



بررسی جریان هوای القایی حاصل از آتش‌سوزی در فضای دو اتاقی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

قاسم حیدری‌نژاد^{۱*}، هادی پاسدار شهری^۲، کیومرث مظاهری^۳

۱- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، gheidari@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله جریان هوای القایی حاصل از آتش‌سوزی در یک اتاق و اثرات آن بر اتاق مجاور بررسی می‌شود. برای این منظور، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با دو مدل زیرشبکه اسماغورینسکی و یک-معادله‌ای در دو حالت منبع آتش در مرکز و گوشه اتاق در توان‌های حرارتی مختلف آتش‌سوزی، بکار برده می‌شود. اثرات احتراق، با استفاده از مدل اتلاف گردابه‌ای اصلاح شده و تابش، با استفاده از مدل جهت گسسته لحاظ شده است. مقایسه نتایج با نتایج تجربی نشان می‌دهد که هر دو مدل زیرشبکه رفتار تغییرات دما در نواحی مختلف اتاق آتش و اتاق مجاور آن را به خوبی تخمین می‌زنند، اما مدل یک-معادله‌ای دقت بالاتری نسبت به مدل اسماغورینسکی دارد. میزان اختلاط هوای ورودی به اتاق آتش در حالتی که منبع آتش در مرکز اتاق است بیشتر از زمانی است که منبع، در گوشه قرار دارد.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان القایی آتش‌سوزی، اسماغورینسکی، یک-معادله‌ای.

Evaluation of induced-flow in a two-room compartment fire using large eddy simulation

G. Heidarinejad^{1*}, H. Pasdarshahri², K. Mazaheri

1- Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- PhD. Candidate, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

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

* P. O. B. 14115-143 Tehran, Iran. gheidari@modares.ac.ir

Abstract- A numerical study for the simulation of induced-flow by a two-room compartment fire has been accomplished using a fully-coupled Large Eddy Simulation (LES) model which incorporates Smagorinsky and One-Equation Sub-Grid Scale (SGS) turbulence models. Also, modified Eddy Dissipation Concept (EDC) and Discrete Ordinate Methods (DOM) are used for incorporating combustion and radiation, respectively. The models are applied for a range of total heat release rate (HRR) for fire source in the center and corner of the fire room. Numerical results of prediction by each SGS model are validated and compared against well-known available experimental data. The predicted time-averaged temperature profiles at different location of the compartment for each case have been calculated and found to be in good agreement with the experimental data. The results also show that the accuracy of One-Equation SGS model for the prediction of the characteristics of fire is higher than those obtain by Smagorinsky SGS model. The air mixture at the fire room opening is higher for the centrally located fire source than the corner one.

Keywords: Large Eddy Simulation, Fire Induced Flow, Smagorinsky, One-Equation.

۱- مقدمه

یکی از جریان‌های پیچیده در مسائل احتراقی، آتش و جریان‌های القایی حاصل از آن در هنگام آتش‌سوزی است. در علوم احتراقی، آتش به عنوان احتراق کنترل نشده و یا رشد و انتشار شعله ناخواسته تعریف می‌شود. سازوکارهای مختلفی نظیر نفوذ، جابجایی، جریان‌های شناوری، جریان‌های ورودی به ناحیه احتراق، اختلاط توربولانسی، واکنش شیمیایی و انتقال حرارت تابشی در مسائل شبیه‌سازی دینامیکی رفتار آتش‌سوزی وجود دارد [۱]. در این میان آتش‌سوزی در فضاهای بسته (محصور)^۱ به دلیل اثراتی که این فضا بر رژیم شعله و جریان‌های احتراقی دارد، از نگاه کاربردی و ایمنی حائز اهمیت است [۲]. یکی از مهمترین مواردی که بر رشد و انتشار آتش در فضای بسته مؤثر است، وجود بازشو و ارتباط آن با فضای مجاور است. در واقع شبیه‌سازی جریان از بازشو و اثر جریان‌های احتراقی حاصل از آتش‌سوزی بر اتاق و فضاهای مجاور تأثیر کلیدی در رشد و انتشار آتش دارد. به همین دلیل استفاده از مدل‌های مناسب و توانمند برای شبیه‌سازی این جریان ضروری است. از سوی دیگر، شناخت و شبیه‌سازی صحیح این جریان، به تصمیم‌گیری مناسب در طول فرایند اطفاء حریق کمک خواهد کرد.

به طور کلی دو مدل ناحیه‌ای^۲ و میدانی^۳ برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی در فضای بسته به کار می‌رود. اولین مدل‌هایی که در این راستا ایجاد شدند، مدل‌های ناحیه‌ای بودند. در این مدل‌ها [۳-۷] ناحیه محاسباتی به دو و یا چند ناحیه فیزیکی تقسیم می‌شود. هر کدام از این نواحی با مجموعه‌ای از معادلات ساده که عمدتاً بر پایه مشاهدات و یا روابط تجربی است، معرفی می‌شوند. در واقع در هر کدام از این نواحی مقدار متوسطی از کمیت مورد بررسی بیان می‌شود. این مدل‌ها زمان محاسباتی اندکی دارند و برای تخمین‌های مهندسی و استفاده در هندسه‌های ساده، مناسب هستند. محدودیت‌های اصلی این مدل‌ها را می‌توان به صورت زیر برشمرد [۸]:

- اطلاعات محدودی را در خصوص رشد آتش در اختیار قرار می‌دهد؛
- شناخت اولیه در خصوص ساختار جریان در فضای مورد

بررسی ضروری است؛

- امکان استخراج جریان‌های غالب در رشد آتش را ندارند؛
- امکان بررسی تأثیر تغییرات لحظه‌ای در جریان را بر انتشار آتش ندارند.

مدل‌های میدانی بر پایه معادلات بقا در غالب مشتقات جزئی و استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی بنا نهاده شده است. بر همین اساس کدهای کامپیوتری اولیه نظیر یون‌دی‌سیف [۹]، جاسمین [۱۰]، فونیکس [۱۱]، فلوتریدی [۱۲] و سوفی [۱۳] اولین کدهای کامپیوتری بودند که بر مبنای معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده ناویر استوکس^۴ بنا و برای شبیه‌سازی این جریان‌ها استفاده می‌شدند. در بیشتر مطالعات اولیه، شبیه‌سازی در حالت دوبعدی انجام و از یک منبع حرارتی به جای آتش استفاده می‌شد. یتو و همکارانش [۱۴] با استفاده از روش RANS فرایند شبیه‌سازی آتش در فضای تک اتاقی، دو اتاقی و چند اتاقی را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی ایشان با این مدل نشان می‌دهد که لحاظ کردن اثرات انتقال حرارت تابشی در شبیه‌سازی این فرایند تأثیر مستقیمی بر دقت پیش‌بینی دمای شعله و محصولات احتراق دارد در حالی که اثر آن بر پیش‌بینی میدان سرعت، ناچیز است. استاوراکاکیس و مارکاتوس [۱۵]، جریان حاصل از آتش در فضای تک اتاقی و دو اتاقی را بررسی کردند. در مطالعه ایشان، به جای آتش از منبع حرارتی معادل استفاده شده و دو مدل $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ RNG با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مطالعه ایشان نشان می‌دهد که دو مدل، نتایج قابل قبولی در پیش‌بینی سرعت دارند، اما مدل $k-\epsilon$ RNG، دما را با دقت بالاتری، تخمین می‌زند. خسیب و همکارانش [۱۶] با استفاده از روش‌های URANS و با کمک نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس جریان آتش در یک اتاق را مدل کردند و نشان دادند که مدل استفاده شده پیش‌بینی قابل قبولی از رفتار غیر دائم آتش دارد. به طور کلی روش‌های RANS بر مبنای متوسط‌گیری زمانی معادلات ناویر استوکس بنا نهاده شده است. بنابراین، این روش‌ها نوسانات ایجاد شده در جریان و اثرات آن بر کمیت‌ها را به خوبی پیش‌بینی نمی‌کنند و موجب خطا در مدل‌سازی به خصوص در حالت غیردائم می‌شود. روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۵ رویکردی دیگر در حل معادلات ناویر

4. Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

5. Large Eddy Simulation (LES)

1. Compartment Fire
2. Zone Model
3. Field Model

شبیه‌سازی آتش‌سوزی و جریان القایی آن در فضای دو اتاقی، بررسی می‌شود. به منظور مطالعه پارامتری و آنالیز حساسیت هر کدام از این دو مدل زیر شبکه، توان‌های مختلف آتش‌سوزی و اثر مکان منبع آتش نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- فیزیک جریان آتش در فضای بسته

بر خلاف آتش‌سوزی در فضای باز، آتش‌سوزی فضای بسته به دلیل اثرات مرزهای جامد و بازشو، دارای رژیم‌های مختلفی است. به طور کلی آتش در فضای بسته شامل مراحل زیر است [۸]:

- اشتعال^۶: در این مرحله سوخت جامد و یا گازی در اثر جرقه و و یا عامل دیگر، شروع به سوختن می‌کند.

- رشد^۷: در این مرحله گازهای داغ حاصل از فرایند احتراق به دلیل نیروهای شناوری به سمت بالا حرکت می‌کنند. در واقع در این مرحله، پلوم آتش تشکیل می‌شود. حرکت جریان هوای داغ به بالا، با نفوذ جریان‌های اطراف به سمت پلوم همراه است. با تجمع جریان هوای داغ در بالا، در صورت وجود بازشو این جریان از بازشو به بیرون حرکت می‌کند و موجبات ورود هوای تازه را به اتاق آتش فراهم می‌کند.

- سوزش^۸: در این مرحله تمامی محصولات قابل احتراق در حال حال سوختن هستند.

- آتش توسعه یافته^۹: در این مرحله حرارت آزاد شده از آتش‌سوزی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در اینجا توسعه و رشد آتش منوط به حضور اکسیژن کافی است. این مرحله در واقع، مرحله‌ای شبیه پایدار است و در صورت وجود بازشو مرتبط با فضای بیرون و سوخت کافی، اکسیژن وارد اتاق آتش شده و محصولات داغ حاصل از احتراق خارج می‌شوند.

- خاموشی^{۱۱}: با تمام شدن سوخت و یا کم شدن اکسیژن، حرارت آزاد شده از آتش کاهش یافته و آتش شروع به خاموش شدن می‌کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود به لحاظ ایمنی و پیچیدگی، بدترین شرایط، سناریوی آتش‌سوزی در مرحله کاملاً توسعه یافته است. این سناریو برای آتش‌سوزی دو اتاقی در این مطالعه

استوکس است. در این روش‌ها، گردابه‌های بزرگ از حل مستقیم معادلات محاسبه می‌شود و اثرات گردابه‌های کوچک با استفاده از مدل‌های زیر شبکه^۱ مدل می‌شوند. به دلیل آنکه در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اثرات نوسانات در زیر شبکه لحاظ شده است، محاسبه متغیرها به صورت لحظه‌ای امکان‌پذیر است. مک‌گراتان [۱۷] برای اولین بار روش LES را برای شبیه‌سازی جریان آتش در حالت دو بعدی بکار برد. بر اساس این مدل اولیه، این روش به حالت‌های سه‌بعدی و با لحاظ شدن جزئیات بیشتر در خصوص زیر مدل‌ها توسعه یافت [۱۸-۲۰]. بر اساس همین مطالعات، در ابتدای سال ۲۰۰۰، موسسه ملی استاندارد و تکنولوژی^۲ ایالات متحده نرم‌افزار رایگان شبیه‌ساز دینامیک آتش^۳ را ارائه نمود [۲۱]. محققان متعددی از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آتش‌سوزی استفاده کردند [۲۲-۲۵]. سان و همکارانش [۲۲]، با کمک FDS جریان هوای حاصل از آتش سوزی را در مسیر پلکانی مدل کردند. چو و زو [۲۳] با استفاده از این نرم‌افزار رابطه‌ای جبری و ساده برای محاسبه نرخ جریان از بازشو بدست آوردند. وانگ و کوئینتیر [۲۶] نتایج حاصل از FDS را با مدل ناحیه‌ای و روابط تجربی در شبیه‌سازی جریان درب اتاق آتش مقایسه نمودند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که شرط مرزی تخلیه در نرم‌افزار FDS در پیش‌بینی جریان از بازشو ناتوان است. مرسی و مائله [۲۴]، جریان در اتاق آتش با درب بازشو و بازشوی سقفی را مدل نمودند. نتایج مطالعات ایشان نشان می‌دهد اثر محل قرار گیری منبع آتش بر پروفیل دما در اتاق بسیار بیشتر از محل دریچه سقفی است. چئونگ و یئو [۲۷]، جریان‌های لحظه‌ای و سیکل پف^۴ در آتش‌سوزی در محیط باز را با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مدل کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که این روش توانایی خوبی در پیش‌بینی رفتار نوسانی جریان و فرکانس آن دارد.

با توجه به مطالعات نگارندگان، تاکنون مطالعه مشخصی در خصوص اثر مدل‌های زیر شبکه بر شبیه‌سازی جریان آتش در فضای بسته صورت نگرفته است. به همین دلیل در این مقاله دو مدل زیر شبکه اسماگورینسکی^۵ و یک-معادله‌ای^۶ برای

6. One-Equation

7. Ignition

8. Spread

9. Flashover

10. Fully-Developed Fire

11. Decay

1. Sub-grid Scale (SGS)

2. National Institute of Standard and Technology (NIST)

3. Fire Dynamic Simulator (FDS)

4. Puff Cycle

5. Smagorinsky

ترم‌های S_ϕ و S_{rad} نیز نرخ انتقال حرارت تابشی و ترم تولید در معادلات انرژی و گونه هستند. تانسور تنش‌های لزجی، بردار شار حرارتی و شار جرمی، هر کدام به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

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

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

عدد پرانتل و اشمیت در این مطالعه (۰/۷) در نظر گرفته می‌شوند [۲۸]. برای بسته شدن معادلات فوق، لازم است که مدل زیرشبکه مناسبی برای ترم تنش‌های زیر شبکه انتخاب شود. در این مطالعه دو مدل زیر شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اول مدل اسماغورینسکی [۲۹] است که البته پیش از این هم برای شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی و جت توربولانسی بکار گرفته شده است [۳۰، ۲۷]. تنش‌های زیر شبکه در این مدل، به صورت زیر معرفی می‌شوند:

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

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

$$\mu_t^{SGS} = \bar{\rho} C_s \Delta^2 |\tilde{S}| \quad (10)$$

در مطالعات پیشین، پیشنهاد شده که از ترم $\bar{\tau}_{kk}$ صرف‌نظر شود. در این معادلات $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ اندازه فیلتر و μ_t^{SGS} لزجت توربولانسی است. همچنین C_s ضریب ثابت اسماغورینسکی است که در این مطالعه ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود [۲۷].

