



بررسی عددی تاثیر مدل‌های مختلف مرز ورودی بر مشخصه‌های جریان لایه مرزی آشفته با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

محمدفرمانی^۱، علی اکبر دهقان^{۲*} و عباس افشاری^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

^۳ دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

چکیده

در این مطالعه اثر سه مدل مختلف مرز ورودی بر مشخصه‌های جریان لایه مرزی آشفته روی صفحه تخت بررسی شده است. مدل‌های مرزی مورد بررسی شامل، پروفیل سرعت ورودی یکنواخت با آشفته‌سازی توسط تریپ، مدل مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه (تی وی ام اف) و مدل بازمقیاس-بازنگاشتی لاند، در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ قابل استفاده است. شبیه‌سازی جریان با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و ضریب اسمانگورینسکی دینامیکی در نرم‌افزار اوپن‌فوم انجام شده است؛ همچنین اعتبارسنجی روش عددی با کمک نتایج حل عددی مستقیم و تحلیلی انجام شده است. مقایسه ضریب اصطکاک پوسته‌ای با روابط تحلیلی نشان می‌دهد که حداکثر انحراف در شبیه‌سازی با مدل‌های مرزی مبتنی بر حل اولیه، لاند و آشفته‌سازی توسط تریپ به ترتیب ۴/۳٪، ۴/۵٪ و ۱۹/۲٪ است؛ در حالی که مقدار و روند توسعه ضخامت‌های انتگرالی، مولفه‌های سرعت و سایر مشخصه‌های جریان در شبیه‌سازی با شروط مرزی مبتنی بر حل اولیه و لاند انطباق مناسبی با نتایج شبیه‌سازی مستقیم عددی دارند، نتایج استفاده از تریپ انحراف بیشتری از نتایج شبیه‌سازی مستقیم عددی دارند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه و لاند در شبیه‌سازی با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مناسب‌تر بوده و در کاهش هزینه محاسبات کاملاً موثر است.

کلمات کلیدی: لایه مرزی آشفته؛ مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه؛ مدل مرزی لاند؛ تریپ؛ نرم‌افزار اوپن‌فوم.

Numerical Investigation of the Effect of Different Inflow Conditions on Turbulent Boundary Layer Flow Characteristics using Large-Eddy Simulation

M. Farmani¹, A.A. Dehghan^{2,*}, A. Afshari³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran.

³ Ph.D. Graduate, Aero. Eng., Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, the impacts of three different inflow conditions on turbulent boundary layer characteristics over a flat plate was numerically investigated. The investigated boundary conditions are uniform velocity profile at inlet with turbulent generation using strip, precursor-based simulation model (TVMF) and rescaling/recycling model purposed by Lund, which are applicable in large-eddy simulation (LES). The simulations are done using LES with dynamic smagorinsky coefficient in OpenFOAM software. Validation of the numerical method was done using direct numerical data and analytical solution. Comparison of the skin friction coefficient with analytical equation shows that the maximum deviation in simulations with precursor-based, Lund and strip model are 4.3%, 4.5%, 19.2% accordingly. The numerical values and development trend of intergral thicknesses, velocity components and the other characteristics obtained through simulations using precursor-based and Lund inlet models, are in good agreement with direct numerical simulation (DNS) results while the results obtained by using the strip model are more diverse from the DNS results. The results of this study indicate that using precursor-based and Lund inflow generation models in LES produces more realistic results accompanied with reduced computational cost.

Keywords: Turbulent Boundary Layer; Precursor-Based Model; Lund Inflow Model; Strip; OpenFOAM Software.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۵۳۱۲۳۲۴۹۳؛ فکس: ۰۳۵۳۸۲۱۲۷۸۱

آدرس پست الکترونیک: adehghan@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۱ در تحلیل مسائل پیچیده صنعتی، موضوعی جالب توجه برای محققان است. رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ از جمله روش‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان سیال در مسائل صنعتی است که با استفاده از فیلتر زمانی و مکانی، طیف وسیعی از ساختارهای جریان آشسته با مقیاس‌های بزرگ تا کوچک را مستقیماً حل کرده و نتیجه‌ای با دقت مناسب را ارائه می‌دهد. علیرغم گسترش امکانات محاسباتی، انتخاب شرط مرزی مناسب به ویژه در ورودی میدان حل، چالشی مهم در شبیه‌سازی عددی جریان‌های آشسته به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ است.

ساده‌ترین روش اعمال شرط مرز ورودی در شبیه‌سازی عددی جریان‌های آشسته، استفاده از پروفیل سرعت یکنواخت در مرز ورودی میدان حل و ایجاد شرایط گذار طبیعی جریان از حالت آرام به گذار و در نهایت آشسته است. چنین روشی معمولاً در مطالعات مربوط به بررسی فرآیند گذار جریان استفاده شده و مزیت آن، عدم نیاز به اعمال نوسانات جریان آشسته در مرز ورودی است. این روش در شبیه‌سازی جریان کاملاً آشسته قابل استفاده نیست، چرا که شبیه‌سازی فرآیند گذار به تنهایی هزینه زیادی دارد و ادغام آن با پیچیدگی‌های شبیه‌سازی جریان تا ایجاد جریان لایه مرزی کاملاً آشسته، هزینه محاسباتی را به شدت بالا می‌برد؛ لذا برای حذف ناحیه گذار و کاهش طول میدان حل از روش‌های مختلفی از جمله، آشسته‌سازی جریان با تریپ استفاده می‌شود.

در مطالعات عددی و تجربی متعددی از تریپ برای آشسته‌سازی جریان استفاده شده است [۱-۵]. ماروسیک و همکاران^۳ [۶] با مطالعه تجربی مشخص کرده‌اند که اثر کاربرد تریپ بر مشخصه‌های آیرودینامیکی جریان لایه مرزی آشسته شده، تا طولی از صفحه وجود دارد که عدد رینولدز جریان به $1/7 \times 10^7$ می‌رسد. شلاتر، اورلو و همکاران^۴ [۷، ۸] با مطالعه تجربی و عددی، نشان داده‌اند که اگر تحریک جریان با استفاده از تریپ در محدوده $Re_\theta < 300$ رخ دهد، مشخصه-

های جریان لایه مرزی آشسته در محدوده $Re_\theta > 2000$ قابل قبول است.

شرط مرزی مبتنی بر حل اولیه^۵ بعنوان مدل مرزی رایج در شبیه‌سازی جریان با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ است. اکسلول و ماین^۶ [۹]، در شبیه‌سازی جریان روی پله به عقب، با انتخاب شرط مرزی ورودی با نوسانات تصادفی و انجام شبیه‌سازی اولیه، یک سری زمانی از مقادیر میدان سرعت در مرز ورودی استخراج کردند. این سری زمانی در شبیه‌سازی اصلی، بعنوان شرط مرزی برای ورودی استفاده شده و نتایج مناسبی از این شبیه‌سازی بدست آمده است. روش بکاررفته در مطالعه آنها مدل ایجاد شرط مرزی ورودی مبتنی بر حل اولیه است.

دسته دیگری از روش‌ها برای آشسته‌سازی جریان و ایجاد شرط مرزی ورودی وجود دارد که در آن بر پایه روش اسپالارت^۷ [۱۰]، میدان سرعت روی یک صفحه مشخص در پایین دست مرز ورودی در هر گام زمانی از شبیه‌سازی، نمونه‌گیری و بازمقیاس شده و سپس به مرز ورودی نگاشت می‌شود. در فرآیند بازمقیاس میدان سرعت نمونه‌گیری شده، تقریب‌ها و اصلاحات مختلفی قابل اعمال است که یکی از معتبرترین آنها توسط لاند و همکاران^۸ [۱۱]، ارائه شده است. مطالعات مختلفی در رابطه با تعیین موقعیت صفحه نمونه‌گیری سرعت انجام شده است. لاند و ماین^۹ [۱۲] در شبیه‌سازی جریان لایه مرزی روی یک دیواره مقعر، موقعیت صفحه بازنگاشت سرعت را به اندازه 10δ پایین دست مرز ورودی مناسب دانسته‌اند. با توجه به مطالعه سیمنس و همکاران^{۱۰} [۱۳]، موقعیت صفحه بازنگاشت میدان سرعت، حداقل باید به اندازه 300δ ، در پایین دست مرز ورودی قرار گیرد. پیوملی و یوان^{۱۱} [۱۴]، موقعیت مناسب صفحه نمونه‌گیری میدان سرعت را به اندازه 48δ پایین دست مرز ورودی، معرفی کرده‌اند. ژائو و همکاران^{۱۲} [۱۵]، بر مبنای مدل لاند، مدلی را برای ایجاد شرط مرزی ورودی آشسته در

⁵ Precursor-Based Boundary Condition

⁶ Akselvoll and Moin

⁷ Spalart

⁸ Lund et al.

