

شبیه سازی نحوه پخش آلودگی در پشت یک ساختمان با استفاده از یک روش RANS-LES

قاسم حیدری نژاد^{۱*}، امیرمحمد جدیدی^۲

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>امروزه مبحث آلودگی هوا به یکی از بزرگترین معضلات خصوصا در شهرهای بزرگ تبدیل شده است که اثرات فراوانی بر محیط زیست و سلامتی افراد می گذارد. در این مقاله نحوه پخش آلاینده گازی سبک در اطراف یک ساختمان در جریان آشفته ۳ بعدی غیرقابل تراکم با استفاده از یک مدل توربولانسی ترکیبی تشریح می گردد. آلودگی در اطراف یک ساختمان در رژیم باد کم سرعت ممکن است در نواحی خاصی تجمع یابد و برای محیط زیست و پیاده رو مشکلات عمده ای ایجاد کند. جریان آشفته باد بر روی ساختمان بدلیل وجود پیچیدگیهایی چون گوشه های تیز، وجود گردابه های گوناگون، اثر زمین و غیره یکی از بهترین انتخابها برای ارزیابی مدل های توربولانسی می باشد. مدل ترکیبی DES یک مدل ترکیبی RANS-LES یک معادله ای برای شبیه سازی جریان آشفته است که بدلیل ذات روش در نزدیکی مرز، شبیه RANS و دور از آن همانند LES عمل می کند. متعاقبا زمان محاسبه این روش ترکیبی در مقایسه با روشهای یک معادله ای از نوع LES کاهش خواهد یافت. بمنظور ارزیابی مدل DES، نتایج حاصله از آن با مدل های اسماکورینسکی و یک معادله ای مقایسه شده است. همچنین به منظور صحت سنجی، نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج تجربی سایر محققین مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که روش DES تطابق خوبی با نتایج تجربی و سایر مدل های توربولانسی از نوع LES دارد و از پتانسیل خوبی برای شبیه سازی های بزرگتر برخوردار می باشد.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۳</p>
	<p>واژگان کلیدی: آلاینده گازی، شبیه سازی کامپیوتری، مدل توربولانسی ترکیبی، مدل توربولانسی DES، ساختمان، آشفته گی، انتقال جرم.</p>

۱- مقدمه

در شرایط مطمئنی تخمین بزنند. اگرچه دلیل عمده چنین تحقیق هایی توسط مطالعات تجربی در تونل باد انجام می پذیرد، اما شبیه سازی تجربی بطور نسبی کم هزینه تر و سریعتر برای نیل به این مقصد می باشد. امروزه دینامیک سیالات محاسباتی برای تخمین الگوی پخش آلودگی در اطراف ساختمان بسیار مورد توجه است.

مطالعه پخش آلودگی حول ساختمان یکی از موضوعات مهم تحقیق بدلیل اهمیت فزاینده به سلامتی انسانها بدلیل آلودگی هوا در دهه های اخیر می باشد [۱]. برای اطمینان از اینکه غلظت آلاینده از حد سلامت انسانها تجاوز نکند، طراحان می باید نحوه پخش آلاینده در حول ساختمان را

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: gheidari@modares.ac.ir

۱. استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲.

روشهای RANS است. برای غلبه بر این مشکل در دهه‌های اخیر پیشرفتهای زیادی برای ترکیب روش LES و RANS انجام شده است تا روشی ترکیبی حاصل گردد که مزایای هر دو روش LES و RANS را داشته باشد ضمن اینکه از معایب هر دو روش بکاهد.

مدل DES توسط اسپالارت و آلامارس [۱۱] بعنوان یک مدل ترکیبی یک معادله‌ای با دو مقیاس طولی پیشنهاد گردید و نتایج بسیار خوبی از آن خصوصا در جریانهایی با جدایش بالا حاصل گردید [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. هدف از طراحی این مدل تخمین میدان جریان آشفته در رینولدزهای مختلف با یک هزینه محاسباتی معقول بوده است. بدین منظور مشخصه‌های مدل‌های RANS با مدل‌های LES ترکیب شده است. انتقال از ناحیه RANS به LES بطور اتوماتیک و با مقایسه دو مقیاس طولی صورت می‌پذیرد که نام این بخش مهم ناحیه خاکستری^۳ می‌باشد. اسپالارت در سال ۲۰۰۶ [۱۵] برای رفع برخی ایرادات روش DES اصلاحی بر روی روش مذکور انجام داد و نام روش جدید DDES نام گرفت.

ارزیابی مدل DES و DDES در شبیه‌سازی جریان آشفته باد بر روی یک ساختمان توسط حیدری نژاد و جدیدی [۱۶] انجام شد و مدل‌های مذکور با مدل‌های توربولانسی نظیر اسماگورینسکی و $k-\epsilon$ مقایسه شدند. نتایج حاکی از آن بوده که روش DES از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های RANS برخوردار است و زمان اجرای کمتری نسبت به مدل‌های LES دارد و از پتانسیل خوبی برای شبیه‌سازی جریان آشفته باد بر روی ساختمان برخوردار است.

پخش آلودگی در نواحی کم سرعت گردابه‌ای بدلیل تجمع آلاینده خصوصا در نواحی پشت ساختمان و اثرات نامطلوب آن بر سلامتی افراد از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این مطالعه ارزیابی مدل توربولانسی ترکیبی DES به منظور شبیه‌سازی پخش آلاینده گازی سبک متان در پشت یک ساختمان می‌باشد. به منظور مقایسه دقت و زمان اجرای شبیه‌سازی، مدل‌های توربولانسی LES دیگر همانند

اکثر چنین مطالعاتی از مدل‌های RANS برای شبیه‌سازی جریان آشفته استفاده کرده‌اند [۴-۲]. در حالیکه مدل‌های LES برای تخمین جریان باد در لایه مرزی اتمسفریک و پخش آلودگی دقیق‌تر می‌باشند. خصیصه وابستگی نتایج به زمان در روش LES بیانگر این واقعیت است که چرا مدل‌های مذکور در جریان غیردائم باد حول ساختمان بهتر از مدل‌های RANS عمل می‌کنند [۵-۷].

