

## مقایسه و بررسی شبیه سازی حریق با نرخ آزادسازی حرارت بالا در محفظه بسته با نرم افزارهای FDS و OpenFOAM

**چکیده:** یکی از ابزارهای قوی در بررسی آتش، روش دینامیک سیالات محاسباتی است که قابلیت پیش بینی کامل پارامترهای اثر گذار در آتش همچون، دما، سرعت، فشار، گونه های سمی و تشعشع را دارد. البته در این روش نیاز به بررسی صحت سنجی می باشد که با شبیه سازی و اعتبار سنجی نتایج آن با نتایج تجربی، صحت نتیجه عددی را به خوبی شناخت و همچنین ارزش مدل های حاکم در شبیه سازی را بررسی کرد. از این رو در پژوهش حاضر، با استفاده و مقایسه نتایج دو نرم افزار اف دی اس و این فوم در هندسه آتش در محفظه، شرایط و پارامترهای دما، سرعت و گونه فرایند احتراق از ابتدا تا انتها بررسی و تحلیل شدند که با بررسی نتایج مشاهده شد که دو نرم افزار در صحت سنجی نتایج مشابهی دارند؛ اگرچه مقدار نتایج نرم افزار این فوم بهتر از اف دی اس می باشد. به طوری که نتایج دما و کربن دی اکسید در نرم افزار این فوم به ترتیب ۲۲/۴ و ۱۶ درصد خطای نسبی دارد؛ اما نرم افزار اف دی اس به ترتیب ۲۴ و ۳۱ درصد خطای نسبی دارد.

**واژه های راهنما:** حریق در محفظه، مطالعه رفتار آتش، شبیه سازی احتراق، نرم افزار اف دی اس، نرم افزار این فوم، جریان اغتشاشی، دینامیک سیالات محاسباتی

حمید تجدد  
کارشناسی ارشد

قاسم حیدری نژاد\*  
استاد

محمد صفرزاده  
دکتری،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳  
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷  
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹

Hamid Tajaddod  
MSc.

Ghassem  
Heidarinejad\*  
Professor

Mohammad  
Safarzadeh  
PhD,  
Faculty of Mechanical  
Engineering, Tarbiat  
Modares University,  
Tehran

## Comparison and investigation of high HRR fire simulation in enclosed compartment with FDS and OpenFOAM

**Abstract:** One of the powerful tools for fire investigation is Computational Fluid Dynamics, which has the capability to predict all influential parameters in fire, such as temperature, velocity, pressure, toxic species, and radiation. However, this method requires validation to assess the accuracy of the results. This can be achieved by simulating and comparing the results with experimental data to evaluate the numerical accuracy and examine the validity of the governing models used in the simulation. In this study, the temperature conditions, velocity, and combustion species were investigated and analyzed in the geometry of the fire compartment, by comparing the results of two software, FDS and OpenFOAM. It was observed that both software have similar validation results, although OpenFOAM performs slightly better than FDS. For instance, the temperature and CO<sub>2</sub> species results in OpenFOAM have a relative error of 22.4 and 16%, while FDS have a relative error of 24 and 31%.

**Keywords:** Compartment fire, Fire behavior study, Fire simulation, FDS software, OpenFOAM software, Turbulence flow, Computational fluid dynamic (CFD)

## ۱- مقدمه

بسته با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را انجام داد [۱۰].

یکی از رایج‌ترین روش‌های شبیه‌سازی آتش استفاده از تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی است. در حال حاضر، بسیاری از این ابزارها قادر به شبیه‌سازی رفتار آتش هستند و در سال‌های اخیر با ارائه نرم‌افزارهای مختلف در زمینه مطالعه عددی رفتار آتش مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱۱]. نرم‌افزارهایی همچون اپن‌فوم<sup>۲</sup> (حلگر تخصصی فایرفوم<sup>۳</sup>، فلونت<sup>۴</sup>، افدی‌اس<sup>۵</sup>، سی.اف.ایکس<sup>۶</sup> و نرم‌افزارهایی دیگر از جمله این نرم‌افزارها هستند. در بین این نرم‌افزارها، اپن‌فوم و افدی‌اس دو حلگری است که بیشتر از سایر نرم‌افزارها در شبیه‌سازی جریان حریق مورد استقبال قرار گرفته است.

مطالعات عددی در سناریوهای مختلف با این دو نرم‌افزار انجام شده است. به عنوان مثال، لی و همکاران به بررسی اولیه از ویژگی‌های احتراق در ارتفاعات مختلف یک محفظه پرداختند [۱۲]. یان و جرنی با استفاده از نرم‌افزار افدی‌اس به منظور بررسی مدل‌سازی عددی مختلف برای ارزیابی دما در سازه‌های فولادی تحت آتش‌سوزی موضوعی پرداختند و مشخص شد از بین روش‌های عددی مورد استفاده، مدل ارائه شده توسط هاسمی<sup>۷</sup>، بیشترین مطابقت را با روش تجربی دارد [۱۳].

سیکانن و هوستیکا به بررسی شبیه‌سازی آتش‌سوزی در محفظه‌های دارای تهویه مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار افدی-اس پرداخته و نتایج نشان داد که نتایج عددی در پیش‌بینی نرخ سوختن<sup>۸</sup> در حالت پایدار ۱۵ درصد خطای نسبی با نتایج تجربی دارد [۱۴].

پریتلر و همکاران به بررسی رژیم‌های احتراق بدون تهویه طبیعی در محفظه بسته با هدف بهبود درک رژیم‌های احتراق با تمرکز بر اثر آتش و نرخ تهویه اجباری پرداختند و سه رژیم متفاوت در محفظه (دو رژیم نرخ سوزاندن ثابت با خاموش شدن به دلیل کمبود سوخت یا اکسیژن و یک رژیم نرخ سوزاندن گذرا با خاموش شدن در اثر کمبود اکسیژن) شناسایی کردند [۱۵]. اما در نرم‌افزار اپن‌فوم نیز مطالعاتی انجام شده است به عنوان مثال، صفرزاده و همکاران نیز با استفاده از این نرم‌افزار توانستند دما، سرعت و گونه‌های سمی را با کمتر از ۲۰ درصد خطای نسبی مدل‌سازی کنند. همچنین تاثیر تهویه (پرده‌ها) در کنترل و گسترش حریق با سوخت متان در ساختمان سه طبقه بررسی

حریق و کنترل آن امروزه به یک بحث مهم در جهان بدل شده است و متخصصان همواره در تلاش هستند که بتوانند از فرایند پیشروی و گسترش حریق در محیط جلوگیری کرده و خطرات متناسب با آن‌ها را کاهش دهند. بنابراین می‌توان با شبیه‌سازی محیط‌های پرخطر و با فرض شرایط و جریان احتراق، این مسائل را پیش‌بینی کرد و با برنامه‌ریزی مناسب از وقوع حوادث این‌چنینی جلوگیری کرد. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که آمارهای مربوط به حوادث ناشی از سوختگی مورد توجه قرار گیرد. مثلاً آمار ناشی از سوختگی در ایران در چهار ماهه نخست سال ۱۴۰۲، ۶۹۴ نفر می‌باشد [۱].

ارزیابی خطر آتش‌سوزی یک مسئله کلیدی است که عمدتاً به دلیل پیچیدگی سناریوی آتش‌سوزی در محفظه‌های بسته و تهویه‌شده مکانیکی است که به طور قابل توجهی بر فرآیندهای احتراق و دینامیک جریان دود تأثیر می‌گذارد [۲]. بسیاری از مطالعات بر روی آتش‌سوزی محفظه متمرکز شده اند [۳، ۴] زیرا در این زمینه مطالعاتی به طور قابل توجهی بزرگ و پیچیده است. با توجه به خطر آتش‌سوزی در محیط‌های صنعتی و ساختمان-های مسکونی، مطالعه رفتار آتش و همچنین عوامل مؤثر بر جلوگیری از رشد و اطفای آن امری ضروری است [۵].

تحقیقات زیادی [۶، ۷] با هدف درک مکانیسم اشتعال و رشد آتش و همچنین حرکت دود به محفظه‌های مجاور انجام شده است. این مجموعه از تحقیقات منجر به مدل‌های رایانه‌ای شد که رشد آتش‌سوزی و انتشار دود را در یک محفظه یا ساختمان پیش‌بینی می‌کند که می‌تواند برای طراحی استراتژی‌های مؤثر برای کنترل رشد و گسترش آتش به منظور بهبود ایمنی زندگی و کاهش آسیب اموال مورد استفاده قرار گیرد [۸]. از این رو کاربران در سال‌های گذشته برای شبیه‌سازی از این نرم‌افزارها بهره برده‌اند.

