



بررسی تأثیر نسبت ابعاد دریچه و شرایط منبع احتراق بر رفتار پدیده بازافروختگی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

سینا پارسا^۱، اسماعیل محمدیان^۲، حسین افشین^{۳*} و بیژن فرهانیه^۴

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

^۴ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

چکیده

بازافروختگی یک پدیده خاص از آتش‌سوزی است که در محیطی بسته با تهویه محدود ایجاد می‌شود و می‌تواند دما و فشار را افزایش داده و آتش را تقویت کند. در این مقاله، با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و استفاده از شبیه‌ساز دینامیک آتش، به بررسی رفتار پدیده بازافروختگی در یک محفظه بسته پرداخته شده است. تغییر نسبت ابعاد دریچه، تزریق سوخت از منبع احتراق و تغییر مکان منبع احتراق، سه پارامتر اساسی هستند که تأثیر آن بر رفتار دینامیکی و ترمودینامیکی پدیده بازافروختگی جهت اطفاء یا تعویق آن، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج دلالت بر این دارد که اگر سوخت با غلظت کمتری در واکنش شرکت کند، امکان وقوع بازافروختگی در فشارهای پایین فراهم می‌شود. با کاهش نسبت ابعاد دریچه، زمان وقوع پدیده بازافروختگی به تعویق افتاد و توانست بیشینه فشار دینامیکی حاصل از این پدیده را نزدیک به ۴ پاسکال کاهش دهد؛ اگرچه به دلیل باقی ماندن مواد نیم‌سوز، امکان وقوع بازافروختگی دوم فراهم شد؛ همچنین با تغییر مکان منبع احتراق و نزدیک کردن آن به دریچه، مشاهده شد که پدیده بازافروختگی در مقیاسی کوچک‌تر رخ داده و امکان اطفاء کامل آن وجود دارد.

کلمات کلیدی: پدیده بازافروختگی؛ شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ؛ شبیه‌ساز دینامیک آتش؛ آتش‌سوزی؛ فشار دینامیکی.

Investigating the Effect of Opening Aspect Ratio and Combustion Source Conditions on Behavior of Backdraft Phenomenon by Large Eddy Simulation

S. Parsa¹, E. Mohammadian², H. Afshin^{3,*}, B. Farhanieh⁴

¹ M.S.c., Mech. Eng., Sharif University of Technology., Tehran, Iran.

² Ph.D Student, Mech. Eng., Sharif University of Technology., Tehran, Iran.

³ Associate. Prof., Mech. Eng., Sharif University of Technology., Tehran, Iran.

⁴ Prof., Mech. Eng., Sharif University of Technology., Tehran, Iran.

Abstract

Backdraft is a special phenomenon of fire that occurs in a closed environment with limited ventilation and it can increase temperature, pressure and intensify fire. In this paper, with the method of Large Eddy Simulation and using Fire Dynamics Simulator, the behavior of the backdraft phenomenon in a closed enclosure is investigated. Changing the aspect ratio of opening, fuel injection from the combustion source and displacement of the combustion source are the three basic parameters whose effect on the dynamic and thermodynamic behavior of the backdraft to extinguish or delay it was investigated. The results indicate that if the fuel participates in reaction with a lower concentration, backdraft can occur at low pressures. By reducing the aspect ratio of opening, the time of occurrence of the backdraft phenomenon was delayed and was able to reduce the peak dynamic pressure resulting from this phenomenon by nearly 4 Pascals; However, due to the presence of semi-combustible materials, the possibility of a second backdraft occurred. Also, by displacement the combustion source and bringing it closer to the opening, it was observed that the backdraft phenomenon occurred on a smaller scale and it is possible to extinguish it completely.

Keywords: Backdraft; Large Eddy Simulation (LES); Fire dynamics simulator (FDS); Fire; Dynamic Pressure.

۱- مقدمه

بازافروختگی یک پدیده خاص از آتش‌سوزی است که در یک محفظه با تهویه محدود به وقوع می‌پیوندد. در یک محیط بسته که آتش وجود دارد بعد از گذشت زمان به علت بسته بودن درب‌ها و پنجره‌ها، اکسیژن مورد نیاز برای سوختن کاهش می‌یابد و در نتیجه مواد نیم‌سوز می‌توانند محیط را به طور خطرناکی با بخارات و گازهای قابل اشتعال پرکنند و با رسیدن هوای کافی به این محفظه، انفجار ناگهانی یا همان پدیده بازافروختگی^۱ صورت پذیرد [۱]. شرایط بازافروختگی لحظاتی حساس و کشنده را در عملیات آتش‌نشانی بوجود می‌آورد و می‌تواند هر کسی را که در آن محدوده باشد، بطور جدی مجروح کرده و صدمات زیادی به او وارد سازد. علاوه بر جان افراد، وقوع این پدیده در محیط‌های صنعتی، می‌تواند تجهیزات و ماشین‌های گران قیمت را نیز تهدید کند. پس همان‌طور که گفته شد، بررسی این پدیده و جلوگیری یا اطفاء آن در ساختمان‌ها، بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

از نشانه‌های شروع پدیده بازافروختگی می‌توان به ترک خوردن شیشه‌ها و حضور دود غلیظ قهوه‌ای رنگ، اشاره کرد. هنگامی که هیچ دریچه‌ای باز نیست، دود شیشه‌ها را پوشانده و سیاه می‌کند؛ دود ساطع شده تحت فشار از شکاف‌ها خارج می‌شود و در عین حال که گرمای حریق حس می‌شود، باید انتظار انفجار و برگشت شعله را داشت.

پژوهش‌های تجربی کمی در زمینه بررسی رفتار پدیده بازافروختگی انجام شده است. به علت خطر بالای این پژوهش‌ها در زمینه آتش‌سوزی و هزینه زیاد، اکثر آن‌ها در یک محفظه کوچک صورت گرفته است. ابداع این روش توسط فلیشمان و مک‌گراتان [۲] انجام شده است. آن‌ها دریچه محفظه را یک بار به صورت افقی که یک سوم ارتفاع دیوار را شامل می‌شد و یک بار به صورت سر تا سری که کل دیوار را دربر می‌گرفت، در نظر گرفتند و به بررسی پدیده بازافروختگی به صورت عددی و تجربی پرداختند و نتایج آنها را با هم مقایسه کردند. گجکویچ [۳] پدیده بازافروختگی را به صورت تجربی در یک هندسه مشخص که فقط یک دریچه افقی داشت، مورد بررسی قرار داد و مقادیر دما، فشار و غلظت گونه‌ها را گزارش کرد. وی نتیجه گرفت که مهم‌ترین

عامل مؤثر بر پدیده بازافروختگی، غلظت گاز شرکت‌کننده در احتراق است. ونگ و فان [۴]، با چند آزمایش تجربی، به بررسی تأثیر شرایط اولیه محصولات حاصل از احتراق در داخل محفظه، بر روی پدیده بازافروختگی پرداختند. آن‌ها با تغییر غلظت جرمی سوخت (متان) در مواد نیم‌سوز از ۵٪ تا ۱۲/۲۴٪ نشان دادند که با افزایش کسر جرمی^۲ سوخت داخل محفظه، پدیده بازافروختگی در مقیاسی بزرگ‌تر و با افزایش شدید فشار همراه می‌شود. در پژوهش دیگر ونگ و همکاران [۵]، ضمن گزارش اینکه مقدار غلظت سوخت، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر وقوع این پدیده است، اثر شکل‌های مختلف دریچه نیز بر روی رفتار پدیده بازافروختگی، مورد بررسی قرار گرفت. وو و همکاران [۶]، قوانینی برای پدیده بازافروختگی با سوخت گازی ارائه کردند که در آن اثرات شرایط مختلف تهویه، مکان احتراق و جریان جرمی نشسته گاز، مورد بحث قرار گرفته است.

امروزه مطالعات عددی به دلیل هزینه پایین و محدودیت‌های کمتر نسبت به مطالعات تجربی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش ونگ و فان [۷] اشاره کرد. آن‌ها نشان دادند که پدیده بازافروختگی، در دو حالت پایدار و ناپایدار رخ می‌دهد و حرکت منحنی‌های دما و انرژی در بین حالت پایدار، از نوع هیستریک^۳ است. در مطالعه‌ای دیگر، یانگ و همکاران [۸]، با در نظر گرفتن یک واکنش ۴ مرحله‌ای، پدیده بازافروختگی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از دو لایه ترکیب نشده از مواد نیم‌سوز با غلظت مختلف سوخت (متان) در ۳/۱٪ و ۱۰/۵۸٪ جرمی، رفتار پدیده بازافروختگی و زمان آتش‌سوزی را پیش‌بینی کردند. ونگ و همکاران [۹]، با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۴، زمان لازم برای رسیدن جریان هوای آزاد به منبع احتراق، در محفظه‌ای که حجم آن را محصولات احتراق شامل می‌شود، به صورت عددی در حالت‌های مختلف محاسبه کردند. یکی از مطالعات عددی که روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در آن استفاده شده، پژوهش فراریس و همکاران [۱۰] است. آن‌ها مدل خود را بر اساس ترکیب رویکردهای مستقل برای احتراق آشفته

^۲ Mass fraction^۳ Hysteretic^۴ Large Eddy Simulation (LES)^۱ Backdraft

گرفتن پارامترهای مؤثری همچون تزریق سوخت از منبع احتراق، ابعاد دریچه و محل منبع احتراق، دینامیک و رفتار پدیده بازافروختگی جهت اطفاء، تعویق یا جلوگیری از وقوع آن، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- روش حل عددی

۲-۱- معادلات حاکم

نرم افزار FDS [۱۶]، یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی جهت بررسی و شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از آتش‌سوزی است. این کد که به صورت نرم‌افزار منبع آزاد^۴ در دسترس است، فرمی از معادلات ناویر-استوکس را برای جریان‌های سرعت پایین (ماخ کمتر از ۰/۳) ناشی از آتش‌سوزی، به صورت عددی حل می‌کند. تمامی شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه توسط نسخه ۶.۳.۲ FDS صورت گرفته است. برای پردازش نهایی و تولید عکس، کانتور و بردار از نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، توسط نرم‌افزار منبع آزاد اسموک‌ویو^۵ استفاده شده است [۱۷].