مطالعات زیادی برای مطالعه پخش آلودگی حول ساختمان انجام شده‌اند. تومیناگا و استاتوپولوس [۸] مدل‌های مختلفی از $k-\epsilon$ را با مدل اسماگورینسکی و نتایج تجربی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که مدل $k-\epsilon$ از دقت کافی برای تخمین غلظت آلاینده برخوردار نمی‌باشد. اگرچه مدل‌هایی مثل $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ realizable سازگاری بهتری با نتایج تجربی از خود نشان دادند. ایشان همچنین بیان کردند که دقت نتایج میانگین‌گیری شده روش اسماگورینسکی بهتر از نتایج روشهای $k-\epsilon$ می‌باشد.

پخش آلاینده گازی در اطراف یک ساختمان مکعبی شکل توسط گوساو و بلوکن مطالعه گردید [۹]. ایشان از مدل اسماگورینسکی برای شبیه‌سازی استفاده کردند و نتایج حاصله را با نتایج تونل باد مقایسه کردند. ایشان به وضوح نشان دادند که نتایج تونل باد و روش اسماگورینسکی از تطابق خوبی برخوردار است.

لاتب و همکاران [۱۰] پخش آلودگی را حول یک ساختمان پیچیده مدل‌سازی کردند. مدل بکار رفته $k-\epsilon$ realizable بوده است و نتایج حاصله از آن با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. ایشان نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر اختلاف قابل توجهی دارند.

پیچیدگی جریان حول ساختمان و کوپل بودن آن با انتقال آلاینده که توسط دو مکانیزم کانوکشن و دیفیوژن انجام می‌پذیرد، نقش مدل‌سازی توربولانسی در تخمین غلظت آلاینده حول ساختمان بسیار شایان اهمیت می‌گردد. متأسفانه زمان محاسبات روشهای LES بسیار بیشتر از

³ gray area

که D_T عدد فیک توربولانسی است. در شبیه‌سازیها عدد اشمیت توربولانسی را اصولاً ثابت در نظر می‌گیرند. مقدار پیشنهادی برای آن در محدوده 0.2 تا $1/2$ است که وابسته به مشخصات جریان و هندسه می‌باشد. در بخش نتایج تاثیر عدد اشمیت توربولانسی بر غلظت آلاینده نشان داده شده است.

در روش DES برای بدست آوردن لزجت توربولانسی از معادله اسپالارت-آلاماراس بصورت رابطه (۳) استفاده می‌گردد.

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + U_j \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} = c_{bl} \tilde{S} \tilde{v} - c_{wl} f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(v + \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_k} \right] + \frac{c_{b2}}{\sigma} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_k} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_k} \quad (3)$$

در معادله فوق \tilde{v} با v_T (تنش توربولانسی) از طریق رابطه (۴) ارتباط پیدا می‌کند.

$$v_T = \tilde{v} f_{v1} \quad (4)$$

در رابطه (۳) c_{w1} ، c_{b2} ، c_{b1} و σ ضرایب ثابت هستند و f_w ، f_{v1} و f_{v2} توابعی هستند که از رابطه (۵) حاصل می‌گردند.

$$f_w = g \left(\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right)^{1/6}, \quad g = r + c_{w2}(r^6 - r) \\ r = \frac{\tilde{v}}{S \kappa^2 d_w^2}, \quad \tilde{S} = \Omega + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d_w^2} f_{v2} \quad (5) \\ f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, \quad \chi = \frac{\tilde{v}}{v}$$

مقیاس طولی d_{DES} ، d_{DES} می‌باشد که توسط رابطه زیر محاسبه شده و در معادله (۳) جایگزین d می‌گردد.

$$d_{DES} = \min d_w, C_{DES} \Delta \quad (6)$$

در رابطه (۶)، d_w فاصله از دیواره، $C_{DES}=0.65$ و $\Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ می‌باشد. 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 $d_w < C_{DES} \Delta$ است مقیاس طولی، فاصله از دیواره است و در نواحی که $d_w > C_{DES} \Delta$ است مقیاس طولی d_{DES} ، طول شبکه است. یعنی در نواحی دور از دیوار،

مدل اسماکورینسکی و یک معادله‌ای با مدل DES مقایسه شده‌اند. همچنین برای صحت سنجی، نتایج حاصله از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. همچنین تاثیر عدد اشمیت توربولانسی نیز بر روی نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از دقت خوب روش DES در تخمین میدان متوسط سرعت و غلظت آلاینده متان می‌باشد. در بخش بعدی به تشریح معادلات حاکم بر جریان پرداخته خواهد شد.

