

مطالعه عددی تأثیر مکان نازل سیستم اطفای حریق مه آب در خاموشی آتش محافظت شده

قاسم حیدری نژاد^{۱*}، حمید تجدد^۲، محمد صفرزاده^۳

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، gheidari@modares.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، h.tajaddod@modaers.ac.ir

۳- دانش‌آموخته دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، m.safarzadeh@modaers.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶ دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶)

چکیده: با قرارگیری آتش در محفظه، مشکلاتی همچون عدم دسترسی به آتش و عدم نشست ذرات اسپری منجر به تأخیر در خاموشی شعله می‌شود. از این رو در این پژوهش با مطالعه عددی، رشد و گسترش حریق و اطفای آن با سیستم اطفای حریق مه آب با اثربخشی موقعیت نازل در آتش محافظت شده انجام شده است. مکان اثر نازل سیستم اطفای حریق مه آب تحت پنج موقعیت قرارگیری چهار طرف، حالت مرکزی و یک طرف، حالت مرکزی و چهار طرف، حالت یک طرف و حالت مرکزی ارزیابی و بررسی شده است. هندسه پژوهش یک اتاق بدون سقف بوده که در دیواره آن درب یا پنجره‌ای وجود ندارد. منبع سوخت در مرکز اتاق قرار داشته و صفحه‌ای در مرکز اتاق به‌عنوان سپر آتش (صفحه آتش محافظت شده) با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از کف اتاق (بر روی آتش) قرار دارد. با توجه به نتایج مشخص شد که سه حالت چهار طرف، حالت مرکزی و یک طرف و حالت مرکزی و چهار طرف به ترتیب بهترین حالت‌ها برای خاموشی آتش محافظت شده هستند که بعد از ۲۲ ثانیه آتش را خاموش سازد. در مجموع، می‌توان گفت که حالت مرکزی و یک طرف با داشتن تعداد نازل کمتر می‌تواند بهترین عملکرد را به دنبال داشته باشد.

کلیدواژه‌گان: مطالعه عددی، سیستم اطفای حریق مه آب، آتش محافظت شده، دینامیک سیالات محاسباتی، نازل اسپری

مقدمه

رفتار و گسترش حریق در محیط‌های مختلف همواره به یک بحث مهم در جهان بدل شده است و مهندسان در تلاش هستند که از فرایند پیشروی و گسترش حریق در محیط جلوگیری کرده و خطرات متناسب با آن‌ها را کاهش دهند. امروزه از سیستم‌های اطفای حریق به طور گسترده در ساختمان‌ها و اماکن مسکونی، اداری و صنعتی استفاده شده تا در مواقع بروز آتش‌سوزی، خسارت‌ها و تلفات ناشی از حریق را به حداقل برسانند؛ 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 این چنینی 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 ده ماهه نخست سال ۱۴۰۱، ۱۷۲۵ نفر است [۱].

با افزایش آگاهی حفاظت از محیط‌زیست و توسعه پایدار در جوامع بین‌المللی، عوامل اطفای حریق هالون که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته بودند، به دلیل پتانسیل قوی تخریب لایه ازن از زمان پروتکل مونترال^۱، به تدریج حذف شدند

^۱ Montreal Protocol

[۲] و سیستم اطفای حریق مه‌آب از سوی برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد^۱ [۳] به عنوان یک جایگزین مناسب از اوایل دهه ۶۰ میلادی در نظر گرفته شده است [۴]. فناوری سیستم اطفای حریق مه‌آب به دلیل مزایای عدم آلودگی محیط‌زیست، پایداری، راندمان بالا، صرفه‌جویی در مصرف آب [۵] و آسیب اندک به اهداف حفاظت‌شده [۶]، به‌طور گسترده توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است و همچنین محققان با مطالعات تجربی و عددی زیادی، اثربخشی سیستم اطفای حریق مه‌آب را برای آتش استخری [۷-۹]، آتش‌سوزی جسم جامد از نوع چوب [۱۰، ۱۱]، آتش‌سوزی سوخت متان-هوا [۱۲]، آتش‌سوزی ترانسفورماتورهای برق [۱۳] و آتش‌سوزی در تونل [۱۴] را تأیید کرده‌اند. همچنین آزمایش‌های آتش‌سوزی در مقیاس بزرگ برای مطالعه برهمکنش بین ستون‌های آتش و سیستم‌های اطفای حریق مبتنی بر آب انجام شده است [۱۵، ۱۶].

مهار آتش با استفاده از سیستم مه‌آب به دو عامل بستگی دارد؛ یعنی عوامل اولیه (خنک‌شدن فاز گاز، کاهش اکسیژن و بخار قابل اشتعال و خنک‌شدن بستر سوخت) و عوامل ثانویه (تضعیف تشعشع) [۱۷]. توانایی سیستم مه‌آب در خاموش کردن آتش، تحت تأثیر ویژگی‌های وابسته به نازل همچون اندازه متوسط قطرات آب [۱۸]، زاویه پاشش، فشار تزریق و سرعت جریان عبوری از نازل [۱۹]، تعداد نازل‌های محیطی و زاویه محیطی [۲۰] نیز توسط محققان مطالعاتی صورت گرفته است. همچنین به عنوان مثال، چوکا و همکاران [۲۱] تأثیر اندازه قطرات و موقعیت نازل برای خاموش کردن آتش استخری بررسی کردند و مشخص شد که تعیین موقعیت نازل می‌تواند بازدهی سیستم اطفای حریق مه‌آب را تا دو برابر افزایش دهد و یا وانگ و همکاران [۲۲] با استفاده از سیستم مه‌آب در یک فضا، با تغییر فاصله صفحه مانع و منبع سوخت، آزمایش‌هایی مختلف را برای تعیین وضعیت بحرانی اطفای حریق آتش محافظت شده انجام دادند. برای شبیه‌سازی برهم‌کنش اسپری و ستون آتش در شرایط آتش محافظت شده از نرم افزار اف‌دی‌اس استفاده شد. اعتبارسنجی نتایج تجربی و عددی، اطفای حریق مناسبی را در مواردی با نسبت صفحه آتش محافظت شده در فاصله پایین و اندازه آتش نشان می‌دهد.

یو و چن [۲۳] به یک سری آزمایش‌های آتش‌سوزی در مقیاس کامل و شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار اف‌دی‌اس پرداختند. این مطالعه با هدف اثربخشی سیستم اطفای حریق در توربین‌های بادی تحت سناریوی مولد باد بر رشد و گسترش حریق در محفظه انجام شد. آنان دریافتند با شبیه‌سازی عددی می‌توان اثربخشی سیستم و سایر پارامترهای حریق همچون منابع آتش محافظت شده یا بدون محافظت‌شده، تعداد نازل و محل سوخت را مقایسه و تحلیل کرد. مطالعه تجربی نشان داد که موقعیت نازل‌های مه‌آب و غبار آب بر بستر سوخت تأثیر قابل توجهی دارند. همچنین مشاهده شد در بررسی تجربی، سیستم مه‌آب قادر به خاموش کردن آتش در مدت دو دقیقه برای منبع آتش محافظت‌شده در مرکز محیط و در مدت پنج دقیقه برای همین منبع در گوشه محیط است.

چن و همکاران [۲۴] با مطالعه عددی و استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس، عملکرد سیستم اطفای حریق مه‌آب برای خاموش کردن حریق در اتاق با بلوک و موانع مختلف، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در شبیه‌سازی، عواملی مانند قطر ذرات آب، محل نازل و موانع بلوک، بین نازل و منبع آتش مؤثر است. مشاهده شد خنک‌کنندگی و حذف اکسیژن مکانیسم‌های غالب سیستم اطفای حریق مه‌آب هستند. در صورت عدم وجود مانع، خنک‌کنندگی مکانیزم غالب برای اطفای حریق است و در صورت وجود مانع، حذف اکسیژن مکانیسم غالب برای اطفای حریق می‌شود، زیرا پاشیدن مستقیم آب به داخل شعله دشوار است.

وضعیت آتش محافظت شده در پژوهش‌های زانگ و همکاران [۲۵] و یو [۲۶] مورد بررسی قرار گرفت که بر روی یک مدل مقیاس‌پذیری مبتنی بر عدد فرود برای اطفای حریق با مه‌آب تمرکز داشتند. با این وجود، بایستی مطالعات بیشتری به صورت عددی و تجربی در مورد اطفای حریق آتش محافظت‌شده تحت شرایط مختلف با سیستم مه‌آب باید انجام شود. با توجه به مرور مطالعات پیشین، مشاهده می‌شود که نقش موقعیت و نحوه پاشش مه‌آب تأثیر به‌سزایی بر کنترل و خاموشی آتش دارد و

¹ United Nations Environment Programme (UNEP)

زمانی که آتش به صورت محافظت شده باشد، کنترل و خاموشی آن به مراتب پیچیده تر می شود. همچنین یکی از خلاءهای این مطالعات، عدم بررسی اثر ترکیب موقعیت و تعداد نازل های مه آب بر آتش محافظت شده می باشد. از این رو در این پژوهش، شبیه سازی رشد و گسترش حریق و اطفای آن با سیستم مه آب، تغییرات ویژگی نازل مانند تعداد و موقعیت نازل، تحت تأثیر استفاده از آتش محافظت شده در داخل یک محفظه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی تمام حالت های ممکن در نصب نازل ها در یک اتاق، سیستم اطفای حریق مه آب تحت پنج سناریوی مختلف (پنج موقعیت قرارگیری چهار طرف، حالت مرکزی و یک طرف، حالت مرکزی و چهار طرف، حالت یک طرف و حالت مرکزی) ارزیابی و بررسی می شود.

معادلات حاکم

رفتار آتش در محیط به صورت یک جریان اغتشاشی بوده و دارای جریانی با چگالی متغیر و عدد ماخ پایین است که به دلیل تغییرات چگالی بایستی از متوسط گیری وزنی فاور برای متوسط گیری معادلات انتقال استفاده شود. معادلات حاکم به فاز پیوسته (جریان آتش) و فاز گسسته (جریان پاشش ذرات آب) تقسیم می شود. در مختصات کارتزین، معادلات متوسط گیری برای بقای جرم (۱)، بقای مومنتوم (۲)، بقای انرژی (۳)، بقای گونه ها (۴) و معادله حالت (۵) به صورت زیر است [۲۷].