در این بخش خلاصه‌ای از معادلات حاکم بر پدیده آتش‌سوزی و احتراق و نحوه مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار FDS بیان شده است. با اعمال قانون پایستگی جرم بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادله بقای جرم کلی به صورت رابطه (۱) بدست می‌آید [۱۸]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = \dot{m}_b \quad (1)$$

که در آن، ρ چگالی، u سرعت، t زمان و $\dot{m}_b = \sum \alpha \dot{m}_{b,\alpha}$ مجموع نرخ تولید گونه‌ها^۶ در واحد حجم بر اثر تبخیر قطرات قطرات مایع یا ذرات جامد می‌باشد که به صورت ترم چشمه جرمی در معادله ظاهر شده است. در پدیده‌های همراه با واکنش شیمیایی، گونه‌های مختلف حاصل از واکنش در آن موجود می‌باشند. شار جرمی گونه α ، \dot{m}_α ، با توجه به سرعت ذره به صورت رابطه (۲) خواهد بود [۱۸]:

$$\sum \alpha \dot{m}_\alpha = \sum \alpha \rho Y_\alpha v_\alpha = \dot{m} \quad (2)$$

مخلوط نشده و از پیش مخلوط شده، در نظر گرفتند. هوروات و ساینای [۱۱]، با بکارگیری علم دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین با استفاده از نرم افزار CFX به بررسی عددی رفتار پدیده بازافروختگی پرداختند. دو حل شبیه‌سازی جداگانه گرداب^۱ به صورت آشفته و ترکیبی از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مورد مطالعه قرار گرفت. امیری و همکاران [۱۲]، به مدل‌سازی عددی عملکرد چند سناریوی مختلف اطفاء حریق در یک محیط بسته پرداختند که دارای سه اتاق است و در آن احتمال بروز پدیده بازافروختگی وجود دارد. پارک و همکاران [۱۳]، با استفاده از یک مدل شبیه‌ساز دینامیک آتش^۲ و یک مدل آزاد، به بررسی عددی رفتار پدیده بازافروختگی پرداختند. در این پژوهش شرایط اولیه سوخت داخل محفظه و همچنین اثرات تابش حرارتی با در نظر گرفتن مدل پرتوهای خاکستری و آدیاباتیک، مورد مطالعه قرار گرفت. مایلسامی و همکاران [۱۴]، با استفاده از مدل FDS و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی محفظه بر روی پدیده بازافروختگی پرداختند. وجه تمایز این پژوهش نسبت به سایر مطالعات، بررسی تاثیر شکل هندسی دریچه بر شرایط بحرانی پدیده بازافروختگی به صورت عددی است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش میزان سوخت در داخل محفظه، بیشینه فشار به صورت صعودی تغییر می‌کند. کرول و همکاران [۱۵]، پژوهش خود را به صورت عددی، پیرامون نتایج فرارپس و همکاران [۱۰]، با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت^۳، روی پدیده بازافروختگی انجام دادند. آن‌ها برای محفظه مورد نظر، از دو مدل محصولات احتراقی ترکیب‌شده و ترکیب‌نشده، استفاده کردند و نشان دادند، اگرچه نتایج این دو مدل بسیار به هم نزدیک است، ولی در مدل ترکیب‌شده، دمای گازهایی که در وقوع پدیده بازافروختگی شرکت می‌کنند، پایین‌تر می‌باشد.

به طور کلی هدف پژوهش حاضر، استفاده از روش LES برای شبیه‌سازی پدیده بازافروختگی در یک محفظه بسته که می‌تواند بیانگر محیط‌هایی مثل ساختمان و وسایل نقلیه باشد، در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، با در نظر

⁴ Open Source

⁵ Smokeview

⁶ Species

¹ Detached Eddy Simulation (DES)

² Fire Dynamic Simulator (FDS)

³ Ansys Fluent

پیچیده بسیار زیاد است، لذا در این پژوهش از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نوعی فیلترگیری پایین‌گذر^۱ جهت جداسازی مقیاس‌های حرکت به شکل رابطه (۷) صورت می‌گیرد [۱۹]:

$$\bar{f}(X, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(X - \bar{x}', t) G(X, \bar{x}', \bar{\Delta}) d\bar{x}' \quad (7)$$

که در آن G تابع فاکتورگیری و $\bar{\Delta}$ پهنا می‌باشد. اگر معادله مومنتم (۴) به صورت رابطه (۸) بازنویسی انجام شود [۱۸ و ۲۰]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu S_{ij}) \quad (8)$$

با استفاده از فاکتورگیری و با فرض امکان جابه‌جایی اپراتور فیلترگیری و مشتق‌گیری مکانی، معادلات ناویر-استوکس فیلترگیری شده برای سیال تراکم‌ناپذیر به صورت رابطه (۹) به دست خواهد آمد.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu \bar{S}_{ij} + T_{ij}) \quad (9)$$

که در آن T_{ij} ، تانسور تنش‌های زیرشبکه است:

$$T_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - u_i u_j \quad (10)$$

۲-۳- مدل احتراقی

FDS، با بکارگیری مدل احتراق هیبریدی^۲ می‌تواند پدیده‌های آتش‌سوزی را به خوبی کنترل کند. هنگامی که واکنش دهنده‌ها در سطح مولکولی مخلوط می‌شوند، به سرعت محصولات احتراق تشکیل می‌شود؛ این بدان معنی است که عدد دامکولر^۳ بسیار بزرگ است. در واقع مدل احتراقی فرض می‌کند که سرعت واکنش ممکن است، به طور مستقیم به زمان مورد نیاز برای ترکیب واکنش دهنده‌ها در سطح مولکولی مرتبط باشد؛ بنابراین، سطح مخلوط آشفته یک شرط کنترل‌کننده برای واکنش احتراق مناسب است. احتراق از طریق ترم منبع به معادلات حاکم معرفی می‌شود (\dot{Q}'''):

که در آن v_α و Y_α به ترتیب سرعت و کسرجرمی ذره است. اگر سرعت هر یک از گونه‌ها را در پایستگی جرم لحاظ کنیم (برای یک المان دیفرانسیلی در جریان همراه با واکنش شیمیایی)، معادله حاکم بر پایستگی جرم گونه‌ها به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot [\rho Y_\alpha (V + v_{\alpha, \text{diff}})] = \dot{m}_\alpha'''' \quad (3)$$

$\alpha = 1, 2, \dots, N$

با اعمال قانون دوم نیوتن بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادلات پایستگی اندازه حرکت سیال به دست خواهد آمد [۱۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u^T) + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (4)$$

که در آن f_b نیروی خارجی ناشی از اصطکاک قطرات مایع موجود در فاز گازی یا حضور میدان مغناطیسی، g شتاب گرانش و τ_{ij} تانسور تنش برای سیال نیوتنی است. با اعمال قانون اول ترمودینامیک بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادلات پایستگی انرژی برای سیال به دست خواهد آمد [۱۶]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s u) = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon \quad (5)$$

که در آن h_s آنتالپی محسوس سیال و تابعی از دما است و همچنین ε بیانگر ترم اضمحلال در معادله انرژی می‌باشد. ترم \dot{q}''' نماینده نرخ رهایش حرارت بر واحد حجم توسط واکنش شیمیایی است. ترم \dot{q}_b''' انرژی منتقل شده به منظور تبخیر قطرات موجود در سیال می‌باشد. ترم \dot{q}'' نرخ انتقال حرارت از طریق شار حرارتی تشعشع \dot{q}_r'' ، هدایت و نفوذ حرارتی را نشان می‌دهد.

$$\dot{q}'' = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{q}_r'' \quad (6)$$

k معرف ضریب هدایت حرارتی است.

۲-۲- شبیه‌سازی توربولانسی

نرم‌افزار FDS ۶.۳.۲ از دو روش برای مدل‌سازی جریان توربولانس استفاده می‌کند: روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و روش شبیه‌سازی عددی مستقیم. مدت زمان محاسبات در روش شبیه‌سازی عددی مستقیم برای مسائل

¹ Low Pass Filter

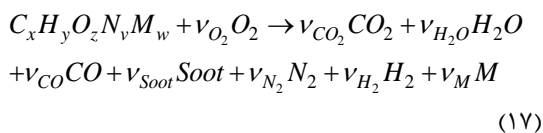
² Hybrid

³ Damkohler

محدود صورت می‌گیرد. نرم‌افزار FDS معادله انتقال تشعشع را به صورت پیش‌فرض با استفاده از زاویه (جهت) گسسته شده حل می‌کند. به این صورت که یک کره با حجم واحد به ۱۰۰ زاویه تابشی تجزیه می‌شود و محاسبات برای هر زاویه صورت می‌گیرد. این تعداد زاویه قابل افزایش است، اما باید توجه داشت که بیش از ۲۰٪ زمان پردازش مربوط به حل معادله انتقال تشعشع می‌باشد و با افزایش تعداد زوایا کل، زمان لازم برای شبیه‌سازی افزایش چشم‌گیری می‌یابد.