۲- معادلات حاکم بر جریان

بطور کلی دو دسته روش LES و RANS برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارند که تفاوت آنها در نوع میانگین گیری از معادله ناویر-استوکس می‌باشد. در دسته روشهای LES از میانگین گیری مکانی با استفاده از فیلتر و در دسته روشهای RANS از میانگین گیری 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، ناویر-استوکس و انتقال جرم میانگین گیری شده در حالتی که سیال تراکم ناپذیر باشد، بصورت رابطه (۱) می‌باشند.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + v_T) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (1) \\ \frac{\partial C}{\partial t} + (u \cdot \nabla) C = \nabla \cdot \left(\frac{v_T}{Sch_T} \nabla u \right)$$

در رابطه فوق u_i بیانگر سرعت، p فشار، v لزجت سینماتیکی سیال، v_T لزجت توربولانسی، C غلظت میانگین آلاینده، Sch_T عدد اشمیت توربولانسی و علامت بار بیانگر میانگین یک پارامتر می‌باشد. عدد اشمیت توربولانسی بصورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد.

$$Sch_T = \frac{\nu_T}{D_T} \quad (2)$$

تفاوت روش DDES و DES در نواحی نزدیک دیواره است که لزوماً جوابها دقیقتر از روش DES نخواهند شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده بمنظور ارزیابی نتایج، روش DES با روش اسماکورینسکی که جزء روشهای LES صریح صفر معادله‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است. در معادله (۹) مدل اسماکورینسکی تشریح شده است. لازم بذکر است که در روش اسماکورینسکی در گام زمانی اول جریان بصورت آرام حل می‌گردد، سپس با یافتن مقادیر سرعتها و با استفاده از رابطه تانسور نرخ کرنش \bar{S}_{ij} و قراردادن آن در معادله ν_{SGS} ، مقدار تنش توربولانسی محاسبه می‌گردد. در گامهای بعدی از تنش توربولانسی حاصله برای حل معادله (۱) استفاده خواهد شد.

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

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

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

در بخش بعدی به بحث درباره شرایط مرزی، هندسه و شبکه بکار رفته در شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد.

۳- هندسه، شرایط مرزی و روش حل

مدل هندسی مورد استفاده در این بخش شامل یک مکعب به ابعاد $0.25 * 0.5 * 0.25$ متر مکعب می‌باشد که ارتفاع ساختمان (در جهت Z) 0.25 متر و طول ساختمان در جهت باد (در راستای محور X) نیز 0.25 متر است. دقیقاً در پشت ساختمان و چسبیده به آن یک دودکش به ارتفاع $1.5H$ و قطر $0.04H$ وجود دارد (H ارتفاع ساختمان است) که از آن آلاینده‌های گازی متان با نسبت حجمی 1% خارج می‌گردد. باد با سرعت مرجع 2.34 متر بر ثانیه وارد دامنه محاسباتی می‌گردد که ارتفاع مرجع $1.5H$ می‌باشد. همچنین سرعت خروج متان از دودکش برابر $1.5U_{ref}$ است که U_{ref} سرعت مرجع در ارتفاع مرجع می‌باشد. در شکل ۲ هندسه مورد بحث در این بخش، نشان داده شده است.

متد عملاً تبدیل به یک روش LES یک معادله‌ای می‌شود. در شکل ۱ شمایی از نحوه عملکرد روش DES نشان داده شده است. در رابطه (۳) تا (۵) ضرایب ثابتی دیده می‌شوند که در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱- مقادیر ضرایب بکار رفته در معادلات (۲) تا

(۴) [۱۶]

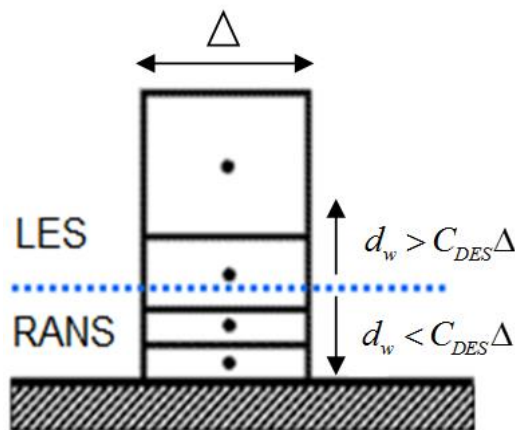
σ	C_{w3}	C_{w2}	C_{w1}	C_{b2}	C_{b1}
۰/۶۶۶۷	۲	۰/۳	۳/۲۳۹۱	۰/۶۲۲	۰/۱۳۲۵

یکی دیگر از تغییراتی که در روش DES اعمال می‌گردد حذف ناحیه خاکستری یا کوچک کردن این ناحیه می‌باشد، زیرا موجب تولید جوابهای غیرفیزیکی می‌گردد. بدین منظور اسپالارت [۱۵]، تابع f_d را به تعریف مقیاس طولی بشکل روابط (۷) و (۸) اضافه کرد.

$$\tilde{d} = d - f_d \max\{0, d - C_{DES}\Delta\} \quad (7)$$

$$f_d = 1 - \tanh\left[(8r_d)^3\right] \quad (8)$$

$$r_d = \frac{\tilde{v}}{S\kappa^2 d^2}$$



شکل ۱- شمایی از نحوه عملکرد روش DES

چون در روش جدید قصد بر آن است که ناحیه RANS سریع به ناحیه LES نرسد، لذا روش اصلاح شده، شبیه سازی تأخیری گردابه‌های جدا شده^۴ نام گرفته است. لازم بذکر است همانگونه که فرولیچ در [۱۷] بیان کرده، تنها

^۴ DDES

شده است. برای افزایش کیفیت نتایج روش DES، جریان ورودی بر اساس فاکتور شدت توربولانس^۵، طبق رابطه (۱۱) آشفته شده است. شدت توربولانسی در ورودی دامنه حل نیز بر اساس [۱۸] در نظر گرفته شده است.

$$I = \frac{u'}{U} \quad (11)$$

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

در رابطه فوق U میانگین سرعت ورودی و u' سرعتهای نوسانی هستند. لازم بذکر است که برای فشار 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.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad w = 0 \quad \text{for down plane} \quad (12)$$

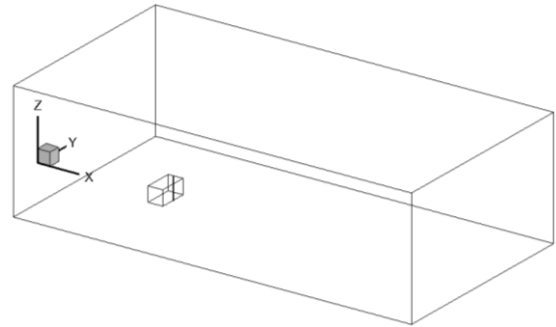
$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad v = 0 \quad \text{for lateral plane}$$

لازم بذکر است که مقدار \bar{v} در دیواره برابر صفر در نظر گرفته می‌شود تا از بی‌نهایت شدن ترم \bar{S} در معادله (۵) جلوگیری شود. شرایط مرزی آلاینده متان در دودکش بصورت مقدار ثابت یک درصد حجمی و در مرز خروجی و دیواره‌های کناری نیز بصورت گرادیان صفر آلودگی در نظر گرفته شده است.

