



مقایسه‌ی مدل احتراقی فلیمنت آرام و اضمحلال گردابه در شبیه‌سازی آتش در ساختمان

سید محمدجمال رازقی، محمد صفرزاده، هادی پاسدارشهری*

مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۲۰

کلمات کلیدی:

آتش در ساختمان
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ
مدل اضمحلال گردابه
مدل فلیمنت

خلاصه: در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از مدل‌های احتراقی فلیمنت آرام پایا و اضمحلال گردابه، جریان آتش در فضای یک-اتاقی با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مدل‌سازی شده است؛ تا مدل احتراقی سازگار با فیزیک جریان آتش در فضای یک-اتاقی مورد بررسی قرار گیرد. شبیه‌سازی با استفاده از مدل زیر شبکه اغتشاشی یک‌معدله‌ای انجام شد. برای استفاده از مدل فلیمنت آرام پایا با استفاده از کتابخانه‌های نرم‌افزار اپن‌فوم حلگری در آن برای شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی توسعه داده شد. سینتیک مورد استفاده برای مدل اضمحلال گردابه، سینتیک یک‌مرحله‌ای بازگشت‌ناپذیر است که فقط قادر به در نظر گرفتن گونه‌های اصلی احتراق است. هزینه محاسباتی شبیه‌سازی با استفاده از مدل اضمحلال گردابه، ۱۴ درصد بیشتر از مدل فلیمنت بوده در حالی که سینتیک مورد استفاده در مدل فلیمنت آرام پایا، سینتیک جی.آر.آی ۳ بوده که موجب پیش‌بینی گونه‌های میانی در احتراق خواهد شد. مقایسه‌ی نتایج دما و سرعت در باز شو برای دو مدل احتراقی نشان می‌دهد که مدل فلیمنت آرام پایا با خطای نسبی ۳/۳ درصد برای دما و ۸ درصد برای سرعت در باز شو، دقت بهتری در شبیه‌سازی جریان آتش در فضای تک-اتاقی، نسبت به مدل اضمحلال گردابه دارد. از طرفی مقایسه‌ی تغییرات دما در اتاق نشان می‌دهد که هر دو مدل پیش‌بینی خوبی از دما در اتاق ارائه می‌دهند اما مدل فلیمنت آرام پایا با خطای نسبی ۳/۲ درصد دقت بهتری ارائه می‌کند.

۱- مقدمه

می‌توان به شبیه‌ساز دینامیک آتش^۱، سی اف ایکس^۲ و فایرفوم^۳ اشاره کرد. به دلیل فیزیک پیچیده‌ی جریان حریق، شبیه‌سازی آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی، چالشی مهم را در پی دارد. رفتار ناپایای این جریان و تقویت اغتشاش در آن به دلیل حضور نیروهای شناوری، موجب وجود مقیاس‌های مختلف خواهد شد. استفاده از معادلات متوسط‌گیری‌شده‌ی رینولدز قابلیت در نظر گرفتن همه‌ی مقیاس‌های جریان و پیش‌بینی دینامیک جریان با جزئیات کامل را نداشته است [۱]. روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با فیلترگیری از مقیاس‌های طولی کوچک جریان، مقیاس طولی بزرگ جریان را به صورت مستقیم حل کرده و مقیاس‌های کوچک آن را با استفاده از مدل‌های زیر شبکه شبیه‌سازی می‌کند [۲]. انتخاب مدل‌های زیر شبکه‌ی مناسب، برای اغتشاش، احتراق، تشعشع و دوده‌انگیزی بسیاری از مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی شبیه‌سازی جریان حریق می‌باشد.

آگاهی از فیزیک سناریوی آتش مورد بررسی، توانایی پیش‌بینی رفتار آتش برای آگاهی از نحوه‌ی پیشروی و گسترش، میزان حرارت و دود ناشی از آن را افزایش می‌دهد. پیش‌بینی رفتار آتش با استفاده از روش‌های تجربی و عددی انجام می‌شود. این روش‌ها می‌توانند به طراحی سیستم‌های اطفای حریق، محاسبه میزان و نوع خاموش‌کننده لازم برای اطفای حریق و کنترل آتش در ساختمان کمک کنند. از طرفی با شناسایی ساختار دود آتش می‌توان در انتخاب فیلترهای سیستم تهویه، کارآمدتر عمل کرد. امروزه با پیشرفت و پیچیدگی سناریوهای آتش استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی، به دلیل هزینه‌ی بالای آزمون‌های آزمایشگاهی و توجه بیشتر این مدل به جزئیات افزایش یافته است.

کدها و نرم‌افزارهای متنوعی برای استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی گسترش داده شد. از شاخص‌ترین این نرم‌افزارها

- 1 Fire dynamic simulator (FDS)
- 2 CFX
- 3 FireFoam

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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



نتایج تجربی مطابقت داشت. دژاردین و همکاران [۱۰] با استفاده از مدل احتراقی فلیملت آرام پایا، با استفاده از توزیع‌های مختلف برای اعمال اغتشاش روی کتابخانه آرام، آتش استخری متان [۹] را شبیه‌سازی کردند. سپس به بررسی نقش ترم شناوری، در معادله‌ی انتقال ورتیسیت و تشکیل گردابه‌های آتش پرداختند و مشاهده شد که برخلاف پلوم‌های غیر واکنشی [۱۱] نقش ترم شناوری با افزایش ارتفاع قابل توجه خواهد بود. مارچاند و همکاران [۱۲] مدل‌های احتراقی فلیملت آرام پایا و مفهوم اضمحلال گردابه را، در شبیه‌سازی آتش کوچک مقیاس متان، با ورودی به طول ۵۰ سانتی‌متر و عرض ۵ سانتی‌متر، مقایسه کردند. مدل فلیملت آرام پایا استفاده شده در این مطالعه، دمای متوسط در خط وسط شعله و مقطع افقی را، کمتر از نتایج تجربی و مدل مفهوم اضمحلال گردابه پیش‌بینی می‌کند.

یوئن و همکاران در مطالعات مختلفی [۱۳-۱۵] با استفاده از مدل احتراقی فلیملت جریان حریق، در سناریوهای مختلف را بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق [۱۳] سعی در بررسی فرآوردی فرعی حاصل از احتراق با استفاده سینتیک تفصیلی سوخت را داشتند. نتایج غلظت کربن مونو اکسید و کربن دی اکسید را بیشتر از مطالعات تجربی نشان داد؛ اما نسبت غلظت کربن مونو اکسید و کربن دی اکسید به یکدیگر، با بهبود ۹/۲٪ نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی شد. سپس در مطالعه [۱۴]، به مقایسه‌ی سه مدل زیرشبکه‌های اسماگورینسکی، ویسکوزیته ادی تعدیل‌شده برای دیواره و ورم‌ن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل ویسکوزیته ادی تعدیل‌شده برای دیواره زیر شبکه سازگارتر با روش فلیملت است و در تحقیقی دیگر از این نویسندگان [۱۵] مقدار مناسب سه ضریب ثابت اسماگورینسکی، عدد پرانتل و عدد اشمیت اغتشاشی که با مدل احتراقی فلیملت آرام همخوانی بیشتری داشته باشد را ارائه دادند.

استفاده از مدل فلیملت در شبیه‌سازی جریان‌های واکنشی کمک می‌کند تا با استفاده از سینتیک تفصیلی گونه‌های میانی و اثرات آن‌ها بر احتراق در نظر گرفته شود. این موضوع هزینه‌ی محاسباتی هنگفتی را در مقایسه با سایر مدل‌ها با سینتیک تفصیلی به دنبال نخواهد داشت. از طرفی به دلیل اینکه احتراق در فرآیند آتش‌سوزی معمولاً به‌صورت کامل رخ نمی‌دهد، استفاده از سینتیک یک-مرحله‌ای موجب در نظر نگرفتن مجموعه‌ای از واکنش‌های میانی خواهد شد. به منظور بررسی دقیق این موضوع، این مطالعه مقایسه‌ای میان تأثیر استفاده

هوانگ و همکاران [۳] سه مدل احتراقی منبع گرمایی حجمی^۱، شکست گردابه^۲ و پیش تابع چگالی احتمال^۳ را برای سه سناریوی آتش در یک اتاق مورد بررسی قرار دادند و آن‌طور که گزارش شده است مدل منبع گرمایی حجمی علی‌رغم هزینه‌ی کم محاسباتی، به دلیل در نظر نگرفتن واکنش‌های شیمیایی مدل مناسبی برای تخمین گونه‌های احتراقی حاصله نیست. ماراگکاس و همکاران [۴] کارایی مدل احتراقی اضمحلال گردابه^۴ را در دو بسته نرم‌افزاری فایرفوم و شبیه‌ساز دینامیک آتش، برای آتش استخری بزرگ مقیاس متان، مقایسه کردند و پیش‌بینی دمای متوسط، حدود ۱۰۰ کلوین بیش از نتایج تجربی، توسط بسته‌ی اپن‌فوم را گزارش کردند. در مطالعه‌ی دیگری توسط آن‌ها [۵] با نرم‌افزار فایرفوم، مقایسه‌ای میان نتایج مدل احتراقی مفهوم اضمحلال گردابه^۵، اضافه‌شده به فایرفوم و مدل احتراقی اضمحلال گردابه که پیش‌فرض فایرفوم است؛ انجام شد. ماراگکاس و همکاران [۴]، با استفاده از مدل زیر شبکه اغتشاشی اسماگورینسکی و محاسبه ضرایب به‌صورت دینامیکی، شبیه‌سازی آتش استخری کوچک مقیاس متانول [۶] را انجام دادند. استفاده از مدل مفهوم اضمحلال گردابه موجب بهبود پیش‌بینی دمای متوسط در خط وسط شعله گشت. میزان غلظت کربن دی اکسید نیز با مدل مفهوم اضمحلال گردابه به نتایج تجربی نزدیک‌تر بود.