۲-۵- واکنش تک مرحله‌ای سریع

در نرم‌افزار FDS ورژن ۶.۳.۲ و این پژوهش، واکنش احتراق به صورت یک واکنش سریع و تک مرحله‌ای به فرم زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۶]:



M ، گونه‌های دیگر موجود در سوخت است که در هر دو طرف واکنش موجود هستند. دوده^۱ در FDS به صورت یک هیدروکربن آروماتیک که تنها دارای کربن و هیدروژن است، مدل می‌شود. ضرایب واکنش به صورت رابطه (۱۸) محاسبه می‌شوند.

نوع سوخت، تعداد اتم‌های هر جز در آن و جرم مولکولی M (در صورت وجود) باید توسط کاربر تعیین شود در غیر این صورت به طور پیش‌فرض از پروپان به عنوان سوخت استفاده می‌شود. هریک از پارامترهای H_{frac} (کسر اتمی هیدروژن در دوده)، γ_{CO} (کسر جرمی منو اکسید کربن تولیدی از یک کیلوگرم سوخت)، γ_{H_2} (کسر جرمی هیدروژن تولیدی از یک کیلوگرم سوخت) و γ_{Soot} (کسر جرمی دوده تولیدی از یک کیلوگرم سوخت)، دارای یک مقدار پیش‌فرض است که توسط کاربر قابل تغییر می‌باشد (به طور مثال مقدار پیش‌فرض γ_{Soot} برابر ۰/۰۱ است). از مقادیر پیش‌فرض در این پژوهش استفاده شده است.

$$\dot{Q}''' = - \sum_{\alpha} \dot{m}_F''' \Delta H_F \quad (11)$$

ترم منبع شیمیایی نیز از طریق رابطه (۱۲) مشخص می‌شود [۱۴ و ۲۰]:

$$\frac{\dot{m}_F'''}{\bar{\rho}} = -\bar{\rho} \frac{\min\left(\frac{Y_F, Y_A}{s}\right)}{\tau_{mix}} \quad (12)$$

که در این رابطه ΔH_F حرارت تشکیل سوخت، Y_A و Y_F غلظت سوخت و هوا، s ضریب استوکیومتری هوا و τ_{mix} زمان واکنش است [۱۴].

۲-۴- مدل انتقال حرارت تابشی

معادله انتقال تابشی در محیطی شامل جذب، نشر و انعکاس، به صورت رابطه (۱۳) خواهد بود [۱۶ و ۲۱]:

$$S \cdot \nabla I_{\lambda}(X, s) = -[\kappa(X, \lambda) + \sigma_s(X, \lambda)] I_{\lambda}(X, s) + B(X, \lambda) + \frac{\sigma_s(X, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \phi(s, s^*) I_{\lambda}(X, s^*) ds^* \quad (13)$$

که در آن $I_{\lambda}(X, s)$ شدت تابش در طول موج λ است. S بردار جهت شدت تابش، $\kappa(X, \lambda)$ و $\sigma_s(X, \lambda)$ به ترتیب ضرایب موضعی جذب و انعکاس بوده و $B(X, \lambda)$ چشمه نشر انرژی تشعشعی می‌باشد. ϕ تابع فاز است که نشان دهنده نسبت انعکاس در یک جهت به انعکاس ایزوتروپ است. در صورتی که از انعکاس صرف‌نظر شود، معادله (۱۳) به فرم (۱۴) تبدیل خواهد شد:

$$S \cdot \nabla I_{\lambda}(x, s) = \kappa(x, \lambda) [I_b(x) - I_{\lambda}(x, s)] \quad (14)$$

که I_b ترم چشمه (شدت تابش جسم سیاه) است و توسط تابع پلانک تعریف می‌شود. شار حرارتی تشعشعی در سطوح جامد به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$\dot{q}_r''(x) = \int_{4\pi} s^* I_{\lambda}(x, s^*) ds^* \quad (15)$$

سهام فاز گازی در معادله انرژی به صورت ترم $\nabla \cdot \dot{q}_r''(x)$ ظاهر می‌شود.

$$-\nabla \cdot \dot{q}_r''(x)(gas) = \kappa(x) [U(x) - 4\pi I_b(x)] \quad (16)$$

$$U(x) = \int_{4\pi} I(x, s^*) ds^*$$

انتقال حرارت تشعشعی در نرم‌افزار FDS به صورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری حل می‌شود. محاسبه معادلات (۱۵) و (۱۶) از طریق روش حجم

^۱ Soot

که در این مرحله فقط دیورژانس سرعت محاسبه می‌شود و نه خود میدان سرعت.

۷. محاسبه معادله پواسون^۱ به منظور به دست آوردن اغتشاشات فشار.

$$\nabla^2 H^n = - \left[\frac{\nabla \cdot \bar{u}^* - \nabla \cdot \bar{u}^n}{\delta t} \right] - \nabla \cdot \bar{F}^n \quad (20)$$

۸. محاسبه سرعت u^* در مرحله پیش‌بینی

$$\frac{u^* - \bar{u}^n}{\delta t} + \bar{F}^n + \nabla H^n = 0 \quad (21)$$

۹. به منظور سنجش مناسب بودن گام زمانی انتخاب شده شرط کورانت-فدریش-لویی^۲ بررسی می‌شود. اگر این شرط (نامعادله (۲۲)) ارضا شود، نرم‌افزار به مرحله اصلاح می‌رود، در غیر این صورت دوباره از بند ۲ با گام زمانی جدید (که برابر ۰/۸ مقدار ماکزیمم δt مجاز است) روند تکرار می‌شود.

$$\delta t \cdot \max \left(\frac{|u|}{\delta t}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) < 1 \quad (22)$$

۱۰. با توجه به ارضاء شرط کورانت، FDS وارد مرحله اصلاح می‌شود. در این مرحله ابتدا مقادیر H^n و u^* در نواحی مرزی شبکه‌های مختلف انتقال می‌یابد.

۱۱. سرعت \bar{u}^* محاسبه می‌شود.

۱۲. اعمال مرحله اصلاح (توسط روش رانگ-کوتا) بر متغیرهای به دست آمده در مرحله ۲ به عنوان مثال برای چگالی ρ^{n+1} در مرحله اصلاح خواهیم داشت.

$$\frac{\rho^{n+1} - \frac{1}{2}(\rho^n + \rho^*)}{\delta t/2} + \nabla \cdot (\rho^* \bar{u}^*) = 0 \quad (23)$$

۱۳. انتقال مقادیر ρ^{n+1} و Y_α^{n+1} در محل اتصال شبکه‌های مختلف و اعمال شرایط مرزی بر ρ^{n+1} و Y_α^{n+1} .

۱۴. محاسبه دیورژانس سرعت در مرحله اصلاح ($\nabla \cdot u^{n+1}$) با توجه به متغیرهای به دست آمده.

۱۵. محاسبه اغتشاشات فشار با توجه به معادله پواسون.

$$v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{CO}}{2} + \frac{v_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2}$$

$$v_{CO_2} = x - v_{CO} - (1 - H_{frac}) v_{Soot}$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} - \frac{H_{frac}}{2} v_{Soot} - v_{H_2}$$

$$v_{CO} = \frac{MW_f}{MW_{CO}} y_{CO}; \quad v_{H_2} = \frac{MW_f}{MW_{H_2}} y_{H_2}$$

$$v_{Soot} = \frac{MW_f}{MW_{Soot}} y_{Soot}; \quad v_{N_2} = \frac{v}{2}$$

$$v_M = w; \quad MW_{Soot} = H_{frac} MW_H + (1 - H_{frac}) MW_C$$

(18)

۲-۶- الگوریتم حل

نرم‌افزار FDS با استفاده از روش اختلاف محدود با دقت مرتبه دوم معادلات پایستگی جرم، مومنتم و انرژی را در طول زمان حل می‌کند. متغیرها در طول زمان با استفاده از روش صریح رانگ-کوتای مرتبه دوم به صورت پیش‌گویی و اصلاح تجدید می‌گردند. مراحل زیر الگوریتم حل را مشخص می‌کنند:

۱. برآورد و حدس ρ_m^n ، u^n ، Y_α^n ، ρ^n و H^n در گام زمانی n ام.

۲. محاسبه میدان سرعت به هم پیوسته متوسط \bar{u}^n . در صورت وجود شبکه‌های مختلف در میدان حل، مقدار سرعت در نواحی اتصال این شبکه‌ها با میان‌یابی بین دو شبکه متصل به هم مشخص می‌شود و به جای مقادیر سرعت قرار داده می‌شود.

۳. محاسبه \bar{p}_m^* ، Y_α^* و ρ^* در مرحله پیش‌بینی با توجه به معادله انتقال حاکم بر آن‌ها. به عنوان مثال چگالی به صورت زیر از معادله پایستگی جرم کلی به دست می‌آید.

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho^n \bar{u}^n) = 0 \quad (19)$$

۴. انتقال مقادیر ρ^* و Y_α^* در محل اتصال شبکه‌های مختلف و اعمال شرایط مرزی بر ρ^* و Y_α^* .

۵. جایگزینی متغیرها در گام زمانی n ام با مقادیر به دست آمده در مرحله پیش‌بینی.