در برخی از مطالعات [۹] از پیشرفت‌های شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> در آتش‌سوزی و با تشریح برخی از مثال‌ها، از تاثیر مهم استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداخته شده است. با توجه به اهمیت موضوع جریان آتش‌سوزی، مطالعات عددی و تجربی متعددی صورت گرفته است. مک‌گراتان از جمله اولین افرادی بود که شبیه‌سازی حریق در محیط باز و

<sup>5</sup> Fire Dynamic Simulator (FDS)

<sup>6</sup> CFX

<sup>7</sup> Hasemi model

<sup>8</sup> Burning rate

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

<sup>2</sup> OpenFOAM

<sup>3</sup> fireFoam

<sup>4</sup> Fluent

همچنین عمده تفاوت این دو نرم‌افزار در پروفیل دما بود که نرم‌افزار این‌فوم پیش‌بینی بهتری از نتایج دما داشته است [۲۱]. در یک جمع‌بندی می‌توان گفت هر دو نرم‌افزار قابلیت‌های مختلفی دارند که در مطالعه پژوهش‌های مختلف به برخی از آن‌ها (رفتار حریق، بررسی دما، سرعت و گونه‌های سمی) اشاره شد. رفتار حریق (پلوم آتش) و مکانیزم آن در داخل محفظه‌های باز و بسته در پژوهش‌های گوناگون به صورت موردی بررسی شده است. اما مقایسه دو نرم‌افزار در سناریوی مشابه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه در سناریوی آتش استخری، این موضوع بررسی شده است. از این رو مقایسه دو نرم‌افزار در سناریوی آتش در فضای بسته می‌تواند کارایی این دو نرم‌افزار را بیشتر نمایان سازد. به این منظور در مطالعه حاضر، به بررسی و تحلیل رفتار حریق و برخی پارامترهای خروجی آن پرداخته شده و نتایج دو نرم‌افزار با یکدیگر مقایسه می‌گردد. همچنین به منظور بررسی کاملی از مقایسه‌ی این دو نرم‌افزار، نتایج دما، گونه و سرعت مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین سعی شده است که در موقعیت‌های مختلف این موضوع بررسی گردد.

## ۲- روابط ریاضی و مدل‌سازی

در این بخش معادلات ریاضی و همچنین روش عددی به تفصیل بیان می‌گردد.

### ۲-۱- مدل‌سازی حریق

برای شروع این پژوهش ابتدا لازم است که انواع مدل‌سازی‌های حریق در مناطق بسته بررسی شود. آتش‌سوزی در فضای بسته برخلاف آتش‌سوزی در محیط باز، به دلیل تاثیر مرزهای جامد، دیواره‌ها و وجود یا عدم تهویه، دارای مراحل مختلف مانند اشتعال<sup>۵</sup>، رشد<sup>۶</sup>، سوزش<sup>۷</sup>، آتش توسعه‌یافته<sup>۸</sup> و خاموشی<sup>۹</sup> است. یکی از آسیب‌پذیرترین و پیچیده‌ترین سناریوهای مراحل آتش-سوزی در محیط بسته از لحاظ ایمنی آن، مرحله کاملاً توسعه‌یافته است [۲۲]. به طور کلی مدل‌های شبیه‌ساز رایانه‌ای حریق و توزیع دود در دو دسته مدل‌های ناحیه‌ای و مدل‌های میدانی قرار دارد [۲۳].

شد و دریافته‌اند که می‌توان گازهای سمی را به خوبی مدل‌سازی کرده و پرده هوا نیز در صورت استفاده، خطری برای طبقات بالاتر ندارد [۱۶].

رازقی و همکاران با استفاده از کد فایرفوم، حلگری برای استفاده از دو مدل احتراقی فلیملت آرام<sup>۱</sup> و اضمحلال گردابه‌ای<sup>۲</sup> را در نرم‌افزار این‌فوم توسعه دادند و به مقایسه و بررسی فیزیک جریان آتش این دو مدل در فضای تک اتاقی پرداختند و مشخص شد هزینه محاسباتی در مدل اضمحلال گردابه‌ای ۱۴ درصد نسبت به مدل دیگر بیشتر است و همچنین نتایج سرعت و دما در مدل احتراقی فلیملت آرام، از دقت بیشتری نسبت به مدل دیگر برخوردار است [۱۷].

پاسدارشهری و همکاران نیز با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم و به کارگیری روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۳</sup>، دقت این نرم‌افزار را در سناریوی آتش استخری و آتش در فضای تک و دو اتاقه، بررسی کردند و نتایج، دقت قابل قبول این نرم‌افزار را نشان داد [۱۸]. صفرزاده و همکاران با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم و اضافه کردن مدل احتراقی اف‌جی‌ام<sup>۴</sup> به حلگر فایرفوم، توانستند تمام گونه‌های سمی حاضر در حریق در فضای اتاق با سه نرخ آزادسازی حرارت ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۵۰۰۰ کیلووات را مدل کنند [۱۹].

در حالت کلی هر یک از نرم‌افزارها قابلیت شبیه‌سازی خاصی دارند که متناسب با آن قابلیت‌ها، دقت مدل‌سازی تغییر می‌کند. نکته مهم در استفاده از این نرم‌افزارها، انتخاب نرم‌افزار با دقت محاسباتی بالاست. به این منظور مقایسه نتایج نرم‌افزار مورد استفاده در سناریوهای مختلف لازم است. به عنوان مثال مراگکاس و مرسی دو نرم‌افزار این‌فوم و اف‌دی‌اس را در سناریوی آتش‌سوزی استخری مقایسه کردند و دریافته‌اند که تطابق مناسبی بین نتایج عددی دو نرم‌افزار با نتایج تجربی وجود دارد به نحوی که نتایج سرعت و دما در ناحیه‌ی پلوم حرارتی در هر دو نرم‌افزار کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی دارد [۲۰].

آلمیدا و همکاران به شبیه‌سازی عددی شعله نفوذی با سوخت متان پرداختند و نتایج میدان سرعت، دما و کسر مخلوط را در دو حلگر فایرفوم (در نرم‌افزار این‌فوم) و اف‌دی‌اس مقایسه کردند. با مقایسه نتایج مشخص شد که هر دو نرم‌افزار میدان‌های سرعت و گردابه را مشابه یکدیگر پیش‌بینی کردند و نرم‌افزار اف-دی‌اس، تخمین‌های بهتری برای کسر مخلوط نشان داد.

<sup>5</sup> Ignition

<sup>6</sup> Spread

<sup>7</sup> Flashover

<sup>8</sup> Fully-Developed Fire

<sup>9</sup> Decay

<sup>1</sup> Steady Laminar Flamelet Model (SLFM)

<sup>2</sup> Eddy Dissipation Model (EDM)

<sup>3</sup> Large Eddy Simulation (LES)

<sup>4</sup> Flamelet Generated Manifold (FGM)

پیوستگی، مومنتوم، انرژی و کسر جرمی گونه‌ها، معادلات کلی حاکم برای پیش‌بینی حریق به کار برده می‌شود [۲۷]. معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها باید به صورت کوپل شده حل شوند و بعد نحوه گسسته‌سازی معادلات، مدل‌های تعریف شده، فرضیات و روند حل در نرم‌افزار مورد استفاده، مشخص گردد که در نهایت دستگاه حاصل از این معادلات، رفتار فیزیکی یک سیستم احتراقی را بیان خواهد نمود. معادلات حاکم بر جریان سیال در ادامه بیان می‌گردد [۲۸]. با اعمال قانون بقای جرم بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادله بقای جرم کلی به صورت معادله (۱) به دست خواهد آمد [۲۸].

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

در رابطه (۱) دانسیته،  $u$  سرعت،  $t$  زمان را نشان داده است و همچنین در این رابطه، منبع تولید یا همان ترم چشمه وجود ندارد. قانون فیک بیان می‌دارد که در یک مخلوط دوجزئی، شار جرمی گونه  $\alpha$  از رابطه زیر (۲) به دست خواهد آمد [۲۸].

$$\dot{m}''_{\alpha} = Y_{\alpha} \dot{m}''_{tot} - \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} \quad (2)$$

با توجه به معادله (۲) فرم کلی معادله پایداری جرم گونه‌ها (۳) بصورت زیر است. در رابطه (۳) نرخ تولید یا مصرف گونه‌ی  $\alpha$  می‌باشد [۲۸].

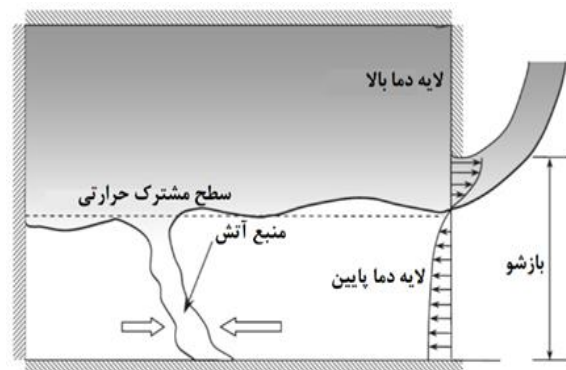
$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{Y}_{\alpha}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{Y}_{\alpha} \bar{u}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} D_{\alpha} \nabla \bar{Y}_{\alpha}) + \dot{m}'''_{\alpha} \quad (3)$$

با استفاده از رابطه (۲) برای همه گونه‌های احتراق در نهایت رابطه (۱) به دست می‌آید. چرا که  $\sum_{\alpha=1}^N Y_{\alpha} \nu_{\alpha, diff} \approx 0$  و همچنین فرض می‌شود که  $\sum_{\alpha=1}^N Y_{\alpha} = 1$  و  $\sum_{\alpha=1}^N \dot{m}'''_{\alpha} = 0$  می‌باشد. با اعمال قانون دوم نیوتن بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادله بقای مومنتوم (۴) به صورت زیر به دست خواهد آمد [۲۸].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{u}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} \bar{u}) = -\nabla P + (\bar{\rho} - \bar{\rho}_{\infty})g + \nabla \cdot \tau + f_b \quad (4)$$

مدل‌های ناحیه‌ای یکی از ساده‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی مناطق محصور به شمار رفته و می‌توان فضای داخل آن را به مناطق مختلف و شرایط را نیز به صورت یکنواخت در نظر گرفت. این مدل نیز به دو دسته مدل تک ناحیه‌ای و دو ناحیه‌ای تقسیم می‌شود [۲۴].

