



شبیه سازی عددی اطفاء حریق استخری توسط سیستم مه آب با بررسی اثر پارامترهای نازل

قاسم حیدری نژاد^{1*}، عماد موسوی²

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* ghedari@modares.ac.ir, 14115-143 صندوق پستی

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 آذر 1395

پذیرش: 05 بهمن 1395

ارائه در سایت: 04 اسفند 1395

کلید واژگان:

اطفاء حریق

دینامیک سیالات محاسباتی

نرم افزار FDS

سیستم مه آب

چکیده

همراه با رشد تکنولوژی نازل های اسپرینکلر و سیستم های مه آب بیش از پیش در اطفاء حریق مورد استفاده قرار می گیرند. روش های محاسباتی برای بررسی تأثیر اثر تهویه و پارامترهای نازل همچنین بهینه سازی آن ها در سیستم مه آب بسیار کارایی دارند. در این پژوهش، کد متن باز شبیه ساز دینامیک آتش (FDS) برای بررسی عددی تأثیر پارامترهای نازل بر خفگی و اطفاء حریق استفاده شده است. محدوده اندازه قطرات طبق استاندارد NFPA 750 محاسبه شده است. مکانیزم های اطفاء حریق در سیستم مه آب و تأثیر آن ها بر زمان اطفاء حریق همچنین تأثیر پارامترهای اندازه ذرات، دبی آب و زاویه مخروطی پاشش نازل بررسی شده است. محاسبات نشان می دهد در نازل مخروط حفره ای، اندازه قطرات کوچک تر از 121 میکرومتر و بزرگ تر از 600 میکرومتر برای اطفاء حریق مناسب هستند. با استفاده از یک نازل توپر و یک پنجم دبی در مقایسه با حالت قبل، زمان اطفاء حریق از 26 به 7.4 ثانیه کاهش یافته است. زاویه پاشش در قطرات ریز اثر چندانی بر زمان اطفاء حریق ندارد اما در قطرات درشت با کم کردن زاویه پاشش می توان به جواب مطلوب رسید. از این رو با شناخت پارامترهای نازل و اثر هر یک از آن ها بر زمان خاموشی حریق می توان به طراحی بهینه رسید.

Numerical simulation of poolfire suppression using water mist system investigating nozzle parameter effects

Ghasem Hiedarinejad*, Emad Mousavi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 November 2016
Accepted 24 January 2017
Available Online 22 February 2017

Keywords:
Fire suppression
CFD modeling
FDS
Water mist system

ABSTRACT

With recent developments in sprinkler technology, water mist system is becoming more and more useful in fire suppression. The computational method is an efficient way to investigate effect of Nozzle parameter of water mists and optimize them. In this research, an open source fire dynamic simulator (FDS) is used to numerically investigate the different nozzle parameters on the fire suppression and extinguishing mechanism. The range of droplet size was determined based on the NFPA 750 standard. Extinguishing mechanisms in water mist systems and their effect on extinguishing time and nozzle parameter such as droplet size, water flow rate and spray cone angle were investigated. The simulation concluded that droplet sizes I hollow cone angle smaller than 121 μm and larger than 600 μm were appropriate for fire extinguishing. With a full cone angle nozzle and 1/5 flowrate compared with hollow cone nozzle, fire extinguishing time reduced from 26 seconds to 7.4 seconds. Spray cone angle in fine droplets does not affect the duration of fire extinguishing significantly, however, for large droplets, the desired result can be achieved by reducing the spray cone angle. So with recognition of nozzle parameter and its effects on fire extinguishing time could enhance the optimum design.

1- مقدمه

هزار و 565 نفر در اثر سوختگی در کشور جان خود را از دست دادند [1]. از این رو به منظور جلوگیری از اثرات مخرب آتش سوزی، استفاده از سیستم های هشدار و اطفاء حریق و اطمینان از کارایی درست آن ها ضروری است. این پژوهش جهت شبیه سازی اطفاء حریق آتش استخری به منظور بررسی تأثیر اندازه قطرات بر کارایی سیستم های اطفاء حریق و در نتیجه بهینه سازی زمان اطفاء حریق است. سیستم اطفاء حریق مه آب در اوایل دهه 60 میلادی برای خاموش کردن شعله های غیرپیش آمیخته مطرح شد و با تصویب پروتکل منع استفاده از مواد خاموش کننده مخرب محیط زیست مورد توجه قرار گرفت. تعریف سازمان انجمن ملی آتش نشانی آمریکا از سیستم اطفاء حریق

امروزه وقوع سوانح طبیعی و انسان ساخت و به دنبال آن بروز بحران ها و اختلال در روند عادی زندگی مردم و جامعه پدیده ای است که اکثر جوامع و کشورها را تهدید می کند و منجر به خسارت های مادی و غیرمادی می گردد. سطح بالای خسارت های جانی و مالی ناشی از حریق، ضرورت توجه ویژه به بحث ایمنی حریق در ساختمان ها و صنایع را مشخص می کند. وقوع حریق های مرگبار در سراسر جهان نشان دهنده ناتوانی الزامات قانونی ایمنی حریق در برقراری امنیت کافی برای افراد و اموال در ساختمان های مختلف است. طبق آمار رسمی سازمان پزشکی قانونی در 11 ماه نخست سال 1394 یک

Please cite this article using:

Gh. Hiedarinejad, E. Mousavi, Numerical simulation of poolfire suppression using water mist system investigating nozzle parameter effects, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 350-358, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Gh. Hiedarinejad, E. Mousavi, Numerical simulation of poolfire suppression using water mist system investigating nozzle parameter effects, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 350-358, 2017 (in Persian)

مه‌آب، اسپری آبی است که 99 درصد از قطرات آن در کمینه فشار طراحی شده نازل، زیر هزار میکرومتر باشند. مزایای اصلی این سیستم توانایی آن در خاموش کردن سوخت‌های مایع و همچنین زیست‌محیطی بودن آن است. با وجود مزایای زیادی که سیستم مه‌آب دارد، این سیستم محدودیت‌ها و مشکلاتی نیز دارد. کارایی این سیستم برای سناریوهای مختلف آتش‌سوزی در حال مطالعه است. برای مثال برای حالت‌های مختلف تهویه کارایی این سیستم به شدت تغییر می‌کند. برای بعضی از سوخت‌های جامد زمان اطفاء حریق برای جلوگیری از شعله‌وری مجدد، طولانی است. پس کارایی این سیستم به نوع سوخت، تهویه، محل آتش و هندسه اتاق بستگی دارد. نکته قابل توجه این است که طبق استاندارد سازمان انجمن ملی آتش‌نشانی آمریکا، بعد از طراحی سیستم مه‌آب، نیاز به آزمایش استاندارد آتش‌سوزی برای اطمینان از کارایی این سیستم است [2].

