



شبیه‌سازی عددی آتش در اتاق با مدل احتراقی تولید فیلمت منی‌فولد و مقایسه با مدل‌های احتراقی دیگر

محمد صفرزاده، قاسم حیدری نژاد، هادی پاسدار شهری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

کلمات کلیدی:

آتش در ساختمان
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ
مدل احتراقی
تولید فیلمت منی‌فولد

خلاصه: در این مقاله، از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شد و روش تک-معادله‌ای به عنوان روش زیر شبکه اتخاذ گردید. همچنین شبیه‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی، غیر دائم و تک فاز انجام می‌شود و عدد فرود 0.00255 در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور بررسی دقیق اثر مدل احتراقی، مدل احتراقی تولید فیلمت منی‌فولد در شبیه‌سازی آتش در اتاق استفاده می‌شود و نتایج این مدل احتراقی با مدل‌های سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه مقایسه می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج مشاهده می‌شود که در سناریوی آتش در فضای اتاق با نرخ آزادسازی حرارت $62/9$ کیلووات، دمای متوسط در شعله به‌طور تقریبی 1500 کلوین می‌شود. همچنین، نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع بهتر از مدل احتراقی تولید فیلمت منی‌فولد نتایج دما را پیش‌بینی کرده‌اند؛ اما در پیش‌بینی سرعت هر سه مدل احتراقی با خطای نسبی کمتر از 10% درصد، به نتایج تجربی نزدیک هستند. با توجه به هزینه‌ی محاسباتی پایین مدل تولید فیلمت منی‌فولد و توانایی استفاده از سینتیک کامل در این مدل احتراقی و همچنین دقت قابل قبول آن، استفاده از این مدل در شبیه‌سازی آتش در اتاق، مناسب است.

۱- مقدمه

مدل زیر شبکه‌های اسماگورینسکی، ویل و ورمن مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل ویل مدل زیر شبکه‌ی مناسبی است. تحقیقات دیگر نیز به بررسی تأثیر روش گسسته سازی مکانی [۵] و زمانی [۶]، در شبیه‌سازی آتش پرداخته شده است. همچنین، تأثیر تشعشع و سینتیک نیز در تحقیقاتی مطالعه شده‌اند [۷].

در شبیه‌سازی آتش از مدل‌های مختلف استفاده می‌شود که در این میان، مدل‌های احتراقی تأثیر به‌سزایی در شبیه‌سازی دارند. در واقع نحوه‌ی کنترل پیشرفت احتراق نظیر تولید و یا مصرف گونه‌ها و همچنین میدان دما به‌طور مستقیم و سرعت، فشار، چگالی و ویسکوزیته به‌صورت غیرمستقیم وابسته به مدل احتراقی است؛ بنابراین ضروری است که مدل احتراقی، دقت لازم در شبیه‌سازی آتش را داشته باشد.

در تحقیقات عددی اولیه از مدل‌های ابتدایی نظیر منبع گرمایی حجمی^۱ [۸] استفاده می‌کردند که در این مدل احتراقی، واکنش‌های احتراقی دیده نمی‌شود و نمی‌توان گونه‌های واکنشی را به دست آورد. به‌تدریج مدل‌های

سناریوی آتش در اتاق بخش قابل‌توجهی از آتش‌سوزی‌های رایج را تشکیل می‌دهد. در این سناریو، فضای بسته باعث می‌شود که الگوی تشکیل شعله‌ی آتش به نسبت حالت آتش در فضای باز تغییر کند که در مواردی حتی باعث خاموشی شعله نیز می‌شود [۱]. در حالتی که آتش در اتاقی باشد که از مجرای به هوای آزاد مرتبط باشد، گازهای داغ خارج شده و هوای تازه وارد اتاق می‌شود که می‌تواند سبب انحراف شعله‌ی آتش شود. با توجه به میزان مساحت مجرای خروجی، آتش به سمت خاموشی و یا حالت پایدار می‌رود [۲].

در حالت کلی، شبیه‌سازی تمام حالت‌های محتمل در سناریوی آتش در اتاق، نیازمند انتخاب مناسب مدل‌های اغتشاشی، احتراقی، تشعشعی، روش گسسته سازی و سینتیک مناسب است [۳]. تحقیقاتی در زمینه‌ی تأثیر مدل اغتشاشی بر شبیه‌سازی آتش انجام شده است؛ به‌عنوان مثال، یوان و همکاران [۴] با استفاده از مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه بزرگ، سه

1 Volumetric Heat Source (VHS)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: pasdar@modares.ac.ir



احتراقی نظیر شکست گردابه^۱، اضمحلال گردابه^۲ [۹] و سینتیک بسیار سریع^۳ [۱۰] نیز در شبیه‌سازی عددی آتش مورد استفاده قرار گرفت و البته در حال حاضر نیز از این مدل‌های احتراقی زیاد استفاده می‌شود. نقاط ضعفی که این مدل‌های احتراقی دارند، عدم توانایی مدل کردن خاموشی شعله، عدم مدل کردن تمام گونه‌های شرکت‌کننده در احتراق، جوابگویی برای سینتیک تک و یا دومرحله‌ای می‌باشد.

با توجه به نقاط ضعف مدل‌های احتراقی فوق‌الذکر، در تحقیقات جدیدتر، استفاده از مدل‌های احتراقی فیلیمت آرام پیشنهاد شده است [۱۱]. با این مدل احتراقی، امکان تخمین تمام گونه‌های شرکت‌کننده در احتراق، با صرف هزینه‌ی محاسباتی اندک فراهم است. از این‌رو، این مدل احتراقی در سناریوهای مختلف نظیر آتش استخری^۴ و آتش در اتاق استفاده شده است. نکته‌ی مثبت مدل احتراقی فیلیمت، داشتن زمان محاسباتی بسیار کم، در مقایسه با مدل‌های احتراقی دیگر است؛ اما این مدل احتراقی در شبیه‌سازی آتش دارای نقاط ضعفی همچون عدم مدل‌سازی خاموشی شعله و عدم در نظر گرفته شدن تشعشع می‌باشد. مطالعات مختلف تأثیر تشعشع را در این مدل احتراقی اعمال کرده‌اند. به‌عنوان مثال، لی و همکاران [۱۴] تأثیر تشعشع با دو روش استفاده از معادله انتقال آنتالپی و اعمال تشعشع در تشکیل کتابخانه را پیشنهاد داده و به این ترتیب نتایج را بهبود می‌دهند.

مدل‌سازی خاموشی شعله، یکی از چالش‌های شبیه‌سازی احتراق است که همه‌ی مدل‌های احتراقی امکان مدل‌سازی آن را ندارند. مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد مدل دیگری است که ضمن دربرداشتن نقاط مثبت مدل احتراقی فیلیمت آرام نظیر زمان محاسباتی کم و توان استفاده از سینتیک کامل، می‌تواند خاموشی شعله را نیز مدل کند [۱۲]. زینگ و همکاران [۱۳] با استفاده از مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد، دقت سینتیک کاهش یافته^۵ را با سینتیک کامل مقایسه کردند. در این مطالعه، سرمشعل نوع دی ساندیا^۶ با سوخت متان مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که بدون لحاظ کردن تأثیر تشعشع در این مدل احتراقی، نتایج عددی با نتایج تجربی همخوانی دارد. همچنین استفاده از سینتیک کامل در مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد، به نسبت سینتیک کاهش یافته، دقت بالاتری دارد.

مرما و کاندلر [۱۴] این مدل احتراقی را در جریان احتراقی تراکم پذیر

- 1 Eddy Brake Up (EBU)
- 2 Eddy Dissipation Model (EDM)
- 3 Infinite Fast Chemistry (IFC)
- 4 Pool Fire
- 5 Reduced mechanism
- 6 Sandia Flame D

استفاده کردند. با توجه به اهمیت دما در جریان تراکم پذیر، استفاده از معادله انتقال آنتالپی در کنار مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد توصیه شد. با توجه به اینکه مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد در رژیم‌های جریانی مختلف کارایی دارد؛ بنابراین، می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در شبیه‌سازی آتش در اتاق نیز باشد؛ مشروط بر آن که دقت لازم را داشته باشد.

در مطالعات محدودی از شبیه‌سازی عددی آتش، از مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد استفاده شده است. صفرزاده و همکاران [۱۵] تأثیر اعمال تشعشع بر این مدل احتراقی را با استفاده از مدل تشعشعی جهت‌های گسسته^۷ بررسی کردند و مشاهده شد که در اتاق به علت کاهش اکسیژن موجود، دمای شعله افت پیدا می‌کند و در نتیجه اعمال تشعشع تأثیر به‌سزایی بر نتایج نمی‌گذارد. صفرزاده و همکاران از مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد [۱۶] استفاده کردند و گونه‌های مختلف سمی که در آتش‌سوزی تولید می‌شود را مدل کردند. در این تحقیق مشاهده شد که نتایج گونه‌ی مونواکسید کربن، کمتر از ۱۵ درصد، با نتایج تجربی خطای نسبی دارد.