در مدل دو ناحیه‌ای، فضای مورد نظر به دو ناحیه تقسیم می‌شود، یکی ناحیه سرد پایینی که شامل تمام فضای زیرین ناحیه بالا که معمولاً محل منشا حریق بوده و ایجاد هوای لازم برای احتراق است و ناحیه بالایی که شامل بخارات داغ تولید شده توسط حریق که در طول حریق گسترش یافته و تمام فضای اتاق را اشغال می‌کند [۲۵]. در شکل (۱)، نمایی از مدل دو منطقه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایی از مدل دو ناحیه‌ای [۱۸]

مدل دوم، مدل‌های میدانی می‌باشد که مدل‌های میدانی همان مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی است که از پیشرفته‌ترین و قدرتمندترین مدل‌ها در حوزه شبیه‌سازی حریق به شمار می‌رود. این مدل‌ها روشی برای محاسبه جریان سیال از طریق یک حجم با استفاده از حل عددی معادلات بقای انرژی، مومنتوم و جرم فراهم می‌کنند. یکی از اصلی‌ترین ویژگی این مدل که آن را از مدل قبل متمایز می‌کند، کاربرد آن نرم‌افزار برای هندسه‌های پیچیده است [۲۵].

## ۲-۲- معادلات انتقال حاکم

با توجه به رفتار آتش که یک جریان اغتشاشی هست و جریان هوای تولیدی حاصل از آن در یک محفظه بسته، جریان با ماخ پایین و چگالی متغیر است، بنابراین به دلیل متغیر بودن چگالی از متوسط وزنی فاوور برای متوسط‌گیری معادلات انتقال استفاده می‌شود [۲۶]. برای انجام شبیه‌سازی عددی یک مسئله فیزیکی، ابتدا بایستی معادلات حاکم بر آن مسئله معلوم گردند. معادلات

در واقع جریان آشفته، جریانی است که یک نوسان نامنظم (اختلاط یا حرکت گردابی) به جریان اصلی اضافه شده باشد برای همه مسائل، یک مدل آشفته واحد وجود ندارد و انتخاب مدل، بسته به شرایط فیزیکی جریان دارد. انتخاب مدل بر مبنای تجربه و کاربرد روش مورد نظر در هر مسئله خاص با در نظر گرفتن امکانات محاسباتی و زمان مورد نظر صورت می‌گیرد. همچنین کاربرد هر روش مستلزم آگاهی به اصول و محدودیت‌های آن روش است. به طور کلی برای مدل‌سازی جریان اغتشاشی در روش دینامیک سیالات محاسباتی، سه دسته روش وجود دارد [۳۰].

اولین روش حل مستقیم عددی<sup>۱</sup> است که در این روش مدل‌سازی، معادلات جریان (معادلات ناویر - استوکس) بدون اعمال مدل‌سازی و به شکل مستقیم حل می‌شوند. در این روش به دلیل اینکه نیاز است شبکه محاسباتی برای گسسته‌سازی معادلات جریان تمامی مقیاس‌های طولی جریان را پوشش دهند به همین خاطر اندازه شبکه محاسباتی باید به اندازه کوچک‌ترین مقیاس جریان یعنی مقیاس کلموگروف باشد، به همین دلیل از این روش در این پژوهش استفاده نمی‌شود. همچنین هزینه محاسباتی این روش بسیار بالا است.

دومین روش متوسط‌گیری شده زمانی معادلات ناویر - استوکس است که در این روش با متوسط‌گیری زمانی از این معادلات، معادلات متوسط‌گیری رینولدز به دست خواهد آمد که این معادلات، همان معادلات ناویراستوکس به همراه جملاتی که به آنها تنش‌های رینولدزی گفته می‌شود، است. از مزایای این روش این است که هزینه محاسبات آن نسبت به روش حل مستقیم عددی کمتر است، زیرا اندازه شبکه در این روش به مراتب نسبت به دو روش دیگر بزرگ‌تر است.

آخرین روشی که از آن برای مطالعه این پژوهش استفاده شده است، متوسط‌گیری مکانی با استفاده از فیلتر و روش گردابه‌های بزرگ است. در مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان به دو بخش گردابه‌های بزرگ و گردابه‌های کوچک تقسیم می‌شود. برای گردابه‌های بزرگ حل انجام می‌شود در حالیکه برای گردابه‌های کوچک مدل‌سازی صورت می‌گیرد. تشخیص گردابه‌های بزرگ و کوچک نیازمند وجود یک فیلتر است. در مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، این فیلتر تابعی از اندازه شبکه است. در واقع گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه شبکه در نظر گرفته نمی‌شوند و مدل می‌شوند که به مدل مقیاس زیر شبکه‌ای معروف است.

در رابطه  $\nabla P(\mathcal{F})$  بردار فشار هیدرواستاتیکی،  $g$  شتاب گرانش،  $f_b$  نیرو و  $\tau$  تانسور تنش می‌باشد. با اعمال قانون اول ترمودینامیک بر یک المان دیفرانسیلی از سیال، معادلات پایستگی انرژی براساس آنتالپی محسوس، بصورت رابطه (۵) بدست خواهد آمد [۲۸].

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

در رابطه (۵)  $\varepsilon$  نماینده ترم اضمحلال در معادله انرژی (=  $\varepsilon$ )  $(\tau:u)$  بیان گر نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم توسط واکنش شیمیایی،  $h_s$  نشان‌دهنده آنتالپی محسوس سیال که تابعی از دماست و  $\dot{q}''$  نرخ انتقال حرارت از طریق تابش و رسانش است که در معادله (۶) نشان داده شده است [۲۸].

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

در رابطه (۶)  $D_{\alpha}$  ضریب بخش گونه  $\alpha$  و  $k$  معرف ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. در آخر نیز معادله حالت به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته می‌شود که  $R_u$  ثابت جهانی گازها و  $W_{\alpha}$  جرم مولی گونه  $\alpha$  است [۲۸].

$$p_0 = \rho R_u T \sum_{\alpha} Y_{\alpha} / W_{\alpha} \quad (7)$$

## ۲-۳- مدل‌سازی اغتشاشی

همان طور که در بخش‌های قبلی ذکر نمودیم، رفتار حریق در محیط یک پدیده فیزیکی و از نوع جریان اغتشاشی می‌باشد و از این رو باید از روش‌های مدل‌سازی اغتشاشی استفاده کنیم. در جریان‌های آرام و با اعداد رینولدز پایین وجود نیروهای لزجت باعث کاهش دامنه این حرکات نوسانی و تصادفی می‌گردد و با افزایش عدد رینولدز و تاثیر بیشتر نیروی اینرسی، نیروهای لزجت قدرت کافی به منظور حذف اغتشاشات از بدنه سیال را از دست داده و دامنه نوسان، تشدید می‌گردد؛ به گونه‌ای که جریان ناپایدار و آشفته می‌گردد [۲۹].

<sup>1</sup> Direct Numerical Simulation (DNS)

در روابط (۱۰) و (۱۱)،  $Pr_T$  عدد پرانتل اغتشاشی و  $Sc_T$  بیانگر عدد اشمیت اغتشاشی است که هر دو عدد مقادیر ثابتی فرض در نظر گرفته می‌شود.