⁹ Lund and Moin

¹⁰ Simens et al.

¹¹ Piomelli and Yuan

¹² Xiao et al.

¹ CFD

² Large Eddy Simulation (LES)

³ Marusic et al.

⁴ Schlatter, Örlü and et al.

اوپنقوم برای نخستین بار در کشور در این مقاله ارائه شده است.

اگرچه کتابخانه نرم‌افزار اوپنقوم دارای طیف گسترده‌ای از مدل‌های مرزی است، لیکن مدل شرط مرزی لاند در این کتابخانه وجود ندارد، لذا برای نخستین بار در کشور، این مدل مرزی بر اساس معادلات لاند [۱۱]، در قالب یک برنامه کامپیوتری با زبان شی‌گرای سی پلاس پلاس، توسعه داده و در اوپنقوم اعمال شده است؛ همچنین به منظور ذخیره‌سازی میدان سرعت در تمام گام‌های زمانی برای استفاده در شبیه‌سازی با مدل مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه، حلگر پیمپل‌فوم^۲ اصلاح شده است. بررسی کیفی عملکرد این مدل-ها در توسعه جریان لایه مرزی آشفته با مقایسه کانتور معیار کیو^۳، انجام شده است؛ همچنین کارایی و اثر مدل‌های مختلف مرز ورودی بر جریان لایه مرزی آشفته، با مقایسه کمی مقدار و روند تغییر ضخامت‌های انتگرالی لایه مرزی و پروفیل سرعت متوسط و نوسانی، مولفه تنش برشی رینولدز^۴، ضریب شکل^۵ و ضریب اصطکاک پوسته‌ای^۶ مطالعه شده است.

۲- معادلات حاکم و مدل‌های عددی مورد استفاده

معادلات حاکم بر رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل زیر شبکه‌ای اسماگورینسکی دینامیکی^۷، برای جریان تراکم‌ناپذیر و معادلات مربوط به مدل شرط مرزی لاند [۱۱]، در این بخش ارائه شده است.

۲-۱- معادلات حاکم بر رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های

بزرگ

معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر به صورت روابط (۲-۱) قابل بیان است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

² PimpleFOAM

³ Q-Criterion

⁴ Reynolds Stress Components

⁵ Shape Factor

⁶ Skin friction Coefficient

⁷ Dynamic Smagorinsky Sub-Grid Model

جریان‌های با گردایان فشار ارائه کرده‌اند. اطلاعات مرز ورودی در این مدل، وابسته به پروفیل سرعت متوسط و مولفه‌های عمودی تنش رینولدز است.

با توجه به اینکه نتایج نهایی شبیه‌سازی عددی جریان آشفته متأثر از روش‌های آشفته‌سازی جریان و شرایط مرز ورودی انتخاب شده است، مطالعه اثر بکارگیری شرایط مرز و روش‌های مختلف آشفته‌سازی جریان، به‌ویژه در مرز ورودی میدان حل، ضمن دستیابی به نتایج مناسب و معتبر، امکان معرفی راهکارهایی مناسب جهت کاهش هزینه محاسباتی را فراهم می‌کند. با توجه به محدودیت‌های موجود در کشور به لحاظ دسترسی به امکانات محاسباتی سطح بالا نظیر، کلاسترها و مراکز پردازش سریع، در این مطالعه بعنوان پژوهشی بنیادی و کاربردی، اثر کاربرد سه مدل مختلف مرز ورودی، شامل مدل مرزی سرعت ورودی یکنواخت و آشفته-سازي جریان توسط تریپ، مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه با شرط مرزی نگاشت مقادیر ثابت در زمان متغیر (تی وی ام اف)^۱ و مدل مرزی لاند، بر مشخصه‌های جریان لایه مرزی روی صفحه تخت، بررسی شده است. مدل‌های مرزی مورد مطالعه با توجه به قابلیت استفاده در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انتخاب شده است. دو مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه و لاند مختص مطالعات عددی است، ولیکن آشفته-سازي توسط تریپ مدلی مرسوم در مطالعات تجربی بوده، لذا مطالعه عددی اثر کاربرد این روش بر مشخصه‌های جریان لایه مرزی، نتایج مهمی را می‌تواند به‌همراه داشته باشد. این مطالعه با هدف معرفی مدل مناسب‌تر جهت کاهش هزینه شبیه‌سازی عددی با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی گردابه-های بزرگ در نرم‌افزار مرجع‌باز اوپنقوم انجام شده است.

بررسی محدودیت استفاده از روش‌های تجربی متداول آشفته‌سازی جریان در مطالعات عددی و ارزیابی مدل مرزی لاند با هدف رفع محدودیت روش‌های تجربی در مطالعات عددی و کاهش هزینه‌های محاسباتی و رفع محدودیت بکارگیری مدل لاند در هندسه‌های پیچیده با اصلاح الگوریتم پیمپل‌فوم برای ذخیره‌سازی و ایجاد بانک داده‌های میدان سرعت برای شرط مرزی مبتنی بر حل اولیه در نرم‌افزار

¹ TimeVarying Mapped Fixed Value (TVMF)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (۸)$$

عامل اصلی پیچیدگی در حل دستگاه معادلات (۷) و (۸)، ظهور ترم τ_{ij}^r معروف به تانسور تنش‌های باقیمانده یا زیر شبکه‌ای است که شامل عبارات مجهول یا به عبارتی، اثر مقیاس‌های حل نشده زیر شبکه است.

$$\tau_{ij}^r = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (۹)$$

عبارت τ_{ij}^r مشابه تنش‌های رینولدز در رهیافت شبیه‌سازی معادلات ناویر - استوکس به روش رینولدز بوده و عادی‌ترین روش برای تعیین این عبارت، مدل کردن آن با استفاده از یک لزجت زیر شبکه‌ای (ν_{sgs}) است که نقشی مشابه لزجت آشفتگی در رهیافت شبیه‌سازی معادلات ناویر - استوکس به روش متوسط‌گیری زمانی رینولدز دارد.

۲-۲- مدل مقیاس زیر شبکه‌ای اسماکورینسکی

دینامیکی

مدل‌های مختلفی برای تعیین سهم مقیاس‌های زیر شبکه‌ای وجود دارد که غالباً بر پایه مدل‌های لزجت گردابه‌ای تعریف شده‌اند. در این مدل‌ها هدف اصلی، یافتن روشی مناسب برای مدل کردن لزجت زیر شبکه‌ای، بعنوان ضریب تناسب تانسور تنش‌های باقیمانده با تانسور نرخ کرنش است.

$$\tau_{ij}^r = \tau_{ij} - (\delta_{ij}/3)\tau_{kk} = -2\nu_{sgs}\bar{S}_{ij} \quad (۱۰)$$

لزجت زیر شبکه‌ای ν_{sgs} با توجه به مدل اسماکورینسکی دینامیکی استخراج می‌شود.

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (۱۱)$$

در مدل اسماکورینسکی دینامیکی، ضریب ثابت (C_s)، به صورت محلی و با استفاده از دو فیلتر شبکه با عرض Δ و فیلتر آزمون با عرض 2Δ ، بدست می‌آید [۱۶]. برای تعیین ضریب ثابت (C_s)، تانسور (L_{ij}) با توجه به دو فیلتر شبکه با نماد (\dots)، و فیلتر آزمون با نماد (\dots)، در قالب تساوی جرمانو^۷، تعریف شده است.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + p \delta_{ij} + 2\mu S_{ij}) = 0 \quad (۲)$$

معادله (۱) معادله بقای جرم و معادله (۲)، معادله مومنتوم است که در این معادلات، (u_i) نشان دهنده بردار سرعت، (p) بیانگر میدان فشار و (S_{ij}) تانسور نرخ کرنش^۱ است که:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (۳)$$

طبق معادله (۴)، ایده اصلی در حل معادلات جریان با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، کاهش هزینه‌های محاسباتی با استفاده از فیلتر پایین‌گذر^۲ $G = G(x, \Delta)$ است که Δ طول قطع‌کننده^۳ فیلتر بوده و مقیاس‌های کوچکتر از این طول در محاسبه متغییری مثل ϕ در نظر گرفته نمی‌شود.