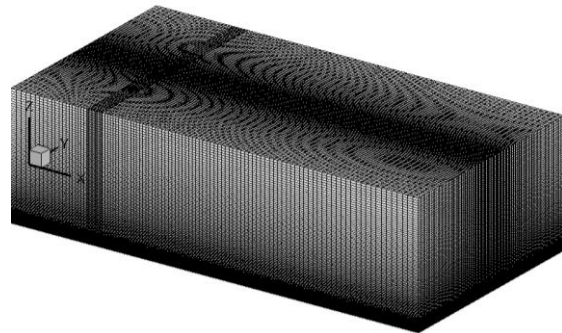
برای حل معادلات حاکم از نرم افزار اوپن فوم و برای جداسازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. برای مدلسازی ریاضی پخش آلودگی از معادله انتقال جرم آشفته که در بخش پیشین بدان اشاره شد، استفاده شده است. این معادله در نرم افزار اوپن فوم بصورت یک کد به سایر معادلات پیوستگی، مومنتوم و معادلات توربولانس به حلگر pisoFoam اضافه شده است. لازم بذکر است که اثرات جاذبه در معادله مومنتوم در نظر گرفته نشده است.

در اوپن فوم معادلات حاکم بر روی یک شبکه هم مرکز حل می‌شوند که اولین بار توسط رای و چو در سال ۱۹۸۳ ارائه

دامنه محاسباتی به ابعاد $26H \times 12H \times 10H$ آنقدر بزرگ در نظر گرفته شده تا اثر قطع دامنه بر روی جوابها (خصوصا در مرز پایین دست) ناچیز باشد. شبکه بکار رفته در شبیه سازی آنقدر کوچک شده است تا جوابها مستقل از شبکه گردند. تعداد سلولها تقریبا برابر $1/500/000$ می‌باشند. نمایی از شبکه بکار رفته در شکل ۳ آورده شده است. همانگونه که از شکل مشخص است، شبکه در نزدیکی ساختمان و نزدیکی زمین که به دقت بالاتری نیاز می‌باشد، ریز شده است.



شکل ۲- شمایی از هندسه بکار رفته در شبیه‌سازی



شکل ۳- شبکه بکار رفته در شبیه‌سازی با $1/500/000$ سلول شرط مرزی ورودی باد به دو صورت لگاریتمی و توانی در کدها اعمال می‌گردد که برای سهولت بیشتر پروفیل توانی بشکل رابطه (۱۰) [۷] اعمال گشته است. مقدار α برابر $0/1667$ بر اساس مقداری که در آزمایش تجربی بدست آمده، قرار داده شده است.

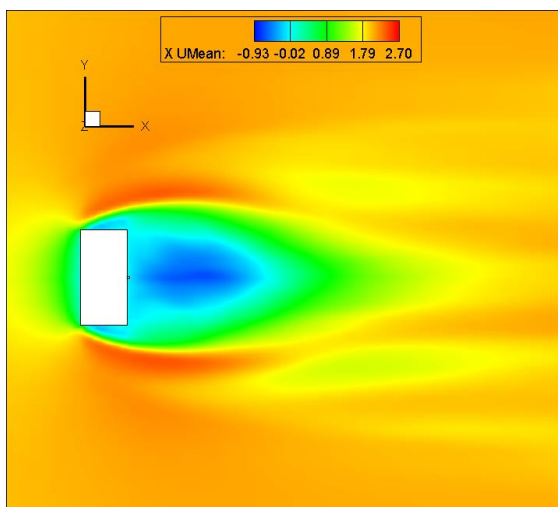
$$\frac{u}{u_b} = \left(\frac{z}{H_b} \right)^\alpha \quad (10)$$

u_b متوسط سرعت جریان در ارتفاع H_b است که H_b ارتفاع شاخص می‌باشد و برابر $2/34$ متر بر ثانیه در نظر گرفته

⁵ turbulence intensity factor

در شکل‌های ۵ تا ۱۰ سرعت متوسط در صفحه $z = 0.125$ m نشان داده شده است. همچنین سرعت متوسط در صفحه $y = 1.75$ m نیز برای مقایسه آورده شده است. همانگونه که از این شکلها مشخص است، در صفحه $z = 0.125$ m الگوی جریان در اطراف ساختمان برای هر سه مدل یکسان می‌باشد. بعبارت دیگر هر ۳ مدل در وجوه کناری ساختمان نواحی پرسرعت و در پشت ساختمان یک ناحیه نسبتاً بزرگ گردابه‌ای را پیش بینی کرده‌اند. اما در صفحه $y = 1.75$ m هر چه از سطح زمین دورتر شویم (بخصوص در فواصل بیشتر از ارتفاع ساختمان)، الگوی جریان در هر سه مدل به یکدیگر شبیه است ولی در نواحی نزدیک زمین (خصوصاً در نواحی گردابه‌ای جلو و پشت ساختمان) طول گردابه‌های مدل‌های LES با DES تا حدی متفاوت می‌باشند.