در تحقیقات اخیر میل به استفاده از مدل احتراقی فلیملت آرام پایا^۶ بیشتر شده است. ون و همکاران [۷] با استفاده از مدل فلیملت آرام پایا و در نظر گرفتن سینتیک تفصیلی (شامل ۳۷ گونه و ۱۱۲ واکنش) آتش استخری در فضای یک اتاقه را مدل کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در نظر گرفتن سینتیک تفصیلی، نقش مهمی در بهبود پیش‌بینی نتایج دما، گونه‌های شیمیایی و ذرات دوده را داشته است. راوات و همکاران [۸] با استفاده از مدل احتراقی فلیملت ناپایا، سینتیک یک-مرحله‌ای و مدل اغتشاشی اسماگورینسکی آتش استخری بزرگ مقیاس با سوخت متان و قطر ورودی یک متر [۹] را شبیه‌سازی کردند. نتایج سرعت افقی متوسط با دقت خوبی به نتایج تجربی نزدیک بود و پیش‌بینی دوده تشکیل‌شده در آتش، با

- 1 Volumetric Heat Source (VHS)
- 2 Eddy Breakup Model (EBU)
- 3 Pre Probability Density Function (prePDF)
- 4 Eddy Dissipation Model (EDM)
- 5 Eddy Dissipation Concept (EDC)
- 6 Steady Laminar Flamelet Model (SLFM)

فوریه محاسبه می‌شوند. ترم‌های $\bar{\tau}_{u_i, h_s}$ و $\bar{\tau}_{u_i, \phi}$ ، $\bar{\tau}_{u_i, u_j}$ به ترتیب تانسور تنش، بردار شار جرمی و شار حرارتی اغتشاشی هستند که ناشی از فیلترگیری متغیرهای جریان در معادلات هستند. برای به دست آوردن این ترم‌ها از مدل‌های زیرشبکه استفاده می‌شود. با توجه به مطالعه‌ی پاسدارشهری و همکاران در زمینه‌ی آتش استخری [۱۶]، برای مدل‌سازی ترم تنش اغتشاشی در تحقیق حاضر از مدل زیرشبکه‌ی اغتشاشی یک-معادله‌ای استفاده شده است؛ بنابراین ترم تنش اغتشاشی با توجه به معادله (۵) محاسبه خواهد شد.

$$\bar{\tau}_{u_i, u_j} = -2 \underbrace{(\bar{\rho} C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}})}_{\mu_{\phi}^{SGS}} \tilde{S}_{ij} + \frac{1}{3} (2 \bar{\rho} C_k \Delta^2 (2 \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{1/2}) \delta_{ij} \quad (5)$$

در معادله‌ی (۵)، μ_T^{SGS} ، لزجت زیر شبکه، k_{SGS} انرژی توربولانسی زیرشبکه و Δ پهنای فیلتر بوده و برابر $(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ است. \tilde{S}_{ij} تانسور نرخ کرنش است و برابر C_k ثابت $1/2 (\partial \tilde{u}_i / \partial x_j + \partial \tilde{u}_j / \partial x_i) - 1/3 (\partial \tilde{u}_k / \partial x_k) \delta_{ij}$ است. ثابت C_k با توجه به مطالعات تئوری دیردورف، ۰/۰۶۹ در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. برای محاسبه‌ی انرژی توربولانسی زیرشبکه، معادله انتقال (۶) حل خواهد شد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} k_{SGS}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i k_{SGS}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_i} \right) + P_{k_{SGS}} - C_\epsilon \frac{\bar{\rho} k_{SGS}^{3/2}}{\Delta} + B_{k_{SGS}} \quad (6)$$

$P_{k_{SGS}}$ و $B_{k_{SGS}}$ به ترتیب ترم تولید و ترم تولید به دلیل نیروهای شناوری هستند. این ترم‌ها به ترتیب برابر $-\tau_{ij} (\partial \tilde{u}_i / \partial x_j)$ و $1/0.48 \Delta (k_{SGS})^{1/2} (\partial \bar{\rho} / \partial x_j) \cdot g_j$ است [۱۸].

۲-۱- مدل احتراقی اضمحلال گردابه

به دست آوردن ترم نرخ حرارت تولیدشده در معادله‌ی انتقال انرژی نیازمند مدل‌سازی می‌باشد. مگناسن و هجارتاگر [۱۹] مدل احتراقی اضمحلال گردابه را ارائه کردند. در این مدل، ناحیه‌ی واکنشی به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های واکنشی است که با گردابه‌های اغتشاشی منتقل می‌شود. در واقع ناحیه‌ای که اختلاط واکنش‌دهنده‌ها و احتراق در آن صورت می‌گیرد مقدار جزئی از کل

از مدل‌های احتراقی فلیمنت آرام و اضمحلال گردابه برای شبیه‌سازی جریان آتش در فضای تک-اتاقی ارائه کرده است. علاوه بر این، در این مقاله تأثیر این دو مدل احتراقی در پیش‌بینی دما در بازشو و برخی کمیت‌های ماکروسکوپی مهم در فرآیند آتش‌سوزی ارزیابی شده است. لازم به توضیح است که به دلیل نبودن مدل فلیمنت آرام در نرم‌افزار این‌فوم حلگری در این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی با استفاده از مدل احتراقی فلیمنت آرام افزوده شده است. در آخر نیز با مقایسه‌ی میان نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده تأثیر استفاده از مدل اضمحلال گردابه با فایرفوم و با استفاده از سینتیک یک-مرحله‌ای برگشت‌ناپذیر و مدل فلیمنت آرام پایا، با حلگر توسعه داده شده در بستر این‌فوم و با سینتیک کامل جی.آر.آی ۳، انجام می‌شود.

۲- معادلات حاکم

جریان هوای حاصل از آتش‌سوزی، جریانی با ماخ پایین و چگالی متغیر است. با توجه به متغیر بودن چگالی از متوسط وزنی فاوور برای متوسط گیری معادلات ناویر استوکس استفاده می‌شود. معادلات متوسط گیری شده بقای جرم، مومنتوم، انرژی و کمیت اسکالر در مختصات کارترزین برای این جریان به صورت زیر نوشته می‌شوند:

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

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

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{\phi})}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{\tau}_{u_i, \phi}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{q}_\phi}{\partial x_i} + S_\phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_s) = -\frac{D\bar{P}}{Dt} - \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{u_i, h_s}}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \bar{\omega}_r + \bar{S}_{rad} \quad (4)$$

در این روابط ρ چگالی، u_i سرعت، P فشار و h_s آنتالپی محسوس هستند. ϕ نماینده‌ی اسکالره‌ی مورد استفاده (کسر جرمی گونه‌ها، کسر مخلوط و واریانس کسر مخلوط) در شبیه‌سازی جریان است. S_ϕ و \bar{S}_{rad} ترم‌های منبع ناشی از اسکالره‌ی جریان و انتقال حرارت تشعشعی هستند؛ درحالی‌که $\bar{\omega}_r$ نرخ حرارت تولیدشده در اثر احتراق است. $\bar{\tau}_{ij}$ تانسور تنش لزجت، \bar{q}_ϕ شار جرمی، \bar{q}_i شار حرارتی هستند و به ترتیب با استفاده از قوانین نیوتن، فیک و

در مطالعه حاضر از با استفاده از نرم‌افزار کمکین^۲ معادلات در فضای کارترین به صورت یک‌بعدی و پایا حل و کتابخانه‌ای از سوخت متان در فشار ۱۰۱ کیلو پاسکال و دمای ۳۰۰ کلون، با سینتیک جی.آر.آی ۳ تشکیل خواهد شد. معادلات (۸) تا (۱۲)، با فرض گاز کامل، در حالت پایا، عدد لوییس یک و بدون در نظر گرفتن اثرات سورت و دوفرت^۳ حل خواهند شد [۲۲].

$$\frac{\partial(F(x))}{\partial x} = G(x) \quad (8)$$

$$H - 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{FG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial(G)}{\partial x} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho Y_i V_i) - \dot{\omega}_i W_i = 0 \quad (10)$$

$$\rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_r c_{p,r} Y_r V_r \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{c_p} \sum_r h_r \dot{\omega}_r = 0 \quad (11)$$

$$H = \frac{\partial P}{\partial Y} F(x) = \rho u \quad G(x) = -\frac{\rho V}{Y} \quad (12)$$

در معادلات (۸) تا (۱۲) u, ρ, x به ترتیب مختصات فیزیکی، چگالی مخلوط، سرعت مخلوط گاز می‌باشند. $\mu, c_p, \lambda, \dot{\omega}_i, Y_i$ به ترتیب کسر جرمی گونه‌ی آم، شدت واکنش گونه‌ی آم، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت و ویسکوزیته دینامیکی می‌باشند.