در مدل یک-معادله‌ای لزجت توربولانسی با استفاده از انرژی جنبشی در مقیاس زیرشبکه محاسبه می‌شود [۳۱]:

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

معادله انتقال اضافی برای محاسبه انرژی جنبشی توربولانسی در مقیاس زیرشبکه با توجه به رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} k_{SGS}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i k_{SGS}) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_i} \right) + P_{k_{SGS}} - D_{k_{SGS}} + B_{k_{SGS}} \end{aligned} \quad (12)$$

بررسی می‌شود. طرح‌واره جریان حاصل از این نوع آتش‌سوزی و کمیت‌های مهم آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، هوای داغ حاصل از محصولات احتراق با رنگ خاکستری و هوای ناحیه دما پایین با رنگ روشن نشان داده شده است. به دلیل اختلاف فشار بین اتاق آتش‌سوزی و اتاق مجاور، هوای تازه از اتاق مجاور (که با محیط بیرون در ارتباط است) و از ناحیه پایین درب مشترک، وارد می‌شود. جریان هوای داغ نیز از بالای درب به اتاق مجاور راه‌یافته و از آنجا خارج می‌شود. دو ارتفاع صفحه خنثی^۱ برای بازشو و اتاق مجاور در شکل ۱ نشان نشان داده شده است. این ارتفاع در واقع ارتفاع صفحه‌ای است که دمای هوا هم دما با دمای محیط است. از بالای این ارتفاع، دمای هوا شروع به افزایش می‌کند. در فرایند اطفاء حریق، تخمین مناسب این ارتفاع حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که ارتفاع ایمن برای ورود آتش‌نشانان به فضای آتش‌سوزی چه میزان است.

۳- معادلات حاکم

جریان هوای حاصل از آتش‌سوزی، جریان با ماخ پایین و چگالی متغیر است. با توجه به متغیر بودن چگالی از متوسط وزنی فاور^۲ برای متوسط‌گیری معادلات ناویر استوکس استفاده می‌شود [۲۸، ۲۷]. معادلات متوسط‌گیری شده بقای جرم، مومنتم، انرژی و کمیت اسکالر در مختصات کارتزین برای این جریان به صورت زیر نوشته می‌شوند:

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

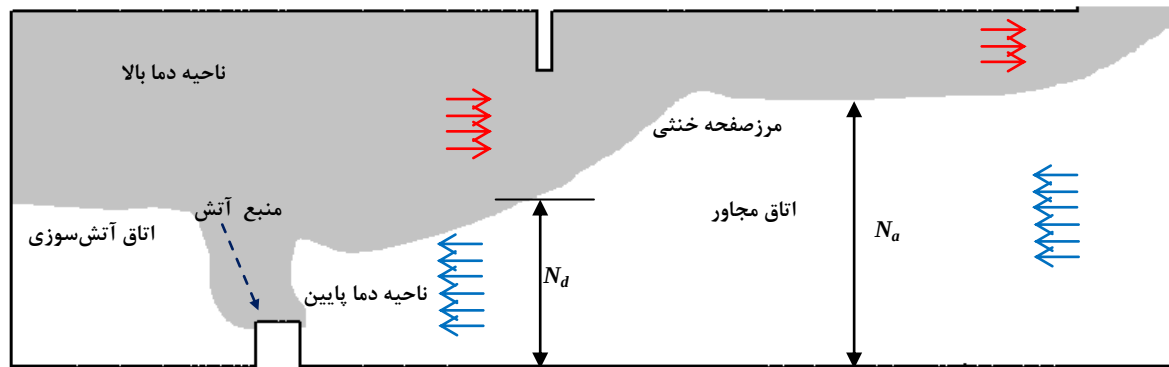
$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{u_i u_j}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i \quad (2)$$

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

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

در این روابط ρ چگالی مخلوط، u_i سرعت، P فشار و T دما هستند. همچنین ϕ نشان دهنده هر کمیت اسکالر در جریان و ω_T نرخ حرارت تولید شده در اثر احتراق است.

1. Neutral Plane
2. Favre-averaged



شکل ۱ طرحواره جریان هوای حاصل از آتش سوزی در اتاق و فضای مجاور

$$\tilde{w}_{fu} = \bar{\rho} \left(\frac{3\varepsilon}{\nu C_{D1}} \right)^{1/2} \frac{\gamma \chi}{1 - \gamma \chi} \min \left(\tilde{Y}_{fu}, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{r} \right)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3}} C_{D1} \frac{k_{SGS}^{3/2}}{\Delta} + \frac{2}{9} C_{D2} \nu \frac{k_{SGS}}{\Delta^2} \quad (19)$$

مقادیر C_{D1} و C_{D2} به ترتیب ۰/۵ و ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود. مقدار γ و χ با استفاده از مقیاس طولی جریان آتش محاسبه می‌شود [۳۳]. برای محاسبه نرخ تابش از محصولات احتراق، از مدل تابشی روش جهات گسسته استفاده شده است.

$$\xi_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial x} + \eta_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial y} + \zeta_i \frac{\partial \bar{I}_i}{\partial z} = \bar{K}_a (\sigma \bar{T}^4 - \bar{I}_i) \quad (20)$$

با محاسبه شدت تابش در هر نقطه، میزان انتقال حرارت تابشی از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$S_{rad} = -4\bar{K}_a \sigma \bar{T}^4 + \sum_{i=1}^n w_i \bar{K}_a \bar{I}(\bar{s}_i) \quad (21)$$

ضرایب وزنی در معادله ۲۱ از مرجع [۳۴] بدست می‌آید.

۴- روش حل

۴-۱- روش حل عددی

برای حل معادلات فوق از کد متن باز اُپن فوم استفاده شده است. معادلات به صورت ضمنی در کد اعمال شده است. مقدار عدد کورانت موضعی ۰/۴ در نظر گرفته شده است. برای برطرف کردن کوپلینگ فشار و سرعت از ترکیب الگوریتم پیزو و سیمپل استفاده شده است [۳۵]. حلقه داخلی پیزو که معادله فشار را شامل می‌شود برای برطرف کردن کوپلینگ فشار و سرعت و معادله بقای جرم استفاده شده است. همچنین الگوریتم سیمپل برای برطرف کردن کوپلینگ کمیات اسکالر و شار جرمی استفاده شده است [۳۶، ۳۵].

