

بررسی جریان القایی در هنگام آتش‌سوزی در مجاورت دیوار عمودی آتش‌گیر به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

هادی پاسدار شهری^۱، قاسم حیدری نژاد^۲ و کیومرث مظاهری^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مخاطب)، pasdar@modares.ac.ir

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، gheidari@modares.ac.ir

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، kiumars@modares.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۱۲/۲۲، پذیرش: ۹۲/۲/۲۶)

در این مقاله، رفتار نوسانی و متوسط زمانی آتش‌سوزی در مجاورت دیوار عمودی و جریان القایی آن در حالت سه‌بعدی و ناپایا به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بررسی شده است. به‌منظور افزایش دقت محاسبه لزجت اغتشاشی، از مدل یک‌معادله‌ای برای اعمال اثرات زیرشبکه استفاده شده است. مدل‌سازی احتراق بر مبنای احتراق غیر پیش‌آمیخته و با استفاده از مدل اصلاح‌شده ائتلاف گردابه برای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل‌سازی تابش به روش جهات گسسته صورت گرفته است. دو میزان نرخ حرارت آزاد شده ۳۶ و ۵۴ کیلووات در حالت بزرگ مقیاس ارزیابی شده است. مقایسه مقادیر متوسط زمانی دما و سرعت حاصل از مطالعه حاضر با نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش استفاده‌شده تغییرات دما و سرعت را در مجاورت دیوار با تخمین قابل قبولی محاسبه می‌کند، اما به‌طور کلی در فواصل نزدیک به دیوار خطای تخمین دما و سرعت افزایش می‌یابد. بررسی رفتار نوسانی آتش نشان می‌دهد که دامنه تغییرات سرعت عمودی لحظه‌ای با دور شدن از دیوار در راستای عمود بر آن کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، شدت نوسانات در راستای موازی با دیوار با دورتر شدن از ناحیه تشکیل شعله به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مدل یک‌معادله‌ای، آتش‌سوزی دیوار عمودی، جریان القایی آتش

مقدمه

یکی از جریان‌های پیچیده در مسائل احتراقی، آتش‌سوزی، تشکیل جریان‌های القایی و نیروی شناوری حاصل از آن است. آتش در واقع احتراقی کنترل‌نشده و یا رشد و انتشار ناخواسته شعله است. سازوکارهای مختلفی نظیر نفوذ، جابه‌جایی، جریان‌های شناوری، جریان‌های ورودی به ناحیه احتراق، اختلاط اغتشاشی، واکنش شیمیایی و انتقال حرارت تابشی در مسائل شبیه‌سازی دینامیکی رفتار آتش‌سوزی وجود دارد [۱]. در این میان، فرایند آتش‌سوزی در فضاهای مجاور دیوار عمودی به دلیل اثرات دیوار بر رژیم شعله و جریان‌های احتراقی، افزایش دمای دیوار و امکان تخریب آن و انتقال آتش‌سوزی به فضاهای بالاتر، از نگاه کاربردی و ایمنی حائز اهمیت است. به‌عنوان مثالی از این نوع جریان می‌توان به آتش‌سوزی مواد پلیمری نظیر عایق‌های حرارتی ساختمان و یا پوشش‌های آتش‌گیر روی دیوار عمودی اشاره کرد. مثال دیگری از این نوع جریان‌ها در آتش‌سوزی در فضای بسته ساختمان بلند مرتبه هنگامی که هوای لازم برای احتراق فراهم نباشد رخ می‌دهد. در این حالت، پس از شکستن بازو مجاور اتاق و ارتباط آن با محیط، شعله به بیرون هدایت می‌شود و جریان عمودی به سمت بالا در مجاورت دیوار و در اثر نیروی شناوری ایجاد می‌کند [۲]. به لحاظ ایمنی، این جریان بسیار حائز اهمیت است. در این حالت، شعله می‌تواند در مجاورت دیوار عمودی نمای ساختمان رشد کند و یا اینکه دود و سایر محصولات احتراق از این مسیر، به سمت فضاهای فوقانی حرکت کنند [۲]. به دلیل پیچیدگی‌های خاص این نوع جریان، استفاده از مدل‌های مناسب و توانمند در شبیه‌سازی ضروری است. از سوی دیگر، شناخت و شبیه‌سازی صحیح این جریان به تصمیم‌گیری مناسب در طول فرایند اطفاء حریق کمک خواهد کرد.

با توجه به اهمیت جریان آتش‌سوزی در مجاورت دیوار عمودی و رشد عمودی شعله در مجاورت دیوار، مطالعات تجربی و عددی متعددی در این زمینه صورت گرفته است [۳-۸]. در عمده این مطالعات رشد عمودی آتش و انتشار آن در حالت یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شد و اثرات مقدار و شکل سوخت جامد و ماهیت نوسانی جریان در نظر گرفته نمی‌شد. علاوه بر آن، در بیشتر این مطالعات، طول شعله به‌صورت تجربی بررسی شده و اثرات انتقال حرارت و افزایش دما بررسی نشده است. کوئینتیر [۹]، با استفاده از یک مدل دوناچی‌های، جریان آتش در مجاورت دیوار در اتاق را بررسی کرد. این مدل برای آتش‌سوزی در مجاورت دیوار و تنها در فضاهای بسته کاربرد دارد. از طرف دیگر، با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، مدل ناحیه‌ای در پیش‌بینی رفتار جریان برای این مسئله ناتوان است. افزایش قابل توجه دما در مجاورت دیوار در این مسئله و نرخ واقعی مصرف سوخت از مشکلات تعریف مدل ناحیه‌ای مناسب برای آتش‌سوزی در مجاورت دیوار در یک اتاق است. دلچاتسوس [۱۰] مدل جبری ساده‌ای را برای آتش اغتشاشی در مجاورت دیوار توسعه داد. مدل جبری ایشان از نتایج تحلیل اغتشاشی این پدیده حاصل شده است. گرچه مدل ایشان به‌لحاظ تشابهی تغییرات دمایی را مشابه نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند، اما به‌دلیل ساده‌سازی‌های انجام‌شده، تخمین دما و میزان تابش در این مدل با خطای قابل ملاحظه‌ای صورت می‌گیرد. تسای و دریسدل [۱۱] نشان دادند که عرض ناحیه ورودی سوخت گازی در دیوار عمودی بر طول شعله آن، در حالی که سوخت به‌صورت کنترل‌شده و تحت جریان معلوم وارد می‌شود، اثر دارد. تسای و وان [۱۲] رشد آتش روی دیوار را برای ماده پلیمری بررسی کردند. مطالعات ایشان نشان می‌دهد که برای ماده پلیمری جامد، که به‌عنوان سوخت در نظر گرفته می‌شد، ابعاد ماده بر طول شعله و سرعت انتشار آتش اثر دارد. رانگولا و همکارانش [۱۳] اثر ضخامت دیوار آتش‌گیر از جنس ماده پلیمری را بر رشد آتش بررسی کردند. ایشان ماده آتش‌گیر با ضخامت ۲۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر را بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که ضخامت ماده آتش‌گیر و ابعاد ماده سوختی در انتشار آتش موثر است. بر این اساس، با کاهش ضخامت دیوار، طول شعله و سرعت رشد آتش کاهش می‌یابد. البته در مطالعه مرجع [۱۳] فرض شعله آرام در نظر گرفته شده است. وانگ و همکارانش [۱۴]، آتش بین دو دیوار عمودی، که هر کدام از ماده پلیمری آتش‌گیر بودند، را بررسی کردند. این مطالعه به‌صورت دوبعدی و با استفاده از روش‌های متوسط‌گیری زمانی معادلات ناویر استوکس (RANS) صورت گرفت. نتایج ایشان نشان می‌دهد، با افزایش نسبت فاصله به ارتفاع دیوارهای عمودی، میزان سهم انتقال حرارت تابشی از ۹۰ به ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش این نسبت (بیش از ۰/۳) اثر دو شعله بر یکدیگر ناچیز شده و با توجه به یافته‌های ایشان نتایج به‌دست آمده با نتایج بررسی تنها یک دیوار عمودی مطابقت دارد. وانگ و همکارانش [۱۵] رفتار جریان شناوری القایی آتش کنار دیوار عمودی را با نرم‌افزار FDS^۱، که اساس آن شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با مدل زیرشبکه اسماکورینسکی است، بررسی کردند. در این تحقیق، برای مدل‌سازی تابش از مدل P-1 و برای مدل‌سازی احتراق مدل کسر مخروط به‌کار برده شد. ایجاد آتش در دیوار جامد در اینجا به‌صورت مجازی و با تزریق پروپان به‌وسیله مشعل متخلخل روی دیوار انجام گرفت. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که سهم انتقال حرارت تابشی برای جریان مورد استفاده با افزایش تزریق سوخت تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، رفتار آتش در کنار دیوار به‌صورت کاملاً وابسته به زمان و سه‌بعدی است. یکی از منابع خطای این تحقیق در نظر گرفتن اثرات اغتشاش در مدل احتراقی زیرشبکه است. از طرف دیگر، مدلی برای دوده ارائه نشده است و برای ساده‌سازی، غلظت آن در کل میدان ثابت فرض شده است. این فرض خود می‌تواند در تعیین تابش ایجاد خطا کند.