مرحله بعد محاسبه اسکالره‌ای جریان است. در مدل فلیملت آرام پایا برای شعله غیرپیش‌آمیخته، از اسکالره‌ای کسر مخلوط و نرخ اضمحلال استفاده شده است. کسر مخلوط در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته اسکالری غیر واکنشی است که به‌عنوان معیاری از حضور سوخت و اکسیدکننده در نظر گرفته می‌شود.

$$Z = \frac{sY_F - Y_O + Y_O^0}{sY_F + Y_O^0} \quad (13)$$

در معادله (۱۳) s ، کسر جرمی استوکیومتری، Y_O, Y_F ، کسر جرمی سوخت و اکسیدکننده و Y_O^0, Y_F^0 کسر جرمی سوخت و اکسیدکننده در جریان سوخت و اکسیدکننده‌ی نسوخته و Z کسر مخلوط است. اسکالر دیگری که در این مدل استفاده می‌گردد؛ نرخ اضمحلال، χ است. نرخ اضمحلال نیز بیانگر تغییرات گرادیان سرعت در جریان و به عبارتی بیانگر میزان اختلاط مولکولی بوده و دارای واحد s^{-1} است و از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود [۲۰].

حجم مخلوط است. در این مدل احتراقی، نرخ مصرف سوخت از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$\dot{\omega}_r = \bar{\rho} \min \left(C_{EDM} \frac{\varepsilon_{sgs}}{k_{sgs}}, \frac{C_{diff} \alpha}{\Delta^2} \right) \min \left(\tilde{Y}_{Fuel}, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{s} \right) \quad (7)$$

C_{EDM} و C_{diff} ثابت‌های مدل اضمحلال گردابه هستند و مقدار آن به ترتیب برابر ۲ و ۴ است. $\tilde{Y}_{Fuel}, \tilde{Y}_{O_2}$ کسر جرمی سوخت و اکسیدکننده و s نسبت جرمی استوکیومتری هوا به سوخت است.

۲-۲- مدل احتراقی فلیملت آرام

پیترز [۲۰] نشان داد که با فرض نازک بودن شعله، مقیاس زمانی احتراق در قیاس با زمان جابجایی و نفوذ کمتر خواهد بود و در نتیجه احتراق در لایه‌های نازکی رخ می‌دهد که گردابه‌ها در آن در مقایسه با گردابه‌های مقیاس کولموگروف نیز کوچک‌تر است. به این لایه‌ها فلیملت می‌گویند و ساختار جریان درون این لایه‌ها آرام است. در نظر گرفتن شعله به صورت مجموعه‌ای از فلیملت‌ها کمک می‌کند تا ساختار پیچیده‌ی شیمیایی شعله را از ساختار دینامیکی جریان جدا کرده و موجب صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه محاسباتی خواهد شد. در این مدل با استفاده از اسکالره‌ای مختلف، جداولی از فلیملت‌های آرام تشکیل داده می‌شود تا مشخصه‌های ترموشیمیایی جریان احتراقی از آن‌ها استخراج گردد.

استفاده از مدل فلیملت آرام در جریان‌های اغتشاشی در سه مرحله انجام می‌پذیرد؛ تشکیل کتابخانه آرام، اعمال تابع توزیع احتمال^۱ به کتابخانه برای لحاظ کردن اثر اغتشاش در آن و حل میدان اصلی جریان. برای تشکیل کتابخانه آرام، هر فلیملت، با قرار دادن دو نازل سوخت و اکسیدکننده در فواصل مختلف از یکدیگر تشکیل می‌شود. این ساختار که به‌عنوان جریان متقابل شناخته می‌شود؛ نزدیک‌ترین حالت برای تشکیل فلیملت است. برای به دست آوردن مشخصه‌های هر فلیملت استفاده از دو روش امکان‌پذیر است. روش اول حل معادلات فلیملت بوده که توسط پیترز و با استفاده از تبدیلات کروکو [۲۱] ارائه شد. روش دوم، حل معادلات انتقال یک-بعدی برای ساختار جریان متقابل و محاسبه‌ی اسکالره‌ای جریان است.

2 CHEMKIN
3 Soret and Dufour effect

1 Probability Density Function (PDF)

استفاده می‌شود [۲۴].

$$\tilde{\phi}(\tilde{z}, \tilde{\chi}_{st}, z^{n2}) = \int_{\chi}^1 \int_0^1 \phi(z, \chi_{st}) P(z) P(\chi_{st}) d\chi_{st} dz \quad (17)$$

با توجه به مطالعات قبلی [۲۵] برای محاسبه‌ی توابع چگالی احتمال در رابطه‌ی (۱۷)، برای $P(\chi_{st})$ از تابع دلتای دیراک و برای $P(z)$ از توزیع بتا استفاده شد [۲۵]. در رابطه‌ی (۱۷)، مجذور واریانس کسر مخلوط فیلترگیری شده برابر $\tilde{z}^{n2} = (z - \tilde{z})^2$ است و با استفاده از توزیع بتا و دلتا، از کتابخانه آرام متوسط گیری شده است تا کتابخانه‌ی مغشوش بر مبنای کسر مخلوط فیلترگیری شده، مجذور واریانس کسر مخلوط فیلترگیری شده و نرخ اضمحلال استوکومیتری فیلترگیری شده تشکیل شود [۲۶].

مرحله‌ی آخر در استفاده از مدل فلیملت، به دست آوردن اسکالرهای یاد شده در میدان اصلی جریان و استفاده از کتابخانه اغتشاشی مدل فلیملت آرام برای به دست آوردن متغیرهای ترموشیمیایی جریان است. برای محاسبه‌ی $\tilde{\chi}_{st}$ در میدان، با استفاده از تابع توزیع دلتای دیراک برای $P(\chi_{st})$ و با استفاده از انتگرال چگالی احتمال از رابطه‌ی (۱۶)، مقدار متوسط نرخ اضمحلال استوکومیتری از مقدار محلی آن، با توجه به رابطه‌ی (۱۸) قابل محاسبه است.

$$\chi_{st} = \frac{\tilde{\chi}}{\int_0^1 F(z) P(z) dz} \quad (18)$$

همان‌طور که اشاره شد در حل معادلات به روش فیلترگیری گردابه‌های بزرگ برای به دست آوردن کسر مخلوط و مجذور واریانس کسر مخلوط فیلترگیری شده از حل معادلات انتقال آن‌ها استفاده می‌شود [۲۷].

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{z}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{z}) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{z}}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} z^{n2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i z^{n2}) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial z^{n2}}{\partial x_i} \right) =$$

$$C_g \mu_t \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \right)^2 - \bar{\rho} \tilde{\chi} \quad (20)$$

در معادلات (۱۹) و (۲۰) از عدد اشمیت آرام و توربولانسی

$$\chi = 2D_z (\nabla z \cdot \nabla z) \quad (14)$$

در رابطه‌ی (۱۴) D_z بیانگر ضریب نفوذ مولکولی مخلوط است که به دلیل فرض یکسان بودن عدد لوییس گونه‌ها، عدد لوییس مخلوط برابر یک خواهد شد و در نتیجه ضریب نفوذ مولکولی مخلوط با ضریب نفوذ حرارتی آن برابر خواهد شد. پیترز با حل تحلیلی جریان متقابل نرخ اضمحلال را به صورت تابعی از کسر مخلوط به دست آورد [۲۳]. از طرفی برای بی بعد کردن معادله (۱۵) از نرخ اضمحلال استوکومیتری استفاده می‌شود؛ بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۱۶) می‌توان با داشتن نرخ اضمحلال از رابطه‌ی (۱۴) مقدار استوکومیتری آن را به دست آورد.

$$\chi = \frac{a}{\pi} \cdot \exp\left(-2(\text{erf}^{-1}(1-2z))^2\right) \quad (15)$$

$$\chi_{st} = \frac{\chi}{\exp\left(2\left[\left(\text{erf}^{-1}(1-2z_{st})\right)^2 - \left(\text{erf}^{-1}(1-2z)\right)^2\right]\right)} \quad (16)$$

در آخر برای در نظر گرفتن اثرات غیر تعادلی در تشکیل کتابخانه‌ی فلیملت، با تغییر سرعت یا فاصله‌ی میان نازل‌ها، گرادیان سرعت دچار تغییر می‌گردد و این تغییر موجب تغییر در مقیاس زمانی اختلاط سوخت و اکسیدکننده خواهد شد. به عنوان مثال با افزایش فاصله میان دو نازل میزان گرادیان سرعت و یا نرخ کرنش در شعله کاهش یافته و در نتیجه زمان بیشتری برای اختلاط موجود خواهد بود که باعث می‌شود واکنش به حالت تعادلی نزدیک‌تر باشد. از طرفی با کاهش این فاصله به دلیل اختلاط ناقص اثرات غیر تعادلی افزایش یافته و با ادامه‌ی کاهش فاصله شاهد خاموشی فلیملت خواهیم بود؛ بنابراین می‌توان با تغییر نرخ کرنش، فلیملت‌های متعدد از حالت تعادلی تا خاموشی تشکیل داد. لازم به توضیح است که خواص ترموشیمیایی سیال به صورت تابعی از کسر مخلوط و نرخ اضمحلال استوکومیتری $(\phi(z, \chi_{st}))$ ارائه می‌شود. در این مطالعه ۱۵ کتابخانه‌ی فلیملت آرام با تغییر نرخ اضمحلال استوکومیتری از حالت تعادلی تا خاموشی تشکیل شد.

