



ارزیابی مدل توربولانسی DES و DDES در جریان باد بر روی ساختمان و مقایسه آن با روش‌های توربولانسی متداول

امیر محمد جدیدی^۱، قاسم حیدری نژاد^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، gheidari@modares.ac.ir

چکیده- جریان آشفته باد بر روی ساختمان به دلیل دارا بودن پیچیدگی‌های فیزیکی از جمله وجود گوشه‌های تیز، اثر زمین و وجود گردابه‌های مختلف، یکی از بهترین گزینه‌ها برای ارزیابی روش‌های توربولانسی می‌باشد. روش DES و DDES از روش‌های نسبتاً جدید ترکیبی RANS-LES برای شبیه‌سازی جریان آشفته می‌باشند که به دلیل ذات ترکیبی آن در نزدیکی مرز از روش RANS و در نواحی دورتر از آن از روش LES استفاده می‌کنند و متعاقباً زمان اجرای شبیه‌سازی در آنها نسبت به روش‌های رایج LES کمتر می‌باشد. در این مقاله برای ارزیابی روش‌های DES و DDES، جریان آشفته تراکم‌ناپذیر باد بر روی ساختمان در رینولدز ۲۲۰۰۰ بصورت سه بعدی و با استفاده از پردازش موازی شبیه‌سازی شده است و برای صحت‌سنجی از نتایج تجربی سایر محققان استفاده شده است. همچنین این روش با روش‌های متداول توربولانسی k-ε و اسماگورینسکی نیز مقایسه شده است تا کارایی آن نسبت به سایر روش‌های توربولانسی آشکار شود. نتایج حاکی از آن است که روش DES با شبکه ریز در عین کاهش ۲۶٪ زمان محاسبات نسبت به مدل اسماگورینسکی، از دقت خوبی به‌منظور شبیه‌سازی جریان آشفته غیرقابل تراکم باد بر روی ساختمان برخوردار است.

کلیدواژگان: جریان باد، جریان آشفته حول ساختمان، مدل DES، روش‌های RANS-LES، پردازش موازی.

Evaluating DES and DDES models for wind flow over building and comparing with traditional turbulence models

A. M. Jadidi¹, G. Heidarinejad^{2*}

1- Prof., Mech. Eng. Dept., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- PHD Student, Mech. Eng. Dept., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran. gheidari@modares.ac.ir

Abstract-Turbulent wind flow over buildings occurs due to the complexity like sharp corners, ground effect and different vortexes is one of the best choices to evaluate turbulence methods. DES and DDES are hybrid RANS-LES models for simulating turbulent flow which for their characteristic treat near wall as RANS and farther the wall act as LES model. Consequently computational time will decrease compared to traditional LES models. In this article to evaluate DES and DDES models, turbulent incompressible wind flow in $Re = 22000$ over 3D building is simulated using parallel processing facilities. For verification purpose other investigators experiment results are used. Also the mentioned models are compared with classic RANS and LES models, like k-ε and LES-Smagorinsky to depict their performance. Our results illustrate DES model with fine grid has good precision for simulating turbulent incompressible wind flow over building and decline of 26 percentage of computational time compared to LES-Smagorin sky model.

Keywords: Wind Flow, Turbulent Flow Around Building, DES Model, RANS-LES Models, Parallel Processing.

۱- مقدمه

دسته روش برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارند که

عبارتند از:

- RANS
- LES
- DNS

برخلاف پیشرفت‌هایی که در دهه ۷۰ به وسیله دردروف [۱] در روش LES بوجود آمد، امروزه در مسایل مهندسی به دلیل نیاز به پردازش بالا، حافظه زیاد و نیز عدم وجود مدل‌های مناسب برای ریزمقیاس‌ها به نسبت RANS کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جریان غیر دایم آشفته حول یک ساختمان مکعب شکل با استفاده از روش LES اولین بار توسط موراکامی و موچیدا [۲] بررسی شده است. ایشان برای مدل‌سازی زیرشبکه از روش‌اسماگورینسکی استفاده کردند و به خوبی نشان دادند که روش مذکور پتانسیل بسیار بالایی برای پیش‌بینی صحیح جریان حول ساختمان دارد. در تحقیقات محققان مذکور به جز جریان پایین‌دست جریان، بقیه نواحی الگوی صحیحی نسبت به جواب‌های تجربی نشان دادند.

موراکامی در سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰ از هر دو روش LES و RANS برای تخمین جریان حول مکعب و ساختمان‌های پیچیده استفاده کرد [۳-۵]. وی نشان داد که ابعاد شبکه بکار رفته و شرایط مرزی به طرز مؤثری بر روی جواب‌ها تأثیر می‌گذارند. او با استفاده از یک شبکه ریز و اعمال صحیح شرایط مرزی توانست جواب‌های میانگین سرعت و فشار نسبتاً خوبی بدست آورد. او از نتایج کارها این‌گونه جمع‌بندی کرد که بطور کلی روش LES نسبت به روش‌های میانگین‌گیری زمانی برای محاسبه جریان حول ساختمان ارجحیت دارد، اما در روش LES نیز اختلاف جواب‌ها وجود دارد.

لیکهای و رودی [۶] جریان حول مکعب درون کانال را با انواع مختلف روش‌های $k-\epsilon$ حل کردند و نتیجه گرفتند که تمامی مدل‌ها به طرز ضعیفی طول ناحیه جدایش را تخمین می‌زنند. همچنین از روش LES و مدل اسماگورینسکی نیز استفاده کردند و نتایج بهتری حاصل گردید، اما هزینه محاسباتی به شدت افزایش یافت. رودی [۷] مقایسه‌ای میان LES و RANS انجام داد و نشان داد که LES به طرز آشکاری از روش‌های RANS بهتر عمل می‌کند و از پتانسیل بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده برخوردار است.

هندسه یک ساختمان بر روی شرایط آب و هوایی محیط داخل و اطرافش به طرز غیر قابل اجتنابی تأثیر می‌گذارد. به ویژه در ساختمان‌های بلند، بادهای پرسرعت در اطراف ساختمان می‌تواند برای افراد بیرون از ساختمان (پیاده‌رو) نامطبوع و حتی خطرناک باشد. بنابراین در طراحی ساختمان می‌بایست به شرایط آسایش افراد داخل ساختمان و هم به تأثیر آن بر روی محیط بیرون توجه داشت.

در کاربردهای مدل‌سازی جریان بر روی ساختمان بیشتر توجه به آسایش افراد داخل ساختمان بوده و تأثیر باد در بیرون ساختمان بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است. اگر هم شرایط بیرون از ساختمان مد نظر قرار گرفته به منظور تعیین شرایط مرزی باد روی ساختمان بوده و تأثیر باد بر اقلیم اطراف ساختمان، کمتر مورد توجه بوده است. اقلیم بیرون از ساختمان متأثر از سرعت باد، جهت باد، باران، آلودگی هوا، تشعشع و نور است که این عوامل با حضور ساختمان تغییر می‌کنند و تغییر آنها به ابعاد، شکل و جهت ساختمانها و همچنین به تأثیر ساختمان‌ها بر یکدیگر و تأثیر عوامل دیگر بر ساختمان (همانند درخت‌ها)، بستگی دارد. این تغییرات می‌توانند مطلوب و یا غیر مطلوب باشند. تغییرات اقلیمی بیرونی غیرمطلوب عبارتند از:

- افزایش سرعت باد حول ساختمان که می‌تواند منجر به شرایط عدم آسایش برای پیاده‌رو و یا حتی ایجاد خطر شود.
- سرعت باد آنقدر کم شود که منجر به عدم تخلیه گازهای صنعتی و تجمع آن حول ساختمان گردد.
- انعکاس نور و ایجاد سایه توسط ساختمان
- آلودگی‌های قابل رویت

بطور کلی برای بررسی جریان حول ساختمان از اطلاعات تونل باد استفاده می‌شود، اما ابزار CFD نیز امروزه با گسترش توان کامپیوترها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. مزیت اصلی روش‌های عددی کاهش هزینه‌های استفاده از تونل باد می‌باشد اما در عوض دارای این عیب بزرگ نیز می‌باشند که برای اعتبارسنجی نتایج، هنوز نیاز به نتایج تونل باد دارند؛ علاوه بر این که برای تحلیل سه بعدی رژیم توربولانس حول چندین ساختمان هنوز محدودیت‌های پردازش کامپیوتری در روش‌های دقیق‌تر بسیار جدی به نظر می‌رسد. بطور کلی سه

جدید DDES نام گرفت که در این مقاله این مدل نیز برای ارزیابی جریان آشفته باد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش بعد مدل اسماگورینسکی مورد بررسی جامع‌تری قرار خواهد گرفت.