نتایج بررسی‌های نگارندگان [۱۷] نشان می‌دهد که انتخاب مدل‌های مناسب زیرشبکه تاثیر مستقیمی بر دقت نتایج حل عددی دارد. در این میان مدل زیرشبکه یک‌معادله‌ای توانایی بالاتری نسبت به مدل اسماکورینسکی در پیش‌بینی رفتارهای نوسانی و متوسط جریان آتش استخری دارد [۱۷]. در مدل یک‌معادله‌ای، مقدار لزجت اغتشاشی با توجه به انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال در مقیاس زیرشبکه تعیین می‌شود. به همین دلیل، انتظار می‌رود که دستیابی به دقت بالاتر نسبت به مدل اسماکورینسکی در محاسبه لزجت اغتشاشی در این مدل حاصل شود. در این مقاله، مدل زیرشبکه یک‌معادله‌ای به‌همراه مدل

1. Fire Dynamic Simulator

احتراقی نرخ اتلاف گردابه^۱ اصلاح شده در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ و مدل جهات گسسته در تابش به منظور پیش بینی رفتار آتش در مجاورت دیوار به کار می رود.

معادلات حاکم

جریان هوای حاصل از آتش سوزی، جریان با ماخ پایین و چگالی متغیر است. با توجه به متغیر بودن چگالی از متوسط وزنی فاور برای متوسط گیری معادلات ناویر استوکس استفاده می شود [۱۸، ۱۹]. معادلات متوسط گیری شده بقای جرم، تکانه، انرژی و کمیت اسکالر در مختصات کارتزین برای این جریان به صورت زیر نوشته می شوند:

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

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

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

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

در این روابط ρ چگالی مخلوط، u_i سرعت، P فشار و T دماست. همچنین، ϕ نشان دهنده هر کمیت اسکالر در جریان و $\bar{\omega}_r$ نرخ حرارت تولید شده در اثر احتراق است. جمله های S_ϕ و S_{rad} نیز نرخ انتقال حرارت تابشی و جمله تولید در معادلات انرژی و گونه اند. تانسور تنش های لزجی، بردار شار حرارتی و شار جرمی، هر کدام به صورت زیر تعریف می شوند:

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

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

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

در این روابط Pr و Sc_ϕ عدد پرانتل و اشمیت هستند. برای بسته شدن معادلات بالا، لازم است که مدل زیر شبکه مناسبی برای جمله تنش های زیر شبکه انتخاب شود. تنش های زیر شبکه و لزجت اغتشاشی در اینجا به صورت زیر معرفی می شوند:

$$\bar{\tau}_{u_i u_j} = \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j = -2 \mu_t^{SGS} \tilde{S}_{ij} + \frac{1}{3} \bar{\tau}_{kk} \delta_{ij} \quad (8)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (9)$$

$$\mu_t^{SGS} = \bar{\rho} C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \quad (10)$$

در مطالعات پیشین، پیشنهاد شده که از جمله $\bar{\tau}_{kk}$ به دلیل ناچیز بودن آن در مقابل تنش های زیر شبکه، صرف نظر شود. در این معادلات $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ پهنای فیلتر و μ_t^{SGS} لزجت اغتشاشی است. مدل زیر شبکه ای که در این مطالعه استفاده شده مدل یک معادله ای است [۲۰]. مقدار C_k در رابطه بالا، با توجه به مطالعات نظری ساگات^۲، ۰/۰۶۹ در نظر گرفته می شود [۲۰]. در

1. Eddy Dissipation Concept (EDC)
2. Sagaut

این مدل لزجت اغتشاشی با استفاده از انرژی جنبشی در مقیاس زیرشبکه محاسبه می‌شود. به این ترتیب لازم است که معادله انتقال اضافی برای محاسبه انرژی جنبشی اغتشاشی در مقیاس زیرشبکه حل شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k_{SGS}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i k_{SGS}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_i} \right) + P_{k_{SGS}} - D_{k_{SGS}} + B_{k_{SGS}} \quad (11)$$

جمله‌های تولید، اضمحلال و تولید به‌واسطه نیروهای شناوری در این رابطه به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۰]:

$$P_{k_{SGS}} = -\bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

$$D_{k_{SGS}} = C_\varepsilon \frac{\bar{\rho} k_{SGS}^{3/2}}{\Delta} \quad (13)$$

$$B_{k_{SGS}} = -\frac{C}{\sigma_\rho} \Delta \sqrt{k_{SGS}} \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} \cdot g_i \right) \quad (14)$$

ضرایب C و σ_ρ مقادیر ثابت با مقدار یک، برای تعیین جمله‌های اضمحلال و تولید به‌واسطه نیروی شناوری اند [۲۰]. همچنین، $C_\varepsilon = 1.048$ است [۲۰]. شار حرارتی و اسکالر در مقیاس زیرشبکه در معادلات (۳) و (۴) به کمک روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{\tau}_{u_i T} = -\bar{\rho} C_p (\widetilde{T u_i} - \tilde{T} \tilde{u}_i) = \frac{\mu_t^{SGS} C_p}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad (15)$$

$$\bar{\tau}_{u_i \phi} = -\bar{\rho} (\widetilde{\phi u_i} - \tilde{\phi} \tilde{u}_i) = \frac{\mu_t^{SGS}}{Sc_i} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x_i} \quad (16)$$

برای شبیه‌سازی احتراق از روش اتلاف گردابه استفاده شده است. این مدل در ابتدا برای معادلات به روش RANS پیشنهاد شده بود که در سال‌های اخیر برای استفاده در LES توسعه یافته و اصلاح شده است [۲۲، ۲۱]. معادله انتقال سوخت در این مدل به‌صورت رابطه (۱۷) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_{fu}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_{fu}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \alpha + \frac{\mu_t^{SGS}}{Sc_i} \frac{\partial \tilde{Y}_{fu}}{\partial x_j} \right) + \tilde{w}_{fu} \quad (17)$$

نرخ سوزش در مدل اصلاح‌شده اتلاف گردابه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۲۲، ۲۱]:

$$\tilde{w}_{fu} = \bar{\rho} \left(\frac{3\varepsilon}{\nu C_{D1}} \right)^{1/2} \frac{\gamma \chi}{1 - \gamma \chi} \min \left(\tilde{Y}_{fu}, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{r} \right); \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3}} C_{D1} \frac{k_{SGS}^{3/2}}{\Delta} + \frac{2}{9} C_{D2} \nu \frac{k_{SGS}}{\Delta^2} \quad (18)$$

مقادیر C_{D1} و C_{D2} به ترتیب ۰/۵ و ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۲]. مقدار γ و χ با استفاده از مقیاس طولی جریان آتش محاسبه می‌شود [۲۲].

$$\gamma = \left(\frac{L^*}{L_t} \right)^\alpha \quad (19)$$

$$\chi = \frac{\phi(1+S)}{(\phi+S)} \quad \text{for } 0 \leq \phi < 1 \quad (20)$$

$$\chi = \frac{(1+S)}{(\phi+S)} \quad \text{for } \phi \geq 1$$

که در آن ϕ نسبت هم‌ارزی است. در رابطه (۱۹) مقادیر L^* و L_t طول‌های مشخصه‌اند که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$L^* = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (21)$$

$$L_i = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، \dot{Q} ، T_∞ و ρ_∞ به ترتیب مقدار حرارت بیشینه آزاد شده از آتش، دما و چگالی محیط اند. برای محاسبه نرخ تابش از محصولات احتراقی از مدل تابشی روش جهات گسسته^۱ استفاده شده است. معادله انتقال شدت تابش به صورت زیر نوشته می شود:

$$\xi_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial x} + \eta_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial y} + \zeta_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial z} = \bar{K}_a (\sigma \bar{T}^4 - \bar{I}_i) \quad (23)$$

$$S_{rad} = -4\bar{K}_a \sigma \bar{T}^4 + \sum_{i=1}^n w_i \bar{K}_a \bar{I}(\bar{s}_i) \quad (24)$$

ضرایب وزنی در معادله (۲۴) از مرجع [۲۳] به دست می آید. با محاسبه شدت تابش در هر نقطه، میزان انتقال حرارت تابشی از رابطه (۲۴) محاسبه می شود. در این مطالعه تنها تابش از دی اکسید کربن و بخار آب در نظر گرفته می شود.