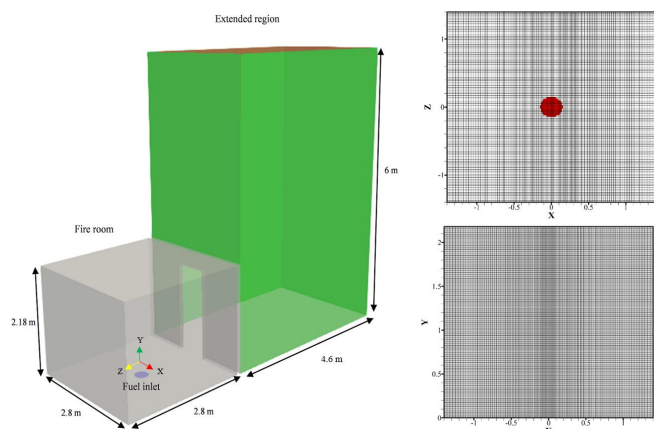
کتابخانه‌ی به دست آمده، قابلیت استفاده در مدل‌سازی شعله‌ی آرام را دارا است؛ اما برای استفاده از آن در شعله‌های مغشوش می‌بایست اثر اغتشاش را بر آن اعمال نماییم تا متغیرهای متوسط گیری شده به دست آورده شود. برای این کار از توابع چگالی احتمال

به خوبی شبیه‌سازی گردد؛ بنابراین با توجه به شکل ۱ علاوه بر اتاقی که منبع آتش در آن قرار گرفته است فضای توسعه‌یافته‌ای به ابعاد ۲/۸×۶×۴/۶ مترمربع در نظر گرفته شده است.

نمایی دوبعدی از شبکه‌بندی انجام شده در دیواره‌ی اتاق و کف آن که محل ورود سوخت می‌باشد، نشان داده شده است. شبکه‌ی مورد استفاده در این مطالعه سازمان‌یافته بوده و به دلیل شدت بالای تغییرات در بالای منبع آتش، سعی شده است تا تمرکز شبکه در وسط اتاق بیشتر شود که جریان در این قسمت با دقت مناسب مدل‌سازی گردد. مگکراتن و همکاران [۳۱]، رابطه‌ی (۲۲) را برای به دست آوردن مقیاس طولی از آتش که تغییرات در آن شدید است ارائه کردند. با به دست آوردن مقیاس طولی آتش، حداقل تعداد شبکه محاسباتی با استفاده از شاخص کیفیت شعله ($PRI = L^{base}/\Delta x$) قابل تعیین خواهد بود. مطالعات قبلی انجام شده در زمینه شبیه‌سازی جریان آتش [۳۲] مقدار ۵ الی ۱۵ را برای این شاخص پیشنهاد می‌کنند.

$$L^{base} = \left(\frac{\dot{Q}_{comb}}{\rho_{\infty} T_{\infty} C_p \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (22)$$

در مطالعه‌ی حاضر با توجه به اینکه توان حرارتی آتش برابر ۶۲/۹ کیلووات است مقدار شاخص طول در آن برابر ۰/۳۱ متر خواهد بود با در نظر گرفتن اینکه شاخص کیفیت شعله برابر ۱۵ است اندازه‌ی پیشنهادی برای شبکه برابر ۰/۰۲ متر است. برای به دست آوردن این اندازه به ترتیب به میزان ۱۲۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ شبکه در راستاهای X، Y و Z در داخل اتاق آتش استفاده شد؛ بنابراین ۱،۵۰۰،۰۰۰ شبکه



شکل ۱. هندسه‌ی فضای یک-اتاقی مورد بررسی

Fig. 1. Geometry of the one-room compartment in the current study

استفاده شده است. در فیزیک آتش مقدار عدد اشمیت آرام Sc برابر ۰/۷۲ و عدد اشمیت توربولانسی Sc_t برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد. ثابت C_g نیز برابر $1/Sc$ بوده و مقدار آن ۲/۸۶ است [۲۸].

از طرفی در شبیه‌سازی به روش گردابه‌های بزرگ برای به دست آوردن نرخ اضمحلال متوسط گیری شده خیمنز و همکاران [۲۹] با این فرض که نوسان‌های کسر مخلوط متناسب با نوسان‌های اغتشاش میرا می‌شوند، رابطه‌ی (۲۱) را معرفی کردند.

$$\tilde{\chi} = C_{\chi} \frac{\varepsilon}{k} z^{n2} \quad (21)$$

در رابطه‌ی (۲۱) k انرژی جنبشی مغشوش و ε اضمحلال انرژی جنبشی مغشوش است. با توجه به مطالعات قبلی مقدار ثابت C_{χ} برابر ۲ در نظر گرفته شده است.

۳- شرح آزمون تجربی

استکلر و همکاران [۳۰] در فضای یک-اتاقی با یک بازشو ۴۵ آزمون تجربی مختلف را انجام دادند. اتاق آزمون دارای طول و عرض ۲/۸ متر و ارتفاع ۲/۱۸ متر است. دیوارها از نوعی فیبر سرامیکی عایق به منظور کاهش نرخ انتقال حرارت هدایت، ساخته شده است. یک بازشو در یکی از وجوه اتاق قرار دارد که ابعاد آن در خصوص هر آزمایش متفاوت است. در مطالعه‌ی حاضر، از نتایج آزمونی که بازشو در آن دری به عرض ۰/۷۴ متر و ارتفاع ۱/۸۳ متر است، استفاده شده است. منبع آتش در این آزمون با تزریق سوخت متان در مرکز اتاق، از ناحیه‌ای با قطر ۰/۳ متر، تأمین می‌شود. توان حرارتی آتش در این آزمون ۶۲/۹ کیلووات است. با قرار دادن مجموعه‌ای از ترموکوپل‌ها و پروب‌ها در طول بازشو مقادیر سرعت و دما گزارش شده است. از طرفی با قرار دادن شاخه ترموکوپل دیگری در گوشه‌ی روبرویی اتاق (به فاصله‌ی ۰/۳۰۵ متر از هر دیوار)، دما در این ناحیه نیز گزارش شد.

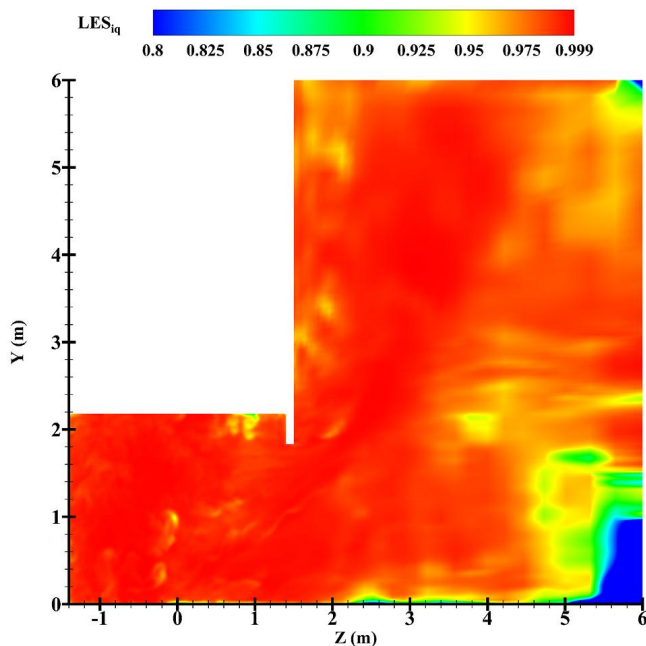
۴- روش حل

۴-۱- هندسه‌ی مورد بررسی

در این مطالعه فضای یک-اتاقی آزمون استکلر و همکاران [۳۰] با یک بازشو به ابعاد اشاره شده، مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی جریان در نزدیکی بازشو به دلیل ورود و خروج هوا از آن لازم است تا فضایی به اتاق اضافه شود تا رفتار جریان در این ناحیه،

