

بررسی مدل‌های زیرشبکه شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای پیش‌بینی جریان بازشو در آتش‌سوزی فضای یک-اتاقی

هادی پاسدار شهری^{۱*}، قاسم حیدری نژاد^۲، کیومرث مظاهری^۲

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک - گروه تبدیل انرژی
(*نویسنده مخاطب: pasdar@modares.ac.ir)

چکیده

در این مقاله جریان هوای عبوری از بازشو هنگام آتش‌سوزی در فضای یک-اتاقی با دو میزان توان حرارتی مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با دو مدل زیرشبکه اسماگورینسکی و یک-معادله‌ای، بکار برده رفته است. اثرات احتراق، با استفاده از مدل اتلاف گردابه‌ای اصلاح شده و تابش، با استفاده از مدل جهات گسسته لحاظ شده است. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که هر دو مدل زیرشبکه پروفیل سرعت در نواحی مختلف بازشو را به خوبی تخمین می‌زنند اما مدل یک-معادله‌ای دقت بالاتری نسبت به مدل اسماگورینسکی دارد. هر دو مدل، دقت بالاتری (در حدود ۷ تا ۱۰ درصد) نسبت به مدل‌های اغتشاشی رینولدز متوسط‌گیری شده‌ناویراستوکس دارند. همچنین، هر دو مدل استفاده شده، مقدار دما را در ناحیه دما بالای بازشو و محل خروج محصولات احتراق، بیشتر از مقدار تجربی آن تخمین می‌زنند.

واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مدل اسماگورینسکی، مدل یک-معادله‌ای

۱- مقدمه

آتش‌سوزی و جریان‌های القایی حاصل از آن، یکی از جریان‌های پیچیده احتراقی است. آتش به عنوان احتراق کنترل نشده و یا رشد و انتشار ناخواسته شعله تعریف می‌شود. آتش‌سوزی در فضاهای بسته به دلیل اثراتی که این فضا بر رژیم شعله و جریان‌های احتراقی دارد، از نگاه کاربردی و ایمنی حائز اهمیت است [۱]. یکی از مهمترین مواردی که بر رشد و انتشار آتش در فضای بسته موثر است، وجود بازشو و ارتباط آن با فضای مجاور است. در واقع شبیه‌سازی جریان از بازشو و اثر جریان‌های احتراقی حاصل از آتش‌سوزی بر اتاق و فضاهای مجاور تاثیر کلیدی در رشد و انتشار آتش دارد. به همین دلیل استفاده از مدل‌های مناسب و توانمند برای شبیه‌سازی این جریان ضروری است. از سوی دیگر، شناخت و شبیه‌سازی صحیح این جریان، به تصمیم‌گیری مناسب در طول فرآیند اطفاء حریق کمک خواهد کرد. به طور کلی دو مدل ناحیه‌ای و میدانی برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی در فضای بسته به کار می‌رود. اولین مدل‌هایی که در این راستا ایجاد شدند، مدل‌های ناحیه‌ای بودند. در این مدل‌ها [۲-۴] ناحیه محاسباتی به دو و یا چند ناحیه فیزیکی تقسیم می‌شود. هر کدام از این نواحی مقدار متوسطی از کمیت مورد بررسی بیان می‌شود. این مدل‌ها زمان محاسباتی اندکی دارند و برای تخمین‌های مهندسی و استفاده در هندسه‌های ساده، مناسب هستند. محدودیت‌های اصلی این مدل‌ها را می‌توان به صورت زیر برشمرد [۵]:

- اطلاعات محدودی را در خصوص رشد آتش در اختیار قرار می‌دهد؛
- شناخت اولیه در خصوص ساختار جریان در فضای مورد بررسی ضروری است؛
- امکان بررسی تاثیر تغییرات لحظه‌ای در جریان را بر انتشار آتش ندارند.

-استاد مدعو، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک - گروه تبدیل انرژی

-استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک - گروه تبدیل انرژی

مدل‌های میدانی بر پایه معادلات بقاء در غالب مشتقات جزئی و استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی بنا نهاده شده است. بر همین اساس کدهای کامپیوتری اولیه که بر مبنای معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده ناویر استوکس^۱ بنا و برای شبیه‌سازی این جریان‌ها استفاده می‌شدند توسعه یافتند. در بیشتر مطالعات اولیه، شبیه‌سازی در حالت دوبعدی انجام و از یک منبع حرارتی به جای آتش استفاده می‌شد. پیو و همکارانش [۶] با استفاده از روش RANS فرآیند شبیه‌سازی آتش در فضای یک-اتاقی، دو-اتاقی و چند-اتاقی را بررسی نمودند. نتایج شبیه‌سازی ایشان با این مدل نشان می‌دهد که لحاظ کردن اثرات انتقال حرارت تابشی در شبیه‌سازی این فرآیند تاثیر مستقیمی بر دقت پیش‌بینی دمای شعله و محصولات احتراق دارد در حالی که اثر آن بر پیش‌بینی میدان سرعت، ناچیز است. استاوراکاکیس و مارکاتوس [۷]، جریان حاصل از آتش در فضای یک-اتاقی و دو-اتاقی را بررسی کردند. در مطالعه ایشان، به جای آتش از منبع حرارتی معادل استفاده شده و دو مدل k -استاندارد و k -RNG با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مطالعه ایشان نشان می‌دهد که دو مدل، نتایج قابل قبولی در پیش‌بینی سرعت دارند اما مدل k -RNG، دما را با دقت بالاتری، تخمین می‌زند. به طور کلی روش‌های RANS نوسانات ایجاد شده در جریان و اثرات آن بر کمیت‌ها را به خوبی پیش‌بینی نمی‌کنند و موجب خطا در مدل‌سازی به خصوص در حالت غیردائم می‌شود. روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ رویکردی دیگر در حل معادلات ناویر استوکس است. در این روش‌ها، گردابه‌های بزرگ از حل مستقیم معادلات محاسبه می‌شود و اثرات گردابه‌های کوچک با استفاده از مدل‌های زیر شبکه^۳ مدل می‌شوند. به دلیل آنکه در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اثرات نوسانات در زیر شبکه لحاظ شده است، محاسبه متغیرها به صورت لحظه‌ای امکان‌پذیر است. مک‌گراتان [۸] برای اولین بار روش LES را برای شبیه‌سازی جریان آتش در حالت دوبعدی بکار برد. بر اساس این مدل اولیه، این روش به حالت‌های سه‌بعدی و با لحاظ شدن جزئیات بیشتر در خصوص زیر مدل‌ها توسعه یافت [۹-۱۱]. سان و همکارانش [۱۲]، با کمک نرم‌افزار نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش^۴ جریان هوای حاصل از آتش سوزی را در مسیر پلکانی مدل کردند. چو و زو [۱۳] با استفاده از این نرم‌افزار رابطه‌ای جبری و ساده برای محاسبه نرخ جریان از بازشو بدست آوردند. حیدری‌نژاد و همکاران [۱۴] به بررسی جریان القایی آتش‌سوزی در فضای دو-اتاقی و مقایسه پروفیل دمای این جریان در نواحی مختلف اتاق آتش و اتاق مجاور آن پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که مدل یک-معادله‌ای^۵ مقدار دما را با دقت بیشتری نسبت به اسماگورینسکی^۶، تخمین می‌زند. پاسدار شهری و همکاران [۱۵]، مقایسه‌ای بین مدل‌های زیرشبکه اسماگورینسکیو یک-معادله‌ای در شبیه‌سازی آتش استخری در محیط باز با مدل احتراقی کسر مخلوط داشتند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که رفتار نوسانی پلوم آتش با قوت بالاتری توسط مدل یک-معادله‌ای تخمین زده می‌شود. با توجه به اهمیت انتخاب مدل مناسب زیرشبکه، در این مطالعه به بررسی اثر مدل‌های زیرشبکه اسماگورینسکی و یک-معادله‌ای بر جریان القایی آتش در بازشو فضای یک-اتاقی پرداخته شده است.