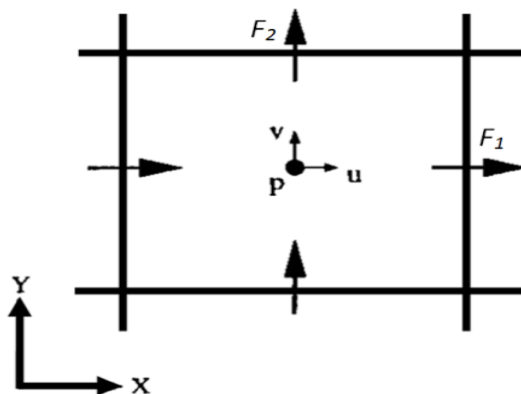
نحوه پخش آلاینده متان در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ آورده شده است. این شکل نشان‌دهنده سطوحی از آلودگی است که در آن غلظت آلاینده معادل $c = 0.005$ است. با مراجعه به این شکلها می‌توان گفت که طول این سطح در هر ۳ روش با یکدیگر تقریباً برابر است، اما نحوه پخش آن در مدل DES با دو مدل اسماکورینسکی و یک معادله‌ای تا حدی متفاوت است. لازم بذکر است که نحوه پخش آلاینده متان در روشهای اسماکورینسکی و یک معادله‌ای به یکدیگر نزدیکتر می‌باشد.



شکل ۵- سرعت متوسط در صفحه $z = 0.125$ m با استفاده از مدل اسماکورینسکی

شده است [۱۹]. در شکل ۴ نمایی از یک شبکه هم مرکز 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-چو محاسبه می‌گردد.

ترم زمانی معادله ناویر-استوکس بر اساس روش اولر مرتبه اول ضمنی، جداسازی شده است. ترمهای جابجایی معادله ناویر-استوکس بر اساس روش TVD مرتبه دوم و ترمهای دیفیوژن با استفاده از روش تفاضل مرکزی جداسازی شده‌اند. لازم بذکر است که برای حل کوپلینگ سرعت و فشار در معادله ناویر-استوکس از الگوریتم PISO با دو تصحیح فشار استفاده شده است.

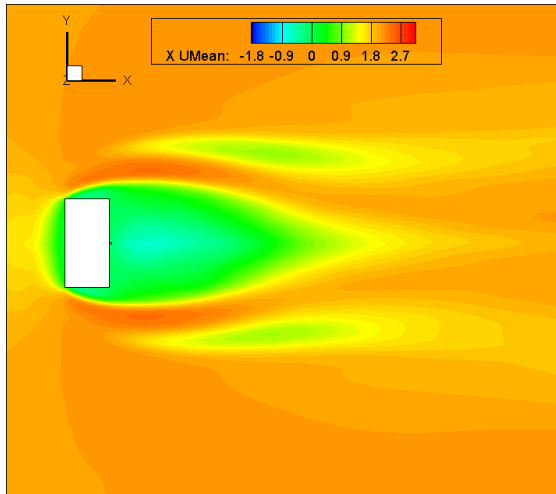


شکل ۴- شبکه هم مرکز

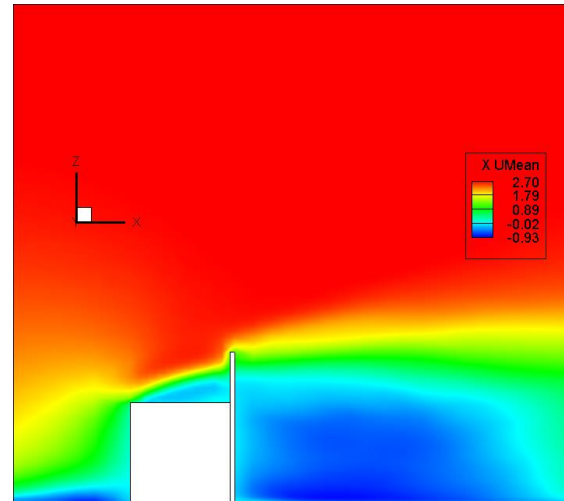
در قسمت بعد نتایج حاصل از شبیه‌سازی پخش آلودگی آورده شده است.

۴- نتایج

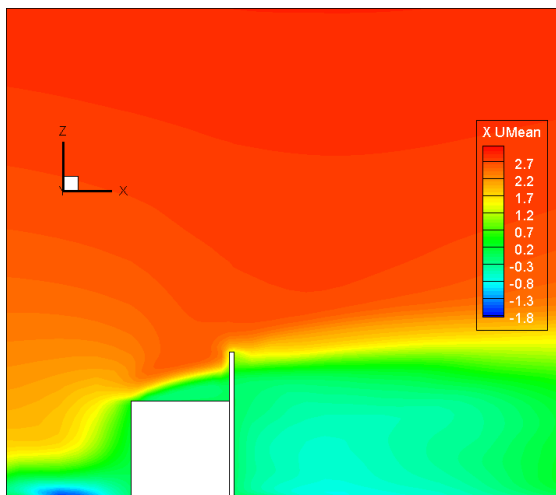
در این بخش به ارائه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی پخش آلودگی در پشت یک ساختمان مدل پرداخته می‌شود. نتایج بدست آمده توسط مدل DES ارائه می‌گردد و برای ارزیابی، نتایج بدست آمده از مدل DES با مدل‌های توربولانسی LES (مانند اسماکورینسکی و یک معادله‌ای) و نتایج تجربی مقایسه خواهند شد. همچنین تاثیر عدد اشمیت بر نتایج نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