۲- معادلات حاکم

به جز روش شبیه‌سازی مستقیم^۴ عددی بطور کلی دو دسته روش LES و RANS برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارند که تفاوت آنها در نوع میانگین‌گیری از معادله ناویر-استوکس می‌باشد. در دسته روش‌های LES از میانگین‌گیری مکانی با استفاده از فیلتر و در دسته روش‌های RANS از میانگین‌گیری زمانی استفاده می‌شود. روش DES یک روش ترکیبی LES-RANS می‌باشد که بطور خودکار در نزدیکی مرز تبدیل به روش RANS شده و در نواحی دورتر شبیه یک مدل LES یک معادله‌ای عمل می‌کند. معادله پیوستگی و ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده در حالتی که سیال تراکم ناپذیر باشد، بصورت رابطه (۱) می‌باشند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\nu + \nu_T) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) \quad (1)$$

در روابط فوق u_i بیانگر سرعت، p فشار، ν لزجت سینماتیکی سیال و ν_T لزجت توربولانسی می‌باشد. در روش DES برای بدست آوردن لزجت توربولانسی از معادله اسپالارت-آلاماراس^۵ بصورت رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + U_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = c_{bl} \tilde{S} \tilde{\nu} - c_{wl} f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \right] + \frac{c_{b2}}{\sigma} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \quad (2)$$

در معادله فوق $\tilde{\nu}$ با ν_T (تنش توربولانسی) از طریق رابطه (۳) ارتباط پیدا می‌کند.

$$\nu_T = \tilde{\nu} f_{\nu 1} \quad (3)$$

هزینه محاسباتی این روش بالاست اما با استفاده از روش‌های پردازش موازی و کامپیوترهای امروزی این مشکل تا حدی مرتفع شده است.

توتار [۸] از یک مدل جدید LES که مدل RNG بر پایه زیرشبکه نامیده می‌شود را برای تخمین جریان اطراف ساختمان تست کرد و نشان داد که این روش از دقت خوبی برای تخمین جریان حول ساختمان برخوردار است. آریستودمو و بنتهام [۹] از مدل اسماگورینسکی برای مدل‌سازی جریان باد آشفته تراکم‌پذیر بر روی ۴ ساختمان بهره بردند و نتایج عددی را با نتایج تونل باد مقایسه کردند. نوآوری مقاله در ترکیب روش LES با شبکه محاسباتی قابل انطباق^۱ است به گونه‌ای که امکان تغییر عرض فیلتر و اجرای مدل لزجت گردابه‌ای غیرهمسانگرد وجود دارد. مقادیر خطای سرعت متوسط در برخی مناطق تا ۸۵ درصد نیز گزارش شده است.

همان‌گونه که بیان شد، روش‌هایی که تاکنون برای مدل‌سازی جریان باد بر روی ساختمان بکار رفته‌اند یا دقت کافی نداشته‌اند (اکثر مدل‌های مرسوم RANS مانند k-ε) و یا زمان اجرای آنها بالاست (مدل‌های LES، حتی ساده‌ترین مدل LES که اسماگورینسکی است زمان اجرای نسبتاً بالایی دارد). به همین دلیل در این مقاله از یک روش ترکیبی RANS-LES به نام DES^۲ به منظور کاهش زمان محاسبات در عین حفظ دقت محاسبات استفاده خواهد شد. این مدل اولین بار توسط اسپالارت و آلاماراس [۱۰] در سال ۱۹۹۴ بعنوان یک مدل توربولانسی یک معادله‌ای و نه به عنوان مدل DES ارائه شد و در سال ۱۹۹۷ توسط اسپالارت، جو و استریلت [۱۱] برای اولین بار برای شبیه‌سازی جریان بر روی بال هواپیما با موفقیت بکار گرفته شد. به عبارت دیگر DES یک مدل توربولانسی از نوع LES با دو طول مقیاس طولی اختلاطی می‌باشد که در ناحیه نزدیک دیواره از روش RANS و در ناحیه دور از دیواره از روش LES استفاده می‌کند. انتقال بین این دو ناحیه بسیار مهم است و در ناحیه خاکستری^۳ اتفاق می‌افتد.

اسپالارت در سال ۲۰۰۶ [۱۲] برای رفع برخی ایرادات روش DES اصلاحی بر روی روش مذکور انجام داد و نام روش

1. Adaptive
2. Detached Eddy Simulation
3. Gray area

4. DNS
5. Spalart-Allamaras

یکی دیگر از تغییراتی که در روش DES اعمال می‌شود حذف ناحیه خاکستری یا کوچک کردن این ناحیه می‌باشد، زیرا موجب تولید جواب‌های غیرفیزیکی می‌شود. بدین منظور اسپالارت [۱۲]، تابع f_d را به تعریف مقیاس طولی به شکل روابط (۶) و (۷) اضافه کرد.

$$\tilde{d} = d - f_d \max\{0, d - C_{DES}\Delta\} \quad (۶)$$

$$f_d = 1 - \tanh\left[(8r_d)^3\right] \quad r_d = \frac{\tilde{v}}{S\kappa^2 d^2} \quad (۷)$$

چون در روش جدید قصد بر آن است که ناحیه RANS سریع به ناحیه LES نرسد، لذا روش اصلاح شده، شبیه‌سازی تأخیری گردابه‌های جدا شده نام گرفته است. روش DDES بر روی موارد زیادی بر روی موارد زیادی تست شده است و به عنوان یک استاندارد جدید معرفی شده است [۱۳]. لازم به ذکر است همان‌گونه که فرولیچ در [۱۴] ذکر کرده است، تنها تفاوت روش DDES و DES در نواحی نزدیک دیواره است که لزوماً جواب‌ها دقیق‌تر از روش DES نخواهند شد. در مقاله حاضر نشان داده خواهد شد که در نواحی نزدیک دیواره که جریان برگشتی نیز وجود دارد، روش DES دقیق‌تر از روش DDES عمل می‌کند.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده به منظور مقایسه روش DES با سایر روش‌های توربولانسی، روش اسماکورینسکی که از روش‌های LES صریح صفر معادله‌ای می‌باشد و روش k-ε که یک مدل RANS دو معادله‌ای است، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در معادله (۸) مدل اسماکورینسکی تشریح شده است. لازم به ذکر است که در روش اسماکورینسکی در گام زمانی اول جریان بصورت آرام حل می‌شود، سپس با یافتن مقادیر سرعت‌ها و با استفاده از رابطه تانسور نرخ کرنش \bar{S}_{ij} در معادله (۶) و قراردادن آن در معادله ν_{SGS} مقدار تنش توربولانسی محاسبه می‌شود. در گام‌های بعدی از تنش توربولانسی حاصله برای حل معادله (۱) استفاده خواهد شد.

$$\nu_{SGS} = (C_{SGS}\Delta)^2 |\bar{S}| = C\Delta^2 (2\bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)}, C = 0.1 - 0.25 \quad (۸)$$

1. Delayed Detached Eddy Simulation

در رابطه (۲) C_{b1} ، C_{w1} ، C_{b2} و σ ضرایب ثابت هستند و f_w ، f_{v1} و f_{v2} توابعی هستند که از رابطه (۴) حاصل می‌گردند.

$$f_w = g \left(\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right)^{1/6}, \quad g = r + c_{w2}(r^6 - r)$$

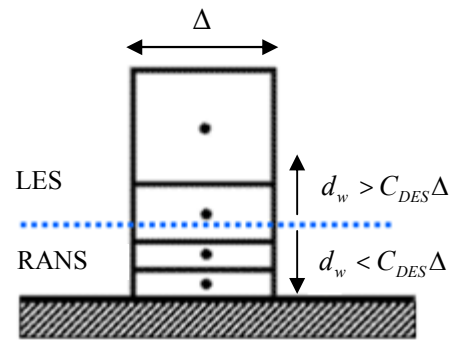
$$r = \frac{\tilde{v}}{S\kappa^2 d_w^2}, \quad \tilde{S} = \Omega + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d_w^2} f_{v2}$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, \quad \chi = \frac{\tilde{v}}{v} \quad (۴)$$

مقیاس طولی DES، d_{DES} می‌باشد که توسط رابطه (۵) محاسبه شده و در معادله (۲) جایگزین d می‌شود.

$$d_{DES} = \min(d_w, C_{DES}\Delta) \quad (۵)$$

در رابطه فوق d_w فاصله از دیواره، $C_{DES} = 0.65$ و $\Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ می‌باشد. به عبارت دیگر این مقیاس طولی بطور اتوماتیک مشخص می‌کند که در چه ناحیه‌ای باید RANS و در کجا باید LES اجرا شود. در نواحی نزدیک دیواره که $d_w \leq C_{DES}\Delta$ است مقیاس طولی، فاصله از دیواره است و در نواحی که $d_w > C_{DES}\Delta$ است مقیاس طولی DES، طول شبکه است. یعنی در نواحی دور از دیواره، متداً تبدیل به یک روش LES یک معادله‌ای می‌شود. در شکل ۱ شمایی از نحوه عملکرد روش DES نشان داده شده است.