با توجه به مرور مطالعات، می‌توان متوجه شد که مدل احتراقی سه‌م به‌سزایی در شبیه‌سازی آتش دارد و سعی بر آن بوده است که با انجام محاسبات کم، جزئیات دقیقی از احتراق و گونه‌های حاصل از آن مدل‌سازی شود. از این‌رو در مطالعات عددی اخیر به سمت مدل‌های احتراقی فیلیمت تمایل پیدا شده است. از بین مدل‌های فیلیمت، مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد با داشتن مزایایی همچون، مدل‌سازی خاموشی آتش، داشتن زمان محاسباتی پایین و امکان استفاده از سینتیک کامل، می‌تواند به‌عنوان یکی از مدل‌های احتراقی بسیار معتبر در شبیه‌سازی آتش مورد استفاده قرار گیرد. بررسی نتایج این مدل در سناریوهای مختلف آتش می‌تواند کارایی این مدل احتراقی را بیش‌ازپیش، نمایان سازد؛ بنابراین لزوم مقایسه‌ی نتایج مدل‌های احتراقی مختلف با مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد در سناریوی آتش در اتاق، از جمله خلأهای مطالعات پیشین است.

در این مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی تولید فیلیمت منی‌فولد که مدل احتراقی کاملی است که جزئیات دقیق گونه‌های خطرناک در آتش را پیش‌بینی می‌کند، میدان سرعت و دما در سناریوی آتش در اتاق، مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج این مدل احتراقی با مدل‌های احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه مقایسه می‌شود.

7 Discrete Ordinate Method (DOM)

۲- معادلات حاکم

گرفته می‌شود [۱۸]. تنش زیر شبکه اغتشاشی مربوط به مومنتوم است که به صورت رابطه‌ی (۶) مدل می‌شود [۱۹].

$$\bar{\tau}_{u_i u_j} = \bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j = -2\mu_t^{SGS} \tilde{S}_{ij} + \frac{1}{3} \bar{\tau}_{kk} \quad (6)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (7)$$

$$\bar{\tau}_{kk} = 2C_1 \bar{\rho} \Delta^2 |2\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}| \delta_{ij} \quad (8)$$

همچنین δ_{ij} و \tilde{S}_{ij} به ترتیب، تانسور نرخ کرنش، تابع دلنا می‌باشند. همچنین در شبیه‌سازی آتش می‌توان از ترم $\bar{\tau}_{kk}$ در رابطه‌ی (۶) صرف‌نظر کرد [۴]. μ_t^{SGS} ویسکوزیته اغتشاشی است که در این مقاله توسط روش زیر شبکه‌ی یک-معادله‌ای مدل می‌شود [۲۰]. در این مدل زیر شبکه، معادله‌ی انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاشی زیر شبکه حل می‌شود و مقدار لزجت گردابه‌ای با توجه به انرژی جنبشی اغتشاشی زیر شبکه به صورت روابط (۹) تا (۱۳) تعیین می‌شود [۶].

$$\mu_t^{SGS} = \bar{\rho} C \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} k_{sgs})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i k_{sgs})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} C_{\alpha k} \Delta \sqrt{k_{sgs}} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} \right) + P_{k_{sgs}} - D_{k_{sgs}} + B_{k_{sgs}} \quad (10)$$

$$P_{k_{sgs}} = -\tau_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

$$D_{k_{sgs}} = C_* \frac{\bar{\rho} k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (12)$$

آتش یک جریان احتراقی غیر پیش آمیخته است. با استفاده از روش فیلترگیری فاور، می‌توان معادلات مربوط به جریان واکنشی نظیر پیوستگی، مومنتوم، انرژی، کسر مخلوط و معادلات توربولانس را فیلترگیری نمود و در شبیه‌سازی استفاده نمود؛ که در این صورت معادلات کلی حاکم، به صورت روابط (۱) تا (۳) می‌شود [۱۷].

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

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

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

در روابط (۱) تا (۳)، ρ چگالی مخلوط و ρ_{ref} چگالی مرجع در محیط اطراف هستند. u_i سرعت، p فشار، g شتاب گرانش زمین و h آنتالپی هستند. ω_τ نرخ حرارت تولیدشده در اثر احتراق است و عبارت S_{rad} نیز نرخ انتقال حرارت تابشی را نشان می‌دهد. $\bar{\tau}_{u_i T}$ بردار شار حرارتی زیر شبکه و \bar{q}_i ، $\bar{\tau}_{ij}$ به ترتیب تانسور تنش‌های لزجی و بردار شار حرارتی هستند که هر کدام به صورت روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شوند.

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \quad (4)$$

$$\bar{q}_i = -\frac{\mu C_p}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (5)$$

در معادلات (۴) و (۵)، μ و C_p به ترتیب ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشد. Pr عدد پراانتل هستند که در شبیه‌سازی آتش 0.7 در نظر

محاسبه می‌شود.

$$B_{k_{sgs}} = -\frac{C}{\sigma_\rho} \Delta \sqrt{k_{sgs}} \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} \cdot g_j \right) \quad (13)$$

۲-۱- مدل‌های احتراقی

در صورتی که از مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع و اضمحلال گردابه استفاده شود، معادلات انتقال گونه به صورت رابطه (۱۵)، به معادلات اضافه می‌گردد.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{\phi})}{\partial x_i} = -\frac{\partial\bar{q}_\phi}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{\tau}_{u_i\phi}}{\partial x_i} + S_\phi \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، $\bar{\phi}$ نشان‌دهنده کسر جرمی گونه‌های شرکت‌کننده در آتش و \bar{q}_ϕ بردار شار مربوط به کسر جرمی است. همچنین، ترم S_ϕ ترم تولید در معادله گونه هست که در واکنش تک-مرحله‌ای، با توجه به نرخ انجام واکنش سوخت، محاسبه می‌شود. رابطه محاسبه‌ی نرخ انجام واکنش سوخت توسط مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع و اضمحلال گردابه در جدول ۱ آورده شده است.

در روابط (۱۶) تا (۱۸)، Δt و C_c به ترتیب گام زمانی و ضریب ثابت مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع هستند. همچنین \bar{Y}_F, \bar{Y}_{O_2} به ترتیب، کسر جرمی اکسیدکننده و سوخت هستند و S نسبت جرمی استوکیومتری هوا به سوخت است. $\varepsilon_{sgs}, k_{sgs}$ نیز به ترتیب، میزان انرژی جنبه اغتشاشی و نرخ اضمحلال آن است.

k_{sgs} انرژی جنبشی اغتشاشی است و هر یک از عبارت‌های $P_{k_{sgs}}, D_{k_{sgs}}, B_{k_{sgs}}$ به ترتیب ترم‌های منبع شناوری، اضمحلال و تولید می‌باشند که توسط معادلات (۱۱) تا (۱۳) محاسبه می‌شوند. در این روابط، عبارت Δ معرف اندازه‌ی فیلتر است که به صورت $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ به دست می‌آید و همچنین μ_t^{SGS} معرف لزجت توربولانسی می‌باشد که به عبارتی اثرات اغتشاش گردابه‌های کوچک این‌گونه وارد معادلات می‌شود. در معادلات مربوط به مدل زیر شبکه‌ی تک معادله‌ای ضریب C را معمولاً ۰/۰۶۹، $C_{\alpha k} = C / \sigma_k$ و مابقی ضرایب را یک انتخاب می‌کنند [۲۰]. اثر تشعشع، توسط رابطه (۱۴) در معادله‌ی انرژی اعمال شده است [۲۱].

$$S_{rad} = -4\bar{K}_a E_b + \sum_{i=1}^{n_{rad}} w_i \bar{K}_a \bar{I}_i (\hat{S}_i) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، ω_i, I_i, K_a به ترتیب، ضرایب وزنی، میزان تشعشع و ضریب تشعشع در معادله‌ی تشعشع می‌باشند و E_b, \hat{S}_i به ترتیب، جهت‌های گسسته‌سازی و توان تشعشعی جسم سیاه هستند که با توجه به دمای گاز

جدول ۱. روابط مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه

Table 1. The equation of infinite fast chemistry and eddy dissipation combustion model