قطرات آب با استفاده از مکانیزم‌های کاهش مستقیم دمای سطح سوخت¹، کاهش دمای فاز گاز²، جذب تشعشع³ در ناحیه بین سطح سوخت و شعله و همچنین کاهش اکسیژن در ناحیه آتش⁴، سبب اطفاء حریق می‌شوند. رسیدن قطره به سطح سوخت و جذب گرمای سطح سبب کاهش نرخ تبخیر سوخت و در نتیجه کاهش نرخ سوزش می‌شود. جذب گرما و تبخیر قطره در ناحیه شعله سبب کاهش دما در این ناحیه می‌شود. در واقع قطرات آب با نفوذ در شعله آتش و تبخیر در آن ناحیه، انرژی تشعشعی شعله را جذب می‌کنند و مانع از رسیدن این انرژی به سطح سوخت می‌شوند. این عامل سبب کاهش نرخ تجزیه⁵ سوخت می‌شود. به همین دلیل علاوه بر کاهش دمای شعله سبب کاهش نرخ تجزیه سوخت می‌شود. جذب حرارت و تبخیر قطره در پیرامون آتش، سبب ایجاد لایه‌ای از بخار آب گرداگرد آتش شده و از ورود اکسیژن جلوگیری می‌کند که سبب خفه شدن آتش می‌شود [3-5]. در واقع با تبخیر یک قطره‌ی آب، حجم بخارهای آب حاصل از آن قطره در مقایسه با حجم آن قطره در فاز مایع، 1700 برابر می‌شود و این عامل علاوه بر اشغال ناحیه پیرامون شعله توسط بخارات آب، مانند سدی از ورود هوای تازه به ناحیه آتش‌سوزی ممانعت به عمل می‌آورد. در تمام سیستم‌های اطفاء حریق توسط آب این مکانیزم‌ها هم‌زمان عمل می‌کنند و سبب اطفاء حریق می‌شوند. در طراحی سیستم اطفاء حریق، با توجه به شرایط برای بهبود عملکرد سیستم اطفاء حریق می‌توان به گونه‌ای عمل کرد که با انتخاب مکانیزم مناسب اطفاء آن حریق به عملکرد مناسب سیستم مه‌آب رسید. یکی از راهکارهای اصلی تعیین مکانیزم اصلی اطفاء حریق، نوع سوخت است. در سوخت‌های مایع معمولاً مکانیزم خفگی نقش بسزایی در اطفاء حریق دارد. مهم‌ترین عامل تعیین کننده مکانیزم اطفاء حریق، اندازه قطرات آب پاشش شده است. با کاهش اندازه قطره آب، به دلیل تبخیر سریع‌تر، این قطرات نمی‌توانند به عمق بیشتری از آتش نفوذ کنند و معمولاً در ناحیه‌های پیرامون شعله تبخیر می‌شوند بنابراین امکان رسیدن قطرات به سطح سوخت کاهش می‌یابد. به همین دلیل با کاهش اندازه قطره مکانیزم خفگی نقش بسزایی در اطفاء حریق بر عهده دارد. به طور کلی برای سوخت‌های مایع و گازی هیدروکربنی حد بحرانی خفگی زیر 13 درصد است این در صورتی است که سوخت‌های جامد معمولاً کمتر از این مقدار و حدود 7 درصد است. پس کاهش مقدار اکسیژن بر سوخت‌های مایع قوی‌تر بوده است [3].

در مطالعه انجام شده بر اطفاء حریق، کیم و همکاران [6] به صورت عددی و تجربی در اتاقی با طول و عرض 4 متر و ارتفاع 2.3 متر زمان اطفاء حریق و تغییرات دما را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. سوخت استفاده شده متانول و هگزان است. اندازه ظرف محتوی سوخت در حالت اول 0.3×0.3 و در حالت دوم 0.4×0.4 است. این مطالعه نشان‌دهنده توانایی FDS در پیش‌بینی تغییرات دما و زمان اطفاء حریق است. با توجه به نتایج به دست آمده رژیم دمایی بعد از پاشش به دو دسته ناحیه سقوط ناگهانی دما و ناحیه تغییرات آرام دما تقسیم شده است. همچنین زمان بحرانی اطفاء حریق در انتهای ناحیه تغییرات ناگهانی دما تعریف شده است. این پارامتر با توجه به تغییرات دما بعد از پاشش مه‌آب به دست می‌آید و به زمان خاموشی حریق نزدیک است. فرنگ و همکاران [7] به صورت عددی تأثیر اندازه قطرات بر زمان اطفاء حریق را مطالعه نمودند. اندازه قطره 750 میکرومتر به عنوان کم‌ترین زمان اطفاء حریق معرفی شده است. با توجه به شبیه سازی هندسه ساده شده و شبکه‌بندی درشت دقت شبیه‌سازی کافی نبوده است. از نتایج این شبیه‌سازی توانایی FDS در محاسبه زمان اطفاء حریق و پیش‌بینی مناسب توزیع دما است. یاو و همکاران [8] به صورت تجربی کارایی نازل‌ها در فشار پایین (0.2-0.8 MPa) را مورد بررسی قرار دادند. سوخت در نظر گرفته شده پلیمری است. زاویه مخروطی پاشش 120 درجه و در فشارهای مختلف ثابت است. میزان تولید دوده و کربن‌دی‌اکسید محاسبه شده است. با افزایش فشار، توانایی نازل در اطفاء حریق افزایش می‌یابد. از نتایج دیگر این پژوهش تأثیر کلیدی رسیدن مه‌آب به سطح سوخت در اطفاء حریق است. جنف و همکاران [9] به صورت عددی و تجربی خاموش شدن آتش را با استفاده از پاشش مه آب برای دو حالت، یکی مراحل اولیه شروع آتش و دیگری آتش توسعه یافته در فضای یک اتاقی با چند بازو بررسی کرد. هندسه بررسی شده اتاقی با طول 4.2 و عرض 4.3 متر و ارتفاع 3.05 متر است و چهار نازل حفره‌ای برای اطفاء حریق تعبیه شده است. نتیجه آن اهمیت محل حسگر آتش و اقدام به موقع برای اطفاء حریق است. نتایج نشان داد مهار آتش در حالت توسعه یافته بسیار دشوارتر از آتش در مراحل اولیه است. لیو و همکاران [10] به صورت تجربی تأثیر زاویه پاشش و دبی آب بر خاموش شدن آتش استخری مطالعه کردند. هندسه مورد بررسی اتاقی با طول و عرض 1 متر و ارتفاع 2 متر است. این اتاق توسط یک بازو به فضای مجاور مرتبط است. یک نازل در ارتفاع 1.8 متری از سطح سوخت نصب شده است. منبع آتش ظرفی استوانه‌ای به قطر 200 میلی‌متر حاوی سوخت دیزل است. این مطالعه برای سه زاویه مخروطی آب، 60، 90 و 120 درجه انجام شده است. تأثیر میزان فشار و دبی آب به صورت تجربی بررسی شد. در این مطالعه نشان داده شد هرچند زاویه 120 درجه دامنه بیشتری از آتش رو فرا می‌گیرد در مواردی قادر به خاموش کردن آتش نیست. زمان خاموش کردن در زاویه مخروطی 60 درجه نسبت به 120 درجه کاهش زیادی داشته است. چوکا و همکاران [11] تأثیر اندازه قطرات و موقعیت نازل برای خاموش کردن آتش استخری بزرگ مقیاس مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه این مطالعه نشان داد تعیین موقعیت نازل می‌تواند بازدهی سیستم خاموش کننده را تا دو برابر افزایش دهد.

وانگ و همکاران [12] به صورت عددی تأثیر اندازه قطرات را در اطفاء حریق مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهش با شبکه بندی مکعب مربی به ضلع 10 سانتی‌متر انجام شده است و از لحاظ محاسباتی با شبکه بندی مناسب فاصله بسیار دارد در نتیجه دقت این پژوهش برای استناد مناسب نمی‌باشد. تأثیر مقدار دبی بر اندازه قطرات مناسب برای اطفاء بررسی شده است. در این مطالعه اندازه قطرات بزرگ‌تر از $300 \mu\text{m}$ برای اطفاء حریق

¹ Direct cooling² Gas Phase Cooling³ Blocking Radiant heat⁴ Oxygen Displacement⁵ Pyrolysis

توصیه نشده است.