۲- فیزیک مساله

به لحاظ ایمنی و پیچیدگی‌های جریان، بدترین شرایط در هنگام آتش‌سوزی که در آن تمام سوخت در حال سوختن است و دما به بالاترین مقدار خود رسیده، سناریوی آتش‌سوزی در مرحله کاملاً توسعه‌یافته است. به همین دلیل در این مطالعه، این سناریو مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. طرحواره جریان حاصل از این نوع آتش‌سوزی در فضای یک-اتاقی و کمیت‌های مهم آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، هوای داغ حاصل از محصولات احتراق با رنگ خاکستری و هوای ناحیه دما پایین با رنگ روشن نشان داده شده است. به دلیل اختلاف فشار بین اتاق آتش‌سوزی و فضای مجاور که از طریق بازشو به این اتاق متصل است، هوای تازه از قسمت پایین بازشو (که با محیط بیرون در ارتباط است) وارد اتاق آتش می‌شود. جریان هوای داغ نیز

¹Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

²Large Eddy Simulation (LES)

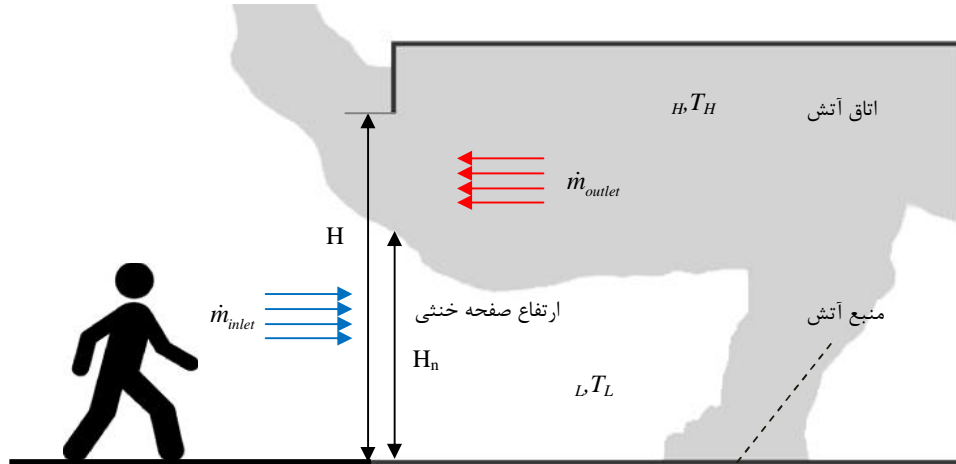
³Sub-grid Scale (SGS)

⁴Fire Dynamic Simulator (FDS)

⁵One-Equation

⁶Smagorinsky

از بالای بازشو خارج می‌شود. در شکل ۱ ارتفاع صفحه خنثی برای بازشو نشان داده شده است. این صفحه در واقع مکان هندسی نقاطی است که سرعت عمود بر مقطع بازشو در آن، صفر می‌شود. به عبارت دیگر از بالای این صفحه، جریان گازهای داغ حاصل از محصولات احتراق از اتاق خارج و از پایین آن جریان هوای کم دما وارد اتاق می‌شود. در بالای این ارتفاع، دمای هوا در حال افزایش است. در فرآیند اطفاء حریق، تخمین مناسب این ارتفاع حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که ارتفاع ایمن برای ورود آتش‌نشانان به فضای آتش‌سوزی چه میزان است.



شکل ۱ طرحواره آتش‌سوزی در فضای یک-اتاقی

۳- معادلات حاکم و روش حل عددی

جریان هوای حاصل از آتش‌سوزی، جریان با ماخ پایین و چگالی متغیر است. با توجه به متغیر بودن چگالی از متوسط وزنی فاور برای متوسط‌گیری معادلات ناویر استوکس استفاده می‌شود [۱۶]. معادلات متوسط‌گیری شده بقای جرم، مومنتم، انرژی و کمیت اسکالر در مختصات کارتزین برای این جریان به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{u_i u_j}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i \quad (2)$$

$$\bar{\rho} C_p \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \bar{\rho} C_p \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} = \frac{D \bar{p}}{Dt} - \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{u_i T}}{\partial x_i} + \bar{S}_T + S_{rad} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\zeta})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{\zeta})}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{q}_\zeta}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{u_i \zeta}}{\partial x_i} + S_\zeta \quad (4)$$

در این روابط چگالی مخلوط، u_i ، سرعت، P ، فشار و T دما هستند. همچنین نشان‌دهنده هر کمیت اسکالر (نظیر گونه‌ها) در جریان و S_T نرخ حرارت تولید شده در اثر احتراق است. ترم‌های S_{rad} و S_ζ نیز نرخ انتقال حرارت تابشی و ترم تولید در معادلات انرژی و گونه هستند. تانسور تنش‌های لزجی، بردار شار حرارتی و شار جرمی، هر کدام به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\bar{\tau}_{ij} = -\frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{u}_k \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_i} + \bar{\rho} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\bar{q}_i = -\frac{\bar{\rho} C_p \tilde{T}}{Pr} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\bar{q}_\zeta = -\frac{\bar{\rho}}{Sc_\zeta} \frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial x_i} \quad (7)$$

عدد پرانتل و اشمیت در این مطالعه (۰/۷) در نظر گرفته می‌شوند [۱۶]. برای بسته شدن معادلات فوق، لازم است که مدل زیرشبکه مناسبی برای ترم تنش‌های زیرشبکه انتخاب شود. در این مطالعه دو مدل زیرشبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اول مدل اسماکورینسکی [۱۷] است. تنش‌های زیر شبکه در این مدل، به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\overline{\tau}_{u_i u_j} = \dots \overline{u_i u_j} - \dots \tilde{u}_i \tilde{u}_j = -2 \tau_t^{SGS} \tilde{S}_{ij} + \frac{1}{3} \overline{\tau}_{kk} u_{ij} \quad (۸)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} u_{ij} \quad (۹)$$

$$\tau_t^{SGS} = \dots C_s \Delta^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (۱۰)$$

در مطالعات پیشین، پیشنهاد شده که از ترم $\overline{\tau}_{kk}$ صرف نظر شود. در این معادلات $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ اندازه فیلتر و τ_t^{SGS} لزجت توربولانسی است. همچنین C_s ضریب ثابت اسماکورینسکی است که در این مطالعه ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. در مدل یک-معادله‌ای لزجت توربولانسی با استفاده از انرژی جنبشی در مقیاس زیرشبکه محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\tau_t^{SGS} = \dots C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \quad (۱۱)$$

معادله انتقال برای محاسبه انرژی جنبشی توربولانسی در مقیاس زیرشبکه با توجه به رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots k_{SGS}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\dots \tilde{u}_i k_{SGS}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\dots C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_i} \right) + P_{k_{SGS}} - D_{k_{SGS}} + B_{k_{SGS}} \quad (۱۲)$$