۶. محاسبه دیورژانس سرعت ($\nabla \cdot u^*$) با توجه به داده‌های به دست آمده از مرحله پیش‌بینی. باید توجه شود

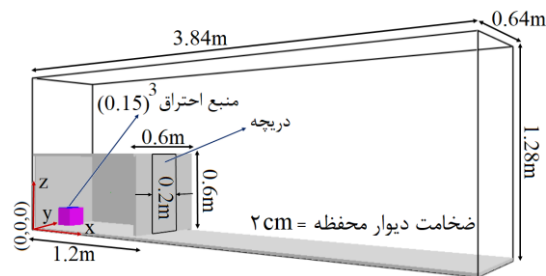
¹ Poisson equation

² Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)

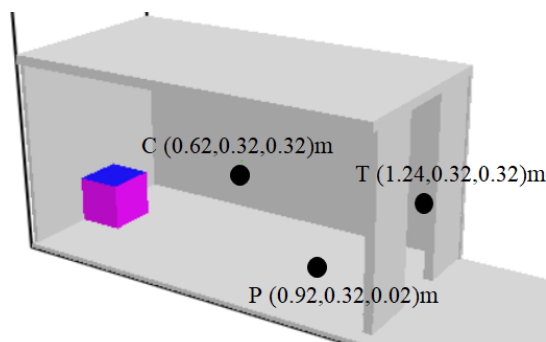
نسبتا زیاد است و در نتیجه امکان بروز پدیده بازفروختگی می‌تواند وجود داشته باشد. هندسه کلی مدل در شکل ۱ آورده شده است.

در این پژوهش از ۳ سنسور (ماژول نرم‌افزاری) برای محاسبه مقادیر دما، فشار دینامیکی و کسر جرمی اکسیژن استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سنسور دما دقیقا در مرکز دریچه قرار دارد؛ چرا که دمای مرکز دریچه می‌تواند بیانگر دما محفظه و دمای پدیده بازفروختگی باشد. مکان قرار گیری سنسور دما با تغییر ابعاد دریچه، تغییر می‌کند؛ اما همواره در مرکز آن قرار خواهد گرفت. مکان سنسور فشار دینامیکی با توجه به پژوهش تجربی ونگ و همکاران [۴] مشخص شده است که همواره در فاصله سه چهارم بعد طولی محفظه از نقطه $(0,0,0)$ ، قرار می‌گیرد.

برای شبیه‌سازی پدیده بازفروختگی در این پژوهش، فرض می‌شود که آتش‌سوزی مدت زیادی در محیط ادامه داشته است و سپس به علت کمبود اکسیژن، آتش خاموش شده باشد؛ در واقع شبیه‌سازی از زمانی شروع می‌شود که



شکل ۱- نمای سه بعدی هندسه در حالت کلی



شکل ۲- مکان سنسور دما، فشار دینامیکی و کسر جرمی اکسیژن

$$\nabla^2 H^* = - \left[\frac{\nabla \cdot u^{n+1} - \frac{1}{2}(\nabla \cdot \bar{u}^* + \nabla \cdot \bar{u}^n)}{\delta t / 2} \right] - \nabla \cdot \bar{F}^* \quad (24)$$

۱۶. محاسبه سرعت در گام زمانی جدید با توجه به بخش اصلاح و گام دوم رانگ-کوتا.

$$\frac{u^{n+1} - \frac{1}{2}(\bar{u}^* + \bar{u}^n)}{\delta t / 2} + \bar{F}^* + \nabla H^* = 0 \quad (25)$$

۱۷. حال که سرعت در گام زمانی جدید محاسبه گردید مقادیر H^* و u^{n+1} در نواحی مرزی شبکه‌های مختلف انتقال می‌یابند. با حل دیگر معادلات، سایر متغیرها در گام زمانی جدید محاسبه می‌گردند و معادلات حاکم حل می‌شوند.

۷-۲- شرایط عددی مسئله

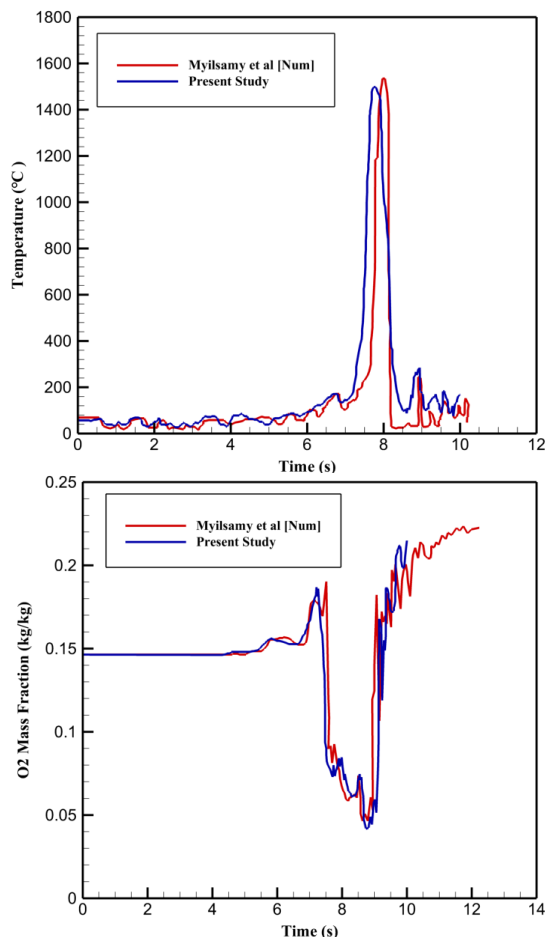
جهت وجود امکان اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، هندسه مدل و شرایط مدل‌سازی استفاده شده در این پژوهش، تقریبا همانند هندسه و شرایط فعالیت عددی مایلسامی و همکاران [۱۴] است، با این تفاوت که در این پژوهش ابعاد دریچه و شرایط منبع احتراق، تغییر می‌کند که در ادامه نتایج حاصل از تغییر این پارامترها، شرح داده خواهد شد. دریچه با ابعاد $0.12 \times 0.16 \text{ m}^2$ ، در شبیه‌سازی‌های مختلف، دقیقا در مقابل منبع احتراق قرار می‌گیرد. از طریق این دریچه جریان هوای آزاد می‌تواند وارد محفظه شود. محفظه شبیه‌سازی شده، دارای طول (در جهت x)، عرض (در جهت y) و ارتفاع (در جهت z)، به ترتیب، $1/2$ ، $1/6$ و $1/6$ متر است. دیوارهای محفظه دارای ضخامت ۲ cm می‌باشند. محفظه مورد نظر، در یک دامنه محاسباتی بزرگ‌تر به ابعاد $3/84$ ، $3/64$ و $1/28$ قرار می‌گیرد تا بتوان رفتار پدیده بازفروختگی را به خوبی مشاهده کرد. از مکعبی به اندازه $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$ که در انتهای محفظه و مقابل دریچه قرار گرفته است، به عنوان منبع آتش استفاده می‌گردد. جنس بدنه منبع آتش از استیل^۱ استفاده شده است؛ که دمای سطح بالایی آن، 1500°C در نظر گرفته می‌شود. مشخصات منبع آتش بر اساس مطالعات ونگ و همکاران [۴ و ۹] انتخاب شده است. با توجه به اندازه بزرگ درب، مقدار هوای ورودی به محفظه

^۱ Steel

جدول ۱- شرایط اولیه شبیه‌سازی در داخل محفظه

کسر جرمی گونه‌ها				دمای لایه‌ها (k) و ارتفاع لایه دما پایین (m)			
Y_{CH4}	Y_{O2}	Y_{CO}	Y_{CO2}	Y_{N2}	T_U	T_L	H_L
۰/۱۲۲۴	۰/۱۴۶۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۲۱	۰/۷۰۹۴	۳۷۶	۳۴۰	۰/۲۸

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که روند تغییرات دما در مرکز دریچه و تغییرات کسر جرمی اکسیژن در مرکز محفظه در شبیه‌سازی، بسیار نزدیک به روند موجود در پژوهش مایلسامی و همکاران [۱۴] است. حداکثر اختلاف بین نتایج بدست آمده کمتر از ۵٪ می‌باشد که با توجه به



شکل ۳- مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و پژوهش مایلسامی و همکاران [۱۴]؛ بالا: تغییرات دما بر حسب زمان در مرکز دریچه و پایین: تغییرات کسر جرمی اکسیژن بر حسب زمان در مرکز محفظه

مواد نیم‌سوز داخل محفظه تشکیل شده و دریچه در ثانیه ۰/۱ باز می‌گردد. در این حالت غلظت گازهای موجود داخل محفظه توزیعی همگن دارد. فضای داخل محفظه، شامل مخلوطی همگن از متان (به عنوان سوخت) با غلظت ۱۲/۲۴٪ جرمی، هوا با غلظت ۸۵٪ جرمی و گازهای دیگر با غلظت کمتر از ۲/۵٪ جرمی است. دمای داخل محفظه نیز با توجه به کار تجربی ونگ و همکاران [۴] در نظر گرفته شده است؛ بدین صورت که دما به دو لایه، دما بالا و دما پایین، داخل محفظه تقسیم می‌شود. مشخصات شرایط اولیه محفظه در جدول ۱ نمایش داده شده است. در تمامی دیوارها شرط عدم وجود انتقال حرارت (شرط بی‌دررو) در نظر گرفته شده است و دمای دیوار نیز با دمای محلی گازهای موجود در محیط برابر گرفته می‌شود.