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(r, t') G(x - r, t - t') dt' dr \quad (۴)$$

به عبارت دیگر، ایده اصلی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، تفکیک متغیرهای جریان به مقیاس‌های بزرگ و کوچک با توجه به مقیاس زیر شبکه^۴ Δ است، به نحوی که:

$$\bar{\phi} = \phi - \phi' \quad (۵)$$

$\bar{\phi}$ و ϕ' در معادله (۵) به ترتیب نشان دهنده مقیاس‌های کوچک و مقیاس‌های فیلتر شده یا بزرگ هستند. اندازه مقیاس زیر شبکه Δ با توجه به ابعاد سلول‌های شبکه محاسباتی تعیین می‌شود.

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (۶)$$

با همگشت^۵ فیلتر پایین‌گذر G در معادلات (۱) و (۲)، معادلات فیلتر شده جریان تراکم ناپذیر بدست می‌آیند که در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مورد استفاده است:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۷)$$

^۱ Rate Of Strain Tensor

^۲ Low-Pass Filtering

^۳ Cut Off Length

^۴ Sub-Grid Scale

^۵ Convolve

^۶ Eddy-Viscosity

^۷ Germano

$$u'_i(x, y, z, t) = u_i(x, y, z, t) - U_i(x, y) \quad (16)$$

که U_i مولفه متوسط سرعت با توجه به قانون دیواره برای ناحیه داخلی و قانون انحراف برای ناحیه خارجی لایه مرزی باز مقیاس می‌شود. با فرض اینکه U_{recy} و U_{inlt} به ترتیب، معرف سرعت در صفحه بازنگاشت و سرعت در صفحه ورودی میدان حل باشد:

$$U_{inlt}^{Inner} = \gamma U_{recy} (y_{inlt}^+) \quad (17)$$

$$U_{inlt}^{outer} = \gamma U_{recy} (\eta_{inlt}) + (1 - \gamma) U_{\infty} \quad (18)$$

$$\gamma = \left(\frac{u_{\tau, inlt}}{u_{\tau, recy}} \right) \quad (19)$$

y_{inlt}^+ و η_{inlt} به ترتیب مختصه‌های داخلی و خارجی نقاط شبکه در مرز ورودی میدان حل بوده که با درون‌یابی بدست می‌آید. باز مقیاس مولفه عمودی بردار سرعت متوسط روندی مشابه دارد و مولفه سرعت متوسط در راستای عرض صفحه که همان راستای z است، صفر مقدار دهی شده و نیاز به باز مقیاس ندارد.

مولفه‌های نوسانی سرعت نیز به همین روش باز مقیاس شده و پروفیل مولفه‌های نوسانی سرعت در مقطع ورودی بدست می‌آید.

$$(u'_i)_{inlt}^{Inner} = \gamma (u'_i)_{recy} (y_{inlt}^+, z, t) \quad (20)$$

$$(u'_i)_{inlt}^{outer} = \gamma (u'_i)_{recy} (\eta_{inlt}, z, t) \quad (21)$$

پروفیل سرعت بر مبنای مدل لاند، طبق معادله (۲۲) در مقطع ورودی میدان حل بدست می‌آیند.

$$(u_i)_{inlt} = [(U_i)_{inlt}^{Inner} + (u'_i)_{inlt}^{Inner}] [1 - W(\eta_{inlt})] + [(U_i)_{inlt}^{outer} + (u'_i)_{inlt}^{outer}] W(\eta_{inlt}) \quad (22)$$

$W(\eta)$ یک تابع وزنی است و با توجه به معادله (۲۳) بدست می‌آید.

$$w(\eta) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[\frac{\alpha(\eta - b)}{(1 - 2b)\eta + b} \right] \right\} \tanh(\alpha) \quad (23)$$

ضرایب α و b به ترتیب برابر ۴ و ۰/۲ هستند [۱۱].

۳- بیان مسئله و روش حل عددی

در این مطالعه، اثر بکارگیری مدل‌های مختلف مرز ورودی آشفته شامل، مدل مرزی سرعت یکنواخت و آشفته‌سازی توسط تریپ، مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه با شرط مرزی

$$L_{ij} = T_{ij}^r - \hat{t}_{ij}^r = 2\bar{\Delta}^2 \left[C_s^2 \overline{|\hat{S}| \hat{S}_{ij}} - 4C_s^2 \left| \hat{S} \right| \overline{\hat{S}_{ij}} \right] \quad (12)$$

که $T_{ij}^r = \overline{u_i u_j} - \hat{u}_i \hat{u}_j$ تانسور تنش‌های زیر شبکه فیلتر آزمون و $\hat{t}_{ij}^r = \overline{u_i u_j} - \hat{u}_i \hat{u}_j$ تانسور تنش‌های زیر شبکه فیلتر شبکه است که سپس در فیلتر آزمون همگشت شده است. در واقع تانسور (L_{ij}) سهم تنش‌های مقیاس‌های زیر شبکه‌ای است که اندازه‌های کوچکتر از فیلتر آزمون و بزرگتر از فیلتر شبکه دارند. با توجه به مدل اسمگورینسکی دینامیکی ضریب ثابت (C_s) طبق معادله (۱۳) بدست می‌آید [۱۷].

$$C_s^2 = \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (13)$$

$$M_{ij} = 2\bar{\Delta}^2 \left(\overline{|\hat{S}| \hat{S}_{ij}} - \alpha^2 \left| \hat{S} \right| \overline{\hat{S}_{ij}} \right) \quad (14)$$

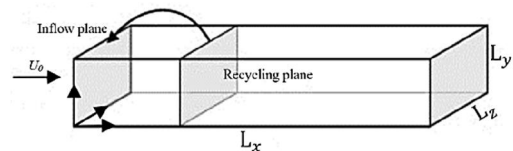
$\alpha = \hat{\Delta} / \bar{\Delta} \approx 2$ به منظور کاهش نوسانات حل، از میانگین‌گیری مکانی در طول یک صفحه موازی با دیوار استفاده شده و در نهایت ضریب ثابت C_s از رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$C_s^2 = \frac{\langle L_{ij} M_{ij} \rangle}{\langle M_{ij} M_{ij} \rangle} \quad (15)$$

مدل اسمگورینسکی دینامیکی، از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های استاتیکی، برخوردار است.

۲-۳- مدل ورودی آشفته لاند

اساس روش ورودی آشفته ارائه شده توسط لاند و همکاران [۱۱]، نمونه‌گیری از پروفیل سرعت جریان در یک مقطع پایین‌دست مرز ورودی، باز مقیاس آن بر مبنای سرعت اصطکاکی، ضخامت لایه مرزی و ضخامت مومنتوم و در نهایت نگاشت آن به مرز ورودی، مطابق شکل ۱ است.