ترم‌های تولید، اضمحلال و تولید به واسطه نیروهای شناوری در این رابطه، به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۸]:

$$P_{k_{SGS}} = -\overline{\tau}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (۱۳)$$

$$D_{k_{SGS}} = C_v \frac{\overline{k_{SGS}^{3/2}}}{\Delta} \quad (۱۴)$$

$$B_{k_{SGS}} = -\frac{C}{\tau_t^{SGS}} \Delta \sqrt{k_{SGS}} \left(\frac{\partial \dots}{\partial x_i} \cdot g_i \right) \quad (۱۵)$$

ضرایب C_v و C مقادیر ثابت با مقدار یک، برای تعیین ترم‌های اضمحلال و تولید به واسطه نیروی شناوری هستند [۱۸]. شار حرارتی و اسکالر مقیاس زیرشبکه در معادلات ۳ و ۴، به کمک روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\overline{\tau}_{u_i T} = -\dots C_p (\overline{T u_i} - \tilde{T} \tilde{u}_i) = \frac{\tau_t^{SGS} C_p}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad (۱۶)$$

$$\overline{\tau}_{u_i \zeta} = -\dots (\overline{\zeta u_i} - \tilde{\zeta} \tilde{u}_i) = \frac{\tau_t^{SGS}}{Sc_t} \frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial x_i} \quad (۱۷)$$

شبیه‌سازی احتراق با استفاده از روش اتلاف گردابه که در سال‌های اخیر برای استفاده در LES توسعه یافته و اصلاح شده است [۳۲ و ۳۳] صورت می‌گیرد. معادله انتقال سوخت، در این مدل به صورت رابطه (۱۸) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \dots \tilde{Y}_{fu}}{\partial t} + \frac{\partial \dots \tilde{u}_j \tilde{Y}_{fu}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\dots \tau + \frac{\tau_t^{SGS}}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{Y}_{fu}}{\partial x_j} \right) + \tilde{w}_{fu} \quad (۱۸)$$

نرخ سوزش در مدل اصلاح شده اتلاف گردابه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۹ و ۲۰]:

$$\tilde{w}_{fu} = \dots \left(\frac{3v}{C_{D1}} \right)^{1/2} \frac{x t}{1 - x t} \min \left(\tilde{Y}_{fu}, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{r} \right), \quad v = \sqrt{\frac{2}{3} C_{D1} \frac{k_{SGS}^{3/2}}{\Delta} + \frac{2}{9} C_{D2} \frac{k_{SGS}}{\Delta^2}} \quad (۱۹)$$

مقادیر C_{D1} و C_{D2} به ترتیب ۰/۵ و ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود. مقدار x و t با استفاده از مقیاس طولی جریان آتش محاسبه می‌شود [۲۰]. برای محاسبه نرخ تابش از محصولات احتراق، از مدل تابشی روش جهات گسسته استفاده شده است.

$$\left\langle \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial x} + y_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial y} + z_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial z} = \bar{K}_a (\dagger \bar{T}^4 - \bar{I}_i) \right. \quad (20)$$

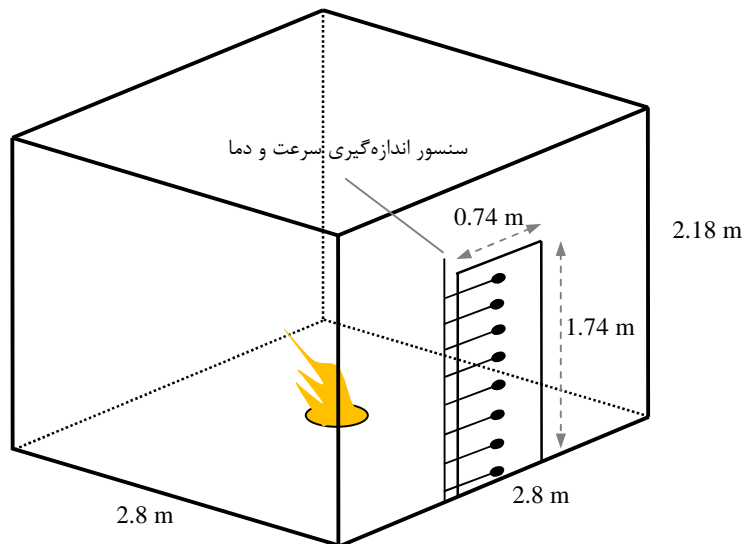
با محاسبه شدت تابش در هر نقطه، میزان انتقال حرارت تابشی از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود. ضرایب وزنی در معادله ۲۱ از مرجع [۲۱] بدست می‌آید.

$$S_{\text{rad}} = -4\bar{K}_a \dagger \bar{T}^4 + \sum_{i=1}^n w_i \bar{K}_a \bar{I}(\bar{s}_i) \quad (21)$$

واکنش یک-مرحله‌ای $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7.52\text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7.52\text{N}_2$ برای سوخت متان ورودی در نظر گرفته می‌شود. حل معادلات فوق از کد متن باز OpenFOAM استفاده شده است. معادلات به صورت ضمنی در کد اعمال شده است. مقدار عدد کورانت موضعی ۰/۴ در نظر گرفته شده است. برای برطرف کردن کوپلینگ فشار و سرعت از ترکیب الگوریتم پیزو و سیمپل استفاده شده است [۲۲]. حلقه داخلی پیزو که معادله فشار را شامل می‌شود برای برطرف کردن کوپلینگ فشار و سرعت و معادله بقای جرم استفاده شده است. همچنین الگوریتم سیمپل برای برطرف کردن کوپلینگ کمیات اسکالر و شار جرمی استفاده شده است [۲۲ و ۲۳].