برای شبکه‌بندی مسئله از سلول‌های مکعبی با اضلاع ۱ cm استفاده شده است که با توجه به ابعاد فضای محاسباتی، تعداد کل سلول‌ها ۳۱۴۵۷۲۸ (۳۸۴×۶۴×۱۲۸) عدد می‌شود. راهنمای نرم‌افزار FDS [۱۶]، پیشنهاد می‌کند که برای آتش با نرخ رهایش حرارتی D_{ai} مقدار $D^*/\Delta x$ باید بین ۴ تا ۱۶ باشد که $D^* = (\dot{Q} / \rho_{amb} c_p T_{amb} \sqrt{g})^{2/5}$ قطر آتش و Δx اندازه ضلع سلول شبکه است. کمیت‌های ρ_{amb} ، c_p و T_{amb} با توجه به شرایط محیط (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) محاسبه می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در این بخش به تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تأثیر پارامترهایی همچون تزریق متان از منبع احتراق، ابعاد دریچه و محل منبع احتراق بر رفتار و دینامیک پدیده بازافروختگی، می‌پردازیم.

به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی، پژوهش مایلسامی و همکاران [۱۴]، مدل شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج عددی ایشان مورد مقایسه قرار گرفته است.

(آتش) در مدت زمان کمتری توسعه پیدا می‌کند و از محفظه خارج می‌شود.

با دقت بیشتر در شکل ۴، می‌توان به این موضوع دست یافت که نوسان و میانگین دما بعد از وقوع پدیده بازافروختگی در حالتی بیشتر است که از منبع احتراق، متان تزریق می‌شود. با تزریق متان به داخل محفظه، غلظت این گونه افزایش پیدا می‌کند و بعد از وقوع پدیده بازافروختگی، مقداری از مواد نیم‌سوز در محفظه باقی می‌ماند. با توجه به دمای بالای محیط و وجود اکسیژن کافی، این مواد نیم‌سوز به تولید حرارت و ایجاد آتش‌سوزی ادامه می‌دهند و در این حالت شاهد میانگین دمای بالاتری بعد از وقوع پدیده بازافروختگی می‌باشیم.

منبع احتراقی که در این بخش مورد بررسی قرار گرفت، در سایر شبیه‌سازی‌ها نیز استفاده شده است. بررسی اثر پارامتر تزریق سوخت و کاهش زمان محاسبات، از دلایل استفاده از این منبع احتراق است.

۳-۲- تغییر ابعاد دریچه با مساحت ثابت

در این پژوهش با اعمال تغییر در ابعاد دریچه، به بررسی رفتار و دینامیک پدیده بازافروختگی پرداخته می‌شود. پارامتر نسبت ابعاد دریچه، به دو صورت مورد بررسی قرار گرفته است؛ در حالت اول، مساحت دریچه ثابت است و نسبت ارتفاع به طول^۱ را کاهش می‌دهیم و در حالت دوم علاوه بر نسبت ارتفاع به طول، مساحت دریچه نیز کاهش می‌یابد.

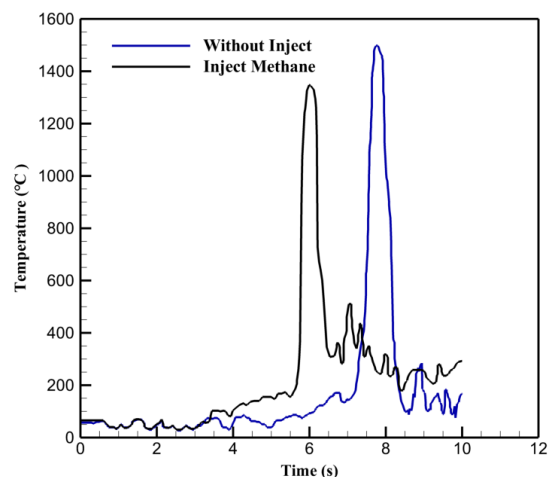
با اعمال تغییراتی که در شکل ۵ نمایش داده شده است، بدیهی است که زمان لازم برای حرکت جریان هوای آزاد از دریچه تا منبع احتراق، تغییر خواهد کرد. با توجه به پژوهش ونگ [۹]، مدت زمان لازم برای رسیدن جریان هوای آزاد به بالای منبع احتراق در حالتی که نسبت ابعاد ۳ است، ۲/۹ ثانیه می‌باشد. این مدت برای نسبت ابعاد ۲/۰۸، ۱/۳۳ و ۰/۷۵ تغییر می‌کند و به ترتیب برابر ۳/۱، ۳/۴ و ۳/۷ ثانیه می‌شود. با توجه به ثابت بودن مساحت دریچه، جریان هوا با کاهش نسبت ابعاد، با گذر زمان بیشتری به بالای منبع احتراق می‌رسد و دلیل آن تقابل بین مواد نیم‌سوز (متان) و جریان هوا است. چگالی مواد نیم‌سوز از چگالی هوا کمتر

پیچیده بودن مسئله مورد بررسی، به دلیل وجود احتراق و گونه‌های مختلف در محیط، دقت به دست آمده در شبیه‌سازی قابل قبول است.

۳-۱- تزریق سوخت از منبع احتراق

سطح بالایی منبع احتراق دارای دمای ۱۵۰۰°C است که بعد از رسیدن جریان هوای آزاد از دریچه به آن، فعال می‌شود. از این منبع احتراق در پژوهش مایلسامی [۱۴] استفاده شده است؛ اما در این پژوهش، مشخصات منبع احتراق با توجه به کار تجربی ونگ [۴] در نظر گرفته می‌شود و مقداری سوخت متان با دبی $0.15 \times 10^{-3} \text{ Kg/s}$ به مدت ۱/۵ ثانیه، به محفظه تزریق می‌شود. در واقع در این بخش تنها با تغییر دادن مشخصات منبع احتراق نسبت به مدلی که برای اعتبارسنجی انجام شده است، به بررسی تاثیر این پارامتر پرداخته می‌شود. شکل ۴، تغییرات دما را برحسب زمان در مرکز دریچه، برای دو منبع احتراق مختلف را نشان می‌دهد.

همان‌طور که شکل ۴ مشاهده می‌شود با تغییر مشخصات منبع احتراق و تزریق متان از آن، وقوع پدیده بازافروختگی به تسریع می‌افتد. نقاط بیشینه دمایی مربوط به لحظه وقوع این پدیده می‌باشد. بیشینه دما در حالتی که از منبع احتراق سوخت تزریق می‌شود، کمتر است؛ چرا که با تزریق متان به محفظه، مواد نیم‌سوز سریع‌تر واکنش داده و پلوم حرارتی



شکل ۴- مقایسه تغییرات دما بر حسب زمان در مرکز دریچه برای دو منبع احتراق متفاوت

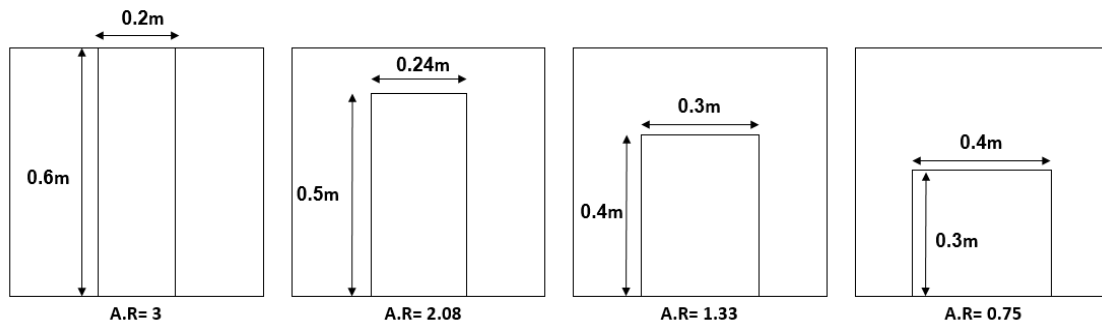
^۱ Aspect Ratio

منبع احتراق و ممانعت موجود بین خروج مواد نیم‌سوز و ورود هوای آزاد (اکسیژن)، از علت‌های تعویق در زمان بروز پدیده بازفروختگی است.

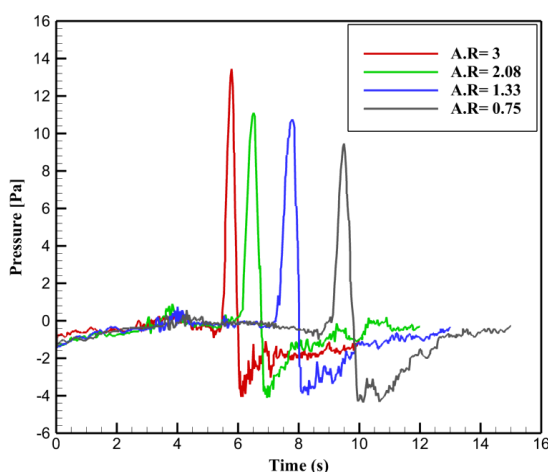
تغییرات فشار دینامیکی پشت درب، در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، با کاهش نسبت ابعاد، فشار دینامیکی نیز از ۱۴ پاسکال به زیر ۱۰ پاسکال کاهش می‌یابد. با کاهش نسبت ابعاد دریچه، مواد نیم‌سوز کمتری در واکنش شرکت می‌کنند [۵]؛ چرا که با کاهش نسبت ابعاد دریچه و خارج شدن شکل آن از حالت دودکش، اکسیژن کمتری به محفظه تزریق می‌شود و واکنش احتراقی متان ناقص‌تر رخ خواهد داد. در واقع با کاهش نسبت ارتفاع به طول درب و تعویق در زمان فعال شدن منبع احتراق، پدیده بازفروختگی ناقص و در فشار پایین‌تر رخ می‌دهد.