روش حل

روش حل عددی

برای حل معادلات بالا از کد متن باز این فوم^۲ استفاده شده است. معادلات به صورت ضمنی در کد اعمال شد. مقدار عدد کورانت موضعی ۰/۴ در نظر گرفته شده است. برای برطرف کردن کوپلینگ فشار و سرعت از ترکیب الگوریتم پیزو^۳ و سیمپل^۴ استفاده شده است [۲۴]. حلقه داخلی پیزو، که معادله فشار را شامل می شود، برای برطرف کردن کوپلینگ فشار و سرعت و معادله بقای جرم استفاده شده است. حلقه خارجی سیمپل برای برطرف کردن کوپلینگ سایر معادلات استفاده می شود. جزئیات الگوریتم حل در مراجع [۲۵، ۲۴] ذکر شده است. برای محاسبه خواص ترموفیزیکی مواد، از کتابخانه کد استفاده شده است. در این کتابخانه ها، خواص ترموفیزیکی مخلوط گازی با معلوم بودن دما و غلظت گازها و با استفاده از چند جمله ای ها محاسبه می شود. محاسبه خواص تابشی در این تحقیق برای توده گاز انجام می شود. تنها میزان تابش از گازهای دی اکسید کربن و بخار آب در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب جذب با توجه به غلظت این دو محاسبه می شود. ضریب جذب گاز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۷]:

$$K_a(T) = p [X_{CO_2} K_{CO_2}(T) + X_{H_2O} K_{H_2O}(T)] \quad (25)$$

در این رابطه، p فشار مطلق، X_{CO_2} و X_{H_2O} به ترتیب کسر مولی دی اکسید کربن و بخار آب است. برای محاسبه ضریب جذب دی اکسید کربن و بخار آب، از چند جمله ای درجه شش مطابق رابطه (۲۶) استفاده شده است [۲۷].

$$K(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 + a_6 T^6 \quad (26)$$

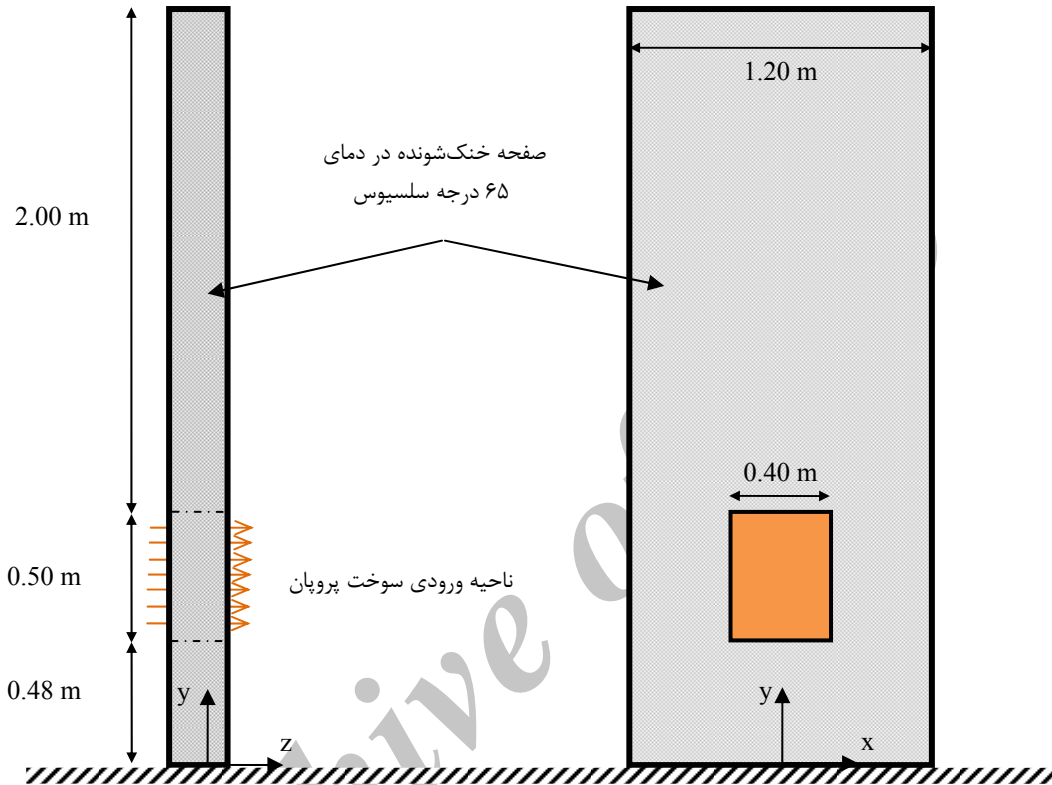
ضرایب معادله (۲۶) برای دی اکسید کربن و بخار آب در مرجع [۲۷] آمده است.

هندسه مورد بررسی

هندسه مورد بررسی در این مطالعه براساس مطالعه آزمایشگاهی کوتین و همکارانش [۱۶] است. این مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است. جزئیات دقیق در خصوص نحوه آزمون در مرجع [۱۶] آورده شده است. در مطالعه آزمایشی انجام شده ناحیه آتش سوزی به وسیله منبع سوخت پروپان توسط مشعل متخلخل فراهم می شود. این مشعل روی یک صفحه عمودی به ارتفاع

1. Discrete Ordinate Method (DOM)
2. OpenFoam
3. PISO
4. SIMPLE

۲/۹۸ متر و عرض ۱/۲ متر قرار دارد. عرض ناحیه ورودی سوخت (مشعل) ۰/۴۰ متر و ارتفاع آن ۰/۵۰ است. میزان نرخ سوخت ورودی ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ kg/m²s است. این مقادیر معادل نرخ حرارت تئوری حرارت آزاد شده ۳۶ و ۵۴ کیلووات‌اند. دما در نواحی مختلف جلوی صفحه به وسیله ترموکوپل و سرعت با روش سرعت‌سنجی لیزری^۱ اندازه‌گیری شده است. صفحه عمودی توسط سیال خنک‌شونده در دمای ۶۵ درجه سلسیوس نگه داشته می‌شوند.



شکل ۱- هندسه مورد بررسی برای شبیه‌سازی آتش مجاورت دیواره

شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

به منظور بررسی دقیق مسئله، لازم است که شناخت کافی نسبت به محدوده مقیاس طولی حل حاصل شود. مقیاس طولی مناسب برای حل مسئله شامل توده^۲ حرارتی آتش و جریان شناوری حاصل از آن براساس نرخ حرارت آزاد شده از آن، توسط رابطه زیر، تعریف می‌شود [۲۶]:

$$L^{Base} = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} C_p \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (27)$$

به طور کلی هنگامی که برای این مقیاس طولی حداقل ۱۰ شبکه محاسباتی در نظر گرفته شود، مقادیر بزرگ مقیاس که از حل مستقیم معادلات به دست می‌آید و در واقع توسط لزجت واقعی کنترل می‌شوند، به درستی حل می‌شود [۲۶]. در اینجا طول مشخصه از مرتبه حدود ۰/۲۵ متر است (برای آتش ۳۶ کیلو وات). بنابراین، برای حل صحیح بزرگ مقیاس، لازم است که اندازه شبکه از مرتبه ۲/۵ سانتی‌متر باشد.

1. Laser Doppler Velocimetry (LDV)
2. Plum

با توجه به جریان شناوری ایجاد شده در اثر آتش‌سوزی و اثر آن بر هوای محیط، لازم است که شبکه محاسباتی مناسب برای اعمال شرایط مرزی تعیین شود. به همین منظور، شبکه محاسباتی در جهات مختلف صفحه عمودی باید کشیده شود تا اثرات شرط مرزی بر نتایج محاسبات ناچیز باشد. طول شبکه در راستای عمودی (y)، ۵/۰ متر، در راستای x، ۲/۴ متر (از هر طرف ۱/۲ متر) و در راستای z، ۲/۵ متر (۱/۵ متر در جهت مثبت و ۱/۰ متر در جهت منفی)، در نظر گرفته شد. با تغییر این طول‌ها به مقادیر بیشتر از مقادیر یادشده، تغییر محسوس در پیش‌بینی دما و سرعت جریان در چند خط نشانه حاصل نشد. در ابتدا از شبکه خشن با میزان ۱۷۸،۴۵۱ نقطه محاسباتی استفاده شد. برای دستیابی به نتایج مستقل از اندازه شبکه، تعداد نقاط افزایش داده شد. شبکه متوسط حل با ۶۰۰،۳۰۶ نقطه حل شد. در نهایت مشاهده شد که با افزایش تعداد نقاط محاسباتی از ۱،۳۱۷،۰۹۵ نقطه، تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج مقادیر متوسط جریان حاصل نمی‌شود. روی دیوار عمودی از شرط مرزی عدم لغزش استفاده شد. همچنین، دما در این دیوار معلوم (۶۵ درجه سلسیوس) است. در ناحیه ورودی سوخت نیز با توجه به توان آتش میزان دبی جریان ورودی تعیین می‌شود. علاوه بر آن، در فضاهای اضافه‌شده به میدان محاسباتی، سرعت صفر و دما و سایر گونه‌ها در شرایط محیط در نظر گرفته شده است. شبکه محاسباتی در فواصل اطراف ورودی سوخت و نیز در ناحیه $m \leq z \leq 0.5$ صفر، برای حل دقیق‌تر جریان با تراکم بیشتری در نظر گرفته شد. در مجموع ۵۶۱،۶۰۰ شبکه محاسباتی در این ناحیه در نظر گرفته شده است. تعداد نقاط شبکه در جهت z در این ناحیه ۳۰ نقطه در نظر گرفته شده و نسبت شدت تغییرات آن به گونه‌ای است که بیشینه Δt به کمینه آن (در مجاورت دیوار) $\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} = 2$ است.