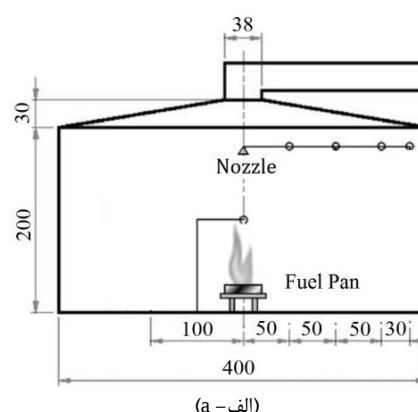
بررسی های پیشین نشان می دهد اندازه قطرات مه آب عاملی بسیار تعیین کننده در زمان اطفاء حریق است. پژوهش های عددی انجام شده در این زمینه فاقد دقت محاسباتی لازم بوده است [12,7]. با توجه به مطالعات نگارندگان تاکنون این پارامتر برای دو نوع نازل مختلف و در دو حالت چیدمان نازل بررسی نشده است. از دیگر پارامترهای بررسی شده تأثیر اندازه قطرات در پاشش مه آب با زوایای مختلف است که در پژوهش های پیشین دیده نمی شود. پس از آن اثر دبی آب بر زمان اطفاء حریق بررسی شده است.

2- شبیه سازی عددی

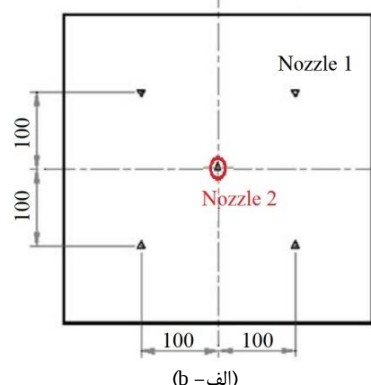
1-2- هندسه مورد بررسی

در مطالعه حاضر زمان اطفاء حریق در یک هندسه سه بعدی بررسی شده است. شکل شماتیک مسئله در شکل 1 آورده شده است. مسئله بررسی شده، اتاقی با طول و عرض 4 متر و ارتفاع 2.3 متر است. این اتاق توسط یک دودکش به فضای مجاور مرتبط است. چهار عدد ترموکوپل نوع K^1 برای محاسبه دما مطابق شکل 1 در ارتفاع 1.8 متری از سقف نصب شده اند.

جدول 1 خصوصیات آتش در آزمایش را نشان می دهد. آزمایش با سوخت متانول شبیه سازی شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. اندازه ظرف محتوی سوخت در این حالت 0.4×0.4 است. آزمایش اول، بدون حضور نازل ها و در حالت خشک انجام شده است سپس همان آزمایش در حضور نازل ها و پاشش آن ها جهت محاسبه زمان اطفاء حریق توسط سیستم مه آب انجام شده است.



(الف - a)



(الف - b)

Fig. 1 Schematic of case study a) Side view b) Top view [6]

شکل 1 تصویر شماتیک مسئله مورد بررسی. (الف نمای جلو ب) نمای بالا [6]

جدول 1 خصوصیات آزمایش

Table 1 Experimental properties

سوخت	ظرف (m)	میانگین سوزش ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	حرارت آزاد شده (kW)
متانول	0.4×0.4	0.0155	49.60

پنج نازل مه آب نوع حفره ای² مطابق شکل 1 در ارتفاع 1.8 متری نصب شده است. جدول 2 خصوصیات نازل ها را نشان می دهد. در این شبیه سازی به آتش اجازه رشد داده شده است و پس از 70 ثانیه سیستم مه آب فعال می شود.

2-2- شبکه محاسباتی

به منظور دستیابی به نتایج استقلال از شبکه لازم است در ابتدا شناخت کافی نسبت به محدوده مقیاس طولی مناسب برای حل مسئله، ضروری است. مقیاس طولی مناسب شامل پلوم آتش و جریان شناوری حاصل از آن توسط رابطه (1) بیان می شود [13].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} C_p \sqrt{g}} \right)^{1/4} \quad (1)$$

این طول مشخصه برآوردی از ناحیه مؤثر در اطراف آتش استخری است که از تغییرات آن اثر می پذیرد. مک گراتان و همکاران [14] اشاره کردند که اگر مقدار طول مشخصه از رابطه (2) پیروی کند مقادیر بزرگ مقیاس از حل مستقیم معادلات بدست می آیند.

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (2)$$

برای دستیابی به نتایج استقلال از شبکه سرعت و دما در فاصله طولی 0.5 و 0.3 از مرکز اتاق اندازه گیری شده است. با توجه به در ارتباط بودن دودکش اتاق با فضای بیرون، در شبیه سازی لازم است جهت بهبود شرایط مرزی فضای بیشتری به شبیه سازی اضافه شود. فضای کامل شبیه سازی شده در این پژوهش دارای طول 5 متر، عرض 4 متر و ارتفاع 3.2 متر است. با توجه به شکل 2 برای دستیابی به نتایج مستقل از اندازه شبکه محاسباتی، شبکه در نظر گرفته شده از 158,256 تا 5,834,496 سلول در زمان 40 ثانیه، طی چند مرحله افزایش یافت. با افزایش اندازه شبکه از 2,999,563 به 5,834,496، تغییرات محسوسی در دما و سرعت و همچنین دمای اطفاء حریق مشاهده نشده است. سپس با افزایش فضای محاسبات در نظر گرفته شده به طول 7 متر و عرض 5 و ارتفاع 5 متر، پارامترهای سرعت، دما و زمان اطفاء حریق تغییرات ناچیزی داشته اند. از طرفی برای آتش با توان 49.6 کیلووات طول مشخصه حدوداً از مرتبه 30 سانتی متر بوده است. بنابراین اندازه شبکه در محدوده رابطه (2) است. پس شبکه ای با تعداد سلول 2999563 برای شبیه سازی مسئله مورد نظر انتخاب شده است.

جدول 2 خصوصیات نازل

Table 2 Nozzle properties

نازل 1	نازل 2	
121 μm	121 μm	متوسط توزیع قطر
3 mm	3 mm	قطر خروجی
13 bar	13 bar	فشار
6 lpm	6 lpm	دبی جریان
مخروط توپر ³	مخروط حفره ای	الگو پاشش
90	خارجی 90، داخلی 70	زاویه پاشش

² Hollow cone

³ Full cone angle

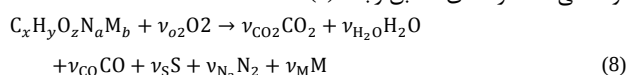
¹ K type

$$\bar{p} = \frac{\rho RT}{W} \quad (7)$$

در نرم افزار FDS دو روش برای مدل کردن احتراق تعریف شده است. در مدل اول از مدل احتراقی شیمی سریع⁴ با استفاده از کسر مخلوط استفاده شده است. در این مدل فرض بر این است واکنش سوخت و اکسیژن بی نهایت سریع انجام می شود. در مدل دوم گونه های گازی شکل بر اساس رابطه آرنیوس با یکدیگر واکنش می دهند. این مدل بیشتر در شبیه سازی مستقیم عددی که نفوذ سوخت و اکسید کننده بطور مستقیم مدل می شود، مورد استفاده قرار می گیرد. در حالی که در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، که در آن شبکه محاسباتی به اندازه شبکه مورد استفاده در روش DNS ریز نیست تا نفوذ سوخت و اکسید کننده را به خوبی مدل کند، از مدل احتراقی کسر مخلوط استفاده می شود [15].