## ۲-۴- تابع دیواره‌ای

دقت روش زیر شبکه اسمانگورینسکی در نزدیکی مرز جامد پایین هست، زیرا گردابه‌های بزرگ وجود ندارند، گرادیان سرعت در جریان سیال بالا می‌رود و ابعاد شبکه محاسباتی بایستی کاهش یابد، به همین دلیل برای جریان در نزدیکی دیواره، اثرگذاری دیوار در نتایج حل عددی قابل توجه است. یکی از راه‌های افزایش دقت محاسبات در مجاورت دیواره، استفاده از تابع دیواره است [۲۹]. در کل می‌توان با استفاده از تابع کاهنده (رابطه ۱۲)، ضریب ثابت به کار رفته در مدل اسمانگورینسکی را با شرایط نزدیک دیوار تطبیق داد [۲۹] در رابطه (۱۳)،  $d$  فاصله از دیوار جامد است.

$$C_0 = 0.01 \left\{ 1.0 - \exp \left[ \left( -\frac{d_+}{25} \right)^3 \right] \right\} \quad (12)$$

$$\begin{cases} d_+ = \frac{d}{u_* / \nu} \\ u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \end{cases} \quad (13)$$

## ۲-۵- انتقال حرارت تابشی

یکی از فرضیاتی که می‌توان در حوزه شبیه‌سازی آتش بررسی و در نظر گرفت، فرض گاز خاکستری است. در نرم‌افزار اف‌دی‌اس انتقال حرارت تابشی به صورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری حل می‌شود [۱۸]. معادله انتقال تابشی برای فضایی که دارای پارامترهای تشعشع (جذب، نشر و انعکاس) است، به صورت رابطه (۱۴) خواهد بود [۳۱].

$$S \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_\lambda(x, s) + B(x, s) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s^*) I_\lambda(x, s^*) ds^* \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $\kappa(x, \lambda)$  ضریب موضعی جذب،  $\sigma_s(x, \lambda)$  ضریب موضعی انعکاس و  $B(x, s)$  چشمه نشر انرژی تشعشعی،

در این پژوهش با نرم‌افزار اف‌دی‌اس شروع به شبیه‌سازی کردیم و از مدل اغتشاشی گردابه‌های بزرگ استفاده کردیم و علت این انتخاب این بوده است که این مدل نسبت به دو مدل قبلی دارای جزئیات بیشتر و زمان محاسباتی کمتری است، هرچند که در این نرم‌افزار فقط روش گردابه‌های بزرگ و حل عددی مستقیم وجود دارد.

در روش گردابه‌های بزرگ، انتخاب مدل مناسب برای محاسبه ترم تنش ناشی از اغتشاش ( $\tau_{SGS}$ ) بسیار گسترده و پیچیده بوده است. لذا با انتخاب مدل مناسب می‌توان مقدار انرژی اتلافی را چنان تعیین کرد که نظریه آشمار انرژی برقرار باشد [۱۸]. برای مدل‌سازی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، روش شناخته شده اسمانگورینسکی وجود دارد. در این روش، مقدار لزجت گردابه‌ای با توجه به طول مشخصه و مقیاس سرعت به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [۲۹].

$$\mu_T^{SGS} = \bar{\rho} (C_S \Delta)^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (8)$$

در رابطه (۸) که یک ثابت تجربی و ضریب تطبیقی در مدل اسمانگورینسکی است و مقدار ضریب ثابت اسمانگورینسکی در رژیم‌های مختلف متفاوت است این مقدار به طور کلی در محدوده ۰/۰۹۴ تا ۰/۲ می‌باشد که در یک جریان معین مقدار آن عدد ثابتی خواهد بود. پهنای فیلتر که از رابطه (۹) بدست می‌آید [۲۹] و نشان‌دهنده کوچکترین مقیاس میدان است که حل می‌شود و با توجه به اندازه شبکه محاسباتی تعیین می‌شود و در نرم‌افزار اف‌دی‌اس برابر با ریشه سوم حجم سلول محاسباتی قرار داده شده است.

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (9)$$

در ادامه بایستی بعد از محاسبه لزجت گردابه‌ای، پارامترهای نفوذ ضریب هدایت حرارتی اغتشاشی طبق رابطه (۱۰) و ضریب نفوذ اغتشاشی گونه طبق رابطه (۱۱) به صورت تابعی از لزجت گردابه‌ای مدل شوند [۳۱].

$$k_T^{SGS} = \frac{\mu_T^{SGS} C_p}{Pr_T} \quad (10)$$

$$(\rho D)_T^{SGS} = \frac{\mu_T^{SGS}}{Sc_T} \quad (11)$$

در رابطه (۱۵)  $\tilde{Y}_F$  کسر جرمی سوخت،  $\tilde{Y}_{O_2}$  کسر جرمی اکسیدکننده و  $S$  نسبت جرمی استوکیومتری هوا به سوخت است. همچنین  $\tau_{mix}$  از طریق رابطه (۱۶) بدست می‌آید [۳۴].

$$\tau_{mix} = \min \left( \frac{K_{sgs}}{C_{EDM} \varepsilon_{sgs}}, \frac{\Delta^2}{C_{diff} \alpha} \right), \quad (16)$$

$C_{EDM} = 4, C_{diff} = 2$

## ۲-۸- روش عددی

در پژوهش حاضر از دو نرم‌افزار برای حل معادلات بالا استفاده شده است. نرم‌افزار این‌فوم (نسخه ۱۸,۰۶)، که با زبان برنامه نویسی C++ به صورت متن باز نوشته شده است، اولین نرم افزار مورد استفاده است. هم چنین این پژوهش در نرم افزار دیگری به نام افدی‌اس (نسخه ۶) انجام شده است. نرم‌افزار افدی‌اس در سال ۲۰۰۰ برای بررسی آتش و عملکرد سیستم‌های اطفاء حریق در انستیتوی ملی استانداردها و تکنولوژی آمریکا<sup>۱</sup>، منتشر شد [۳۵]. این دو حلگر، معادلات انتقال حاکم را برای جریان‌هایی با ماخ پایین با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ حل می‌کنند.

در نرم‌افزار افدی‌اس، برای سهولت در نتایج و همچنین ایجاد رابط بصری بهتر برای خروج دود و سایر پارامترها از رابط گرافیکی به نام پایروسیم<sup>۲</sup> نیز استفاده شده است. این نرم‌افزار در شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل آتش استفاده شده و همچنین یک مدل‌سازی احتراقی با کنترل ترکیبی که بر اساس افدی‌اس و برنامه شبیه‌سازی دود<sup>۳</sup> می‌باشد و در نتیجه برنامه کاربردی آسان برای کاربران فراهم می‌کند [۳۶]. نرم‌افزار پایروسیم، همانند برنامه افدی‌اس توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا توسعه یافته است.

به‌منظور رفع وابستگی معادلات انتقال پیوستگی، مومنتوم، انرژی و گونه از الگوریتم پیمپل<sup>۴</sup> در نرم‌افزار این فوم استفاده می‌شود. همچنین به‌منظور گسسته‌سازی ترم‌های مشتق زمانی از روش گسسته‌سازی مرتبه اول اولر و برای ترم‌های مشتق مکانی نفوذی از روش گسسته‌سازی مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است. همچنین برای ترم‌های مکانی جابه‌جایی نیز از تقریب

$I_{\lambda}(x, S)$  شدت تابش در طول موج  $\lambda$  است. همچنین ترم انتگرال در سمت راست رابطه (۱۴)، بیانگر انرژی تشعشعی انعکاس یافته در جهات دیگر است [۳۱].

نرم‌افزار افدی‌اس رابطه (۱۴) را به‌صورت پیش‌فرض با ۱۰۰ زاویه گسسته شده محاسبه کرده که این تعداد زاویه محاسباتی، قابل افزایش می‌باشد. بنابراین بیش از ۲۰ درصد زمان پردازش مربوط به محاسبه رابطه (۱۴) است که با افزایش تعداد جهات، کل زمان لازم برای شبیه‌سازی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند [۲۲].

## ۲-۶- مدل‌سازی احتراقی

در نرم‌افزار افدی‌اس دو روش برای مدل‌کردن احتراق تعریف شده است. مدل اول، مدل نرخ واکنش محدود است. در این مدل گونه‌های گازی شکل بر اساس رابطه آرینیوس با یکدیگر واکنش می‌دهند. این مدل بیشتر در شبیه‌سازی مستقیم عددی که نفوذ سوخت و اکسیدکننده به طور مستقیم مدل می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. درحالی‌که در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ که در آن شبکه محاسباتی به‌اندازه شبکه مورد استفاده در روش شبیه‌سازی مستقیم عددی ریز نیست و از مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ای می‌توان استفاده نمود.

در مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ای، به محض حضور سوخت و اکسیژن، واکنش شیمیایی صورت خواهد گرفت. زمانی که احتراق از حالت آرام به حالت اغتشاشی می‌رسد، بایستی اثر متقابل احتراق و اغتشاش را در نظر گرفت. لذا نیاز است در مدل‌سازی آتش با به‌کارگیری مدل احتراقی مناسب، اثرات اغتشاش و احتراق واقع شده در آتش را وارد مدل‌سازی نمود [۳۲].