نتایج

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

$$LES_{IQ} = \frac{k_{Resolved}}{k_{Total}} = \frac{k_{Resolved}}{k_{Resolved} + k_{SGS}} \quad (28)$$

در این رابطه، k_{Total} انرژی جنبشی اغتشاشی کل جریان، $k_{Resolved}$ انرژی جنبشی اغتشاشی حل‌شونده و k_{SGS} انرژی جنبشی اغتشاشی در مقیاس زیرشبکه است. در این مطالعه، با توجه به حل معادله (۱۱)، می‌توان مقادیر k_{SGS} را در کل میدان محاسباتی، به‌دست آورد. انرژی جنبشی اغتشاشی حل‌شونده نیز با توجه به رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود.

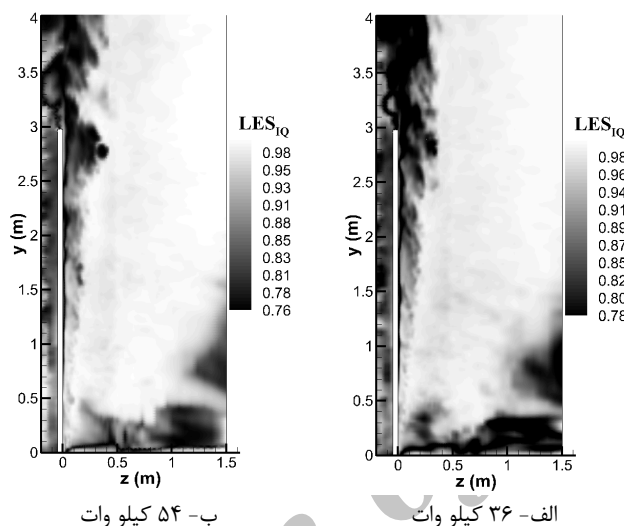
$$k_{Resolved} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2 + v'^2 + w'^2}) = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (29)$$

در این رابطه u' ، v' و w' نوسانات سرعت حل‌شونده در جهت‌های x، y و z است. نوسانات سرعت‌های حل‌شونده از تفاضل سرعت متوسط از سرعت لحظه‌ای با توجه به رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود.

$$k_{Resolved} = \frac{1}{2} \overline{(u_i - \bar{u}_i)(u_i - \bar{u}_i)} \quad (30)$$

برای محاسبه مقادیر متوسط سرعت، از متوسط‌گیری زمانی مقادیر در محدوده شبه‌پایدار 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 به‌صورت مستقیم شبیه‌سازی شده است. به عبارت دیگر، در این حالت، حل جریان همان حل شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) است. مقدار LES_{IQ} از پهنای فیلتر جریان متاثر است. هرچه اندازه فیلتر (که البته رابطه مستقیم با اندازه شبکه دارد) کوچک‌تر باشد، میزان انرژی جنبشی حل‌شونده در میدان حل افزایش می‌یابد و در نتیجه LES_{IQ} افزایش خواهد یافت. کلیک و همکاران [۲۹] نشان دادند که در بسیاری از کاربردهای مهندسی، حل ۷۵ تا ۸۵ درصد از انرژی جنبشی اغتشاشی جریان توسط شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مناسب است. به عبارت دیگر، اندازه شبکه محاسباتی برای قرارگیری در

این محدوده کفایت می‌کند. کمپ و همکاران [۳۰] نیز در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان‌های احتراقی نشان دادند که اگر کمتر از ۷۰ درصد از انرژی جنبشی جریان به‌وسیله شبکه محاسباتی حل شود، کیفیت شبیه‌سازی به این روش ناکافی است. در شکل ۲، برای شبکه محاسباتی انتخاب‌شده، به‌منظور نشان‌دادن کیفیت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، کانتور متغیر LES_{IQ} در صفحه مرکزی میدان حل، برای دو میزان حرارت آزاد شده، ۳۶ و ۵۴ کیلووات، در زمان ۷۰ ثانیه، رسم شده است. مشاهده می‌شود که در اکثر نقاط میدان حل، مقدار این متغیر بیش‌تر از ۰/۷۵ است. این موضوع کیفیت مناسب شبکه محاسباتی انتخاب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- کانتور LES_{IQ} برای دو میزان حرارت آزاد شده ۳۶ و ۵۴ کیلو وات

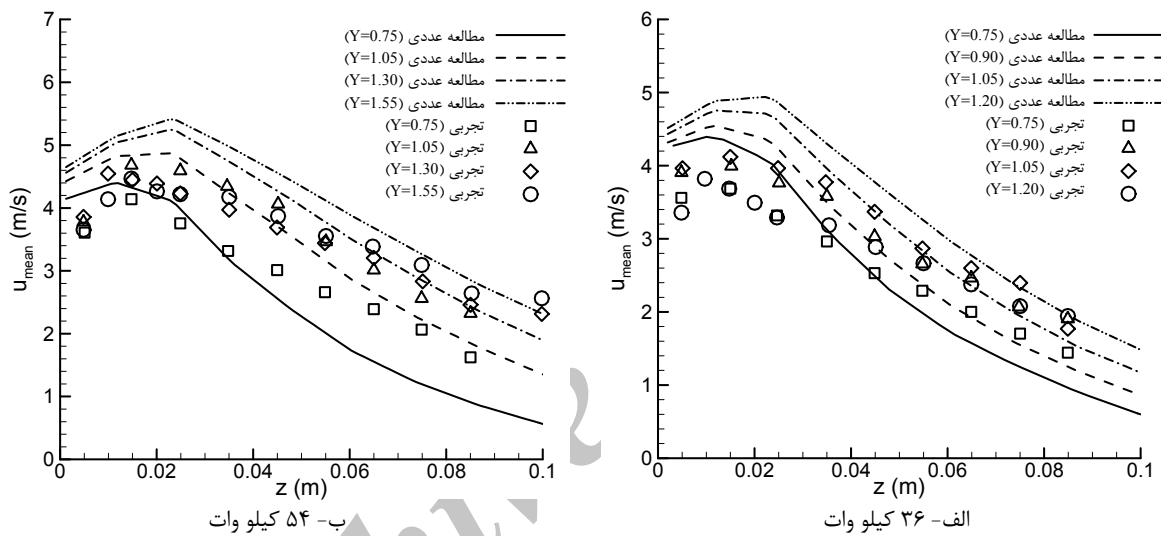
رفتار آتش و پلوم حرارتی حاصل از آن یک رفتار کاملاً نوسانی است. روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ قادر است چنین رفتاری را پیش‌بینی کند. برای مسئله معرفی‌شده، تنها نتایج متوسط‌گیری زمانی در صفحه مرکزی ($y/z, x=0/0$) حاصل از مطالعه تجربی در دسترس است. بنابراین، برای مقایسه صحیح کمی بین نتایج حل عددی و نتایج تجربی، لازم است که مقادیر متوسط زمانی نتایج عددی استخراج شود. برای این منظور، ابتدا برای دوره زمانی ۵۰ ثانیه، مسئله به‌صورت غیردایم حل شده تا اثرات شرایط اولیه در میدان محاسبات ظاهر نشود. سپس، برای محاسبه مقادیر متوسط، از کمیت‌ها در فاصله زمانی ۵۰ تا ۷۰ ثانیه، متوسط‌گیری می‌شود. این مقادیر متوسط را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\phi_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{\phi}_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (31)$$