روابط	مدل احتراقی
$\bar{\omega}_F'' = \bar{\rho} \frac{\min(\bar{Y}_F, \bar{Y}_{O_2} / s)}{C_c \Delta t}$	سینتیک بسیار سریع [۱۷] (۱۶)
$\bar{\omega}_F'' = \bar{\rho} \frac{\min(\bar{Y}_F, \bar{Y}_{O_2} / s)}{\tau_{mix}}$	(۱۷)
$\tau_{mix} = \min \left(\frac{k_{sgs}}{C_{EDM} \varepsilon_{sgs}}, \frac{\Delta^2}{C_{diff} \alpha} \right), C_{EDM} = 4, C_{diff} = 2$	اضمحلال گردابه [۹] (۱۸)

۲-۱-۱- مدل احتراقی تولید فیلیمت منیفلود

در مدل احتراقی تولید فیلیمت منیفلود سعی می‌شود، متغیرهایی نظیر کسر جرمی و دما بر اساس مقدار کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش استخراج شوند [۲۲]. به این منظور با استفاده از مدل‌سازی معادلات معروف به فیلیمت (معادلات جرم، گونه و آنتالپی در فضای شعله) متغیرهای کسر جرمی و دما بر اساس کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش به دست می‌آید [۲۳]. در گام بعدی، کتابخانه‌ی اغتشاشی مربوط به این مدل احتراقی، تشکیل شده و از این کتابخانه در میدان اصلی استفاده می‌شود. به این منظور نیاز است که معادلات انتقال کسر مخلوط، واریانس کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش در فضای هندسی حل گردد؛ بنابراین با توجه به ماهیت این مدل احتراقی، روابط (۱۹) تا (۲۱) به دسته معادلات انتقال اضافه می‌گردد و دیگر نیاز به حل معادله انتقال گونه نمی‌باشد [۲۴].

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{Z})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho}(D + D_t) \frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}Z^{n2})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_iZ^{n2})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho}D_t \frac{\partial Z^{n2}}{\partial x_i} \right) + 2\bar{\rho}D_t \left(\frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_i} \right)^2 - \bar{\rho}\tilde{\chi} \quad (20)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{y}_p)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{y}_p)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho}D_y \frac{\partial\tilde{y}_p}{\partial x_i} \right) + \tilde{\omega}_{y_p} \quad (21)$$

در روابط (۱۹) تا (۲۱)، Z کسر مخلوط و \tilde{Z}^{n2} ، D و D_t به ترتیب واریانس کسر مخلوط، ضریب نفوذ آرام و اغتشاشی هستند. \tilde{y}_p تابع پیشرفت واکنش که به صورت کسر جرمی بخار آب در نظر گرفته شده است. عبارت تولید تابع پیشرفت واکنش است که از کتابخانه‌ی مدل احتراقی تولید فیلیمت منیفلود فراخوانی می‌شود. همچنین، $\tilde{\chi}$ در رابطه‌ی (۲۰)، متوسط اتلاف اسکالر کسر مخلوط و معرف نرخ اضمحلال نوسانات کسر مخلوط است.

۲-۲- حل عددی

روش‌های گسسته‌سازی برای تمامی عبارت‌های جابجایی در معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی زیرشبکه، انتقال انرژی، گونه، انتقال تابع پیشرفت واکنش، کسر مخلوط و واریانس آن از تقریب مرتبه دو و برای عبارت مشتق زمانی در تمام معادلات از روش اویلری استفاده شد [۶]. پیمپل به‌عنوان الگوریتم اعمال وابستگی بین سرعت، فشار، دما و پارامترهای کسر مخلوط و واریانس آن اتخاذ شد [۵].

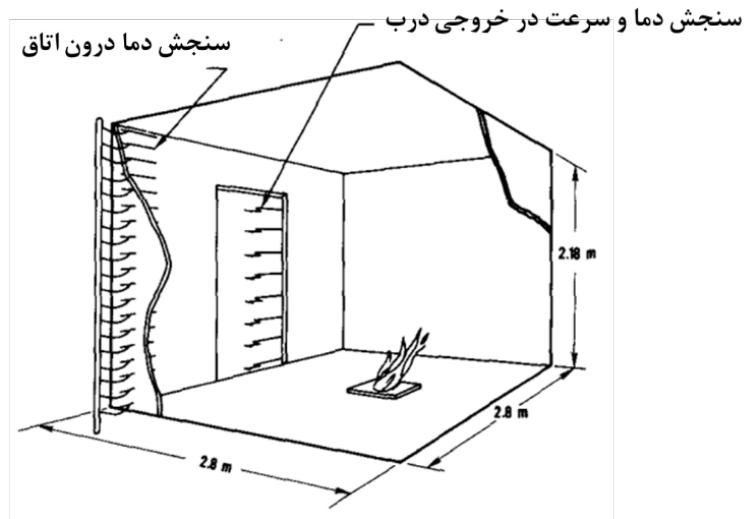
میزان باقیمانده برای معادلات انتقال همچون مومنتوم، فشار، دما و گونه کمتر از 10^{-6} قرار داده شد. با توجه به این که در این مقاله از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است و به منظور دستیابی به جواب فیزیکی، مقدار بیشینه عدد کورانت 0.8 ($\sum_{i=1}^3 \frac{u_i}{\Delta x_i} \leq 0.8$) لحاظ شد که به طور نسبی معادل با گام زمانی 0.01 می‌شود. به‌منظور تشکیل کتابخانه‌ی آرام برای مدل احتراقی تولید فیلیمت منیفلود از نرم‌افزار کمکین استفاده شد و توسط کد نوشته‌شده، کتابخانه‌ی اغتشاشی تهیه شد. برای شبیه‌سازی حالت‌های موردبررسی از نرم‌افزار این. فوم استفاده شده و مدل احتراقی تولید فیلیمت منیفلود نیز به این نرم‌افزار اضافه شده است و سایر مدل‌های احتراقی در خود این نرم‌افزار موجود است. همچنین برای تولید شبکه نیز از همین نرم‌افزار استفاده شد. در حالت کلی، 100 ثانیه زمان سپری می‌شود تا آتش به حالت شبه‌پایدار برسد و در مدت 30 ثانیه نتایج متوسط گیری شده و با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند.

۳- نتایج

در این بخش سناریوی آتش در فضای اتاق مطابق با نتایج تجربی استکلر و همکاران [۲۵] انتخاب شده و نتایج مدل احتراقی تولید فیلیمت منیفلود در فضای بسته با حضور دیوار موردبررسی قرار می‌گیرد. به این منظور ابتدا کیفیت شبکه بررسی شده و سپس نتایج دما و سرعت مدل احتراق تولید فیلیمت منیفلود، با مدل‌های احتراقی دیگر مقایسه می‌شود.

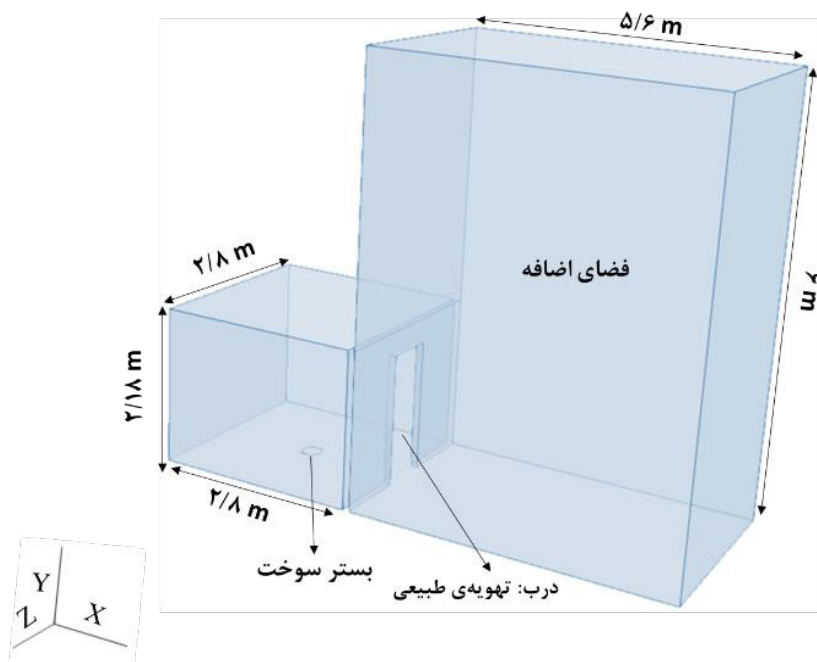
۳-۱- هندسه و فضای محاسباتی

فضای هندسی نتایج تجربی [۲۵] شبیه شکل ۱ از یک اتاق با ارتفاع 218 سانتی‌متر و سطح مقطع 280×280 سانتی‌متر مربع تشکیل شده است. درب اتاق با سطح مقطع 180×74 سانتی‌متر مربع برای تهویه‌ی طبیعی لحاظ شده است که از طریق این درب، گازهای داغ خارج و هوای تازه وارد می‌شود. مطابق با این شکل، بستر سوخت در مرکز اتاق با قطر 30 سانتی‌متر تعبیه شده است و سوخت مورد استفاده، متان در نظر گرفته شده است. در