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u}) = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot \left[\mu_{eff} \left(\nabla \tilde{u} + (\nabla \tilde{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{u}) I \right) \right] + \bar{\rho} g + f_b \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{h}_s) = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_{th} + \frac{\nu_{sgs}}{Pr_t} \right) \nabla \tilde{h}_s \right] - \nabla \cdot \bar{q}_r'' + \bar{q}_c''' + \dot{q}_b''' \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{Y}_k) = \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_k + \frac{\nu_{sgs}}{Sc_t} \right) \nabla \tilde{Y}_k \right] + \dot{m}_{b,k}''' + \bar{\omega}_k''', \quad (k = 1, \dots, N_s - 1) \quad (4)$$

$$\bar{p} = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (5)$$

در معادلات (۱) الی (۵)، $\bar{\rho}$ چگالی، \tilde{u} سرعت، \bar{P} فشار، $\mu_{eff} = \mu + \mu_{sgs}$ ویسکوزیته دینامیکی، μ ویسکوزیته آرام، $\mu_{sgs} = \bar{\rho} \nu_{sgs}$ ویسکوزیته مقیاس زیر شبکه، g شتاب گرانشی، f_b مجموعه نیروهای وارد ذره از فاز گسسته به فاز پیوسته، \tilde{h}_s انرژی محسوس، D_{th} ضریب انتشار حرارتی، Pr_t عدد پرناتل جریان آشفته، \bar{q}_r'' شار حرارت تابشی، $\bar{q}_c''' = \Delta H_c \bar{\omega}_F'''$ نرخ آزاد شدن گرما در واحد حجم در اثر احتراق است، ΔH_c گرمای احتراق سوخت، \dot{q}_b''' گرمای ناشی از تبخیر ذرات، \tilde{Y}_k کسر جرمی گونه، D_k ضریب انتشار جرم گونه، Sc_t عدد اشمیت آشفته، $\dot{m}_{b,k}'''$ نرخ تغییر جرم ذرات و $\bar{\omega}_k'''$ نرخ سرعت واکنش گونه هستند [۲۷].

در این مطالعه از مدل توربولانسی شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است. در مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ، جریان به دو بخش گردابه های بزرگ و گردابه های کوچک تقسیم می شود. گردابه های بزرگ به صورت مستقیم حل می شود؛ در حالی که برای گردابه های کوچک مدل سازی صورت می گیرد [۲۸]. در روش گردابه های بزرگ، انتخاب مدل مناسب برای محاسبه ترم تنش ناشی از اغتشاش (τ_{SGS}) که به نام مدل زیر شبکه شناخته می شود، بسیار گسترده و پیچیده بوده است.

روش شناخته شده اسمگورینسکی بیشتر از سایر مدل‌های زیر شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد وجود دارد. در این روش، مقدار لزجت گردابه‌ای با توجه به طول مشخصه و مقیاس سرعت به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [۲۹].

$$\mu_{SGS} = \bar{\rho}(C_s \Delta)^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (6)$$

در رابطه (۶)، C_s یک ثابت تجربی است و ضریب تطبیقی در مدل اسمگورینسکی است. Δ پهنای فیلتر بوده و در نرم‌افزار اف-دی‌اس برابر با ریشه سوم حجم سلول محاسباتی قرار داده شده است. برای شبیه‌سازی فرایند تبخیر قطرات آب در هوا، از دیدگاه اولری-لاگرانژی استفاده شده است. در این دیدگاه هوا (جریان حریق) به عنوان فاز پیوسته و قطرات آب به عنوان فاز گسسته در نظر گرفته شده است. برای توضیح بهتر نحوه عملکرد سیستم مه آب، هر سه معادله بقای جرم، بقای مومنتوم و بقای انرژی در فاز گازی و نحوه حرکت ذرات آب در فاز مایع در میدان فازگازی باید در نظر گرفته شود. علاوه بر این، بقای-جرم، بقای مومنتوم و بقای انرژی انتقالی بین گاز و مایع نیز باید در نظر گرفته شود [۲۴].

در نرم‌افزار اف‌دی‌اس شکست اولیه و ثانویه قطرات اسپری آب در نظر گرفته نمی‌شود و فرض را بر آن می‌گذارد که قطرات به صورت کاملاً آتمایزه شده بدون شکست وارد محفظه می‌شوند که البته در مراجع زیادی [۳۰ و ۳۱] از این فرض استفاده کردند. البته دلیل این امر این است که پدیده‌های همچون شکست اولیه و ثانویه در نواحی نزدیک اسپرینکلر اتفاق می‌افتد. این در صورتی است که فاصله اسپرینکلر و شعله آتش تا چندین متر نیز می‌رسد؛ بنابراین از نواحی که فیزیک شکست اولیه و ثانویه حاکم است بسیار دور می‌شود از این رو می‌توان با فرض قابل قبولی از مدل کردن این فیزیک‌ها دور شد. مومنتوم انتقال یافته از ذرات به جریان هوا با افزودن نیروی هر ذره در سلول شبکه حوزه محاسباتی و تقسیم بر حجم سلول همان حوزه به دست می‌آید، همچنین از پدیده برخورد قطرات^۱ صرف نظر شد [۱۴] و حرکت قطرات آب (بقای مومنتوم) در فضای آزاد را می‌توان با معادله (۷) نشان داد [۲۴].

$$\frac{d}{dt}(m_d u_d) = -\frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (u_d - u) |u_d - u| + m_d g \quad (7)$$

در رابطه (۷) m_d جرم قطره آب، C_D ضریب درگ، u_d سرعت قطرات آب، u سرعت فاز گاز، g چگالی هوا است. در هر سلول شبکه محاسباتی که در فاز پیوسته وجود دارند، با برقراری شرایط تبخیر، نرخ تغییر جرم بین دو فاز فعال می‌شود. نرخ تبخیر تابعی از کسر جرمی بخار تعادل مایع (α)، m_p جرم قطره مایع، A_p مساحت سطح قطره، h_m ضریب انتقال جرم، ρ_g چگالی گاز، $Y_{\alpha,l}$ گونه گازی، $Y_{\alpha,g}$ کسر جرمی بخار فاز گاز موضع است. در مدل محاسبه نرخ تبخیری که در نرم‌افزار اف‌دی‌اس استفاده می‌شود؛ ابتدا معادله بقای جرم به فرم رابطه (۸) اتخاذ می‌شود [۳۰].

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p h_m \rho_g (Y_{\alpha,l} - Y_{\alpha,g}) \quad (8)$$

که در رابطه انتقال جرم (۸) نشان داده شده است به صورت معادله (۹) نوشته می‌شود [۳۰].

$$h_m = \frac{Sh D_{lg}}{L} ; \quad Sh = 2 + 0.6 Re_D^{1/2} Sc^{1/3} \quad \text{droplet} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، Sh عدد شروود^۲، D_{lg} ضریب پخش دو جزئی بین بخار مایع و فاز پیوسته، L مقیاس طولی متناسب با قطر قطره، Re_D عدد رینولدز قطره برحسب قطر و سرعت نسبی هوا-قطره و Sc عدد اشمیت است که در نرم‌افزار اف‌دی‌اس برای

^۱ droplet collision

^۲ Sherwood Number

همه موارد ۰/۶ در نظر گرفته شده است. کسر جرمی بخار فاز پیوسته از معادلات انتقال جرم فاز پیوسته و کسر جرمی بخار تعادل مایع از معادله کلاپیرون^۱ حاصل می‌شود [۳۰] که در رابطه (۱۰) نشان داده شده است.

$$Y_{a,l} = \frac{X_{a,l}}{X_{a,l}(1 - W_a/W_\alpha) + W_a/W_\alpha} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) W_α وزن مولکولی گونه گازی α ، W_a وزن مولکولی هوا است. $X_{a,l}$ کسر حجمی بخار تعادل می‌باشد که به صورت رابطه (۱۱) بدست می‌آید [۳۰].

$$X_{a,l} = \exp \left[\frac{h_v W_\alpha}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_p} \right) \right] \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) W_α وزن مولکولی گونه گازی α ، W_a وزن مولکولی هوا، h_v گرمای نهان تبخیر مایع، R ثابت جهانی گازها، T_b دمای جوش مایع در فشار اتمسفر می‌باشد و دمای قطره T_p از رابطه (۱۲) که قانون بقای انرژی است، بدست می‌آید [۳۰].

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{m_p c_p} \left[A_p h (T_g - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_v + \dot{q}_r \right] \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) T_g دمای موضعی گاز، \dot{q}_r نرخ گرمای تابشی قطره و h ضریب انتقال حرارت بین قطره و گاز است که در رابطه (۱۳) مشاهده می‌شود. در رابطه (۱۳) عدد ناسلت^۲، K ضریب هدایت حرارتی گاز و pr عدد پرانتل که برای همه موارد ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود [۳۰].

$$h = \frac{NuK}{L} ; \quad Nu = 2 + 0.6 Re_D^{\frac{1}{2}} pr^{\frac{1}{3}} \text{ gas - droplet} \quad (13)$$

روش عددی

در این مطالعه، برای فرایند شبیه‌سازی آتش با سیستم اطفای حریق مه‌آب از نرم‌افزار افدی‌اس نسخه ۶،۷،۶ استفاده شده است. این کد به صورت نرم‌افزار متن باز^۳ در دسترس است که معادلات ناویر-استوکس را برای جریان‌هایی با عدد ماخ پایین با روش عددی حل کرده و مشتقات جزئی در معادلات حاکم بر جریان سیال با استفاده از روش تفاضل محدود^۴ با دقت زمانی و مکانی مرتبه دوم گسسته شده و به صورت صریح^۵ حل شده است [۳۲]. در نرم‌افزار افدی‌اس مقدار مجاز عدد کورانت به طور پیش فرض در محدوده ۰/۸ تا ۱ توصیه می‌شود که در این مطالعه عدد کورانت موضعی برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. با توجه به این قید، گام زمانی در این مطالعه $1/8 \times 10^{-3}$ ثانیه بوده است. نازل در نظر گرفته از نوع مخروطی کامل با فرض اتمیزه کامل^۶ است [۲۱ و ۳۳] که توزیع قطرات با تابع رازن راملر^۷ با قطر ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شد و طبق اطلاعات کاتالوگ نازل‌ها مرجع [۳۴] مشخص شده است. همچنین منظور از قطر میانگین، قطر متوسط ذرات^۸ که برابر ۵۰ میکرومتر است. برای انجام مطالعات از یک دستگاه کامپیوتر با پردازشگر intel-Core i7-4970k با فرکانس ۱ گیگاهرتز که ۴ هسته

¹ Clausius-Clapeyron

² Nusselt Number

³ Open source

⁴ Finit difference

⁵ Explicit

⁶ fully atomized

⁷ Rosin-Rammler

⁸ Sauter mean diameter

حقیقی ۴ هسته مجازی و ۲۰ گیگابایت حافظه موقت دارد، استفاده شده است. در این مطالعه از فرض واکنش یک-مرحله‌ای بازگشت‌ناپذیر استفاده شده است و واکنش شیمیایی در حالت کلی به صورت رابطه (۱۴) و (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.