کسر مخلوط به صورت نسبت جرم هر یک از گونه ها به کل جرم آن حجم، مشخص می شود. به این ترتیب در سوخت این مقدار یک و در هوای آزاد صفر است. در نواحی که احتراق رخ می دهد، این نسبت متشکل از هر سوخت محترق نشده و قسمتی از محصولات احتراق است که از سوخت حاصل شده اند. انجام و یا عدم انجام واکنش شیمیایی میان سوخت و اکسید کننده، با توجه به دما و غلظت اکسیژن تعیین می شود. هنگامی که دما و یا غلظت اکسیژن از مقدار مشخصی کمتر باشد، احتراق صورت نمی گیرد.

واکنشی تک مرحله ای مطابق رابطه (8) است [15].



در واکنش یک مرحله ای، s دوده و M مربوط به ترکیبات غیر از کربن، هیدروژن، اکسیژن موجود در سوخت است.

با توجه به اینکه روش های RANS براساس متوسط گیری زمانی معادلات را حل می کنند، از آنجا که فرآیند آتش سوزی متشکل از سازوکارهای مختلفی نظیر اغتشاش، احتراق، تابش و ... است، حذف این نوسانات می تواند موجب کاهش دقت شبیه سازی شود. از جمله مطالعات صورت گرفته بر فیزیک آتش توسط پاسدار شهری و همکاران [17,16] انجام شده است نشان دهنده دقت بالاتر مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ (حدود 7 تا 10 درصد) نسبت به مدل اغتشاشی رینولدز متوسط گیری شده نایر-استوکس بوده است. برای مدل سازی توربولانس در این شبیه سازی از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است. در این روش گردابه های بزرگ، به طور مستقیم و با استفاده از شبکه حل بدست می آید. برای مدل کردن گردابه های کوچک از مدل اسماکورینسکی⁵ استفاده شده است. انتقال حرارت تابشی در نرم افزار FDS بصورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری⁶ حل می شود. معادله انتقال تابشی⁷ برای محیطی که شامل جذب⁸، نشر⁹ و انعکاس¹⁰ تشعشع است، این نرم افزار معادله انتقال تشعشع را بصورت پیش فرض با استفاده از 100 زاویه گسسته شده حل می نماید. این تعداد جهت محاسباتی، جهت افزایش دقت محاسبات قابل افزایش است. در این پژوهش از دیدگاه اولری-لاگرانژی برای شبیه سازی فرایند تبخیر قطرات آب در هوا استفاده شده است. در این دیدگاه، هوا به عنوان فاز پیوسته شناخته شده و معادلات حاکم بر آن در مختصات اولری نوشته می شود و قطرات آب به عنوان فاز گسسته شناخته

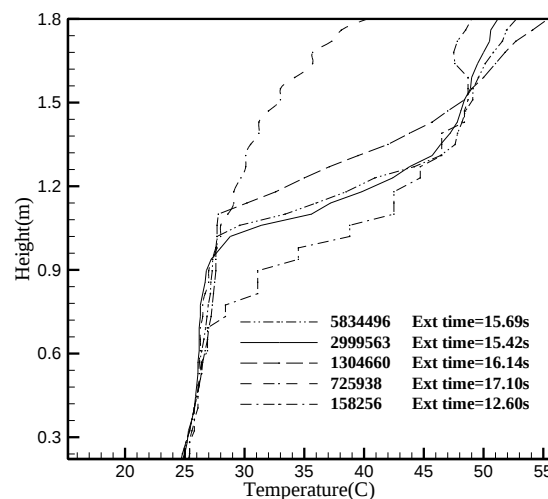


Fig. 2 Grid independency considering diagrams

شکل 2 نمودارهای بررسی استقلال حل از شبکه

3-2- روابط و فرمول های ریاضی

نرم افزار متن باز FDS¹ از یک حل صریح پیش بینی اصلاح² و رانگ کوتاه مرتبه دوم با گسسته سازی مرتبه دوم مکانی و زمانی برای حل معادلات متوسط گیری مکانی نایر-استوکس³ استفاده می کند. این کد معادلات بقا را به صورت اختلاف محدود حل می کند. در این نرم افزار عبارت جابه جایی در مرحله پیش بینی به روش بالادست گسسته شده و در مرحله تصحیح به روش پایین دست گسسته شده اند. جملات دیورژانس یا نفوذ و نفوذ گرمایی نیز در دو مرحله پیش بینی و تصحیح با استفاده از گسسته سازی مرکزی، گسسته می شوند. جریان سیال آتش استخری به عنوان یک جریان با عدد ماخ پایین در نظر گرفته می شود. معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی و گونه با عدد ماخ کم در مختصات کارتزین به شکل زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = \dot{m}_b''' \quad (3)$$

معادله بقای گونه ها [15]:

فرم کلی معادله بقای جرم گونه ها به صورت زیر رابطه (4) است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Y_\alpha u) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (4)$$

در رابطه (4) $\dot{m}_\alpha'''$ نرخ تولید گونه α است و $\dot{m}_{b,\alpha}''' = \sum \dot{m}_{b,\alpha}'''$ نرخ تولید گونه α است که از تبخیر قطرات حاصل می شوند و به صورت جمله چشمه ظاهر شده اند.

معادله بقای مومنتم [15]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - u \times \omega + \nabla H - \bar{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_0)g + f_b + \nabla \cdot \tau] \quad (5)$$

معادله بقای انرژی [15]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s u) + \nabla p = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad (6)$$

که در آن h_s آنتالپی محسوس سیال است و $\dot{q}'''$ نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم در واکنش های شیمیایی و $\dot{q}''$ نرخ انتقال حرارت از طریق تابش و رسانش است.

معادله حالت گاز ایدال [15]:

⁴ Fast Chemistry

⁵ Smagorinsky

⁶ Gray gas

⁷ Radiative Transport Equation

⁸ Absorption

⁹ Emitting

¹⁰ Scattering

¹ Fire Dynamic Simulator

² Explicite Predictor-Corrector

³ Novier-Stockes

نتایج تجربی است. شکل 4 مقایسه میانگین دمای سقفی با نتایج تجربی پس از پاشش مه آب است. روند کاهش دما در محاسبات عددی صورت گرفته مشابه با نتایج تجربی است اما در چند نقطه اختلاف دمای بالایی با نتایج تجربی مشاهده شده است. این اختلاف می تواند ناشی از مدل ساده اطفاء حریق در نرم افزار FDS باشد. در حقیقت مدل توسعه یافته در این نرم افزار براساس نتایج تجربی بوده است و با توجه به نتایج تجربی، روند کاهشی نرخ حرارت آزاد شده پس از پاشش بررسی شده و بر اساس آن نتایج، مدل اطفاء حریق در نرم افزار FDS توسعه یافته است. در نتیجه با بررسی های صورت گرفته، رابطه (7) بر اساس نتایج تجربی برای مدل اطفاء حریق ارائه شده است. از طرف دیگر با توجه به محاسبه دمای فاز گاز به عنوان دمای خروجی از ترموکوپل در شبیه سازی، در بازه های زمانی که تغییرات دما شدیدتر بوده می تواند سبب عدم پیش بینی درست دما شود. پس از پاشش مه آب تغییرات دمای پیش بینی شده با زمان بالا بوده و خطای محاسبات دما پس از پاشش مه آب را می تواند در پی داشته باشد. بنابراین نوسانات دمای پیش بینی شده پس از پاشش، می تواند ناشی از عدم اعمال فیزیک درست حاکم بر حسگرها نیز باشد.