شکل ۱. هندسه‌ی موردبررسی در مرجع تجربی [۲۵]

Fig. 1. experimental geometry in reference [24]



شکل ۲. ابعاد و هندسه‌ی موردبررسی در فضای محاسباتی

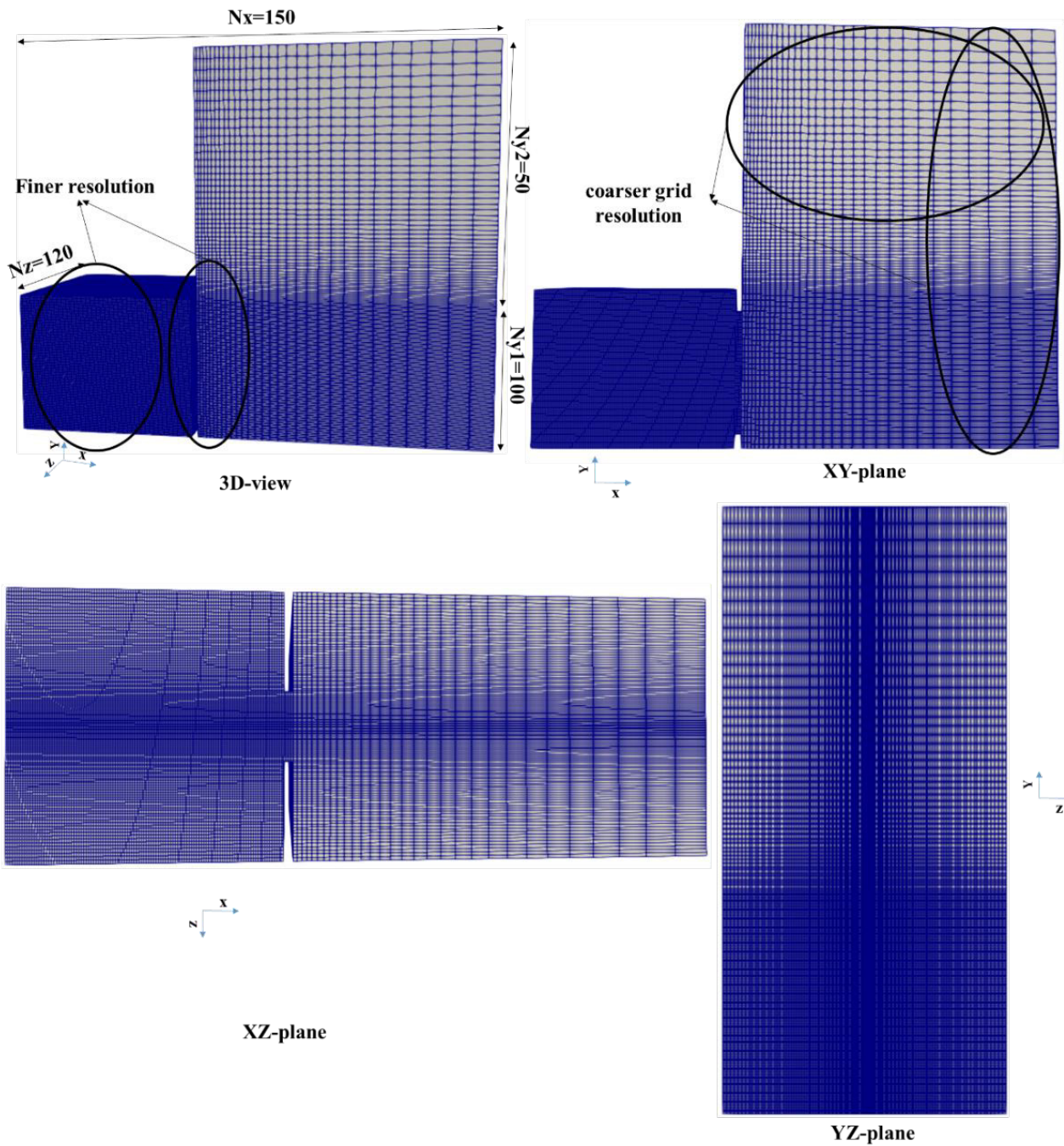
Fig. 2. geometry of computational domain

اتاق، یک هندسه‌ی اضافه با ابعاد $5/6 \times 6 \times 2/8$ متر مکعب، مطابق با شکل ۲ نیز به هندسه‌ی موردبحث در شبیه‌سازی اضافه گردید تا به این صورت، ابعاد هندسه‌ی اضافه بر دقت نتایج تأثیر نگذارد.

در شکل ۳، شبکه‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی آتش در فضای اتاق موردنظر و فضای اضافه، آورده شده است. در این سناریو، تعداد

وسط خط مرکزی درب اتاق، حسگرهای اندازه‌گیری سرعت و دما تعبیه شده است. همچنین، در گوشه‌ی سمت چپ نزدیک درب اتاق، حسگرهای دیگری برای اندازه‌گیری دما قرار داده شده است.

مطابق با ابعاد هندسه‌ی تجربی، فضای هندسی که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ایجاد شد. به منظور کاهش اثر شرط مرزی بر روی نتایج آتش درون



شکل ۳. نمایی از شبکه‌ی محاسباتی مورد استفاده در سناریوی آتش در اتاق از نمای مختلف

Fig. 3. different view of the computational grid used in the compartment fire

کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ [۲۷] استفاده شد که طبق رابطه‌ی (۲۲) تعریف می‌شود.

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

در رابطه‌ی (۲۲)، $k_{Resolved}$ دار انرژی جنبشی اغتشاشی مدل شده به‌طور مستقیم توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و k_{SGS} انرژی جنبشی اغتشاشی زیرشبکه می‌باشد. نیاز است که شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در فضای محاسباتی بالاتر از ۸۰ درصد باشد تا شبکه کیفیت موردنیاز را داشته باشد. در شکل ۴، نتایج شاخص کیفیت برای شبکه محاسباتی ۱,۹۸۰,۰۰۰ در سه مقطع آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر سه مقطع، مقدار شاخص کیفیت در اکثر نقاط این صفحات بالاتر از ۸۰ درصد است و در نتیجه شبکه‌ی محاسباتی مورد استفاده، کیفیت موردنیاز را داراست و به‌عنوان مش اصلی انتخاب شده است که نمایی از این مش در شکل ۳ نشان داده شد.

۳-۳- پیشروی آتش در اتاق

در شکل ۵ کانتور دما برحسب زمان در صفحه‌ی مرکزی اتاق آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ابتدا (در زمان کمتر از ۱۰ ثانیه) آتش در اتاق همچون آتش استخری اتفاق می‌افتد و آتش در محیط اتاق به‌صورت کاملاً عمودی حرکت می‌کند. به تدریج ناحیه‌ی پلوم آتش به ناحیه‌ی سقف نزدیک می‌شود و در نزدیکی سقف اتاق، آتش پخش می‌شود و ناحیه‌ی گاز داغ در نزدیک سقف را شکل می‌دهند. به‌مرور زمان، ضخامت این ناحیه در نزدیک سقف بیشتر می‌شود تا اینکه ناحیه‌ی گاز داغ در نزدیک سقف به نزدیکی درب خروجی می‌رسد و از درب اتاق خارج می‌شود. با خروج دود و محصولات احتراق از بالای درب اتاق، در زمان حدود ۲۰ ثانیه، مکش هوای تازه از پایین اتاق تشدید می‌شود (البته از ابتدای آتش، مکشی توسط آتش اتفاق می‌افتد که به علت افزایش خروج گازهای حاصل از احتراق در طول زمان، این مکش تشدید می‌شود).

با ورود هوای تازه از پایین درب، آتش درون اتاق در معرض باد با سرعت ورودی درب اتاق، قرار می‌گیرد و به این ترتیب، با گذشت زمان شعله به سمت

۱۲۰×۱۰۰×۱۲۰ مش در فضای اتاق و ۳۰×۱۵۰×۱۲۰ عدد مش در فضای اضافه به‌کاررفته است و در مجموع ۱,۹۸۰,۰۰۰ مش در این هندسه استفاده شد. علاوه بر این مش، دو شبکه‌ی دیگر با تعداد ۱,۰۰۰,۰۰۰ و ۳,۰۰۰,۰۰۰ مش نیز برای بررسی کیفیت شبکه استفاده شده است.

