

بررسی دقت مدل‌های زیرشبکه در مدل‌سازی آتش چرخان درونی توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

محمد صفرزاده^۱، قاسم حیدری‌نژاد^۲ و هادی پاسدارشهری^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، m.safarzadeh@modares.ac.ir

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

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، pasdar@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۰۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۰۲/۰۴، پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۲)

چکیده: در این مقاله، آتش چرخشی با سوخت متانول در یک اتاق با ارتفاع زیاد، که یک شکاف در یک گوشه آن ایجاد شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مدل زیرشبکه اسمگورینسکی، ویل و تک‌معادله‌ای و مدل احتراقی اضمحلال گردابه انجام شده و نتایج در دو شرایط مختلف (بستر سوخت با قطر ۵/۸ و ۷ سانتی‌متر) با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. با مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی مشاهده می‌شود که نتایج عددی دمای متوسط در وسط و گوشه اتاق با نتایج تجربی همخوانی دارد. نتایج مدل‌های مختلف زیرشبکه در خط مرکزی نشان می‌دهد که مدل ویل با نتایج تجربی همخوانی بهتری دارد. همچنین عملکرد دو مدل زیرشبکه تک‌معادله‌ای و اسمگورینسکی بدتر از مدل ویل بوده است، به طوری که به طور متوسط درصد خطای نسبی مدل ویل ۷/۳ درصد است، در حالی که هر یک از مدل‌های اسمگورینسکی و تک‌معادله‌ای به ترتیب ۸ و ۸/۹ درصد خطا نسبت به نتایج تجربی دارند. در فواصل دور از مرکز نتایج سه مدل زیرشبکه تفاوت چندانی ندارد و همخوانی بیشتری با نتایج تجربی دیده می‌شود، به گونه‌ای که در گوشه اتاق خطای نسبی کمتر از ۸ درصد است.

کلیدواژگان: آتش چرخان، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مدل زیرشبکه ویل، اسمگورینسکی، تک‌معادله‌ای.

مقدمه

آتش چرخان^۱، در مقایسه با آتشی که در معرض چرخش نباشد، ارتفاع، دما و نرخ مصرف سوخت بالاتری دارد. از این رو این سناریو یکی از پرخطرترین سناریوهای آتش‌سوزی است. آتش چرخان عموماً از برهمکنش جریان باد خارجی با آتش اتفاق می‌افتد و در شکل‌های مختلف نمایان می‌شود از جمله آتش چرخان در جنگل، در پشت یک جسم در معرض باد و یا حتی در یک آتش‌ال‌شکل [۱]. در حالت کلی، آتش چرخان به دو حالت کلی آتش چرخان بیرونی و درونی تقسیم می‌شود.

در آتش چرخان درونی، عموماً یک آتش در یک محیط محبوس قرار دارد که از کنج این فضای محبوس هوا مکیده می‌شود [۲] و این ورودی هوا سبب چرخش آتش می‌شود. معمولاً، آتش چرخان درونی در اتاق‌های با ارتفاع زیاد ایجاد می‌شود. از آنجا که در این سناریو ارتفاع و دمای شعله زیاد است، می‌تواند صدمات جدی برای محیط اطراف داشته باشد. زو و چو [۳] با انتخاب یک اتاق با ارتفاع ۹ متر و ایجاد یک فاصله در گوشه‌ای از یکی از دیواره‌ها، آتش چرخشی را ایجاد کردند. در این

1. Fire Whirl

تحقیق تجربی، تأثیر فواصل مختلف شکاف (مکش هوا) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که برای مواقعی که فاصله زیاد و یا کم باشد آتش چرخشی با شدت زیاد ایجاد نمی‌شود.

گام و همکاران [۴] سوخت مایع را انتخاب کرده و آتش چرخشی را بررسی کردند. آن‌ها آتش چرخشی را در پنج مرحله تقسیم کردند. مرحله اول شبیه به آتش در محیط آزاد است. مرحله دوم نرخ مصرف سوخت زیادتر می‌شود. در مرحله سوم، به تدریج آتش چرخشی شروع می‌شود. در مرحله چهارم، آتش چرخشی به حالت شبه پایدار می‌رسد و در مرحله آخر (پنجم) به تدریج آتش رو به اضمحلال می‌رود. هوا و همکاران [۵] آتش چرخشی درونی را برای سوخت متانول، اتانول، گازولین و پروپانول به صورت تجربی انجام دادند. آن‌ها اشاره کردند که نوع سوخت مورد بررسی در شروع مکانیزم آتش چرخشی تأثیری نخواهد داشت. با این حال طول شعله برای سوخت‌های مختلف، متفاوت خواهد بود.

علاوه بر تحقیقات تجربی، مطالعاتی نیز به صورت عددی در زمینه مدل‌سازی آتش چرخان داخلی انجام شده است. لی و همکاران [۶]، با استفاده از معادلات شبه پایدار تقارن محوری، آتش چرخان را مدل‌سازی کردند. در این تحقیق اشاره می‌شود که سرعت عمودی در راستای خط مرکزی به هر دو نیروی شناوری و تفاضل فشار در راستای عمودی وابسته است و همچنین مکش هوا با معکوس عدد ریچاردسون متناسب است. ساساکی و همکاران [۷] آتش چرخان پشت یک جسم ال‌شکل را که در معرض باد قرار دارد، مورد بررسی قرار دادند. عبور باد از جسم ال‌شکل سبب می‌شود که یک جریان چرخشی پشت این جسم شکل گیرد و به تبع آن آتش که در این جریان چرخشی قرار می‌گیرد نیز تشکیل آتش چرخشی می‌دهد. در این مطالعه عدد فرود یک پارامتر کلیدی است و مقدار سرعت بحرانی هم با مجذور قطر بستر سوخت متناسب است.

یوان و همکاران [۸] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ آتش چرخانی را در فضای محبوس مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، تأثیر مستقیم تشعشع بر میزان مصرف سوخت مایع مورد بررسی قرار گرفت و میدان دما و سرعت بررسی شد. آن‌ها بیان کردند که مدل استفاده شده در نرم‌افزار FDS (نرم‌افزار تخصصی شبیه‌سازی آتش) برای بخارشدن سوخت دقت کافی را به نسبت نتایج تجربی دارد، اگرچه به طور کامل با نتایج تجربی مطابقت ندارد. همچنین مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ قادر به مدل‌سازی میدان دما در آتش چرخان است.

چو و همکاران [۹] یک آتش چرخان داخلی در یک محفظه عمودی و محیط بسته با تهویه مناسب را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استفاده شد و آن‌گونه که در این تحقیق گزارش شده است ارتفاع شعله آتش چرخان داخلی، با افزایش میزان جرم ورودی سوخت، افزایش می‌یابد. پارت و همکاران [۱۰] آتش چرخان با مقیاس آزمایشگاهی را بررسی کردند. مدل اغتشاشی مورد استفاده متوسط‌گیری استوکس^۱ و مدل احتراقی شکست گردابه^۲ بود.

پاسدار شهری و همکاران [۱۱]، با استفاده از مدل احتراقی شیمی بسیار سریع، مدل‌سازی آتش استخری با مدل‌های زیرشبکه اسمانگورینسکی و تک‌معادله‌ای ساده در مقیاس بزرگ را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده شد که مدل تک‌معادله‌ای و اسمانگورینسکی میزان تغییرات سرعت عمودی را به ترتیب، با ۷ و ۱۲ درصد اختلاف نسبت به نتایج تجربی، تخمین می‌زنند. یوان و همکاران [۱۲]، با استفاده از مدل احتراقی فلیملت آرام، سه مدل زیرشبکه‌های اسمانگورینسکی، گرانروی گردابه تعدیل‌شده برای دیواره^۳ و ورم^۴ را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در مدل گرانروی گردابه تعدیل‌شده برای دیواره، زیرشبکه سازگارتر با روش فلیملت است.