ترم‌های تولید، اضمحلال و تولید به واسطه نیروهای شناوری در این رابطه، به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۳۱]:

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

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

$$B_{k_{SGS}} = -\frac{C}{\sigma_\rho} \Delta \sqrt{k_{SGS}} \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} \cdot g_i \right) \quad (15)$$

ضرایب C و C_ε مقادیر ثابت با مقدار یک، برای تعیین ترم‌های اضمحلال و تولید به واسطه نیروی شناوری هستند [۳۱]. شار حرارتی و اسکالر مقیاس زیرشبکه در معادلات ۳ و ۴، به کمک روابط زیر محاسبه می‌شوند:

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

$$\bar{\tau}_{u_i \phi} = -\bar{\rho} (\phi u_i - \tilde{\phi} \tilde{u}_i) = \frac{\mu_t^{SGS}}{Sc_t} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x_i} \quad (17)$$

شبیه‌سازی احتراق با استفاده از روش اتلاف گردابه که در سال‌های اخیر برای استفاده در LES توسعه یافته و اصلاح شده است [۳۳، ۳۲] صورت می‌گیرد. معادله انتقال سوخت، در این مدل به صورت رابطه (۱۸) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_{fu}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_{fu}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \alpha + \frac{\mu_t^{SGS}}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{Y}_{fu}}{\partial x_j} \right) + \tilde{w}_{fu} \quad (18)$$

در نهایت نرخ سوزش در مدل اصلاح شده اتلاف گردابه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، به صورت رابطه (۱۹) نوشته می‌شود [۳۳، ۳۲]:

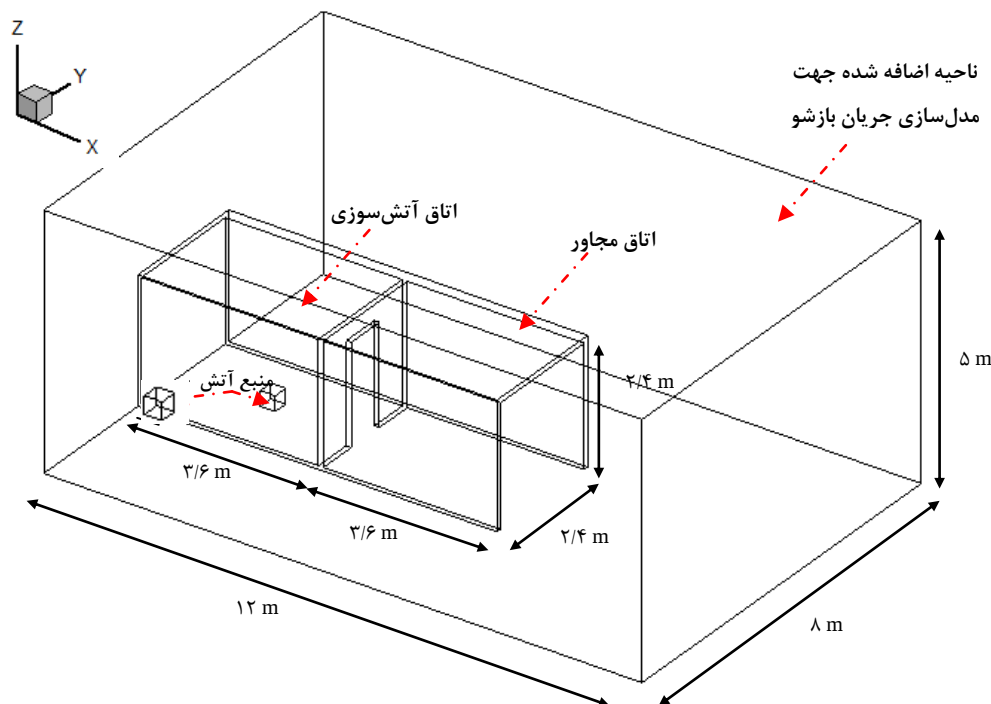
۴-۲- هندسه مورد بررسی

برای صحت‌سنجی و توانایی مدل‌های استفاده شده، مسأله آتش‌سوزی در فضای دو اتاقه، که در آن منبع آتش‌سوزی در یک اتاق واقع شده و به وسیله یک بازشو به اتاق مجاور در ارتباط است بررسی می‌شود. این مطالعه به صورت آزمایشگاهی توسط نیلسن و فیلشمن [۳۷] مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج آزمایشی ایشان، برای صحت‌سنجی و مقایسه زیر مدل‌ها استفاده خواهد شد. مسأله مورد بررسی، اتاقی با طول $3/6$ متر و عرض و ارتفاع $2/4$ متر است که منبع آتش در این اتاق قرار دارد (اتاق آتش). این اتاق توسط یک بازشو به عرض $0/8$ متر و ارتفاع $2/0$ متر به فضای مجاور مرتبط است (اتاق مجاور). انتهای اتاق مجاور با محیط بیرون در ارتباط است. منبع سوخت در اتاق آتش، در سه حالت بررسی می‌شود. در دو حالت اولیه، سوخت پروپان در ارتفاع $0/3$ متر و از سطح مربعی به طول و عرض $0/3$ متر با دو میزان توان ورودی 55 و 110 کیلو وات وارد اتاق می‌شود. در حالت سوم، همین منبع سوخت در گوشه دیوار قرار دارد و میزان توان حرارتی آن 110 کیلووات است (شکل ۲). نتایج اندازه‌گیری دما در صفحه مرکزی اتاق آتش و اتاق مجاور در فواصل معین مطابق شکل ۳ و در ارتفاع‌های مختلف نسبت به کف اتاق با توجه به مطالعه مرجع [۳۷] در دسترس است.

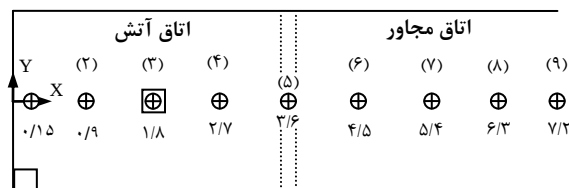
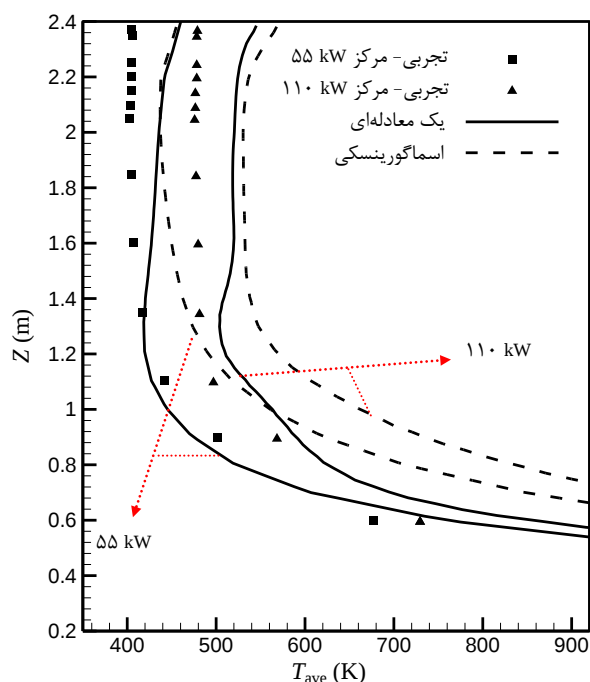
با توجه به آنکه فضای انتهای اتاق مجاور، به محیط بیرون در ارتباط است و در واقع ورود و خروج هوا از این فضا، برقرار است، در شبیه‌سازی لازم است که فضای توسعه یافته، به اتاق اضافه شود تا جریان در این قسمت به خوبی مدل شود. برای این منظور اتاق مذکور در فضایی مطابق ابعاد نشان داده شده در شکل ۲، قرار داده شده است. همچنین، مطالعه محاسبه جواب مستقل از شبکه برای فضای محاسباتی صورت گرفت.