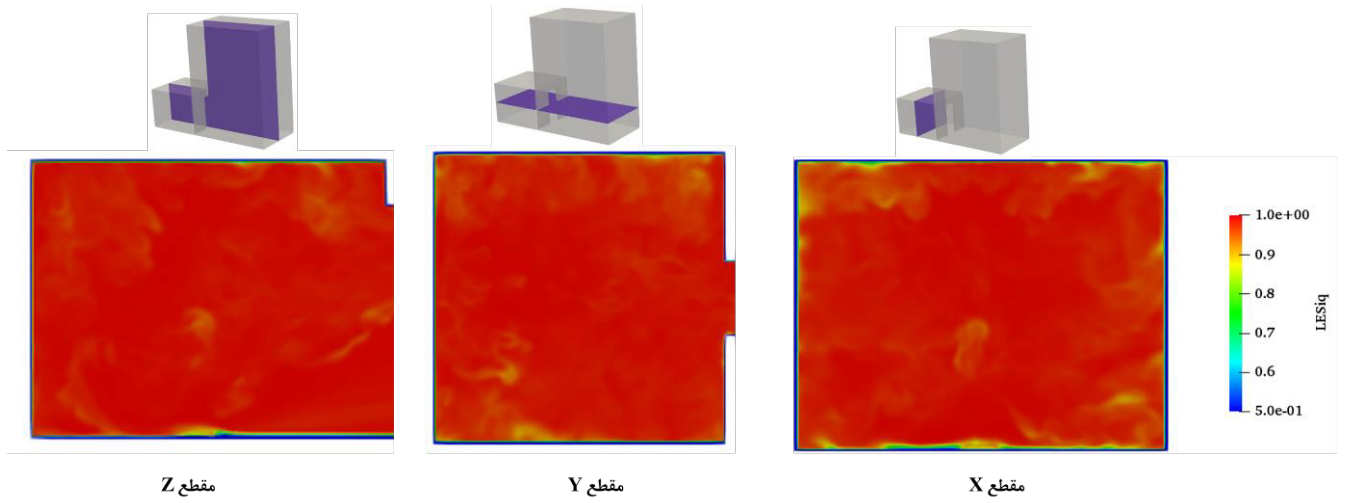
زمانی که آتش در اتاق اتفاق می‌افتد، به تدریج آتش از فضای درون اتاق به محیط بیرون زبانه می‌کشد؛ بنابراین نیاز است که درون اتاق و فضای بیرون اتاق (در نزدیکی‌های درب خروج) تعداد کافی مش با تمرکز بیشتر در این نواحی، به‌کاربرده شود. به این منظور، درون اتاق تعداد مش زیادی به‌کاربرده شد و همچنین در نزدیکی درب نیز تمرکز مش به نحوی است که هر چه به سمت زمین و درب خروج نزدیک می‌شود، مش ریزتر می‌شود. در نواحی دور از درب خروجی نیز به تدریج تمرکز مش کمتر شده و از شبکه‌های درشت‌تری استفاده می‌شود.

دمای اولیه‌ی ۳۰۰ کلوین به‌عنوان شرایط اولیه حاکم بر مسئله در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که در ابتدا کل فضا را هوا (ترکیب اکسیژن و نیتروژن با کسر جرمی ۰/۲۳۳ و ۰/۷۶۷، به ترتیب) پر کرده است که با تزریق سوخت، آتش شکل می‌گیرد؛ بنابراین، تابع پیشرفت واکنش، کسر مخلوط و واریانس آن در شرایط اولیه صفر لحاظ شده است. همچنین تمام گازهای موجود در اتاق آتش و فضای اضافه، ساکن با سرعت صفر می‌باشد.

شرط مرزی دیواره‌ها عدم لغزش لحاظ گردید و ورودی بستر سوخت هم شرط مرزی سرعت ۰/۰۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مرزهای اطراف (فضای اضافه) هم به‌صورت شرط مرزی با فشار محیط (۱۰۱ کیلو پاسکال) فرض شد. شرط مرزی حرارتی بر روی دیواره‌ها عایق و در بستر سوخت، دمای ورودی سوخت، ۳۰۰ کلوین لحاظ گردید. در محیط اطراف نیز شرط مرزی ترکیبی استفاده شد؛ به این صورت که در جایی که مکش هواست، دمای ورودی ۳۰۰ کلوین و در خروج گاز، گرادیان صفر لحاظ گردید [۲۶]. همچنین، شرط مرزی ترکیبی برای کسر جرمی گونه‌ها، کسر مخلوط و تابع پیشرفت واکنش نیز بر روی مرز فضای اضافه اعمال شد [۲۶]. برای راستی آزمایی نتایج از نرخ آزادسازی حرارت ۶۴ کیلووات استفاده شد.

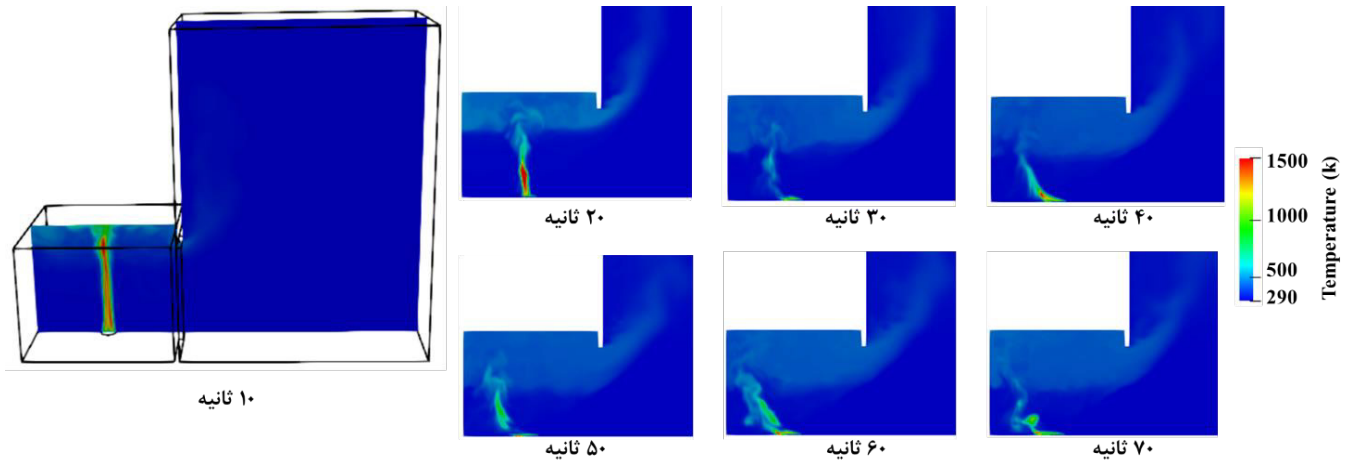
۳-۲- بررسی شبکه‌ی محاسباتی

به‌منظور مدل‌سازی آتش در اتاق در مطالعه‌ی حاضر، سه نوع شبکه‌بندی ۱,۰۰۰,۰۰۰، ۱,۹۸۰,۰۰۰ و ۳,۰۰۰,۰۰۰ به‌عنوان بررسی تأثیر شبکه‌ی محاسباتی، مدنظر قرار گرفته است. به‌منظور بررسی کیفیت شبکه از شاخص