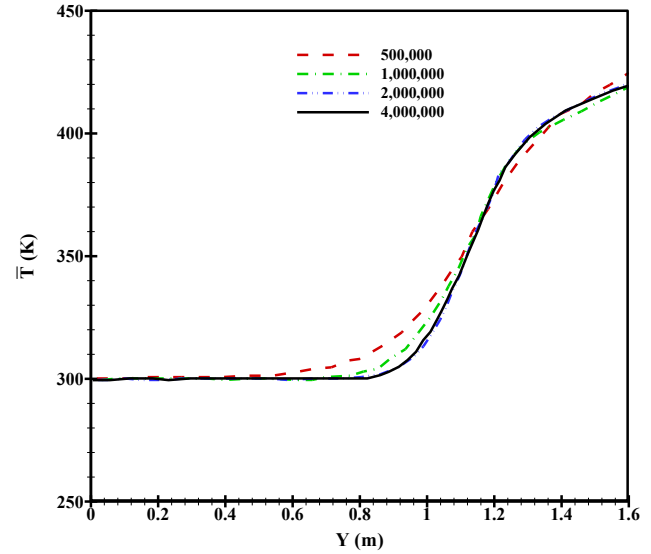
اغتشاشی حل شده برابر $\overline{u_i' u_i'} / 2$ است. هرچه اندازه فیلتر کوچکتر باشد، میزان انرژی جنبشی حل شونده در میدان حل افزایش می‌یابد و در نتیجه LES_{IQ} ، افزایش خواهد یافت.

در مطالعه به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به دلیل استفاده از فیلترگیری برای اطلاع از کیفیت شبکه استفاده از شاخص LES_{IQ} جامعیت بهتری دارد؛ زیرا این شاخص به مفهوم روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ که فیلترگیری مقیاس‌های طولی کوچک جریان و حل مستقیم مقیاس‌های طولی بزرگ جریان است نزدیک‌تر است. برای نمونه در مطالعه مرسی و همکاران [۵] که با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ روی آتش استخری انجام گرفته است، از شاخص LES_{IQ} برای بررسی کیفیت شبکه استفاده شده است. در مطالعه [۴] نیز کیفیت شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه‌ی یوئن و همکاران [۲۸] نیز از مفهوم LES_{IQ} در شبیه‌سازی به روش گردابه‌های بزرگ برای آتش در فضای تک-اتاقی استفاده شده است. (علاوه بر آن در مطالعه‌ی یوئن که هندسه‌ای همانند مطالعه حاضر دارد، سه شبکه مورد بررسی قرار گرفت که بیشترین شبکه در آن به اندازه‌ی ۰/۰۳ متر بود اما در مطالعه‌ی حاضر شبکه‌ی مورد استفاده به اندازه‌ی ۰/۰۲ متر بوده که میزان آن از شبکه‌ی مورد استفاده در مطالعه‌ی یوئن بیشتر است.)



شکل ۳. بررسی مقدار در صفحه مرکزی میدان

Fig. 3. deviations at the middle plane of the domain



شکل ۲. بررسی نتایج استقلال حل از شبکه

Fig. 2. Assessment of grid independency

در درون اتاق استفاده شده است و ۵۰۰,۰۰۰ شبکه برای شبیه‌سازی جریان در خارج از اتاق در نظر گرفته شده است.

برای بررسی استقلال از حل شبکه‌ی استفاده شده، در ابتدا شبکه محاسباتی با میزان ۵۰۰,۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد و این تعداد شبکه در چهار مرحله تا میزان ۴,۰۰۰,۰۰۰ سلول افزایش یافت. شکل ۲ نمودار تغییرات دمای متوسط در نزدیکی بازشو را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از ۲,۰۰۰,۰۰۰ به ۴,۰۰۰,۰۰۰ شبکه، تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات دما حاصل نمی‌شود؛ بنابراین میزان شبکه محاسباتی ۲,۰۰۰,۰۰۰ در ادامه محاسبات در نظر گرفته شد.

کیفیت مدل‌سازی در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ وابسته به درصدی از انرژی جنبشی اغتشاشی است که در شبیه‌سازی با این روش به طور مستقیم حل می‌شود. پوپ معتقد است در شبیه‌سازی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، باید حداقل ۸۰ درصد از انرژی جنبشی اغتشاشی به طور مستقیم حل شود. این درصد به نام LES_{IQ} بوده و به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود:

$$LES_{IQ} = \frac{k_{Resolved}}{k_{Total}} = \frac{k_{Resolved}}{k_{Resolved} + k_{SGS}} \quad (23)$$

در رابطه‌ی (۲۳) k_{Total} انرژی جنبشی اغتشاشی کل جریان، $k_{Resolved}$ انرژی جنبشی اغتشاشی حل شده به طور مستقیم و k_{SGS} انرژی جنبشی اغتشاشی در مقیاس زیرشبکه است. انرژی جنبشی

جدول ۱. مقایسه‌ی بین زمان محاسباتی مدل‌های مورد استفاده

Table 1. Comparison of computational time of acquired combustion models

مدل احتراقی	سینتیک	تعداد گونه‌ها	زمان (ساعت)
فلیملت آرام	جی.آر.آی ۳	۵۳ گونه	۱۳۶
اضمحلال گردابه	واکنش برگشت ناپذیر یک-مرحله‌ای $CH_4 + 2O_2 + 7.5N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.5N_2$	۵ گونه	۱۵۶

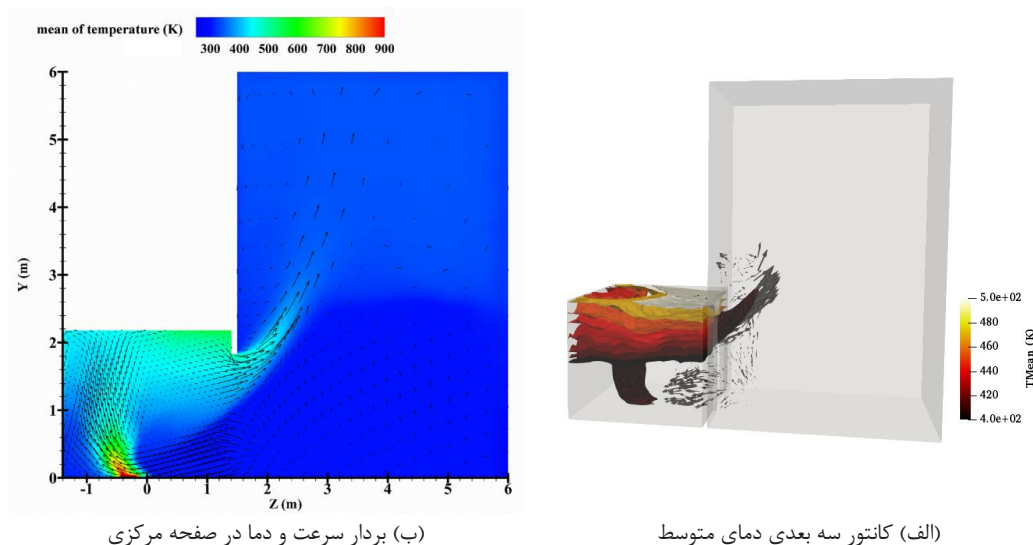
حلگر نوشته شده، ابتدا در قسمت پیش پردازش، معادلات فلیملت را با نرم‌افزار کمکین، با توجه به تعداد کتابخانه‌های مورد نظر حل نموده سپس اثرات اغتشاش را با استفاده از روش تابع چگالی احتمال، بر آن اعمال می‌کند. در این مطالعه از ۱۵ کتابخانه آرام استفاده شد. در مرحله بعد حلگر فلیملت فایرفوم با حل معادلات جریان اغتشاشی، مقادیر اسکالره‌های غیر واکنشی را در میدان حل نموده و با استفاده از آن‌ها جدول مربوطه باز شده و خواص ترموشیمیایی از آن استخراج می‌گردد.

برای شبیه‌سازی از دو میلیون شبکه محاسباتی استفاده شده و با دو مدل احتراقی فلیملت آرام و اضمحلال گردابه حل عددی صورت گرفته است. سینتیک مورد استفاده برای مدل اضمحلال گردابه از نوع یک-مرحله‌ای برگشت ناپذیر بوده و در مدل فلیملت آرام از سینتیک جی.آر.آی ۳ (۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. کامپیوتر مورد استفاده برای شبیه‌سازی دارای ۱۶ هسته با فرکانس ۳/۴ گیگاهرتزی و حافظه موقت ۱۶ گیگابایتی است. شبیه‌سازی‌ها به مدت ۱۳۰ ثانیه انجام گرفته و نتایج در ۲۰ ثانیه پایانی، با رسیدن به حالت شبه پایدار متوسط‌گیری شده است. جدول ۱ به تفکیک هر مدل، مقایسه‌ای از مدت زمان انجام محاسبات با استفاده از این مدل‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱ شبیه‌سازی با استفاده از مدل فلیملت آرام نسبت به مدل اضمحلال گردابه، به مدت ۲۰ ساعت (حدود ۱۵ درصد) از زمان محاسباتی شبیه‌سازی کاسته است. همان‌طور که اشاره شد، کاهش زمان محاسباتی در مدل

شکل ۳، توزیع LES_{10} را در صفحه مرکزی برای سلول محاسباتی با استفاده از مدل یک-معادله‌ای نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در بیشتر نقاط میدان محاسباتی، این نسبت بیش از ۰/۸ است. این نتیجه نشان‌دهنده اندازه مناسب سلول محاسباتی است.