در ابتدا شبکه محاسباتی درشت با میزان $222,188$ سلول در نظر گرفته شد. این تعداد شبکه در چهار مرحله تا میزان $2,247,582$ سلول افزایش یافت. در چند ناحیه از میدان محاسباتی نتایج متوسط زمانی سرعت و دما برای شبکه‌های مختلف با هم مقایسه شدند. مشاهده شد که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از $1,712,499$ به $2,247,582$ شبکه، تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات سرعت و دما حاصل نمی‌شود. بنابراین محاسبات با $1,712,499$ شبکه انجام شد.

با توجه به آنکه در مطالعه تجربی، نتایج متوسط‌گیری زمانی، برای کمیت دما در دسترس است، ابتدا برای دستیابی به جواب‌های شبه پایدار، مسأله مورد نظر برای دوره زمانی 500 ثانیه انجام شد. متوسط‌گیری کمیت‌ها در فاصله زمانی 50 ثانیه انتهایی زمان حل، صورت گرفت.



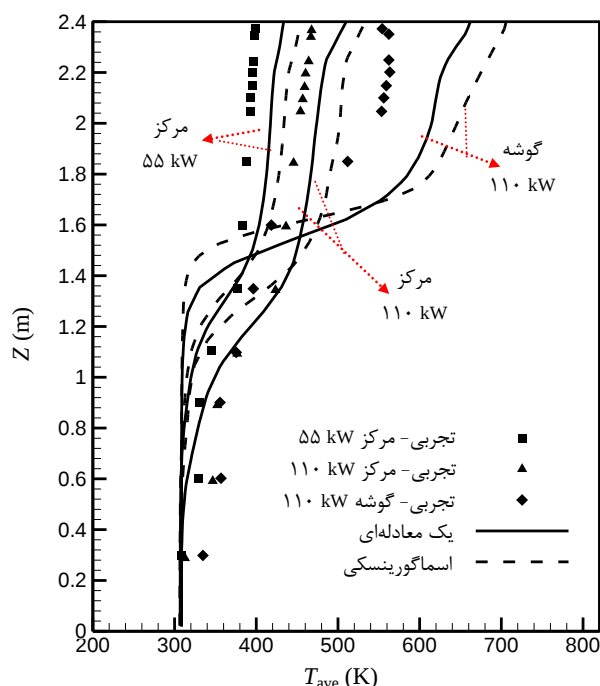
شکل ۲ هندسه مورد بررسی و ناحیه اضافه شده جهت مدل‌سازی جریان بازشو



شکل ۳ مکان حسگرهای دما (اعداد برحسب متر و سنسورها به صورت خطی عمود بر صفحه می‌باشند)

۵- نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های انجام شده در مطالعه مرجع [۳۷]، مقایسه می‌شود. تغییرات دما در ارتفاع اتاق، با توجه به اهمیت آن، در سه قسمت مختلف، بررسی می‌شود. این سه قسمت، داخل اتاق آتش، محل باز شو و اتاق مجاور هستند. با توجه به تعداد حالت‌های بررسی شده در این مطالعه، نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در خطوط (۳) تا (۷) با نتایج تجربی، مقایسه می‌شود. شکل ۴، مقایسه دما محاسباتی و مقادیر تجربی را در خطوط (۳) و (۴) نشان می‌دهد. در تمامی نقاط داخل اتاق آتش، مقدار دمای نقاط مختلف با افزایش توان حرارتی آتش، مطابق انتظار، افزایش یافته است. همچنین در حالتی که منبع آتش در گوشه اتاق قرار دارد، به دلیل کاهش نرخ تهویه هوا از اتاق آتش، دما، در تمامی نقاط بیشتر از حالتی است که آتش در مرکز واقع شده است. خط (۳) ترموکوپل‌های قرار گرفته در بالای منبع آتش (حالت مرکزی) را نمایش می‌دهد. برای این خط نتایج آتش در گوشه در دسترس نبود. مطابق انتظار در محل آتش، دما در ناحیه نزدیک شعله، بیشتر از دما در مجاورت سقف است. با حرکت پلوم آتش به سمت بالا و پیوستن جریان‌های ورودی به پلوم، دما از مرکز به بالا کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی در اینجا، سازگاری قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. در مجموع در تمامی نقاط داخل اتاق آتش، مدل یک-معادله‌ای، دقت بالاتری در تخمین دما دارد. البته هر دو مدل حل تشابهی یکسانی مشابه نتایج تجربی دارند.



شکل ۴ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی مرجع [۳۷] در خط (۳) (بالا) و (۴) (پایین)، اتاق آتش

در ناحیه کم دما در اتاق آتش، پیش‌بینی دما کمتر از مقادیر تجربی است. نتایج دو مدل زیر شبکه در این نقاط اختلاف چندانی ندارند. یکی از دلایل تفاوت نتیجه اندازه‌گیری دما در این ناحیه با نتایج عددی، اثرپذیری تابشی ترموکوپل‌ها از ناحیه دما بالا می‌باشد، اما در ناحیه دما بالا، میزان دمای حل

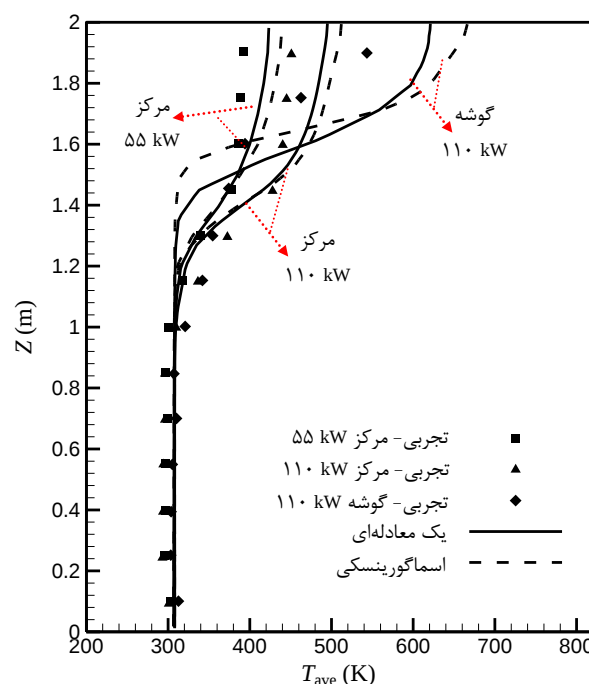
تغییرات دما در خط (۴)، به خوبی تشکیل لایه دما بالا و پایین در اتاق آتش را نشان می‌دهد. لایه دما پایین که دارای تغییرات دمایی ناچیز است، ورود هوای از اتاق مجاور، به وسیله باز شو، به اتاق آتش را نشان می‌دهد. دمای هوای ورودی تقریباً با دمای محیط برابر است.