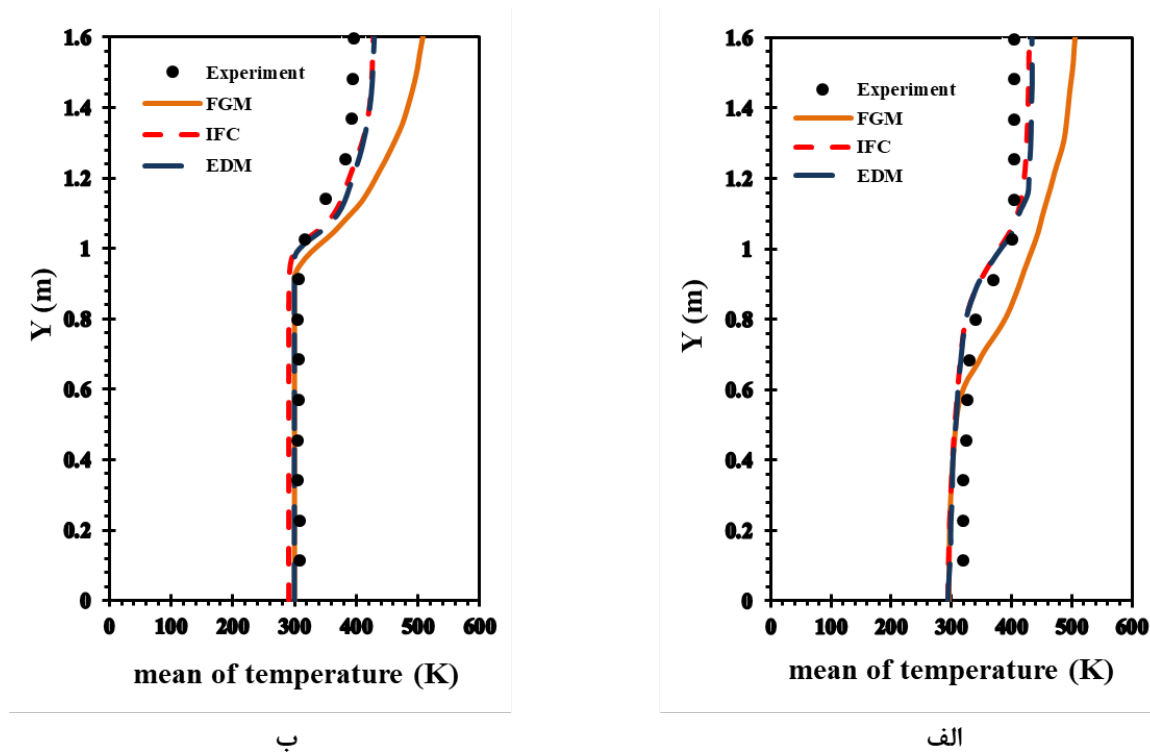
شکل ۴. نتایج شاخص کیفیت شبکه در مقطع‌های مختلف

Fig. 4. LES_iq result in different view



شکل ۵. روند پیشروی آتش در اتاق

Fig. 5. The progress of fire in the room



شکل ۶. دمای متوسط در الف) داخل اتاق و ب) خط مرکزی درب اتاق

Fig. 6. Mean temperature in a) inside the room and b) the center line of the door

می‌شود. با توجه به این شکل، دما با افزایش ارتفاع، افزایش می‌یابد تا به ۴۰۰ کلوین در ارتفاع ۱/۶ متر می‌رسد. با توجه به این شکل، نتایج هر سه مدل احتراقی در ارتفاع‌های پایین، بر یکدیگر منطبق هست و با نتایج تجربی همخوانی دارد؛ اما در ارتفاع‌های بالاتر، نتایج عددی مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارند؛ اما نتایج مدل احتراقی تولید فیلمت منیفولد، دقت پایین‌تری دارد.

با توجه به شکل ۶، دمای متوسط در پایین درب از ۳۰۰ کلوین شروع شده و با افزایش ارتفاع، زیاد می‌شود تا به حدود ۴۰۰ کلوین در بالای درب می‌رسد. در ارتفاع‌های پایین (ارتفاع کمتر از ۱ متر) که محل ورود هوا به علت مکش است، دمای در حدود دمای محیط (۳۰۰ کلوین) می‌باشد؛ اما در ارتفاع‌های بالا، دما به محدوده‌ی دمای گازهای داغ لایه‌ی نزدیک سقف نزدیک می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، دما در ارتفاع‌های بالا در هر دو نمودار یکسان است؛ چراکه از بالای درب اتاق گازهای محبوس در نزدیکی‌های سقف خارج می‌شود.

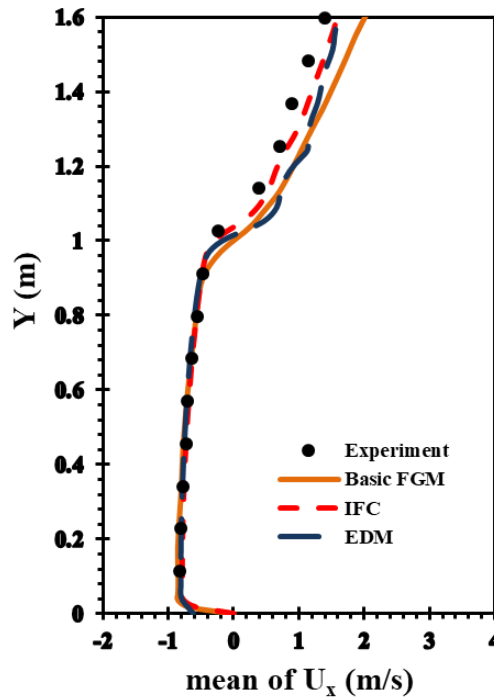
با توجه به شکل ۶، نتایج عددی سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع،

خلاف درب منحرف می‌شود (در زمان بین ۲۰-۵۰ ثانیه) و به تدریج فضای بیشتری از اتاق (در نزدیکی سقف اتاق) را گازهای داغ فرامی‌گیرد و ضخامت لایه‌ی گاز داغ در نزدیک سقف افزایش می‌یابد تا در زمان ۵۰-۶۰ ثانیه به بعد، دیگر این ضخامت تقریباً ثابت می‌ماند و در زمان بیشتر از ۶۰ ثانیه، رفتار آتش به صورت شبه پایدار می‌شود؛ به این معنا که شعله‌ی آتش در طول زمان نوسان کرده و به سمت راست و چپ منحرف می‌شود.

۳-۴- مقایسه‌ی نتایج مدل‌های احتراقی مختلف

به منظور بررسی دقت شبیه‌سازی، نتایج دمای متوسط در خط مرکزی درب خروجی و درون اتاق (خطی که ۰/۳۰۵ متر از دیوارها فاصله دارد) با نتایج تجربی مرجع [۲۵] در شکل ۶ مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۶، نتایج عددی دما در خط مرکزی درب اتاق اگرچه با نتایج تجربی همخوانی دارد؛ اما به نسبت داخل اتاق، مقداری اختلاف دارد و در نمودار دما داخل اتاق، همخوانی بیشتری با نتایج تجربی دیده می‌شود.

در شکل ۶، نتایج دما برحسب ارتفاع درون گوشه‌ی اتاق مشاهده



شکل ۷. سرعت متوسط در خط مرکزی درب اتاق

Fig. 7. Mean velocity in the center line of the door

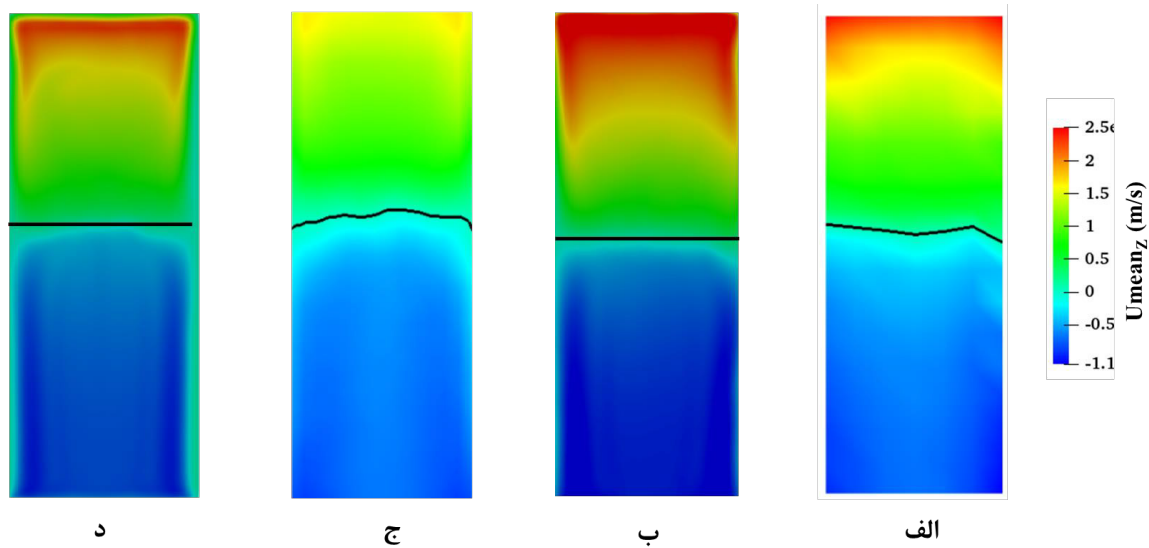
و سینتیک بسیار سریع در پیش‌بینی نتایج دمای متوسط در خط مرکزی درب خروجی و درون اتاق کمتر از ۵ درصد است.