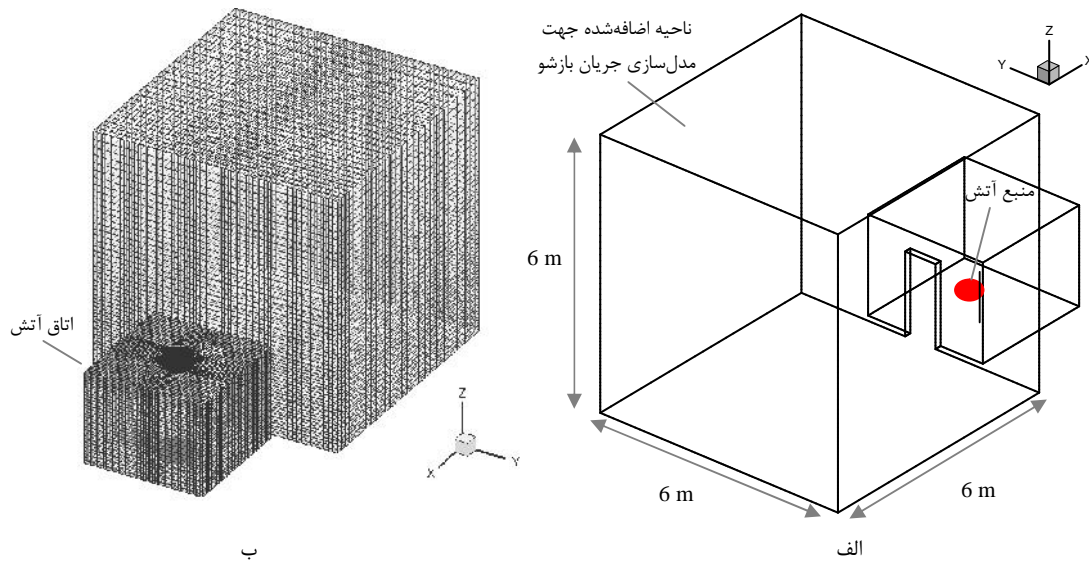
۴- هندسه مورد بررسی و شرایط مرزی

در این مطالعه، شبیه‌سازی‌ها با توجه به آزمون‌های استیکر و همکارانش [۲۴] در فضای یک-اتاقی با یک بازشو انجام شده است. طرحواره اتاق آزمون آتش استیکر و همکارانش در شکل ۲ نشان داده شده است. اتاق آزمون دارای طول و عرض ۲/۸ متر و ارتفاع ۲/۱۸ متر است. یک بازشو در یکی از وجوه اتاق قرار دارد. ابعاد بازشودر در شکل ۲ نشان داده شده است. منبع آتش در آزمون ایشان با تزریق سوخت متان در مرکز اتاق تامین می‌شود. سوخت از ناحیه‌ای با قطر ۰/۳ متر که دقیقاً در مرکز اتاق واقع شده، وارد می‌شود. بر اساس میزان سوخت ورودی، در این مطالعه دو توان ۶۲/۹، ۱۰۵/۳ کیلووات بررسی می‌شوند.



شکل ۲ طرحواره اتاق آزمون آتش استیکر و همکاران

یکی از پیچیدگی‌های تحلیل جریان در بازشو مرتبط با اتاق آتش، شرط مرزی بازشو است. در واقع در این مساله امکان لحاظ نمودن شرط مرزی مناسب برای بازشو وجود ندارد زیرا، خود بازشو قسمتی از میدان حل است. به همین منظور ناحیه اضافی به ناحیه محاسباتی به منظور شبیه‌سازی جریان در بازشو، به اتاق آتش، افزوده شود. هندسه مورد بررسی برای این مطالعه موردی و ساختار شبکه محاسباتی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ الف: هندسه مورد بررسی و فضای اضافه شده به اتاق ب: ساختار شبکه محاسباتی

به منظور محاسبه جریان از بازشو، فضای محاسباتی با طول، عرض و ارتفاع ۶ متر به اتاق آتش، اضافه شده است. برای ناحیه ورودی سوخت، شرط مرزی دبی ورودی در نظر گرفته شد. گرادیان کمیات اسکالر در مجاورت دیوار صفر است. در نواحی باز اطراف از شرط مرزی ترکیبی برای معادلات اندازه حرکت، انتقال انرژی و گونه‌ها استفاده شده است. به عبارت دیگر، در صورت ورود جریان به ناحیه محاسباتی مقدار سرعت صفر و دما و سایر گونه‌ها برابر شرایط محیط است. در این حالت در این نواحی گرادیان فشار با توجه به گرادیان چگالی در مرز، محاسبه می‌شود. اما در صورت خروج جریان از این ناحیه گرادیان تمامی کمیت‌ها صفر خواهد بود و مقدار فشار برابر با فشار کل است. برای این مساله در ابتدا شبکه محاسباتی با میزان ۱۶۲,۸۸۰ سلول در نظر گرفته شد. این تعداد شبکه در چهار مرحله تا میزان ۱,۹۸۲,۷۶۰ سلول افزایش یافت. مشاهده شد که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از ۱,۳۰۳,۰۴۰ به ۱,۹۸۲,۷۶۰ شبکه، تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات سرعت و دما حاصل نمی‌شود. بنابراین میزان شبکه محاسباتی ۱,۳۰۳,۰۴۰ در ادامه محاسبات در نظر گرفته شد. دوره زمانی حل نیز در این مطالعه موردی ۱۴۰ ثانیه در نظر گرفته شد تا اثرات شرایط اولیه در جواب نهایی ظاهر نشود. کمیت‌های متوسط‌گیری شده در محدوده ۳۰ ثانیه‌ای انتهای زمان محاسباتی، بدست آمده است.

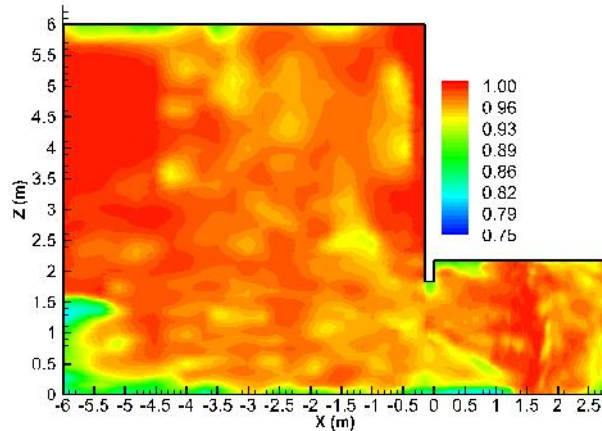
۵- نتایج

کیفیت شبیه‌سازی LES وابسته به درصدی از انرژی جنبشی توربولانسی است که در شبیه‌سازی با این روش حل می‌شود. پوپ [۲۵] معتقد است در شبیه‌سازی به روش LES باید حداقل ۸۰ درصد از انرژی جنبشی توربولانسی حل شود. این درصد به صورت رابطه (۲۸) تعریف می‌شود:

$$LES_{IQ} = \frac{k_{Resolved}}{k_{Total}} = \frac{k_{Resolved}}{k_{Resolved} + k_{SGS}} \quad (22)$$

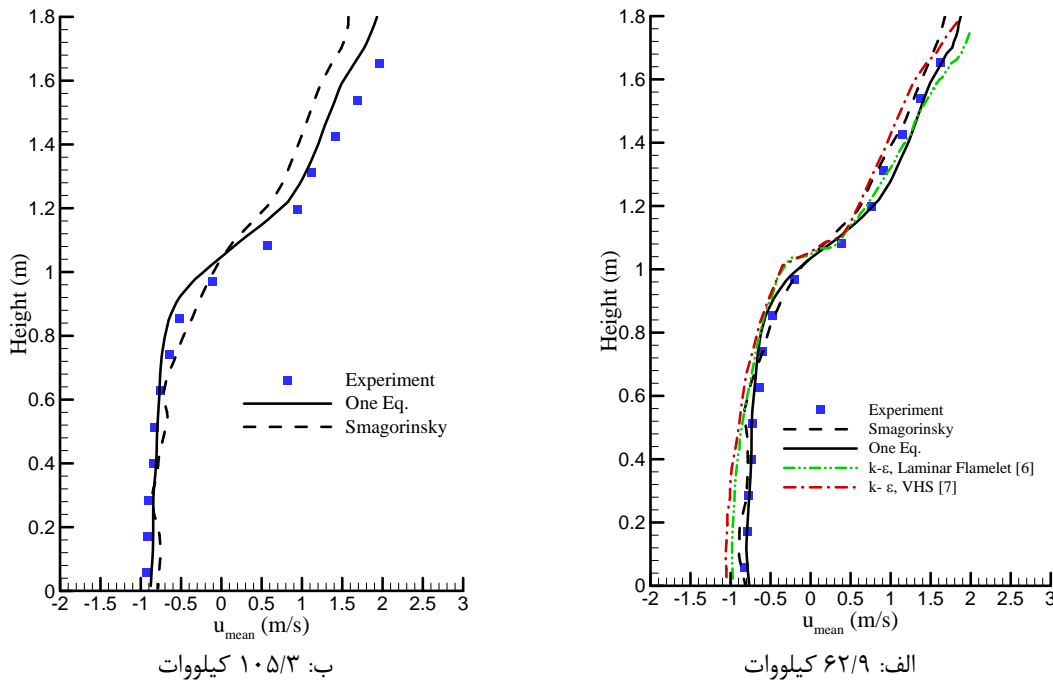
در این رابطه k_{Total} انرژی جنبشی توربولانسی کل جریان، $k_{Resolved}$ انرژی جنبشی توربولانسی حل شونده و k_{SGS} انرژی جنبشی توربولانسی در مقیاس زیرشبکه است. برای محاسبه مقادیر متوسط سرعت، از متوسط‌گیری زمانی مقادیر در محدوده شبیه-پایدار نتایج، استفاده شده است. به لحاظ عددی، LES_{IQ} عددی بین صفر و یک است. به لحاظ فیزیکی هنگامی که LES_{IQ} به سمت یک، میل کند، تمامی مقیاس‌های جریان به صورت مستقیم شبیه‌سازی شده است. مقدار LES_{IQ} از پهنای فیلتر جریان متاثر است. هرچه اندازه فیلتر کوچکتر باشد، میزان انرژی جنبشی حل شونده در میدان حل افزایش می‌یابد و در نتیجه LES_{IQ}