۴-۲- روش حل عددی

برای حل عددی جریان از کد این‌فوم استفاده شده است؛ این‌فوم ابزاری است که با استفاده از قابلیت شیء‌گرایی زبان سی پلاس پلاس به‌صورت مجموعه کتابخانه‌هایی نوشته شده است و به دلیل متن باز بودن آن قابلیت تغییرات در کد مرجع برای کاربران فراهم است. در مطالعه حاضر، برای شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل احتراقی اضمحلال گردابه، از حلگر فایرفوم، استفاده شده است؛ اما برای استفاده از مدل فلیملت حلگر دیگری توسعه و ایجاد شد.



(ب) بردار سرعت و دما در صفحه مرکزی

(الف) کانتور سه بعدی دمای متوسط

شکل ۴. بررسی بردار سرعت در باز شو و کانتور دما

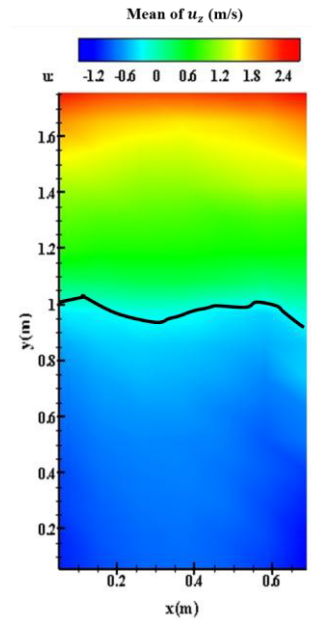
Fig. 4. Temperature contour and velocity vectors in the compartment

۵- نتایج و بحث

۱- بررسی فیزیک آتش در فضای بسته

آتش‌سوزی در فضای بسته به دلیل وجود اثر مرزهای جامد و بازشوها دارای رژیم متفاوتی است. گرمای آزادشده در این سناریو، به‌وسیله‌ی سازوکارهای انتقال حرارت جابجایی، هدایت و تشعشع به سیالات اطراف منتقل شده و موجب ایجاد جریانی عموماً اگتاشاشی رو به بالا به‌واسطه‌ی نیروی شناوری می‌گردد. سقف اتاق موجب انباشته شدن محصولات احتراق ناشی از آتش‌سوزی در لایه‌ای گرم زیر سقف اتاق می‌شود. به دلیل اختلاف فشار اتاق آتش‌سوزی با فضای بیرون، هوای تازه از ناحیه پایین بازشو وارد می‌شود. جریان هوای داغ نیز از بالای بازشو از اتاق خارج می‌شود. ناحیه‌ای که مرز مشترک بین لایه‌ی هوای گرم و سرد را شامل می‌شود صفحه‌ی خنثی می‌نامند. تخمین ارتفاع صفحه خنثی کمک می‌کند تا آتش‌نشانان از ارتفاع ایمن برای ورود به اتاق آگاه شوند.

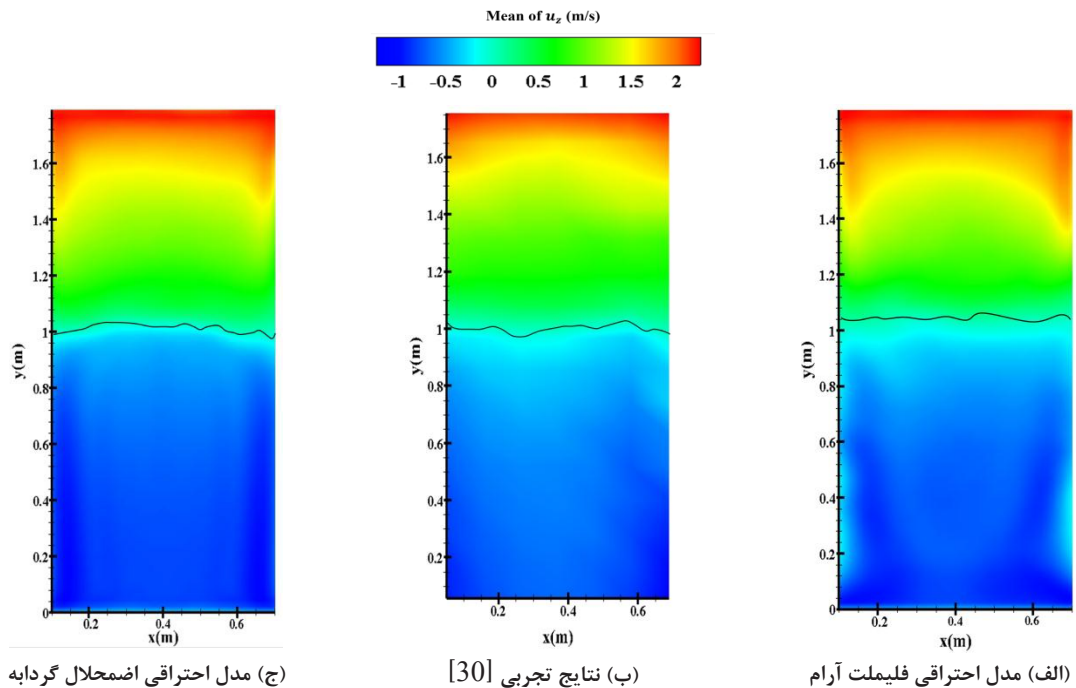
شکل ۴ بردار سرعت در درب ورودی به اتاق را نشان می‌دهد و در درون اتاق کانتور دمای متوسط رسم شده است. در شکل ۴ (الف) این کانتور به‌صورت سه بعدی رسم شد و در شکل ۴ (ب) کانتور دمای متوسط در صفحه‌ی مرکزی رسم شد تا بردار سرعت در میدان نمایش داده شود. با توجه به این دو کانتور نیمه‌ی بالایی اتاق به‌وسیله‌ی



شکل ۵. کانتور نتایج تجربی [۳۰] سرعت در بازشو

Fig. 5. Velocity contour of experimental results at the doorway

فلیمت حتی با استفاده از سینتیکی کامل‌تر، برتری این مدل احتراقی بر مدل اضمحلال گردابه است که در جریان‌های واکنشی دیگر هم قابل مشاهده است [۳۳، ۳۴].



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج تجربی و حل عددی سرعت متوسط در بازشو

Fig. 6. Comparison of averaged velocity contour at the doorway for the numerical and experimental results

جدول ۲. مقایسه کمیت‌های ماکروسکوپی و خطای نسبی آن‌ها
Table 2. Comparison of the value and relative error for macroscopic parameters

مدل احتراقی	دبی ورودی (kg/s)		دبی خروجی (kg/s)		ارتفاع صفحه خنثی (m)	
	مقدار	خطا	مقدار	خطا	مقدار	خطا
آزمون استکلر [۳۰]	۰/۵۵۳	-	۰/۵۶۷	-	۱/۰۳	-
فلیمنت آرام	۰/۵۱۶	۶/۷٪	۰/۵۱۴	۹/۳٪	۱/۰۵	۲/۳٪
اضمحلال گردابه	۰/۵۴۷	۱/۱٪	۰/۵۵	۳٪	۱/۰۱	۱/۵٪

هوای گرم اشغال شده است و در لایه‌ی پایینی هوا سرد قرار دارد. هوای ورودی به اتاق آتش، به سمت شعله حرکت کرده و به جریان تشکیل شده در بالای 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. از طرفی می‌توان ورود هوا به اتاق از قسمت پایینی در و خروج هوای گرم از قسمت بالایی آن را با استفاده از بردارهای سرعت رسم شده در شکل ۴ مشاهده کرد. برای پیدا کردن صفحه خنثی، کانتور سرعت در باز شو در شکل ۵ رسم شد.