یکی از عواملی که در پیش‌بینی بیش‌ازحد دما در مدل احتراقی تولید فیلمت منیفولد تأثیرگذار است، عدم در نظر گرفتن اثر تشعشع در این مدل احتراقی است (درحالی‌که در مدل احتراقی اضمحلال گردابه، اثر تشعشع وارد شده است). از این رو مشاهده می‌شود که در ارتفاع‌های پایین که دما کمتر است، نتایج دو مدل احتراقی با یکدیگر فرقی ندارد و نتایج هر دو مدل احتراقی با نتایج تجربی منطبق است؛ اما در ارتفاع‌های بالاتر که دما زیاد می‌شود (و اثر تشعشع مهم می‌شود)، نتایج دو مدل احتراقی از یکدیگر فاصله می‌گیرد.

در شکل ۷، نتایج سرعت متوسط در خروجی درب اتاق برای سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، اضمحلال گردابه و تولید فیلمت منیفولد نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج عددی مربوط به سرعت در سه مدل احتراقی با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد؛ اگرچه در ارتفاع‌های بالاتر مقداری اختلاف با نتایج تجربی دیده می‌شود، اما در کل

اضمحلال گردابه و تولید فیلمت منیفولد در ارتفاع‌های پایین خط مرکزی وسط درب خروجی، با نتایج تجربی مطابقت دارد؛ اما در ارتفاع‌های بالاتر که محل خروج گازهای داغ داخل اتاق است، نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع بهتر از نتایج مدل احتراقی تولید فیلمت منیفولد شده است. در حالت کلی، با توجه به نتایج دمای متوسط در خط مرکزی درب خروجی و درون اتاق، مشاهده می‌شود که نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع در این سناریو، بهتر از مدل احتراقی تولید فیلمت منیفولد است. همچنین نتایج دو مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع در پیش‌بینی نتایج دمای متوسط بر یکدیگر منطبق هستند.

مدل احتراقی تولید فیلمت منیفولد نتایج دما را بیشتر از نتایج تجربی و مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع پیش‌بینی کرده است. به‌نحوی که مقدار خطای نسبی نتایج عددی با نتایج تجربی در خط مرکزی درب اتاق برای مدل احتراقی تولید فیلمت منیفولد، ۱۵ درصد و در داخل اتاق کمتر از ۱۲ درصد است. درحالی‌که دقت مدل احتراقی اضمحلال گردابه



شکل ۸. کانتور سرعت متوسط در جهت Z در خروجی درب اتاق الف) نتایج تجربی [۲۵] و نتایج عددی ب) مدل احتراقی تولید فلیمنت منیفولد، ج) مدل احتراقی اضمحلال گردابه و د) مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع

Fig. 8. Mean velocity contour in the Z direction at the door a) Experimental results [8] and numerical results of b) flamelet generated manifold, c) eddy dissipation and d) infinite fast chemistry combustion models

آورده شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. با توجه به کانتور سرعت، مشاهده می‌شود که شکل کلی کانتور سرعت نتایج عددی و تجربی شبیه به یکدیگر است؛ اما در ارتفاع‌های بالا مقداری عدم تطابق بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود که این مسئله در مبحث نتایج سرعت متوسط در خط مرکزی این صفحه، بیان شد.

نکته‌ی دیگری که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، در یک ارتفاع سرعت به صفر رسیده و علامت سرعت، تغییر می‌کند. این ارتفاع که خط خنثی را نشان می‌دهد، بیانگر مرز مشترک بین ورودی هوای تازه و خروجی گازهای داغ حاصل از احتراق هست؛ که در ارتفاع بالاتر از این خط، گازهای داغ از درب اتاق خارج شده و در ارتفاع‌های پایین‌تر از این خط، هوای تازهی محیط اطراف وارد اتاق آتش می‌شود و بنابراین در سطح مشترک این دو ناحیه، سرعت صفر است.

نتایج تجربی و عددی مربوط به ارتفاع خط خنثی در جدول ۲ که برگرفته از شکل ۸ می‌باشد، آورده شده است. خط خنثی مربوط به نتایج تجربی در ارتفاع ۱/۰۵ متر است و سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، اضمحلال گردابه و تولید فلیمنت منیفولد به ترتیب، این ارتفاع را ۱/۰۸، ۱/۰۴ و ۱/۰

به نسبت نتایج دمای متوسط، نتایج سرعت متوسط با دقت بالاتری با نتایج تجربی همخوانی دارد. به طوری که در ارتفاع کمتر از ۱/۰ متر، نتایج عددی سه مدل احتراقی، کمتر از ۲ درصد خطای نسبی با نتایج تجربی وجود دارد و در ارتفاع‌های بالاتر، کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی در سه مدل احتراقی وجود دارد.

نکته‌ی دیگری که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در ارتفاع‌های بالاتر نتایج مدل تولید فلیمنت منیفولد به نسبت مدل اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع فاصله‌ی بیشتری از نتایج تجربی می‌گیرد (این نکته در منحنی‌های دما نیز مشاهده می‌شود). علت این موضوع نیز اثر مستقیم دما بر روی سرعت است که در مدل احتراقی تولید فلیمنت منیفولد که دما بالاتر به دست می‌آید، نیروی شناوری با قدرت بیشتری بر گازهای خروجی وارد شده و در نتیجه سرعت در این مدل احتراقی افزایش می‌یابد. همچنین برخلاف نتایج دمای متوسط، دقت مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع در پیش‌بینی سرعت متوسط بهتر از مدل احتراقی اضمحلال گردابه بوده است.

در شکل ۸ کانتور سرعت در خروجی درب برای نتایج عددی سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، اضمحلال گردابه و تولید فلیمنت منیفولد

جدول ۲. نتایج تجربی و عددی مربوط به ارتفاع خط خنثی و دبی هوای ورودی

Table 2. Experimental and numerical results of the height of the neutral line and the inlet air flow rate

مدل احتراقی	مدل احتراقی	مدل احتراقی اضمحلال	نتایج تجربی	
تولیدفلیملت منی فولد	سینتیک بسیار سریع	گردابه		
۱/۰	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۰۵	ارتفاع خط خنثی
٪ ۴/۸	٪ ۱/۰	٪ ۲/۹	-	خطای نسبی
۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۵۸۳	۰/۵۶۳	دبی هوای ورودی
٪ ۴	٪ ۱/۲	٪ ۳/۶	-	خطای نسبی

است، ضروری است که اثر تشعشع بر مدل احتراقی تولید فلیملت منی فولد بررسی شود تا به این ترتیب دقت این مدل احتراقی افزایش یابد. البته لازم به ذکر است در حالت کلی، مدل احتراقی تولید فلیملت منی فولد که توان شبیه سازی تمام گونه های شرکت کننده در حریق را دارد، در بدترین حالت ۱۵ درصد خطا و به طور متوسط (متوسط خطای نسبی دما، سرعت، دبی ورودی و ارتفاع خط خنثی) کمتر از ۱۰ درصد خطا با نتایج تجربی دارد. بنابراین دقت مدل احتراقی تولید فلیملت منی فولد، دقت قابل قبولی است (اگر چه در این سناریو، مقداری نتایج این مدل به نسبت سایر مدل های احتراقی، دقت پایین تری دارد).

نکته ی مهمی که عمده دلیل استفاده از این مدل احتراقی در این سناریو است، توانایی این مدل احتراقی در شبیه سازی تمامی گونه های شرکت کننده در حریق است. این درحالی است که سایر مدل های احتراقی مرسوم همچون اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع، تنها ۵ گونه را شبیه سازی می کنند (که از این ۵ گونه، تنها گونه ی سمی کربن دی اکسید را می توان مدل کرد). در حالت کلی، مزیت مدل تولید فلیملت منی فولد به نسبت سایر مدل های احتراقی در تخمین گونه های متعدد، با زمان محاسباتی مشابه سایر مدل های احتراقی، است. همچنین در تحقیق دیگری از نویسندگان حاضر [۱۶]، توزیع گونه در سناریوی آتش در اتاق و دقت مدل احتراقی تولید فلیملت منی فولد، با جزئیات بیشتری، بررسی شده است.

متر به دست آورده اند. مدل احتراقی اضمحلال گردابه ارتفاع خط خنثی را بالاتر از نتایج تجربی به دست آورده است؛ اما مدل احتراقی تولید فلیملت منی فولد ارتفاع خط خنثی را کمتر از نتایج تجربی گزارش کرده است؛ اما مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، این ارتفاع را با کمتر از ۱ درصد خطا، منطبق بر نتایج تجربی گزارش کرده است. در حالت کلی نتایج این سه مدل احتراقی با نتایج تجربی در پیش بینی ارتفاع خط خنثی، اختلاف چندانی ندارد و بر نتایج تجربی منطبق است.