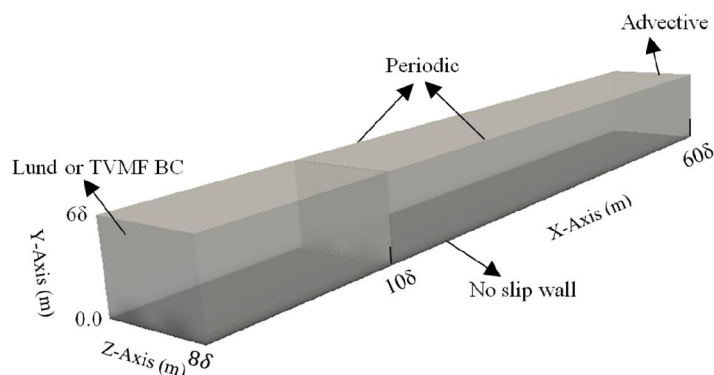


شکل ۱- شماتیک مفهومی از مدل آشفته‌ساز لاند

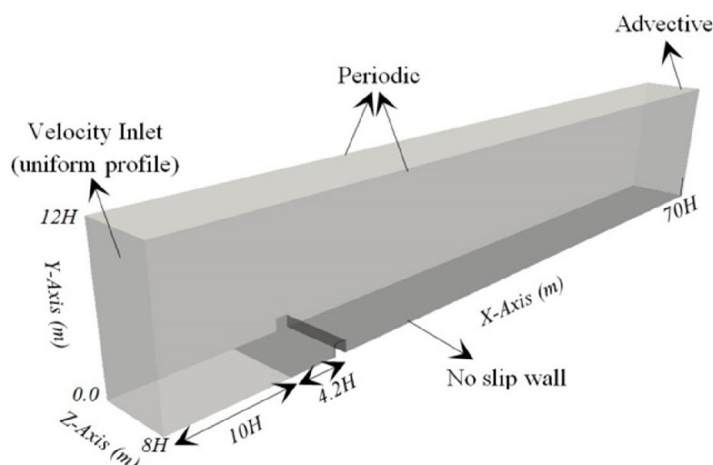
مبنای این روش شامل تجزیه بردار سرعت به دو قسمت متوسط و نوسانی است.

ابعاد صفحه تخت 30×4 سانتیمتر مربع و اعداد ماخ و رینولدز جریان بر مبنای طول صفحه به ترتیب برابر با 0.106 و 4×10^5 است. ابعاد میدان حل در شبیه‌سازی با مدل مرز ورودی لاند و مدل مبتنی بر حل اولیه، $60\delta \times 6\delta \times 8\delta$ و در شبیه‌سازی با مدل مرزی سرعت یکنواخت با آشفتنی سازی توسط تریپ، $70H \times 12H \times 8H$ در نظر گرفته شده است. ارتفاع تریپ مربع شکل (H) برابر ۵ میلی‌متر و معادل ضخامت لایه مرزی (δ) در ورودی میدان حل در شبیه‌سازی با مدل مرزی لاند و مدل مبتنی بر حل اولیه، انتخاب شده است. میدان حل و شرایط مرزی مورد استفاده، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

نگاشت مقادیر ثابت در زمان متغیر (تی وی ام اف) و مدل مرزی آشفتنی ساز لاند، بر جریان لایه مرزی روی یک صفحه تخت، با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل زیر-شبکه‌ای اسمالگورینسکی دینامیکی، در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم بررسی و نتایج با یکدیگر و با حل‌های دقیق حاصل از شبیه‌سازی مستقیم مقایسه شده است. حلگر مورد استفاده در این مطالعه، پیمپلوم بوده که برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتنی تراکم ناپذیر مناسب است. با تنظیم حداکثر مقدار عدد کورانت در محدوده کوچکتر از ۱، گام زمانی مناسب به طور خودکار در الگوریتم پیمپلوم تعیین شده است. برای گسسته سازی زمانی از روش رو به عقب و برای محاسبه گرادیان‌ها، از الگوریتم خطی گاوس استفاده شده است.

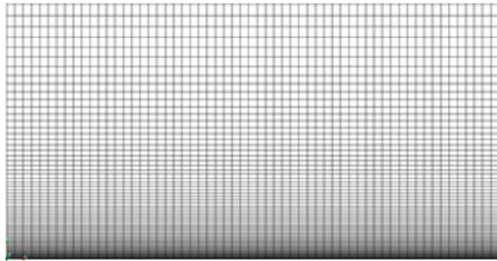


شکل ۲- میدان محاسباتی حل برای مدل مرزی لاند و مدل مبتنی بر حل اولیه به همراه شرایط مرزی



شکل ۳- میدان حل برای مدل مرزی سرعت یکنواخت و آشفتنی سازی توسط تریپ مربع شکل به همراه شرایط مرزی

برای تولید شبکه از ابزار بلاک مش در نرم افزار اوپن فوم استفاده شده که برای تولید شبکه روی هندسه های ساده مناسب است. با توجه به معیارهای مرجع [۱۸] و مطالعه اثر شبکه بر نتایج حل، $\Delta x^+ = 49$ ، $\Delta y^+ = 0.19$ و $\Delta z^+ = 12$ بعنوان پارامترهای مناسب برای ایجاد شبکه محاسباتی انتخاب شده است. بر این اساس تعداد سلول های بکار رفته در شبکه بندی میدان حل در شبیه سازی با مدل های مرزی مبتنی بر حل اولیه و لاند، 1536000 و در مدل مرزی با سرعت یکنواخت و آشفتگی سازی توسط تریپ، 3749330 سلول از نوع شش-وجهی است. نمونه ای از شبکه محاسباتی تولید شده در نزدیک به سطح صفحه تخت، در شکل ۵ نشان داده شده است.



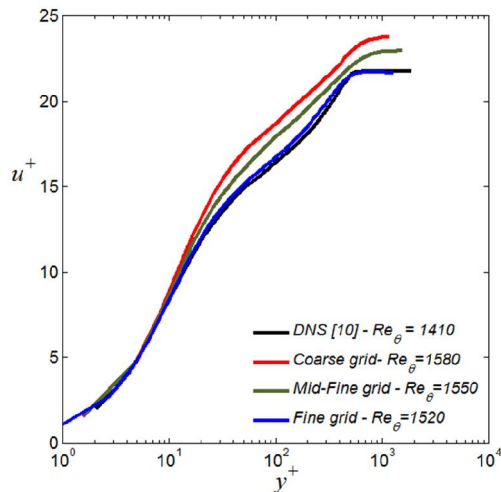
شکل ۵- شبکه محاسباتی در نزدیکی صفحه تخت در $z=0$ صفحه

۳-۱- مدل مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه

در این روش، شبیه سازی اولیه ای به مدت $30L/U_0$ ، روی میدان حل با ابعاد $20\delta \times 6\delta \times 8\delta$ انجام شده و در تمام گام های زمانی حل، میدان سرعت در مقطع ورودی ذخیره شده است. در مرز ورودی ضخامت لایه مرزی برابر ۵ میلی متر انتخاب و از مدل لاند برای آشفتگی سازی استفاده شده است. برای اطمینان از شکل گیری پروفیل سرعت آشفتگی و رسیدن شرایط حل به حالت پایا، میدان سرعت در گام های زمانی مختلف بررسی شده است. با اصلاح الگوریتم پیمپل فوم، میدان سرعت بر مرز ورودی در تمام گام های زمانی ذخیره شده و پس از اعمال اصلاحات لازم بعنوان بانک داده های میدان سرعت در شرط ورودی سرعت از نوع تی وی ام اف، در شبیه سازی اصلی، مورد استفاده قرار گرفته است. باید توجه نمود که برای تعیین مرز ورودی سرعت در این روش، می-

در شکل ۲، محل صفحه نمونه گیری پروفیل سرعت برای شبیه سازی با مدل مرزی لاند در موقعیت 10δ ، مطابق با مرجع [۱۱] انتخاب شده است؛ در حالیکه میدان حل در شبیه سازی با مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه فاقد صفحه نمونه گیری است.

به منظور بررسی استقلال نتایج حل از شبکه محاسباتی و انتخاب پارامترهای مناسب شبکه، از پیشنهاد ارائه شده در مرجع [۱۸] استفاده شده و مطالعه اثر شبکه در حالت غیر دائم روی سه نوع شبکه بندی متفاوت، شبکه درشت با تعداد 568632 سلول، شبکه متوسط با 786432 سلول و شبکه ریز با 1536000 سلول در شبیه سازی با مدل مرزی لاند انجام و نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق شکل ۴، با ریز شدن سلول های شبکه، نتایج به نتایج شبیه سازی عددی مستقیم [۱۰] نزدیک تر شده است.