هندسه مورد بررسی

هندسه مورد مطالعه از پژوهش ناگروها و کانستارو [۳۴] است. این هندسه همانند یک اتاق بوده و برای آزمایش تجربی ساخته شده است. این اتاق دارای ابعاد 200×200 سانتی‌متر مربع و ارتفاع ۲۵۰ سانتی‌متر است. اتاق بدون سقف بوده که با محیط اطراف تهویه طبیعی دارد و همچنین در دیواره آن درب یا پنجره‌ای وجود ندارد. منبع سوخت در مرکز اتاق قرار داشته، دارای ابعاد $6 \times 6/5 \times 6/5$ سانتی‌متر مکعب و جنس آن از چوب است. صفحه‌ای در مرکز اتاق با ابعاد 40×40 سانتی‌متر مربع به-عنوان سپر آتش (صفحه آتش محافظت‌شده) در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از کف اتاق قرار دارد.

این محفظه دارای پنج نازل مه آب شامل؛ یک نازل جریان بالا (فوجت^۱) با زاویه پاشش ۷۵ درجه در مرکز محفظه و چهار نازل ساده^۲ با زاویه پاشش ۱۰۰ درجه که در چهار طرف محفظه و در مرکز دیواره نصب شده است و ارتفاع تمامی نازل‌ها ۱/۵ متر از کف محفظه و دبی جریان مجموع نازل‌ها ۲/۶ لیتر در دقیقه است. زمان فعال‌سازی سیستم اطفای حریق مه آب ۶۰ ثانیه پس از شروع فرایند احتراق است. به‌منظور تجزیه و تحلیل دما از ترموکوپل نوع K در ۴ و ۱۰ سانتی‌متری بالاتر از منبع سوخت استفاده شده است و آتش نیز با نرخ آزادسازی حرارت ۴۰۰ کیلووات بر مترمربع در مساحت ۰/۰۱ مترمربع تعریف شده است. در شکل ۱ نمایی از هندسه اصلی با جزئیات کامل را نشان داده شده است.

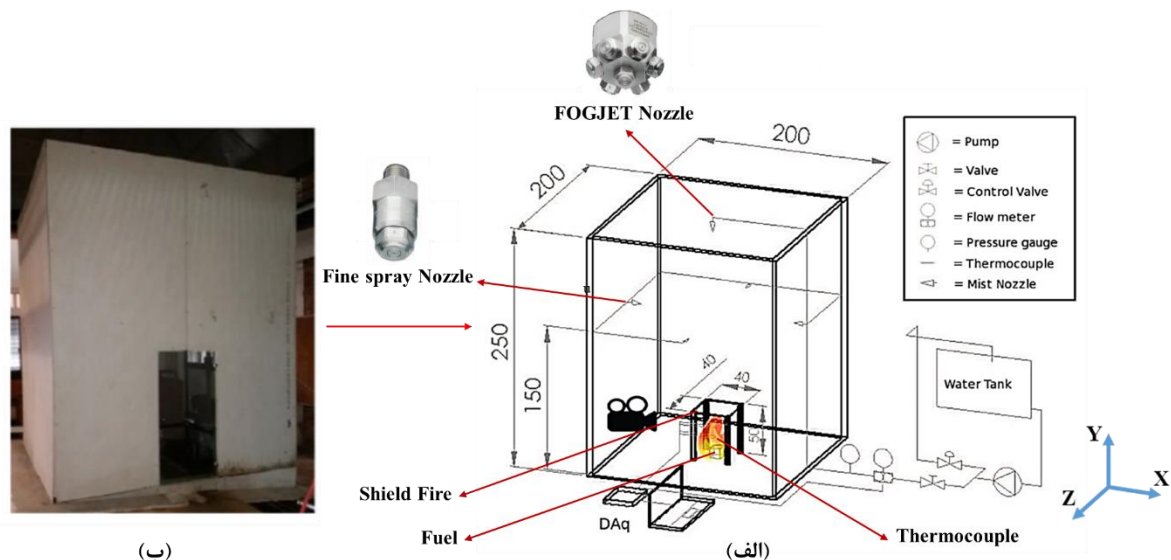


Figure 1- a) representation of the validation geometry with full details, b) representation of the experimental geometry [34]

شکل ۱- الف) نمایی از هندسه اصلی صحت سنجی با جزئیات کامل، ب) نمایی از هندسه تجربی [۳۴]

¹ fogjet nozzle

² Fine spray nozzle

در این مطالعه مکان اثر نازل سیستم اطفای حریق مه آب تحت پنج سناریوی مختلف ارزیابی و بررسی شده است. در این سناریوها، تعداد و موقعیت نازلها متغیر بوده است. در سناریوی مرکزی یک نازل در مرکز محفظه و در ارتفاع ۲/۵ متری نصب شده است. در حالت یک طرفه، نازل در یک سمت محفظه قرار داشته و با توجه به موقعیت منبع سوخت، تفاوتی در انتخاب جهت دیواره وجود ندارد. در حالت چهارطرفه، نازلها در چهارطرف محفظه و وسط هر دیواره (در ارتفاع ۱/۵ متری) قرار داشته و در حالت مرکزی و یک طرفه یک نازل در مرکز و یک نازل در یکی از دیوارههاست. در حالت مرکزی و چهارطرفه، نازلها در مرکز محفظه و چهار دیوار اطراف قرار دارد. در جدول ۱ مشخصات دو نازل مورد استفاده در هندسه تجربی [۳۴] مطابق با کاتالوگ مرجع [۳۵] نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات دو نازل استفاده شده در صحت سنجی

Table 1- Specifications of two nozzles used in validation case

Model	Spray angles	Water Spray Flow rate	Operating pressures	Details
FullJet G Nozzles	WIDE ANGLE SPRAY(76°)	0.11 to 136 gpm	1.5 to 10 bar	3/4" to 1-1/2" female conn. Optional TWD strainer
Fine Spray - LNN	STANDARD ANGLE SPRAY (43° to 94°)	0.82 to 130 gph	1.5 to 69 bar	1/4" male conn. Integral strainer

مشخصات و جزئیات سناریوها در جدول ۲ نشان داده شده است. در تمامی این حالتها مه آب از زمان ۳۰ ثانیه تا خاموشی کامل آتش فعال می شود. همچنین بایستی ذکر کرد که در حالت های مورد بررسی در جدول ۲، اگرچه دبی تغییر کرده ولی با تغییر نوع نازل، زاویه و قطر ذرات ثابت نگه داشته شده است؛ بنابراین در پنج حالت مختلف جدول ۲ تنها از نازل نوع Fogjet nozzle در پژوهش حاضر استفاده شده است و از نازل Fine spray (به علت عدم تأمین دبی مورد نظر در برخی از حالتها) استفاده نشده است.

جدول ۲- حالت های مورد بررسی شبیه سازی به همراه مشخصات نازل

Table 2- Nozzle specifications with details

cases	Scenario	nozzle type	Each of the nozzle flow rate (l/min)	Latitude Angle (°)	Median Diameter (µm)
Case 1	Center	One fogjet nozzle	2.62	37/5°	50
Case 2	One Corner	One fogjet nozzle	2.62	37/5°	50
Case 3	Four Corner	Four fogjet nozzle	0.655	37/5°	50
Case 4	Center & One Corner	Two fogjet nozzle	1.31	37/5°	50
Case 5	Center & Four Corner	Five fogjet nozzle	0.524	37/5°	50

شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

یکی از عوامل موثر بر دقت تجزیه و تحلیل نرم افزار اف دی اس، بعد شبکه (مش) است. برای تنظیم وضوح مش، از عبارت بی بعد $D^*/\delta x$ برای محاسبه اندازه مش مناسب استفاده می شود. D^* مقیاس طول مشخصه مرتبط با نرخ آزادسازی حرارتی سوخت و δx اندازه سلول مش است. هرچه اندازه مش کوچکتر باشد، دقت آن با زمان محاسباتی، بیشتر مورد نیاز است. برای تعیین مقیاس طول مشخصه از رابطه (۱۶) استفاده می شود [۳۶].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}_f}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}, dx = \frac{D^*}{10} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) \dot{Q}_f نرخ انتشار گرما، ρ_∞ چگالی هوای محیط، c_p گرمای ویژه سیال، T_∞ دمای هوای محیط و g شتاب گرانشی است. در این پژوهش نرخ آزادسازی حرارت ۴۰۰ کیلووات بر مترمربع در مساحت ۰/۰۱ مترمربع تعریف شده است. نسبت توصیه شده $D^*/\delta x$ بین ۴ تا ۱۶ است [۳۴] که در این پژوهش، اندازه سلول مش برابر با ۱۰ انتخاب شد. برای شبیه سازی عددی از سه شبکه مختلف با تعداد مش ۵۵۳۰۰۰، ۱۱۱۰۰۰۰ و ۱۹۳۰۰۰۰ استفاده شده که تعداد مش ۱۱۱۰۰۰۰،

برای این مطالعه به عنوان مش مناسب در نظر گرفته شده است و روش شبکه بندی از نوع مش یکنواخت است. در ناحیه محاسباتی اصلی، ناحیه به چند شبکه مختلف تقسیم شده است؛ به صورتی که در ناحیه نزدیک به شعله، تعداد شبکه ریزتری با تمرکز بیشتر انجام شده است. در شکل ۲ شبکه بندی هندسه در نماهای مختلف نشان داده شده است.

