ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

قاسم حيدرىنژاد^{1*}، عماد موسوى²

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

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

* تېران، صندوق پستى gheidari@modares.ac.ir ،14115-143

چکیدہ	اطلاعات مقاله
همراه با رشد تکنولوژی نازلهای اسپرینکلر و سیستمهای مهآب 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 مهآب بسیار کارایی دارند. در این پژوهش، کد متنباز شبیه-	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 07 آذر 1395 نرم 05 م 1205
ساز دینامیک آتش (FDS) برای بررسی عددی تأثیر پارامترهای نازل بر خفگی و اطفاء حریق استفاده شده است. محدوده اندازه قطرات طبق	پدیرش: 05 بهمن 1395 ارائه در سایت: 04 اسفند 1395
استاندارد NPFA 750 محاسبه شده است. مکانیزمهای اطفاء حریق در سیستم مهاب و تاثیر انها بر زمان اطفاء حریق همچنین تاثیر پارامترهای اندازه ذرات، دبی آب و زاویه مخروطی پاشش نازل بررسی شده است. محاسبات نشان میدهد در نازل مخروط حفرهای، اندازه قطرات	<i>کلید واژگان:</i> اطفاء حریق
کوچکتر از 121 میکرومتر و بزرگتر از 600 میکرومتر برای اطفاء حریق مناسب هستند. با استفاده از یک نازل توپر و یکپنجم دبی در	رین دینامیک سیالات محاسباتی
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	نرمافزار FDS سىستىم مەآب
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, ghiedari@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 27 November 2016 Accepted 24 January 2017 Available Online 22 February 2017	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
Keywords: Fire suppression CFD modeling FDS Water mist system	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 آنها 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 مهآب 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 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 می کند و منجر به خسارتهای مادی و غیرمادی می گردد. سطح بالای خسارتهای جانی و مالی ناشی از حریق، ضرورت توجه ویژه به بحث ایمنی حریق در ساختمانها و صنایع را مشخص می کند. وقوع حریق -های 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

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 بهشدت تغییر می کند. 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 سوخت'، کاهش دمای فاز گاز'، جذب تشعشع' در ناحیه بین سطح سوخت و شعله و همچنین کاهش اکسیژن در ناحیه آتش ، سبب اطفاء حریق میشوند. رسیدن قطره به سطح سوخت و جذب گرمای سطح سبب کاهش نرخ تبخیر سوخت و در نتیجه کاهش نرخ سوزش می شود. جذب گرما و تبخیر قطره در ناحیه شعله سبب کاهش دما در این ناحیه می شود. در واقع قطرات آب با نفوذ در شعله آتش و تبخیر در آن ناحیه، انرژی تشعشعی شعله را جذب می-کنند و مانع از رسیدن این انرژی به سطح سوخت می شوند. این عامل سبب کاهش نرخ تجزیه⁶ سوخت می شود. به همین دلیل علاوه بر کاهش دمای شعله سبب كاهش نرخ تجزیه سوخت می شود. جذب حرارت و تبخیر قطره در پیرامون آتش، سبب ایجاد لایهای از بخار آب گرداگرد آتش شده و از ورود اكسيژن جلوگيرى مىكند كه سبب خفه شدن آتش مى شود [3-5]. در واقع با تبخیر یک قطره ی آب، حجم بخارهای آب حاصل از آن قطره در مقایسه با حجم أن قطره در فاز مايع، 1700 برابر مى شود و اين عامل علاوه بر اشغال ناحیه پیرامون شعله توسط بخارات آب، مانند سدی از ورود هوای تازه به ناحیه آتش سوزی ممانعت به عمل می آورد. در تمام سیستم های اطفاء حریق توسط آب این مکانیزمها همزمان عمل می کنند و سبب اطفاء حریق می-شوند. در طراحی سیستم اطفاء حریق، با توجه به شرایط برای بهبود عملکرد سیستم اطفاء حریق می توان 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. مهم ترین عامل تعیین کننده مکانیزم اطفاء حریق، اندازه قطرات آب پاشش شده است. با کاهش اندازه قطره آب، به دلیل تبخیر سریعتر، این قطرات نمی توانند به عمق بیشتری از آتش نفوذ کنند و معمولاً در ناحیه های پیرامون شعله تبخير مىشوند بنابراين امكان رسيدن قطرات به سطح سوخت كاهش 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 درصورتی 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 تجربي در اتاقي با طول و عرض 4 متر و ارتفاع 2.3 متر زمان اطفاء حريق 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 بهدست 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 بهدست میآید و به زمان خاموشی حریق نزدیک است. فرنگ و همکاران [7] به صورت عددی تأثیر اندازه قطرات بر زمان اطفاء حريق را مطالعه نمودند. اندازه قطره 750 ميكرومتر به عنوان كمترين زمان اطفاء حريق معرفي شده است. با توجه به شبيه سازي 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 نازل ها 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 کربندی کسید 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 بازشو 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 حريق تعبيه شده است. نتيجه آن اهميت محل حسكر آتش و اقدام به موقع برای اطفاء حریق است. نتایج نشان داد مهار آتش در حالت توسعه یافته بسيار دشوارتر از آتش در مراحل اوليه است. ليو و همكاران [10] به صورت تجربي تأثير زاويه پاشش و دبي آب را بر خاموش شدن آتش استخري مطالعه كردند. هندسه مورد بررسى اتاقى با طول و عرض 1 متر و عرض و ارتفاع 2 متر است. این اتاق توسط یک بازشو به فضای مجاور مرتبط است. یک نازل در ارتفاع 1.8 مترى از سطح سوخت نصب شده است. منبع آتش ظرفى 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 می گیرد 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 مقياس مورد مطالعه قرار دادند. نتيجه اين مطالعه نشان داد تعيين موقعيت نازل می تواند 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 سانتی متر 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 300µm برای اطفاء حریق