همچنین مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که میزان اختلاط بین لایه دما بالا و لایه دما پایین در خط (۴) که در مجاورت باز شو می‌باشد، بیشتر از ورودی باز شو است.

علاوه بر این، افزایش دما در اتاق آتش و باز شو در حالتی که آتش ۱۱۰ کیلووات در گوشه قرار دارد نسبت به آتش، با همین توان در مرکز، بیشتر است. هنگامی که آتش در مرکز اتاق قرار دارد، این امکان وجود دارد که ورود جریان به داخل پلوم آتش از اطراف و باز شو صورت گیرد. به عبارت دیگر حجم هوای بیشتری به پلوم وارد می‌شود که باعث کاهش دمای ناحیه دما بالا می‌شود. اما زمانی که آتش در گوشه واقع شده، سطح تماس شعله با هوای آزاد اطراف که امکان ورود هوا به آن را فراهم می‌کند، نصف می‌شود. این کاهش سطح تماس، هوای تازه کمتری را همراه جریان پلوم مخلوط می‌کند و افزایش دما در ناحیه دما بالا را به دنبال دارد.

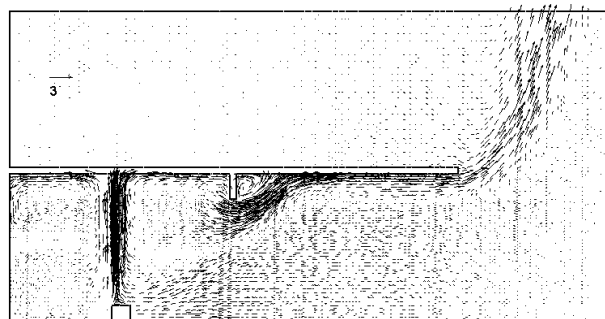
شکل ۶، برای دو خط (۶) و (۷) در اتاق مجاور، تغییرات دما با ارتفاع از کف، را نشان می‌دهد. گرچه در این ناحیه اختلاف نتایج مدل زیر شبکه یک-معادله‌ای و اسماکورینسکی، کمتر است، اما در مجموع مدل یک-معادله‌ای، دقت بالاتری در پیش‌بینی نتایج دارد. مقایسه دما در این نواحی با نواحی قرار گرفته در اتاق آتش نشان می‌دهد که ارتفاع صفحه خنثی (نسبت به کف) در اتاق مجاور بیشتر از اتاق آتش است. یکی از دلایل این نتیجه‌گیری، وجود تیغه بالای باز شو می‌باشد که به صورت یک مانع در برابر خروج دود از اتاق آتش عمل می‌کند. این انباشت دود، افزایش دما و کاهش ارتفاع صفحه خنثی را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر آن، چه در نتایج تجربی و چه عددی، دما در ناحیه دما پایین و تا ارتفاع حدود ۱/۸۵ متر برای تمام حالت‌ها تقریباً یکسان است. در واقع در ناحیه پایین این ارتفاع، هوای محیط با دمای کمتر و البته چگالی بیشتر قرار دارد. در بالای این ارتفاع، گرادیان دمایی شدیدی بین شروع ناحیه دما بالا و سقف، برقرار است. این گرادیان دما در اتاق مجاور به مراتب بیشتر از اتاق آتش است. این گرادیان دمای بیشتر نسبت به اتاق آتش، نشان می‌دهد که میزان اختلاط بین هوای تازه و محصولات احتراق خروجی، کمتر از نقاط واقع در اتاق آتش است. در واقع وجود شعله در اتاق آتش و اثرات توربولانسی و نوسانی آن موجب افزایش اختلاط در این اتاق می‌شود. از سوی دیگر به دلیل عدم موجود تیغه در اتاق مجاور،

عددی بیشتر از نتایج تجربی تخمین زده می‌شود. این اختلاف که به میزان بیشتر از تخمین حاضر در تحقیقات مشابه محققان پیشین به روش RANS نیز دیده می‌شود [۱۴]، ناشی از فرضیاتی نظیر در نظر گرفتن واکنش تک مرحله‌ای، فرض عایق بودن جداره و عدم لحاظ نمودن اثرات تابشی دوده است. در مجموع با استفاده از مدل زیر شبکه یک-معادله‌ای، میزان دقت اندازه‌گیری دما در برخی نقاط تا ۴/۸ درصد بهبود یافته است. همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره شد، یکی از قسمت‌های کلیدی در شبیه‌سازی، وضعیت متغیرها در محل باز شو است. مقایسه نتایج حل عددی حاضر و نتایج تجربی، در محل باز شو، برای حالات مختلف مورد بررسی در شکل ۵، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند تشابهی، بین مطالعه عددی حاضر با مدل‌های زیر شبکه مختلف و نتایج تجربی برقرار است. در این ناحیه نیز نتایج مدل یک-معادله‌ای دقت بیشتری نسبت به اسماکورینسکی دارد. نکته‌ای که از این نتایج استنباط می‌شود، آن است که با افزایش حرارت تولید شده در منبع آتش در حالت آتش مرکزی، حجم ناحیه دما بالا در محل باز شو، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر ارتفاع صفحه خنثی در این حالت کاهش می‌یابد.

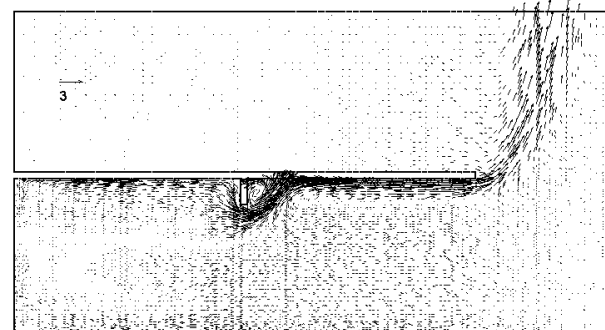


شکل ۵ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی مرجع [۳۷] در خط (۵)، ناحیه باز شو

شکل ۷، بردار سرعت در صفحه مرکزی ($Y=0$) برای آتش ۱۱۰ کیلووات در مرکز و گوشه را به کمک مدل زیر شبکه یک-معادله‌ای، نشان می‌دهد. بردار سرعت در این صفحه در اتاق آتش برای دو حالت مورد بررسی، کاملاً متفاوت است. در حالتی که آتش در مرکز قرار دارد، جریان پلوم سرعت بالا در مرکز اتاق آتش شکل می‌گیرد که منجر به ایجاد جت سقفی در دو سمت، یکی به سمت دیوار انتهایی اتاقی و دیگری به سمت بازشو، می‌شود. این در حالی است که جت سقفی ایجاد شده برای حالتی که آتش در گوشه قرار دارد، یک سویه و به سمت بازشو است. هنگامی که جریان محصولات احتراق به بازشو می‌رسد، به دلیل کاهش سطح مقطع عبور جریان، سرعت محصولات احتراق افزایش محسوس دارد. در هر دو حالت، جریان جت سقفی به سمت بیرون در اتاق مجاور ایجاد می‌شود. این جریان مقداری از هوای محیط را به داخل می‌کشد. اختلاف فشار ایجاد شده به دلیل پلوم حاصل از آتش، در حالتی که آتش در مرکز اتاق قرار دارد، به مراتب بیشتر است. این اختلاف در میزان سرعت هوای ورودی به اتاق آتش از محل بازشو، قابل مشاهده است.