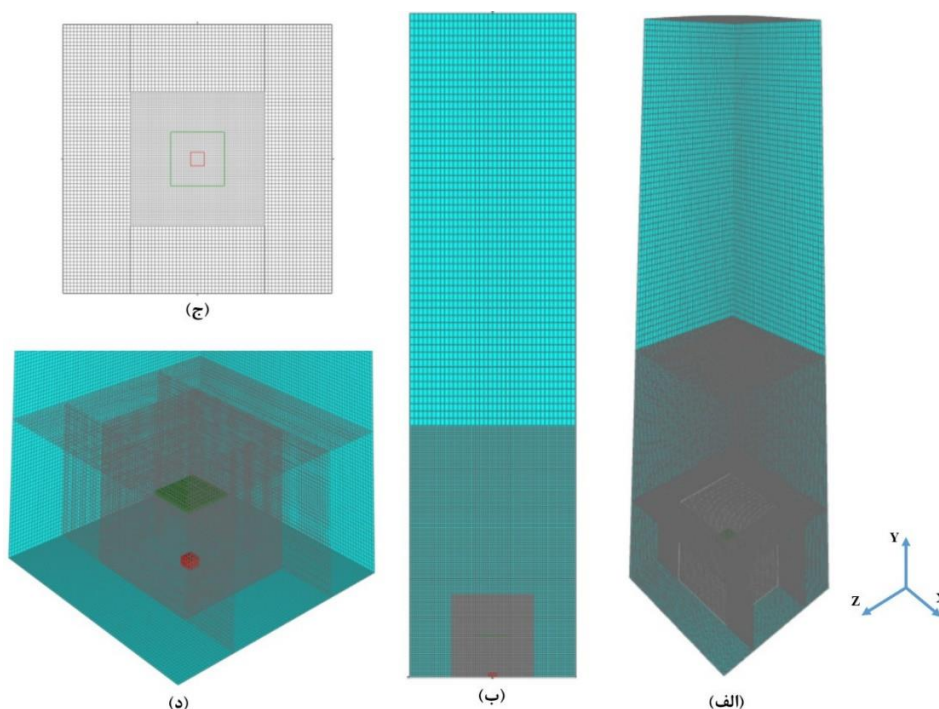


Figure 2- a) 3D view of the geometry grid, b) side view of the geometry grid, c) top view of the geometry grid and d) close view of the main combustion environment [34]

شکل ۲- الف) نمایی سه بعدی از شبکه بندی هندسه، ب) نمای جانبی از شبکه بندی هندسه، ج) نمایی بالا از شبکه بندی هندسه و د) نمایی نزدیک از محیط اصلی احتراق [۳۴]

در شکل ۳ نمایی از شرایط مرزی هندسه نشان داده شده است. شرایط مرزی در هندسه شبیه سازی بدین صورت است که از ۴ طرف فضای بسته (دیوار با شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت و گرادیان صفر برای دما و گونه) و تنها از بالای محفظه به فضای آزاد دسترسی دارد. برای شبیه سازی عددی لازم بود ناحیه محاسباتی اضافی در نظر گرفته شود و بدین صورت مطابق شکل ۳ ناحیه ای در بالای هندسه اصلی با ابعاد 200×200 سانتی متر مربع و ارتفاع 500 سانتی متر قرار داده شد. تعیین ابعاد دامنه محاسباتی در راستای Y لحاظ شده است؛ زیرا جریان هوای حاصل از محصولات خروجی احتراق به دلیل نیروی گرانشی در راستای Y حرکت می کند. همچنین به منظور اعمال شرایط مرزی محیط آزاد از شرط آزاد^۱ استفاده شده است که متناسب با مقدار اختلاف فشار دامنه اصلی و محیط آزاد جریان سیال به دست می آید. هندسه تجربی از دیوارهای با نوار توخالی و تخته سیلیکات کلسیم ساخته شده و شرایط مرزی آن به صورت دمای آدیاباتیک، سرعت در دیواره به دلیل شرط عدم لغزش برابر صفر و گونه ها شرط گرادیان صفر دارد.

¹ Open Boundary condition

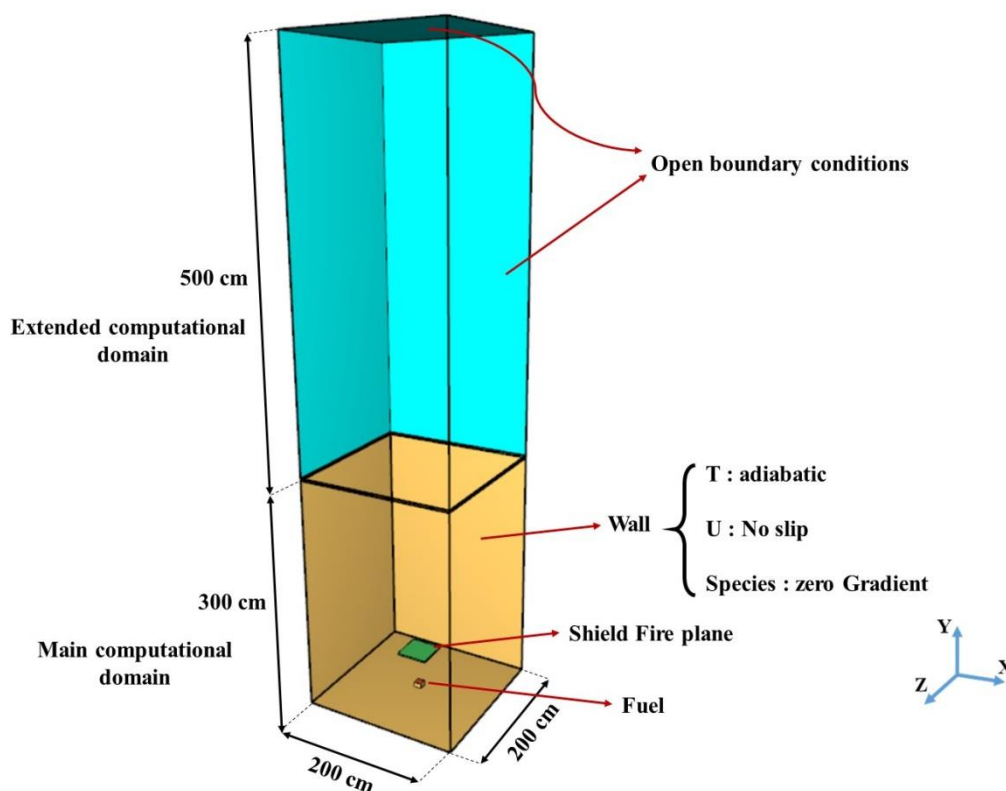


Figure 3- View of geometry boundary conditions

شکل ۳- نمایی از شرایط مرزی هندسه

جریان احتراق یک جریانی اغتشاشی است و طبق طیف انرژی کولموگرو در یک جریان اغتشاشی مجموعه‌ای از گردابه‌ها با مقیاس‌های متفاوت از بزرگ‌ترین تا کوچک‌ترین اندازه دیده می‌شود که انرژی ذخیره شده در این گردابه‌ها، در نمودار طیف انرژی کولموگرو نشان داده می‌شود. باتوجه به شکل ۴، به منظور ارزیابی دقت مطالعه شبکه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، تجزیه و تحلیل برای شبکه محاسباتی انتخاب شده از طریق طیف انرژی کولموگرو انجام شد. به این منظور داده‌های سرعت مربوط به نقطه‌ای در ارتفاع چهار سانتی‌متری از بستر سوخت (دلیل انتخاب این نقطه وجود نوسانات زیاد در این ناحیه است) در طول شبیه‌سازی ذخیره شده و با استفاده از آنالیز فرکانسی fast fourier سهم هر گردابه با هر فرکانس (و در نتیجه آن انرژی جنبشی آن) محاسبه و PSD آن در شکل ۴ نشان داده شده است. باتوجه به شکل ۴ آبشار انرژی در نقطه ۰/۷ تا ۱۰ هرتز، خطی با شیب ۵/۳- نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، طیف انرژی کولموگرو این نقطه با خطی با شیب ۵/۳- مطابقت دارد، در نتیجه آبشار انرژی با این شبیه‌سازی برآورده شده است. از این رو می‌توان گفت که شبکه مورد استفاده کیفیت مطلوب را دارا است.

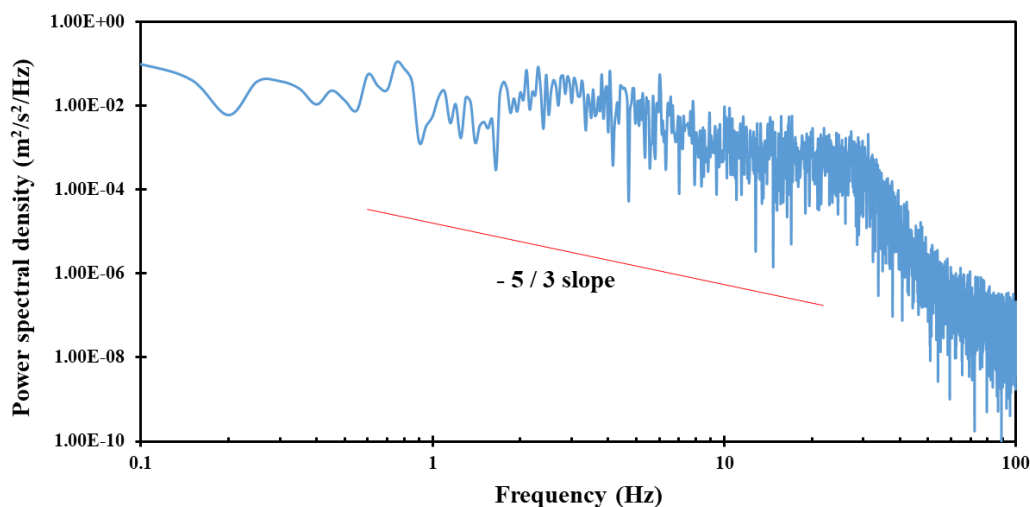
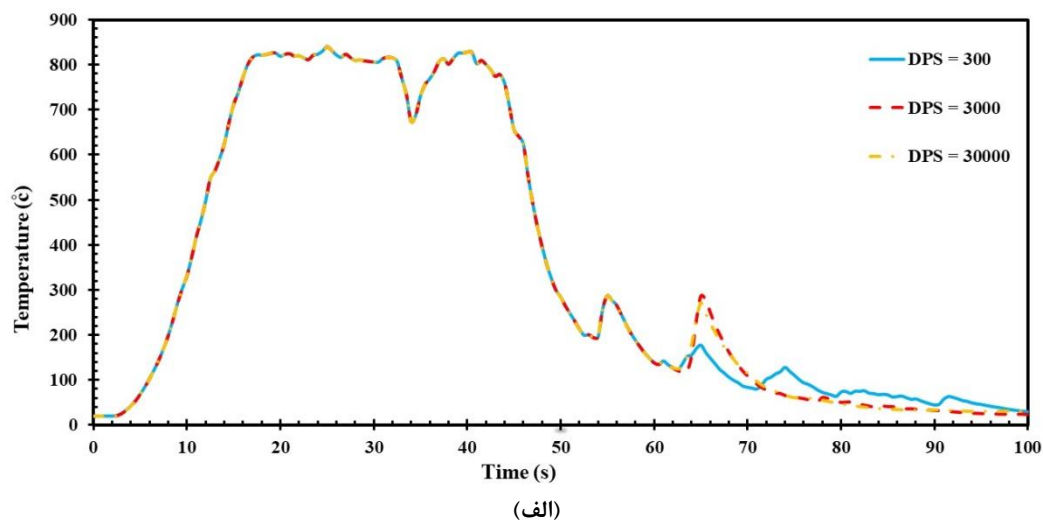