Direct cooling Gas Phase Cooling

Blocking Radiant heat

⁴ Oxygen Displacement ⁵ Pyrosis

توصيه نشده است.

بررسیهای پیشین نشان میدهد اندازه قطرات مهآب عاملی بسیار تعیین کننده در زمان اطفاء حریق است. پژوهشهای عددی انجام شده در این زمينه فاقد دقت محاسباتي 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 یاشش مهآب با زوایای مختلف است که در پژوهشهای پیشین دیده نمی شود. پس از آن اثر دبی آب بر زمان اطفاء حریق بررسی شده است.

2- شبيه سازى عددى

1-2- هندسه مورد بررسی

در مطالعه حاضر زمان اطفاء حریق در یک هندسه سهبعدی بررسی شده است. شکل شماتیک مسئله در شکل 1 آورده شده است. مسئله بررسی شده، اتاقى با طول و عرض 4 متر و ارتفاع 2.3 متر است. اين اتاق توسط يک دودکش به فضای مجاور مرتبط است. چهار عدد ترموکوپل نوع K^1 برای محاسبه دما مطابق شكل 1 در ارتفاع 1.8 مترى از سقف نصب شدهاند.

جدول 1 خصوصیات آتش در آزمایش را نشان میدهد. آزمایش با سوخت متانول شبیه سازی شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. اندازه ظرف محتوى سوخت در اين حالت 0.4×0.4 است. آزمايش اول، بدون حضور نازلها و در حالت خشک انجام شده است سپس همان آزمایش در حضور نازلها و پاشش آنها جهت محاسبه زمان اطفاء حريق توسط سيستم مهآب انجام شده است.



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 خصوصيات آزمايش

Table I Experimenta	l properties		
حرارت آزاد شده(kW)	میانگین سوزش (kg/m²s)	ظرف(m)	سوخت
49.60	0.0155	0.4×0.4	متانول

پنج نازل مهآب نوع حفرهای 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 مهآب فعال می شود.

2-2- شبکه محاسباتی

(2)

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) بيان مي شود [13].

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

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 مستقيم معادلات بدست مي آيند.

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16$$

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 شبیهسازی اضافه شود. فضای کامل شبیهسازی شده در این پژوهش دارای طول 5 متر، عرض 4 متر و ارتفاع 3.2 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 داشتهاند. از طرفی برای آتش با توان 49.6 کیلووات طول مشخصه حدوداً از مرتبه 30 سانتیمتر بوده است. بنابراین اندازه شبکه در محدوده رابطه (2) است. پس شبکهای با تعداد سلول 2999563 برای شبیهسازی مسئله مورد نظر انتخاب شده است.