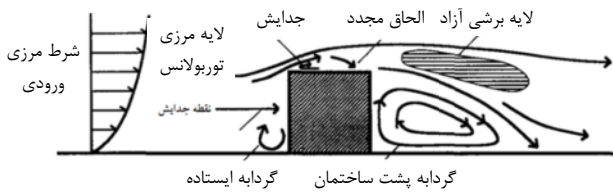


شکل ۱ شمایی از نحوه عملکرد روش DES

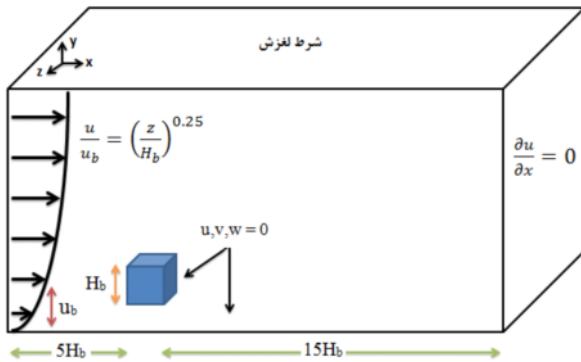
در روابط (۲) تا (۴) ضرایب ثابتی دیده می‌شوند که در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱ مقادیر ضرایب بکار رفته در معادلات (۲) تا (۴) [۱۰]

σ	c_{w3}	c_{w2}	c_{w1}	c_{b2}	c_{b1}
۰/۶۶۶۷	۲	۰/۳	۳/۲۳۹۱	۰/۶۲۲	۰/۱۳۲۵



شکل ۳ نواحی تشکیل شده در جریان باد اطراف یک ساختمان مکعبی شکل [۲]



شکل ۴ نمایش شرایط مرزی اعمال شده

شرط مرزی ورودی باد به دو صورت لگاریتمی و توانی در کدها اعمال می‌شود که برای سهولت بیشتر پروفیل توانی بشکل رابطه (۹) اعمال شده است.

$$\frac{u}{u_b} = \left(\frac{z}{H_b}\right)^\alpha \quad (9)$$

u_b متوسط سرعت جریان در ارتفاع H_b است که H_b ارتفاع شاخص می‌باشد و در این مسأله چون ارتفاع ساختمان یک می‌باشد، برابر یک در نظر گرفته شده است. u_b و α نیز بر اساس مرجع [۵] به منظور مقایسه نتایج به ترتیب برابر یک و ۰.۲۵ در نظر گرفته می‌شود. برای افزایش کیفیت نتایج روش DES و DDES جریان ورودی بر اساس فاکتور شدت توربولانس^۳، ۵ درصد طبق رابطه ۱۰ و ۱۱ آشفته شده است.

$$I = \frac{u'}{U} \quad (10)$$

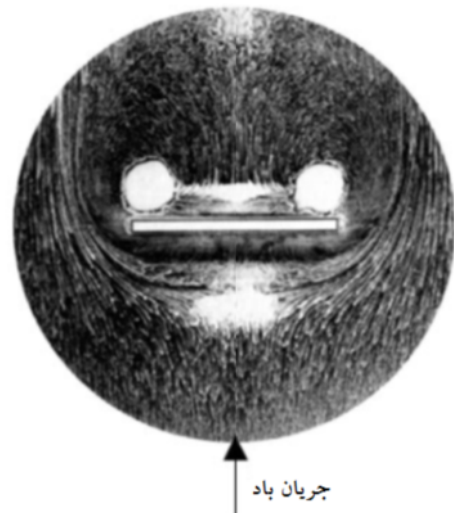
$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} \quad (11)$$

در روابط فوق U میانگین سرعت ورودی و u' سرعت‌های نوسانی هستند. لازم به ذکر است که برای فشار

۳- شرایط مرزی و روش حل

برای بهتر دیده شدن نواحی مختلف جریان باد بر روی یک ساختمان، عکسی از جریان حول ساختمان بلند و باریک در شکل ۲ آورده شده است که با استفاده از تکنیک جریان روغن، گرفته شده است [۱۵]. نواحی سکون در شکل فوق که شامل ناحیه جلوی ساختمان و پشت ساختمان می‌باشد، با رنگ سفید در شکل نشان داده شده‌اند. در این نواحی گردابه‌هایی تشکیل می‌شوند که گردابه جلوی ساختمان که در اطراف و ناحیه پشت ساختمان نیز امتداد می‌یابد، گردابه نعل اسبی^۱ گفته می‌شود. دو گردابه دیگر نیز در پشت ساختمان تشکیل می‌شوند که با یکدیگر ترکیب شده و گردابه‌ای بزرگ‌تر در پشت ساختمان بوجود می‌آورند. اگر ابعاد ساختمان نسبت به یکدیگر قابل اغماض نباشد، آنگاه علاوه بر گردابه‌های ذکر شده، گردابه‌ای نیز در پشت بام تشکیل می‌شود که موجب می‌شود جریان از روی بام جدا شود و مجدداً بر روی بام برگردد^۲. این امر در شکل ۳ نشان داده شده است.

اعمال شرایط مرزی بطور صحیح، به نحو آشکاری بر کیفیت نتایج تأثیر می‌گذارد. در شکل ۴ شرایط مرزی اعمال شده در جریان باد بر روی ساختمان تشریح شده است. ابعاد ساختمان $1 \times 1 \times 1$ است و ابعاد دامنه حل $11 \times 11 \times 21$ می‌باشد که ۲۱ در جهت حرکت باد است.

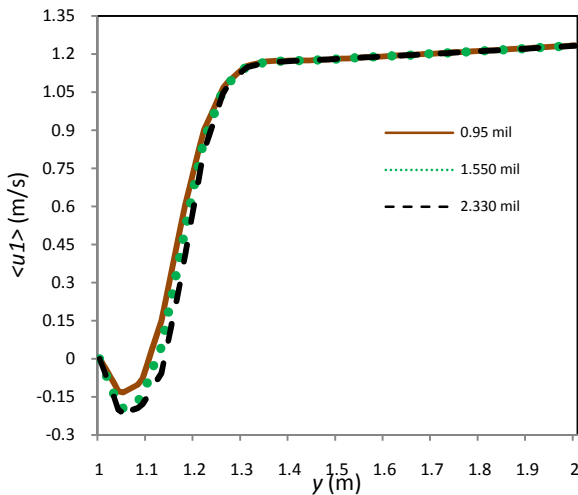


شکل ۲ گردابه‌های تشکیل شده در اطراف ساختمان باریک و بلند با تکنیک جریان روغن [۱۵]

1. Horseshoe Vortex
2. Reattachment zone

ناویر- استوکس بر اساس روش TVD مرتبه دوم و ترمهای دیفیوژن با استفاده از روش تفاضل مرکزی جداسازی شده‌اند. لازم به ذکر است که برای حل کوپلینگ سرعت و فشار در معادله ناویر- استوکس از الگوریتم PISO با دو تصحیح فشار استفاده شده است.

نکته مهمی که بایستی به آن اشاره کرد شبکه بکار رفته در شبیه‌سازی می‌باشد. شبکه بکار رفته در مساله آنقدر ریز شده است که جوابهای حاصله مستقل از شبکه^۴ شده‌اند. این امر در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، مسأله در شبکه‌ای با $2/330/000$ سلول مستقل از تعداد مش شده است. به دلیل زیاد بودن تعداد سلولها از پردازش موازی در محیط سیستم عامل لینوکس و از یک تا ۴ پردازنده ۴ هسته‌ای در سامانه پردازش موازی دانشگاه تربیت مدرس (این سامانه مجهز به ۱۶ پردازشگر ۴ هسته‌ای می‌باشد) استفاده شده است. همچنین در این تعداد شبکه چون مقدار y^+ در دیواره‌ها از ۳۰ کم‌تر در حدود ماکزیمم ۲۵ می‌باشد از مدل دیواره^۵ صرف‌نظر شده است.