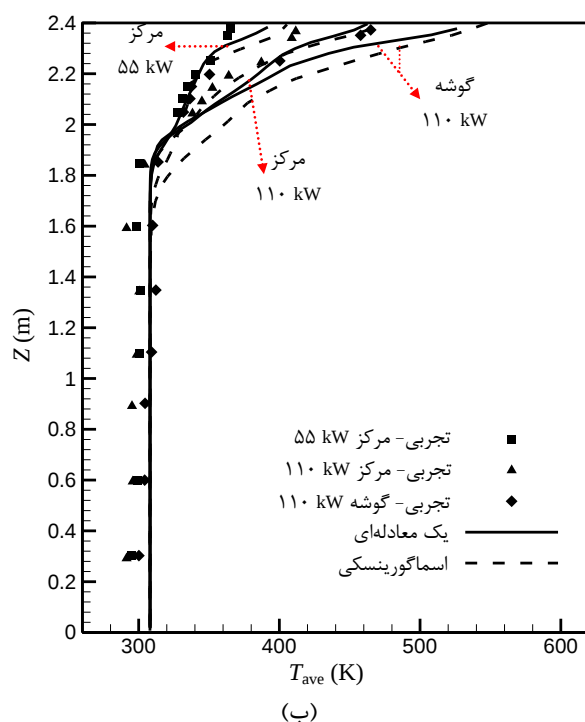
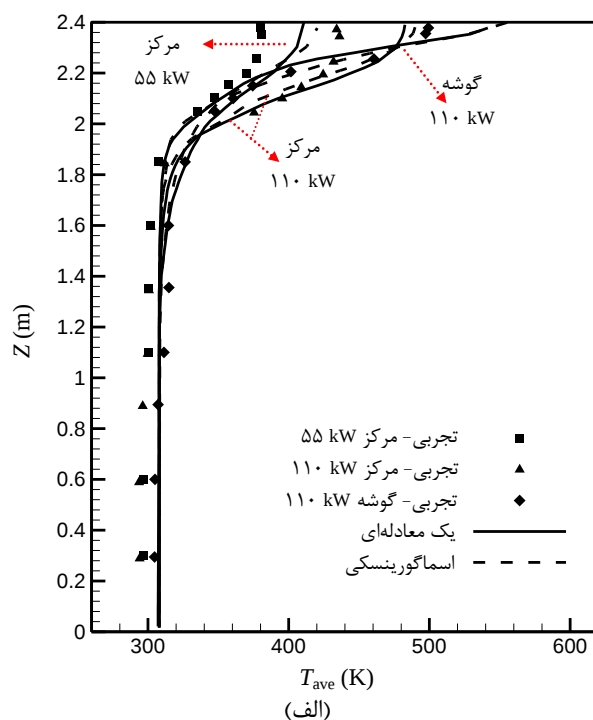
الف- منبع آتش در مرکز



ب- منبع آتش در گوشه

شکل ۷ بردار سرعت در اتاق آتش و اتاق مجاور، آتش ۱۱۰ کیلووات، مدل زیر شبکه یک-معادله‌ای

مدت زمانی که محصولات احتراق در این اتاق به سر می‌برند نیز کمتر است. این خود باعث کمتر شدن اختلاط آن با هوای تازه می‌شود.



شکل ۶ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی مرجع [۳۷] در الف- خط (۶) و ب- خط (۷)، اتاق مجاور

افزایش نرخ هوای وارد شده به پلوم آتش است.

۷- فهرست علائم

C_{D1}	ضریب ثابت در معادله (۱۹)
C_{D2}	ضریب ثابت در معادله (۱۹)
C_e	ضریب ثابت در معادله (۱۴)
C_p	گرمای ویژه فشار ثابت مخلوط هوا ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
C_k	ضریب ثابت مدل یک-معادله‌ای
C_s	ضریب اسمانگورینسکی
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
K_a	ضریب جذب گاز
p	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل
u_j	سرعت (ms^{-1})
Sc	عدد اشمیت
t	زمان (s)
T	دما (K)
T_{ave}	دمای متوسط (K)

علائم یونانی:

σ	ثابت استفان بولتزمن
σ_k	ضریب ثابت در معادله (۱۲)
σ_p	ضریب ثابت در معادله (۱۵)
Δ	اندازه فیلتر
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
μ_t^{SGS}	لزجت توربولانسی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

بالانویس‌ها:

SGS	مقیاس زیرشبکه
(-)	کمیت فیلتر شده
(~)	کمیت فیلتر فاور

۸- مراجع

- [1] Drysdale D., *An Introduction to Fire Dynamics*, New York: Wiley, 1999.
- [2] Quintiere J.G., *Fundamentals of Fire Phenomena*, John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [3] Brani W. B. D.M., "Two-Zone Model for a Single-Room Fire", *Fire Safety Journal*, Vol. 19, 1992,

در نتایج تجربی مرجع [۳۷] نیز این مشاهده، البته به صورت کیفی، گزارش شده است. این افزایش دما به دلیل سطح تماس بیشتر منبع آتش، در مرکز اتاق آتش با محیط پیرامون است که موجب ورود حجم بیشتری از هوا به داخل پلوم حرارتی و ایجاد اختلاف فشار بیشتر می‌شود. در نهایت هر دو جریان جت سقفی محصولات احتراق از قسمت انتهایی اتاق مجاور، خارج می‌شود. جریان محصولات احتراق، پلوم حرارتی به سمت بالا را تشکیل می‌دهد. قطر پلوم با حرکت به سمت بالا و ورود جریان‌های هوای اطراف به آن، افزایش می‌یابد. در هیچ یک از این دو حالت در خروج پلوم حرارتی، برگشت جریان رخ نداده است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله جریان هوای القایی حاصل از آتش‌سوزی در فضای دو اتاقه مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با استفاده از مدل‌های زیرشبکه اسمانگورینسکی و یک-معادله‌ای انجام شد. همچنین از مدل اصلاح شده اتلاف گردابه‌ای در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و نیز مدل جهات گسسته به منظور اعمال اثرات احتراق و تابش استفاده شد. مدل توسعه داده شده در سه حالت، منبع آتش در مرکز اتاق (در دو توان ۵۵ و ۱۱۰ کیلو وات) و آتش در گوشه اتاق (در دو توان ۱۱۰ کیلو وات) بکار گرفته و با نتایج تجربی موجود مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل زیرشبکه یک-معادله‌ای، تغییرات دما در نواحی مختلف ناحیه آتش‌سوزی را با دقت بالاتری نسبت به مدل اسمانگورینسکی، تخمین می‌زند. با افزایش توان آتش‌سوزی در حالتی که منبع آتش در مرکز اتاق آتش قرار دارد، دمای هوا در ناحیه دما بالا افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش دما در ناحیه دما پایین در اتاق آتش، ناچیز است. به طور کلی گردادیان تغییرات دما در اتاق مجاور به آتش، نسبت به اتاق آتش‌سوزی در ناحیه دما بالا بیشتر است. این اثر به دلیل اثرات منبع آتش بر جریان محصولات احتراق و افزایش اختلاط آن با هوای تازه ورودی از بازو می‌باشد. این میزان اختلاط و نیز میزان هوای ورودی به اتاق آتش از بازو، در حالتی که منبع آتش در مرکز قرار دارد، بیشتر از حالتی است که منبع آتش در گوشه اتاق قرار دارد. دلیل این امر، افزایش سطح تماس شعله با هوای اطراف و