است؛ پس با کاهش ارتفاع دریچه، مواد نیم‌سوز در ارتفاع بالاتری قرار گرفته و از ورود جریان هوا آزاد به داخل محفظه ممانعت به عمل می‌آورند.

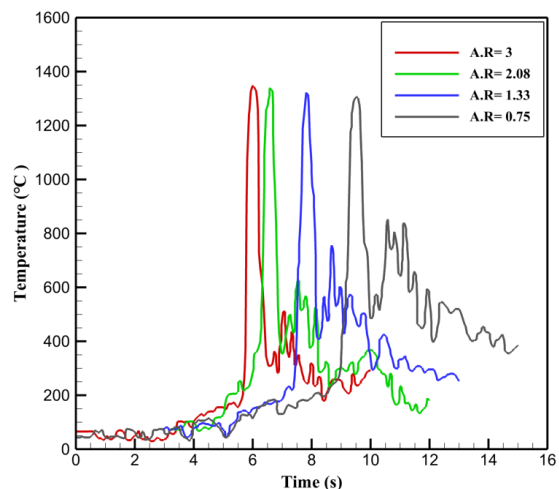
شکل ۶، تغییرات دما را در مرکز دریچه بر حسب زمان، با دریچه‌های مختلف و کاهش نسبت ابعاد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه دما با کاهش نسبت ابعاد در مساحت ثابت، تغییر چندانی نمی‌کند؛ در واقع به دلیل بزرگی اندازه آتش نسبت به ابعاد محفظه و تأثیر زیاد آن بر انتقال حرارت موجود در اتاق، تفاوت دما در حالت‌های مختلف ابعاد دریچه اندک است. با توجه به شکل ۶، با کاهش نسبت ابعاد درب، پدیده بازفروختگی به تعویق می‌افتد. بازفروختگی در نسبت ابعاد ۳، ۲/۰۸، ۱/۳۳ و ۰/۷۵، به ترتیب بعد از گذر زمان ۵/۹، ۶/۵، ۷/۸ و ۹/۵ ثانیه رخ داده و به بیشینه دمای خود رسیده است. تعویق در زمان فعال شدن



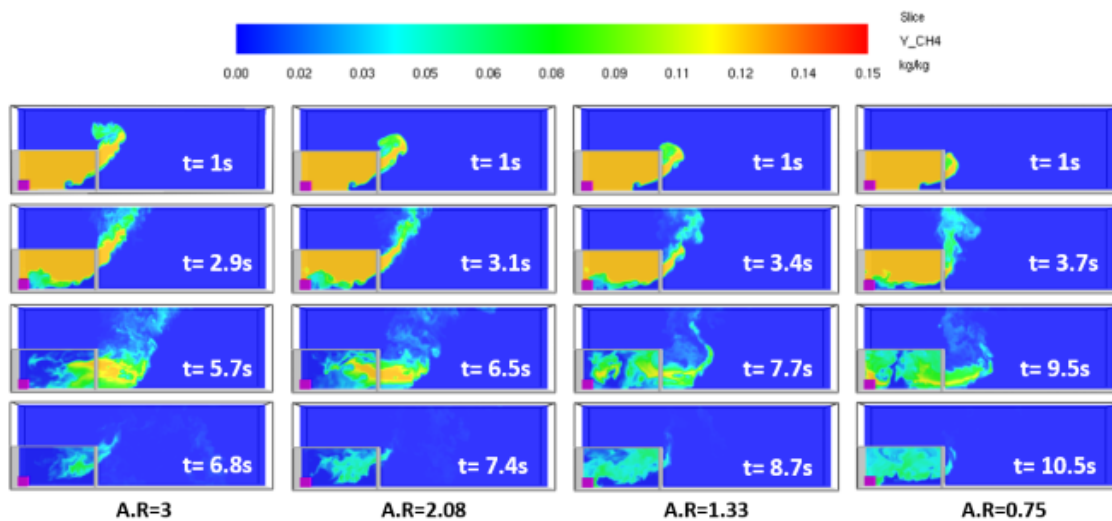
شکل ۵- شماتیک تغییر ابعاد دریچه با مساحت ثابت



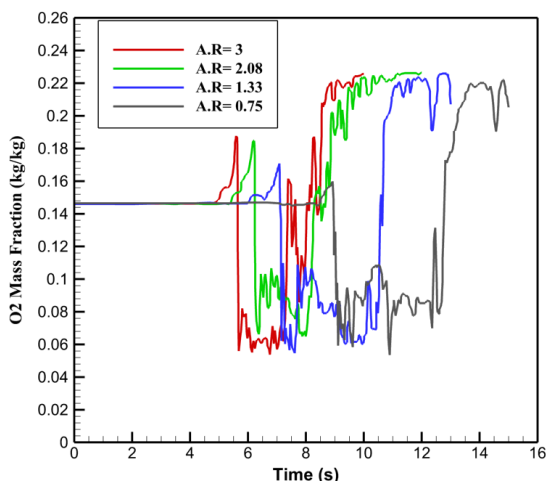
شکل ۷- تغییرات فشار دینامیکی بر حسب زمان برای نسبت ابعاد مختلف دریچه با مساحت ثابت



شکل ۶- تغییرات دما بر حسب زمان در مرکز دریچه برای نسبت ابعاد مختلف دریچه با مساحت ثابت



شکل ۸- مقایسه کانتور کسر جرمی متان در زمان‌ها و نسبت ابعاد مختلف دریچه با مساحت ثابت



شکل ۹- تغییرات کسر جرمی اکسیژن بر حسب زمان در مرکز محفظه برای نسبت ابعاد مختلف دریچه

کم دریچه، امکان وقوع مجدد پدیده بازافروختگی دوم بعد از بازافروختگی اول، وجود خواهد داشت.

۳-۳- تغییر ارتفاع و مساحت دریچه

در این حالت، فقط ارتفاع دریچه را کاهش می‌دهیم تا تاثیر آن بر رفتار بازافروختگی مشاهده شود؛ بدیهی است که با کاهش و افزایش ارتفاع، مساحت دریچه نیز تغییر خواهد کرد. با اعمال تغییراتی که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، بدیهی است که زمان لازم برای حرکت جریان هوای آزاد از دریچه تا منبع احتراق، تغییر خواهد کرد. مدت زمان

شکل ۸، کانتور کسر جرمی (غلظت) متان را در زمان‌های مختلف از جمله زمان وقوع پدیده بازافروختگی نشان می‌دهد که برای نسبت ابعاد ۳، ۲/۰۸، ۱/۳۳ و ۰/۷۵، به ترتیب بعد از گذر زمان ۵/۹، ۶/۵، ۷/۸ و ۹/۵ ثانیه است. همان‌طور که مشخص است، با کاهش نسبت ابعاد دریچه، بعد از وقوع پدیده بازافروختگی مقداری از مواد نیم‌سوز در داخل محفظه می‌مانند و در واکنش شرکت نمی‌کنند. باقی ماندن این مواد در داخل محفظه، افزایش نوسان و میانگین دما را بعد از وقوع پدیده بازافروختگی (شکل ۶)، به دنبال دارد؛ همچنین این موضوع می‌تواند بروز بازافروختگی دوم را بعد از بازافروختگی اول، در صورت کاهش اکسیژن، به همراه داشته باشد.

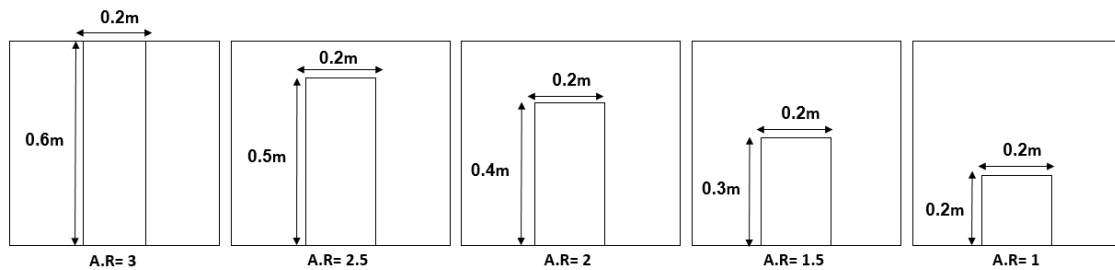
شکل ۹، تغییرات کسر جرمی اکسیژن را در مرکز محفظه، با نسبت ابعاد مختلف دریچه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدای شروع پدیده بازافروختگی، اکسیژن وارد شده به محفظه، با افزایش نسبت ابعاد درب، افزایش پیدا کرده است. یعنی با افزایش نسبت ابعاد دریچه و نزدیک شدن شکل دریچه به حالت دودکش، این امکان برای مواد نیم‌سوز داخل محفظه فراهم می‌شود که تقریباً همه آن‌ها با اکسیژن کافی برای احتراق، ترکیب شده و واکنش دهند. همچنین با توجه به شکل ۹ دیده می‌شود که با کاهش نسبت ابعاد دریچه، مدت زمان لازم برای پر شدن محفظه از جریان هوای آزاد (۲۲٪ جرمی اکسیژن)، افزایش یافته است. از این نکته می‌توان به این نتیجه رسید که با توجه به باقی ماندن مواد نیم‌سوز داخل محفظه برای نسبت ابعاد

دریچه ربط داد. در واقع با کاهش مساحت دریچه، پلوم حرارتی بایستی از محیطی کوچک‌تر خارج شود و بدیهی است که آشفتنگی افزایش پیدا کرده و پلوم حرارتی، تمام سطح مقطع دریچه را شامل می‌شود.