شکل ۶ نتایج استقلال از شبکه

۴- نتایج عددی

در این قسمت برای ارزیابی مدل DES و DDES جریان آشفتنه باد بر روی یک ساختمان با روش‌های توربولانسی رایج (همانند $k-\epsilon$ و اسماکورینسکی) از لحاظ دقت و زمان محاسبه،

4. Grid Independent Solution
5. Wall Function

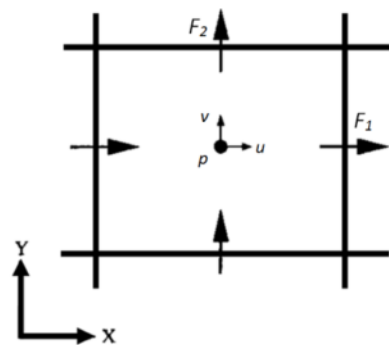
میانگین ورودی شرط گرادیان صفر و برای فشار میانگین خروجی نیز شرط فشار اتمسفر قرار داده شده است. برای دیواره‌ها شرط عدم لغزش و برای سرعت خروجی شرط گرادیان سرعت صفر اعمال شده است. همچنین برای دیواره‌های جانبی دامنه محاسباتی، شرط لغزش^۱ اعمال شده است که در رابطه (۱۲) آورده شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad w = 0 \quad \text{برای صفحه پایینی}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad v = 0 \quad \text{برای صفحات کناری} \quad (12)$$

لازم به ذکر است که مقدار \bar{t} در دیواره برابر صفر در نظر گرفته می‌شود تا از بی‌نهایت شدن ترم \bar{S} در معادله (۴) جلوگیری شود. برای حل معادلات حاکم از نرم افزار اوپن فوم ویرایش ۲.۰۱ و برای جداسازی معادلات حاکم از روش حجم محدود^۲ استفاده شده است.

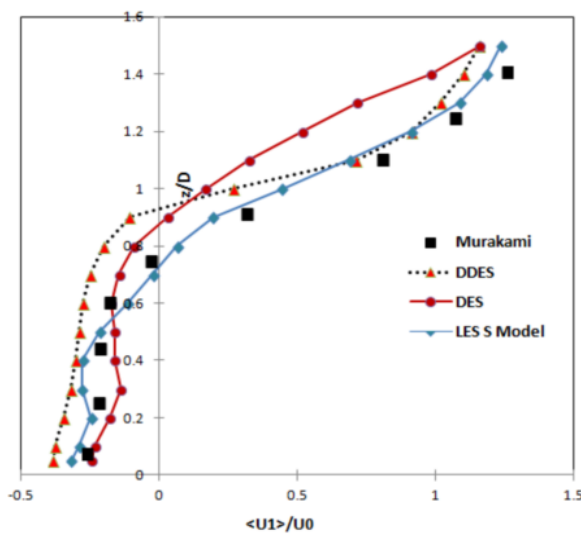
در اوپن فوم معادلات حاکم بر روی یک شبکه هم مکان^۳ حل می‌شوند که اولین بار توسط رای و چو در سال ۱۹۸۳ ارائه شده است [۱۶]. در شکل ۵ نمایی از یک شبکه هم مکان که در آن سرعت و فشار بر روی یک شبکه یکسان حل می‌گردند، آورده شده است. F_1 و F_2 بیانگر شار جرمی عبوری از سطح المان هستند. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌گردد، سرعت و فشار در مرکز المان و شار جرمی در سطح المان با استفاده از میانبایی رای و چو محاسبه می‌شود.



شکل ۵ نمایی از یک شبکه هم مکان

ترم زمانی معادله ناویر- استوکس بر اساس روش اولر مرتبه اول ضمنی، جداسازی شده است. ترم‌های جایجایی معادله

1. Slip Condition
2. Finite Volume
3. Collocated Grid



شکل ۸ مقایسه پروفیل سرعت در پشت ساختمان در روش‌های مختلف توربولانسی

روش DES مقادیر سرعت را در ارتفاع کمتر از یک با دقت قابل قبولی بدست آورده اما در مقادیر بیشتر از یک دارای دقت کافی نمی‌باشد. در ناحیه پشت ساختمان مدل DDES نسبت به DES از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد.

از شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان فهمید که مدل DES در ناحیه پشت ساختمان و مدل DDES در ناحیه پشت بام دارای دقت کافی نیستند و هر یک تنها یک ناحیه را به خوبی محاسبه می‌کنند. دلیل عدم دقت مدل‌های DES و DDES تسخیر مقادیر کمتر انرژی جنبشی توربولانسی نسبت به مدل‌های LES به دلیل ذات ترکیبی روش می‌باشد که در بخش بعدی به وضوح دیده می‌شود. برای رفع این مشکل پروفیل سرعت ورودی توسط یک روش تصادفی، آشفته شده و مجدداً نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده است که حاصل آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است.

با مراجعه به شکل‌های فوق می‌توان به وضوح دید که اثر آشفتگی جریان ورودی خصوصاً در پشت ساختمان کیفیت نتایج روش DES را تا حد بسیار زیادی افزایش داده است.

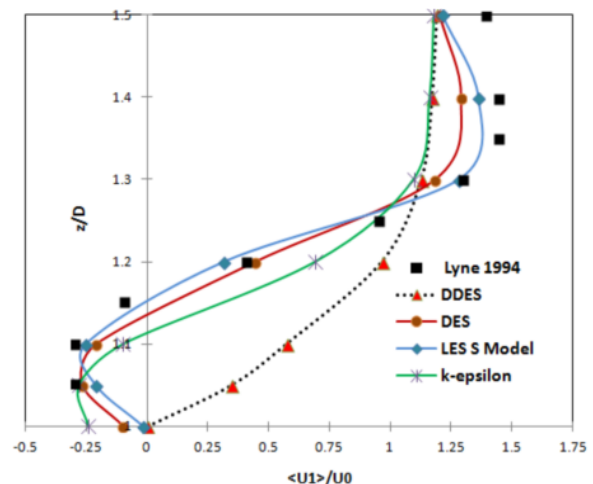
گردابه‌های تشکیل شده در اطراف و پشت ساختمان توسط روش DES و DDES در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده‌اند. گردابه نعل اسبی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ (به ترتیب توسط مدل DES و DDES) در جلو و کناره‌های ساختمان تشکیل شده است.

مقایسه شده است. همچنین به منظور صحت‌سنجی، نتایج حاصل با نتایج تجربی سایر محققان نیز مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که روش DES از پتانسیل بسیار خوبی برای شبیه‌سازی جریان باد بر روی مجموعه‌ای از ساختمان‌ها برخوردار است.

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، در فیزیک جریان باد بر روی یک ساختمان سه ناحیه بسیار مهم وجود دارند که برای مقایسه نیز پروفیل سرعت و طول گردابه‌ها در آن نواحی مورد قیاس قرار گرفته‌اند. در ابتدا پروفیل سرعت متوسط بر روی مرکز پشت بام تا ارتفاع ۱/۵ متر با استفاده از مدل‌های مختلف توربولانسی با نتایج تجربی در شکل ۷ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که ورودی جریان باد برای روش DES و DDES در شکل‌های ۷ و ۸ آشفته نمی‌باشد.

همان‌گونه که از شکل فوق استنباط می‌شود، روش LES با مدل زیرشبکه اسماکورینسکی و DES جواب‌های دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌ها داده‌اند. روش DDES حتی نتوانسته جریان برگشتی را تخمین بزند و روش $k-\epsilon$ نیز خطای زیادی نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان داده است. برای ارزیابی بیشتر، پروفیل سرعت در پشت ساختمان نیز با داده‌های تجربی و با روش‌های توربولانسی دیگر مقایسه شده است که در شکل ۸ نشان داده شده است.

از شکل ۸ می‌توان دریافت که مدل اسماکورینسکی و DDES نسبت به سایر روش‌ها ناحیه پشت ساختمان را با دقت بیشتری محاسبه کرده است.