## ۲-۷- مدل اضمحلال گردابه‌ای

در مقاله حاضر، به‌منظور مدل‌سازی برهمکنش آشفته‌گی احتراق و تعیین نرخ مصرف و یا تولید گونه‌ها از مدل احتراقی اضمحلال گردابه استفاده شده است. در این مدل احتراقی، نرخ مصرف سوخت از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۳۳].

$$\bar{\omega}''_F = -\bar{\rho} \frac{\min(\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_{O_2}/S)}{\tau_{mix}} \quad (15)$$

<sup>3</sup> Smokeview

<sup>4</sup> PIMPLE

<sup>1</sup> National Institute of Standards and Technology (NIST)

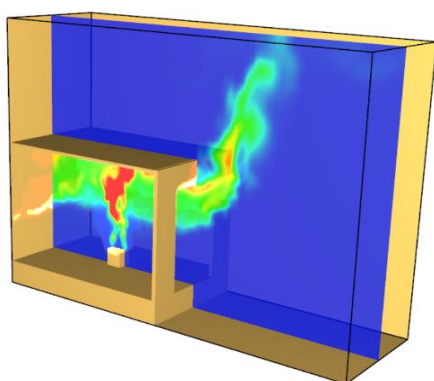
<sup>2</sup> Pyrosim software

به منظور بررسی اثر دما و سرعت رفتار حریق داخل محفظه ۵ سرعت سنج و ۵ دماسنج در محل درب در فاصله‌های ۵، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر از کف قرار داده شده است. دمای فضا در شرایط استاندارد محیط یعنی ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است. نمایی از محیط فضای شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اف‌دی‌اس را در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

### ۳-۲- نتایج عددی

در شکل (۳) کانتور سه‌بعدی از شعله حریق آورده شده است. به منظور تحلیل بهتری از توسعه حریق در این فضا، کانتور دوبعدی دما به همراه بردار سرعت در صفحه میانی اتاق در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. ابتدا سوخت موجود در ظرف با هوا ترکیب شده و احتراق به صورت غیرپیش‌آمیخته شروع می‌شود (زمان کمتر از ۰/۵ ثانیه).

باتوجه به مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ای، شعله‌ورسازی اولیه نیاز به جرقه ندارد و شعله به صورت خودبه‌خودی آغاز می‌شود که البته این موضوع تأثیری در ادامه شبیه‌سازی ندارد. باگذشت زمان شعله اولیه به سمت سقف اتاق کشیده شده (زمان ۱ ثانیه) و از زمان ۲ ثانیه به بعد شعله به سمت درب خروجی هدایت شده و حتی به خارج اتاق کشیده می‌شود. همچنین باتوجه به بردارهای سرعت در درب خروجی، در زمان‌های اولیه (کمتر از ۰/۵ ثانیه) جهت سرعت در تمام مقطع به سمت خارج اتاق جریان دارد. این موضوع ریشه در کاهش چگالی به تبع احتراق است که گازهای داخل اتاق را به سمت خروجی جهت می‌دهد تا به این ترتیب بتواند کاهش چگالی (نیاز به افزایش حجم) را جبران کند. در ادامه از حدود زمان ۱۰ ثانیه، شکل رفتار حریق در این اتاق به حالت پایداری رسیده است، یعنی تا زمانی که شرایط احتراق مهیا باشد به همین حالت به صورت شبه پایدار تا انتها به سوختن ادامه می‌دهد.



مرتبه دوم استفاده شده است. مقدار عدد کورانت موضعی حداکثر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. همچنین شبیه‌سازی به مدت ۱۰۰ ثانیه انجام می‌شود که از ثانیه ۵ به بعد، نتایج متوسط گیری شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

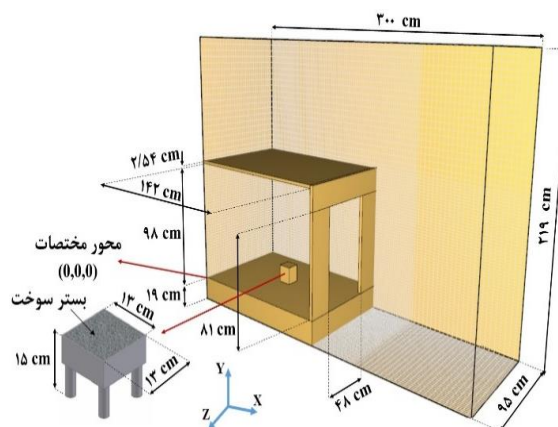
### ۳- نتایج و بحث

در این بخش با اشاره به هندسه مورد مطالعه، نتایج عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱- هندسه مورد بررسی

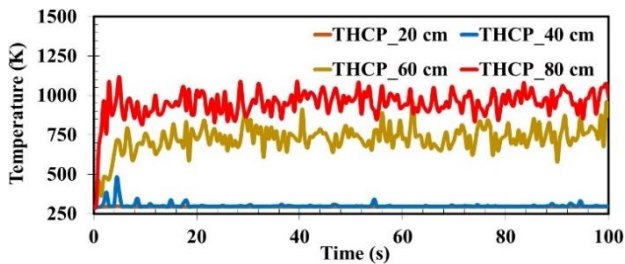
هندسه مورد نظر به منظور شبیه‌سازی، برگرفته از مطالعه آزمایشگاهی باندی و همکاران [۳۷] می‌باشد. این هندسه شامل فضایی به ارتفاع ۹۸ سانتی‌متر و سطح کف آن دارای طول ۱۴۲ سانتی‌متر و عرض ۹۵ سانتی‌متر مربع است. همچنین درب ورودی محفظه دارای سطح مقطع ۸۱ در ۴۸ سانتی‌متر مربع می‌باشد که برای تهویه طبیعی به کار برده شده است.

منبع سوخت مربعی در مرکز محفظه به طول ۱۳ سانتی‌متر مربع و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر از کف تعبیه شده است و سوخت داخل آن متان می‌باشد. دیواره این فضا با دولایه صفحه عایق با ضخامت ۲/۵۴ سانتی‌متر ساخته شده است. برای شبیه‌سازی لازم است ناحیه محاسباتی اضافه در خروجی درب در نظر گرفته شود. از این رو یک فضا روبه‌روی درب ورودی به سطح مقطع ۱۵۸ در ۹۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۱۹ سانتی‌متر از کف محیط قرار داده و همچنین یک ناحیه محاسباتی دیگر هم به بالای فضای شبیه‌سازی به ارتفاع ۱۰۲ سانتی‌متر و سطح مقطع آن هم همانند هندسه اتاق است.



شکل ۲ هندسه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اف‌دی‌اس

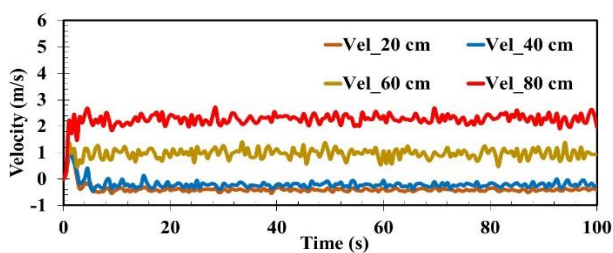
جریان هوای ورودی به اتاق، دمای کمتری را نشان می‌دهد و بالعکس سنسوری که در فاصله ۸۰ سانتی‌متری قرار دارد، حداکثر دما (حدود ۹۷۳ کلوین) را ثبت کرده است.



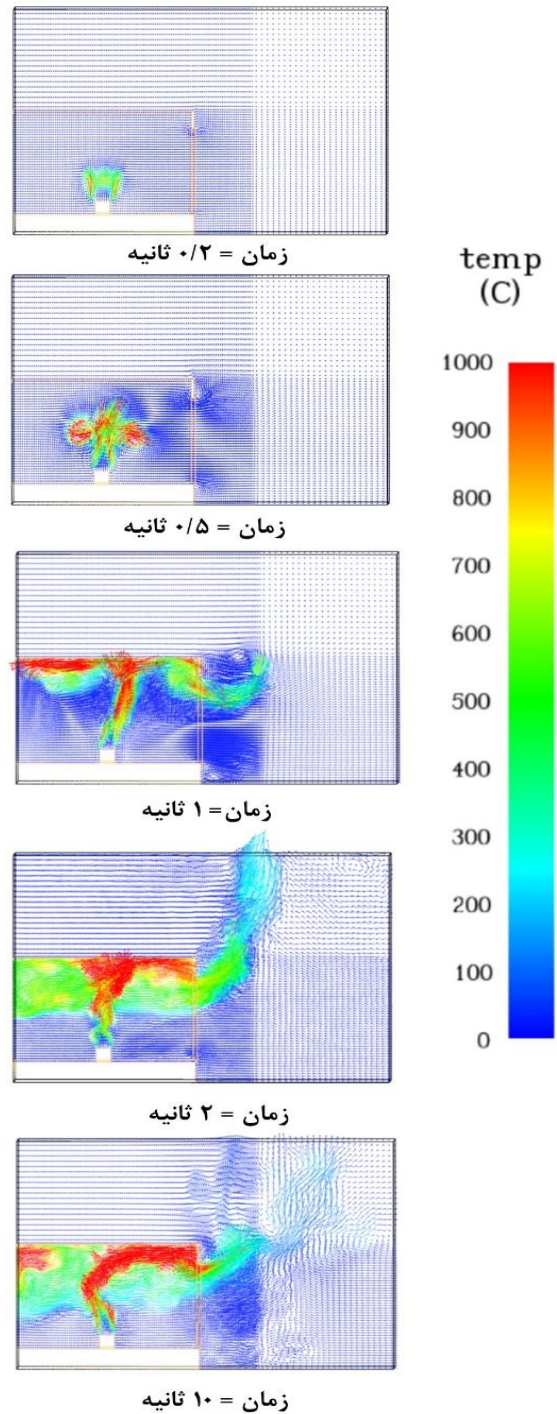
شکل ۴ نتایج عددی دما در خط مرکزی درب در نرم‌افزار افدی‌اس

باتوجه به شکل (۵)، به منظور تحلیل بهتری از شرایط و پارامترهای رفتار حریق در اتاق، همانند سنسورهای دما که در فواصل مختلف قرار داشتند، سنسورهای سرعت نیز وجود داشته است و در این حالت به بررسی سنسورهای سرعت پرداخته و مشخص شد هر ۵ سنسور سرعت در شروع فرایند احتراق و تا زمان حدود ۳ ثانیه افزایش پیدا کرده که علت این موضوع کاهش چگالی فضای اتاق نسبت به محیط بیرون (ناحیه محاسباتی) است. حد مقاله خودداری نمایید. مطالب هر بخش مرتبط با عنوان تیترا آن بخش و دور از حاشیه‌نویسی باشد.