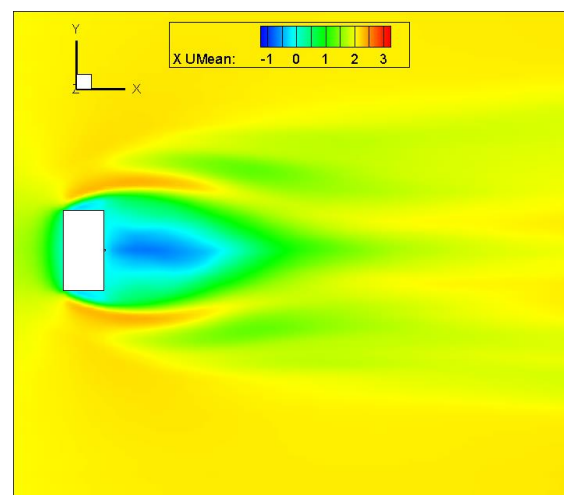
شکل ۹- سرعت متوسط در صفحه $z = 0.125$ m با استفاده از مدل DES



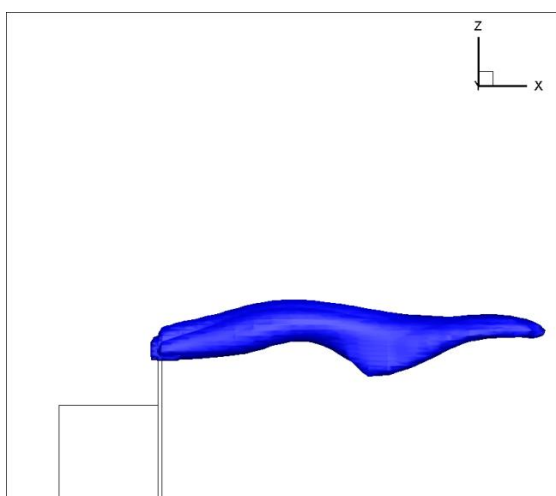
شکل ۶- سرعت متوسط در صفحه $y = 1.75$ m با استفاده از مدل اسماکورینسکی



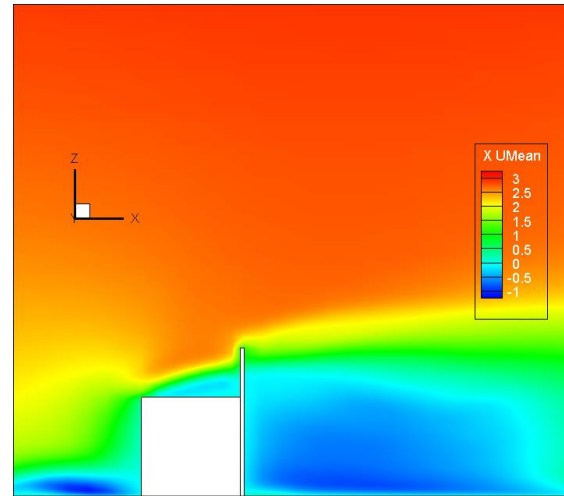
شکل ۱۰- سرعت متوسط در صفحه $y = 1.75$ m با استفاده از مدل DES



شکل ۷- سرعت متوسط در صفحه $z = 0.125$ m با استفاده از مدل یک معادله‌ای



شکل ۱۱- نحوه پخش آلودگی در سطحی که غلظت آلاینده برابر 0.005 می‌باشد با استفاده از مدل اسماکورینسکی

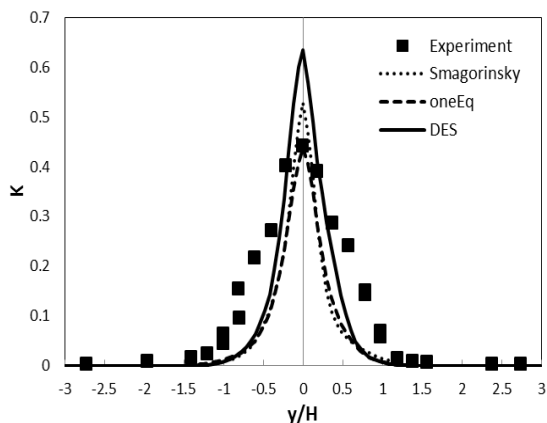


شکل ۸- سرعت متوسط در صفحه $y = 1.75$ m با استفاده از مدل یک معادله‌ای

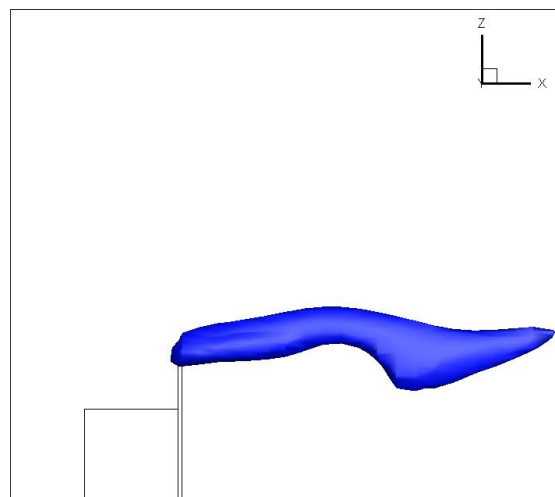
مرجع است (ارتفاع مرجع در این بخش معادل ارتفاع دودکش است).

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ پارامتر K با استفاده از مدل‌های DES، اسماگورینسکی و یک معادله‌ای بر روی خط افقی و عمودی با نتایج تجربی مقایسه شده است. اگر مبدا مختصات بر روی مرکز وجه پشتی ساختمان و چسبیده بر زمین در نظر گرفته شود آنگاه خط افقی دارای مختصات $x/H=5$ و $z/H=1.5$ و $-3 < y/H < 3$ و خط عمودی مختصات $x/H=5$ ، $1.6 < z/H < 2.8$ و $y/H=0$ را داراست. با مراجعه به شکل ۱۴ می‌توان گفت که دقت پارامتر بدون بعد K در مدل DES (جز در نقطه مرکزی خط مقایسه) نسبت به دو روش اسماگورینسکی و یک معادله‌ای بالاتر پیش‌بینی شده است. در شکل ۱۵ پارامتر بدون بعد K در خط عمودی نشان داده شده است. همانگونه که از نتایج نیز مشخص است، دقت مدل یک معادله‌ای نسبت به مدل‌های اسماگورینسکی و DES بر روی خط عمودی بیشتر است. لازم بذکر است که نتایج در اشمیت توربولانسی 0.5 ارائه شده است.