نتیجه ی دیگری که در جدول ۲ آورده شده است، میزان دبی هوای ورودی از درب اتاق می باشد. با توجه به جدول ۲، میزان ورودی هوای تازه در تحقیق تجربی، ۰/۵۶۳ کیلوگرم بر ثانیه گزارش شده است و نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و تولید فلیملت منی فولد با حدود ۴ درصد خطای نسبی، ۰/۵۹ کیلوگرم بر ثانیه به دست آورده اند؛ اما مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، مقدار دبی هوای ورودی را با حدود ۱ درصد خطا، منطبق بر نتایج تجربی گزارش کرده است.

در حالت کلی با مقایسه ی نتایج، نکته ای مشهود است به این صورت که در شبیه سازی که از مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه استفاده شد، اثر تشعشع وارد نشده بود؛ اما در مدل احتراقی تولید فلیملت منی فولد، اثر تشعشع وارد نشده بود و از این رو اختلاف هایی در نتایج مشاهده شد. از آنجاکه، یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در بهبود نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منی فولد، اعمال تأثیر تشعشع در این مدل احتراقی

۴- جمع بندی

- Applications, 69(11) (2016) 1223-1241.
- [5] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarsahri, Numerical Investigation of Compartment Fire under Maximum and Minimum of Natural Ventilation using FGM Combustion Model, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering (2021), (in Persian).
- [6] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarsahri, Evaluation of LES sub-grid scale models and time discretization schemes for prediction of convection effect in a buoyant pool fire, Heat and Mass Transfer, (2020) 1-16.
- [7] A.C.Y. Yuen, G.H. Yeoh, V. Timchenko, T. Barber, LES and multi-step chemical reaction in compartment fires, Numerical Heat Transfer; Part A: Applications, 68 (2015) 711-736.
- [8] H. Xue, J. Ho, Y. Cheng, Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation, Fire Safety Journal, 36(1) (2001) 37-54.
- [9] G. Maragkos, B. Merci, Large Eddy Simulations of CH4 Fire Plumes, Flow, Turbulence and Combustion, 99 (2017) 239-278.
- [10] Y.-L. Huang, H.-R. Shiu, S.-H. Chang, W.-F. Wu, S.-L. Chen, Comparison of combustion models in cleanroom fire, Journal of Mechanics, 24(3) (2008) 267-275.
- [11] S.C.P. Cheung, G.H. Yeoh, A.L.K. Cheung, R.K.K. Yuen, S.M. Lo, Flickering behavior of turbulent buoyant fires using large-eddy simulation, Numerical Heat Transfer; Part A: Applications, 52 (2007) 679-712.
- [12] J.A. van Oijen, A. Donini, R.J.M. Bastiaans, J.H.M. ten Thije Boonkamp, L.P.H. de Goey, State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds, Progress in Energy and Combustion Science, 57 (2016) 30-74.
- [13] Y. Xing, T. Zhang, Z. Tian, J. Li, Y. Yan, Large eddy simulation of a turbulent non-premixed flame based on the flamelet-generated manifolds approach and a reduced mechanism verification, Aerospace Science and Technology, (2020) 105952.
- [14] H.F. Mrema, G.V. Candler, Large eddy simulation of supersonic combustion using the flamelet/progress-

با هدف بررسی اهمیت مدل احتراقی در شبیه‌سازی آتش در اتاق، از مدل احتراقی تولید فلیملت منی‌فولد استفاده شد و نتایج آن با دو مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه مقایسه شد. به این منظور یک اتاق که تحت تهویه طبیعی قرار دارد، انتخاب گردید و نتایج در حالتی که نرخ آزادسازی حرارت ۶۲/۹ کیلووات باشد، مطالعه شد. با بررسی نتایج در سناریوی آتش در فضای یک-اتاقه، مشاهده شد که:

- مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه نتایج بهتری نسبت به مدل احتراقی تولید فلیملت منی‌فولد، در مدل کردن دما، داشتند، به طوری که نتایج مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه، ۱۰ درصد خطای نسبی کمتری نسبت به مدل احتراقی تولید فلیملت منی‌فولد در پیش‌بینی نتایج دما، دارند.

- با توجه به اعمال تشعشع در مدل‌های احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه، از جمله عوامل مؤثر در بهبود نتایج این مدل‌ها بوده است (در مدل احتراقی تولید فلیملت منی‌فولد، اثر تشعشع وارد نشده بود؛ که البته یکی از موارد بهبود دقت مدل احتراق تولید فلیملت منی‌فولد، اضافه کردن اثر تشعشع بر این مدل احتراقی است).

- همچنین هر سه مدل احتراقی در پیش‌بینی سرعت، دبی هوای ورودی به اتاق و ارتفاع خط خنثی، خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد داشتند که دقت مناسب این مدل‌های احتراقی را نشان می‌دهد.

منابع

- [1] G. Yeoh, R. Yuen, S. Chueng, W. Kwok, On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires, Building and Environment, 38(6) (2003) 771-785.
- [2] X. Chen, S. Lu, X. Wang, K.M. Liew, C. Li, J. Zhang, Pulsation behavior of pool fires in a confined compartment with a horizontal opening, Fire technology, 52(2) (2016) 515-531.
- [3] G.H. Yeoh, K.K. Yuen, Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering, Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering, (2009).
- [4] A. Yuen, G. Yeoh, V. Timchenko, S. Cheung, T. Chen, Study of three LES subgrid-scale turbulence models for predictions of heat and mass transfer in large-scale compartment fires, Numerical Heat Transfer, Part A:

- (in Persian).
- [21] S.C.P. Cheung, G.H. Yeoh, A fully-coupled simulation of vortical structures in a large-scale buoyant pool fire, *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (2009) 2187-2202.
- [22] H. Bongers, J.A. Van Oijen, L.P.H. De Goey, Intrinsic low-dimensional manifold method extended with diffusion, *Proceedings of the Combustion Institute*, 29 (2002) 1371-1378.
- [23] L.M. Verhoeven, W.J.S. Ramaekers, J.A. van Oijen, L.P.H. De Goey, Modeling non-premixed laminar co-flow flames using flamelet-generated manifolds, *Combustion and Flame*, 159 (2012) 230-241.
- [24] S. Pohl, G. Frank, M. Pfitzner, J. Matheis, S. Hickel, Flamelet generated manifolds for modeling turbulent non-premixed combustion in OpenFOAM.
- [25] K.D. Steckler, J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen, Flow induced by fire in a compartment, in: *Symposium (international) on combustion*, Elsevier, 1982, pp. 913-920.
- [26] G.H. Yeoh, R.K.K. Yuen, S.C.P. Cheung, W.K. Kwok, On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires, *Building and Environment*, 38 (2003) 771-785.
- [27] G. Maragkos, T. Beji, B. Merci, Advances in modelling in CFD simulations of turbulent gaseous pool fires, *Combustion and Flame*, 181 (2017) 22-38.
- variable approach and the evolution-variable manifold approach, *AIAA Scitech 2019 Forum*, (2019) 1-20.
- [15] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasharshahri, Simulation of Pool and Compartment Fire Using Flamelet Generated Manifold With/Without Radiation Coupling, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2021) 1-10.
- [16] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasharshahri, Air curtain to control smoke and fire spread in a ventilated multi-floor building, *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106612, (2021).
- [17] S.M.J. Razeghi, M. Safarzadeh, H. Pasharshahri, Comparison of combustion models based on fast chemistry assumption in large eddy simulation of pool fire, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(4) (2020).
- [18] G. Heidarinejad, H. Pasharshahri, K. Mazaheri, Evaluation of Induced-Flow in a Two-Room Compartment Fire Using Large Eddy Simulation, *Modares Mechanical Engineering*, 13(4) (2013) 74-85, (in Persian).
- [19] A.C.Y. Yuen, G.H. Yeoh, V. Timchenko, S.C.P. Cheung, T.J. Barber, Importance of detailed chemical kinetics on combustion and soot modelling of ventilated and under-ventilated fires in compartment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 96 (2016) 171-188.
- [20] H. Pasharshahri, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, Large eddy simulation on one-meter methane pool fire using one-equation sub-grid scale model, in: *MCS*, pp. 11-15,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasharshahri, *Numerical Simulation of Compartment Fire with Flamelet Generated Manifold and Comparison with Other Combustion Models*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(3) (2022) 493-508.

DOI: 10.22060/mej.2021.19947.7145