سنسورهای ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری از کف هر دو بعد شروع فرایند احتراق در مرکز اتاق به دلیل دور بودن از شعله و همچنین جریان کاهشی هوای ورودی از پایین درب، باعث شده است بعد از زمان ۵ ثانیه سرعت تا حدود ۰/۵ متر بر ثانیه کاهش یافته و در ادامه به صورت شبه پایدار تا انتها پیش می‌رود. سرعت سنسور ۶۰ سانتی‌متری از کف، بعد از زمان ۲ ثانیه به دلیل جریان هوای گازهای خروجی حاصل از احتراق در حدود سرعت میانگین ۱ متر بر ثانیه (به سمت خارج اتاق) به دست آمده است. باتوجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود سنسور ۸۰ سانتی‌متری از کف نسبت به سایر سنسورها سرعت جریان بیشتری را ثبت نموده (حدود ۲/۴ متر بر ثانیه) که این به دلیل حجم بالای گازهای خروجی احتراق که از بالای درب به فضای خارج هدایت می‌شوند، است.



شکل ۵ نتایج عددی سرعت در خط مرکزی درب در نرم‌افزار افدی‌اس



شکل ۳ کانتورهای دوبعدی و سه‌بعدی شعله در نرم‌افزار افدی‌اس

در شکل (۴) نتایج عددی دما در سنسورهای تعبیه شده در درب برای موقعیت‌های مختلف (در فواصل ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متری) نشان داده شده است. باتوجه به رفتار زمان‌مند در تمامی سنسورها دما از ۲۹۳ کلوین شروع شده و در زمان ۵ ثانیه به بعد به حالت شبه پایدار می‌رسد.

باتوجه به شکل (۴)، سنسوری که در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از کف محیط قرار دارد به دلیل دور بودن از شعله خروجی و گازهای حاصل از احتراق و همچنین جانمایی در محل ورود

### ۳-۳- اعتبارسنجی نتایج دو نرم‌افزار اپن فوم و اف‌دی‌اس با نتایج تجربی

پس از بررسی و تحلیل داده‌های دما و سرعت، بایستی نتایج دو نرم‌افزار اپن فوم و اف‌دی‌اس برای اعتبارسنجی با نتایج تجربی مقایسه شود تا برای تحلیل نهایی به جمع‌بندی رسیده شود. در داده‌های نتایج تجربی برای دقت و بررسی بهتر دما از دو نوع دماسنج استفاده شده است.

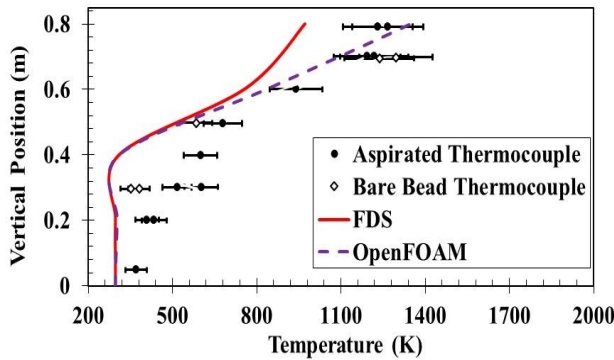
باتوجه به شکل (۶) که مقادیر سنسورهای دما در درب است، می‌توان نتیجه گرفت، دمای داده تجربی برای دماسنج نوع Aspirated در فاصله ۵ سانتی‌متری از کف در حدود ۳۷۰ کلوین است و در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از کف به حدود ۴۲۰ کلوین رسیده است و در همین دو فاصله در نرم‌افزار اپن فوم دما از حدود ۳۰۳ کلوین به ۳۱۰ کلوین رسیده است و همچنین در نرم‌افزار اف‌دی‌اس دما در فاصله ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری حدوداً به صورت ثابت تا ۳۰۰ کلوین می‌رسد.

در فاصله ۲۹ سانتی‌متری، نتایج تجربی به این صورت است که دماسنج نوع Aspirated دمای ۵۶۰ کلوین و دماسنج نوع Bare Bead در همین فاصله نیز با عدم قطعیت  $\pm 30$  دمای ۳۵۲ کلوین را نشان داده و دو نرم‌افزار اپن فوم و اف‌دی‌اس در بازه ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری نسبت نتایج یکسانی داشته و دما در ۳۰۳ کلوین باقی‌مانده است. در فاصله ۴۰ سانتی‌متری نتیجه تجربی ۵۹۰ کلوین را نشان داده است.

در این قسمت نتایج دما در دو نرم‌افزار به صورت نسبتاً یکسان تا فاصله ۵۰ سانتی‌متری و با افزایش دما از ۳۰۳ تا ۵۳۰ کلوین رسیده و در ادامه از یکدیگر فاصله گرفته است. در همین فاصله (۵۰ سانتی‌متری) دو نوع دماسنج Aspirated و Bare Bead به ترتیب دمای ۶۸۰ و ۵۸۰ کلوین را نشان داده است. در این فاصله نتایج عددی با نتایج تجربی همخوانی دارد به نحوی که میزان خطای نسبی دو نرم‌افزار با نتایج تجربی کمتر از ۱۰ درصد است.

در فاصله ۶۰ سانتی‌متری، دماسنج Aspirated دمای ۹۴۰ کلوین را نشان داده و در همین فاصله نرم‌افزار اپن فوم ۸۶۰ کلوین و نرم‌افزار اف‌دی‌اس ۷۸۰ کلوین را نشان می‌دهد. از فاصله ۶۰ سانتی‌متری به بعد نتایج عددی دو نرم‌افزار از یکدیگر فاصله گرفته که نتایج نرم‌افزار اپن فوم به نتیجه تجربی نزدیک‌تر است، به نحوی که میزان خطای نسبی این نرم‌افزار کمتر از ۵ درصد است در صورتی که خطای نسبی نرم‌افزار اف‌دی‌اس بیشتر از ۲۰ درصد است. در انتها مشاهده می‌شود، نتایج تجربی در فاصله ۶۸

سانتی‌متری برای دو نوع دماسنج Aspirated و Bare Bead به ترتیب ۱۱۲۰ و ۱۲۸۰ کلوین است. نتایج نرم‌افزار اف‌دی‌اس از فاصله ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متری تا دمای ۹۸۰ کلوین رسیده و در همین فاصله نرم‌افزار اپن فوم نیز تا ۱۳۲۰ کلوین رسیده است.



شکل ۶ اعتبارسنجی نتایج عددی دما در خط مرکزی درب برای دو نرم‌افزار اپن فوم و اف‌دی‌اس

در شکل (۷) سرعت متوسط سنسورهای نصب شده افقی در خروجی درب اتاق نشان داده است. در کف محیط اتاق، سرعت در نتایج تجربی و هم چنین در دو نرم‌افزار صفر است، زیرا سرعت در دیواره برابر صفر است (شرط عدم لغزش) و هم چنین همین اتفاق در فاصله ۸۰ سانتی‌متری از کف (لبه بالایی درب) در نتایج عددی و تجربی مشاهده شده است. در سنسور اول (فاصله ۵ سانتی‌متری) نتایج تجربی سرعت،  $1/2$  متر بر ثانیه است که علامت منفی نشان‌دهنده ورود هوای محیط اطراف است. در همین نقطه نتایج دو نرم‌افزار هم به همین موضوع دلالت دارند و سرعت  $0/5$  تا  $0/7$  را نشان می‌دهد.

در فاصله ۲۰ سانتی‌متری سرعت جریان خروجی کمی افزایش یافته (نتیجه تجربی سرعت ۱- متر بر ثانیه را نشان می‌دهد و هم چنین دو نرم‌افزار نیز تا حدودی سرعتی بیشتر از فاصله ۵ سانتی‌متری را تجربه کرده) و در ادامه بعد از فاصله ۲۰ سانتی‌متری، سنسور نصب شده در ۴۰ سانتی‌متری، سرعت نتیجه تجربی آن  $0/4$  متر بر ثانیه است که در همین فاصله دو نرم‌افزار سرعت کمتری (کمتر از  $0/1$  متر بر ثانیه) را نشان داده است.

باتوجه به شکل (۷) نتایج عددی نرم‌افزار اپن فوم برای سرعت، همچون نتایج دما در خروجی درب، به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. دمای سنسور TF2 نسبت به سنسور TF1، بالاتر است؛ زیرا باتوجه به جریان هوای خروجی و شعله آتش که از سمت درب به بیرون از اتاق منتقل می‌شود، باعث شده دمای بالاتری را گزارش کند.