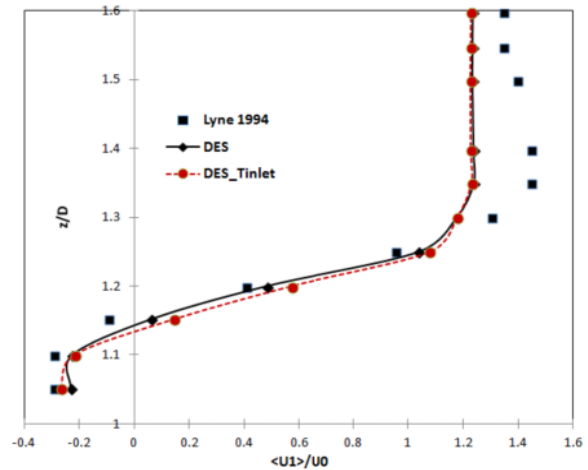


شکل ۷ مقایسه پروفیل سرعت در مرکز پشت بام در روش‌های مختلف توربولانسی

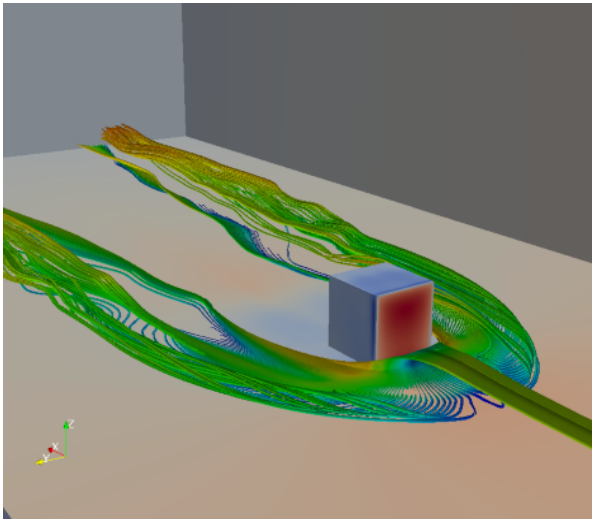
اسماگورینسکی و DES از دقت بالاتری برخوردار هستند که یکی از دلایل آن، تسخیر میزان انرژی جنبشی توربولانسی دقیقتری نسبت به بقیه روش‌های ذکر شده می‌باشد.

جدول ۲ مقایسه طول گردابه‌های پشت ساختمان و روی بام

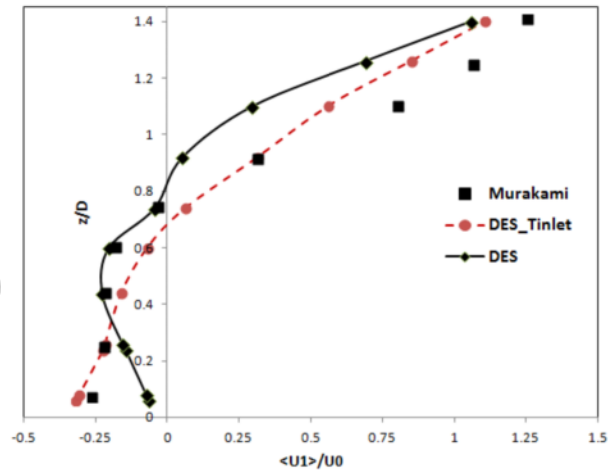
خطا	گردابه روی بام	گردابه پشت	روش
-	وجود دارد	۱/۴	تجربی
٪۴۲/۸	تسخیر می‌کند	۲/۰۰	DES
٪۴۶/۴	تسخیر نمی‌کند	۲/۰۵	DDES
٪۱۴/۳	تسخیر می‌کند	۱/۶	اسماگورینسکی
٪۶۴/۳	تسخیر نمی‌کند	۲/۳	k-ε



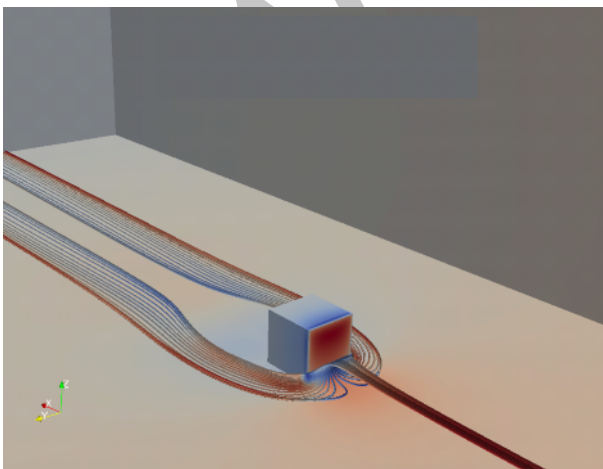
شکل ۹ مقایسه پروفیل سرعت در مرکز پشت بام بین روش DES با ورودی توربولانس و بدون توربولانس با نتایج تجربی



شکل ۱۱ نمایش گردابه نعل اسبی در اطراف ساختمان که با استفاده از روش DES حاصل شده است



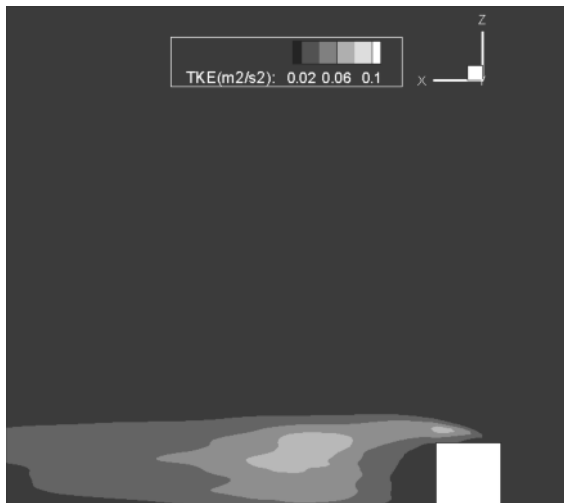
شکل ۱۰ مقایسه پروفیل سرعت در پشت ساختمان بین روش DES با ورودی توربولانس و بدون توربولانس با نتایج تجربی



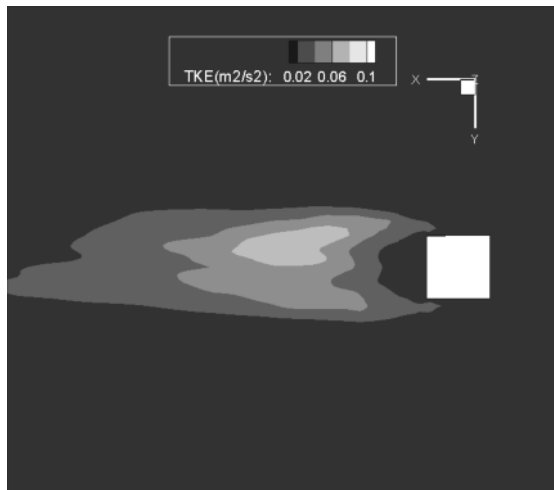
شکل ۱۲ نمایش گردابه نعل اسبی در اطراف ساختمان که با استفاده از روش DDES حاصل شده است

همچنین گردابه‌ای در پشت ساختمان تشکیل می‌شود که خود از ترکیب دو گردابه کوچک‌تر که در کناره‌های پشت ساختمان با یکدیگر ترکیب شده‌اند، بوجود آمده است. گردابه پشت ساختمان در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ برای مدل‌های DES و DDES نشان داده شده است. طول این گردابه یکی از معیارهای مقایسه دقت مدل توربولانسی می‌باشد. به همین منظور در جدول ۲ طول گردابه پشت ساختمان و نحوه تسخیر گردابه روی بام برای ارزیابی با نتایج تجربی، آورده شده‌اند.