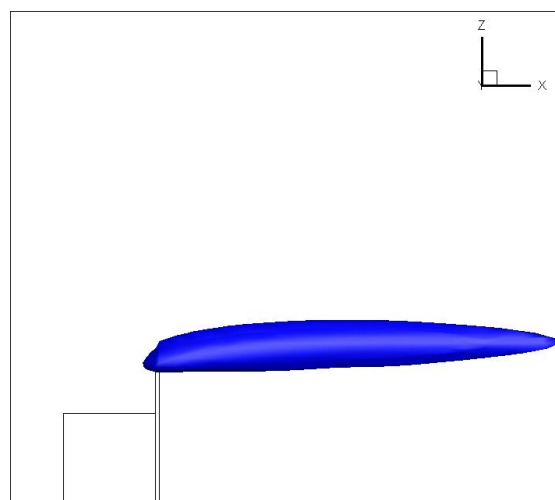
تاثیر Scht بر روی نتایج در شکل ۱۶ آورده شده است. لازم بذکر است که نتایج بدست آمده با استفاده از مدل توربولانسی یک معادله‌ای بدست آمده‌اند. استفاده از مدل‌های توربولانسی دیگر منجر به نتایج تقریباً یکسانی می‌گردد که در اینجا بدلیل اختصار از آوردن آنها خودداری شده است.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج تجربی با مدل‌های مختلف توربولانسی بر روی خط افقی در اشمیت توربولانسی 0.5



شکل ۱۲- نحوه پخش آلودگی در سطحی که غلظت آلاینده برابر 0.005 می‌باشد با استفاده از مدل ۱ معادله‌ای



شکل ۱۳- نحوه پخش آلودگی در سطحی که غلظت آلاینده برابر 0.005 می‌باشد با استفاده از مدل DES

به منظور صحت سنجی نتایج حاصله، پارامتر بدون بعد K که معرف غلظت میانگین بدون بعد است، بصورت رابطه (۱۳) تعریف می‌گردد.

$$K = \frac{c}{C_0} \quad (13)$$

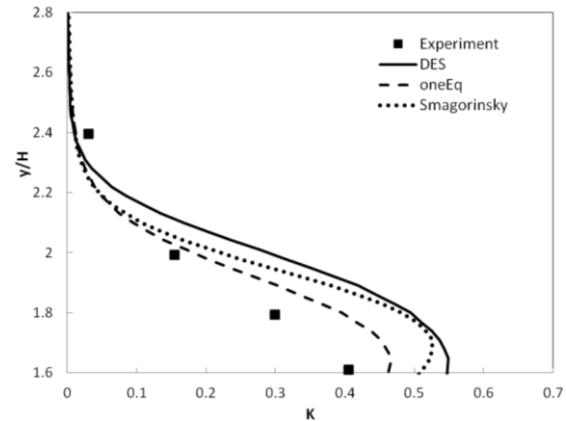
$$C_0 = \frac{Q_e}{H^2 U_{ref}}$$

که C_0 غلظت مرجع (واحد آن kg/m^3 می‌باشد) و Q_e دبی خروج آلاینده از دودکش است که واحد آن kg/s می‌باشد. همچنین H ارتفاع ساختمان و U_{ref} سرعت باد در ارتفاع

۵- جمع بندی

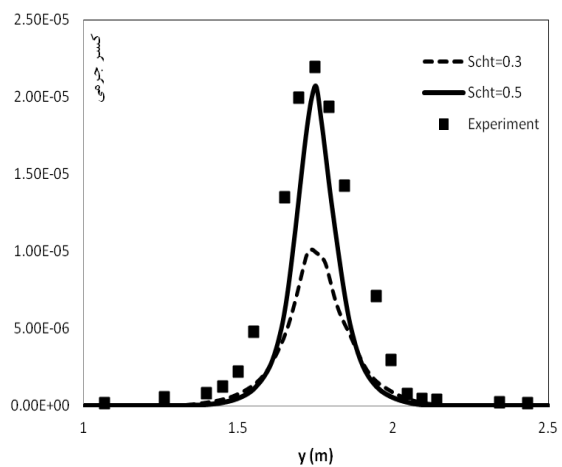
در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی پخش آلاینده سبک گاز متان با نسبت حجمی یک درصد در پشت یک ساختمان با استفاده از مدل های توربولانسی DES، اسماگورینسکی و یک معادله ای ارائه گشت. بدلیل اینکه ارتفاع دودکش یک و نیم برابر ارتفاع ساختمان است، تاثیر آشفتگی ساختمان بر نحوه پخش آلودگی ناچیز است. با توجه به نتایج حاصله از این بخش می توان به جمع بندی زیر دست یافت:

- نتایج سرعت حاکی از آنست که جز در نواحی نزدیک دیواره در بقیه نواحی هر ۳ مدل DES، یک معادله ای و اسماگورینسکی نتایج مشابهی خواهند داد.
- نتایج هر ۳ مدل توربولانسی نشان دهنده آنست که نواحی پرسرعت در کناره های ساختمان و نواحی کم سرعت در پشت و وجه روبروی ساختمان اتفاق می افتد.
- الگوی پخش آلاینده متان حاکی از آنست که روش DES مقادیر نوسانی را تا حدی میرا می کند که دلیل آن ترکیب روش LES با RANS می باشد. اما طول ناحیه تاثیر گرفته از آلودگی را هر ۳ مدل توربولانسی تقریباً یکسان محاسبه می کنند.
- مقایسه نتایج پارامتر بدون بعد شده غلظت آلاینده میان نتایج تجربی و مدل های مختلف توربولانسی حاکی از آنست که در برخی مناطق دقت روش DES از دو مدل توربولانسی دیگر بیشتر و در برخی مناطق دقت مدل یک معادله ای بیشتر است. به عبارت دیگر در حالتی که آلاینده گازی سبک تحت تاثیر آشفتگی ساختمان نباشد دقت روشهای LES و RANS- در یک حد می باشد و هیچ یک از روشها مزیتی به دیگری از لحاظ دقت حل ندارند.
- عدد اشمیت توربولانسی تاثیر بسیار زیادی بر نتایج خصوصاً در صفحه مرکزی ساختمان جایی که دودکش در آن قرار گرفته و تاثیر دیفیوژن توربولانسی غالب بر



شکل ۱۵- مقایسه نتایج تجربی با مدل های مختلف

توربولانسی بر روی خط عمودی در اشمیت توربولانسی ۰/۵



شکل ۱۶- تاثیر عدد اشمیت توربولانسی بر غلظت میانگین آلاینده متان

همانگونه که از شکل مذکور مشخص است، عدد اشمیت توربولانسی بر روی نتایج کاملاً تاثیر می گذارد. تاثیر مستقیم عدد اشمیت توربولانسی بر عدد فیک توربولانسی است که نهایتاً بر دیفیوژن توربولانسی اثر می گذارد. از شکل ۱۶ نیز کاملاً مشخص است که تاثیر عدد اشمیت توربولانسی بر خط مرکزی ساختمان که دودکش در آنجا قرار گرفته و اثر دیفیوژن بر کانوکشن غالب است، بیشتر می باشد. همچنین بهترین نتایج در $Scht = 0.5$ حاصل شده اند و بهمین دلیل در سایر شبیه سازیها نیز از همین مقدار بهینه استفاده شده است. در بخش بعدی به جمع بندی و نتیجه گیری از مباحث این بخش پرداخته خواهد شد.

کانوکشن است، می‌گذارد. همچنین دقیق ترین نتایج در $Scht = 0.5$ حاصل می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] Cermak J.E. (1978). "Dispersion of pollutants in the urban environment". ASCE Spring Convention and Exhibition, vol. 3269, p. 29
- [2] Li Y., Stathopoulos T. (1997). "Numerical evaluation of wind-induced dispersion of pollutants around a building". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 67-68, pp. 757-766.
- [3] Meroney R.N., Leitl B.M., Rafailidis S., Schatzmann M. (1999), "Wind-tunnel and numerical modeling off low and dispersion about several building shapes". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 81, pp. 333-345.
- [4] Banks D., Meroney RN., Petersen RL., Carter JJ. (2003). "Evaluation of FLUENT for pre-dicting concentrations on buildings". Air and waste management association annual conference, San Diego.
- [5] Murakami S., 1993. "Comparison of various turbulence models applied to a bluff body". J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 46-47, pp. 21-36.
- [6] Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R. (2002). "Comparison of various k- ϵ model and DSM applied to flow around a high-rise building" – report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. Wind Struct, Vol. 5, pp. 227-244.
- [7] Tominaga Y., Mochida A., Murakami S., Sawaki S. (2008). "Comparison of various revised k- ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer". J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 96, pp. 389-411.
- [8] Tominaga Y., Stathopoulos T. (2010). "Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: model evaluation of RANS and LES". Building and Environment, Vol. 45, pp. 2231-2239.
- [9] Gousseau P., Blocken B., van Heijst G.J.F. (2011). "CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: on the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy". Journal of Hazardous Materials, Vol. 192, pp. 422-434.
- [10] Lateb M., Masson C., Stathopoulos T., Bedard C. (2010). "Numerical simulation of pollutant dispersion around a building complex". Building and Environment, Vol. 45, pp. 1788-1798.
- [11] Spalart P.R., Allmaras S.R. (1994). "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows" La Recherche A_erospatiale, Vol. 1, pp. 5-21.
- [12] Shur M., Spalart P.R., Strelets M., and Travin A. (1999). "Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack". Engineering Turbulence Modeling and Experiments, Vol. 4, pp. 669-678.
- [13] Bunge U., Mockett C., Thiele F. (2007). "Guidelines for implementing Detached-Eddy Simulation using different models". Aerospace Science and Technology, Vol. 11, pp. 376-385.
- [14] Viswanathan A.K., Tafti D.K. (2006). "Detached eddy simulation of turbulent flow and heat transfer in a two-pass internal cooling duct". International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 27, pp. 1-20.
- [15] Spalart P.R., Deck S., Shur M.L., Squires K.D., Strelets M.K., and Travin A. (2006). "A new version of Detached eddy simulation resistant to ambiguous grid densities". Theoret. Comput. Fluid Dynamics, Vol. 20, pp. 181-195.
- [16] Jadidi A.M., Heidarinejad G. (2013). "Evaluating DES and DDES models for wind flow over building and comparing with traditional turbulence models" Modares Mechanical Engineering Journal, Vol. 14, pp. 81-93.
- [17] Frohlich J., von Terzi D., "Hybrid LES/RANS Methods for the Simulation of Turbulent Flows" Progress in Aerospace Sciences, Vol. 44, 2008, pp. 349-377.

- [18] Huber A.H., Snyder W.H., Lawson Jr R.E. (1980). "The effects of a squat building on short stack effluents—awindtunnel study". U.S. Environmental Protection Agency report EPA-600/4-80-055, North Carolina, USA.
- [19] Rhie C., Chow W. (1983). "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation". AIAA Journal, Vol. 21, pp. 1525–1532.