Figure 4- Network study – PSD variations based on frequency

شکل ۴- مطالعه شبکه - تغییرات PSD بر اساس فرکانس

در حل جریان دوفازی اولیری - لاگرانژی تمام قطرات در شبیه‌سازی ردیابی نمی‌شوند؛ بلکه تنها مجموعه‌ای از قطرات که به‌عنوان قطرات در ثانیه^۱ شناخته شده، در شبیه‌سازی لحاظ شده و ردیابی می‌شوند [۳۷]. در شکل ۵ نتایج دمای ترموکوپل و اندازه سرعت در ارتفاع ۴ سانتی‌متری از بستر سوخت به ازای تعداد قطرات تزریق شده در واحد زمان نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، این تعداد قطره در سه حالت ۳۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است و مشاهده می‌شود که نتایج در دو حالت DPS=3000,30000 بر یکدیگر منطبق شده‌اند. از این رو می‌توان گفت که DPS=3000 به شرایط استقلال از تعداد DPS رسیده است.



¹ Droplets per seconds (DPS)

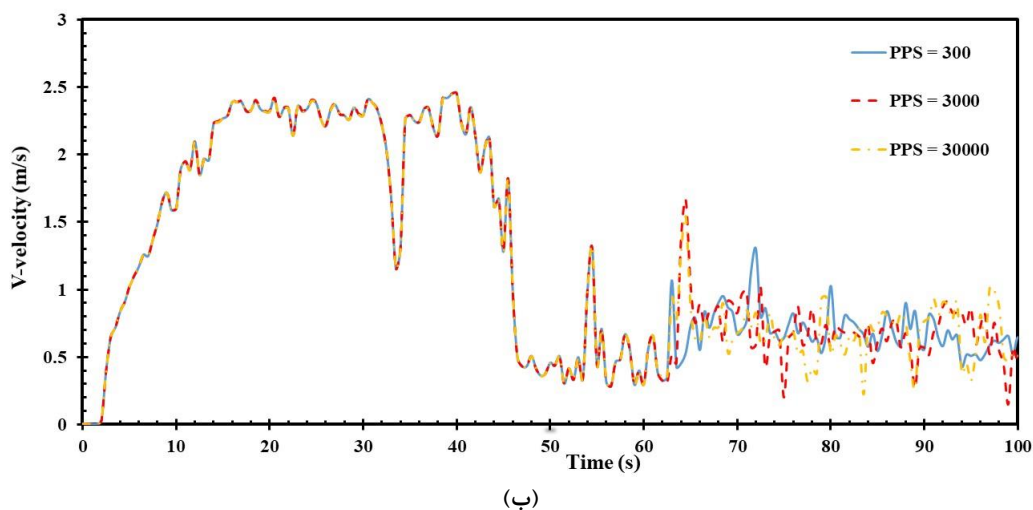


Figure 5- Thermocouple temperature results at a height of 4 cm from the fuel bed for different DPS
 شکل ۵- نتایج الف) دمای ترموکوپل و ب) اندازه سرعت در ارتفاع ۴ سانتی متری از بستر سوخت به ازای مختلف DPS

صحت‌سنجی

در شکل ۶ اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج تجربی دما در پژوهش ناگروها و کانستارو [۳۴] در طی زمان ۱۲۰ ثانیه نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ در شروع فرایند احتراق و تشکیل شعله، نتیجه تجربی در مدت ۷ ثانیه به دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و در همین حالت، نتیجه عددی در مدت زمان ۱۲ ثانیه این ناحیه‌ی گذر را طی کرده است. این اختلاف نتایج تجربی و عددی به ماهیت مدل‌سازی فرایند آشکافت^۱ بر می‌گردد (که البته نتایج ناحیه پایدار مد نظر می‌باشد و از این رو این ناحیه گذر در بررسی خاموشی مهم نمی‌باشد). در ادامه نوسانات دما طبق نمودار تجربی تغییرات کمی نسبت به نتایج عددی داشته است. در زمان ۶۰ الی ۷۵ ثانیه دمای نتایج عددی بیشتر با فراز و نشیب‌هایی همراه بوده که نشان‌دهنده سرعت و جریان هوای محیط در واکنش به سیستم مه‌آب بوده است. در زمان ۷۵ ثانیه (پس از ۱۵ ثانیه از زمان فعال‌سازی سیستم مه‌آب) هر دو نتایج مطابقت خوبی داشته و تا انتها تا زمان اطفای حریق به همین شکل ادامه دارد.

سرانجام با افت دمای محیط، دمای شعله کمتر شده و به تدریج به سمت خاموشی دائم می‌رسد و در ۱۰۰ ثانیه دمای گازهای احتراق سرد شده و به دمای محیط رسیده است. البته با صراحت نمی‌توان گفت که فرایند اطفای حریق تکمیل شده است. همچنین مدت زمان طی شده تا کاهش دما به دمای محیط (مدت زمان t_s) که مسئله مهم مورد بررسی در تحقیق حاضر است، در نتایج تجربی و عددی با کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی، همخوانی خوبی دارند. نکته دیگری که از نمودار نیز مشاهده می‌شود، در بخش اعتبارسنجی نتایج، مه‌آب از زمان ۶۰ ثانیه فعال شده و پس از مدت زمان t_{s1} قطرات مه‌آب به نزدیکی بستر سوخت رسیده و فرایند کاهش دما شروع می‌شود. تا قبل از شروع تزریق مه‌آب، آتش بر بستر سوخت به حالت پایدار می‌رسد. البته همان‌طور که از نتایج نیز استنباط می‌شود، در زمان ۲۰ ثانیه به بعد نتایج عددی به حالت پایداری رسیده است، از این‌رو در بررسی پنج حالت مختلف موردنظر، زمان اولیه قبل از فعال‌شدن مه‌آب، ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

^۱ آشکافت یک فرایند شیمیایی است که طی آن ماد جامد قابل اشتعال تحت تأثیر افزایش حرارت، تجزیه شده و بسته به نوع آن به مواد مختلف از جمله گازهای نظیر متان و خاکستر تبدیل می‌شود.

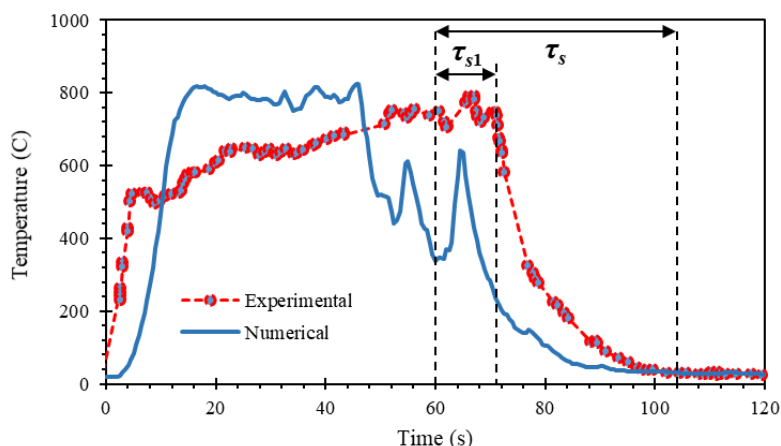


Figure 6- Validation of numerical and experimental results of temperature

شکل ۶- صحت‌سنجی نتیجه عددی و تجربی دما

نتایج عددی

به‌منظور بررسی اثر موقعیت و تعداد نازل‌های مه آب بر خاموشی آتش محافظت‌شده، پنج حالت مختلف در نظر گرفته شد. در تمامی این حالت‌ها به آتش اجازه داده می‌شود تا ۳۰ ثانیه به حالت پایداری رسیده و بعد از آن مه آب فعال شده و فرایند خاموشی بررسی می‌شود. در تمامی این حالت‌ها فرایند خاموشی شبیه یکدیگر است و تنها تفاوت در مدت زمانی است که طول می‌کشد تا خاموشی انجام شود.

در شکل ۷ کانتور دما و اسپری آب از زمان فعال شدن تا خاموشی آتش برای حالت اول (نازل مرکزی) نشان داده شده است. در این شکل که از زمان شروع فرایند احتراق تا خاموشی آتش نشان داده شده است، شعله تا زمان ۳۰ ثانیه، به حداکثر دمای خود خواهد رسید. در زمان ۳۰ ثانیه سیستم اطفای حریق مه آب فعال شده و در محیط اطراف صفحه سپر آتش، تزریق شده است. به تدریج با فعال شدن سیستم مه آب، ذرات آب در مجاورت گازهای داغ ناشی از احتراق قرار گرفته و به تدریج تبخیر می‌شوند. با توجه به گرماگیر بودن فرایند تبخیر مشاهده می‌شود که در زمان ۴۰ ثانیه دمای محیط گازی بالای صفحه سپر آتش، خنک شده و به دمای محیط آزاد (۳۰ درجه سانتی‌گراد) می‌رسد. در این مرحله فرایند اول در خاموشی آتش فعال شده است. سپس قطرات آب به علت قطر و وزن کم، توانایی انتقال با جریان مکش هوا را دارند و به این علت به ناحیه نزدیک بستر سوخت منتقل شده و دمای محیط نزدیک شعله آتش کاهش پیدا کرده است.