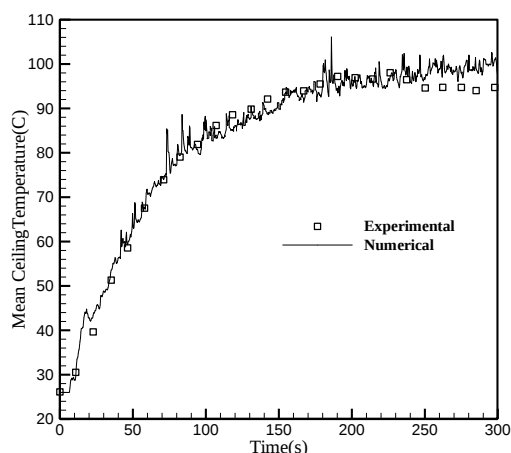


Fig. 3 Compare mean ceiling temperature with numerical simulation without active water mist system.

شکل 3 مقایسه میانگین دمای سقفی آزمایش تجربی با نتایج شبیه سازی عددی بدون حضور سیستم مه آب

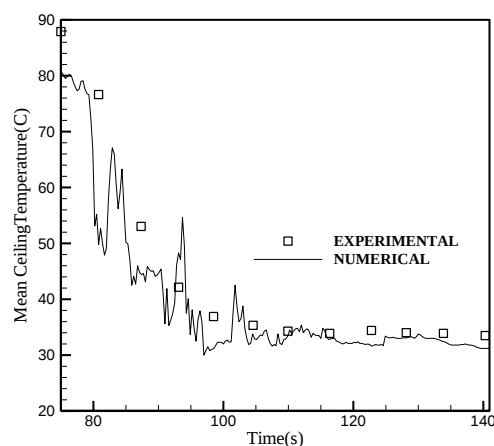


Fig. 4 Compare mean ceiling temperature with numerical simulation since mist injection.

شکل 4 مقایسه میانگین دمای سقفی آزمایش تجربی با نتایج شبیه سازی عددی بعد از پاشش مه آب

شده و معادلات حاکم بر آن در مختصات لاگرانژی بیان می شود. برای شبیه سازی اطفاء حریق از مدلی بر پایه نتایج تجربی استفاده شده است. آب با سرد کردن سطح سوخت سبب کاهش نرخ واکنش آن می شود. روش تجربی محاسبه اطفاء حریق بر طبق کاهش نرخ واکنش و به صورت نمایی است. کاهش نرخ مصرف سوخت در معادله (9) آورده شده است [15].

$$\dot{m}_f'' = \dot{m}_{f,0}''(t) e^{-\int k(t)dt} \quad (9)$$

در رابطه (9) $\dot{m}_{f,0}''$ نرخ مصرف سوخت بر واحد سطح بدون حضور آب است و k تابعی از جرم آب بر واحد سطح که به سطح سوخت رسیده است.

$$k(t) = a \dot{m}_{p,f}'' \quad (10)$$

در رابطه (10) $\dot{m}_{p,f}''$ نشان دهنده میزان جرم آب بر واحد سطح که به سطح سوخت رسیده است. a ضریبی تجربی است که واحد آن $m^2/(kgs)$ است.

علاوه بر تأثیر برخورد قطرات آب به سطح سوخت که از مدلی برپایه نتایج تجربی استفاده شده است، در صورتی که دمای سلول کوچک تر از دمای اشتعال خودبخودی باشد، میزان اکسیژن خارج از محدوده اشتعال پذیری باشد و یا در صورتی که حرارت آزاد شده نتواند دمای مخلوط حاصل احتراق را بالاتر از دمای بحرانی شعله برساند آتش در آن سلول خاموش می شود [15].

2-4- شرایط مرزی

برای مدل کردن آتش سوزی، گرمای آزاد شده از سطح سوخت تعریف شده است. در انتهای شبکه محاسباتی از شرط مرزی محیط باز¹ استفاده شده است. در واقع در این نوع شرایط مرزی با توجه به جهت جریان که وارد شونده² یا خارج شونده³ باشد، مقدار فشار تعیین می شود. نحوه محاسبه فشار برای جریان وارد شونده به صورت رابطه (11) و برای جریان خارج شونده به صورت رابطه (12) است [15].

$$P = \frac{\tilde{p}}{\rho_\infty} + \frac{|u|^2}{2} \quad (11)$$

$$P = \frac{\tilde{p}}{\rho_\infty} \quad (12)$$

در این رابطه u مقدار سرعت محاسبه شده در مرز مورد نظر، $\tilde{p}$ و ρ به ترتیب چگالی و فشار محیط خارج از محیط می باشند.

2-3- صحت سنجی

برای شبیه سازی از نرم افزار FDS نسخه 6.3 استفاده شده است و نتایج حاصل از شبیه سازی، برای اعتبار سنجی با نتایج پژوهش کیم و همکاران [6] مقایسه شده است و زمان اطفاء حریق و تغییرات دما بررسی شده است. تغییرات دما در دو حالت خشک⁴ و حالت تر⁵ بررسی شده اند. در حالت تر سیستم اطفاء حریق پس از 70 ثانیه فعال شده است.

زمان اطفاء حریق در آزمایش تجربی 27 ثانیه بوده است و زمان پیش بینی شده عددی، 26 ثانیه است. خطای محاسبه 1 ثانیه بوده و تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد. شکل 3 مقایسه مقدار پیش بینی شده میانگین دمای ترموکوپل های سقفی با نتایج تجربی بدون پاشش مه آب است. در 40 ثانیه ابتدای آتش سوزی پیش بینی دما خطای بیشتری داشته است. بیشترین اختلاف پیش بینی شده حدود 5 درجه سانتیگراد است که نشان دهنده تطابق مناسب نتایج FDS در پیش بینی دمای اتاق در حالت خشک با

¹ Open Boundary Condition

² Ingoing

³ Outgoing

⁴ بدون حضور سیستم مه آب

⁵ حضور سیستم مه آب

4- نتایج و بحث

از جمله پارامترهای مؤثر نازل بر زمان اطفاء حریق می توان به اندازه ذرات اسپری، مومنتم اسپری، زاویه مخروطی اسپری، سرعت خروجی اسپری، دبی آب خروجی و غیره اشاره کرد. در بین این پارامترها، اندازه قطرات از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این شبیه سازی تأثیر سه پارامتر اندازه ذرات، زاویه پاشش (زاویه مخروطی پاشش) و دبی جریان بر زمان خاموشی شعله بررسی شده است. پس از مرحله صحت سنجی، در همان فضا و شرایط اثر پارامترهای نازل بر زمان اطفاء حریق بررسی شده است. اندازه قطرات بررسی شده طبق استاندارد سیستم مه آب کمتر از $1000\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. کمینه اندازه قطره بررسی شده $80\mu\text{m}$ است.

4-1- تأثیر اندازه قطره

برای بررسی اثر اندازه قطرات، دو حالت در نظر گرفته شده است.

حالت 1- پنج عدد نازل مخروط حفره ای هر یک با دبی 6 لیتر بر ثانیه و با چینش مطابق شکل 1
حالت 2- یک عدد نازل مخروط توپر با دبی 6 لیتر بر ثانیه در مرکز اتاق و ارتفاع 1.8 متری از سطح سوخت

رابطه اندازه قطره بر زمان اطفاء حریق برای نازل شماره 1 در شکل 5 بیان شده است. پنج نازل حفره ای مطابق با آزمایش تجربی در نظر گرفته شده است. در ناحیه ای که اندازه قطرات کوچک تر از $121\mu\text{m}$ است به دلیل ریز بودن قطرات، سطح انتقال حرارت افزایش یافته است و قطرات مه آب به سرعت تبخیر می شوند و با افزایش حجم صورت گرفته از رسیدن اکسیژن به سوخت جلوگیری می کنند و سبب خاموشی سریع شعله می شوند. در این بازه با کاهش اندازه قطره از $121\mu\text{m}$ به $80\mu\text{m}$ زمان اطفاء حریق از 26 ثانیه به 7.7 ثانیه کاهش یافته است. در قطرات بزرگ تر از $600\mu\text{m}$ تبخیر آب نسبت به قطرات ریز بسیار کاهش یافته است همچنین با افزایش مومنتم قطرات آب، احتمال برخورد با سطح سوخت افزایش چشمگیری داشته است.