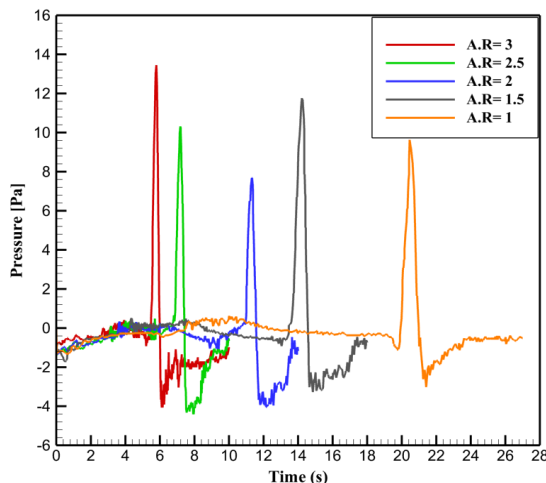
شکل ۱۲، تغییرات فشار دینامیکی را در پشت دریچه نشان می‌دهد. با کاهش ارتفاع و مساحت دریچه، سرعت و در نتیجه فشار دینامیکی کاهش پیدا کرده است. با کاهش ارتفاع دریچه از ۰/۴ تا ۰/۲ متر انتظار می‌رود، فشار دینامیکی نیز کاهش یابد؛ اما در شکل ۱۲، شاهد افزایش فشار در این بازه هستیم. علت این افزایش فشار را می‌توان به تأثیر شکل هندسی دریچه و افزایش آشفتنگی پلوم حرارتی، ربط داد. با کاهش بیش از حد مساحت دریچه، سرعت افزایش پیدا کرده و باعث افزایش فشار در ارتفاع ۰/۳ متر دریچه شده است. سناریویی که در این بخش مورد بررسی قرار گرفت، شامل مزایا و معایبی است که می‌تواند برای اطفاء یا جلوگیری

لازم برای رسیدن جریان هوای آزاد به بالای منبع احتراق برای ارتفاع دریچه ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲ متر، به ترتیب برابر ۳/۲، ۳/۷، ۴/۴ و ۷/۵ ثانیه است.

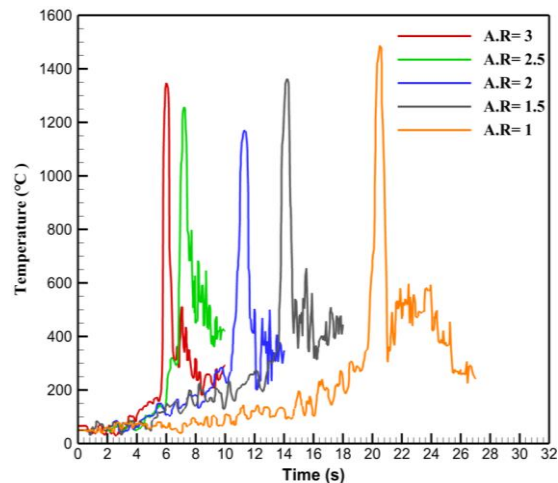
شکل ۱۱، تغییرات دما بر حسب زمان را در مرکز دریچه، برای ارتفاع‌های مختلف آن، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش مساحت و ارتفاع دریچه، پدیده بازفروختگی به تعویق می‌افتد؛ همچنین با افزایش مساحت و ارتفاع دریچه از ۰/۴ تا ۰/۶ متر، دما افزایش پیدا کرده و این به خاطر همان اکسیژن بیشتر جذب شده است. زمانی که سطح مقطع را افزایش می‌دهیم، اکسیژن بیشتری در واحد زمان به محصولات احتراق و مواد نیم‌سوز تزریق می‌شود و همین موضوع، تسریع در وقوع پدیده بازفروختگی و افزایش دما را در بر دارد. در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که دما با کاهش ارتفاع دریچه از ۰/۳ تا ۰/۲ متر، افزایش پیدا کرده است. این نتیجه را می‌توان به تأثیر کاهش سطح مقطع



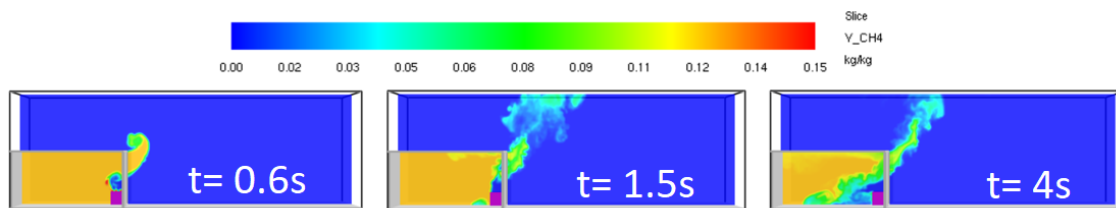
شکل ۱۰- شماتیک تغییر ارتفاع دریچه با تغییر مساحت



شکل ۱۲- تغییرات فشار دینامیکی بر حسب زمان در پشت دریچه با تغییر ارتفاع و مساحت دریچه



شکل ۱۱- تغییرات دما بر حسب زمان در مرکز دریچه با تغییر ارتفاع و مساحت دریچه



شکل ۱۳- کانتور کسر جرمی متان در زمان‌های مختلف برای حالت NWO

فراهم می‌شود که پدیده بازافروختگی رخ ندهد و اطفاء شود که این نتایج در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.

برای حالتی که منبع احتراق در مرکز قرار می‌گیرد، نتایج با حالت NWO متفاوت است. تغییرات دما بر حسب زمان برای حالتی که منبع در مرکز محفظه (CEN) قرار دارد، در شکل ۱۴ نشان داده می‌شود.

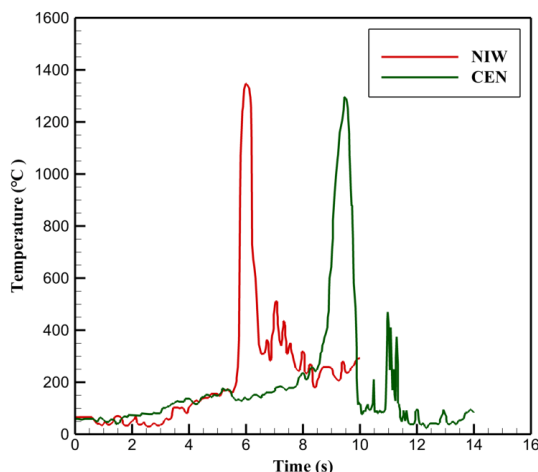
با توجه به شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن منبع احتراق به دریچه یعنی حالت CEN، وقوع پدیده بازافروختگی به تعویق می‌افتد و تقریباً در زمان ۹/۵ ثانیه رخ داده است؛ همچنین دما در نقطه پیک و میانگین دما بعد از وقوع بازافروختگی، نسبت به حالت NIW کمتر است.

زمانی که منبع احتراق در مرکز محفظه (CEN) قرار می‌گیرد، بسیاری از مواد نیم‌سوز که در نیمه سمت راست منبع قرار دارند، به صورت پلوم حرارتی با اکسیژن هوای آزاد واکنش داده و از محفظه خارج می‌شوند؛ بنابراین در زمان وقوع پدیده بازافروختگی، مواد نیم‌سوز در غلظت کمتر با

از وقوع پدیده بازافروختگی مؤثر باشد. بر اساس نتایجی که از تغییرات دما و فشار بدست آمد، بهترین انتخاب برای ارتفاع دریچه، ۰/۴ متر است؛ یعنی برای جلوگیری از اثرات مخرب پدیده بازافروختگی بهتر است، ارتفاع درب چهار شیشم ارتفاع دیوار انتخاب شود. امکان وقوع مجدد پدیده بازافروختگی به واسطه باقی ماندن محصولات احتراق در محفظه، مثل بخش ۲-۳، از جمله معایب عملکرد این پارامتر است.

۳-۴- تغییر مکان منبع احتراق

در این قسمت با تغییر دادن محل منبع احتراق از انتهای محفظه^۱ به مرکز محفظه^۲ و نزدیک دریچه^۳، به بررسی رفتار پدیده بازافروختگی می‌پردازیم. با تغییر مکان منبع احتراق، زمان لازم برای رسیدن جریان هوای آزاد به بالای منبع، تغییر می‌کند و در حالتی که منبع احتراق در مرکز قرار می‌گیرد این زمان ۱/۵ ثانیه است. برای حالتی که منبع نزدیک دریچه است این زمان به ۰/۳ ثانیه کاهش می‌یابد. در حالتی که منبع احتراق در فاصله بسیار کم از دریچه قرار می‌گیرد (NWO)، پلوم حرارتی به سرعت به سمت خارج از دریچه گسترش یافته و بالای منبع احتراق به یک فضای عاری از مواد نیم‌سوز تبدیل می‌شود. این نتیجه با توجه به پژوهش وو و همکاران [۶] نیز قابل توجیه است. از آنجایی که چگالی مواد نیم‌سوز کمتر از چگالی هوا است، با باز شدن دریچه، این مواد از بالای درب خارج می‌شوند و فقط مقدار کمی از مواد نیم‌سوز که بالای منبع احتراق قرار دارند، با اکسیژن هوا واکنش داده و به خارج محفظه رانده خواهند شد. در واقع با نزدیکی منبع احتراق به دریچه، این امکان



شکل ۱۴- تغییرات دما بر حسب زمان در مرکز دریچه برای دو حالت محل منبع احتراق NIW و CEN

¹ Near Inside Wall (NIW)

² Compartment Center (CEN)

³ Near Window Opening (NWO)

همین کمتر بودن غلظت محصولات احتراق برای حالت CEN، دلیل اصلی کاهش فشار دینامیکی این حالت، در شکل ۱۵ است.