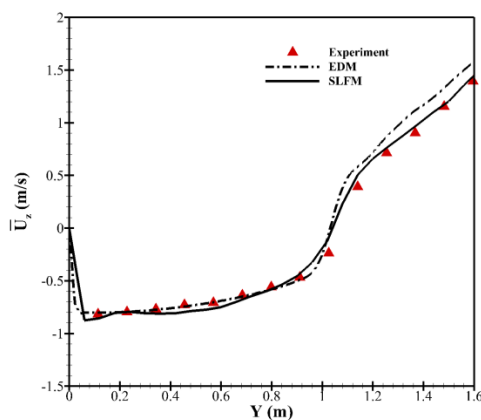
با توجه به شکل ۵، در ارتفاعی از باز شو که سرعت صفر گردد بین ورود و خروج هوا تعادل برقرار شده و صفحه‌ی خنثی در آن ارتفاع واقع شده است. برای نمایش این ارتفاع خطی سیاه رنگ، بر کانتور

سرعت به دست آمده از داده‌های تجربی استکلر [۳۰] در باز شو رسم شده است. با توجه به نحوه‌ی جایگذاری ترموکوپل‌ها در آزمون استکلر و همکاران [۳۰] کانتور شکل ۵ در راستای عرض از هر در به میزان ۰/۱ متر فاصله دارد. نتایج تجربی [۳۰] ارتفاع ۱/۰۳ متر را برای صفحه‌ی خنثی گزارش می‌کند.

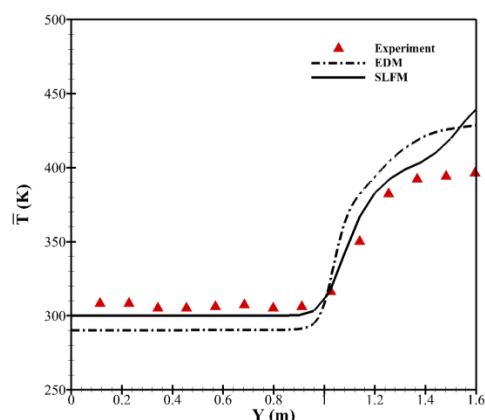
۵-۲- صحت سنجی و مقایسه نتایج تغییرات دما و سرعت در باز شو

شبیه‌سازی مطالعه حاضر، با استفاده از مدل‌های احتراقی فلیمنت آرام و اضمحلال گردابه انجام شده است. نتایج تجربی در باز شو برای دما و سرعت و در داخل اتاق دما، گزارش شده است. شکل ۶، مقایسه‌ی کانتور سرعت متوسط در باز شو را برای شبیه‌سازی انجام شده و نتایج تجربی، نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌گردد که سرعت متوسط در باز شو، تطابق خوبی با نتایج تجربی داراست.

در ادامه برخی از پارامترهای ماکروسکوپی مقایسه می‌شود. یکی از این پارامترها، صفحه خنثی می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد؛ صفحه خنثی، مکان هندسی نقاطی در مقطع باز شو 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. با توجه به شکل ۶ صفحه خنثی روی کانتور سرعت رسم شد. با توجه به شکل ۶، محل صفحه‌ی خنثی در شبیه‌سازی‌های انجام شده تطابق خوبی با نتایج



(ب) سرعت متوسط



(الف) دمای متوسط

شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج تجربی و حل عددی دما و سرعت متوسط در باز شو

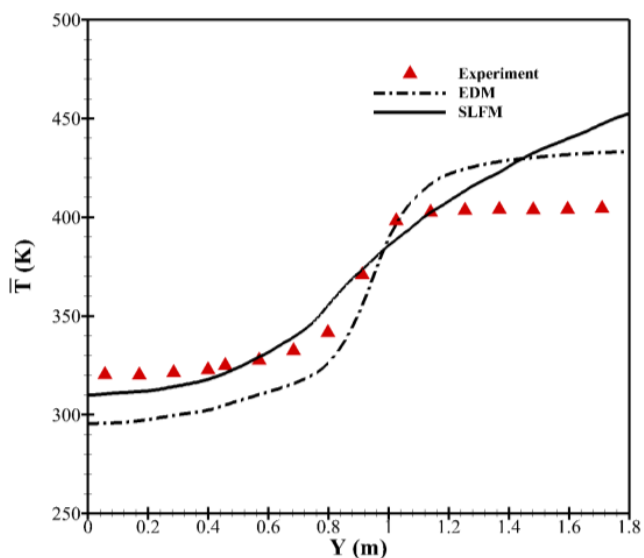
Fig. 7. Comparison of numerical and experimental results for the averaged velocity and temperature at the doorway

نیمه‌ی بالایی بازشو کمی بیشتر از نتایج تجربی پیش‌بینی شده است. این موضوع می‌تواند ناشی از ماهیت دو مدل احتراقی استفاده شده در فرض شیمی بسیار سریع برای مدل‌سازی احتراق باشد.

با توجه به شکل ۷ (الف) تا ارتفاع ۱/۴ متری مدل فلیملت روند بهتری نسبت به مدل اضمحلال گردابه دارد اما با افزایش بیشتر ارتفاع شاهد افزایش دمای پیش‌بینی شده در مدل فلیملت هستیم؛ اما در مورد مدل اضمحلال گردابه، با افزایش ارتفاع تغییرات دما کاهش می‌یابد و دما به مقدار ثابتی می‌رسد. با توجه به شرط مرزی معادله انرژی در نزدیکی دیواره انتظار می‌رود که دما همین گونه نیز تغییر کند؛ اما در مدل فلیملت به دلیل حل نشدن معادله انرژی، دما از کتابخانه فلیملت به دست می‌آید که می‌تواند از مشکلات بهره‌گیری از این مدل به این صورت باشد. ممکن است اگر در استفاده از مدل فلیملت به‌گونه‌ای عمل کرد که معادله‌ی انرژی حل گردد؛ این موضوع باعث افزایش دقت مدل فلیملت در نزدیکی دیواره گردد.

شکل ۸ نتایج مربوط به تغییرات دمای متوسط در اتاق را نشان می‌دهد. با توجه به فیزیک جریان لایه‌ی هوای گرم در نیمه‌ی بالایی اتاق و هوای سرد در نیمه‌ی پایین آن قرار خواهد گرفت. با توجه به شکل ۸، هر دو مدل در پیش‌بینی روند تغییرات دما در اتاق به خوبی عمل کردند. مقدار خطای نسبی متوسط در پیش‌بینی دما برای مدل فلیملت آرام، ۳/۲ درصد و برای مدل اضمحلال ۵/۲ درصد است.

در جدول ۳ مقایسه‌ی بین مقدار درصد خطای نسبی حل عددی



شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج تجربی و حل عددی دمای متوسط در اتاق
 Fig. 8. Comparison of numerical and experimental results for the average temperature in the room

جدول ۳. درصد خطای نسبی مربوط به نتایج عددی در مدل‌های مختلف
 Table 3. Relative error of different combustion models

مقطع و پارامتر مورد بررسی	مدل فلیملت آرام	مدل اضمحلال گردابه
سرعت متوسط در بازشو	۸٪	۱۴/۸٪
دمای متوسط در بازشو	۳/۳٪	۶/۱٪
دمای متوسط در اتاق	۳/۲٪	۵/۲٪

تجربی دارد. جدول ۲ نشان می‌دهد که با استفاده از مدل فلیملت آرام، ارتفاع صفحه‌ی خنثی، ۱/۰۵ متر به دست می‌آید که دارای اختلاف ۲/۳ درصد با نتایج تجربی است. علاوه بر مدل فلیملت آرام، مدل اضمحلال گردابه نیز در پیش‌بینی ارتفاع صفحه خنثی به خوبی و با دقت ۱/۵ درصد عمل می‌کند.

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 (۲۴) محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_{inlet} = \int_A \bar{\rho} u_{ave} dA \quad (24)$$

جدول ۲ مقایسه دبی هوای ورودی و خروجی مدل‌های احتراقی مورد بررسی در این مطالعه را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. به‌طور کلی نتایج هر دو مدل همخوانی قابل قبولی با نتایج تجربی دارد؛ اما مدل اضمحلال گردابه با خطای نسبی ۱/۱ درصد در پیش‌بینی دبی هوای ورودی و ۳ درصد در پیش‌بینی دبی هوای خروجی، دقت بهتری در تعیین دبی هوا دارد.

برای مقایسه‌ی دقیق‌تر نتایج حل عددی و تجربی سرعت و دمای متوسط در مرکز بازشو با یکدیگر مقایسه خواهند شد. با توجه به شکل ۷ با افزایش ارتفاع بازشو دمای هوا افزایش می‌یابد و جهت سرعت تغییر می‌کند. تا ارتفاع ۱ متری بازشو، علامت سرعت منفی بوده که بیانگر کشیده شدن هوا به درون اتاق است. با افزایش ارتفاع علامت سرعت مثبت شده و مقدار آن افزایش می‌یابد؛ که این موضوع به دلیل خروج گازهای حاصل از احتراق از نیمه‌ی بالایی بازشو است. با توجه به شکل ۷ سرعت متوسط پیش‌بینی شده در بازشو با هر دو مدل، تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. از طرفی دمای متوسط نیز در

اتاقی در مقایسه با مدل اضمحلال گردابه، مدل بهتری خواهد بود.