شکل ۴- پروفیل سرعت متوسط برای شبکه های محاسباتی مختلف و مقایسه با نتایج شبیه سازی مستقیم عددی [۱۰]

از آنجا که نتایج رهیافت شبیه سازی گردابه های بزرگ همواره به ابعاد سلول های محاسباتی وابسته است، تطابق نسبی و مناسب نتایج شبکه ریز در این تحقیق با نتایج مرجع [۱۰] سبب شده تا با توجه به هزینه محاسباتی و زمان انجام شبیه سازی و دقت نتایج، مدل شبکه ریز بعنوان شبکه بهینه در شبیه سازی جریان لایه مرزی آشفتگی روی صفحه تخت انتخاب گردد.

و تمام شبیه‌سازی‌ها توسط یک پردازنده ۱۲ هسته‌ای انجام شده است.

به منظور مقایسه کیفی کارایی مدل‌های مرزی مورد مطالعه در توسعه لایه مرزی آشفته استاندارد، کانتور معیار کیو که با مقادیر سرعت رنگ‌آمیزی شده، برای هر سه مدل مرز ورودی، در شکل ۶ ارائه شده است. معیار کیو نامتغیر دوم، تانسور گرادیان سرعت است که برای مشاهده ساختارهای همدوس در جریان آشفته استفاده می‌شود.

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}) \quad (24)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (25)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (26)$$

Ω_{ij} و S_{ij} به ترتیب بخش نامتقارن و متقارن گرادیان سرعت هستند. با توجه به شکل ۶، کاربرد هر سه مدل سبب ایجاد ساختارهای آشفته در جریان لایه مرزی شده است. کانتور معیار کیو در شبیه‌سازی با مدل مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه و مدل لاند، نشان دهنده شکل‌گیری و توسعه مناسب لایه مرزی آشفته از ابتدای صفحه تخت است؛ در حالیکه در شبیه‌سازی با مدل مرز ورودی سرعت یکنواخت و آشفته‌سازی توسط تریپ، فرآیند آشفته‌سازی با اعمال نوسانات تصادفی و کنترل نشده توسعه یافته و روند نامنظم و نوسانی شکل‌گیری و فروپاشی ساختارهای همدوس در تمام سطح صفحه تخت دیده می‌شود. حذف اثر اغتشاشات تصادفی شکل گرفته توسط تریپ و دستیابی به پروفیل لایه مرزی استاندارد، نیازمند توسعه میدان حل و افزایش هزینه محاسبات است [۶-۸].

در شکل ۷، روند تغییرات ضخامت‌های انتگرالی شامل، ضخامت لایه مرزی δ ، ضخامت جابجایی δ^* و ضخامت مومنتم θ در محدوده $(0.5 < x/L < 1)$ ، با روابط حل تحلیلی قانون توانی یک هفتم (۱/۷) مقایسه شده است. در این شکل $\alpha_{ref}/L = 0.5$ به‌عنوان موقعیت مرجع در نظر گرفته شده است.

نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات ضخامت‌های لایه مرزی در شبیه‌سازی با مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه و لاند، انطباق مناسبی با هم و با نتایج حل تحلیلی دارد.

توان از پروفیل سرعت آشفته استاندارد بدست‌آمده از مطالعات تجربی یا عددی دیگر نیز استفاده کرد.

۳-۲- مدل مرز ورودی لاند

بر خلاف شبیه‌سازی با مدل مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه، در این مدل مرزی، از ابتدا شبیه‌سازی اصلی با استفاده از مدل مرز ورودی لاند انجام و با سایر نتایج مقایسه شده است. نتایج این شبیه‌سازی، بیانگر تأثیر یک شرط مرزی با ساختارهای همدوس^۱ و کنترل شده، بر مشخصه‌های جریان لایه مرزی آشفته است.

۳-۳- مدل مرز ورودی با آشفته‌سازی توسط تریپ

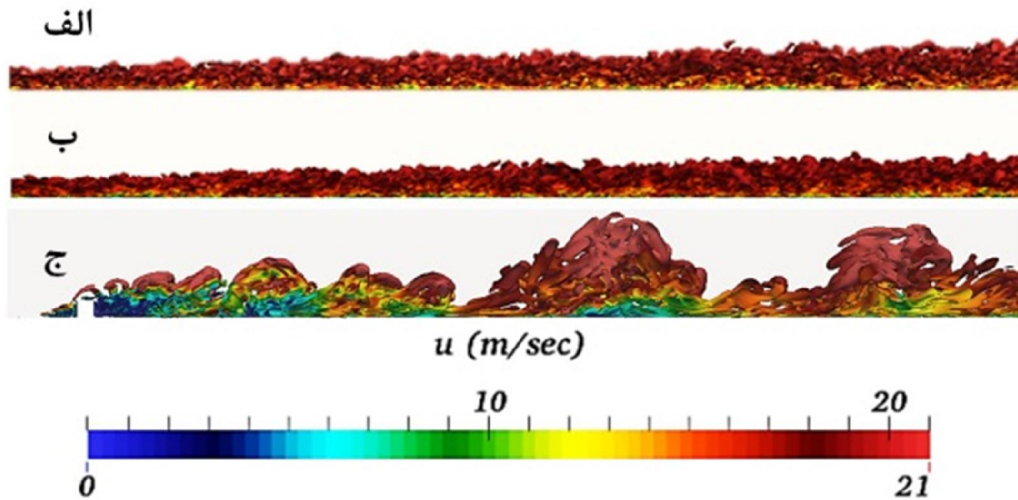
در شبیه‌سازی با این مدل مرزی، سرعت ورودی یکنواخت در نظر گرفته شده و برای آشفته‌سازی جریان پایین دست از مدلی به ابعاد 5×5 میلی‌متر بعنوان تریپ استفاده شده که در موقعیت ۷٪ پایین دست لیه حمله صفحه تخت قرار گرفته است (شکل ۳). استفاده از این روش آشفته‌سازی، امکان بررسی حساسیت مشخصه‌های جریان آشفته لایه مرزی به شرایط مرزی ورودی تصادفی با همبستگی زمانی و مکانی ضعیف در ساختارهای آشفته، را فراهم می‌کند.

۴- نتایج

نتایج ارائه شده در این بخش، با میانگین‌گیری زمانی و مکانی بدست آمده است. فرآیند میانگین‌گیری زمانی پس از رسیدن لایه مرزی به حالت شبه‌پایا آغاز شده که این زمان برابر با $10T$ از آغاز حل عددی است [۱۹، ۲۰]. دوره زمانی میانگین‌گیری داده‌ها، $10T$ بوده که مدت زمانی است که سیال سطح مدل را طی می‌کند. میانگین‌گیری مکانی روی صفحات با بردار نرمال در جهت x انجام شده است.

مدت زمان اجرای شبیه‌سازی با مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه با احتساب زمان شبیه‌سازی اولیه در حدود ۷۳ ساعت، برای مدل مرزی لاند ۵۳ و مدل سرعت ورودی یکنواخت و آشفته‌سازی جریان توسط تریپ ۱۲۰ ساعت بوده

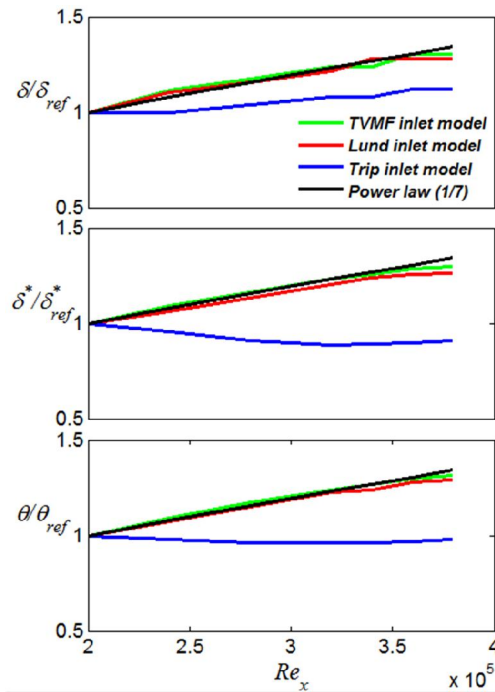
^۱ Turbulence Coherent Structures



شکل ۶- کانتور معیار کیو ($Q=2 \times 10^5$)، رنگ آمیزی شده با مقادیر سرعت لحظه‌ای، الف) مدل مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه و ب) مدل مرز ورودی لاند ج) مدل مرز ورودی سرعت یکنواخت و آشفته‌سازی توسط تریپ