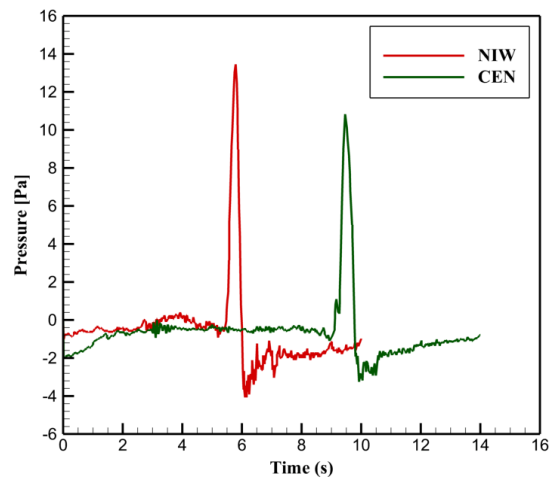
۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و بکارگیری نرم‌افزار FDS، به خوبی دینامیک و رفتار پدیده بازفروختگی مورد مطالعه قرار گرفت. از یک واکنش احتراقی سریع برای بررسی پدیده بازفروختگی در یک محفظه بسته استفاده شد. در این پژوهش، رفتار پدیده بازفروختگی جهت اطفاء، تعویق یا جلوگیری از وقوع آن، با استفاده از ۳ پارامتر مؤثر، مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای تزریق سوخت از منبع احتراق، تأثیر ابعاد دریچه با دو روش (ثابت در نظر گرفتن مساحت و تغییر ابعاد، کاهش مساحت همراه با تغییر ابعاد) و تغییر مکان منبع احتراق، شبیه‌سازی و تحلیل شدند. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی، پژوهش حاضر با مقاله مایلسامی و همکاران [۱۴] مورد مقایسه قرار گرفت که با توجه به پیچیده بودن مسئله مورد بررسی، به دلیل وجود احتراق و گونه‌های مختلف در محیط، دقت به دست آمده در شبیه‌سازی قابل قبول بود.

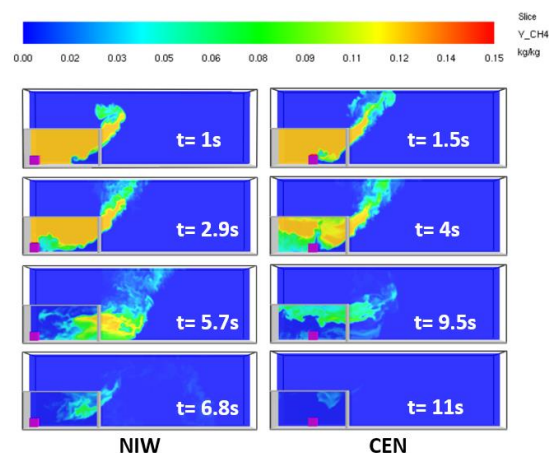
کاهش نسبت ابعاد دریچه، توانست زمان وقوع پدیده بازفروختگی را به تعویق بی‌اندازد و همچنین نقش مؤثری در کاهش فشار دینامیکی حاصل از این پدیده، داشته باشد. امکان بروز بازفروختگی دوم و افزایش میانگین دما بعد از بازفروختگی اول، از جمله معایب استفاده از این پارامتر است. کاهش مساحت دریچه، تغییرات متفاوتی در مقادیر فشار و دما ایجاد کرد؛ اما بررسی شد که بهترین ارتفاع برای دریچه (جهت کاهش خطرات ناشی از بازفروختگی)، چهار ششم ارتفاع دیوار است. با توجه به نتایجی که بدست آمد، شاید بتوان گفت تنها پارامتری که می‌تواند منجر به اطفاء پدیده بازفروختگی شود و از وقوع آن جلوگیری کند، تغییر مکان منبع احتراق و نزدیک کردن آن به دریچه است. در این پژوهش با نزدیک کردن منبع احتراق به دریچه، ما شاهد ضعیف شدن پدیده بازفروختگی از نظر فشاری یا حتی اطفاء کامل این پدیده، بودیم. نتایج در حالت کلی، این را بیان می‌کند که اگر غلظت کمتری از سوخت و مواد نیم‌سوز در واکنش شرکت کنند، امکان وقوع پدیده بازفروختگی در

اکسیژن موجود در هوا، واکنش داده و باعث کاهش فشار دینامیکی در حالت CEN شده است که این نتیجه را می‌توان در شکل ۱۵ مشاهده کرد.

شکل ۱۶، کانتور کسر جرمی متان را در زمان‌های مختلف برای دو حالت CEN و NIW نشان می‌دهد. دو زمان ۹/۵ ثانیه برای CEN و ۵/۷ ثانیه برای NIW، بسیار حائز اهمیت هستند؛ چرا که زمان وقوع بازفروختگی را برای این دو حالت نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، غلظت مواد نیم‌سوز در حالت CEN در زمان وقوع پدیده بازفروختگی، بسیار کمتر از حالت NIW است و



شکل ۱۵- تغییرات فشار دینامیکی بر حسب زمان در پشت دریچه برای دو حالت محل منبع احتراق CEN و NIW



شکل ۱۶- کانتور کسر جرمی متان در زمان‌های قبل و بعد بازفروختگی برای CEN و NIW

[۱۲] امیری پ، گنجی ر، افشین ح، فرهانیه ب (۱۳۹۲) بررسی عملکرد سناریوهای مختلف اطفاء حریق، برای یک محیط بسته با احتمال بروز پدیده بک‌درافت. سومین همایش ملی تهویه و بهداشت صنعتی.

- [13] Park JW, Oh CB, Choi BI, Han YS (2017) Computational study of backdraft dynamics and the effects of initial conditions in a compartment. *J Mech Sci Technol* 31(2): 985-993.
- [14] Myilsamy D, Bo C, Choi BI (2019) Large eddy simulation of the backdraft dynamics in compartments with different opening geometries. *J Mech Sci Technol* 33(5): 1-13.
- [15] Krol A, Krol M, Krawiec S (2020) A numerical study on fire development in a confined space leading to backdraft phenomenon. *Energies* 13(7): 1854.
- [16] McGrattan K, McDermott R, Hostikka S, Floyd J, Weinschenk C, Overholt K (2015) Fire dynamics simulator (version 6.3.2) technical reference guide. NIST SP 1018-1.
- [17] Forney GP (2015) User's guide for smokeview version 6.3.2. A tool for visualizing fire dynamics simulation data. NIST Special Publication 1017-1.
- [18] Turns SR (2000) An introduction to combustion: concepts and applications. McGraw-Hill.

[۱۹] جوشقانی م (۱۳۸۳) بررسی ساختارهای بزرگ حرکتی در پدیده جابجایی آزاد پلوم با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ. دانشگاه صنعتی شریف.

[۲۰] حیدری‌نژاد ق، پاسدارشهری ه، صفرزاده م (۱۳۹۹) اهمیت استفاده از مدل احتراقی و زیرشبکه مناسب به‌منظور مدل‌سازی الگوی جریان در آتش استخری بزرگ‌مقیاس. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر ۲۴۴۲-۲۴۲۵: ۵۲(۹).

[۲۱] خسروی‌الحسینی م، رحیم‌پار هریس د، درستی ق (۱۳۹۱) مقایسه روش‌های حل معادله انتقال تشعشع در مدل‌سازی مشعل متخلخل. مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس ۴۱-۳۰: ۱۲(۶).

فشارهای پایین فراهم می‌شود که این نتیجه با نتایج گجکوویچ [۳]، ونگ و فان [۴] و مایلسامی و همکاران [۱۴] مطابقت داشت.

۵- مراجع

- [1] Fleischmann CM (1994) Backdraft phenomenon. National Institute of Standards and Technology, USA, NIST-GCR-94-646.
- [2] Fleischmann CM, McGrattan KB (1999) Numerical and experimental gravity currents related to backdrafts. *Fire Safety J* 33: 21-34.
- [3] Gojkovic D (2000) Initial backdraft experiments. Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden.
- [4] Weng WG, Fan WC (2003a) Critical condition of backdraft in compartment fires: A reduced-scale experimental study. *J Loss Prevent Proc* 16(1): 19-26.
- [5] Weng WG, Fan WC, Yang LZ, Song H, Deng ZH, Qin J, Liao GX (2003b) Experimental study of back-draft in a compartment with openings of different geometries. *Combust Flame* 132(4): 709-714.
- [6] Wu J, Zhang Y, Gou X, Yan M, Wang E, Liu L (2011) Experimental research on gas fire backdraft phenomenon. *Procedia Environ Sci* 11: 1542-1549.
- [7] Weng WG, Fan WC (2004) Nonlinear analysis of the backdraft phenomenon in room fires. *Fire Safety J* 39: 447-464.
- [8] Yang R, Weng WG, Fan WC, Wang YS (2005) Subgrid scale laminar flamelet model for partially premixed combustion and its application to backdraft simulation. *Fire Safety J* 40(2): 81-98.
- [9] Weng WG, Fan WC, Hasemi Y (2005) Prediction of the formation of backdraft in a compartment based on large eddy simulation. *Eng Computation* 22(4): 376-392.
- [10] Ferraris SA, Wen JX, Dembele S (2008) Large Eddy Simulation of the backdraft phenomenon. *Fire Safety J* 43(3): 206-225.
- [11] Horvat A, Sinai Y (2007) Numerical simulation of backdraft phenomena. *Fire Safety J* 42(3): 200-209.