افزایش خواهد یافت. کیمپ [۲۶] و همکاران در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان‌های احتراقی نشان دادند که اگر کمتر از ۷۰ درصد از انرژی جنبشی جریان به وسیله شبکه محاسباتی حل شود، کیفیت شبیه‌سازی به این روش، ناکافی می‌باشد. در شکل ۴ برای شبکه محاسباتی انتخاب شده، به منظور نشان دادن کیفیت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، کانتور پارامتر LES_{I0} در صفحه مرکزی میدان حل، برای میزان حرارت آزاد شده، ۶۲/۹ کیلووات، رسم شده است. در اکثر نقاط میدان حل، مقدار این پارامتر بیش‌تر از ۰/۸ است. این موضوع کیفیت مناسب شبکه محاسباتی انتخاب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴ مقدار نسبت انرژی جنبشی اغتشاشی حل‌شونده (LES_{I0}) در صفحه مرکز میدان احتراق ۶۲/۹ کیلووات مدل یک-معادله‌ای

شکل ۵ مقایسه بین سرعت عمود بر بازشو را در دوتوان مورد بررسی، نشان می‌دهد. مرجع [۶] بر اساس مدل اغتشاشی $k - \nu$ و مدل احتراقی فلیم‌ت آرام با واکنش یک-مرحله‌ای بازگشت‌ناپذیر است. در مرجع [۷]، مدل اغتشاشی، $k - \nu$ و هیچ مدل احتراقی استفاده نشده و حرارت آزاد شده معادل آن لحاظ شده است. مقادیر منفی سرعت در شکل ۴ نشان می‌دهد که جریان از پایین بازشو به سمت اتاق وارد می‌شود و مقادیر مثبت نشان‌دهنده جریان‌های محصولات احتراق است که از بالای بازشو از اتاق آتش خارج می‌شوند. با توجه به حالت الف، مشاهده می‌شود که در ناحیه دما پایین، مدل‌های استفاده شده در کار حاضر، هر دو میزان سرعت را بهتر از مدل‌های $k - \nu$ پیش‌بینی می‌کنند. هر دو مدل [۶] و [۷] میزان سرعت را بیشتر از مقدار تجربی پیش‌بینی می‌کنند. در این مدل‌ها میزان جریان هوای ورودی به اتاق آتش، بیشتر از مقدار واقعی آن، محاسبه می‌شود. در این ناحیه، مقدار خطای سرعت در مرجع [۶]، مرجع [۷]، مدل اسم‌گورینسکی و مدل یک-معادله‌ای در ناحیه دما پایین در مقطع بازشو، به ترتیب، ۲۸، ۱۸، ۵/۵ و ۳/۵ درصد است. در این ناحیه کمترین میزان خطا را مدل یک-معادله‌ای دارد. اما در ناحیه‌ای که سرعت عمود بر بازشو مقدار مثبتی دارد، مدل استفاده شده در مرجع [۸] و همچنین مدل اسم‌گورینسکی در مطالعه حاضر، مقدار سرعت را کمتر از مقادیر تجربی پیش‌بینی می‌کنند در حالیکه مدل مرجع [۶] و همچنین مدل زیرشبکه یک-معادله‌ای این مقدار را بیشتر از مقدار تجربی برآورد می‌کنند. در این ناحیه نیز بیشینه خطا در مدل‌های مرجع [۷]، مرجع [۶]، اسم‌گورینسکی و یک-معادله‌ای به ترتیب، ۱۳، ۸، ۶ و ۳ درصد است. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که مدل یک-معادله‌ای نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌های اغتشاشی داشته است. البته این نکته نیز باید مورد توجه قرار گیرد که به دلیل تعدد مدل‌های زیرشبکه در جریان شبیه‌سازی آتش، نظیر مدل‌های تابش، احتراق و ... نمی‌توان تنها برتری جواب‌های را مربوط به مدل زیرشبکه اغتشاشی دانست. اما این مدل می‌تواند تاثیر مستقیم بر سایر مدل‌ها داشته باشد. زیرا بر اساس آنالوژی تعیین عبارت‌های زیرشبکه در معادلات فیلتر شده انرژی و گونه، این عبارت‌ها با توجه به اعداد پراکتل و اشمیت اغتشاشی و لزجت گردابه‌ای تعیین می‌شود. بنابراین لزجت گردابه‌ای اثر مستقیم بر عبارت‌های زیرشبکه در معادلات انرژی و گونه نیز دارد. به همین دلیل انتظار می‌رود که پیش‌بینی دقیق‌تر لزجت گردابه‌ای منجر به افزایش دقت در تعیین عبارت‌های زیرشبکه معادلات انرژی و گونه شود.



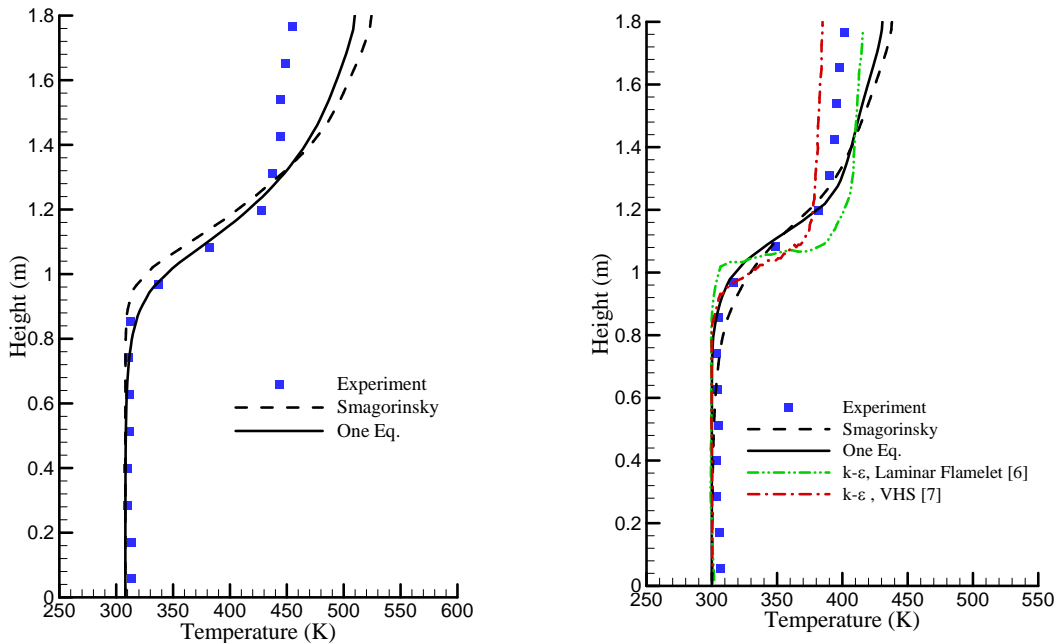
شکل ۵ مقایسه پروفیل سرعت عمود بر باز شو در حالات مختلف