جدول ۱ مشخصات دو سنسور دما در نتایج تجربی و دو نرم افزار  
این فوم و اف دی اس

نام سنسور	مختصات سنسور (سانتی متر)	نتایج تجربی دما (کلوین)	نتیجه عددی دما (کلوین)	نتیجه عددی دما (کلوین) اف دی اس
TF1	(۲۹، ۸۸، ۱۳۲)	$1014 \pm 54$	۱۱۷۵	۹۱۵
TF2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	$1325 \pm 100$	۱۴۴۵	۱۱۸۹

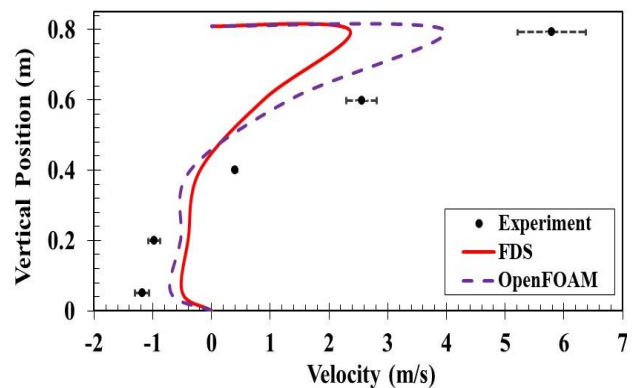
از بین گونه های مختلف خروجی حاصل از احتراق، در این گزارش به بررسی سه نوع آن پرداخته شده است. در جدول (۲) مشخصات و نتایج دو گونه های سمی دی اکسید کربن و مونوکسید کربن و گونه اکسیژن نشان داده شده است. هر سنسور گونه در دو موقعیت شبیه به محل نصب سنسورهای TF1 و TF2 قرار داده شده است.

در سنسور OX1، نتیجه عددی نرم افزار اف دی اس نسبت به این فوم دقت بهتری دارد، ولی در سنسور OX2 این اتفاق برعکس رخ داده است و نرم افزار این فوم دقت بیشتری دارد. علت مقدار اختلاف گزارش شده اکسیژن در این دو سنسور به دلیل وجود شعله آتش در نزدیکی درب است. از این رو مقدار اکسیژن در موقعیت OX1 به نسبت سنسور OX2 کمتر است. در سنسور CD1 (کربن دی اکسید) نتیجه تجربی مقدار ۸ درصد با عدم قطعیت ۰/۴ را ثبت نموده است که هر دو نرم افزار نیز در این نقطه از دقت خوبی برخوردار هستند و در سنسور CD2 این مقدار در حدود ۷/۳ درصد با میزان عدم قطعیت ۰/۲۴ درصد است که در این سنسور نتیجه نرم افزار اف دی اس تطابق بهتری با نتیجه تجربی دارد.

دو سنسور CM1 و CM2 که مربوط به اندازه گیری غلظت کربن مونوکسید هستند، به ترتیب دارای نتیجه تجربی ۱/۷ با عدم قطعیت ۰/۳ و ۲/۱ با عدم قطعیت ۰/۳۵ است که این مقادیر فقط در نرم افزار اف دی اس محاسبه گردیده است که در دو سنسور این نرم افزار مقدار تقریبی ۱ درصد گزارش شده و میزان خطا هر دو سنسور مقداری بالا است که نیاز به استفاده از سینتیک بالاتری دارد.

در نرم افزار این فوم به علت استفاده از سینتیک تک مرحله ای مقدار گونه کربن مونوکسید گزارش نشده است.

سنسور TF2 دمای ۱۳۲۵ کلوین با عدم قطعیت ۱۰۰ درجه را نشان داده و همچنین دو نرم افزار اف دی اس و این فوم در این نقطه به ترتیب دمای ۱۱۸۹ و ۱۴۴۵ کلوین را نشان داده است که در این سنسور نتیجه نرم افزار این فوم به نتیجه تجربی نزدیک تر بوده و خطای نسبی این نرم افزار ۹ درصد است که دقت بالایی دارد.



شکل ۷ اعتبارسنجی نتایج عددی دما در خط مرکزی درب برای دو نرم افزار این فوم و اف دی اس

در جدول (۱) مشخصات و نتایج به دست آمده دو سنسور دما، یکی در ارتفاع ۸۸ سانتی متری و فاصله ۲۹ سانتی متری از سطح دیوار انتهایی اتاق (TF1) و دیگری در ارتفاع ۸۸ سانتی متری و در فاصله ۱۳۲ سانتی متری از سطح دیوار انتهایی (TF2)، آورده شده است. دو سنسور از یکدیگر ۱۰۳ سانتی متر فاصله داشته و باتوجه به فاصله نصب شده از کف و نزدیک بودن به شعله حریق، هر دو سنسور، دما بالایی (نزدیک به ۱۰۰۰ کلوین) را گزارش کردند.

نتایج تجربی در سنسور TF1 با عدم قطعیت ۵۴ کلوین، ۱۰۱۴ کلوین را نشان داده و در همین سنسور دو نرم افزار اف دی اس و این فوم به ترتیب ۹۱۵ و ۱۱۷۵ کلوین را گزارش کرده است که هر دو نرم افزار با خطای نسبی کمتر از ۱۵ درصد به نتیجه تجربی نزدیک هستند (اگرچه نرم افزار اف دی اس کمی دقت بالاتری دارد). دمای سنسور TF2 نسبت به سنسور TF1، بالاتر است؛ زیرا باتوجه به جریان هوای خروجی و شعله آتش که از سمت درب به بیرون از اتاق منتقل می شود، باعث شده دمای بالاتری را گزارش کند. سنسور TF2 دمای ۱۳۲۵ کلوین با عدم قطعیت ۱۰۰ درجه را نشان داده و همچنین دو نرم افزار اف دی اس و این فوم در این نقطه به ترتیب دمای ۱۱۸۹ و ۱۴۴۵ کلوین را نشان داده است که در این سنسور نتیجه نرم افزار این فوم به نتیجه تجربی نزدیک تر بوده و خطای نسبی این نرم افزار ۹ درصد است که دقت بالایی دارد.

بهتری داشته و در سنسور OX2 نرم افزار اپن فوم دقت بیشتری دارد. علت مقدار اختلاف گزارش شده اکسیژن در این دو سنسور به دلیل وجود شعله آتش در نزدیکی درب است. در سنسور CD1 (کربن دی اکسید) هر دو نرم افزار از دقت خوبی برخوردار هستند؛ اگرچه نتایج نرم افزار اپن فوم بهتر بوده است. مقادیر دو سنسور CM1 و CM2 فقط در نرم افزار افدی اس محاسبه گردیده است و میزان خطا هر دو سنسور نسبتاً بالا است که نیاز به استفاده از سینتیک بالاتری دارد. در نرم افزار اپن فوم به علت استفاده از سینتیک تک مرحله ای مقدار گونه کربن مونوکسید گزارش نشده است.

#### ۵- مراجع

- [1] M. Organization. "Statistics of deaths caused by burns." [https://www.lmo.ir/web\\_directory/54002.html](https://www.lmo.ir/web_directory/54002.html) (accessed Sep. 05, 2023, 2023).
- [2] E. Georges, H. Pretrel, K. Varrall, and O. Vauquelin, "Burning rate of elevated pool fire in a well-ventilated compartment: Effects of radiative heat fluxes," *Fire Safety Journal*, p. 103933, 2023/09/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103933>.
- [3] J. Willi, D. Madrzykowski, M. McKinnon, and N. Dow, "Experimental data from compartment fires with gas burner and upholstered furniture fuels," *Data in Brief*, vol. 47, p. 108934, 2023/04/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.108934>.
- [4] J. Lee, B. Kim, S. Lee, and W. G. Shin, "Validation of the fire dynamics simulator (FDS) model for fire scenarios with two liquid pool fires in multiple compartments," *Fire Safety Journal*, vol. 141, p. 103892, 2023/12/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103892>.
- [5] X. Shen *et al.*, "Inverse tracing of fire source in a single room based on CFD simulation and deep learning," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107069, 2023/10/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107069>.
- [6] A. I. Filkov *et al.*, "A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment," *Fire Safety Journal*, vol. 140, p. 103871, 2023/10/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871>.
- [7] S. Shaharuddin, K. N. Abdul Maulud, S. A. F. Syed Abdul Rahman, A. I. Che Ani, and B. Pradhan, "The role of IoT sensor in smart building context for indoor fire hazard scenario: A systematic review of interdisciplinary articles," *Internet of Things*, vol. 22,

جدول ۲ مشخصات دو سنسور دما در نتایج تجربی و دو نرم افزار اپن فوم و افدی اس

نام سنسور	مختصات سنسور (سانتی متر)	نتایج تجربی	نتیجه عددی: اپن فوم	نتیجه عددی: افدی اس
OX1	(۱۳۲، ۸۸، ۲۹)	$0.11 \pm 0.15$	۰/۵	۰/۵
OX2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	$0.36 \pm 0.52$	۰/۵	۰/۶
CD1	(۱۳۲، ۸۸، ۲۹)	$0.4 \pm 8$	۸/۹	۵/۵
CD2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	$0.28 \pm 7/3$	۸/۹	۵
CM1	(۱۳۲، ۸۸، ۲۹)	$0.3 \pm 1/7$	—	۱/۰۵
CM2	(۲۹، ۸۸، ۲۹)	$0.35 \pm 2/1$	—	۰/۹۵