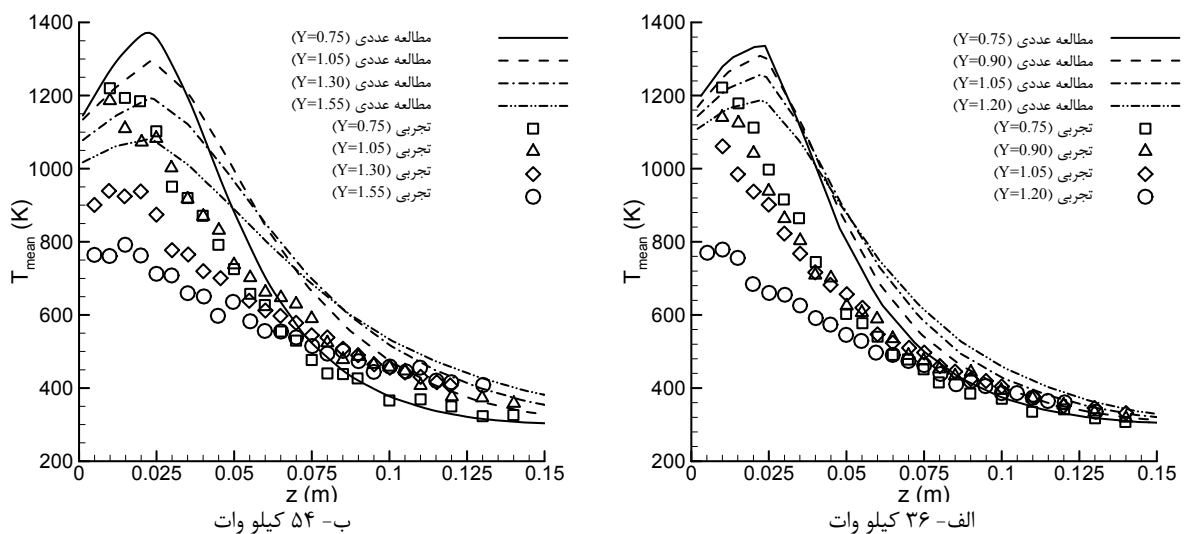
شکل ۳ مقایسه بین سرعت عمودی متوسط در ارتفاع‌های مختلف حاصل از حل عددی و نتایج تجربی برای دو میزان نرخ حرارت آزاد شده ۳۶ و ۵۴ کیلووات را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حل عددی و تجربی از تشابه یکسانی در ارتفاع‌های مختلف برخوردارند. به‌طور کلی، مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله عمودی از ناحیه ورودی سوخت، سرعت عمودی افزایش می‌یابد. همچنین، مقدار بیشینه این سرعت در ارتفاع‌های بالاتر در فاصله بیشتری نسبت به دیوار عمودی قرار دارد. در مجاورت دیوار، میزان سرعت عمودی بیشتر از مقادیر تجربی تخمین زده می‌شود. در حالی که با دور شدن از دیوار عمودی، این سرعت، به‌ویژه در ارتفاع‌های پایین‌تر، کمتر از مقادیر تجربی به‌دست می‌آید. یکی از دلایل این اختلاف اثرات ناشی از دیوار است که با در نظر گرفتن ضریب ثابت C_k در مدل یک‌معادله‌ای برای محاسبه لزجت اغتشاشی با دقت قابل قبولی محاسبه نمی‌شود. این نکته نیز قابل ذکر است که اندازه‌گیری دقیق سرعت در مجاورت دیوار یکی از مشکلات پیش‌رو در روش‌های

اندازه‌گیری است که البته در مرجع [۱۵] به این مورد اشاره شده است، اما متأسفانه مقدار دقیق خطای اندازه‌گیری برای لحاظ کردن در مقایسه‌ها ذکر نشده است. مقایسه توزیع سرعت متوسط در ارتفاع‌های مختلف نشان‌دهنده رشد لایه مرزی احتراقی ایجادشده در مجاورت دیوار عمودی است. مطابق انتظار، ضخامت لایه مرزی ایجادشده در مجاورت دیوار عمودی، با افزایش ارتفاع y ، افزایش یافته است.

شکل ۴ مقایسه بین دمای متوسط در ارتفاع‌های مختلف حاصل از حل عددی و نتایج تجربی برای دو میزان نرخ حرارت آزادشده ۳۶ و ۵۴ کیلووات را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تخمین دما نیز، مشابه سرعت عمودی، حل عددی و تجربی از تشابه یکسانی در ارتفاع‌های مختلف برخوردارند. گرچه با دورشدن از دیوار میزان خطا بسیار ناچیز است، اما همچنان در مجاورت دیوار مقدار خطای پیش‌بینی دما قابل توجه است. در مجاورت دیوار، دمای محاسباتی بیشتر از مقادیر تجربی تخمین زده می‌شود. این تخمین برای نرخ حرارت آزادشده ۳۶ کیلووات بیشتر از ۵۴ کیلووات است.



شکل ۳- مقایسه بین مقادیر سرعت عمودی متوسط تجربی و نتایج عددی کار حاضر ($Y=y-0.48$)

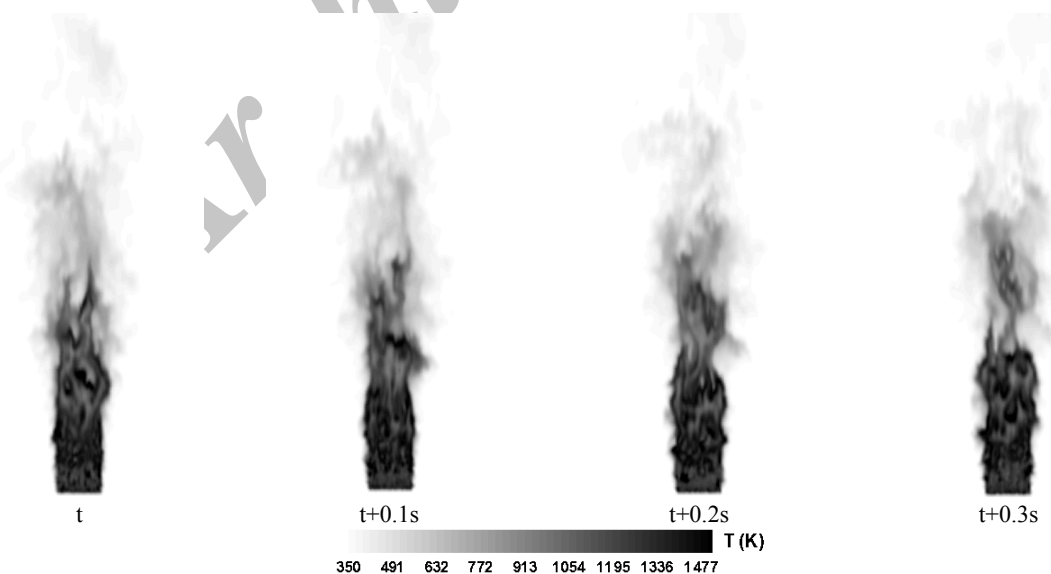


شکل ۴- مقایسه بین مقادیر دمای متوسط تجربی و نتایج عددی کار حاضر ($Y=y-0.48$)

مشاهده می‌شود که دما با دور شدن از دیوار به نرخ کمتری کاهش می‌یابد. نرخ کاهش دما در نزدیکی دیوار و در واقع در ناحیه‌ای که شعله قرار دارد بسیار شدیدتر است. با افزایش ارتفاع، دما در مجاورت دیواره، به دلیل تبادل حرارت شعله با محیط و همچنین ورود جریان به پلوم حرارتی، کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. این نتایج به نوعی از پیش‌بینی بیشتر سرعت در مجاورت دیوار نیز حاصل شده است. در واقع هنگامی که سرعت در مجاورت دیوار بیش از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود، فرصت لازم به جریان برای تبادل حرارت با محیط و به عبارت دیگر از دست دادن دما داده نشده است. این امر می‌تواند موجب پیش‌بینی بیشتر دما در این ناحیه شود.