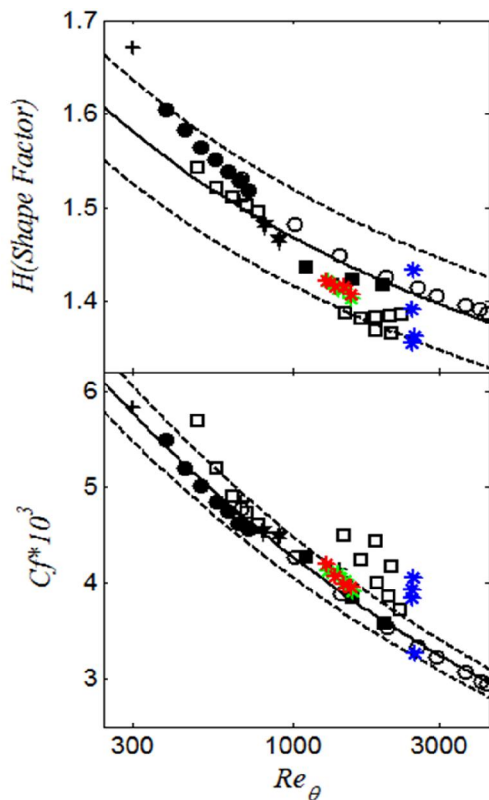
شکل‌گیری ساختارهای نوسانی همبسته و کنترل شده در مرز ورودی، عامل اصلی در ایجاد لایه مرزی آشفته استاندارد با روند توسعه طبیعی و منظم شده است؛ ولیکن در شبیه‌سازی با مدل مرز ورودی سرعت یکنواخت و آشفته-سازی توسط تریپ، نرخ رشد ضخامت‌های انتگرالی در لایه مرزی انحراف قابل توجهی با حل تحلیلی داشته و روند تصادفی توسعه و اضمحلال ساختارهای نوسانی ایجاد شده در لایه مرزی، تا مرز خروجی میدان حل ادامه یافته و چنین رفتاری در مطالعات دیگر نیز دیده شده است [۸، ۱۱]؛ بنابراین می‌توان دریافت که اگرچه معمولاً در مطالعات تجربی از تریپ به‌عنوان محرک ایجاد جریان آشفته استفاده می‌شود، لذا استفاده از این روش آشفته‌سازی ممکن است، همیشه منجر به ایجاد یک لایه مرزی آشفته استاندارد نگردد.

روند تغییر ضریب شکل H و ضریب اصطکاک پوسته‌ای C_f بر حسب عدد رینولدز بر پایه ضخامت مومنوم Re_θ در موقعیت‌های ۶۰٪، ۷۰٪، ۸۰٪، ۹۵٪ x/L در مقایسه با نتایج سایر محققین [۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۳، ۲۱، ۲۲] در شکل ۸ ارائه شده است. مقدار و روند تغییر ضریب شکل و ضریب اصطکاک پوسته‌ای در شبیه‌سازی با شرط ورودی مدل مبتنی بر حل اولیه و مدل لاند، همخوانی مناسبی با سایر مطالعات داشته که نشان دهنده دقت این دو مدل در کنترل مشخصه‌های خارجی و داخلی لایه مرزی آشفته است.



شکل ۷- روند تغییرات ضخامت‌های انتگرالی لایه مرزی بدست آمده از شبیه‌سازی با مدل ورودی مبتنی بر حل اولیه، مدل مرز ورودی لاند و مدل مرز ورودی سرعت یکنواخت با آشفته‌سازی توسط تریپ در مقایسه با نتایج حل تحلیلی قانون (۱/۷)

می‌توان دریافت که اثر اغتشاشات تصادفی و ساختارهای نوسانی غیر همبسته ناشی از تریپ بر مشخصه‌های متوسط جریان لایه مرزی، تا مرز خروجی میدان حل همچنان وجود دارد که در فاصله‌ای بیش از ۵۰ برابر ارتفاع تریپ قرار دارد؛ بنابراین با توجه به این نتایج و طبق مطالعه ماروسیک و همکاران [۶]، شلاتر و همکاران [۷] و افشاری و همکاران [۲۳]، هنگام استفاده از تریپ، برای رسیدن به فرم استاندارد، نیاز به افزایش طول میدان حل بوده که قاعدتاً هزینه محاسباتی قابل توجهی به همراه دارد.

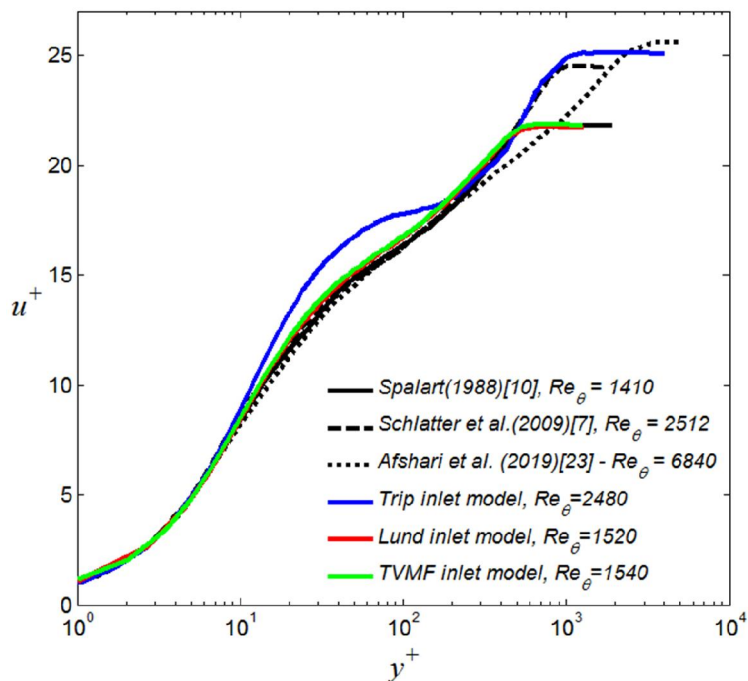


شکل ۸- بررسی روند تغییرات ضریب شکل و ضریب اصطکاک پوسته‌ای در مقایسه با نتایج مطالعات مختلف،
 □: خوجادزه و اوپرلک [۴، ۵]، ○: شلاتر و همکاران [۷]،
 +: اسپالارت [۱۰]، ■: سیمنس و همکاران [۱۳]،
 * وو و موین [۲۱]، ●: کامیناهو و اسکوت [۲۲] و مطالعه حاضر *؛ مدل مرزی ورودی مبتنی بر حل اولیه،
 *؛ مدل مرزی ورودی لاند و *؛ مدل مرز ورودی سرعت یکنواخت با آشفته‌سازی توسط تریپ

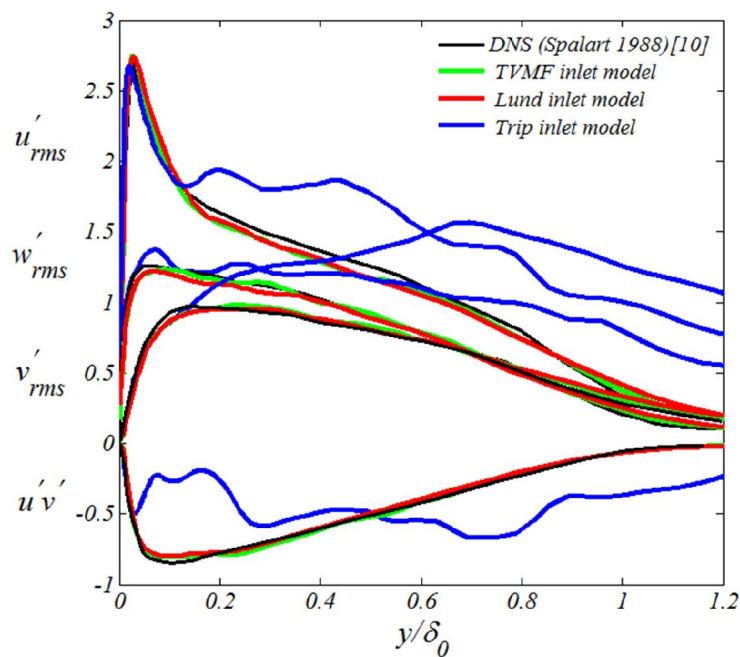
از طرفی، نرخ تغییر نتایج شبیه‌سازی با مدل آشفته‌سازی توسط تریپ، در مقایسه با دیگر مطالعات همخوانی ندارد، چراکه اثر اغتشاشات کنترل‌نشده به واسطه وجود تریپ، مانع از تشکیل لایه مرزی آشفته استاندارد تا مرز خروجی میدان حل شده است؛ همچنین مقایسه مقدار ضریب اصطکاک پوسته‌ای با رابطه نیمه‌تجربی $C_f = 0.024Re_{\theta}^{-0.25}$ نشان می‌دهد که حداکثر انحراف در شبیه‌سازی با مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه ۴/۳٪، مدل مرزی لاند ۴/۵٪ و در مدل آشفته‌سازی توسط تریپ ۱۹/۳٪ است.