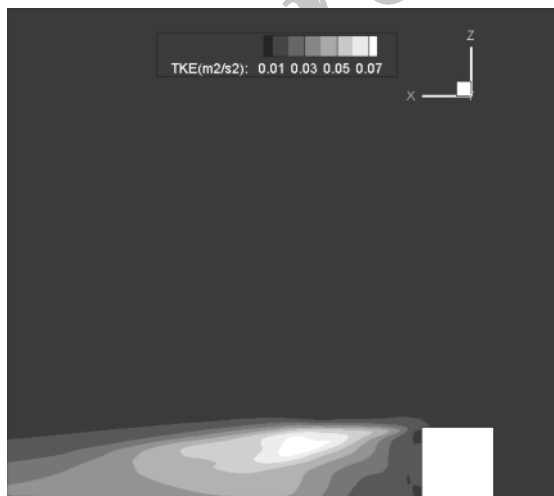
در جدول ۲ طول گردابه‌های پشت ساختمان و روی بام با استفاده از مدل‌های DES، DDES، اسماگورینسکی و $k-\epsilon$ آورده شده است. همان‌گونه که از نتایج پیداست، روش



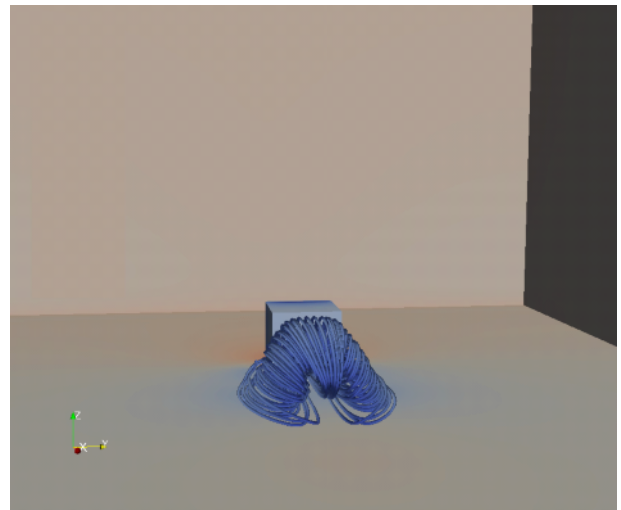
شکل ۱۵ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $y = 5.5$ با استفاده از مدل DES



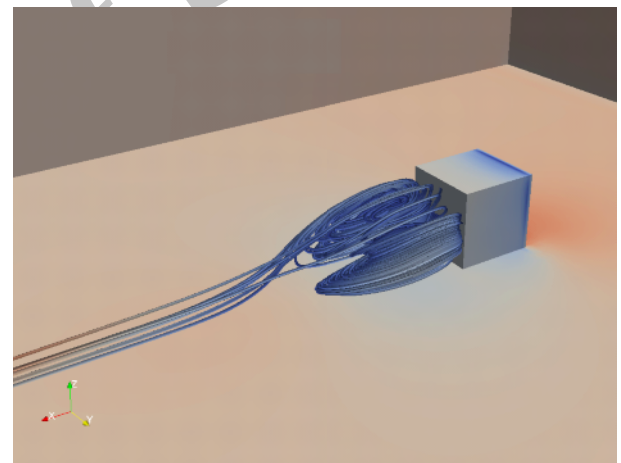
شکل ۱۶ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $z = 0.5$ با استفاده از مدل DES



شکل ۱۷ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $y = 5.5$ با استفاده از مدل DDES



شکل ۱۳ نمایش گردابه پشت ساختمان با استفاده از مدل DES که از ترکیب دو گردابه متقارن با یکدیگر تشکیل شده است

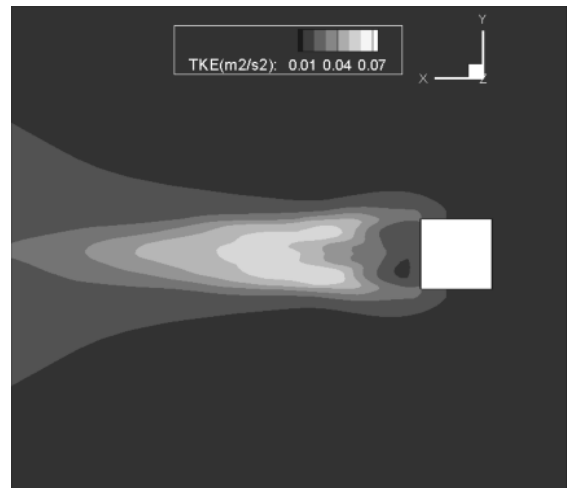


شکل ۱۴ نمایش گردابه پشت ساختمان با استفاده از مدل DDES که از ترکیب دو گردابه متقارن با یکدیگر تشکیل شده است

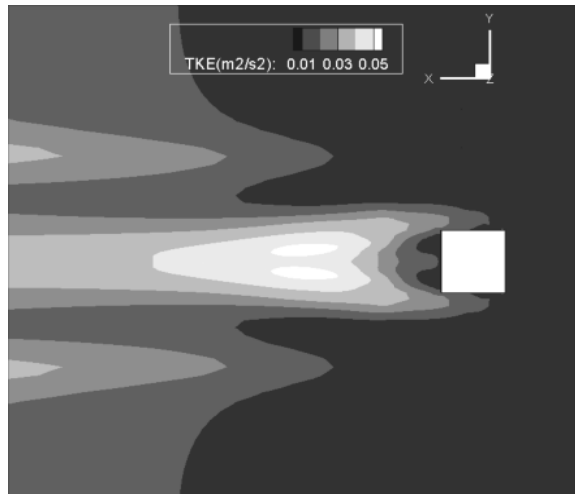
تنش‌های توربولانسی دارای ۶ مؤلفه $\overline{u'u'}$ ، $\overline{u'v'}$ ، $\overline{u'w'}$ ، $\overline{v'v'}$ ، $\overline{v'w'}$ و $\overline{w'w'}$ می‌باشد که بر اساس نتایج بدست آمده در این شبیه‌سازی، مؤلفه $\overline{u'u'}$ بزرگ‌تر از سایر مؤلفه‌هاست و سایر مؤلفه‌ها تقریباً در مدل‌های مختلف دارای مقدار ماکزیمم تقریباً یکسانی می‌باشند که به دلیل اختصار از آوردن نتایج آن خودداری شده است. از طرفی انرژی جنبشی توربولانسی تسخیر شده برابر است با نصف مجموع مؤلفه‌های $\overline{u'u'}$ ، $\overline{v'v'}$ و $\overline{w'w'}$. شکل‌های ۱۵ تا ۲۲ بیانگر میزان تنش توربولانسی در مدل‌های مختلف می‌باشند.



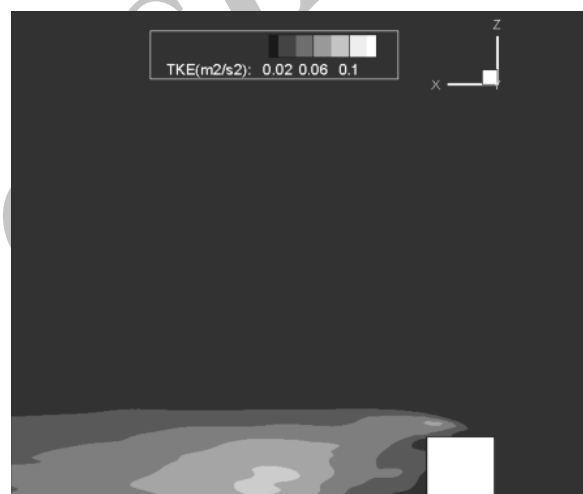
شکل ۲۱ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $y = 5.5$ با استفاده از مدل $k-\varepsilon$



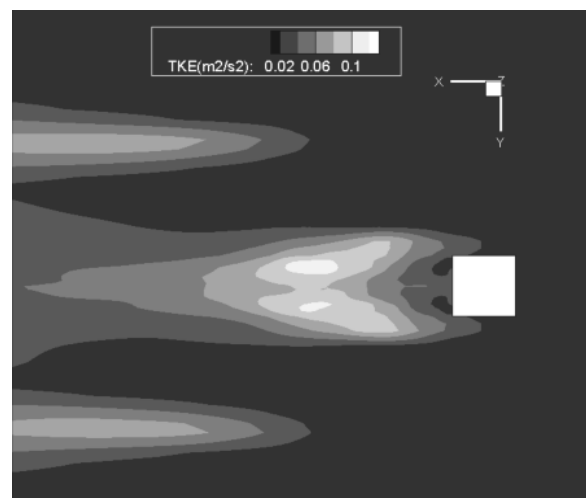
شکل ۱۸ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $z = 0.5$ با استفاده از مدل DDES



شکل ۲۲ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $z = 0.5$ با استفاده از مدل $k-\varepsilon$



شکل ۱۹ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $y = 5.5$ با استفاده از مدل اسماکورینسکی