شکل ۶ مقایسه بین دمای متوسط جریان در باز شو را نشان می‌دهد. الگوی پیش‌بینی شده برای تغییرات دما با نتایج تجربی به لحاظ کیفی همخوانی دارد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تمامی مدل‌های استفاده شده در ناحیه دما پایین، به خوبی مقدار دما را که در واقع همان دمای هوای محیط است، پیش‌بینی می‌کنند. یکی از موارد مهم در آتش‌سوزی، شیب تغییرات دمایی در سطح مشترک ناحیه دما پایین و دما بالا است. مدل یک-معادله‌ای، شیب تغییرات دمایی را با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌کند. در واقع روند تغییر دما از ناحیه دما پایین به ناحیه دما بالا با استفاده از این مدل، با نتایج تجربی سازگاری قابل قبولی دارد. این تغییرات دارای الگوی کاملاً متفاوت در مدل‌های استفاده شده در مراجع [۶] و [۷] است. با توجه به آنکه این ناحیه در واقع محل برخورد دو جریان با دمای متفاوت و در نتیجه چگالی متفاوت است، و همچنین به دلیل اختلاف فشار موجود، امکان تشکیل گردابه‌های باروکلینیک در این ناحیه افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال تشکیل گردابه به همراه وجود جریان‌های ورودی به هر کدام از مسیرهای هوای کم دما و محصولات احتراق، میزان اختلاط و پیچیدگی جریان را در این ناحیه بیشتر می‌کند. به نظر می‌رسد که این پیچیدگی‌ها به خوبی توسط مدل $k-\nu$ مرجع [۶] پیش‌بینی نمی‌شود. در مدل مرجع [۶]، رفتار تغییرات دما به جای پیروی از یک رفتار نرم^۱، رفتاری تند^۲ دارد. چنین رفتاری در شبیه‌سازی‌های LES که از مدل احتراقی نیز استفاده شده است، مشاهده نمی‌شود. اما نکته اصلی، میزان خطا در ناحیه دما بالا در تمامی مدل‌هاست. در مرجع [۷] که از مدل احتراقی استفاده نشده است، در ناحیه دما بالا، دمایی پیش‌بینی شده کمتر از دمای اندازه‌گیری تجربی است. یکی از دلایل آن لحاظ نشدن مدل احتراقی و در واقع جریان‌ها و اختلاط‌های ناشی از احتراق است. در واقع در این حالت تنها پلوم حرارتی ناشی از یک منبع حرارتی مدل شده است که به مراتب میزان فرآیند انتقال حرارت به دلیل کاهش این اختلاط، کم می‌شود. مقایسه مرجع [۶] با دو مدل زیر شبکه استفاده شده در مطالعه حاضر، نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل مرجع [۶] در نیمه پایینی ناحیه دما بالا ضعیف‌تر از مدل‌های مطالعه حاضر است در صورتی که در نیمه فوقانی (ارتفاع بیش از ۱/۴ متر) این نتیجه برعکس است. اما در مجموع بیشینه خطا در پیش‌بینی دما در مدل مرجع [۶] در حدود ۱/۳ درصد بیش از

¹Smooth

²Sharp

اسماگورینسکی و ۲/۶ درصد بیش از مدل یک-معادله‌ای است. افزایش تعداد جهات تابشی برای بهبود پیش‌بینی دما در ناحیه دما بالا مناسب خواهد بود.



ب: ۱۰۵/۳ کیلووات

الف: ۶۲/۹ کیلووات

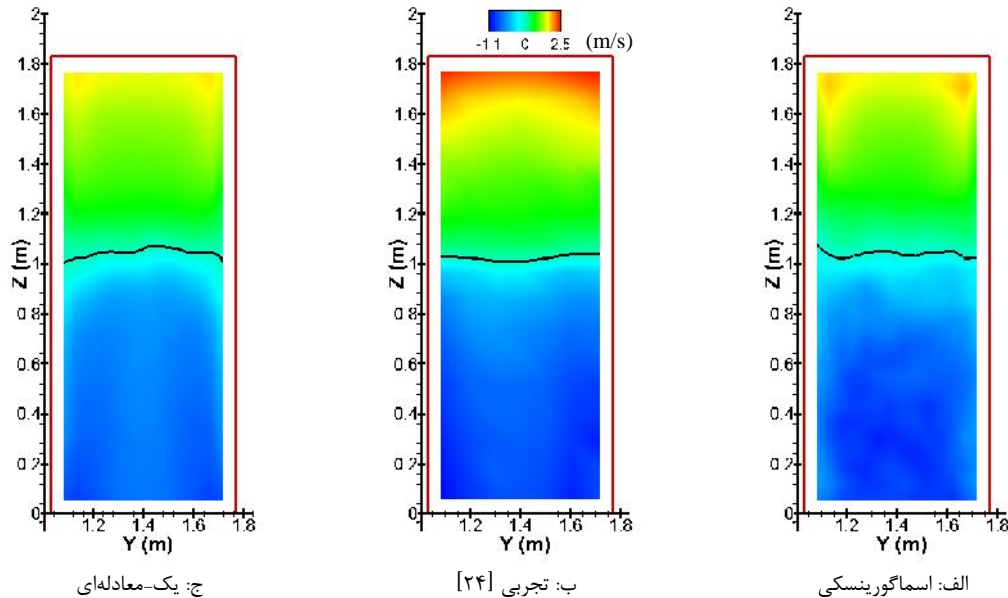
شکل ۶ مقایسه پروفیل دما در خط مرکزی بازشو در حالات مختلف شبیه‌سازی

یکی از این پارامترها، صفحه خنثی می‌باشد. این صفحه با توجه به مقطع بازشو (و البته ضخامت آن) تعریف می‌شود. صفحه خنثی، مکان هندسی نقاطی در مقطع بازشو است که سرعت عمود بر جریان در این نقاط، صفر می‌شود. در بالای این صفحه خروج محصولات احتراق دما بالا از اتاق آتش، و در پایین آن ورود هوای تازه کم دما از محیط اطراف به داخل اتاق رخ می‌دهد. در شکل ۷ تغییرات سرعت عمود بر بازشو در مقطع آن (حاشیه قرمز) بر مبنای مدل‌های بکار رفته و نتایج تجربی برای آتش ۶۲/۹ کیلووات نشان داده شده است. خط مشکی رنگ در وسط بازشو نشان دهنده مکان هندسی نقاطی با سرعت عمود بر درب، صفر است. مشاهده می‌شود که در هر دو حالت به لحاظ کیفی، محل صفحه خنثی در عرض بازشو به خوبی تخمین زده شده است. مقدار بیشینه خطا در تخمین ارتفاع صفحه خنثی در مدل اسماگورینسکی ۳/۹ درصد و در مدل یک-معادله‌ای، ۱/۷ درصد است. پیش‌بینی مدل یک-معادله‌ای در خصوص این کمیت دقیق‌تر است.