۷- منابع

- [1] V. Novozhilov, Computational fluid dynamics modeling of compartment fires, *Progress in Energy and Combustion science*, 27(6) (2001) 611-666.
- [2] S. Hostikka, K.B. McGrattan, Large eddy simulation of wood combustion, in: *Proceedings of the Ninth International Interflam Conference*, 2001, pp. 755-762.
- [3] 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.
- [4] G. Maragkos, B. Merci, Large Eddy simulations of CH₄ fire plumes, *Flow, Turbulence and Combustion*, 99(1) (2017) 239-278.
- [5] G. Maragkos, T. Beji, B. Merci, Towards predictive simulations of gaseous pool fires, *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3) (2019) 3927-3934.
- [6] E.J. Weckman, A.B. Strong, Experimental investigation of the turbulence structure of medium-scale methanol pool fires, *Combustion and Flame*, 105(3) (1996) 245-266.
- [7] J.X. Wen, L.Y. Huang, J. Roberts, The effect of microscopic and global radiative heat exchange on the field predictions of compartment fires, *Fire Safety Journal*, 36(3) (2001) 205-223.
- [8] R. Rawat, H. Pitsch, J. Ripoll, Large-eddy simulation of pool fires with detailed chemistry using an unsteady flamelet model, *CTR Proc*, (2002) 357-367.
- [9] S. Tieszen, T. O'hern, R. Schefer, E. Weckman, T. Blanchat, Experimental study of the flow field in and around a one meter diameter methane fire, *Combustion and Flame*, 129(4) (2002) 378-391.
- [10] P.E. DESJARDIN, Modeling of conditional dissipation rate for flamelet models with application to large eddy simulation of fire plumes, *Combustion science and technology*, 177(10) (2005) 1883-1916.

از نمودارهای سرعت و دما در مقاطع گزارش شده با نتایج تجربی ارائه شد. به‌طور کلی مدل فلیملت آرام با درصد خطای نسبی کمتری نسبت به مدل اضمحلال گردابه دما و سرعت در جریان را پیش‌بینی می‌کند.

۶- جمع‌بندی

مطالعه‌ی مقایسه‌ای میان مدل‌های احتراقی فلیملت آرام و مدل اضمحلال گردابه برای انتخاب مدل احتراقی سازگار با فیزیک جریان آتش در ساختمان یک-اتاقی با مدل اغتشاشی زیر شبکه یک-معادله‌ای انجام شد. برای استفاده از مدل فلیملت آرام پایا با استفاده کتابخانه‌های اپن‌فوم و زبان برنامه‌نویسی سی پلاس پلاس حلگری به این نرم‌افزار اضافه شد. برای مقایسه‌ی دو مدل، تغییرات دما و سرعت متوسط در بازشو با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل فلیملت آرام پایا در پیش‌بینی سرعت متوسط در بازشو برای جریان آتش در فضای تک-اتاقی، با اختلاف ۸ درصد و مدل اضمحلال گردابه با اختلاف ۱۴/۸ درصد نسبت به نتایج تجربی عمل می‌کند. این برتری مدل فلیملت برای هندسه‌ی حاضر، در پیش‌بینی دما نیز تکرار شده است. از طرفی با مقایسه‌ی تغییرات دما در درون اتاق نیز می‌توان مشاهده کرد که هر دو مدل با دقت خوبی به نتایج تجربی نزدیک هستند؛ اما مدل فلیملت علاوه بر زمان محاسباتی کمتر، با خطای نسبی کمتری دما را پیش‌بینی کرده است؛ اما مقایسه‌ی کمیت‌های ماکروسکوپی جریان القایی ناشی از آتش در بازشوی فضای تک-اتاقی، مانند ارتفاع صفحه خنثی، میزان دبی خروجی و ورودی از بازشو، برتری مدل اضمحلال گردابه را پیش‌بینی این کمیت‌ها نشان می‌دهد. دبی جریان ورودی از بازشو در مدل اضمحلال گردابه با خطای نسبی ۱/۱ درصد و برای مدل فلیملت آرام پایا با خطای نسبی ۶/۷ درصد نسبت به نتایج تجربی عمل می‌کند. دبی خروجی از بازشو نیز در هندسه‌ی حاضر، برای مدل اضمحلال گردابه با خطای نسبی ۳ درصد و برای مدل فلیملت آرام پایا با خطای نسبی ۹/۳ درصد عمل می‌کند؛ که نشان از برتری مدل اضمحلال گردابه در پیش‌بینی این کمیت‌های ماکروسکوپی برای جریان القایی ناشی از آتش در فضای تک-اتاقی دارد؛ بنابراین با توجه به این‌که پیش‌بینی میدان دما و سرعت از اهمیت بالایی برخوردار است، مدل فلیملت آرام پایا در کل برای شبیه‌سازی جریان آتش در فضای تک-

- Modifications to the Eddy Dissipation Concept (EDC), *Combustion Science and Technology*, (2019) 1-29.
- [20] N. Peters, Laminar flamelet concepts in turbulent combustion, in: *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1988, pp. 1231-1250.
- [21] N. Peters, Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion, *Progress in energy and combustion science*, 10(3) (1984) 319-339.
- [22] R. Design, CHEMKIN Tutorials Manual CHEMKIN® Software. 10112/15112, in, December, 2017.
- [23] N. Peters, *Turbulent combustion*, Cambridge university press, 2000.
- [24] C.D. Pierce, P. Moin, Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion, *Journal of fluid Mechanics*, 504 (2004) 73-97.
- [25] H. Müller, M. Pfitzner, Implementation of a Steady Laminar Flamelet Model for non-premixed combustion in LES and RANS simulations, in: *8th International OpenFOAM Workshop*, 2013, pp. 1-12.
- [26] B.A. Perry, M.E. Mueller, A.R. Masri, A two mixture fraction flamelet model for large eddy simulation of turbulent flames with inhomogeneous inlets, *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(2) (2017) 1767-1775.
- [27] W. Han, A. Scholtissek, C. Hasse, The role of tangential diffusion in evaluating the performance of flamelet models, *Proceedings of the Combustion Institute*, (2018).
- [28] A. Yuen, G. Yeoh, V. Timchenko, T. Barber, LES and multi-step chemical reaction in compartment fires, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 68(7) (2015) 711-736.
- [29] C. Jiménez, F. Ducros, B. Cuenot, B. Bédard, Subgrid scale variance and dissipation of a scalar field in large eddy simulations, *Physics of Fluids*, [11] P.E. DesJardin, T.J. O'Hern, S.R. Tieszen, Large eddy simulation and experimental measurements of the near-field of a large turbulent helium plume, *Physics of Fluids*, 16(6) (2004) 1866-1883.
- [12] V. Minh Le, A. Marchand, S. Verma, R. Xu, J. White, A. Marshall, T. Rogaume, F. Richard, J. Luche, A. Trouve, Simulations of a turbulent line fire with a steady flamelet combustion model coupled with models for non-local and local gas radiation effects, *Fire Safety Journal*, 106 (2019).
- [13] A. Yuen, G. Yeoh, V. Timchenko, S. Cheung, T. 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.
- [14] 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: Applications*, 69(11) (2016) 1223-1241.
- [15] A.C. Yuen, G.H. Yeoh, V. Timchenko, S.C. Cheung, Q.N. Chan, T. Chen, On the influences of key modelling constants of large eddy simulations for large-scale compartment fires predictions, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 31(6-8) (2017) 324-337.
- [16] H. Pasharshahi, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, Comparison of Turbulence Sub-Grid Scale Model for Modeling of Large Scale Pool Fire Using LES, *Energy: Engineering & Management*, 3(1) (2013) 52-61 (in Persian).
- [17] J.W. Deardorff, A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 41(2) (1970) 453-480.
- [18] S.B. Pope, *Turbulent flows*, in, IOP Publishing, 2001.
- [19] I.S. Ertesvåg, *Analysis of Some Recently Proposed*

- 38.
- [33] M. Landfahner, C. Schluckner, R. Prieler, H. Gerhardtter, T. Zmek, J. Klarner, C. Hochenauer, Development and application of a numerically efficient model describing a rotary hearth furnace using CFD, *Energy*, 180 (2019) 79-89.
- [34] M. Buchmayr, J. Gruber, M. Hargassner, C. Hochenauer, Performance analysis of a steady flamelet model for the use in small-scale biomass combustion under extreme air-staged conditions, *Journal of the Energy Institute*, 91(4) (2018) 534-548.
- 13(6) (2001) 1748-1754.
- [30] K.D. Steckler, J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen, Flow induced by fire in a compartment, *Symposium (International) on Combustion*, 19(1) (1982) 913-920.
- [31] J. Floyd, H. Baum, K. McGrattan, A mixture fraction combustion model for fire simulation using CFD, in: *Proceedings of the International Conference on Engineered Fire Protection Design*, Society of Fire Protection Engineers, 2001, pp. 279-290.
- [32] G. Maragkos, T. Beji, B. Merci, Advances in modelling in CFD simulations of turbulent gaseous pool fires, *Combustion and Flame*, 181 (2017) 22-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

S. M. J. Razeghi, M. Safarzadeh, H. Pasharshahri, *Comparison Study of Compartment Fire Simulation with Steady Laminar Flamelet and Eddy Dissipation Model*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(5) (2021) 2953-2966.

DOI: [10.22060/mej.2020.17303.6568](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17303.6568)