در ادامه برخی از قطراتی که تا به این لحظه تبخیر نشده‌اند به علت نیروی وزن به سطح بستر سوخت انتقال یافته و موجب خاموشی شعله می‌شوند. انتقال این قطرات به سطح بستر سوخت فرایند دوم در خاموشی آتش را فعال می‌سازند که این فرایند سهم بیشتری نسبت به فرایند اول در خاموشی آتش دارد. به همین علت مشاهده می‌شود که تا زمانی که فرایند اول به تنهایی فعال است (زمان بین ۳۰ تا ۴۰ ثانیه) تنها دمای محیط کمی کاهش می‌یابد؛ اما زمانی که فرایند دوم نیز به کمک فرایند اول می‌آید (زمان ۵۰ ثانیه به بعد) خاموشی آتش شدت می‌گیرد و بعد از آن شعله به طور کامل خاموش می‌شود.

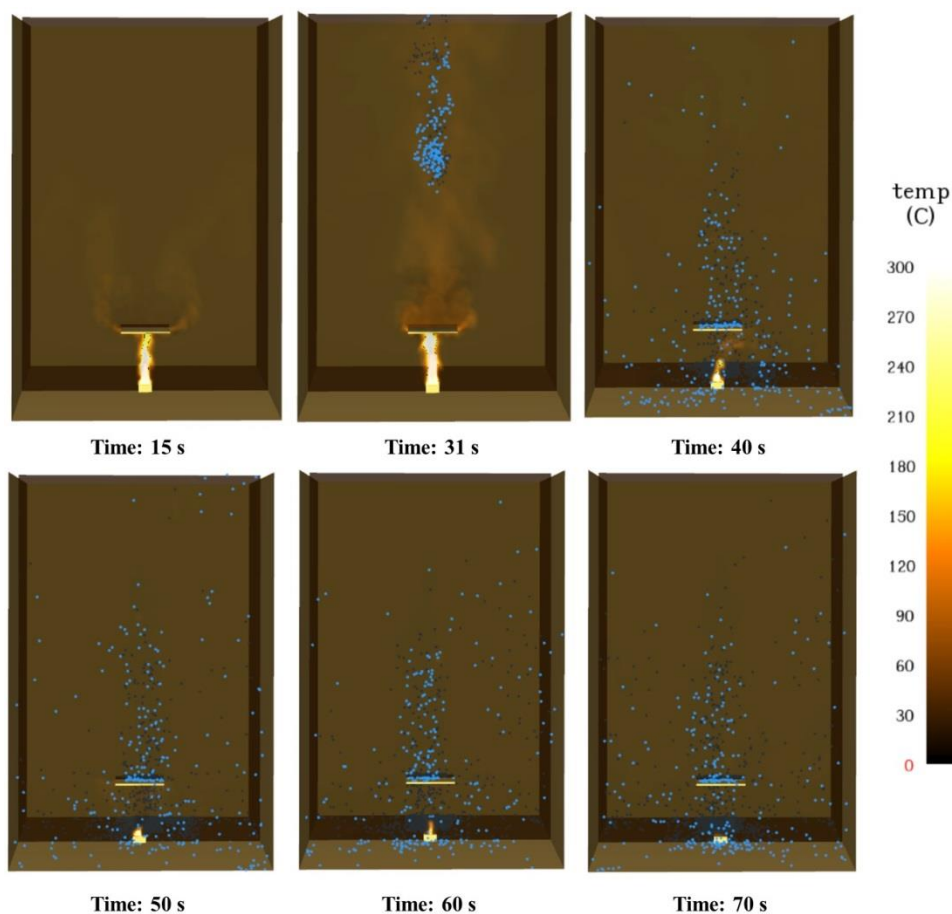


Figure 7- Temperature contour and water spray from the time of activation to the extinguishing of the fire
 شکل ۷- کانتور دما و اسپری آب از زمان فعال شدن تا خاموشی آتش

در شکل ۸، نتایج عددی دما توسط ترموکوپل در حالت‌های مختلف قرارگیری نازل نشان داده شده است. از زمان شروع فرایند احتراق تا زمان ۱۶ ثانیه، دمای ترموکوپل حالت صعودی داشته و تا دمای ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است. این دما حداکثر دمای ترموکوپل در فاصله چهار سانتی‌متری از سطح منبع سوخت است. از زمان ۱۶ تا ۳۰ ثانیه، دمای ترموکوپل نسبتاً ثابت بوده و سپس از زمان ۳۶ ثانیه؛ یعنی بعد از فعال‌سازی سیستم اطفای حریق مه آب، کاهش دمای ترموکوپل در هر پنج موقعیت نازل این سیستم مشاهده شده است. با توجه به نمودار ۳ مشاهده می‌شود که سه حالت موقعیت قرارگیری نازل یعنی حالت ۳، ۴ و ۵ به ترتیب بهترین موقعیت‌ها در کاهش دمای نزدیک بستر سوخت هستند. دو حالت دیگر نیز هرچند زمان بیشتری برای کاهش دمای محیط و اطراف آتش محافظت‌شده نیاز داشته‌اند؛ ولی با اختلاف چند ثانیه نسبت به حالت‌های دیگر فرایند اطفای حریق و خنک‌سازی بستر سوخت را تکمیل کرده‌اند.

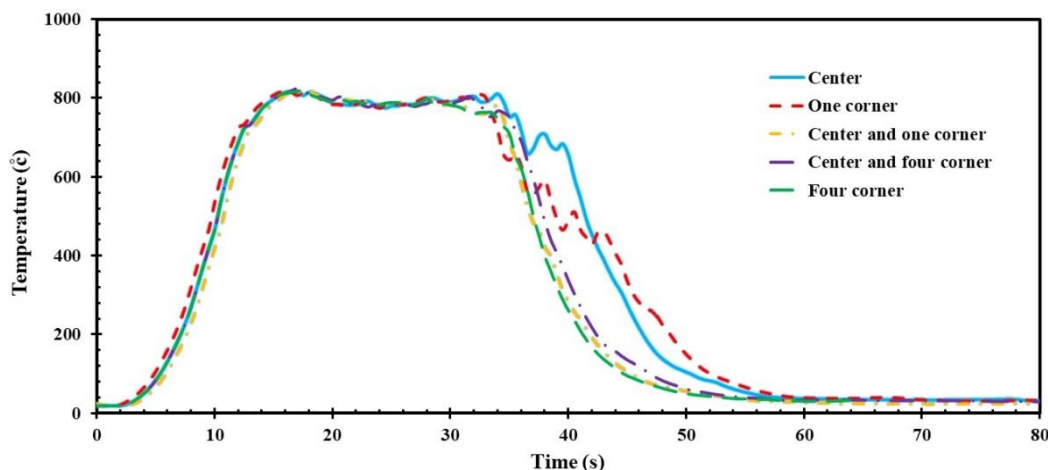


Figure 8- Numerical results of temperature in different scenarios

شکل ۸- نتایج عددی دما در سناریوهای مختلف

در شکل ۹ نتایج نرخ آزادسازی حرارت برای پنج حالت مورد بررسی، نشان داده شده است. نرخ آزادسازی حرارت برابر با حاصل ضرب نرخ مصرف سوخت در گرمای احتراق سوخت است. با توجه به ثابت بودن گرمای احتراق سوخت در پنج حالت مختلف، نرخ آزادسازی حرارت و نرخ مصرف سوخت یک رفتار را خواهند داشت. از این رو مشاهده می شود که نتایج شکل ۹ و ۱۰ رفتار کاملاً مشابهی را دارند. طبق شکل ۹ از زمان شروع فرایند احتراق تا زمان ۲۰ ثانیه، نرخ آزادسازی حرارت افزایشی بوده و به ۴ کیلووات رسیده است. در ادامه از زمان ۲۰ تا ۳۰ ثانیه، نرخ آزادسازی حرارت به صورت ثابت پیشرفته است و تا این زمان هیچ تفاوتی بین پنج حالت مختلف دیده نمی شود (چراکه هنوز مه آب با فعال نشده است و فقط احتراق شکل گرفته است). پس از فعال سازی سیستم مه آب در زمان ۳۰ ثانیه، تا زمان ۳۶ ثانیه باز تفاوتی در نتایج دیده نمی شود؛ چراکه هنوز ذرات مه آب به نزدیک بستر سوخت و گازهای حاصل از احتراق نرسیده اند.

باتوجه به شکل ۹، در زمان ۳۶ ثانیه به بعد، رفتار پنج حالت مختلف متفاوت شده و نحوه پخش ذرات اسپری اثرگذار است. از این رو در سه حالت ۳، ۴ و ۵، نرخ آزادسازی حرارت پس از طی ۴ ثانیه به کمتر از ۱ کیلووات رسیده و در زمان ۵۲ ثانیه آتش به طور کامل مهار شده است. در حالی که، در حالت ۱ و ۲، این اتفاق کمی متفاوت تر رخ داده است، به طوری که ابتدا در طی ۸-۹ ثانیه، نرخ آزادسازی حرارت به ۲ کیلووات رسیده و در ۷۰ ثانیه فرایند اطفای حریق تکمیل شده است. به طور کلی با این نتایج مشخص شد که در حالت های ۳، ۴ و ۵، بهترین و مؤثرترین موقعیت برای کاهش نرخ آزادسازی حرارت و در نتیجه آن بهبود فرایند اطفای حریق است.

همچنین به این نکته نیز باید توجه داشت که به منظور بررسی خاموشی آتش، بررسی دمای نزدیک بستر سوخت (شکل ۸) به تنهایی کافی نیست و پارامتر جامع تر، نرخ آزادسازی حرارت و مصرف سوخت است. به نحوی که در بررسی دمای نزدیک به آتش، برای حالت ۱ و ۲، مدت زمان خاموشی را ۳۰ ثانیه پیش بینی می کند. این در صورتی است که در بررسی نرخ آزادسازی حرارت و مصرف سوخت، مدت زمان خاموشی ۴۰ ثانیه به دست می آید.