در شکل ۹، پروفیل سرعت متوسط بر حسب مختصات عمود بر دیواره، برای شبیه‌سازی با هر سه مدل مختلف مرز ورودی، در مقایسه با نتایج حل شبیه‌سازی عددی مستقیم [۷، ۱۰] با دو محدوده عدد رینولدز مختلف و نتایج مطالعه تجربی [۲۳] ارائه شده است. با توجه به شکل ۹، استفاده از دو مدل مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه و لاند، منجر به توسعه پروفیل سرعت متوسط مطابق با فرم استاندارد لایه مرزی آشفته و منطبق با نتایج شبیه‌سازی حل عددی مستقیم شده است.

اختلاف جزئی مشاهده شده در محدوده $100 < Re_{\theta} < 400$ ، بین نتایج دو مدل مبتنی بر حل اولیه و مدل لاند با مرجع [۱۰]، به اختلاف رهیافت حل عددی و همچنین به اختلاف عدد رینولدز و شدت آشفته‌گی در مرز ورودی مرتبط است و چنین اختلافی در مطالعات دیگر از جمله مطالعه لاند [۱۱] دیده شده است. مقایسه پروفیل سرعت متوسط در آشفته‌سازی توسط تریپ با نتایج حل شبیه‌سازی عددی مستقیم [۷] و نتایج مطالعه تجربی [۲۳] نشان می‌دهد که در محدوده $100 < Re_{\theta} < 200$ ، مقدار سرعت متوسط بیش از مقدار مورد انتظار بدست آمده، ولیکن در محدوده $Re_{\theta} > 200$ فرم پروفیل سرعت متوسط به روند مورد انتظار بازگشته است. اختلاف نتایج پروفیل سرعت متوسط در محدوده $100 < Re_{\theta} < 200$ ، علاوه بر شدت آشفته‌گی در مرز ورودی، به طول کوتاه صفحه نیز مرتبط بوده، بطوریکه در مطالعات تجربی مختلف [۶، ۷، ۲۳] علیرغم وجود شدت آشفته‌گی در بالادست جریان، دستیابی به پروفیل استاندارد لایه مرزی آشفته مخصوصاً در ناحیه خارجی، مستلزم افزایش طول صفحه بوده است.



شکل ۹- پروفیل سرعت متوسط در موقعیت $x/L = 95\%$



شکل ۱۰- پروفیل مولفه‌های نوسانی سرعت و تنش برشی رینولدز برحسب فاصله بی‌بعد از دیواره در موقعیت $x/L = 95\%$

در شکل ۱۰، پروفیل مولفه‌های نوسانی سرعت و مولفه تنش برشی رینولدز (u'_{rms} , v'_{rms} , w'_{rms} و $u'v'$)، بر حسب فاصله از دیواره (y/δ_0)، برای شبیه‌سازی با مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه، مدل مرزی لاند و مدل مرزی سرعت یکنواخت و آشفته‌سازی توسط تریپ، در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی مستقیم [۱۰]، ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی با مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه در انطباق کامل با نتایج شبیه‌سازی با مدل مرزی لاند بوده و تطابق مناسبی با نتایج حل مستقیم عددی اسپالارت [۱۰] دارد. اختلاف جزئی بین نتایج، مرتبط با اختلاف عدد رینولدز و شدت آشفتگی در مرز ورودی و رهیافت عددی، مورد استفاده بوده که در برخی مطالعات دیگر [۱۱، ۲۴] نیز گزارش شده است.

به‌طور کلی پیش‌بینی مولفه‌های نوسانی سرعت و تنش برشی رینولدز با استفاده از مدل سرعت یکنواخت در مرز ورودی و آشفته‌سازی توسط تریپ، نتایج ضعیفی را ارائه کرده است. در ناحیه داخلی لایه مرزی ($y/\delta_0 < 0.1$)، همانند پروفیل سرعت متوسط، انطباق نسبی بین نتایج پیش‌بینی شده این مدل مرزی با نتایج حل مستقیم عددی [۱۰] وجود دارد؛ در حالی که در ناحیه میانی و خارجی، مقادیر مولفه‌های نوسانی سرعت و تنش برشی رینولدز انحراف قابل توجهی نسبت به سایر نتایج دارد؛ همچنین مولفه v'_{rms} در محدوده $y/\delta_0 < 0.1$ بر خلاف سایر نتایج، روند افزایشی دارد. ایجاد اغتشاشات کنترل نشده و ساختارهای نوسانی غیرهمبسته توسط تریپ، عامل اصلی در به تعویق افتادن توسعه لایه مرزی آشفته استاندارد است و اثر این نوسانات تا مرز خروجی میدان حل در این مطالعه دیده شده است. بر اساس مطالعات تجربی و عددی [۶-۸، ۲۵]، پروفیل سرعت در ناحیه نزدیک به دیواره سریعاً به فرم استاندارد می‌رسد؛ درحالی‌که در ناحیه خارجی تأثیرپذیری پروفیل‌های متوسط و نوسانی بیشتر بوده و حذف اثر اغتشاشات ناشی از تریپ، نیازمند افزایش طول توسعه لایه مرزی و در نتیجه هزینه محاسبات است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر و کارایی سه مدل مختلف مرز ورودی و آشفته‌سازی جریان، بر مشخصه‌های جریان لایه مرزی روی

صفحه تخت، با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در نرم‌افزار اوپن‌فوم انجام شده است. هدف اصلی در مطالعه حاضر، شناسایی مدل مناسب مرز ورودی برای استفاده در شبیه‌سازی جریان آشفته با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ است که حداقل هزینه محاسباتی را در بر داشته باشد.

مقایسه کیفی کانتور معیار کیو و مقایسه کمی پروفیل سرعت متوسط، ضریب شکل، ضریب اصطکاک پوسته‌ای و مولفه‌های نوسانی سرعت و تنش برشی رینولدز نشان می‌دهد که استفاده از هر سه مدل مرز ورودی، ضمن کاهش هزینه محاسباتی بواسطه حذف ناحیه گذار طبیعی جریان و کاهش طول میدان حل، سبب شکل‌گیری لایه مرزی آشفته روی صفحه تخت خواهد شد؛ ولیکن نتایج شبیه‌سازی با مدل‌های مرز ورودی مبتنی بر حل اولیه و لاند از دقت کاملاً مناسب تری نسبت به نتایج شبیه‌سازی با مدل سرعت ورودی یکنواخت و آشفته‌سازی جریان توسط تریپ، روی مدلی با طول نسبتاً کوتاه و بدون هیچگونه آشفتگی در مرز ورودی برخوردار است. در واقع شکل‌گیری ناحیه برگشتی و لایه برشی پشت تریپ مربع شکل، سبب ایجاد اغتشاشات کنترل نشده و ساختارهای نوسانی غیرهمبسته‌ای می‌شود که تغییر غیرعادی ضخامت لایه مرزی و ضریب اصطکاک پوسته‌ای و سایر مشخصه‌های لایه مرزی را بدنبال دارد و با توجه به نتایج برخی از مطالعات گذشته [۶]، [۷] و [۲۳]، دستیابی به پروفیل لایه مرزی آشفته استاندارد در یک شبیه‌سازی عددی، نیازمند افزایش طول مدل صفحه تخت و هزینه محاسباتی است. در این مطالعه انحراف ضریب اصطکاک پوسته‌ای مدل مرزی مبتنی بر حل اولیه و مدل مرزی لاند از روابط تحلیلی به ترتیب برابر با ۴/۳٪ و ۴/۵٪ و برای مدل مرزی سرعت یکنواخت با آشفته‌سازی توسط تریپ، ۱۹/۲٪ پیش‌بینی شده است؛ همچنین پروفیل سرعت متوسط و مولفه‌های نوسانی سرعت و تنش برشی رینولدز، نشان دهنده انطباق بسیار مناسب نتایج پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های مرزی مبتنی بر حل اولیه و لاند با نتایج حل عددی مستقیم [۱۰] در تمام محدوده لایه مرزی آشفته است. این در حالیست که در شرایط استفاده از مدل مرزی سرعت یکنواخت با آشفته‌سازی توسط تریپ، نتایج تنها در زیر لایه لزج و ناحیه داخلی لایه مرزی نسبتاً مناسب پیش‌بینی شده

