, pp. 65-95, (1993).
5. Pinelli, A., Uhlmann, M., Sekimoto, A. and Kawahara, G., "Reynolds number dependence of mean flow structure in square duct turbulence", *Journal of Fluid Mechanics*, 644, pp. 107-122, (2010).
6. Pirozzoli, S., Modesti, D., Orlandi, P. and Grasso, F., "Turbulence and secondary motions in square duct flow", *Journal of Fluid Mechanics*, 840, pp. 631-655, (2018).
7. Zhang, H., Trias, F.X., Gorobets, A., Tan, Y. and Oliva, A., "Direct numerical simulation of a fully developed turbulent square duct flow up to $Re_{\tau} = 1200$ ", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 54, pp. 258-267, (2015).
8. Hebrard, J., Métais, O. and Salinas-Vasquez, M., "Large-eddy simulation of turbulent duct flow: heating and curvature effects", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25(4), pp. 569-580, (2004).
9. Xu, H. and Pollard, A., "Large eddy simulation of turbulent flow in a square annular duct", *Physics of Fluids*, 13(11): pp. 3321-3337, (2001).
10. Sagaut, P., "Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction", Springer Science & Business Media, (2006).
11. Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3(7), pp. 1760-1765, (1991).
12. Lilly, D.K., "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(3), pp. 633-635, (1992).
13. Archambeau, F., Méchitoua, N. and Sakiz, M., "Code Saturne: A finite volume code for the computation of turbulent incompressible flows-Industrial applications", *Journal of Finite Volumes*, 1(1): pp. 1-62, (2004).
14. Rasam, A., Wallin, S., Brethouwer, G. and Johansson, A.V., "Large eddy simulation of channel flow with and without periodic constrictions using the explicit algebraic subgrid-scale model", *Journal of Turbulence*, 15(11), pp. 752-775, (2014).
15. Rasam, A., Wallin, S., Brethouwer, G. and Johansson, A.V., "Improving separated-flow predictions using an anisotropy-capturing subgrid-scale model", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 65, pp. 246-251, (2017).
16. Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T., "Computational fluid Dynamics", Vol. I, Engineering Education System, (2000).

17. Rasam, A., Brethouwer, G., Schlatter, P., Li, Q. and Johansson, A.V., "Effects of modelling, resolution and anisotropy of subgrid-scales on large eddy simulations of channel flow", *Journal of Turbulence*, (12): pp. N10, (2011).
18. Pope, S.B., "*Turbulent flows*", IOP Publishing, (2001).