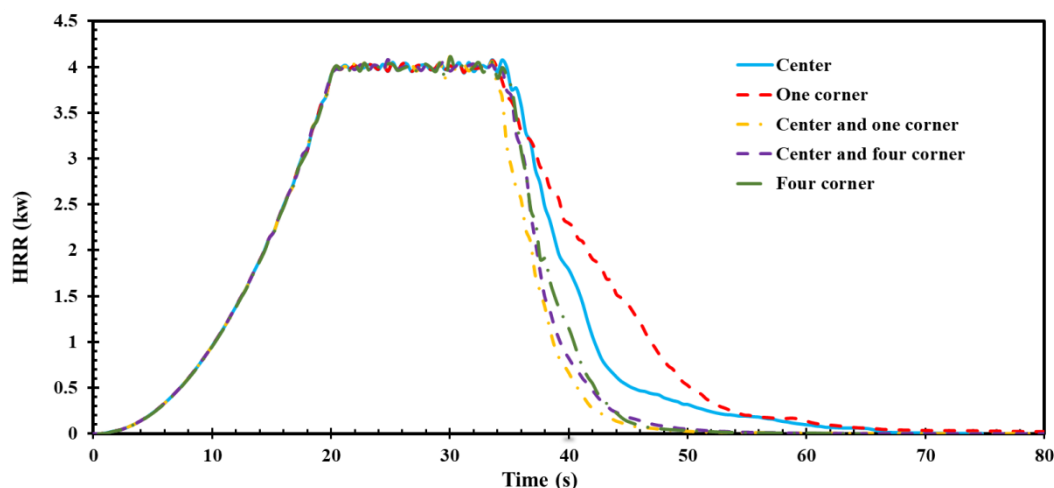


Figure 9- Numerical results of heat release rate

شکل ۹- نتایج عددی نرخ آزادسازی حرارت

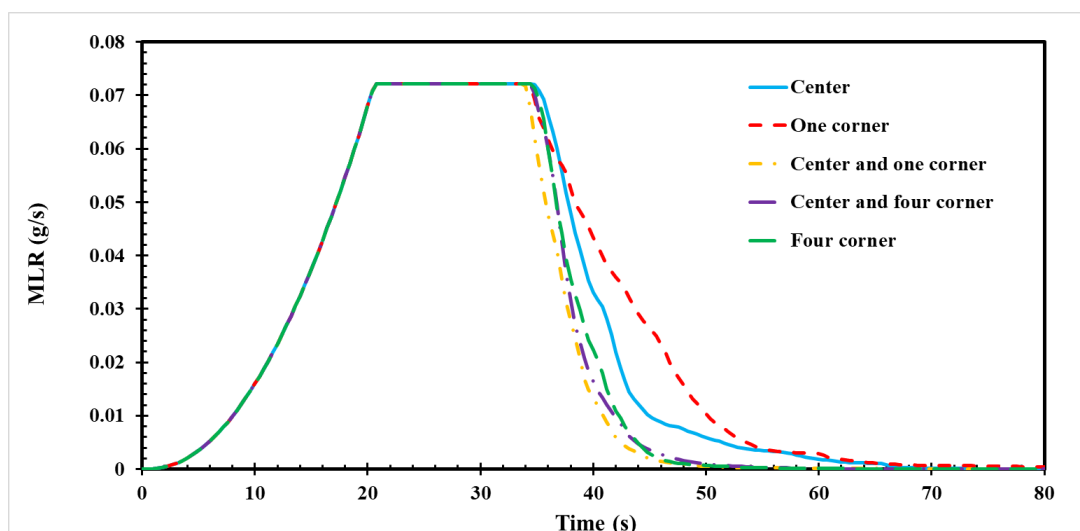


Figure 10- Numerical results of fuel consumption rate

شکل ۱۰- نتایج عددی نرخ مصرف سوخت

در یک جمع‌بندی می‌توان گفت مطابق شکل ۱۱، باتوجه به مؤثر بودن فرایند دوم اطفای حریق (نفوذ قطرات آب به سطح بستر سوخت) در حالت ۱ که اسپری آب در بالای صفحه سپر آتش قرار دارد، ذرات اسپری شده بیشتری با صفحه سپر آتش برخورد کرده و ذرات کمتری مستقیماً با بستر سوخت برخورد می‌کنند و به همین علت خاموشی آتش دیرتر اتفاق می‌افتد. در حالت ۲ ذرات اسپری آب پس از عبور از بالای صفحه سپر آتش به انتهای محفظه منحرف شده و ذرات از بستر سوخت فاصله گرفته و نشست دشوار و کمتری دارد و همچنین تأثیر کمتری برای فرایند دوم اطفای حریق دارد و نسبت به همه حالت‌ها دیرتر آتش را خاموش می‌کند. مطابق شکل ۱۱، در حالت‌های ۳، ۴ و ۵ ذرات اسپری آب علاوه بر تمرکز بر مرکز محفظه و بالای صفحه سپر آتش، در محیط اطراف بستر سوخت از چهار جهت نشت خوبی بر بستر سوخت داشته که نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ گواه بر این موضوع است و بین این سه حالت از نظر تعداد نازل و نتایج عددی حالت ۳ بهترین حالت در این پژوهش در نظر گرفته شده است.

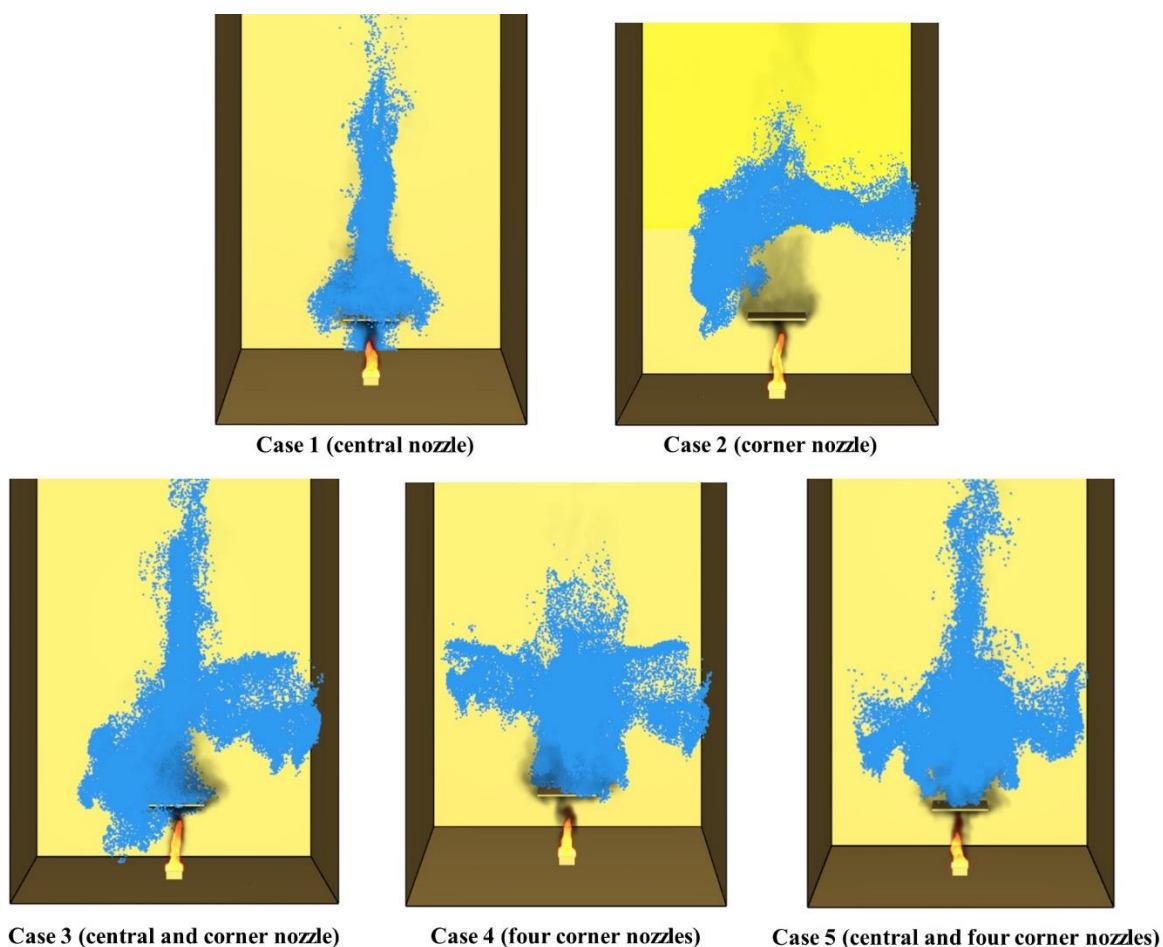


Figure 11- Numerical results of 5 different modes of water spray at activation time

شکل ۱۱- نتایج عددی پنج حالت مختلف اسپری آب در زمان فعال سازی

باتوجه به نتایجی که از تحلیل نرخ آزادسازی حرارت و مصرف جرم به دست آمد، جدول ۳ که مشخصات زمان خاموشی در حالت‌های مختلف قرارگیری نازل‌ها را نشان می‌دهد، آماده شد. باتوجه به جدول ۳ مشخص شده است که در حالت ۱ و ۲ که تنها از یک نازل مه آب استفاده شده است، بدترین حالت در خاموشی آتش محافظت شده است که بعد از ۴۰ ثانیه آتش را خاموش کرده‌اند؛ اما در حالت‌های ۳، ۴ و ۵ که بیشتر از یک نازل استفاده شده است، زمان خاموشی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

جدول ۳- مشخصات زمان خاموشی نازل‌ها در حالت‌های مختلف

Table 3- Specifications of nozzles shutdown time in different modes

Cases	Number of nozzle	Start of extinguish time (s)	End of extinguish time (s)	Extinguish priod (s)
Center	1	30	70	40
One Corner	1	30	70	40
Four Corner	4	30	52	22
Center & One Corner	2	30	52	22
Center & Four Corner	5	30	52	22

نتیجه گیری

این پژوهش با شبیه سازی فرایند حریق و خاموشی آن با استفاده از سیستم اطفای حریق مه آب تحت پنج موقعیت قرارگیری نازل تحت تأثیر صفحه سپر آتش انجام شد. در گام نخست، با اعتبارسنجی نتیجه عددی پژوهش و تجربی دما در پژوهش ناگروها و کانستارو مشخص شد که در شروع فرایند احتراق و تشکیل شعله، نتیجه تجربی و عددی مقداری اختلاف دارد که به ماهیت مدل سازی بستر سوخت مرتبط می شود و در روند تحقیق تأثیر خاصی ندارد. اما در نواحی بعد از شعله و رسانی اولیه، هر دو نتایج عددی و تجربی مطابقت خوبی داشته و تا انتها تا زمان اطفای حریق به همین شکل ادامه دارد. به نحوی که مدت زمان خاموشی در نتایج عددی، کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی دارد. در گام بعد با مقایسه ۵ حالت مختلف چیدمان نازل مه آب به شکل چهار طرف، حالت مرکزی و یک طرف، حالت مرکزی و چهار طرف، حالت یک طرف و حالت مرکزی، اثر موقعیت و تعداد نازل بر خاموشی آتش بررسی شد و مشاهده شد که:

- با توجه به نتایج عددی نرخ آزادسازی حرارت و مصرف سوخت مشخص شد که سه موقعیت قرارگیری نازل یعنی حالت چهار طرف، حالت مرکزی و یک طرف و حالت مرکزی و چهار طرف، بهترین چیدمان نازل های مه آب است که کمترین زمان خاموشی آتش محافظت شده را دارند.
- دو حالت دیگر یعنی مرکزی و یک طرف، زمان بیشتری برای کاهش دمای محیط و اطراف آتش محافظت شده نیاز داشته و فرایند اطفای حریق با تأخیر بیشتری انجام شده به نحوی که مدت زمان خاموشی تقریباً دوبرابر شده است.
- استفاده از حداقل دو نازل مه آب می تواند زمان خاموشی را به نحو قابل توجهی کاهش دهد و البته با افزایش تعداد نازل تأثیر خاموشی بیشتر نمی شود. از این رو در حالتی که آتش در مرکز اتاق باشد، با دو نازل می توان بهترین عملکرد را شاهد بود.