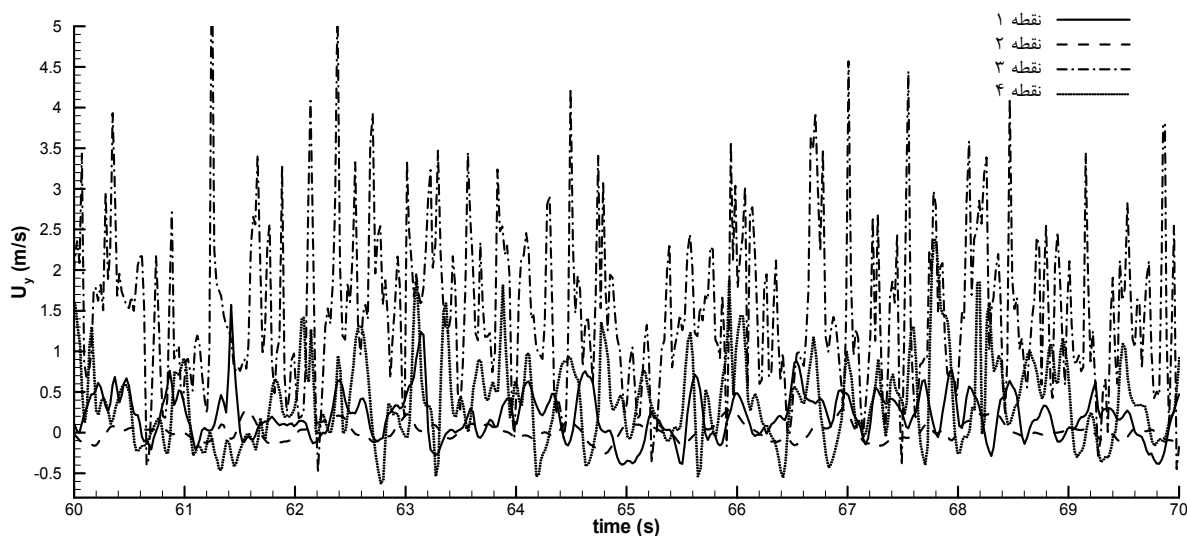
توضیح این نکته لازم است که در مطالعات تجربی اندازه‌گیری دما در ناحیه دمابالا در جریان آتش‌سوزی، نیاز به اصلاح مقادیر اندازه‌گیری شده به دلیل اثرات تابشی سطح ترموکوپل با محیط دمابالین است. به دلیل بالا بودن دما در سطح ترموکوپل، انتقال حرارت تابشی رخ می‌دهد و منجر به آن می‌شود که دما در این ناحیه کمتر از مقدار واقعی آن اندازه‌گیری شود. در مطالعه تجربی مرجع [۱۶]، که در کار حاضر برای مقایسه نتایج استفاده شده است، متأسفانه اصلاح مقادیر اندازه‌گیری توسط ترموکوپل انجام نشده است. یکی از عوامل پیش‌بینی بیشتر دما در این ناحیه می‌تواند اندازه‌گیری دما کمتر از مقدار واقعی آن در مطالعه تجربی باشد.

یکی از ویژگی‌های روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ کارایی آن در پیش‌بینی رفتار نوسانی توده حرارتی آتش است. شناخت این رفتار نوسانی در شبیه‌سازی رشد و انتشار آتش‌سوزی اهمیت دارد. شکل ۵ کانتور دمای لحظه‌ای در مجاورت دیوار را در چهار فاصله زمانی با اختلاف ۰/۱ ثانیه برای آتش ۵۴ کیلووات نمایش می‌دهد. این نوسانات ناشی از تشکیل گردابه‌های باروکلینیک^۱ در مجاورت سطح مشترک شعله و هوای اطراف است. این گردابه‌ها به دلیل اختلاف چگالی (ناشی از اختلاف دما) در سطح مشترک نواحی دمابالا و دمابالین و همچنین اختلاف فشار (در راستای عمود بر اختلاف چگالی) حاصل می‌شود. به دلیل گردایان دمایی بیشتر در بستر ورودی سوخت، این گردابه‌ها در این ناحیه تشکیل شده و به دلیل نیروهای شناوری به سمت بالا حرکت می‌کنند. با حرکت به سمت بالا، این گردابه‌ها ترکیب شده و گردابه‌های بزرگ‌تری را شکل می‌دهند. تشکیل مداوم این گردابه‌ها در مجاورت سطح شعله و حرکت آن‌ها به سمت بالا موجب ایجاد ماهیت نوسانی جریان و تغییرات در سرعت، به ویژه سرعت در راستای نیروی شناوری (U_y)، می‌شود.



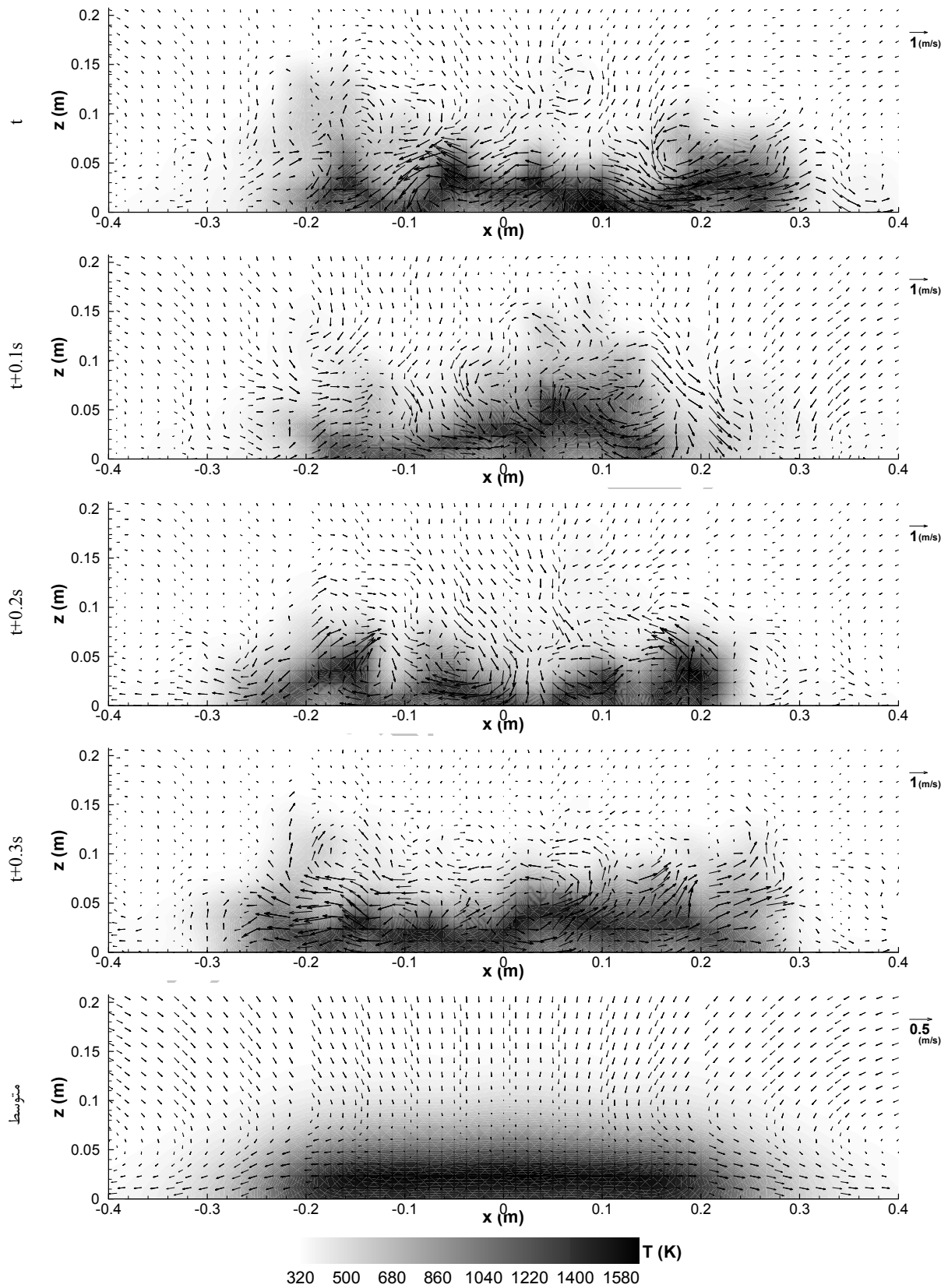
شکل ۵- کانتور دما در چهار فاصله زمانی با فاصله ۰/۱ ثانیه برای آتش ۵۴ کیلووات