کمیت ماکروسکوپی دیگری که در اینجا، بررسی می‌شود، مقدار دبی هوای ورودی به اتاق آتش است. مقدار دبی هوای ورودی به اتاق آتش با توجه به سرعت عمود بر مقطع بازشو و چگالی هوا در ناحیه پایین صفحه خنثی و با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_{inlet} = \int_A \bar{u}_{ave} dA \quad (23)$$

جدول ۱ مقایسه دبی هوای ورودی در دو مورد بررسی در این مطالعه را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. با افزایش توان حرارتی، میزان دبی هوای ورودی به اتاق آتش، افزایش می‌یابد. به طور کلی نتایج هر دو مدل، همخوانی قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. بیشینه خطا در پیش‌بینی دبی هوای ورودی به اتاق آتش برای مدل‌های زیرشبکه اسماگورینسکی و یک-معادله‌ای به ترتیب ۴/۵ و ۳/۵ درصد است.

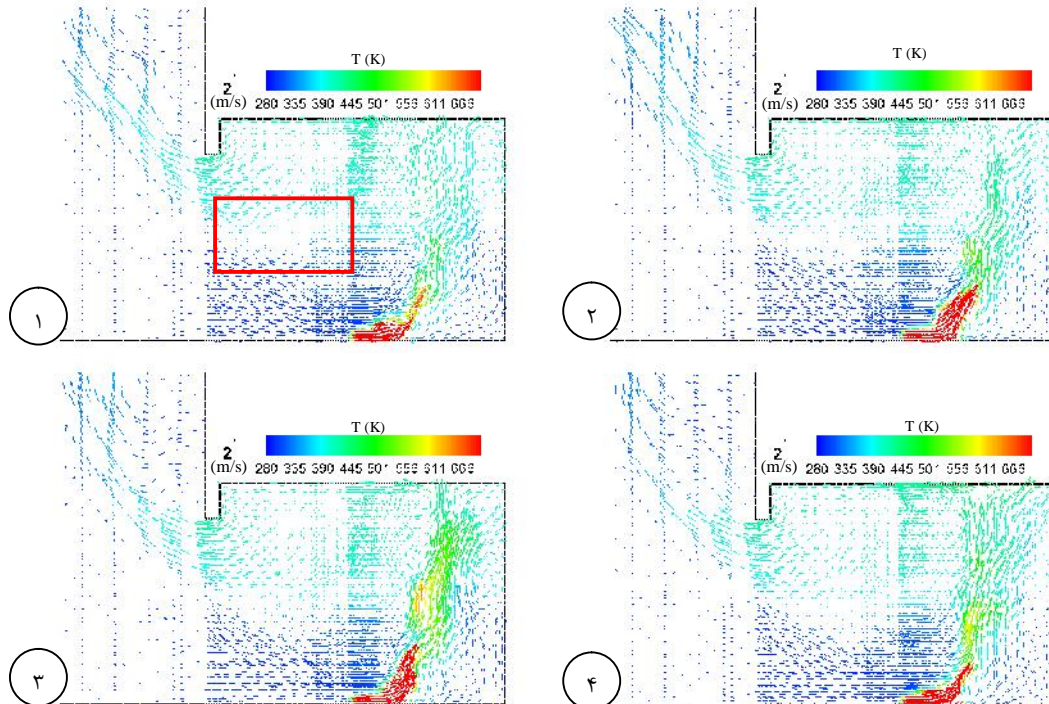


شکل ۷ مقایسه کیفی سرعت عمود بر باز شو و موقعیت صفحه خنثی با نتایج تجربی برای آتش ۶۲/۹ کیلووات

جدول ۱ مقایسه دبی هوای ورودی به اتاق در حالات مختلف شبیه‌سازی

توان (کیلووات)	تجربی [۷] (kg/s)	اسماگورینسکی (kg/s)	یک-معادله‌ای (kg/s)
۶۲/۹	۰/۵۶۳	۰/۵۸۸	۰/۵۸۳
۱۰۵/۳	۰/۶۲۴	۰/۶۰۸	۰/۶۳۲

شکل ۸ تغییرات لحظه‌ای بردار سرعت و دمای متناظر آن در صفحه مرکزی YZ میدان محاسباتی را در ۴ زمان متوالی با فاصله زمانی ۰/۵ ثانیه، با استفاده از مدل یک-معادله‌ای در آتش با توان ۶۲/۹ کیلووات، نشان می‌دهد. رفتار کاملاً نوسانی آتش استخری که در مرجع [۱۵] به آن اشاره شده است، در این شکل قابل مشاهده است. همچنین در مقطع ورودی باز شو، به خوبی ورود هوا از پایین به اتاق آتش و خروج آن از بالای آن در هر گام زمانی، قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که قسمت دما بالا در اطراف ناحیه تشکیل شعله آتش، دائماً در حال تغییر شکل است. اینگونه مشاهدات، با استفاده از مدل‌های RANS قابل برداشت نمی‌باشد. در واقع یکی از ویژگی‌های استفاده از روش LES امکان بررسی رفتار شبیه پایدار آتش‌سوزی و جریان‌های القایی آن است. در این مطالعه با توجه به لحاظ نمودن فضای اضافی برای شبیه‌سازی جریان باز شو، امکان بررسی رفتار جریان خروجی از اتاق نیز وجود دارد. در صورتی که به این جریان که در واقع نوعی پلوم حرارتی حاصل از آتش‌سوزی است، توجه شود، مشاهده می‌شود که در مقاطع مختلف، همواره مقداری ورود هوا از ناحیه اطراف آن، به این پلوم حرارتی وجود دارد. این ورود هوا منجر می‌شود که در واقع قطر پلوم با حرکت به سمت بالا افزایش یافته و دمای آن نیز کاهش یابد. داخل اتاق آتش هم در مجاورت باز شو و ناحیه ورود هوای بیرون، تقابل ناحیه‌ای که از بالای آن جریان هوای داغ خارج می‌شود، و از پایین آن هوای سرد وارد اتاق می‌شود، جالب توجه است (به ناحیه مربعی که در حالت (۱) نشان داده شده توجه فرمایید). این ناحیه در واقع تقابل دو جریان در جهت مخالف با خواص ترموفیزیکی مختلف (به دلیل تغییرات دمایی آنها) است. به دلیل اثر نیروهای برشی این دو جریان، همواره در گام‌های زمانی مختلف قسمتی از جریان هوای خروجی به هوای ورودی می‌پیوندد و یا عکس این رفتار رخ می‌دهد. این رویداد موجب می‌شود که در تمامی گام‌های زمانی همواره یک ناحیه گردابه‌ای در محلی تلاقی دو جریان ایجاد شود.