متانول محصول بسیار مهم صنایع شیمیایی است. این سوخت در صنایعی نظیر چسب‌های صنعتی، انواع حلال‌ها و ضدیخ و همچنین سوخت پاک در موتور احتراق داخلی کاربرد دارد. از این رو، ضرورت ذخیره و استفاده از این سوخت در مخازن

1. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)
2. Eddy Break-Up (EBU)
3. Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (WALE)
4. Verman

ضروری به نظر می‌رسد. یکی از سناریوهای محتمل نیز آتش چرخان بر این سوخت است که ایمنی مخازن نگهداری این سوخت یکی از ضروریات صنایع پتروشیمی است. بنابراین، در این مقاله با انتخاب این سوخت، سناریوی آتش چرخان توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بررسی می‌شود.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، تعیین مدل زیرشبکه است. با توجه به تحقیقات پیشین، خلأ بررسی مدل زیرشبکه سازگار با فیزیک آتش چرخان در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مشاهده می‌شود. از این رو در این مقاله اتاقی با یک ورودی هوا از گوشه اتاق که باعث ایجاد یک چرخش در آتش می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، آتش چرخشی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مدل‌های مختلف زیرشبکه با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. به این منظور آتش چرخشی در دو حالت با قطر دبی سوخت ورودی ۵/۸ و ۷ سانتی‌متر مطالعه می‌شود و نتایج دما در خط مرکزی و گوشه اتاق بررسی می‌شود (از آنجا که آتش چرخان برخلاف حالت غیرچرخان از محور مرکزی منحرف می‌شود، لذا نیاز به بررسی در خط مرکزی و گوشه‌های اتاق است که در این تحقیق در هر دو مقطع نتایج بررسی می‌شود) و در نهایت تحلیلی از میدان سرعت و نوسانات آن انجام می‌شود. نوآوری این مطالعه در بررسی دقت روش‌های زیرشبکه مختلف در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ سناریوی آتش چرخان است، تا به این ترتیب بتوان مدل زیرشبکه‌ای با دقت بالا در سناریوهای کاربردی و جدید آتش‌سوزی پیشنهاد داد. از این رو سوخت متانول و سناریوی آتش چرخان، که هر دو جدید بوده و مطالعات اندکی در این موارد انجام شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

معادلات حاکم

مدل $k-\epsilon$ با استفاده از متوسط‌گیری زمانی، اکثر نوسانات زمانی موجود در میدان اصلی جریان را متوسط می‌گیرد و آن‌ها را از بین می‌برد، اما در مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با فیلترگیری مکانی، بسیاری از نوسانات و گردابه‌هایی در اندازه ابعاد فیلتر را به‌طور مستقیم مدل می‌کند. بنابراین، علی‌رغم زمانی محاسباتی کم مدل $k-\epsilon$ در مدل‌سازی آتش که ماهیتی نوسانی دارد، استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ توصیه می‌شود. از این رو، در شبیه‌سازی آتش ابتدا از معادلات $k-\epsilon$ برای مدل‌سازی اغتشاش استفاده می‌شد، اما به مرور زمان و با پیشرفت حافظه و سرعت کامپیوترها توجه به سمت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نیز معطوف شده است. مک‌گراتان [۱۳] اولین مطالعه در زمینه استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در شبیه‌سازی آتش در فضای باز و بسته را انجام داد. البته در شرایط کنونی روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ یک مدل اغتشاشی مناسب، به‌منظور مدل‌سازی اغتشاش در حریق، به‌شمار می‌رود.

آتش یک جریان احتراقی غیرپیش‌آمیخته است. با استفاده از روش فیلترگیری فاور، می‌توان معادلات مربوطه جریان واکنشی نظیر پیوستگی، تکانه، انرژی، بقای گونه‌ها را فیلترگیری و در شبیه‌سازی استفاده کرد که در این صورت معادلات انتقال مورد نیاز برای مدل‌سازی احتراق به‌صورت روابط (۱) تا (۴) می‌شود [۱۴].

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

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

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

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

در این روابط ρ چگالی مخلوط، u_i سرعت، p فشار و T دماست. همچنین، φ نشان دهنده هر کمیت اسکالر در جریان (نظیر جزءمولی محصولات) و ω_r نرخ حرارت تولیدشده در اثر احتراق است. عبارات δ_{ij} و δ_{ij} نیز نرخ انتقال حرارت تابشی و ترم تولید در معادلات انرژی و کمیت اسکالرنده. در معادلات (۲) تا (۴) تانسور تنش‌های گرانیوی، بردار شار حرارتی و شار جرمی که با استفاده از قوانین نیوتن، فوریه و فیک [۱۲] مدل‌سازی می‌شوند و $\bar{\tau}_{u_i u_j}$ ، $\bar{\tau}_{u_i T}$ و $\bar{\tau}_{u_i \varphi}$ به ترتیب تنش‌های اغتشاشی گرانیوی، شار حرارتی و جرمی‌اند که توسط روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌شوند.

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

$$\bar{\tau}_{u_i T} = - \frac{\mu_t^{sgs} C_p}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\bar{q}_\varphi = - \frac{\mu_t^{sgs}}{Sc_t} \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x_i} \quad (7)$$

و Pr_t و Sc_t به ترتیب عدد پراختل و اشمیت اغتشاشی‌اند.

مدل زیرشبکه اسماگورینسکی

مدل زیرشبکه‌ای که بیش از دیگر مدل‌ها مورد استقبال قرار گرفته مدل اسماگورینسکی ثابت است که به‌کارگیری این مدل به نسبت سایر مدل‌ها خیلی ساده‌تر است [۱۵]. در این مدل تنش زیرشبکه اغتشاشی در معادله انتقال تکانه توسط روابط (۸) تا (۱۰) ارائه می‌شود.

$$\mu_t^{sgs} = \bar{\rho} C_s \Delta^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (8)$$

$$|\tilde{S}_{ij}| = (2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij})^{1/2} \quad (9)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (10)$$

C_s ضریب ثابت اسماگورینسکی است که می‌تواند مقداری بین ۰/۰۶۵-۰/۲ داشته باشد [۱۶]. مقدار این ضریب، همچون نتایج یوان و همکارانش [۱۷]، ۰/۲ انتخاب شد.

مدل زیرشبکه تک‌معادله‌ای

این مدل زیرشبکه در سناریوی آتش استخری، آتش در ساختمان و آتش در کنار دیوار دقت مناسبی دارد. از این رو می‌توان از این مدل زیرشبکه در شبیه‌سازی آتش چرخان نیز استفاده کرد. در این مدل، طبق روابط (۱۱) تا (۱۵)، معادله انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاشی حل می‌شود و مقدار گرانیوی گردابه‌ای با توجه به انرژی جنبشی اغتشاشی تعیین می‌شود [۱۱].

$$\mu_t^{sgs} = \bar{\rho} C_\Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} k_{sgs})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i k_{sgs})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} C_{\alpha k} \Delta \sqrt{k_{sgs}} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} \right) + P_{k_{sgs}} - D_{k_{sgs}} + B_{k_{sgs}} \quad (12)$$

$$P_{k_{sgs}} = -\tau_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (13)$$

$$D_{k_{sgs}} = C_* \frac{\bar{\rho} k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (14)$$

$$B_{k_{sgs}} = -\frac{C}{\sigma_\rho} \Delta \sqrt{k_{sgs}} \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} \cdot g_j \right) \quad (15)$$

در معادلات مربوط به مدل زیر شبکه تک معادله ای ضریب C معمولاً 0.069 ، $C_{\alpha k} = C / \sigma_k$ و مابقی ضرایب مقدار یک است [۱۱].

مدل زیر شبکه ویل

مدل زیر شبکه دیگری که توسط نیکودز و دوکروس ارائه شد مدل زیر شبکه ویل [۱۸] است. این مدل زیر شبکه در نزدیکی دیوار و همچنین تغییر جریان آرام به مغشوش عملکرد خوبی دارد. گرانیوی اغتشاشی در این روش از رابطه (۱۶) به دست می آید.

$$\mu_t^{sgs} = \bar{\rho} (C_\omega \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}}$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_i} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_i} \frac{\partial \tilde{u}_l}{\partial x_k}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (16)$$

ضریب ثابت این مدل زیر شبکه C_ω ، 0.5 لحاظ می شود.