شکل ۲۰ مقدار انرژی توربولانسی در صفحه $z = 0.5$ با استفاده از مدل اسماکورینسکی

همان‌گونه که در شکل‌های مذکور دیده می‌شود، بیشینه تنش توربولانسی در صفحه $y=5.5$ با استفاده از مدل‌های DES، DDES، اسماکورینسکی و $k-\varepsilon$ به ترتیب برابر ۰/۰۹، ۰/۰۶۵، ۰/۰۹ و ۰/۰۵ است که در پشت ساختمان اتفاق می‌افتد. همچنین در صفحه $z=0.5$ (در راستای ارتفاع) نیز ماکزیمم تنش توربولانسی متعلق به مدل اسماکورینسکی و DES است که به ترتیب برابر ۰/۱۱ و ۰/۰۹ است و در پشت ساختمان قرار دارد. این مقدار برای روش‌های DDES و $k-\varepsilon$ به ترتیب برابر ۰/۰۶ و ۰/۰۵ می‌باشد. این به آن معناست که مدل اسماکورینسکی و پس از آن DES در هر دو صفحه مورد بررسی، میزان بیشتری از انرژی جنبشی توربولانسی را تسخیر کرده‌اند. در شبیه‌سازی جریان آشفته باد حول ساختمان، روش

باید به این نکته توجه داشت که دلیل نزدیکی نتایج در این بخش اینست که ضریب پسا شاخصی انتگرالی است که در آن خطاها سرشکن شده‌اند و در نتیجه مقدار بدست آمده، رفتاری هموارتر^۱ خواهد داشت. لازم به ذکر است که دقت نتایج در این بخش، مستقیماً بر روی محاسبه نیروی وارده بر ساختمان، تأثیر مستقیم می‌گذارد. البته اهمیت این موضوع در ساختمان‌های عموماً بالاتر از ۱۰۰ متر که دیگر در لایه مرزی باد نیستند و اثر باد بر روی سازه جدی می‌شود، بیشتر مورد توجه است و در ساختمان‌های کم ارتفاع چندان اهمیت ندارد. در جدول ۴ سرعت اجرای مدل‌های مختلف توربولانسی بررسی شده در این مقاله، با یکدیگر مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که از نتایج جدول مذکور مشخص است، در این شبیه‌سازی روش $k-\varepsilon$ به نسبت مدل‌های دیگر سریعتر و روش اسماکورینسکی کندتر می‌باشد که دلیل آن تفاوت در ذات روش‌هاست، چونکه روش‌های RANS از میانگین‌گیری زمانی (که موجب میرایی بخش مهمی از نوسانات می‌شود) و روش‌های LES از میانگین‌گیری مکانی استفاده می‌کنند. روش DES به نسبت روش اسماکورینسکی ۱۵/۸ درصد سریع‌تر و روش $k-\varepsilon$ نسبت به مدل اسماکورینسکی ۲۸/۷ درصد سریع‌تر است. لازم به ذکر است که نتایج زمان اجرا در جدول ۴ با شبکه $2/330/000$ سلولی بر روی ۱ نود با ۴ هسته می‌باشد. در یک شبیه‌سازی دیگر از یک شبکه با $3.800.000$ سلول استفاده شده است تا نتایج زمان اجرا در شبکه‌های مختلف نیز نشان داده شود. این شبیه‌سازی بر روی ۴ نود مجزا و در مجموع با استفاده از ۱۶ هسته انجام شده است. نتیجه این شبیه‌سازی در انتهای جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ مقایسه زمان اجرای مدل‌های مختلف توربولانسی

در جریان باد حول یک ساختمان با ابعاد واحد		
روش	تعداد سلول	زمان اجرا (روز)
DES	۲/۳۳۰/۰۰۰	۲/۵۵
DDES	۲/۳۳۰/۰۰۰	۲/۵۸
اسماگورینسکی	۲/۳۳۰/۰۰۰	۳/۰۳
$k-\varepsilon$	۲/۳۳۰/۰۰۰	۲/۱۶
DES	۳/۸۰۰/۰۰۰	۱/۳۲
اسماگورینسکی	۳/۸۰۰/۰۰۰	۱/۷۹

همان‌گونه که از نتایج مشخص است، در شبکه ریز روش

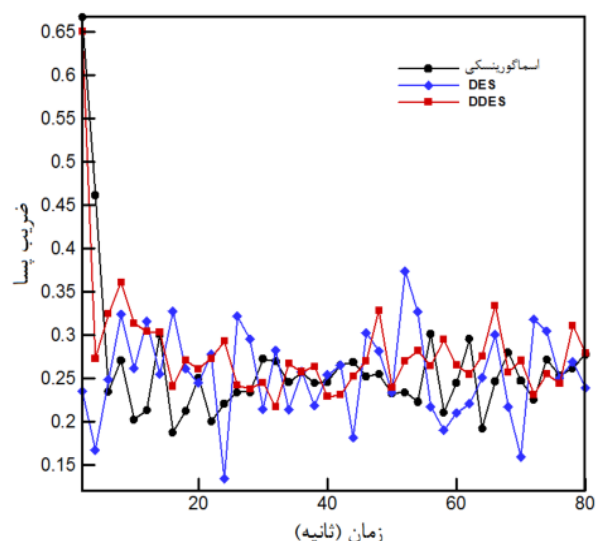
1. Smooth

$k-\varepsilon$ میزان کمتری از انرژی جنبشی توربولانسی را تسخیر کرده که این امر این روش را برای شبیه‌سازی مذکور تا حدی غیردقیق می‌کند.

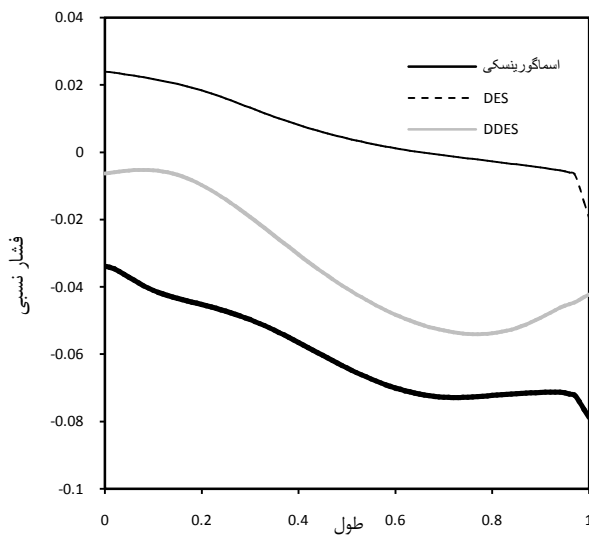
در شکل ۲۳ ضریب پسا در زمانهای مختلف با استفاده از مدل‌های مختلف توربولانسی نمایش داده شده است. به منظور وضوح بیشتر از آوردن نتایج مربوط به روش $k-\varepsilon$ در این شکل خودداری شده است، اما میانگین زمانی نتایج تمامی مدل‌ها در جدول ۳ به منظور مقایسه آورده شده است. به دلیل نبودن نتایج ضریب پسا در رینولدز ۲۲۰۰۰ و به دلیل این که مقادیر سرعت‌ها و انرژی جنبشی توربولانسی در مدل اسماکورینسکی دقیق‌تر از سایر مدل‌ها بوده است، در این بخش مقادیر خطا نسبت به مدل اسماکورینسکی سنجیده شده است. با مراجعه به شکل ۲۳ و جدول ۳ می‌توان دریافت که مدل‌های اسماکورینسکی و DES مقدار میانگین ضریب پسا بر روی ساختمان را با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های DDES و $k-\varepsilon$ محاسبه کرده‌اند. روش DES، DDES و $k-\varepsilon$ به ترتیب خطایی معادل ۰.۴٪، ۰.۷۱۶٪ و ۰.۸۱۵٪ در محاسبه ضریب پسا را داشته‌اند.

جدول ۳ مقایسه ضریب پسا بر روی یک ساختمان با ابعاد واحد در رینولدز ۲۲۰۰۰

روش	C_D	خطا
DES	۰/۲۵۷	۰.۴٪
DDES	۰/۲۶۶	۰.۷۱۶٪
اسماگورینسکی	۰/۲۴۷	-
$k-\varepsilon$	۰/۲۲۶	۰.۸۱۵٪



شکل ۲۳ ضریب پسی ساختمانی با ابعاد واحد در رینولدز ۲۲۰۰۰ با استفاده از مدل‌های مختلف توربولانسی



شکل ۲۵ توزیع فشار نسبی بر روی خط مرکزی وجه پشتی ساختمان

در وجه پشتی ساختمان، بیشترین فشار در قسمت پایین ساختمان است و هر چه به سمت بالا حرکت کنیم فشار افت می‌کند.