در این ناحیه، مکانیزم اصلی خاموشی شعله، مکانیزم سردسازی سطح سوخت است. در ناحیه میانی اندازه قطرات آب، زمان اطفاء حریق بالا بوده و سیستم اطفاء حریق به خوبی عمل نمی کند. با افزایش اندازه قطره، سرعت تبخیر آب نسبت به بازه ابتدایی کاهش یافته است. در سوخت مایع کمبود اکسیژن، مکانیزمی مؤثر در اطفاء حریق است در نتیجه در این ناحیه زمان

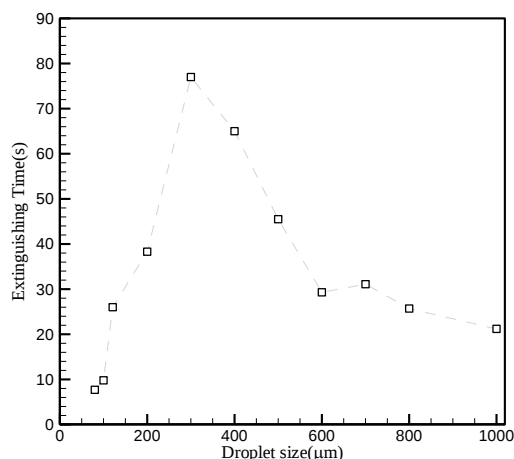


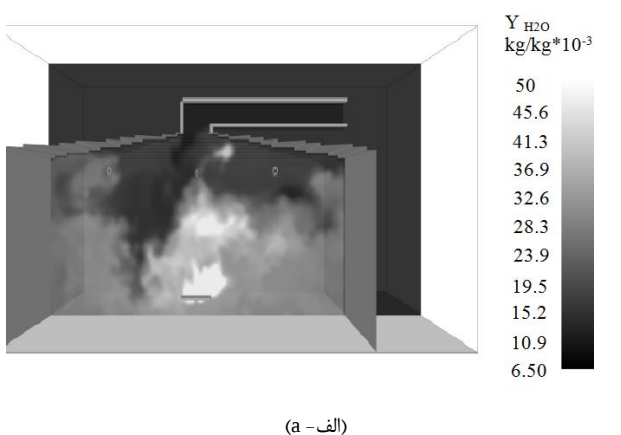
Fig. 5 Effect of discharge Droplet size on fire extinguishing time

شکل 5 رابطه تأثیر اندازه قطره بر زمان اطفاء حریق در حالت اول

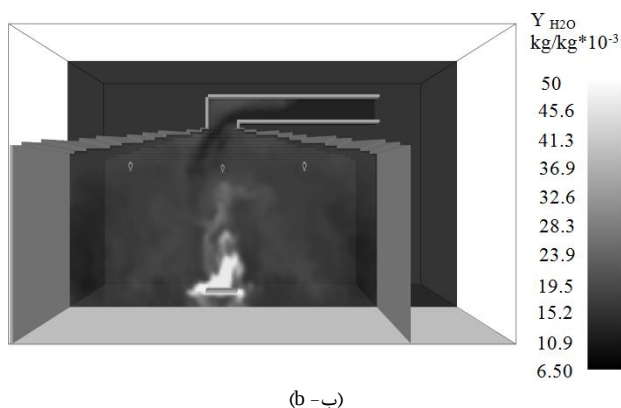
خاموشی شعله به سبب کاهش تبخیر آب، افزایش داشته است. افزایش زمان خاموشی حریق در این ناحیه می تواند با توجه به چینش نازل ها و همچنین حفره ای بودن آن ها نیز توجیه شود.

شکل 6 کانتور کسر جرمی بخار آب برای قطرات با قطر $80\mu\text{m}$ و $1000\mu\text{m}$ را 5 ثانیه پس از پاشش نشان می دهد. در این شکل نقش مکانیزم خفگی برای اندازه قطرات ریز و درشت بررسی شده است. با شروع پاشش سیستم مه آب، قطرات با قطر 80 میکرومتر به دلیل جرم کمی که دارند به سرعت و به محض خروج از نازل، گرمای محیط را جذب می کنند و تبخیر می شوند. این لایه با جلوگیری از ورود هوای تازه، میزان اکسیژن مورد نیاز آتش را کاهش می دهد و سبب خفگی آتش می شود. این در صورتی است در در قطرات 1000 میکرومتری میزان تبخیر آب کاهش چشمگیری داشته است. و نقش مکانیزم خفگی کاهش یافته است. مکانیزم سرد سازی برای سوخت - هایی که نقطه اشتعال پذیری پایینی دارند به تنهایی عملکرد مناسبی ندارد [3]. اطفاء حریق در این سوخت ها فقط با استفاده از سردسازی سطح دشوار است چون کاهش دما به اندازه لازم جهت کاهش مخلوط سوخت و هوا تا زیر نقطه اشتعال پذیری ممکن نیست.

برای بررسی دقیق تر اثر اندازه قطرات بر زمان خاموشی شعله، از یک نازل مخروط توپر استفاده شده است. در زاویه مخروطی پاشش 90 درجه اثر اندازه قطرات به صورت شکل 7 است. در حالت اول با استفاده از پنج مخروط حفره ای و در مجموع دبی 30 لیتر بر ثانیه و اندازه قطرات 121 میکرومتر،



(الف - ا)



(ب - ب)

Fig. 6 Contour of steam fraction after 5 second after mist injected a) $80\mu\text{m}$ b) $1000\mu\text{m}$

شکل 6 کانتور کسر جرمی بخار آب 5 ثانیه پس از پاشش مه آب . الف) 80 میکرومتر ب) 1000 میکرومتر

در زاویه پاشش نقشی اساسی را ایفا می کنند. با افزایش اندازه ذرات مومنتم آن ها افزایش می یابد. در واقع قطرات بزرگ تر به دلیل بزرگ بودن نسبت اینرسی به پسا¹ وارد بر آن ها بیشتر در هوا نفوذ می کنند. بنابراین سطح خیس کنندگی برای قطرات بزرگ تر، وسیع تر است. در نتیجه قطرات ریزتر با وجود افزایش زاویه پاشش، سطح خیس کنندگی کمتری دارند. مطابق شکل 8 تأثیر زاویه پاشش بر زمان خاموشی شعله در قطرات درشت تر، بیشتر است. از علل این امر می توان، تبخیر سریع قطرات ریز مه آب پس از پاشش که با افزایش حجم آن ها نیز همراه است نام برد. این پدیده در زاویه های پاشش بالا نیز سبب خفگی آتش می شود علاوه بر این، مومنتم پایین قطرات مه آب و کاهش سطح خیس کنندگی قطرات ریز نسبت به قطرات درشت در زاویه های نیز سبب کاهش زمان اطفاء حریق می شود. در شکل 8 برای زاویه پاشش 80 درجه میزان اختلاف زمان خاموشی حریق در اندازه قطره 80 میکرومتری در مقایسه با اندازه قطرات 30 میکرومتری 2 ثانیه است، در حالی که این اختلاف برای پاشش با زاویه 130 درجه به حدود 27 ثانیه رسیده است. بنابراین در شرایطی که طراحی بر اساس قطرات درشت است، زاویه های پاشش پایین، پارامتری مهم در کاهش زمان اطفاء حریق است.