در این روابط عبارت Δ معرف اندازه فیلتر است که به صورت $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ به دست می آید. همچنین، μ_t^{sgs} معرف گرانیوی اغتشاشی است که تأثیر گردابه های کوچک را وارد معادلات می کند.

مدل احتراقی اضمحلال گردابه

در مدل سازی آتش معمولاً از مدل های احتراقی بر پایه سینتیک سریع استفاده می کنند. در این مقاله از مدل احتراقی EDM^۲ استفاده شده است [۱۹]. این مدل احتراقی بر این فرض استوار است که واکنش ها بسیار سریع اتفاق می افتند و در واقع، به محض ورود مقداری سوخت و اکسیدکننده، در یک زمان مشخصه اغتشاشی واکنش اتفاق می افتد و این بدان معناست که انجام واکنش های شیمیایی بسیار سریع تر از مقیاس زمانی نفوذ و انتقال جریان است [۲۰]. برای تمامی حالت های مورد بررسی از فرض واکنش تک مرحله ای بازگشت ناپذیر استفاده می شود و واکنش شیمیایی در حالت کلی به صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته می شود.



مدل تشعشی

تشعشع با استفاده از مدل تشعشی جهت های گسسته^۳ وارد شبیه سازی می شود. در این روش برای هر نقطه جهت های مختلفی را در نظر می گیرد و معادله دیفرانسیلی را در هر جهت حل کرده و سپس میزان انتقال حرارت تشعشع را برای هر نقطه به دست می آورد. اثر تشعشع توسط رابطه (۱۸) در معادله انرژی اعمال می شود.

$$S_{rad} = -4\bar{K}_a E_b + \sum_{i=1}^{n_{rad}} w_i \bar{K}_a \bar{I}_i(\hat{s}_i) \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، w_i ، ضرایب وزنی مربوط به جهت های گسسته سازی معادله تشعشع است [۲۱].

1. Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (WALE)
2. Eddy Dissipation Model
3. Discrete Ordinates Method (DOM)

حل عددی

سناریوی آتش چرخان مورد مطالعه براساس تحقیق تجربی چو و همکاران [۲۲] انجام شده است. در این مطالعه تجربی، سوخت مورد استفاده متانول در نظر گرفته شد. در این شبیه‌سازی روش‌های گسسته‌سازی برای تمامی عبارات‌های جابه‌جایی در معادلات اندازه حرکت، انرژی جنبشی زیر شبکه، انتقال انرژی، انتقال گونه از تقریب مرتبه دو بادسوی محلی طیفی^۱ و برای عبارات مشتق زمانی در تمام معادلات از روش اویلری استفاده شد. میزان باقی‌مانده برای سرعت، فشار، دما و گونه کمتر از 10^{-6} قرار داده شد. در حالت کلی، در این سناریو حدود ۱۰ ثانیه زمان نیاز است تا آتش به حالت شبه پایدار برسد و پس از آن برای مقایسه نتایج با نتایج تجربی ۱۰ ثانیه متوسط‌گیری انجام می‌شود. در حل عددی توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، عدد کارنت باید کمتر از یک باشد تا حل عددی فیزیکی باشد. ماراگکاس و مرسی [۲۳] نیز برای ارضای استقلال حل از گام زمانی مقدار عدد کارنت ۰/۸ را پیشنهاد می‌دهند. در این مطالعه، عدد کورانت بیشینه ۰/۸ لحاظ شد که به‌طور نسبی معادل با گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه است.

برای انجام محاسبات، از یک دستگاه کامپیوتر با سیستم حافظه مشترک به‌میزان ۴ گیگابایت و ۱۶ پردازشگر intel-Corei5-2400 با فرکانس ۳/۱ گیگاهرتز، که هرکدام ۴ هسته حقیقی دارند، استفاده شده است.

هندسه و فضای محاسباتی

هندسه‌ای که در نتایج تجربی [۲۲] استفاده شده است شبیه شکل ۱-الف است. هندسه‌ای که در شبیه‌سازی استفاده شده است مطابق با هندسه تجربی در شکل (۱-ب) آورده شده است. فضای هندسی یک اتاق با ارتفاع ۱۴۵ سانتی‌متر و طول و عرض 34×35 سانتی‌متر مربع است. شکافی به ارتفاع ۱۴۵ و عرض $3/6$ سانتی‌متر در گوشه‌ای از اتاق برای ورود هوا و ایجاد چرخش در آتش قرار داده شده است. به‌منظور کاهش اثر شرط مرزی بر روی نتایج آتش چرخان، یک هندسه اضافه نیز به هندسه مورد بحث در شبیه‌سازی اضافه شد تا به این صورت نتایج مستقل از اعمال شرط مرزی در فضای آزاد باشند.

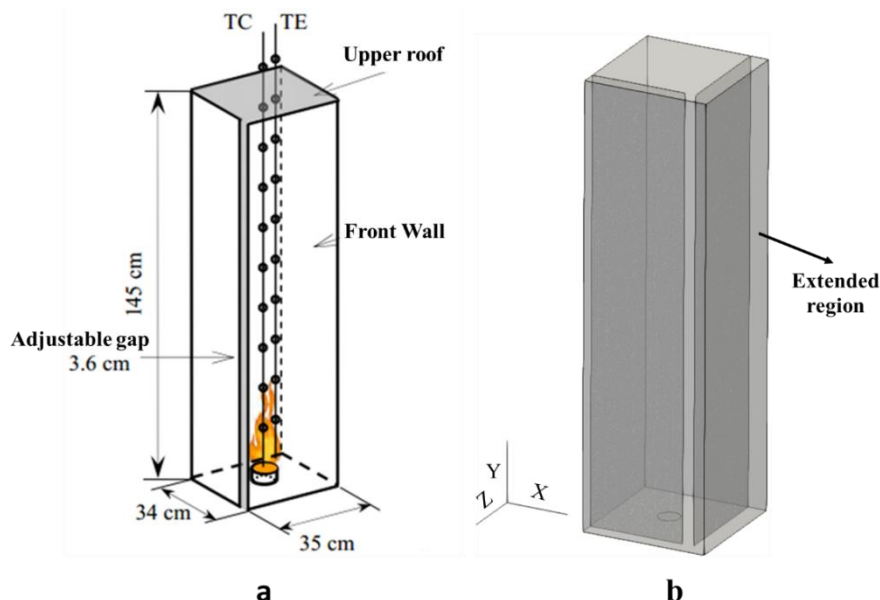


Figure 1- Dimensions and computational geometries in (a) Experimental Reference [22] and (b) Simulation

شکل ۱- ابعاد و هندسه مورد بررسی در الف) مرجع تجربی [۲۲] و در ب) شبیه‌سازی

1. Locally-Upwinded Spectral Technique (LUST)

شرط مرزی دیواره‌ها عدم لغزش لحاظ شد و ورودی بستر سوخت هم شرط مرزی سرعت در نظر گرفته شد. هوای اطراف هم به صورت شرط مرزی با فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال فرض شد. شرط مرزی حرارتی و گونه محیط اطراف، هوا (ترکیبی از اکسیژن و نیتروژن) با دمای ۳۰۰ کلوین لحاظ شد. از آنجا که سوخت مایع بوده است و در این شبیه‌سازی نحوه تبخیر سوخت مایع و تبدیل آن به فاز گازی مدل نشده است و فرض بر آن شده است که سوخت در دمای تبخیر به صورت فاز گازی با دبی تجربی از بستر سوخت خارج می‌شود، بنابراین، ورودی سوخت، متانول با دمای تبخیر ۳۳۷ کلوین لحاظ شد. میزان دبی ورودی سوخت نیز با توجه به میزان دبی نتایج تجربی مرجع [۲۲]، که نتایج با آن مقایسه می‌شود، مطابق با شکل ۲ لحاظ شد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، دو حالت مختلف با قطر بستر سوخت ۵/۸ (D5.8) و ۷ (D7) سانتی‌متر از نتایج تجربی انتخاب شده و نتایج شبیه‌سازی با آن مقایسه می‌شود. از آنجا که دبی ورودی سوخت دقیقاً مطابق با دبی تجربی است، خطای مدل‌سازی تبخیر سوخت مایع وارد شبیه‌سازی نمی‌شود و می‌توان با دقت بالاتری دقت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را بررسی کرد. با توجه به شکل ۲، میزان سرعت ورودی سوخت در شبیه‌سازی مطابق با دبی تجربی اعمال می‌شود. قطر ورودی سوخت ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