در شکل ۶، تغییرات لحظه‌ای سرعت عمودی (U_y) روی صفحه مرکزی ($x=0$) در چند نقطه در مجاورت توده حرارتی آتش رسم شده است. مکان هندسی نقاط ۱ تا ۴ در شکل ۶، به ترتیب $(0, 0/73, 0/1)$ ، $(0, 0/73, 0/5)$ ، $(0, 1/07, 0/5)$ و $(0, 1/07, 0/1)$ است. شکل ۶ به خوبی نشان می‌دهد که نوسانات شدیدی که در مقدار سرعت عمودی لحظه‌ای در هنگام آتش‌سوزی در مجاورت دیوار رخ داده با مقیاس زمانی مناسب توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ قابل پیش‌بینی است. این رفتار نوسانی در واقع تاییدکننده توده حرارتی لحظه‌ای و جریان شناوری ایجادشده در شکل ۵ است. علاوه بر آن، با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌شود که در شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان، رفتار غیرمتقارن آتش در مجاورت دیوار و توده حرارتی حاصل از آن با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ قابل بررسی است. همچنین، با توجه به این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که شدت تغییرات سرعت عمودی (دامنه نوسانات سرعت) با دور شدن از دیوار کاهش می‌یابد. این کاهش شدت نوسانات می‌تواند ناشی از کاهش اثرپذیری از تغییرات دما و سرعت شعله در مجاورت دیوار باشد. از طرف دیگر، با دور شدن در راستای y از ناحیه ورودی سوخت و در واقع محلی که شعله آتش ایجاد شده، دامنه نوسانات سرعت عمودی افزایش قابل توجهی دارد. در ارتفاع‌های پایین و پس از سوختن ماده سوختی، به دلیل افزایش دما، اختلاف دما، چگالی و نیز فشار بین سطح شعله آتش و هوای اطراف ایجاد می‌شود. این گرادیان‌ها موجب تشکیل گردابه‌هایی در بستر ورودی ماده سوختی و مجاورت سطح شعله می‌شود. در واقع گردابه‌ها در ناحیه پایین ورودی سوخت شکل می‌گیرد. با افزایش ارتفاع، جریان‌هایی به توده حرارتی از سمت محیط وارد می‌شود. از طرف دیگر، به دلیل نیروهای شناوری، گردابه‌های کوچک تشکیل شده در سطح شعله به سمت بالا حرکت می‌کنند. با حرکت گردابه‌ها به سمت بالا، امکان اختلاط آن‌ها با هم فراهم می‌شود. اختلاط گردابه‌ها، تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تر را به دنبال دارد. تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تر و البته چرخش آن‌ها عدم تقارن در سطح شعله و ساختار قارچی شکلی که در هنگام تشکیل توده حرارتی ایجاد می‌شود را به دنبال دارد.



شکل ۶- تغییرات سرعت عمودی لحظه‌ای در نقاط مختلف برای آتش ۵۴ کیلووات

تا به اینجا ماهیت سه‌بعدی و نوسانی جریان مشخص شد. با توجه به این رفتار نوسانی پیش‌بینی‌شده، می‌توان روند تغییرات لحظه‌ای سرعت و دما را در صفحه y و ارتفاع‌های بالای ورودی سوخت نیز بررسی کرد. برای این منظور، در صفحه‌ای به ارتفاع $y=1/48$ m (یک متر بالاتر از ورودی سوخت)، تغییرات لحظه‌ای بردار سرعت و کانتورهای دما در شکل ۷، با فاصله زمانی $0/1$ ثانیه، برای آتش با توان ۵۴ کیلووات رسم شده است.

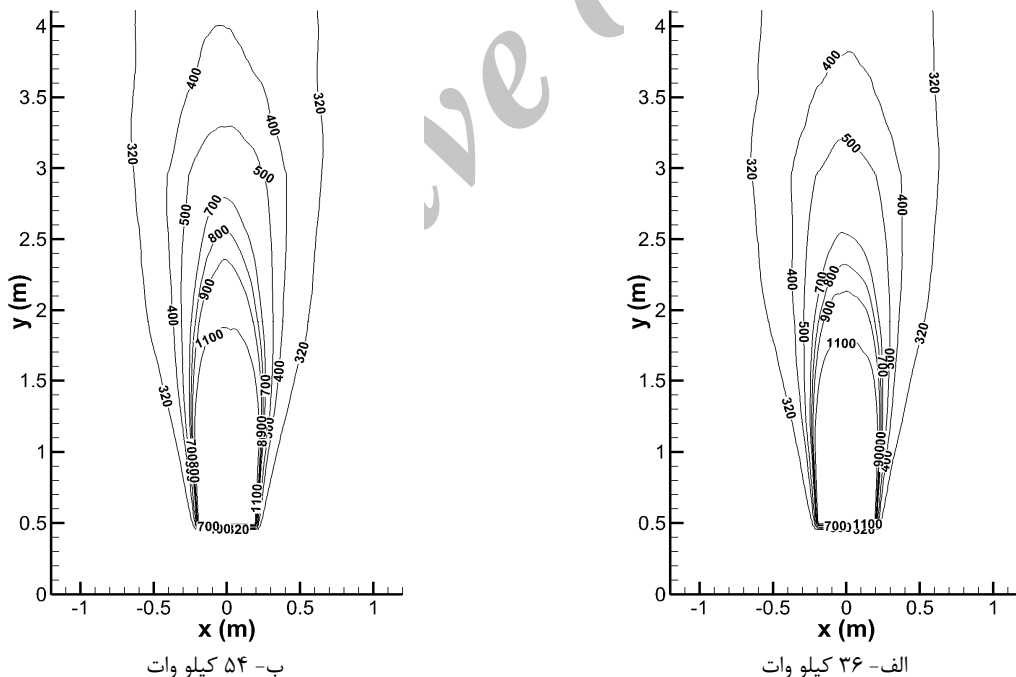


شکل ۷- کانتور دما و بردار سرعت در چهار فاصله زمانی با فاصله 0.1 ثانیه برای آتش 54 کیلو وات در صفحه $m \ 1/48$

در شکل ۷، همچنین، کانتور دمای متوسط و بردار سرعت متوسط نیز رسم شده است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات دما و سرعت در هر لحظه متفاوت است و در این صفحه نیز هیچ تقارنی در جواب‌های لحظه‌ای جریان وجود ندارد. آنچه در این شکل مشاهده می‌شود اثر گردابه‌های تشکیل‌شده بر رفتار دما در این مقطع است. تشکیل و حرکت گردابه‌ها در سطح مشترک ناحیه دمابالا و دماپایین و اثر آن بر ناحیه داخلی توده حرارتی آتش موجب تغییر ساختار توده و لایه مرزی ایجادشده در زمان‌های مختلف و تغییرات در توزیع دما می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر لحظه، یک ناحیه دمابالا، به دلیل حرکت گردابه‌ها شکل می‌گیرد. این ناحیه دمابالا در زمان‌های مختلف در مکان‌های مختلفی قرار دارد.

تشکیل این ناحیه دمابالا موجب ایجاد گردابه‌های باروکلینیک در این قسمت شده بر رفتار توده حرارتی و ساختار آن اثر می‌گذارد. از سوی دیگر، مطابق انتظار، کانتور دما و بردار سرعت متوسط نسبت به صفحه مرکزی محور x ، ساختار متقارن دارند. نمودار متوسط، همچنین، کشیده‌شدن جریان به سمت توده حرارتی حاصل از آتش را نیز نشان می‌دهد. در حالت متوسط‌گیری شده، برخلاف حالت لحظه‌ای، بیشینه دما در قسمت‌های مرکزی صفحه مورد بررسی حاصل شده است.

شکل ۸ کانتور دمای متوسط در صفحه $z=0/01$ m را برای آتش در توان ۳۶ و ۵۴ کیلو وات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که رفتار دمای متوسط کاملاً مشابه شعله غیرپیش‌آمیخته است. با وجود آنکه دما در ناحیه مرکزی جریان در آتش ۵۴ کیلووات به مراتب از ۳۶ کیلووات بیشتر است، اما عرض ناحیه دمابالا تغییر چندانی در دو توان مختلف در صفحه مورد بررسی، که در مجاورت دیوار قرار دارد، نداشته است. علاوه بر این، نرخ کاهش دما در قسمت‌های پایین دیوار و در مجاورت تشکیل شعله، همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشتر از نواحی بالای دیوار عمودی است. این نتیجه را از فاصله بین خطوط معرف کانتور در این دو ناحیه می‌توان استنباط کرد.



شکل ۸- کانتور دما متوسط در صفحه $z=0/01$ m

جمع‌بندی

آتش‌سوزی در مجاورت دیوار و جریان القایی حاصل از آن، به دلیل اثرات مستقیم بر سازه و افزایش دمای آن، می‌تواند موجب تخریب سازه شود. به همین دلیل، این موضوع به لحاظ ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رفتار آتش در مجاورت دیوار

عمودی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و با مدل زیرشبکه یک‌معادله‌ای بررسی شد. از مدل اصلاح‌شده اتلاف گردابه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و نیز جهات گسسته برای احتراق و تابش محصولات احتراق استفاده شد. شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آتش‌سوزی در مجاورت دیوار آتش‌گیر برای دو مقدار نرخ حرارت آزاد شده ۳۶ و ۵۴ کیلووات حاصل از سوختن پروپان صورت گرفت. مقایسه نتایج متوسط‌گیری زمانی سرعت و دما نشان می‌دهد که مدل استفاده‌شده دقت قابل قبولی در پیش‌بینی رفتار جریان القایی آتش دارد. به‌طور کلی، دما و سرعت متوسط جریان در مجاورت دیوار بیشتر از مقادیر تجربی تخمین زده می‌شود. اما، با فاصله گرفتن از دیوار آتش‌گیر، دقت مدل در پیش‌بینی این کمیت‌ها افزایش می‌یابد. بررسی‌های کمی و کیفی نشان می‌دهد که رفتار توده حرارتی و جریان شناوری ایجادشده در زمان آتش‌سوزی در مجاورت دیوار کاملاً نوسانی است. دامنه تغییرات نوسانی مقدار سرعت لحظه‌ای عمودی جریان، در راستای عمود بر صفحه (که مهم‌ترین عامل اثرپذیر از گردابه‌های باروکلینیک است) و با دورشدن از آن کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با دورشدن از ناحیه ورودی سوخت در راستای موازی با صفحه، میزان نوسانات سرعت شدیدتر می‌شود. این تشدید نوسانات متأثر از تشکیل گردابه‌های کوچک در بستر جریان شناوری و ادغام‌شدن آن به هنگام حرکت به سمت بالا در اثر نیروهای شناوری است. رفتار نوسانی سرعت موجب عدم تقارن دمایی در ارتفاع‌های مختلف دیوار و تشکیل نواحی دمابالا در نقاط مختلف در هنگام آتش‌سوزی در مجاورت دیوار می‌شود. درنهایت مقایسه رفتار متوسط‌گیری شده دما نشان می‌دهد که افزایش نرخ حرارت آزاد شده آتش تأثیر چندانی در عرض ناحیه دمابالا در مجاورت دیوار ندارد.