4-3- اثر دبی آب

افزایش دبی مستلزم افزایش هزینه های طراحی و نگهداری سیستم مه آب است. با توجه به این نکته بررسی تأثیر این پارامتر بر کارایی سیستم مه آب ضروری به نظر می رسد. دبی آب در سیستم مه آب، از پارامترهای اساسی است به این نحو که با آگاهی لازم از تأثیر این پارامتر بر زمان اطفاء حریق، می توان ضمن بهبود راندمان سیستم اطفاء حریق هزینه های جاری را بهبود بخشید. شبیه سازی سیستم مه آب برای دبی های مختلف در بازه 1 لیتر بر ثانیه تا 10 لیتر بر ثانیه انجام شده است. در این شبیه سازی از یک نازل با زاویه پاشش 90 درجه و اندازه قطرات 121 میکرومتر استفاده شده است. شکل 9 زمان اطفاء حریق را به ازای دبی های مختلف نشان می دهد. با افزایش دبی زمان اطفاء حریق کاهش یافته است و برای دبی کمتر 1 لیتر بر ثانیه اطفاء صورت نگرفته است. بهبود جذب حرارت از شعله را می توان مهم ترین عامل کاهش زمان خاموشی حریق ناشی از افزایش دبی دانست. با توجه به شکل 9 می توان روند کاهش زمان اطفاء حریق بر اساس دبی آب را به سه ناحیه تقسیم کرد. در صورت استفاده از دبی آب 1 تا 2 لیتر بر ثانیه نسبت به

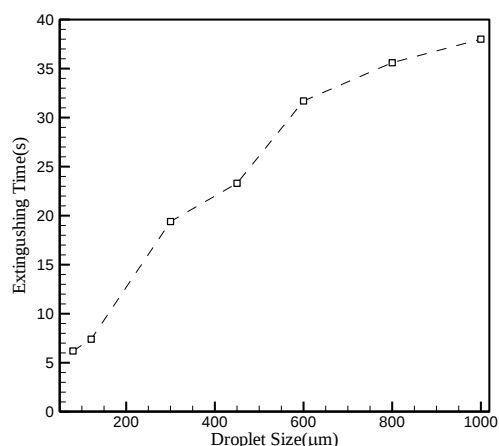


Fig. 7 the effect of Droplet size on extinguishing time

شکل 7 تأثیر اندازه قطره بر زمان خاموشی شعله

زمان خاموشی شعله 26 ثانیه بوده است که با استفاده از یک نازل مخروط توپر در این پژوهش، با کاهش دبی آب از 30 لیتر بر ثانیه به 6 لیتر بر ثانیه زمان اطفاء حریق به مقدار 7.4 ثانیه کاهش یافته است. مطابق شکل 7 مشاهده می شود که با افزایش اندازه قطرات زمان خاموشی شعله افزایش یافته است. افزایش چشمگیر زمان اطفاء حریق در شکل 5 در بازه میانی اندازه قطرات، با توجه به این نکته که نازل از نوع حفراهی است، توجیه می شود در صورتی که در نازل توپر، تغییرات زمان اطفاء حریق با افزایش اندازه قطرات روندی صعودی را نشان می دهد. با افزایش اندازه قطرات نقش مکانیزم خفگی در خاموش کردن آتش کاهش یافته و در نتیجه زمان خاموشی شعله، افزایش می یابد. در اندازه قطرات بزرگتر از 600 میکرومتر رشد زمان خاموشی آتش روند نزولی را طی کرده است. به نحوی که با افزایش 400 میکرومتری اندازه قطرات، زمان خاموشی با افزایش 5 ثانیه ای مواجه شده است. در نتیجه برای اندازه قطره های بزرگتر از 600 افزایش اندازه قطرات تأثیر ناچیزی بر زمان اطفاء حریق دارد. در اندازه قطره 80 میکرومتر زمان خاموشی شعله 6.2 ثانیه است که این میزان در قیاس با اندازه قطره 1000 میکرومتری با کاهشی 32 ثانیه ای همراه بوده است و این امر بیانگر اهمیت اندازه قطرات بر زمان خاموشی شعله است.

4-2- تأثیر زاویه پاشش

زاویه پاشش قطرات آب یکی از پارامترهای مهم در زمان اطفاء حریق است. زاویه پاشش اسپری پارامتری تأثیرگذار بر میزان ناحیه تحت پاشش مه آب و همچنین میزان مصرف آب است. این پارامتر در طراحی با توجه به هندسه اتاق و ناحیه ای تحت پوشش اسپری آب، تعیین می شود. کنترل جهت اسپری می تواند نقش پررنگتری در مقایسه با اندازه ذرات داشته باشد. در بعضی از نمونه ها با تغییر جزئی در زاویه پاشش، بهبود چشمگیری در کارایی سیستم اطفاء حریق مشاهده شده است [2].

شکل 8 تأثیر زاویه پاشش بر زمان خاموشی شعله را برای سه قطره با اندازه های 80 میکرومتر، 121 میکرومتر و 300 میکرومتر نشان می دهد. این شبیه سازی برای یک نازل مخروط توپر انجام شده است. زاویه های مخروطی در نظر گرفته شده در بازه 50 درجه تا 130 درجه است. با افزایش زاویه مخروطی پاشش، زمان اطفاء حریق به دلیل گسترده شدن محدوده پاشش مه آب افزایش یافته است. پخش شدن قطرات مه آب به معنای کاهش تعداد قطرات نفوذ یافته به درون شعله و برخورد با سطح سوخت است. اندازه ذرات

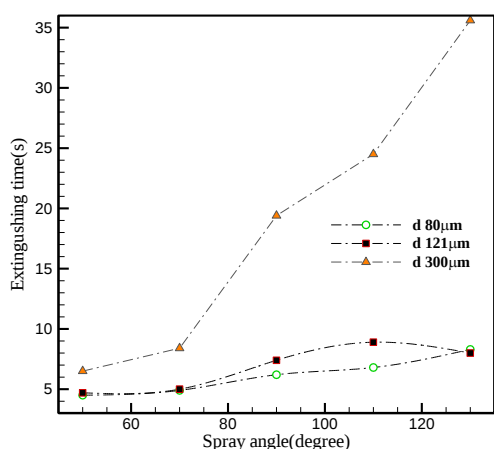


Fig. 8 the effects of droplet cone angle on extinguishing time.

شکل 8 تأثیر زاویه مخروطی پاشش بر زمان خاموشی شعله

¹ Drag

رسیده است. با توجه به زمان اطفاء حریق، دبی آب به سه ناحیه تقسیم شده است و در بازه میانی، سیستم مه آب کارایی مناسبی با توجه به میزان دبی دارد. با توجه به نتایج بدست آمده و تأثیر قابل توجه پارامترهای نازل بر زمان اطفاء حریق رعایت استاندارد سازمان انجمن ملی آتش نشانی آمریکا مبنی بر آزمایش سیستم مه آب پس از طراحی بسیار ضروری است و می توان با طراحی بهتر و بهینه سازی زمان اطفاء حریق سبب کاهش هزینه های جانی و مالی شد.

6- فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D^*	طول مقیاس چشمه آتش
f_b	نیروی خارجی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
g	شتاب گرانش (m^2s^{-1})
h_s	آنتالپی محسوس (J)
$\dot{m}'''$	شار جرمی ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
$\dot{m}_b''$	شار جرمی گونه b ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
$\dot{Q}$	نرخ گرمای آزاد شده (Js^{-1})
$\dot{q}_b''$	انرژی منتقل شده برای تبخیر مایع ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل
T	دما (K)
Y_α	کسر جرمی گونه α ام
W_α	وزن مولکولی گونه α ام (kgmol^{-1})

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ_{ij}	تانسور تنش ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
σ	تنش سطحی (Nm^{-1})

7- مراجع

- [1] Iranian Legal Medicine Organization, Access time October 1 2016; <http://www.imo.ir> (in Persian فارسی)
- [2] N. Zhu, *Experimental performance evaluation of water mist fire suppression system*, PhD Thesis, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 2009.
- [3] J. Mawhinney, B. Dlugogorski, A. Kim, A closer look at the fire extinguishing properties of water mist, *Fire Safety Science*, Vol. 4, No. 1, pp. 47-60, 1994.
- [4] Z. Liu, A. K. Kim, A review of water mist fire suppression systems—fundamental studies, *Journal of fire protection engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 32-50, 1999.
- [5] J. R. Mawhinney, G. G. Back, *Water mist fire suppression systems*, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, pp. 1587-1593, New York: Springer, 2016.
- [6] S. C. Kim, H. S. Ryou, An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure, *Building and Environment*, Vol. 38, No. 11, pp. 1309-1316, 2003.
- [7] Y. M. Ferng, C. H. Liu, Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS code, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, No. 8, pp. 3142-3148, 2011.
- [8] B. Yao, B. H. Cong, J. Qin, W. K. Chow, Experimental study of suppressing Poly(methyl methacrylate) fires using water mists, *Fire Safety Journal*, Vol. 47, No. 1, pp. 32-39, 2012.
- [9] A. Jenft, et al, *Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist*, *Fire Safety Journal*, Vol. 67, No. 1, pp. 1-12, 2014.

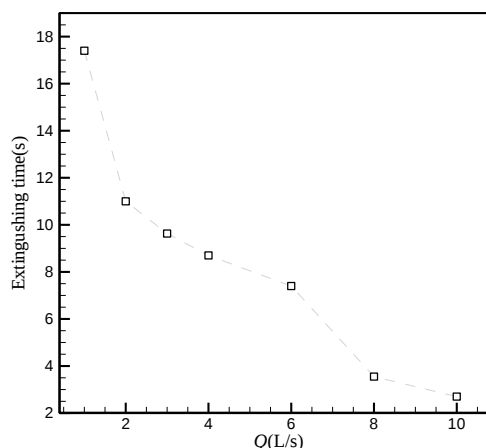


Fig. 9 Water flow rate effect on fire extinguishing time.

شکل 9 تأثیر دبی آب بر زمان خاموشی آتش

نتایج پیشین که بر مبنای دبی 6 لیتر بر ثانیه بیان شده اند، افزایش زمان اطفاء حریق قابل ملاحظه است. در ناحیه میانی با دبی آب 3-6 لیتر بر ثانیه کمترین میزان تغییر زمان اطفاء حریق نسبت به تغییرات دبی آب ملاحظه می شود. این در حالی است که افزایش دبی آب به میزان 8 لیتر بر ثانیه با کاهش تقریبی 50 درصد زمان اطفاء حریق همراه بوده است. با افزایش دبی آب به 10 لیتر بر ثانیه میزان زمان اطفاء حریق با تغییر چشمگیری همراه نبوده که بر این اساس می توان نقطه دبی 8 لیتر بر ثانیه را مقدار بهینه در ناحیه سوم با دبی آب 8-10 لیتر بر ثانیه در نظر گرفت. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی دبی های 8 لیتر بر ثانیه و 2 لیتر بر ثانیه مقداری بهینه جهت اطفاء حریق هستند و انتخاب آن ها در طراحی، با توجه به هزینه های اولیه و کارایی مد نظر برای سیستم اطفاء حریق است.

5- نتیجه گیری

در این مطالعه، به منظور بررسی اثر پارامترهای نازل بر زمان اطفاء حریق مطالعه کیم و همکاران مبنای مقایسه قرار گرفت. به دلیل عدم قطعیت سیستم مه آب در شرایط گوناگون تهویه و سناریوهای مختلف آتش سوزی، این سیستم اطفاء حریق، مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای نازل به عنوان اصلی ترین اجزاء سیستم مه آب بر زمان اطفاء حریق و مکانیزم های اطفاء حریق بررسی شده اند. پارامتر اندازه قطرات در دو نازل مخروط حفره ای و مخروط تو پر بررسی شد. نازل مخروط تو پر با دبی آب 6 لیتر بر ثانیه نسبت به پنج نازل مخروط حفره ای با مجموع دبی 30 لیتر بر ثانیه عملکرد بهتری داشته است. به عبارت دیگر با استفاده از یک نازل تو پر و یک پنجم دبی در مقایسه با حالت قبل، زمان اطفاء حریق از 26 به 7.4 ثانیه کاهش یافته است. از نتایج دیگر تأثیر نوع نازل و چینش نازل ها است به طوری که در بازه 150 μm تا 450 μm ، دسته ی نازل های مخروط حفره ای عملکرد نامناسبی داشته اند و زمان اطفاء حریق به 77 ثانیه رسیده است. اثر زاویه پاشش بر زمان اطفاء حریق در چند اندازه قطره بررسی شده است. در اندازه قطرات ریز، زاویه پاشش مه آب اثر چندانی بر زمان اطفاء حریق نداشته است ولی در قطرات درشت تر به دلیل نفوذ بیشتر قطرات در هوا و سطح وسیع تر خیس کنندگی زمان اطفاء حریق افزایش چشم گیری داشته است. با افزایش دبی آب پاشش شده کارایی سیستم مه آب بهبود یافته است و زمان اطفاء حریق در اندازه قطره 121 میکرومتر و دبی 10 لیتر بر ثانیه به 2.7 ثانیه

- [14] K. B. McGrattan, S. Hostikka, J. E. Floyd, *Fire dynamics simulator, user's guid*, Sixth Edition, Gaithersburg: NIST special publication 1019, 2013.
- [15] K. B. McGrattan, H. R. Baum, R. G. Rehm, A. Hamins, et al, *Fire dynamics simulator-Technical reference guide, Volume 1: Mathematical Model*, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2000.
- [16] H. Pasdarshahri, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, Comparison of Turbulence Sub-Grid Scale Model for Modeling of Large Scale Pool Fire Using LES. *Energy: Engineering & Managment*, Vol. 3, No. 1, pp. 52-61, 2013.
- [17] G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, K. Mazaheri, Evaluation of induced-flow in two-room compartment fire using large eddy simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 74-85, 2013. (in Persian فارسی)
- [10] L. Yinshui, et al, Experimental research on the water mist fire suppression performance in an enclosed space by changing the characteristics of nozzles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, No. 1, pp. 174-181, 2014.
- [11] C. C. Ndubizu, R. Ananth, P. A. Tatem, The effects of droplet size and injection orientation on water mist suppression of low and high boiling point liquid pool fires, *Combustion science and technology*, Vol. 157, No. 1, pp. 63-86, 2000.
- [12] Z. Wang, W. Wang, and Q. Wang, Optimization of water mist droplet size by using CFD modeling for fire suppressions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016. Vol. 44, No. 1, pp. 626-632, 2016.
- [13] G. Heidarinejad, M. Mapar, H. Pasdarshahri, A comprehensive study of two fire sources in a road tunnel: Considering different arrangement of obstacles, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 91-99, 2016.