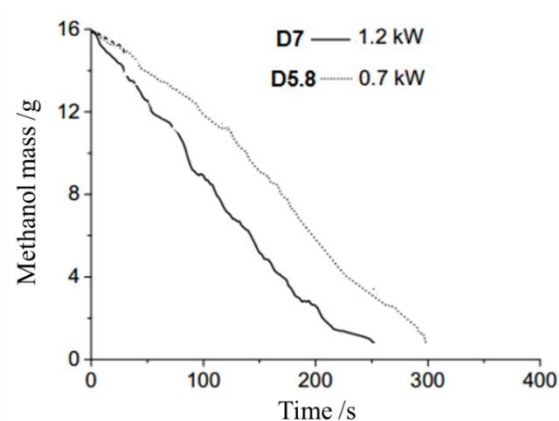


Figure 2: Fuel evaporating rate based on experimental results [22]

شکل ۲- میزان دبی سوخت برحسب نتایج تجربی [۲۲]

نتایج

در قسمت نتایج ابتدا شبکه محاسباتی بررسی می‌شود. سپس، نحوه شکل‌گیری آتش چرخان در این سناریو مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج عددی با نتایج تجربی برای دو حالت مختلف با قطر بستر سوخت ۵/۸ (D5.8) و ۷ (D7) سانتی‌متر مقایسه می‌شود.

بررسی شبکه محاسباتی

به منظور بررسی کیفیت شبکه مورد استفاده در این شبیه‌سازی، از LESiq^۱، که توسط پوپ ارائه شد، استفاده شده است. در شکل ۳، نتایج LESiq برای دو شبکه ۵۰۰ هزار و ۲ میلیون آورده شده است. شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ باید در اکثر فضای محاسباتی مقدار LESiq بالاتر از ۸۰ درصد داشته باشد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر دو شبکه مقدار LESiq در اکثر نقاط این صفحه (صفحه میانی که آتش در آن قرار دارد) بالاتر از ۸۰ درصد است و در نتیجه، از نظر کیفیت شبکه، شبکه ۵۰۰ هزارتایی نیز کیفیت مورد نیاز را دارد.

1. LES Index Quality (LES_iq)

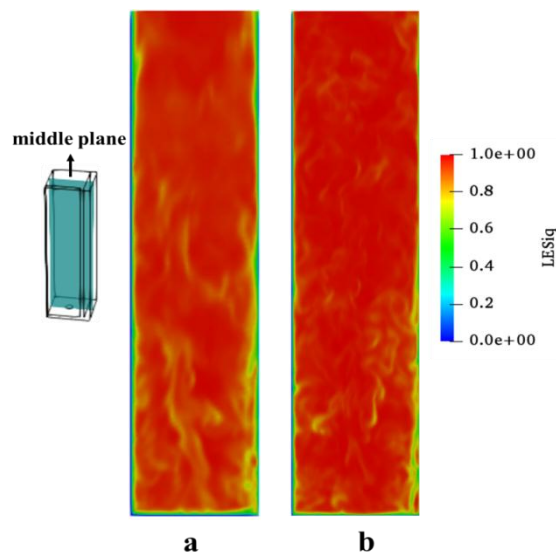


Figure 3- LES_iq results for mesh of (a) 500,000 and (b) two million

شکل ۳- نتایج LESiq برای شبکه (a) ۵۰۰ هزار و (b) دو میلیون

علاوه بر شاخص LESiq، نیاز است که اندازه شبکه مورد استفاده طول مشخصه تأثیرگذار در شبیه‌سازی را به خوبی دربر گرفته باشد. طول مشخصه مناسب برای حل مسئله، شامل پلوم^۱ آتش و جریان شناوری حاصل از آن، براساس توان حرارتی آن (\dot{Q}_{comb})، توسط رابطه (۱۹) تعریف می‌شود.

$$L^{base} = \left(\frac{\dot{Q}_{comb}}{\rho_{\infty} T_{\infty} C_p \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (19)$$

در این رابطه، ρ_{∞} ، T_{∞} ، C_p به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه، دما و چگالی محیط اطراف است. این طول مشخصه در واقع برآوردی از ناحیه مؤثر در اطراف آتش استخری است. به طور کلی، هنگامی که برای این مقیاس طولی حداقل ۱۰ شبکه محاسباتی در نظر گرفته شود، نوسانات و تغییرات شبیه‌سازی به خوبی مدل می‌شود [۲۳]. به منظور دستیابی به شاخص کلی، به‌عنوان شبکه مورد نیاز، در مدل‌سازی آتش، پارامتری به نام شاخص کیفیت شعله (PRI)^۲ تعریف می‌شود که با توجه به مقدار این پارامتر، می‌توان راجع به شبکه مورد استفاده به‌طور تقریبی صحبت کرد. این پارامتر به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

$$PRI = \frac{L^{base}}{\Delta x} \quad (20)$$

در رابطه بالا، Δx اندازه شبکه محاسباتی است. معمولاً، برای مدل‌سازی کلیات جریان آتش، مقدار PRI را حداقل ۱۰ توصیه می‌کنند [۲۳، ۲۴]. در مدل‌سازی حاضر نیز طول مشخصه از مرتبه حدود ۱۸ سانتی‌متر است. بنابراین، برای حل صحیح بزرگ‌مقیاس لازم است که اندازه شبکه از مرتبه ۱/۸ سانتی‌متر باشد. با توجه به اندازه شبکه، که در محدوده بین ۱/۳-۰/۹ سانتی‌متر است، مقدار PRI تقریباً ۱۴-۲۰ به دست می‌آید و لذا می‌تواند جزئیات مدل‌سازی را با دقت مناسب مدل کرد.

شکل‌گیری آتش چرخان درونی

گاو و همکاران [۴] در تحقیق تجربی اشاره می‌کنند که آتش چرخان، در حالتی که سوخت مایع باشد، ۵ مرحله را طی می‌کند. در این شبیه‌سازی نیز این مراحل مشاهده شد که به تفصیل بیان می‌شود. در شکل ۴، کانتور سه‌بعدی دما از زمان

1. Plume
2. Plume Resolution Index

اولیه پیدایش تا شکل‌گیری کامل آتش چرخان آورده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، در زمان ۰/۱ ثانیه، که سوخت به تدریج با هوای محیط ترکیب می‌شود، به تدریج دمایش بالا می‌رود و تحت نیروی شناوری در جهت خلاف گرانش بالا می‌رود. در زمان‌های بین ۰/۱ تا ۰/۳ ثانیه، شعله شکل گرفته کاملاً شبیه به آتش استخری [۲۵] رفتار می‌کند و هیچ اثری از چرخش در آتش وجود ندارد. در واقع، در زمان‌های بین ۰/۱ تا ۰/۳ ثانیه، مرحله اول آتش چرخان را نشان می‌دهد [۴]. گازهای داغ حاصل از احتراق تحت نیروی شناوری از بالای اتاق بیرون رفته و فشار داخل اتاق کاهش می‌یابد. بنابراین، فشار بالاتر محیط بیرون هوای تازه را از طریق شکاف اتاق وارد محیط اتاق می‌کند. البته، در ارتفاع‌های پایین، به علت تأثیرگذاری دیواره پایین، میزان مکش کم است و به تدریج با زیاد شدن ارتفاع، مکش زیاد می‌شود. به تدریج میزان مکش هوا از شکاف موجود در دیوار افزایش می‌یابد و مکش هوای یک‌طرفه موجب می‌شود که یک چرخش در سطح آتش شکل بگیرد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در زمان ۰/۷ ثانیه، در ناحیه پلوم آتش مقداری آتش منحرف شده و چرخش در شعله نمایان می‌شود. از زمان ۰/۷ ثانیه به بعد در واقع مرحله سوم آتش چرخان درونی [۴] را به تصویر می‌کشد.