منابع

1. D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, New York, Wiley, 1999.
2. F. Tang, L. H. Hua, M. A. Delichatsios, K. H. Lu and W. Zhu, "Experimental Study on Flame Height and Temperature Profile of Buoyant Window Spill Plume from an under-Ventilated Compartment Fire," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2012, pp. 93-101.
3. K. Saito, J. G. Quintiere and F. A. Williams, "Upward Turbulent Flame Spread," *Fire Safety Science-Proceedings of the First International Symposium*, 1985, pp. 75-86.
4. F. W. Mowrer and R. B. Williamson, "Flame Spread Evaluation for Thin Interior Finish Materials," *Fire Safety Science Proceedings of the Third International Symposium*, 1991, pp. 689-698.
5. M. M. Delichatsios, M. K. Mathews and M. A. Delichatsios, "An Upward Fire Spread and Growth Simulation," *Fire Safety Science Proceedings of the Third International Symposium*, 1991, pp. 207-216.
6. M. Anderson and C. McKeever, "An Experimental Study of Upward Flame Spread on Cellulosic Materials," *Proceedings of the Seventh International Fire Safety and Engineering Conference INTERFLAM'96*, 1996, pp. 169-178.
7. M. Kokkala, D. Baroudi and W. J. Parker, "Upward Flame Spread on Wooden Surface Products: Experiments and Numerical Modeling," *Fire Safety Science Proceedings of the Fifth International Symposium*, 1997, pp. 309-320.
8. C. Qian and K. Saito, "An Empirical Model for Upward Flame Spread Over Vertical Flat and Corner Walls," *Fire Safety Science Proceedings of the Fifth International Symposium*, 1997, pp. 285-296.
9. J. G. Quintiere, "An Approach to Modeling Wall Fire Spread in a Room," *Fire Safety Journal*, 3, 1981, pp. 201-214.
10. M. A. Delichatsios, "A Simple algebraic model for turbulent wall fires," *Twenty-first Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, 1986, pp. 53-64.
11. K. C. Tsai and D. Drysdale, "Upward Flame Spread: Heat Transfer to the Unburned Surface," *Proceedings of the 7th Symposium of IAFSS*, 2001, pp. 117-128.
12. K. C. Tsai and F. S. Wan, "Upward Flame Spread: The Width Effect," *Proceedings of the 8th Symposium of IAFSS*, 2005, pp. 409-420.
13. A. S. Rangwala, S. G. Buckley and J. Torero, "Upward Flame Spread on a Vertically Oriented Fuel Surface: the Effect of Finite Width," *Proceedings of the 31st Symposium (International) on Combustion*, 2007, pp. 2607-2615.
14. H. Y. Wang, P. Joulain and J. M. Most, "Modeling on Burning of Large-Scale Vertical Parallel Surfaces with Fire-Induced Flow," *Fire Safety Journal*, 32, 1999, pp. 241-271.
15. H. Y. Wang, M. Coutin and J. M. Most, "Large-Eddy-Simulation of Buoyancy-Driven Fire Propagation Behind a Pyrolysis Zone Along a Vertical Wall," *Fire Safety Journal*, 37, 2002, pp. 259-285.

16. M. Coutin, J. M. Most and M. A. Delichatsios, "Flame Heights in Wall Fires: Effects of Width, Confinement and Pyrolysis Length," *Fire Safety Science Proceedings of the Sixth International Symposium*, 1999, pp 729-740.
17. H. Pasharshahri, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, "On the Comparison of Sub-Grid Scale Models in Simulation of Large Scale Pool Fire Using Large Eddy Simulation," *Proceeding of the 4th Fuel and Combustion Conference of Iran*, 8-9 February 2012, Kashan, Iran. (in Farsi)
18. S. C. P. Cheung and G. H. Yeoh, "A Fully-Coupled Simulation of Vortical Structures in a Large-Scale Buoyant Pool Fire", *International Journal of Thermal Science*, 48, 2009, pp. 2187-2202.
19. S. C. P. Cheung, G. H. Yeoh, A. L. K. Cheung and R. K. K. Yuen, "Flickering Behaviour of Turbulent Buoyant Fires using Large-Eddy Simulation," *Numerical Heat Transfer Part A*, 52, 2007, pp. 679-712.
20. G. H. Yeoh and K. K. Yuen, *Computational fluid dynamics in fire engineering*, Elsevier Inc., 2009.
21. Z. B. Chen, J. X. Wen, B. P. Xu and S. Dembele, "Large Eddy Simulation of Fire Dynamics with the Improved Eddy Dissipation Concept," *Fire Safety Science*, 10, 2011, pp. 195-808.
22. Z. B. Chen, J. X. Wen, B. P. Xu and S. Dembele, "The Extension of Eddy Dissipation Concept to the Framework of Large Eddy Simulation," *3rd FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop*, Norwood, MA, USA, May 2011.
23. M. Modest, *Radiative Heat Transfer*, 2nd Edition, Academic Press, San Diego, 2003.
24. Y. Wang, P. Chatterjee and J. L. de Ris, "Large Eddy Simulation of Fire Plumes," *Proceeding of Combustion Institute*, 33, 2011, pp. 2473-2480.
25. Y. Wang, K. Meredith, P. Chatterjee, N. Krishnamoorthy, X. Zhou and S. Dorofeev, "Status of FireFOAM Development and Future Plan," *3rd FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop*, Norwood, MA, USA, May 2011.
26. K. B. McGrattan, H. R. Baum and R. G. Rehm, "Large Eddy Simulations of Smoke Movement," *Fire Safety Journal*, 1998, pp. 30-161.
27. C. P. Cheung, *Modelling of Building Fires Coupled with Turbulent, Combustion, Soot Chemistry and Radiation Effects*, PhD Dissertation, University of Hong Kong, Jan. 2006.
28. S. B. Pope, *Turbulent Flows*, First Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
29. I. B. Celik, Z. N. Cehreli and I. Yavuz, "Index of Resolution Quality for Large Eddy Simulations," *Journal of Fluids Engineering*, 127, 2005, pp. 949-958.
30. A. Kempf, R. P. Lindstedt and J. Janicka, "Large-Eddy Simulation of a Bluff-Body Stabilized Nonpremixed Flame," *Combustion and Flame*, 144, 2006, pp. 170-189.

English Abstract

Large Eddy Simulation of Fire-induced Flow behind a Combustible Vertical Wall

H. Pasharshahri¹, Gh. Heidarinejad² and K. Mazaheri³

1- PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (Correspondent author)

2- Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 2013.1.9, Received in revised form: 2013.3.13, Accepted: 2013.5.16)

Large eddy simulation (LES) is performed to investigate oscillation behavior and time-averaged values of the fire behind a vertical wall. One-Equation sub-grid scale (SGS) model is used for turbulent closure. The combustion is assumed to be non-premixed. Also, modified eddy dissipation concept (EDC) and discrete ordinate methods (DOM) are used for incorporating combustion and radiation, respectively. The models are applied for the total heat release rate (HRR) of 36 kW and 54 kW. The numerical results are validated against experimental measurements. The time-averaged temperature and velocity are in a good agreement with the experiments. Generally, the accuracy of the predictions reduces considerably near the wall surface. The oscillating behaviors of the simulated quantities show the three-dimensional and asymmetric nature of the induced flow. In addition, the amplitude of the vertical velocity fluctuation reduces with increase in normal distance from the vertical wall. This fluctuation increases with increase in the height from the area where the fuel is burning.

Keywords: Large Eddy Simulation, One-equation, Fire-induced flow, Vertical wall fire