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش های شبیه سازی در رایانه ها توسط دو نرم افزار اپن فوم و افدی اس، به تحلیل رفتار حریق (پارامترهای دما، سرعت و گونه) در فضای اتاقی پرداخته شد. همچنین، مدل اغتشاشی مورد نظر شبیه سازی گردابه های بزرگ و مدل احتراقی اضمحلال گردابه بود. نتایج مورد نظر در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه در یک اتاق بررسی و تحلیل شد که نتایج زیر مشاهده شد:

۱- با بررسی نتایج تجربی دما و مقایسه نتیجه عددی آن در دو نرم افزار مشخص شد، نتایج نرم افزار اپن فوم خطای نسبی کمتری نسبت به نرم افزار افدی اس دارد (به ترتیب ۲۲/۴ و ۲۵/۲) و نتایج سرعت آن نیز به این گونه است که دارای خطای نسبی ۵۰/۸ درصد در نرم افزار اپن فوم و ۵۴/۴ درصد در نرم افزار افدی اس به ثبت رسیده است. پس مشاهده شده است نتایج سرعت در هر دو نرم افزار خطای نسبی بیشتری نسبت به نتایج دما به ثبت رسیده که به صورت کلی نتایج نرم افزار اپن فوم قابل قبول تر است.

۲- همچنین با بررسی نتایج گونه نیز مشخص شد در سنسور OX1، نتیجه عددی نرم افزار افدی اس نسبت به اپن فوم دقت

- [17] S. M. J. Razeghi, m. safarzadeh, and H. PashdarShahri, "Comparison study of compartment fire simulation with steady laminar flamelet and eddy dissipation model," (in Persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 2953-2966, 2021, doi: 10.22060/mej.2020.17303.6568.
- [18] H. Pashdarshahri, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, "Development of Compatible Subgrid Scale Model of LES in Numerical Simulation of Compartment Fires," Ph. D. Thesis, Tehran, Tarbiat Modares University, 2013, (In Persian), 2013.
- [19] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. PashdarShahri, "Numerical investigation of compartment fire under maximum and minimum of natural ventilation using flamelet generated manifold combustion model," (in Persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 5 (Special Issue), pp. 3335-3350, 2021, doi: 10.22060/mej.2020.18086.6729.
- [20] G. Maragkos and B. Merci, "Large Eddy Simulations of CH<sub>4</sub> Fire Plumes," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 99, 07/01 2017, doi: 10.1007/s10494-017-9803-4.
- [21] Y. P. Almeida, P. L. C. Lage, and L. F. L. R. Silva, "Large eddy simulation of a turbulent diffusion flame including thermal radiation heat transfer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 81, pp. 412-425, 2015/04/25/ 2015, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.027>.
- [22] M. Mapar, G. Heidarinejad, and H. Pashdarshahri, "Numerical Investigation of Two Simultaneous Fires in a Tunnel and Evaluation of the Obstructive Influence of Vehicles by Large Eddy Simulation," (in Persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 15, pp. 10-22, 2014. [Online]. Available: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-1927-en.html>.
- [23] R. Friedman, "An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke," *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 81-92, 1992, 10.1177/104239159200400301.
- [24] M. Monfared Mesqani, Mehriyar, Reza., "Investigation of the models used for the simulation of fire and smoke emission in closed spaces," (In Persian), *Mechanical Engineering*, vol. 25, no. 4, pp. 49-64, 2015, <https://dorl.net/dor/20.1001.1.16059719.1398.28.4.3.5>.
- [25] D. moradi, "Comparison of fire modeling in enclosed areas," (In Persian), 4th Iran Combustion Conference, Kashan, 2011.
- [26] H. PashdarShahri, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, "Large Eddy Simulation of Fire-induced p. 100803, 2023/07/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100803>.
- [8] H. Cheng and G. V. Hadjisophocleous, "The modeling of fire spread in buildings by Bayesian network," *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 6, pp. 901-908, 2009/08/01/ 2009, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.05.005>.
- [9] Z. Yan, "Development in comprehensive CFD simulation of fire and explosion," *Journal of Safety Science and Resilience*, vol. 4, no. 2, pp. 203-219, 2023/06/01/ 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.12.003>.
- [10] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pashdarshahri, "A Study on turbulence-combustion interaction and Sub-grid Scale model in the simulation of Methane pool fire using LES," (in en), *Scientia Iranica*, vol. 28, no. 4, pp. 2133-2149, 2021, 10.24200/sci.2021.53390.3217.
- [11] M. A. Orabi, A. A. Khan, L. Jiang, T. Yarlaga, J. Torero, and A. Usmani, "Integrated nonlinear structural simulation of composite buildings in fire," *Engineering Structures*, vol. 252, p. 113593, 2022/02/01/ 2022, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113593>.
- [12] Z.-h. Li, Y. He, H. Zhang, and J. Wang, "Combustion characteristics of n-heptane and wood crib fires at different altitudes," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 32, no. 2, pp. 2481-2488, 2009/01/01/ 2009, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.033>.
- [13] X. Yan and T. Gernay, "Numerical modeling of localized fire exposures on structures using FDS-FEM and simple models," *Engineering Structures*, vol. 246, p. 112997, 2021/11/01/ 2021, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112997>.
- [14] T. Sikanen and S. Hostikka, "Predicting the heat release rates of liquid pool fires in mechanically ventilated compartments," *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 266-275, 2017/07/01/ 2017, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.060>.
- [15] H. Pr  tre, N. Chaaoui, B. Lafdal, and S. Suard, "Effect of environmental conditions on fire combustion regimes in mechanically-ventilated compartments," *Fire Safety Journal*, vol. 127, p. 103493, 2022/01/01/ 2022, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103493>.
- [16] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pashdarshahri, "Air curtain to control smoke and fire spread in a ventilated multi-floor building," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 159, p. 106612, 2021/01/01/ 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106612>.

- 42, no. 4, p. 208, 2020/03/30 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02291-9.
- [33] A. Ershadi and M. Rajabi Zargarabadi, "Prediction of turbulent Prandtl number in the methane-air combustion using a second-order turbulent scalar flux model," (In Persian), *Fuel and Combustion*, vol. 12, no. 2, pp. 31-48, 2019, doi: 10.22034/jfnc.2019.92713.
- [34] G. Heidarinejad, H. PasharShahri, and m. safarzadeh, "The Importance of the Compatible Combustion and Sub-grid Scale Models on the Simulation of Large-Scale Pool Fire," (In Persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 9, pp. 2425-2442, 2019, doi: 10.22060/mej.2019.15288.6085.
- [35] J. Floyd, G. Forney, S. Hostikka, T. Korhonen, R. McDermott, K. B. McGrattan, and C. Weinschenk, "Fire dynamics simulator user's guide," in *NIST Special Publication* vol. 1019, ed, 2012.
- [36] J. Zhang, Y. Tao, X. Liu, and H. Zhao, "Fire Simulation Research on a Bus Based on Pyrosim," in *Journal of Physics: Conference Series* vol. 1678, ed, 2020.
- [37] M. Bundy, E. L. Johnsson, and M. Bundy, "NIST Technical Note 1483 Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires NIST Technical Note 1483 Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires," 2007, <https://doi.org/10.6028/nist.tn.1483>.
- Flow behind a Combustible Vertical Wall," (in Persian), *Fuel and Combustion*, vol. 6, no. 1, pp. -, 2013. [Online]. Available: [https://www.jfnc.ir/article\\_46170\\_d33d99e40600856fe1cce3c8b0a21402.pdf](https://www.jfnc.ir/article_46170_d33d99e40600856fe1cce3c8b0a21402.pdf).
- [27] A. Mostofizadeh, G. Moshir, and M. Bazazzadeh, "Investigation of the Effect of Centrifugal Acceleration on the Flame Propagation Speed in Premixed Combustion," (in Persian), *Fuel and Combustion*, vol. 14, no. 4, pp. 100-122, 2022, doi: 10.22034/JFNC.2022.314576.1293.
- [28] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overhold, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User 's Guide (FDS)," in *NIST Special Publication 1019* vol. Sixth Edit, ed, 2020, p. 402.
- [29] G. Heidarinejad, *An introduction to turbulence*. (In Persian), Tehran: Tarbiat Modares University, 2009, p. 185.
- [30] D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD," vol. 2, ed: DCW industries La Canada, CA, 1998, [http://sutlib2.sut.ac.th/sut\\_contents/H133907.pdf](http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H133907.pdf).
- [31] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1 : Mathematical Model," vol. 1, ed, 2015, pp. 1-147.
- [32] S. M. J. Razeghi, M. Safarzadeh, and H. Pasharshahri, "Comparison of combustion models based on fast chemistry assumption in large eddy simulation of pool fire," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol.