



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

* gheidari@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 نازل‌های اسپرینکلر و سیستم‌های مه آب بیش از پیش در اطفاء حریق مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های محاسباتی برای بررسی تأثیر اثر تهویه و پارامترهای نازل همچنین بهینه‌سازی آن‌ها 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. مکانیزم‌های اطفاء حریق در سیستم مه آب و تأثیر آن‌ها بر زمان اطفاء حریق همچنین تأثیر پارامترهای اندازه ذرات، دبی آب و زاویه مخروطی پاشش نازل بررسی شده است. محاسبات نشان می‌دهد در نازل مخروط حفره‌ای، اندازه قطرات کوچک‌تر از 121 میکرومتر و بزرگ‌تر 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 می‌توان به جواب مطلوب رسید. از این رو با شناخت پارامترهای نازل و اثر هر یک از آن‌ها بر زمان خاموشی حریق می‌توان 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, ghiedari@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 آتش‌سوزی، استفاده از سیستم‌های هشدار و اطفاء حریق و اطمینان از کارایی درست آن‌ها ضروری است. این پژوهش جهت شبیه‌سازی اطفاء حریق آتش استخری به منظور بررسی تأثیر اندازه قطرات بر کارایی سیستم‌های اطفاء حریق و در نتیجه بهینه‌سازی زمان اطفاء حریق است. سیستم اطفاء حریق مه آب در اوایل دهه 60 میلادی برای خاموش کردن شعله‌های غیرپیش‌آمیخته مطرح شد و با تصویب پروتکل منع استفاده از مواد خاموش کننده مخرب محیط زیست مورد توجه قرار گرفت. تعریف سازمان انجمن ملی آتش‌نشانی آمریکا از سیستم اطفاء حریق

امروزه وقوع سوانح طبیعی و انسان‌ساخت و به دنبال آن بروز بحران‌ها و اختلال در روند عادی زندگی مردم و جامعه پدیده‌ای است که اکثر جوامع و کشورها را تهدید می‌کند و منجر به خسارت‌های مادی و غیرمادی می‌گردد. سطح بالای خسارت‌های جانی و مالی ناشی از حریق، ضرورت توجه ویژه به بحث ایمنی حریق در ساختمان‌ها و صنایع را مشخص می‌کند. وقوع حریق‌های مرگ‌بار در سراسر جهان نشان‌دهنده ناتوانی الزامات قانونی ایمنی حریق در برقراری امنیت کافی برای افراد و اموال در ساختمان‌های 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:

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 گردگرد 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].

¹ Direct cooling

² Gas Phase Cooling

³ Blocking Radiant heat

⁴ Oxygen Displacement

⁵ Pyrolysis

توصیه نشده است.

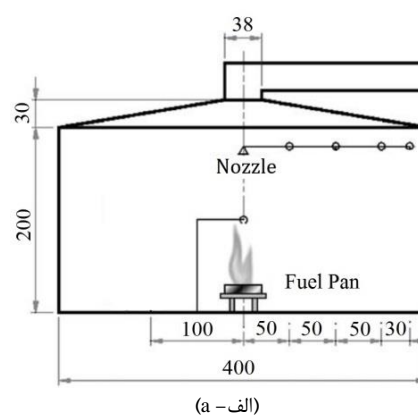
بررسی های پیشین نشان می دهد اندازه قطرات مه آب عاملی بسیار تعیین کننده در زمان اطفاء حریق است. پژوهش های عددی انجام شده در این زمینه فاقد دقت محاسباتی لازم بوده است [12,7]. با توجه به مطالعات نگارندگان تاکنون این پارامتر برای دو نوع نازل مختلف و در دو حالت چیدمان نازل بررسی نشده است. از دیگر پارامترهای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

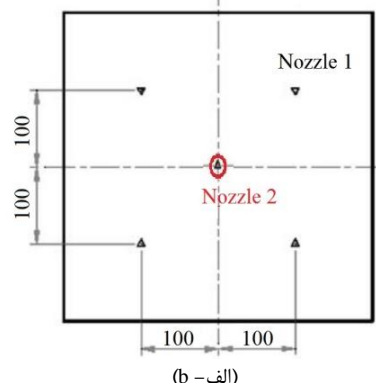
1-2- هندسه مورد بررسی

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-ا)



(الف-ب)

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

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 ای^۲ 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

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 ^۳	مخروط حفره ای	الگو پاشش
90 خارجی	90 داخلی	زاویه پاشش

² Hollow cone

³ Full cone angle

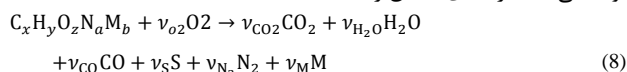
¹ K type

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

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 ناوراستوکس 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 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

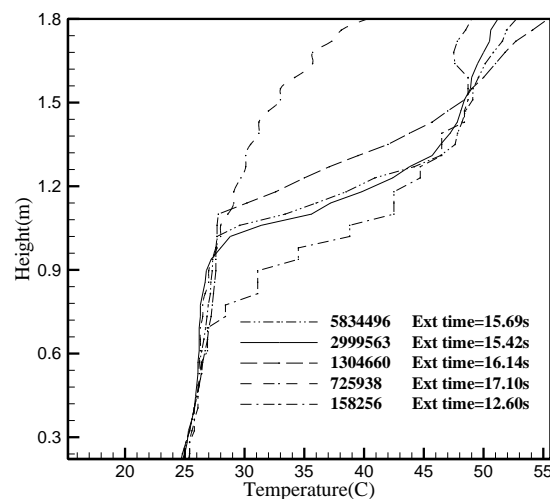


Fig. 2 Grid independency considering diagrams

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 ناور-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 کارترین به شکل زیر است:

معادله بقای جرم [15]:

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

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) نرخ تولید گونه α است و $\dot{m}_{b,\alpha}''' = \dot{m}_b'''$ 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 مه‌آب 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 می‌تواند ناشی از مدل ساده اطفاء حریق در نرم‌افزار FDS باشد. در حقیقت مدل توسعه یافته در این نرم‌افزار براساس نتایج تجربی بوده است و با توجه به نتایج تجربی، روند کاهش نرخ حرارت آزاد شده پس از پاشش بررسی شده و بر اساس آن نتایج، مدل اطفاء حریق در نرم‌افزار FDS توسعه یافته است. در نتیجه با بررسی‌های 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 شبیه‌سازی، در بازه‌های زمانی که تغییرات دما شدیدتر بوده می‌تواند سبب عدم پیش‌بینی درست دما شود. پس از پاشش مه‌آب تغییرات دمای پیش‌بینی شده با زمان بالا بوده و خطای محاسبات دما پس از پاشش مه‌آب را می‌تواند در پی داشته باشد. بنابراین نوسانات دمای پیش‌بینی شده پس از پاشش، می‌تواند ناشی از عدم اعمال فیزیک درست حاکم بر حسگرها نیز باشد.

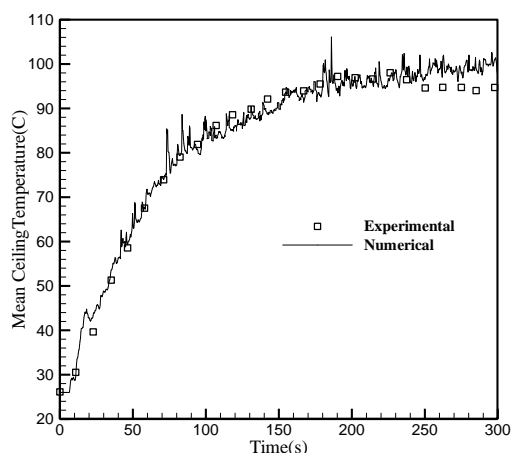


Fig. 3 Compare mean ceiling temperature with numerical simulation without active water mist system.

شکل 3 مقایسه میانگین دمای سقفی آزمایش تجربی با نتایج شبیه‌سازی عددی بدون حضور سیستم مه‌آب

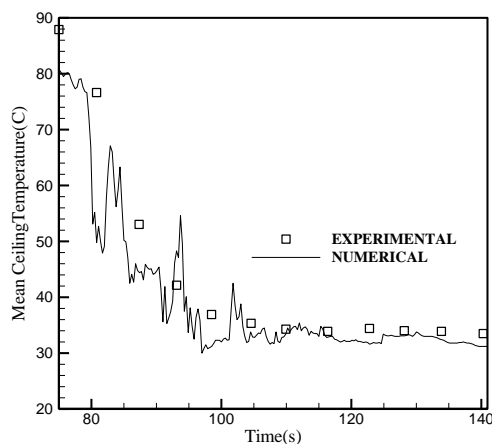


Fig. 4 Compare mean ceiling temperature with numerical simulation since mist injection.

شکل 4 مقایسه میانگین دمای سقفی آزمایش تجربی با نتایج شبیه‌سازی عددی بعد از پاشش مه‌آب

شده و معادلات حاکم بر آن در مختصات لاگرانژی بیان می‌شود. 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 می‌شود. 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) $\dot{m}_{p/f}''$ نشان‌دهنده 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 کوچک‌تر از دمای اشتعال خودبخودی باشد، میزان اکسیژن خارج از محدوده اشتعال‌پذیری 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 می‌شود [15].

2-4- شرایط مرزی

برای مدل کردن آتش‌سوزی، 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 می‌شود. نحوه محاسبه فشار برای جریان وارد شونده به صورت رابطه (11) و برای جریان خارج شونده به صورت رابطه (12) است [15].

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

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

در این رابطه u مقدار سرعت محاسبه شده در مرز مورد نظر، \bar{p} به ترتیب چگالی و فشار محیط خارج از محیط می‌باشند.

3- صحت‌سنجی

برای شبیه سازی از نرم‌افزار FDS نسخه 6.3 استفاده شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، برای اعتبار‌سنجی 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 شده‌اند. 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 پیش‌بینی شده عددی، 26 ثانیه است. خطای محاسبه 1 ثانیه بوده و تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. شکل 3 مقایسه مقدار پیش‌بینی شده میانگین دمای ترموکوپل‌های سقفی با نتایج تجربی بدون پاشش مه‌آب است. در 40 ثانیه ابتدای آتش‌سوزی پیش‌بینی دما خطای بیشتری داشته است. بیشترین اختلاف پیش‌بینی شده حدود 5 درجه سانتیگراد است که نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج FDS در پیش‌بینی دمای اتاق در حالت خشک با

¹ Open Boundary Condition

² Ingoing

³ Outgoing

⁴ بدون حضور سیستم مه‌آب

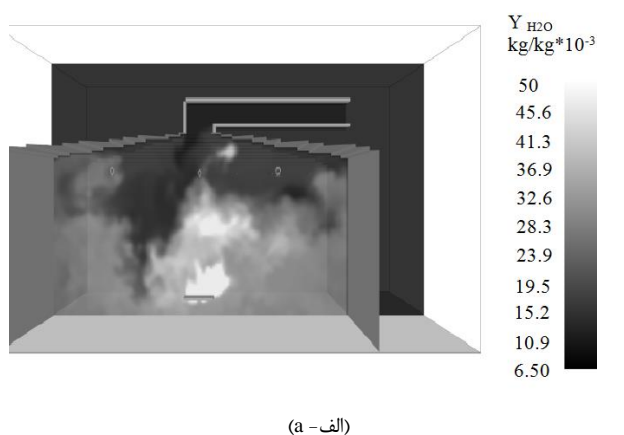
⁵ حضور سیستم مه‌آب

4- نتایج و بحث

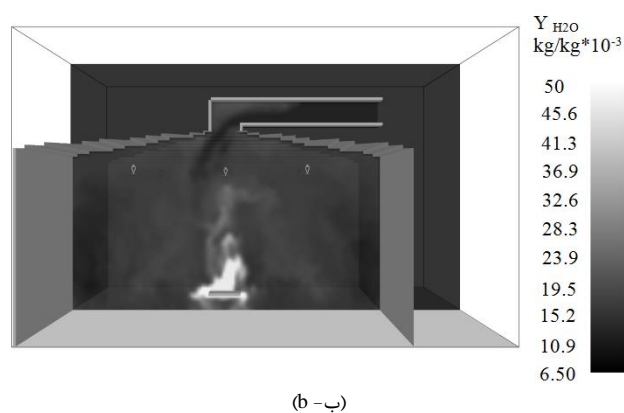
خاموشی شعله به سبب کاهش تبخیر آب، افزایش داشته است. افزایش زمان خاموشی حریق در این ناحیه می‌تواند با توجه به چینش نازل‌ها و همچنین حفره‌ای بودن آن‌ها نیز توجیه شود.

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 می‌دهد. در این شکل نقش مکانیزم خفگی برای اندازه قطرات ریز و درشت بررسی شده است. با شروع پاشش سیستم مه‌آب، قطرات با قطر 80 میکرومتر به دلیل جرم کمی که دارند به سرعت و به محض خروج از نازل، گرمای محیط را جذب می‌کنند و تبخیر می‌شوند. این لایه با جلوگیری از ورود هوای تازه، میزان اکسیژن مورد نیاز آتش را کاهش می‌دهد و سبب خفگی آتش می‌شود. این در صورتی است در قطرات 1000 میکرومتری میزان تبخیر آب کاهش چشمگیری داشته‌است. 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 سوخت‌ها 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 دقیق‌تر اثر اندازه قطرات بر زمان خاموشی شعله، از یک نازل مخروطی 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 حفره‌ای و در مجموع دبی 30 لیتر بر ثانیه و اندازه قطرات 121 میکرومتر،



(الف - الف)



(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 مه‌آب. الف) 80 میکرومتر ب) 1000 میکرومتر

از جمله پارامترهای مؤثر نازل بر زمان اطفاء حریق می‌توان 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 شبیه‌سازی تأثیر سه پارامتر اندازه ذرات، زاویه پاشش (زاویه مخروطی پاشش) و دبی جریان بر زمان خاموشی شعله بررسی شده است. پس از مرحله صحت‌سنجی، در همان فضا و شرایط اثر پارامترهای نازل بر زمان اطفاء حریق بررسی شده است. اندازه قطرات بررسی شده طبق استاندارد سیستم مه‌آب 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 حفره‌ای 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 حفره‌ای مطابق با آزمایش تجربی در نظر گرفته شده است. در ناحیه‌ای که اندازه قطرات کوچک‌تر از $121\mu\text{m}$ است به دلیل ریز بودن قطرات، سطح انتقال حرارت افزایش یافته است و قطرات مه‌آب به سرعت تبخیر می‌شوند و با افزایش حجم صورت گرفته از رسیدن اکسیژن به سوخت جلوگیری می‌کنند و سبب خاموشی سریع شعله می‌شوند. 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 بزرگ‌تر 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 نمی‌کند. 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

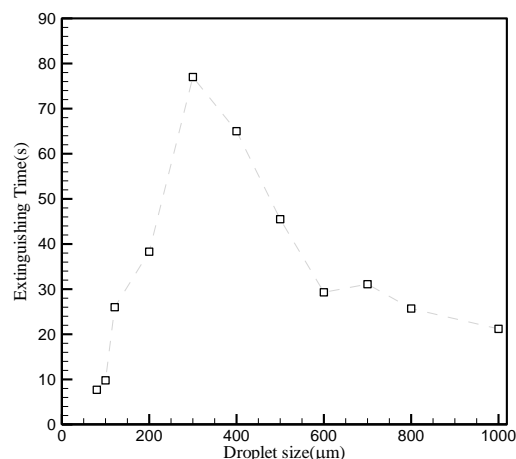


Fig. 5 Effect of discharge Droplet size on fire extinguishing time

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

در زاویه پاشش نقشی اساسی را ایفا می‌کنند. با افزایش اندازه ذرات مومنتم آن‌ها افزایش می‌یابد. در واقع قطرات بزرگ‌تر به دلیل بزرگ بودن نسبت اینرسی به پسا¹ وارد بر آن‌ها بیشتر در هوا نفوذ می‌کنند. بنابراین سطح خیس‌کنندگی برای قطرات بزرگ‌تر، وسیع‌تر است. در نتیجه قطرات ریزتر با وجود افزایش زاویه پاشش، سطح خیس‌کنندگی کم‌تری دارند. مطابق شکل 8 تأثیر زاویه پاشش بر زمان خاموشی شعله در قطرات درشت‌تر، بیشتر است. از علل این امر می‌توان، تبخیر سریع قطرات ریز مه‌آب پس از پاشش که با افزایش حجم آن‌ها نیز همراه است نام برد. این پدیده در زاویه‌های پاشش بالا نیز سبب خفگی آتش می‌شود علاوه بر این، مومنتم پایین قطرات مه‌آب و کاهش سطح خیس‌کنندگی قطرات ریز نسبت به قطرات درشت در زاویه‌های نیز سبب کاهش زمان اطفاء حریق می‌شود. 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، زاویه‌های پاشش پایین، پارامتری مهم در کاهش زمان اطفاء حریق است.

4-3- اثر دبی آب

افزایش دبی مستلزم افزایش هزینه‌های طراحی و نگهداری سیستم مه‌آب است. با توجه به این نکته بررسی تأثیر این پارامتر بر کارایی سیستم مه‌آب ضروری به نظر می‌رسد. دبی آب در سیستم مه‌آب، از پارامترهای اساسی است به این نحو که با آگاهی لازم از تأثیر این پارامتر بر زمان اطفاء حریق، می‌توان ضمن بهبود راندمان سیستم اطفاء حریق هزینه‌های جاری را بهبود بخشید. شبیه‌سازی سیستم مه‌آب برای دبی‌های مختلف در بازه 1 لیتر بر ثانیه تا 10 لیتر بر ثانیه انجام شده است. در این شبیه‌سازی از یک نازل با زاویه پاشش 90 درجه و اندازه قطرات 121 میکرومتر استفاده شده است. شکل 9 زمان اطفاء حریق را به ازای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. 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 می‌توان مهم‌ترین عامل کاهش زمان خاموشی حریق ناشی از افزایش دبی دانست. با توجه به شکل 9 می‌توان 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

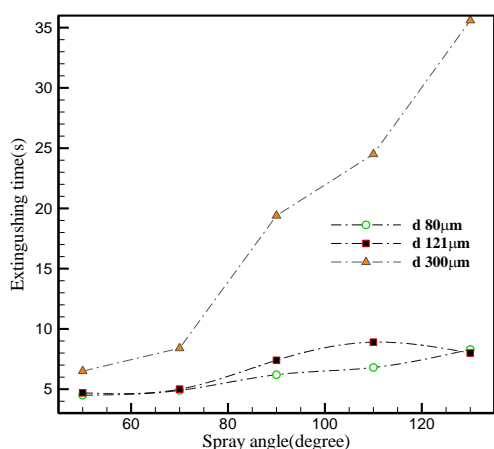


Fig. 8 the effects of droplet cone angle on extinguishing time.

شکل 8 تأثیر زاویه مخروطی پاشش بر زمان خاموشی شعله

¹ Drag

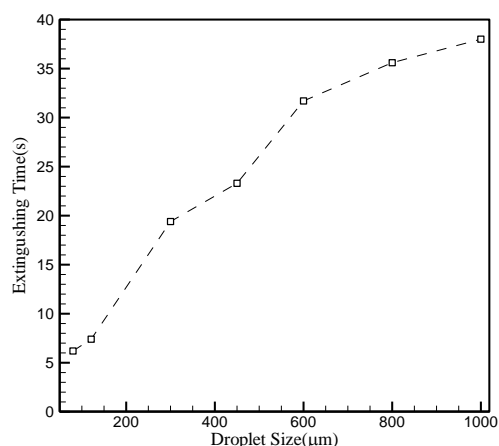


Fig. 7 the effect of Droplet size on extinguishing time

شکل 7 تأثیر اندازه قطره بر زمان خاموشی شعله

زمان خاموشی شعله 26 ثانیه بوده است که با استفاده از یک نازل مخروطی 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 می‌شود که با افزایش اندازه قطرات زمان خاموشی شعله افزایش یافته است. افزایش چشمگیر زمان اطفاء حریق در شکل 5 در بازه‌ی میانی اندازه قطرات، با توجه به این نکته که نازل از نوع حفره‌ای است، توجیه می‌شود در صورتی که در نازل توپر، تغییرات زمان اطفاء حریق با افزایش اندازه قطرات روندی صعودی را نشان می‌دهد. با افزایش اندازه قطرات نقش مکانیزم خفگی در خاموش کردن آتش کاهش یافته و در نتیجه زمان خاموشی شعله، افزایش می‌یابد. 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 ثانیه‌ای مواجه شده است. در نتیجه برای اندازه قطره‌های 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 کاهش 32 ثانیه‌ای 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 مه‌آب و همچنین میزان مصرف آب است. این پارامتر در طراحی با توجه به هندسه اتاق و ناحیه‌ی تحت پوشش اسپری آب، تعیین می‌شود. کنترل جهت اسپری می‌تواند نقش پررنگ‌تری در مقایسه با اندازه ذرات داشته باشد. در بعضی از نمونه‌ها 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 اندازه‌های 80 میکرومتر، 121 میکرومتر و 300 میکرومتر نشان می‌دهد. این شبیه‌سازی برای یک نازل مخروطی توپر انجام شده است. زاویه‌های 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 مه‌آب افزایش یافته است. پخش شدن قطرات مه‌آب به معنای کاهش تعداد قطرات نفوذ یافته به درون شعله و برخورد با سطح سوخت است. اندازه ذرات

رسیده است. با توجه به زمان اطفاء حریق، دبی آب به سه ناحیه تقسیم شده است و در بازه میانی، سیستم مه‌آب 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 آتش‌نشانی آمریکا مبنی بر آزمایش سیستم مه‌آب پس از طراحی بسیار ضروری است و می‌توان با طراحی بهتر و بهینه سازی زمان اطفاء حریق سبب کاهش هزینه‌های 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 گرمی ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
\dot{m}_b'''	شار گرمی گونه b ام ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
\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)
- [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.

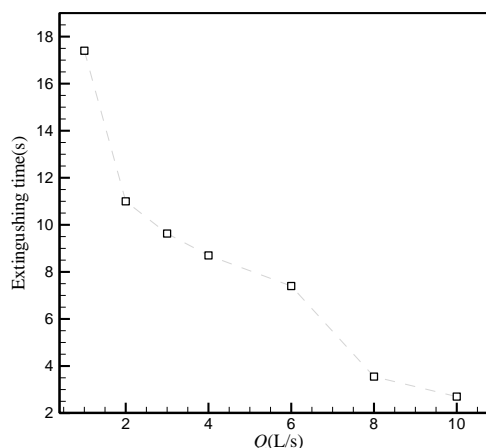


Fig. 9 Water flow rate effect on fire extinguishing time.

شکل 9 تأثیر دبی آب بر زمان خاموشی آتش

نتایج پیشین که بر مبنای دبی 6 لیتر بر ثانیه بیان شده‌اند، 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 می‌شود. 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 می‌توان 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 شبیه‌سازی دبی‌های 8 لیتر بر ثانیه و 2 لیتر بر ثانیه مقداری بهینه جهت اطفاء حریق هستند و انتخاب آن‌ها در طراحی، با توجه به هزینه‌های اولیه و کارایی مد نظر برای سیستم اطفاء حریق است.

5- نتیجه‌گیری

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 مه‌آب در شرایط گوناگون تهویه و سناریوهای مختلف آتش‌سوزی، این سیستم اطفاء حریق، مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای نازل به عنوان اصلی‌ترین اجزاء سیستم مه‌آب بر زمان اطفاء حریق و مکانیزم‌های اطفاء حریق بررسی شده‌اند. پارامتر اندازه قطرات در دو نازل مخروط حفره‌ای و مخروط تو پر بررسی شد. نازل مخروط تو پر با دبی آب 6 لیتر بر ثانیه نسبت به پنج نازل مخروط حفره‌ای 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 نازل‌ها است به طوری که در بازه 150 μm تا 450 μm ، دسته‌ی نازل‌های مخروط حفره‌ای عملکرد نامناسبی داشته‌اند 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 مه‌آب اثر چندانی بر زمان اطفاء حریق نداشته است ولی در قطرات درشت‌تر به دلیل نفوذ بیشتر قطرات در هوا و سطح وسیع‌تر خیس‌کنندگی زمان اطفاء حریق افزایش چشم‌گیری داشته است. با افزایش دبی آب پاشش شده کارایی سیستم مه‌آب 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 guide*, 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. Pashdarshahri, G. Heidarnejad, K. Mazaheri, Comparison of Turbulence Sub-Grid Scale Model for Modeling of Large Scale Pool Fire Using LES. *Energy: Engineering & Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 52-61, 2013.
- [17] G. Heidarnejad, H. Pashdarshahri, 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. Heidarnejad, M. Mapar, H. Pashdarshahri, 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.