شکل ۸ تغییرات لحظه‌ای بردار سرعت و دما در صفحه مرکزی با فاصله زمانی ۰/۵ ثانیه

علاوه بر آن، مشاهده می‌شود که هوای ورودی به اتاق آتش، به سمت شعله حرکت کرده و به جریان تشکیل شده در بالای شعله می‌پیوندد. ورود این هوا موجب می‌شود که جبهه شعله به سمت دیوار مخالف دیواری که باز شو در آن قرار دارد، متمایل شود. در عمده جریان‌های آتش‌سوزی به دلیل وجود چنین جریانی، آتش استخری مایل تشکیل می‌شود. دمای این هوا به مرور در داخل اتاق، افزایش یافته و به دلیل کاهش چگالی و نیز نیروهای شناوری به سمت بالا حرکت می‌کند. این جریان پس از برخورد با سقف اتاق آتش، به دلیل اختلاف فشار بین اتاق و محیط بیرون، خارج می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی جریان القایی آتش‌سوزی در فضای یک-اتاقی پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده، مقدار سرعت در ناحیه دما پایین باز شو، در دو مدل LES بهتر از RANS (مطالعات پیشین) است. مدل‌های RANS که پیش از این استفاده می‌شدند، میزان سرعت را بیشتر از مقدار تجربی پیش‌بینی می‌کنند. این نشان می‌دهد که در این مدل‌ها میزان جریان هوای ورودی به اتاق آتش، بیشتر از مقدار واقعی آن، محاسبه می‌شود. اما در ناحیه دما بالا، مدل زیر شبکه یک-معادله‌ای در حدود ۳ درصد نسبت به اسماگورینسکی و ۱۰ درصد نسبت به RANS بهبود جواب دارد. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که مدل یک-معادله‌ای نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌های اغتشاشی داشته است. در خصوص پروفیل دما، تمامی مدل‌های استفاده شده در ناحیه دما پایین، به خوبی مقدار دما را که در واقع همان دمای هوای محیط است، پیش‌بینی می‌کنند. یکی از موارد مهم در آتش‌سوزی، شیب تغییرات دمایی در سطح مشترک ناحیه دما پایین و دما بالا است. مدل یک-معادله‌ای، شیب تغییرات دمایی را با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌کند. در واقع روند تغییر دما از ناحیه دما پایین به ناحیه دما بالا با استفاده از این مدل، با نتایج تجربی سازگاری قابل قبولی دارد. در نهایت مقایسه کمیات ماکروسکوپی صفحه خنثی و دبی هوای ورودی به اتاق نیز نشان از برتری مدل یک-معادله‌ای نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

مراجع

- 1- Quintiere, J.G., *Fundamentals of Fire Phenomena*, John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- 2- Brani, W.B.D.M., "Two-Zone Model for a Single-Room Fire", *Fire Safety Journal*, Vol. 19, pp.189-216, 1992.
- 3- Fu, Z. and Hadjisophocleous, G., "A Two-Zone Fire Growth and Smoke Movement Model for Multi-Compartment Buildings", *Fire Safety Journal*, Vol. 34, pp. 257-285, 2000.
- 4- Xiaojun, C., Lizhong, Y., Zhihua, D. and Weicheng, F., "A Multi-Layer Zone Model for Predicting Fire Behavior in a Fire Room", *Fire Safety Journal*, Vol. 40, pp. 267-281, 2005.
- 5- Novozhilov, V., "Computational Fluid Dynamics Modeling of Compartment Fires", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, pp. 661-666, 2001.
- 6- Yeoh, G.H., Yuen, R.K.K., Chueng, S.C.P. and Kwok, W.K., "On Modelling Combustion, Radiation and Soot Processes in Compartment Fires", *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 771-785, 2003.
- 7- Stavrakakis, G.M. and Markatos, N.C., "Simulation of Airflow in One- and Two-Room Enclosures Containing a Fire Source", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2690-2703, 2009.
- 8- McGrattan, K.B., Rehm, R.G. and Baum H.R., "Fire-Driven Flows in Enclosures", *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, pp. 285-291, 1994.
- 9- McGrattan, K.B., Rehm, R.G. and Baum, H.R., "Numerical Simulation of Smoke Plumes from Large Oil Fires", *Atmospheric Environment*, Vol. 30, pp. 4125-4136, 1996.
- 10- McGrattan, K.B., Rehm, R.G. and Baum, H.R., "Large Eddy Simulation of Smoke Movement", *Fire Safety Journal*, Vol. 30, pp.161-178, 1998.
- 11- Xin, Y., Gore, J.P., McGrattan, K.B., Rehm, R.G. and Baum, H.R., "Fire Dynamic Simulation of a Turbulent Buoyant Flame using a Mixture-Fraction-Based Combustion Model", *Combustion and Flame*, Vol. 141, pp. 329-335, 2005.
- 12- Sun, X.Q., and et. al., "Studies on Smoke Movement in Stairwell Induced by an Adjacent Compartment Fire", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2757-2765, 2009.
- 13- Chow, W.K. and Zou, G.W., "Correlation Equations on Fire-Induced Air Flow Rates through Doorway Derived by Large Eddy Simulation", *Building and Environment*, Vol. 40, pp. 897-906, 2005.
- ۱۴- حیدری نژاد، ق.، پاسدارشهری، ه. و مظاهری، ک.، "بررسی جریان هوای القایی حاصل از آتش‌سوزی در فضای دو اتاقی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ"، *مجله علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۳، شماره ۴، ۱۳۹۲، ۷۴-۸۵.
- ۱۵- پاسدارشهری، ه.، حیدری نژاد، ق. و مظاهری، ک.، "مقایسه مدل‌های زیر شبکه توربولانسی برای مدل‌سازی آتش‌سوزی بزرگ مقیاس به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ"، *مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران*، کاشان، دانشگاه کاشان، بهمن ۱۳۹۰.
- 16- Cheung, S.C.P., Yeoh, G.H., Cheung, A.L.K. and Yuen, R.K.K., "Flickering Behaviour of Turbulent Buoyant Fires Using Large-Eddy Simulation", *Numerical Heat Transfer Part A*, Vol. 52, pp. 679-712, 2007.
- 17- Smagorinsky, J., "General Circulation Experiment with the Primitive Equations: Part I. the Basic Experiment", *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-164, 1963.
- 18- Yeoh, G.H. and Yuen, K.K., *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*, Elsevier Inc., 2009.
- 19- Chen, Z., Wen, J.X., Xu, B. and Dembele S., "Large Eddy Simulation of Fire Dynamics with the Improved Eddy Dissipation Concept", *Fire Safety Science*, Vol. 10, pp. 195-808, 2011.
- 20- Chen, Z.B., Wen, J.X., Xu, B.P. and Dembele, S., "The Extension of Eddy Dissipation Concept to the Framework of Large Eddy Simulation", in 3rd FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop, Norwood, MA, USA, May 2011.
- 21- Modest, M., *Radiative Heat Transfer*, 2nd Edition, Academic Press, 2003.
- 22- Wang, Y., Chatterjee, P. and De Ris J.L., "Large Eddy Simulation of Fire Plumes", *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 33, pp. 2473-2480, 2011.
- 23- Wang, Y., Meredith, K., Chatterjee, P., Krishnamoorthy, N., Zhou, X. and Dorofeev, S., "Status of FireFOAM Development and Future Plan", in 3rd FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop, Norwood, MA, USA, May 2011.
- 24- Steckler, K.D., Quintiere, J.G. and Rinkinen, W.J., "Flow induced by fire in a compartment", NBSIR 82-2520, National Bureau of Standards, 1984.
- 25- Pope, S.B., *Turbulent Flows*. First Edition, Cambridge University Press, 2000.
- 26- Kempf, A., Lindstedt, R.P. and Janicka, J., "Large-eddy Simulation of a Bluff-body Stabilized Nonpremixed Flame", *Combustion and Flame*, Vol. 144, pp. 170-189, 2006.