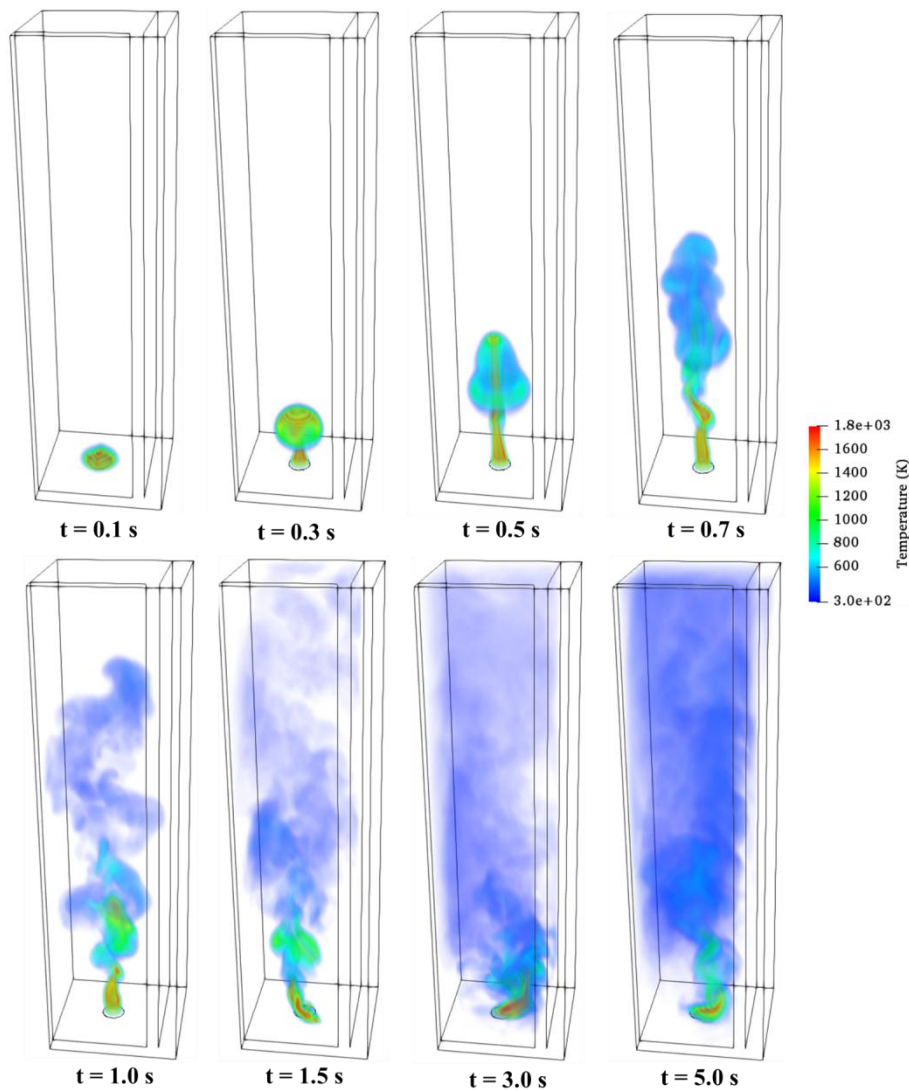


Figure 4- Three-dimensional contour of internal fire whirl temperature

شکل ۴- کانتور سه‌بعدی دمای آتش چرخشی درونی

با گذشت زمان، چرخشی که در ناحیه پلوم آتش در زمان ۰/۷ ثانیه شکل گرفت به نزدیکی بستر سوخت کشیده می‌شود. در زمان ۱/۰ ثانیه چرخش بالای بستر سوخت است و در ۱/۵ ثانیه کاملاً به بستر سوخت نزدیک شده است و شعله آتش در ناحیه بستر سوخت به یک سمت منحرف شده است. در واقع، در زمان ۱/۵-۲/۰ ثانیه، مرحله سوم آتش چرخان به پایان می‌رسد و آتش چرخان وارد مرحله چهارم می‌شود.

در شکل ۵، کانتوری از بردار سرعت در صفحه $y=0/15$ متر در زمان ۲/۰ ثانیه آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شعله آتش از محور مرکزی بستر سوخت منحرف شده است و بردارهای سرعت، پس از ورود از شکاف دیوار، حول شعله آتش می‌چرخند. در واقع، این چرخش است که شعله آتش را از خط مرکزی منحرف می‌کند. از زمان ۲/۰ به بعد، آتش چرخان کاملاً منحرف شده و با توجه به چرخشی که توسط سرعت ورودی هوا از شکاف تحمل می‌کند، به سمتی (در جهت چپ ورودی هوا) منحرف شده و حول محور مرکزی بستر سوخت می‌چرخد. بردار سرعت در نزدیکی شعله آتش به نسبت سایر نقاط مقدار پایین‌تری دارد، چراکه در نزدیکی شعله آتش دما بالاتر بوده و گازهای حاصل از احتراق را تحت نیروی شناوری از محفظه اتاق خارج می‌کند. همچنین، در نزدیکی شکاف آتش نیز، بردارهای سرعت، به علت مکش هوا، مقدار بالایی دارد.

نکته‌ای که در شکل ۴ از زمان ۲/۰ ثانیه به بعد مشاهده می‌شود این است که شعله به صورت شبه پایدار حول محور مرکزی می‌چرخد و این رفتار به صورت مداوم تکرار می‌شود که این مرحله هم مرحله چهارم شکل‌گیری آتش چرخان درونی است [۴]. ذکر این نکته لازم است که با توجه به نتایج تجربی، بعد از این چهار مرحله، مرحله دیگری است که در آن سوخت به تدریج تمام می‌شود و آتش چرخان رو به خاموشی می‌گذارد که در این شبیه‌سازی از این مرحله صرف‌نظر شده است.

مقایسه نتایج مدل‌های مختلف زیرشبکه

برای مقایسه نتایج مدل‌های مختلف زیرشبکه اغتشاشی، نتایج سه مدل زیرشبکه اسماکورینسکی، ویل و تک‌معدله‌ای در آتش چرخشی درونی با یکدیگر مقایسه شده است. در نتایج تجربی چو و همکاران [۲۲] نتایج دمای متوسط در خط مرکزی و گوشه اتاق (همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است) گزارش شده است. در این قسمت نتایج برای دو حالت مختلف با قطر بستر سوخت ۵/۸ و ۷ سانتی‌متر از نتایج تجربی انتخاب شده و با نتایج مدل‌های مختلف زیرشبکه مقایسه می‌شود.

در شکل ۶، نتایج تجربی و عددی سه مدل زیرشبکه اسماکورینسکی، ویل و تک‌معدله‌ای برای دمای متوسط در خط مرکزی برای قطر بستر سوخت ۵/۸ سانتی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در نزدیکی بستر سوخت دما از حدود ۵۶۰ کلوین شروع می‌شود و به تدریج کاهش می‌یابد. در ناحیه پلوم دمای متوسط به حدود ۳۴۰ کلوین می‌رسد و دیگر دمای متوسط تغییر نمی‌کند.