فاصله عمودی از سطح (m)	y	است؛ همچنین علیرغم اینکه نتایج شبیه‌سازی با مدل مرزی سرعت یکنواخت و آشفته‌سازی توسط تریپ دقیق نیست، زمان موردنیاز برای تحصیل همین نتایج در مقایسه با نتایج قابل قبول حاصل از مدل‌های مرزی مبتنی بر حل اولیه و لاند، بیش از دو برابر است (۱۲۰ ساعت در مقایسه با ۵۳ ساعت). بعلاوه نتایج نشان داد، اگرچه روش آشفته‌سازی توسط تریپ همچنان یکی از گزینه‌های مرسوم ایجاد لایه مرزی آشفته در مطالعات تجربی و برخی مطالعات عددی است، لیکن در استفاده از نتایج حاصل از این روش در شبیه‌سازی عددی، باید با بررسی و دقت بیشتری برخورد نمود.
فاصله عمودی نرمال شده با مقیاس دیوار v/u_τ	y^+	
فاصله در راستای دهانه مدل (m)	z	
علائم یونانی		
ضخامت لایه مرزی (m)	δ	
ضخامت اندازه حرکت لایه مرزی (m)	δ^*	
ضخامت مومنتوم لایه مرزی (m)	θ	
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ	
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2s)	ν	در نهایت نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کاربرد مدل‌های مناسب مرز ورودی و تکنیک‌های آشفته‌ساز مناسب نظیر مدل ورودی لاند و مدل مبتنی بر حل اولیه، در شبیه‌سازی عددی جریان‌های آشفته با رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، نه تنها نتایج مناسب و قابل قبولی را فراهم می‌کند، بلکه سبب کاهش هزینه و امکانات محاسباتی می‌گردد.
چگالی (kgm^{-3})	ρ	
تنش برشی دیوار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	τ_w	
بالانویس‌ها و زیرنویس‌ها		
ناحیه داخلی لایه مرزی	Inner	
ناحیه خارجی لایه مرزی	Outer	
صفحه ورودی	Inlt	
صفحه بازنگاشت	recy	
مقیاس زیرشبکه	sgs	

۷- مراجع

- [1] Sandberg RD, Sandham ND (2008) Direct numerical simulation of turbulent flow past a trailing edge and the associated noise generation. J Fluid Mech (596): 353-385.
- [2] Winkler J, Moreau S, Carolus T (2010) Airfoil trailing edge noise prediction from large-eddy simulation: influence of grid resolution and noise model formulation. 16th AIAA/CEAS aeroacoustics conference.
- [3] Afshari A, Dehghan AA, Kalantar V, Farmani M (2017) Experimental investigation of surface pressure spectra beneath turbulent boundary layer over a flat plate with microphone. Modares Mech Engin 17(1): 263-272.
- [4] Khujadze G, Oberlack M (2004) DNS and scaling laws from new symmetry groups of ZPG turbulent

۶- علائم اختصاری

ضریب اصطکاک پوسته‌ای	c_f
ضریب شکل	H
فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	P
عدد رینولدز بر پایه طول	Re_L
عدد رینولدز بر پایه ضخامت جابه‌جایی	Re_θ
مولفه سرعت متوسط جریان (ms^{-1})	U
سرعت اصطکاکی (ms^{-1})	u_τ
مولفه سرعت نوسانی جریان (ms^{-1})	u'_i
مولفه سرعت متوسط جریان (ms^{-1})	\bar{u}_i
سرعت نرمال شده با مقیاس دیوار v/u_τ	u^+
مولفه تنش برشی رینولدز ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	$u'v'$
فاصله در راستای جریان از لبه حمله (m)	x

- Rescaling Method. *Flow, Turb and Combust* 98(3): 663-695.
- [16] Lilly DK (1992) A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. *Phys Fluids A: Fluid Dyn* 4(3): 633-635.
- [17] Germano M, et al. (1991) A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Phys of Fluids A: Fluid Dyn* 3(7): 1760-1765.
- [18] Wagner C, Hüttl T, Sagaut P (2007) Large-eddy simulation for acoustics. Cambridge University Pres.: 209.
- [19] Zahiri A, Roohi E (2018) Implementation of the anisotropic minimum-dissipation (AMD) sub-grid scale model in OpenFOAM and its evaluation in treating turbulent channel flow. *Modares Mech Engin.* 17(12): 478-484.
- [20] Bodling A, et al. (2017) Numerical Investigation of Bio-Inspired Blade Designs at High Reynolds Numbers for Ultra-Quiet Aircraft and Wind Turbines. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference.
- [21] Wu X, Moin P (2009) Direct numerical simulation of turbulence in a nominally zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer. *J Fluid Mech*(630): 5-41.
- [22] Komminaho J, Skote M (2002) Reynolds stress budgets in Couette and boundary layer flows. *Flow, Turb and Comb* 68(2): 167-192.
- [23] Afshari A, Azarpeyvand M, Dehghan AA, Szoke M, Maryami R (2019) Trailing edge flow manipulation using streamwise finlets. *Journal of Fluid Mechanics* (Accepted/In press).
- [24] Rai MM, Moin P (1993) Direct numerical simulation of transition and turbulence in a spatially evolving boundary layer. *J Comput Phys* 109(2): 169-192.
- [25] Schlatter P, ÖRIÜ R (2010) Assessment of direct numerical simulation data of turbulent boundary layers. *J Fluid Mech* (659): 116-126.
- boundary layer flow. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* 18(5): 391-411.
- [5] Khujadze G, Oberlack M (2007) New scaling laws in ZPG turbulent boundary layer flow. TSPF digital library online. Begel House Inc.
- [6] Marusic I et al. (2015) Evolution of zero-pressure-gradient boundary layers from different tripping conditions. *J Fluid Mech* (783): 379-411.
- [7] Schlatter P, et al. (2009) Turbulent boundary layers up to $Re_{\theta}=2500$ studied through simulation and experiment. *Physics of Fluids* 21(5): 051702.
- [8] Örlü R, Schlatter P (2011) Inflow length and tripping effects in turbulent boundary layers. *Journal of Physics Conference Series* 318(2): 022018.
- [9] Akselvoll K, Moin P (1993) Large eddy simulation of a backward facing step flow. *Engineering Turbulence Modeling and Experiments*, Elsevier: 303-313.
- [10] Spalart P R (1988) Direct simulation of a turbulent boundary layer up to $Re_{\theta} = 1410$. *J Fluid Mech* (187): 61-98.
- [11] Lund TS, Wu X, Squires KD (1998) Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations. *J Comput Physics* 140(2): 233-258.
- [12] Lund TS, Moin P (1996) Large-eddy simulation of a concave wall boundary layer. *Int J Heat and Fluid Flow* 17(3): 290-295.
- [13] Simens MP, et al. (2009) A high-resolution code for turbulent boundary layers. *J Comput Physics* 228(11): 4218-4231.
- [14] Piomelli U, Yuan J (2013) Numerical simulations of spatially developing, accelerating boundary layers. *Phys Fluids* 25(10): 101304.
- [15] Xiao F, Dianat M, McGuiirk JJ (2017) An LES Turbulent Inflow Generator using A Recycling and