در بخش بعدی به جمع‌بندی نتایج مدل‌های بکار رفته در این شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

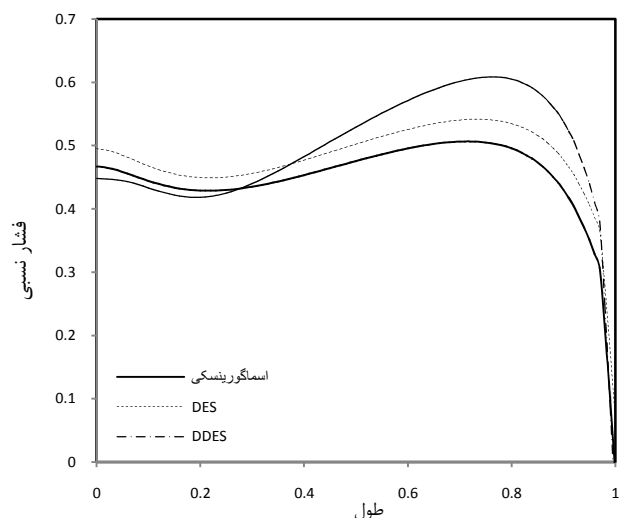
با استفاده از مباحثی که در بخش قبلی ذکر گردید، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- روش DES به همراه آشفتگی‌سازی جریان ورودی از دقت خوبی برای تخمین میدان متوسط جریان و انرژی جنبشی توربولانسی در شبیه‌سازی جریان باد بر روی ساختمان برخوردار می‌باشد. همچنین زمان اجرای آن نیز نسبت به مدل اسماگورینسکی که ساده‌ترین مدل LES است، کمتر می‌باشد.
- با این که روش DDES به نوعی شبیه‌سازی DES می‌باشد اما به دلیل اینکه مکان ناحیه خاکستری در آن تغییر یافته است، از دقت کافی برای تخمین میدان متوسط جریان و انرژی جنبشی توربولانسی برخوردار نیست. لازم به ذکر است که آشفتگی‌سازی جریان ورودی نیز تغییری در رفتار روش مذکور ایجاد نکرده است.

- روش $k-\epsilon$ همان‌طور که در مقالات گذشته نیز به آن اشاره شده است از دقت کافی برای شبیه‌سازی جریان باد برخوردار نیست که دلیل آن عدم دقت مدل در محاسبه مقدار

DES به نسبت روش اسماگورینسکی ۲۶٪ سریع‌تر بوده است که دلیل آن افزایش تعداد شبکه در ناحیه نزدیک به دیواره در شبکه مذکور و تلفات شبکه در پردازش موازی می‌باشد. اینجاست که مزیت اصلی مدل ترکیبی DES، خود را به وضوح نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این بخش نشان داده شد، نتایج عددی مدل ترکیبی DES به نسبت روش $k-\epsilon$ بسیار دقیق‌تر می‌باشد و با این که دقت آن نسبت به مدل اسماگورینسکی چندان کاهش نمی‌یابد، اما زمان اجرای آن ۲۶٪ کمتر از مدل مذکور در شبکه ریز می‌باشد که این مدل را برای شبیه‌سازی‌های بزرگ ایده‌آل می‌سازد.

همچنین به منظور کاربردهای تهویه مطبوع و محاسبه نیروی وارده بر ساختمان توزیع فشار نسبی بر روی خط مرکزی وجه روبرویی و پشت ساختمان در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۲۴ مشخص است بیشترین فشار در وجه روبرویی در ارتفاعی معادل ۰/۸ ارتفاع ساختمان اتفاق می‌افتد و مدل‌اسماگورینسکی و DES تطابق خوبی دارند. در پشت ساختمان همان‌گونه که قبلاً نیز به آن اشاره شد، مدل اسماگورینسکی با مدل‌های DES و DDES کاملاً منطبق نیستند. با مراجعه به شکل ۲۵ می‌توان این تفاوت را مشاهده کرد. روش DES و اسماگورینسکی الگوی کاملاً مشابهی را طی می‌کنند (لزوماً مدل اسماگورینسکی در نزدیکی دیواره با جریان بازگشتی، به دلیل ثابت بودن ضریب مدل مذکور، جواب‌های دقیق‌تری نمی‌دهد) اما روش DDES از الگوی متفاوتی برخوردار است.



شکل ۲۴ توزیع فشار نسبی بر روی خط مرکزی وجه جلوی ساختمان

- [5] Murakami S., "Numerical simulation of turbulent flow field around cubic model current status and applications of $k-\epsilon$ model and LES", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 33, 1990, pp. 139-152.
- [6] Lakehal D., Rodi W., "Calculation of the flow past a surface-mounted cube with two-layer turbulence models", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 67-68, 1997, pp. 65-78.
- [7] Rodi W., "Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 69-71, 1997, pp. 55-75.
- [8] Tutar M., Oguz G., "Large eddy simulation of wind flow around parallel buildings with varying configurations", *Fluid Dynamics Research*, No. 31, 2002, pp. 289-315.
- [9] Aristodemou E., Bentham T., Pain C., Colville R., Robins A., ApSimon H., "A comparison of mesh-adaptive LES with wind tunnel data for flow past buildings: Mean flows and velocity fluctuations", *Atmospheric Environment*, No. 43, 2009, pp. 6238-6253.
- [10] Spalart P.R., Allmaras S.R., "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows", *La Recherche Aerospaciale*, No. 1, 1994, pp. 5-21.
- [11] Shur M., Spalart P.R., Strelets M., Travin A., "Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack", *Engineering Turbulence Modeling and Experiments*, No. 4, 1999, pp. 669-678.
- [12] Spalart P.R., "Young person's guide to Detached Eddy Simulation grids", *Technical Report NASA/CR-2001-211032, NASA Langley Research Center*, 2001.
- [13] Spalart P.R., Deck S., Shur M.L., Squires K.D., Strelets M.K., Travin A., "A new version of Detached eddy simulation resistant to ambiguous grid densities", *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, No. 20, 2006, pp. 181-195.
- [14] Frohlich J., von Terzi D., "Hybrid LES/RANS Methods for the Simulation of Turbulent Flows", *Progress in Aerospace Sciences*, No. 44, 2008, pp. 349-377.
- [15] Huber, A.H., "Wind-Tunnel and Gaussian Plume Modeling of Building Wake Dispersion", *Atmospheric Environment Part A-General Topics*, No. 25, 1991, pp. 1237-1249.
- [16] Rhie C., Chow W., "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation", *AIAA Journal*, No. 21, 1983, pp. 1525-1532.

تنش توربولانسی است که در نهایت منجر به مقادیر غیر دقیق سرعت متوسط و انرژی جنبشی توربولانسی می‌شود. همان‌گونه که از بخش نتایج حاصل گردید مقادیر انرژی توربولانسی ماکزیمم در این مدل کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده شده‌اند. - مدل اسماکورینسکی میدان سرعت میانگین و انرژی جنبشی توربولانسی را بهتر از روش‌های $k-\epsilon$ و DDES تخمین می‌زند، اما نیاز به زمان بیشتری برای محاسبات دارد که این موضوع این روش را برای شبیه‌سازی‌های بزرگ‌تر غیراقتصادی می‌کند.

مدل DES در شبیه‌سازی جریان باد آشفته با تعداد نسبتاً زیادی سلول در این مقاله بکار رفته است که نتایج حاصل بر دقت خوب این روش صحنه می‌گذارد. ضمن این که زمان اجرای این مدل نیز ۲۶٪ کاهش نسبت به مدل اسماکورینسکی از خود نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی‌های بزرگ‌تر این مقدار خود را به خوبی نشان خواهد داد.

۶- تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است از زحمات جناب آقای دکتر حمید نادران استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر و مهندس محمود نادران که در راه‌اندازی کلاستر آزمایشگاه CFD دانشگاه تربیت مدرس کمک‌های شایانی نمودند، تشکر و قدردانی شود.

۷- مراجع

- [1] Deardorff J.W., "On the magnitude of the subgrid scale eddy coefficient", *Journal of Computational Physics*, No. 7, 1971, pp. 120-133.
- [2] Murakami S., "Current status and future trends in computational wind engineering", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 67-68, 1997, pp. 3-34.
- [3] Murakami S., Mochida A., "3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the $k-\epsilon$ model", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 31, 1988, pp. 283-303.
- [4] Murakami S., Mochida A., "Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow around buildings using the $k-\epsilon$ turbulence model", *Journal of Building and Environment*, No. 24, 1989, pp. 51-64.