- Large Oil Fires”, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, 1996, pp. 4125-4136.
- [19] McGrattan K.B., Rehm R.G., Baum H.R., “Large Eddy Simulation of Smoke Movement”, *Fire Safety Journal*, Vol. 30, 1998, pp.161-178.
- [20] Xin Y., Gore J.P., McGrattan K.B., Rehm R.G., Baum H.R., “Fire Dynamic Simulation of a Turbulent Buoyant Flame using a Mixture-Fraction-Based Combustion Model”, *Combustion and Flame*, Vol. 141, 2005, pp. 329-335.
- [21] McGrattan K.B., Forney G., *Fire Dynamics Simulator (Version 4) – User’s Guide*, IST Special Publication 1019, National Institute of Standard and Technology, 2004.
- [22] Sun X.Q., et. al., “Studies on Smoke Movement in Stairwell Induced by an Adjacent Compartment Fire”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, 2009, pp. 2757-2765.
- [23] Chow W.K., Zou G.W., “Correlation Equations on Fire-Induced Air Flow Rates through Doorway Derived by Large Eddy Simulation”, *Building and Environment*, Vol. 40, 2005, pp. 897-906.
- [24] Merci B., Maele K.V., “Numerical Simulations of Full-Scale Enclosure Fires in a Small Compartment with Natural Roof Ventilation”, *Fire Safety Journal*, Vol. 43, 2008, pp. 495-511.
- [25] Gutierrez-Montes C., Sanmiguel-Rojas E., Viedma A., Rein G., “Experimental Data and Numerical Modelling of 1.3 And 2.3MW Fires in a 20 m Cubic Atrium”, *Building and Environment*, Vol. 44, 2009, pp. 1827-1839.
- [26] Wang L., Quintiere J.G., “An Analysis of Compartment Fire Doorway Flows”, *Fire Safety Journal*, Vol. 44, 2009, pp. 718-731.
- [27] Sherman C.P., Cheung, G.H., Yeoh, “A Fully-Coupled Simulation of Vortical Structures in a Large-Scale Buoyant Pool Fire”, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 48, 2009, pp. 2187-2202.
- [28] Cheung S.C.P., Yeoh G.H., Cheung A.L.K., Yuen R.K.K., “Flickering Behaviour of Turbulent Buoyant Fires Using Large-Eddy Simulation”, *Numerical Heat Transfer Part A*, Vol. 52, 2007, pp. 679-712.
- [29] Smagorinsky J., “General Circulation Experiment with the Primitive Equations: Part I. the Basic Experiment”, *Monthly Weather Review*, Vol. 91, 1963, pp. 99-164.
- [30] Kang Y., Wen J.X., “Large Eddy Simulation of a Small Pool Fire”, *Combustion Science*, Vol. 176, 2004, pp. 2193-2223.
- [31] Yeoh G.H., Yuen K.K., *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*, Elsevier Inc., 2009.
- [32] Chen Z., Wen J.X., Xu B., Dembele S., “Large Eddy Simulation of Fire Dynamics with the Improved Eddy Dissipation Concept”, *Fire Safety Science*, Vol. 10, 2011, pp. 195-808.
- pp.189-216.
- [4] Fu Z., Hadjisophocleous G., “A Two-Zone Fire Growth and Smoke Movement Model for Multi-Compartment Buildings”, *Fire Safety Journal*, Vol. 34, 2000, pp. 257-285.
- [5] Xiaojun C., Lizhong Y., Zhihua D., Weicheng F., “A Multi-Layer Zone Model for Predicting Fire Behavior in a Fire Room”, *Fire Safety Journal*, Vol. 40, 2005, pp. 267-281.
- [6] Shigunov V., “A Zone Model for Fire Development in Multiple Connected Compartments”, *Fire Safety Journal*, Vol. 40, 2005, pp. 555-578.
- [7] Zhang X., Hadjisophocleous G., “An Improved Two-Layer Zone Model Applicable to Both Pre- and Post-Flash Over Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 53 2012, pp. 63-71.
- [8] Novozhilov V., “Computational Fluid Dynamics Modeling of Compartment Fires”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, 2001, pp. 661-666.
- [9] Yang K.T., Chang J.C., *UNSAFE-I. A Computer Code for Buoyant Flow in an Enclosure*, University of Notre Dame Technical Report TR 79002-77-1, 1977.
- [10] Markatos N.C., Malin M.R., Cox G., “Mathematical Modelling of Buoyancy-Induced Smoke Flow in Enclosures”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, 1982, pp. 63-75.
- [11] Yang K.T., “Recent Development in Field Modelling of Compartment Fires”, *JSME International Journal Series*, Vol. 37, 1994, pp. 702-717.
- [12] Beard A.N., “Fire Modelling and Design”, *Fire Safety Journal*, Vol. 28, 1997, pp. 117-138.
- [13] Lewis M.J., Moss M.B., Rubini P.A., “CFD Modelling of Combustion and Heat Transfer in Compartment Fire”, *Fire Safety Science Proceeding of 5th International Symposium*, 1997.
- [14] Yeoh G.H., Yuen R.K.K., Chueng S.C.P., Kwok W.K., “On Modelling Combustion, Radiation and Soot Processes in Compartment Fires”, *Building and Environment*, Vol. 38, 2003, pp. 771-785.
- [15] Stavrakakis G.M., Markatos N.C., “Simulation of Airflow in One- and Two-Room Enclosures Containing a Fire Source”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 2690-2703.
- [16] Hasib R., Kumar R., Shahi, Kumar S., “Simulation of an Experimental Compartment Fire by CFD”, *Building and Environment*, Vol. 42, 2007, pp. 3149-3160.
- [17] McGrattan K.B., Rehm R.G., Baum H.R., “Fire-Driven Flows in Enclosures”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, 1994, pp. 285-291.
- [18] McGrattan K.B., Rehm R.G., Baum H.R., “Numerical Simulation of Smoke Plumes from

- [36] Wang Y., Meredith K., Chatterjee P., Krishnamoorthy N., Zhou X., Dorofeev S., "Status of FireFOAM Development and Future Plan", in 3rd FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop, Norwood, MA, USA, May 2011.
- [37] Nielsen C., Fleischmann C. *An Analysis of Pre-Flashover Fire Experiments with Field Modelling Comparison*. Fire Engineering Research Report, ISSN 1173-5996, University of Canterbury, NZ, 2000.
- [33] Z.B. Chen, J.X. Wen, B.P.Xu, S.Dembele, "The Extension of Eddy Dissipation Concept to the Framework of Large Eddy Simulation", in 3rd FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop, Norwood, MA, USA, May 2011.
- [34] Modest M., *Radiative Heat Transfer*, 2nd Edition, Academic Press, 2003.
- [35] Wang Y., Chatterjee P., de Ris J.L., "Large Eddy Simulation of Fire Plumes", *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 33, 2011, pp. 2473-2480.