منابع

- [1] Iranian Legal Medicine Organization. Available: http://www.lmo.ir/web_directory/54002. (accessed Mar. 20, 2023)
- [2] D. General, "UNITED Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer Focal points for licensing systems Note by the Secretariat Annex Focal points for licensing systems," 2022.
- [3] S. N. A. Policy, "ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 40 CFR Part 82," 2009.
- [4] G. Heidarnejad and E. Mousavi, "Numerical simulation of pool fire suppression using water mist system investigating nozzle parameter effects," *mdrsjms*, vol. 17, no. 2, pp. 350–358, Mar. 2017. (in persian)
- [5] Z. Lin, R. Bu, J. Zhao, and Y. Zhou, "Numerical investigation on fire-extinguishing performance using pulsed water mist in open and confined spaces," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 13, no. January, p. 100402, 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100402.
- [6] G. Grant, J. Brenton, and D. Drysdale, "Fire suppression by water sprays," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 79–130, 2000, doi: 10.1016/S0360-1285(99)00012-X.
- [7] W. Xishi, L. Guangxuan, Q. Jun, and F. Weicheng, "Experimental study on the effectiveness of the extinction of a pool fire with water mist," *J. Fire Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 279–295, 2002.
- [8] Y. P. Liu, X. S. Wang, P. Zhu, G. C. Li, X. M. Ni, and J. Zhang, "Experimental study on gas jet suppressed by water mist: A clean control technique in natural gas leakage incidents," *J. Clean. Prod.*, vol. 223, pp. 163–175, 2019.
- [9] Y. Liu, X. Wang, T. Liu, J. Ma, G. Li, and Z. Zhao, "Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 141, pp. 344–354, 2020.
- [10] P. E. Santangelo and P. Tartarini, "Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: A temperature-based analysis of water-mist systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 45, pp. 99–107, 2012.
- [11] P. E. Santangelo, B. C. Jacobs, N. Ren, J. A. Sheffèl, M. L. Corn, and A. W. Marshall, "Suppression effectiveness of water-mist sprays on accelerated wood-crib fires," *Fire Saf. J.*, vol. 70, pp. 98–111, 2014.
- [12] Y. Liu *et al.*, "Laser-based measurement and numerical simulation of methane-air jet flame suppression with water mist," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 148, pp. 1033–1047, 2021.
- [13] X. L. Zhu, G. Chen, Z. G. Wang, L. S. Wu, J. F. Luo, and X. S. Wang, "Extinguishment of a transformer fire with a long projection water mist system," *Fire Saf. J.*, vol. 130, no. February, 2022, doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103603.
- [14] P. Valdes, T. Beji, and B. Merci, "CFD Study on the Interaction between Water Sprays and Longitudinal Ventilation in

- Tunnel Fires,” 2018.
- [15] J. Tu *et al.*, “Effect of foam air mixing on flame intensification – comparative experimental study of foam and water sprays extinguishing transformer oil pool fire,” *Fire Saf. J.*, vol. 133, no. August, p. 103664, 2022, doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103664.
- [16] S. C. Kim and H. S. Ryou, “The effect of water mist on burning rates of pool fire,” *Journal of Fire Sciences*, vol. 22, no. 4, pp. 305–323, 2004. doi: 10.1177/0734904104041796.
- [17] A. Dasgotra, G. Rangarajan, and S. M. Tauseef, “CFD-based study and analysis on the effectiveness of water mist in interacting pool fire suppression,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 152, pp. 614–629, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.033>.
- [18] M. Gupta, A. Pasi, A. Ray, and S. R. Kale, “An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression,” *Exp. Therm. fluid Sci.*, vol. 44, pp. 768–778, 2013.
- [19] T. Sikanen, J. Vaari, S. Hostikka, and A. Paajanen, “Modeling and simulation of high pressure water mist systems,” *Fire Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 483–504, 2014.
- [20] J. Lee and J. Moon, “Numerical analysis of the effect of horizontal distance between a water mist nozzle and ignition source on reduction in heat release rate,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 144, 2020. doi: 10.1016/j.anucene.2020.107560.
- [21] C. C. Ndubizu, R. Ananth, and P. A. Tatem, “Effects of droplet size and injection orientation on water mist suppression of low and high boiling point liquid pool fires,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 157, no. 1–6, pp. 63–86, 2000, doi: 10.1080/00102200008947310.
- [22] Y. Liu, X. Wang, T. Liu, J. Ma, G. Li, and Z. Zhao, “Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 141, pp. 344–354, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.05.043.
- [23] C. W. Chiu and Y. H. Li, “Full-scale experimental and numerical analysis of water mist system for sheltered fire sources in wind generator compartment,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 98, pp. 40–49, 2015, doi: 10.1016/j.psep.2015.05.011.
- [24] Z. Q. Yang, S. H. Chen, and X. J. Zhu, “Simulation Research of the Suppressing Performance of Mist to Pool Fire in Room with Blocks,” in *Advanced Materials Research*, vol. 518, pp. 937–941, 2012.
- [25] H.-Z. Yu, X. Zhou, and J. Carpenter, “Physical scaling of water mist fire extinguishment in industrial machinery enclosures,” *Fire Saf. J.*, vol. 91, pp. 596–605, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.033>.
- [26] H.-Z. Yu, “Froude-modeling-based general scaling relationships for fire suppression by water sprays,” *Fire Saf. J.*, vol. 47, pp. 1–7, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.09.006>.
- [27] G. Maragkos and B. Merci, “Large Eddy Simulations of CH₄ Fire Plumes,” *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 99, no. 1, pp. 239–278, 2017. doi: 10.1007/s10494-017-9803-4.
- [28] H. Pasdarshahri, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, “Development of compatible sub-grid scale model of les in numerical simulation of compartment fires,” Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng, Tarbiat Modares University, Iran, 2013.
- [29] Ghassem Heidarinejad, *An Introduction to Turbulence*, First Edition, Tarbiat Modares Publications, Iran, 2009. (in Persian)
- [30] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overhold, “Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User’s Guide (FDS),” *NIST Special Publication 1019*, vol. Sixth Edit. p. 402, 2020. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1019.pdf>
- [31] M. Beshir, “CFD Modeling of the Interaction between a Smoke plume and a Sprinkler Spray.” 2016.
- [32] M. Mapar, G. Heidarinejad, and H. Pasdarshahri, “Numerical Investigation of Two Simultaneous Fires in a Tunnel and Evaluation of the Obstructive Influence of Vehicles by Large Eddy Simulation” *mdrsjms*, vol. 13, no. 15, pp. 10–22, Mar. 2014, [Online]. Available: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-1927-fa.html> (in Persian)
- [33] Y. Cui and J. Liu, “Research progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 149, pp. 559–574, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.03.003.
- [34] Kuswanto and Y. S. Nugroho, “Experimental and numerical study of water mist fire suppression system effectiveness on shielded fire,” *E3S Web Conf.*, vol. 67, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20186704039.
- [35] I. H. S. P. Catalog, “Spraying System Co.” pp. 1–12. [Online]. Available: <https://www.spray.com/resources/catalogs/catalog75-hydraulic>
- [36] J. Li, T. Beji, and B. Merci, “Preliminary Numerical Study of Fire-Induced Pressure Rise in a Passive House Compartment,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1107, no. 4, p. 42026.
- [37] T. Beji, S. E. Zadeh, G. Maragkos, and B. Merci, “Influence of the particle injection rate, droplet size distribution and volume flux angular distribution on the results and computational time of water spray CFD simulations,” *Fire Saf. J.*, vol. 91, pp. 586–595, 2017.

English Abstract

Numerical study of the effect of the water mist nozzle location on fire extinguishing system in shielded fire

Ghassem heidarinejad^{1*}, Hamid Tajaddod², Mohammad Safarzadeh³

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

2- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran, h.tajaddod@modaers.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, taribat Modares University, Tehran, Iran, m.safarzadeh@modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2023/04/15, Received in revised form: 2023/06/02, Accepted:2023/06/06)

When the fire is placed in the compartment, problems such as lack of access to the fire and lack of settling of spray particles lead to a delay in extinguishing the flame. Therefore, in this research, the growth and spread of the fire and its extinguishing with the water mist system with the effectiveness of the position of the nozzle in the shielded fire have been done using numerical study. The location of the effect of the water mist fire extinguishing system nozzle has been investigated under five case of four sides, central and one side, central and four sides, one side and central. The geometry of the research is a compartment without a roof and there is no door or window in the walls. The fuel source is located in the center of the compartment and there is a plate in the center of the room as a fire shield (protected fire plate) with a height of 50 cm from the floor of the room (on the fire). According to the results, it was found that the three cases of four sides, central mode and one side, and central mode and four sides respectively are the best modes for extinguishing the shielded fire, which extinguishes the fire after 22 seconds. In general, it can be said that the central and one-sided case with less number of nozzles can have the best performance.

Keywords: Numerical study, Water mist fire extinguishing system, Shielded fire, Computational fluid dynamics, Spray nozzle