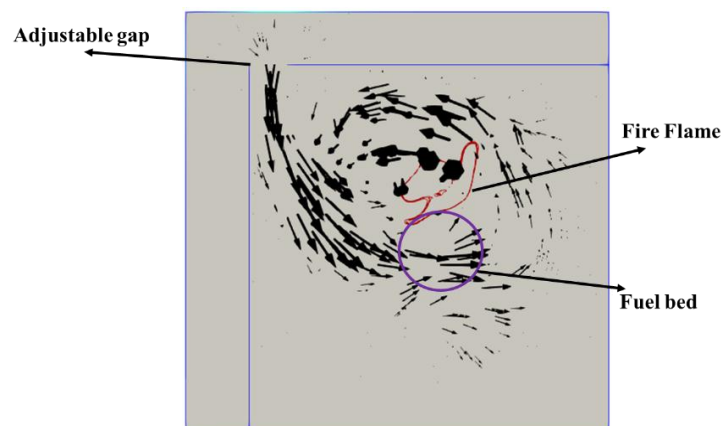


Figure 5 - contour of velocity vector at plane $y = 0.15$ m
 شکل ۵- کانتور بردار سرعت در صفحه $y = 0/15$ متر

نتایج عددی و تجربی دمای متوسط در خط مرکزی فضای هندسی برای قطر بستر سوخت ۵/۸ سانتی‌متر در شکل ۶ آورده شده است. با مقایسه نتایج عددی و تجربی در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در محدوده ارتفاع بیشتر از ۰/۶ متر، که دما خیلی تغییر نمی‌کند، نتایج بر یکدیگر منطبق هستند و در محدوده ۳۴۰ باقی‌مانده است. ارتفاع بیشتر از ۰/۶ متر، ناحیه پلوم آتش چرخشی را نشان می‌دهد که از مرحله واکنش‌های احتراق فاصله گرفته و به همین علت دما ثابت مانده است. در این محدوده همه مدل‌های زیرشبکه با نتایج تجربی کاملاً منطبق هستند و اختلافی بین مدل‌های مختلف زیرشبکه نیست.

طبق شکل ۶، در محدوده ارتفاع کمتر از ۰/۶ متر خط مرکزی (این ناحیه در محدوده شعله است)، نتایج عددی با نتایج تجربی کمی متفاوت است و مدل‌های مختلف زیرشبکه رفتار متفاوتی دارند. در واقع، رفتار مدل‌های زیرشبکه، در محدوده‌ای که دما و تغییرات آن زیاد است، باهم مقداری تفاوت دارند. به‌عنوان مثال، در پیش‌بینی نتایج دمای متوسط در خط مرکزی، سه مدل زیرشبکه رفتار یکسانی دارند. البته، دو مدل زیرشبکه تک‌معادله‌ای و اسماگورینسکی، در نزدیکی ارتفاع ۰/۲ متر، مقداری بیشتر از نتایج تجربی و مدل ویل مقداری کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی کرده‌اند، به‌طوری که درصد خطای این مدل‌ها، در ارتفاع کمتر از ۰/۲ متر، کمتر از ۲۰ درصد است.

در شکل ۷، نتایج عددی دمای متوسط در خط گوشه فضای هندسی با نتایج تجربی مرجع [۲۲] برای قطر بستر سوخت ۵/۸ سانتی‌متر مقایسه شده است. با توجه به این شکل دمای متوسط در تمام ارتفاع در محدوده ۳۰۰ تا ۳۵۰ کلوین است. از آنجا که این خط در گوشه اتاق است و از شعله مقداری فاصله دارد، دمای پایین‌تری به‌نسبت دما در خط مرکزی دارد.

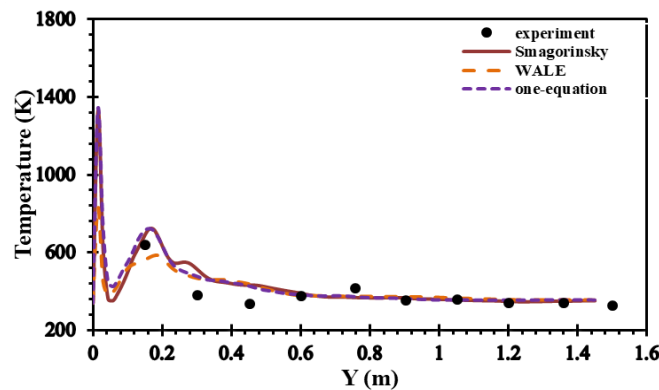


Figure 6- Comparison of the numerical and experimental results of the mean temperature in the center line for the fuel bed diameter of 5.8 cm

شکل ۶- مقایسه نتایج عددی و تجربی دمای متوسط در خط مرکزی برای قطر بستر سوخت ۵/۸ سانتی‌متر

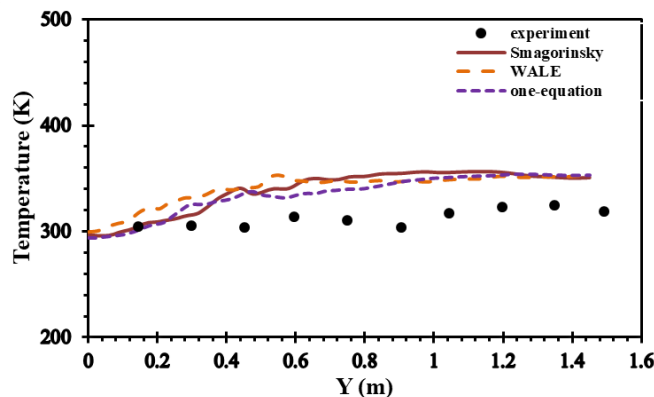


Figure 7- Comparison of numerical and experimental results of mean room temperature in the corner line for fuel bed diameter of 5.8 cm

شکل ۷- مقایسه نتایج عددی و تجربی دمای متوسط در گوشه اتاق برای قطر بستر سوخت ۵/۸ سانتی‌متر

در شکل ۸، نتایج عددی و تجربی دمای متوسط در خط گوشه فضای هندسی برای قطر بستر سوخت ۷ سانتی متر نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، در این حالت نیز همچون حالت قبل (قطر بستر سوخت ۵/۸ سانتی متر)، در محدوده ارتفاع بیشتر از ۰/۶ متر دما در ۳۷۰ کلوین ثابت می ماند. در واقع، در محدوده پلوم در هر دو حالت دما ثابت می ماند. همه مدل های زیرشبکه در این ناحیه با نتایج تجربی کاملاً منطبق اند. حالتی که قطر بستر سوخت ۷ سانتی متر باشد نیز، همچون حالت ۵/۸ سانتی متر، در محدوده ارتفاع کمتر از ۰/۶ متر، مدل های مختلف زیرشبکه رفتار متفاوتی دارند که این موضوع در شکل ۸ نشان داده شده است. به عنوان مثال، در پیش بینی نتایج دمای متوسط در خط مرکزی، مدل ویل رفتار بسیار مناسب تری دارد، به طوری که طبق جدول ۱ درصد خطای این مدل ۷/۲ درصد است، در حالی که هر یک از مدل های اسماگورینسکی و تک معادله ای به ترتیب ۱۰/۳ و ۸ درصد خطا نسبت به نتایج تجربی دارند.

در شکل ۹، نتایج عددی مدل های مختلف زیرشبکه برای دمای متوسط در خط گوشه فضای هندسی، برای قطر بستر سوخت ۷ سانتی متر، با نتایج تجربی مرجع [۲۲] مقایسه شده است. با توجه به این شکل، دمای متوسط در تمام ارتفاع در محدوده ۳۰۰ تا ۳۵۰ کلوین است و البته، به تدریج، با افزایش ارتفاع، افزایش می یابد. افزایش دمایی که در شکل ۷ و ۹ با افزایش ارتفاع دیده می شود، با توجه به نفوذ و پخش دود و محصولات احتراق، قابل توجیه است. به این صورت که در ارتفاع های پایین، چون نتایج در این خط از شعله فاصله دارد، دما پایین است. اما، با افزایش ارتفاع، دود و پلوم حرارتی در جهت افقی بیشتر پخش می شود و در واقع پلوم حرارتی پهن تر می شود و لذا انتقال حرارت تا عمق بیشتری نفوذ می کند و در ارتفاع های بالاتر دما افزایش می یابد.

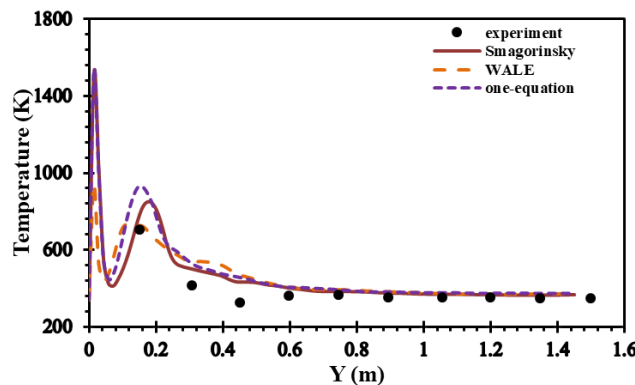


Figure 8- Comparison of numerical and experimental results of the mean temperature in the center line for the 7 cm fuel bed diameter

شکل ۸- مقایسه نتایج عددی و تجربی دمای متوسط در خط مرکزی برای قطر بستر سوخت ۷ سانتی متر

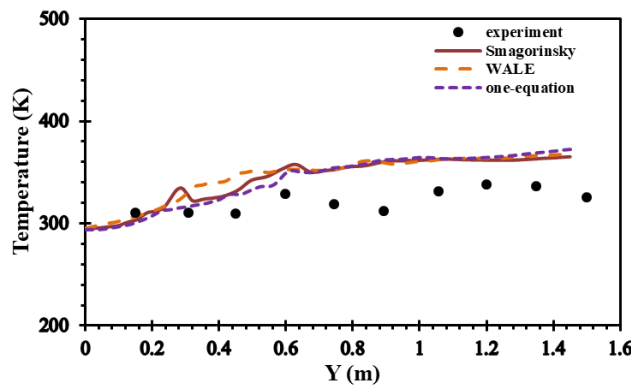


Figure 9- Comparison of numerical and experimental results of mean temperature in the corner line for 7 cm fuel bed diameter

شکل ۹- مقایسه نتایج عددی و تجربی دمای متوسط در گوشه اتاق برای قطر بستر سوخت ۷ سانتی متر

با مقایسه نتایج عددی و تجربی، دیده می‌شود که در کل خط گوشه فضای هندسی اختلاف چندانی بین مدل‌های مختلف زیرشبکه وجود ندارد، اگرچه روش تک‌معادله‌ای به نتایج تجربی نزدیک‌تر است؛ به‌نحوی که طبق جدول ۱ روش تک‌معادله‌ای، اسماگورینسکی و ویل به ترتیب ۸، ۷/۵ و ۸/۳ درصد خطای نسبی با نتایج تجربی دارند.

جدول ۱- خطای نسبی مدل‌های مختلف زیرشبکه

Table 1- relative error of different sub-grid scale models

Burner diameter	line	Smagorinsky	WALE	One-equation
5.8 cm	central	8	7.5	7.5
	corner	5.9	6.7	5.7
7 cm	central	8	7.2	10.3
	corner	8	8.3	7.5
general	Central and corner	7.35	7.43	7.75

تحلیل نتایج سرعت و نوسان آن در آتش چرخان

در شکل ۱۰، نمودار سرعت متوسط عمودی و جذر متوسط مجذور نوسانات سرعت عمودی ($\sqrt{v'^2}$) در خط مرکزی برای قطر بستر سوخت ۷ سانتی‌متر آورده شده است. سرعت متوسط عمودی تا ارتفاع ۰/۲ با افزایش ارتفاع، افزایش می‌یابد که علت افزایش سرعت عمودی، افزایش دما، کاهش چگالی و در نتیجه افزایش نیروی شناوری است. به تبع افزایش نیرو، سرعت در راستای نیروی شناوری نیز افزایش یافته و سرعت عمودی افزایش می‌یابد.

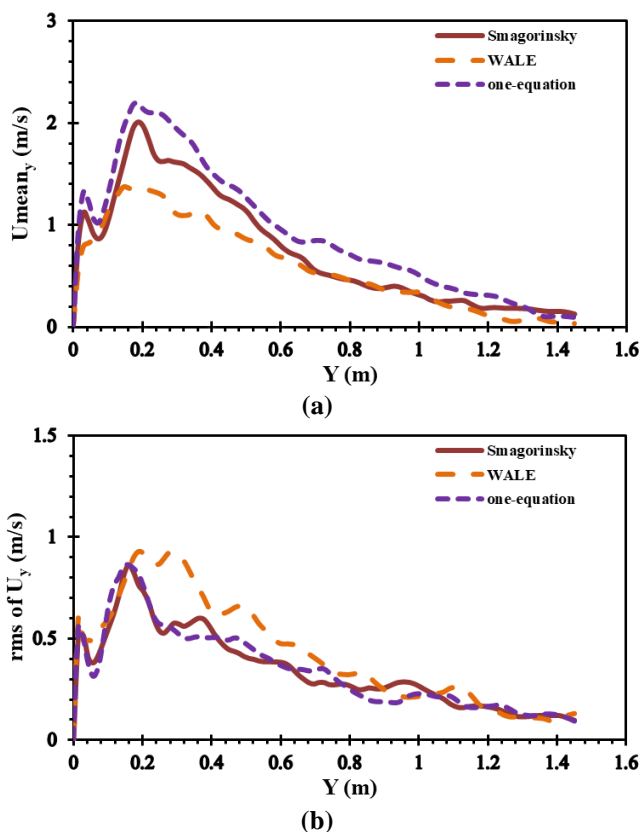


Figure 10- Curve of (a) mean vertical velocity and (b) root mean square of vertical velocity fluctuations in the center line.

شکل ۱۰- نمودار (الف) سرعت متوسط عمودی و (ب) جذر متوسط مجذور نوسانات سرعت عمودی در خط مرکزی

با افزایش ارتفاع میزان چرخش شعله آتش نیز بیشتر می‌شود و از این رو شعله بیشتر از خط مرکزی فاصله می‌گیرد. با افزایش فاصله بین شعله و خط مرکزی، میزان تأثیرگذاری شعله بر گازهای خط مرکزی کمتر شده و لذا گازها با سرعت کمی در خط مرکزی به سمت بالا حرکت می‌کنند. بنابراین، از ارتفاع ۰/۲ به بالا با افزایش ارتفاع، سرعت متوسط کاهش می‌یابد. البته در ارتفاع بالاتر از ۰/۶ نیز، به علت وارد شدن به ناحیه پلوم آتش، دلیل دیگری بر کاهش سرعت عمودی در این ارتفاع است.

همچنین، در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود که مدل زیرشبهه ویل نسبت به دو مدل زیرشبهه اسمگورینسکی و تک معادله‌ای میزان سرعت را پایین‌تر پیش‌بینی کرده است. این موضوع با توجه به نتایج دمای این روش در شکل ۸ قابل توجه است، چراکه این مدل میزان دما را در خط مرکزی کمتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی کرده است و بنابراین در این حالت نیروی شناوری، که رابطه مستقیمی با دما دارد، کاهش می‌یابد و در نتیجه سرعت هم کاهش می‌یابد.

نکته دیگری که در شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود، میزان $\sqrt{v'^2}$ تغییراتی شبیه به سرعت عمودی متوسط دارد و تا ارتفاع ۰/۲ افزایشی و پس از آن کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش سرعت، میزان اغتشاش و زمینه آشفستگی جریان و به تبع آن زیاد شدن $\sqrt{v'^2}$ فراهم می‌شود و همچنین با کاهش سرعت، میزان آشفستگی کاهش می‌یابد. البته این موضوع نیز در آتش غیر چرخان مشاهده می‌شود. همچنین، مقدار تغییرات $\sqrt{v'^2}$ به طور تقریب نصف مقدار سرعت عمودی متوسط است. حال آنکه در حالت بدون چرخش میزان نوسانات سرعت به نسبت خود سرعت در حدود ۰/۲-۰/۱ است [۲۶، ۲۷]، اما در آتش چرخان این نسبت حدود ۰/۵ است. در واقع، میزان نوسانات سرعت در حالت آتش چرخشی خیلی زیادتر از حالت بدون چرخش است و نشان می‌دهد که مقدار نوسانات در حالت آتش چرخشی حدوداً ۲-۳ برابر حالت غیر چرخشی است.

نتیجه گیری

در این مقاله، آتش چرخان داخلی در فضایی با ارتفاع بلند توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مدل‌سازی شد. سوخت متانول برای دو حالت مختلف با قطر بستر سوخت ۵/۸ و ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور بررسی کارایی روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در مدل‌سازی آتش چرخان، نتایج دمای متوسط با نتایج تجربی مرجع [۲۲] مقایسه شد. دو مدل زیرشبهه اسمگورینسکی، تک معادله‌ای و ویل در این شبیه‌سازی مقایسه شدند. با مقایسه نتایج عددی و تجربی در خط مرکزی مشاهده می‌شود که در محدوده ارتفاع نزدیک بستر سوخت، مقدار خطا بیشتر از ارتفاع‌های بالاتر است، به طوری که در نزدیکی بستر سوخت مقدار خطا کمتر از ۲۰ درصد و در ارتفاع بالاتر مقدار خطا کمتر از ۵ درصد است. همچنین، در میان مدل‌های مختلف زیرشبهه، مدل ویل بهتر از مدل تک معادله‌ای و اسمگورینسکی نتایج دما را در خط مرکزی مدل‌سازی می‌کند. همچنین، دقت مدل‌های مختلف زیرشبهه در نواحی دور از شعله (خط در گوشه اتاق) بهتر از خط مرکزی است.

منابع

1. K. Himoto and T. Naruse, "Probabilistic aspect of fire whirl generation around an L-shaped fire source in a crosswind," *Fire Safety Journal*, Vol. 88, 2017, pp. 89-95.
2. H. Yu, S. Guo, M. Peng, Q. Li, J. Ruan, W. Wan and et al., "Study on the influence of air-inlet width on fire whirls combustion characteristic," *Procedia Engineering*, Vol. 62, 2013, pp. 813-820.
3. G. Zou and W. Chow, "Generation of an internal fire whirl in an open roof vertical shaft model with a single corner gap," *Journal of fire sciences*, Vol. 33, 2015, pp. 183-201.
4. Z. Gao, S. Li, Y. Gao and W. K. Chow, "Experimental studies on characteristics of fire whirl in a vertical shaft," *Fire and Materials*, Vol. 43, 2019, pp. 229-240.
5. Y. Huo, W. Chow, and Y. Gao, "Internal fire whirls induced by pool fire in a vertical shaft," *ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 2011, p. T20034.
6. J. Lei, N. Liu, L. Zhang and K. Satoh, "Temperature, velocity and air entrainment of fire whirl plume: A comprehensive experimental investigation," *Combustion and Flame*, Vol. 162, 2015, pp. 745-758.

7. T. Sasaki, M. Igari, and K. Kuwana, "Fire whirls behind an L-shaped wall in a crossflow," *Combustion and Flame*, Vol. 197, 2018, pp. 197-203.
8. A. Yuen, G. Yeoh, S. Cheung, Q. Chan, T. Chen, W. Yang and et al., "Numerical study of the development and angular speed of a small-scale fire whirl," *Journal of computational science*, Vol. 27, 2018, pp. 21-34.
9. W. Chow, J. Dang, Y. Gao and C. Chow, "Dependence of flame height of internal fire whirl in a vertical shaft on fuel burning rate in pool fire," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 121, 2017, pp. 712-720.
10. R. M. Parente, J. M. C. Pereira and J. C. F. Pereira, "On the influence of circulation on fire whirl height," *Fire Safety Journal*, Vol. 106, 2019, pp. 146-154.
11. H. Pasharshahi, G. Heidarinejad and K. Mazaheri, "Large eddy simulation on one-meter methane pool fire using one-equation sub-grid scale model," *proceedings of the Seventh Mediterranean Combustion Symposium*, Cagliari, Sardinia, Italy, September 11-15, 2011.
12. A. Yuen, G. Yeoh, V. Timchenko, S. Cheung and 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*, Vol. 69, 2016, pp. 1223-1241.
13. K. McGrattan, R. Rehm, and H. Baum, "Fire-driven flows in enclosures," *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, 1994, pp. 285-291.
14. O. M. Knio, H. N. Najm and P. S. Wyckoff, "A semi-implicit numerical scheme for reacting flow: II. Stiff, operator-split formulation," *Journal of Computational Physics*, Vol. 154, 1999, pp. 428-467.
15. G. Maragkos, T. Beji and B. Merci, "Towards predictive simulations of gaseous pool fires," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, 2019, pp. 3927-3934.
16. O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, H. Pasharshahi and H. A. Mohabadi, "Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD)," *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 123, 2019, pp. 379-389.
17. A. C. Y. Yuen, G. H. Yeoh, V. Timchenko, S. C. P. Cheung, Q. N. Chan and 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*, Vol. 31, 2017, pp. 324-337.
18. A. C. Y. Yuen, G. H. Yeoh, V. Timchenko and T. Barber, "LES and multi-step chemical reaction in compartment fires," *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, Vol. 68, 2015, pp. 711-736.
19. H. Pasharshahi, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, "Comparison of Turbulence Sub-Grid Scale Model for Modeling of Large Scale Pool Fire Using LES," *Energy: Engineering & Management*, Vol. 3, 2013, pp. 52-61.
20. T. Echekki and E. Mastorakos, *Turbulent combustion modeling: Advances, new trends and perspectives*, Vol. 95, Springer Science & Business Media, Netherlands, 2010.
21. P. P. S. da Costa, "Validation of a mathematical model for the simulation of loss of coolant accidents in nuclear power plants," Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Técnico Lisboa, Portugal, 2016.
22. W. Chow and S. Han, "Experimental data on scale modeling studies on internal fire whirls," *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Vol. 10, 2011, pp. 63-74.
23. G. Maragkos and B. Merci, "Large Eddy Simulations of CH₄ Fire Plumes," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 99, 2017, pp. 239-278.
24. G. Yeoh, S. Cheung, J. Tu and T. Barber, "Comparative Large Eddy Simulation study of a large-scale buoyant fire," *Heat and mass transfer*, Vol. 47, 2011, pp. 1197-1208.
25. G. Heidarinejad, H. Pasharshahi and M. safarzadeh, "The Importance of using the Combustion and Sub-grid Model Modelling of Large Pool Fire Flow Field," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50, No. 4, 2019, pp. 1-3.
26. S. C. P. Cheung, G. H. Yeoh, A. L. K. Cheung, R. K. K. Yuen and S. M. Lo, "Flickering behavior of turbulent buoyant fires using large-eddy simulation," *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, Vol. 52, 2007, pp. 679-712.
27. h. pasharshahi, *improved of compatible subgrid scale with Large Eddy Simulation for numerical simulation of fire in closed space*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, 2013.

English Abstract

Accuracy of Sub-grid Models in Internal Fire Whirl Modeling by Large Eddy Simulation

M. Safarzadeh¹, G. Heidarinejad², H. Pasdarshahri^{3*}

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, m.safarzadeh@modares.ac.ir

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, gheidari@modares.ac.ir

3- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, pasdar@modares.ac.i

*Corresponding author

(Received: 2020.02.27, Received in revised form: 2020.04.23, Accepted: 2020.05.11)

In this paper, a fire whirl in a high-rise room with a gap in one corner is investigated. Methanol fuel is intended. Large Eddy Simulation method was used and the OpenFoam software, one-equation sub-grid model and eddy dissipation combustion model were performed. Results in two different conditions (fuel bed of 5.8 and 7 cm) were obtained and compared with the experimental results. By comparing the numerical results with the experimental results, it is observed that the numerical results of the mean temperature in the middle and corner of the room are consistent with the experimental results. The results of the various sub-grid models in the center line show that the WALE model fits better with the experimental results and also the performance of the two one-equation and Smagorinsky sub-grid models is lower than WALE. On average, the relative error percentage of the WALE model is 7.3 percent, while each of the Smagorinsky and one-equation models have error of 8 and 8.9 percent compared to the experimental results, respectively. The results of the three sub-grid models in the corner are not significantly different and are more consistent with the experimental results. The corner line error of the room being less than 8%.

Keywords: Fire whirl, large eddy simulation, WALE, Smagorinsky, One equation sub-grid scales.