جدول 2 خصوصيات نازل

1 K type

Table 2 Nozzle propertie	S	
نازل 2	نازل 1	
121 µm	121 µm	متوسط توزيع قطر
3 mm	3 mm	قطر خروجى
13 bar	13 bar	فشار
6 lpm	6 lpm	دبی جریان
مخروط توپر ^۳	مخروط حفرهای	الگو پاشش
90	خارجی 90، داخلی 70	زاويه پاشش

² Hollow cone

3 Full cone angle

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-26

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.36.8



Fig. 2 Grid independency considering diagrams شکل 2 نمودارهای بررسی استقلال حل از شبکه

2-3- روابط و فرمولهای ریاضی

نرمافزار متنباز ¹ FDS از یک حل صریح پیشبینی اصلاح¹ و رانگکوتا مرتبه دوم با گسسته سازی مرتبه دوم مکانی و زمانی برای حل معادلات متوسط گیری مکانی ناویر ⊣ستوکس^۳ استفاده می کند. این کد معادلات بقا را به صورت اختلاف محدود حل می کند. در این نرمافزار عبارت جابهجایی در مرحله پیشبینی به روش بالادست گسسته شده و در مرحله تصحیح به روش پاییندست گسسته شدهاند. جملات دیورژانس یا نفوذ و نفوذ گرمایی نیز در دو مرحله پیشبینی و تصحیح با استفاده از گسستهسازی 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:

معادله بقای جرم[15]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = \dot{m}_{\rm b}^{\prime\prime\prime} \tag{3}$$

معادله بقای گونهها[15]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\alpha}) + \nabla \cdot (\rho Y_{\alpha} u) = \nabla \cdot (\rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha}) + \dot{m}_{\alpha}^{\prime\prime\prime} + \dot{m}_{b,\alpha}^{\prime\prime\prime}$$
(4)

$$c_{\alpha} (4)$$

$$c_{\alpha} (4)$$

$$c_{\alpha} (4)$$

$$d_{\alpha} (4$$

است که از تبخیر قطرات حاصل می شوند و به صورت جمله چشمه ظاهر lphaشدەاند.

معادله بقاى مومنتم [15]:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla \mathbf{H} - \tilde{\mathbf{p}} \nabla \left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_0)g + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \tau]$$
⁽⁵⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u + \nabla p = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}^{\prime\prime\prime} + \dot{q}_b^{\prime\prime\prime} - \nabla \cdot \dot{q}^{\prime\prime} \tag{6}$$

که در آن $h_{
m s}$ آنتالپی محسوس سیال است و $\dot{q}^{\prime\prime\prime}$ نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم در واکنشهای شیمیایی و \dot{q}'' نرخ انتقال حرارت از طریق تابش و رسانش است. معادله حالت گاز ایدال [15]:

Radiative Transport Equation

⁴ Fast Chemistry Smagorinsky

Grav gas

Absorption

Emitting

 $\bar{p} = \frac{\rho RT}{T}$ در نرمافزار FDS دو روش برای مدل کردن احتراق تعریف شده است. در مدل اول از مدل احتراقی شیمی سریع[†] با استفاده از کسر مخلوط استفاده شده است. در این مدل فرض بر این است واکنش سوخت و اکسیژن بینهایت سریع انجام میشود. در مدل دوم گونههای گازی شکل بر اساس رابطه آرنیوس با یکدیگر واکنش میدهند. این مدل بیشتر در شبیهسازی مستقیم عددی که نفوذ سوخت و اکسید کننده بطور مستقیم مدل می شود، مورد استفاده قرار می گیرد. در حالی که در روش شبیهسازی گردابههای بزرگ، که در آن شبکه محاسباتی به اندازه شبکه مورد استفاده در روش DNS ریز نيست تا نفوذ سوخت و اكسيد كننده را به خوبي مدل كند، از مدل احتراقي كسر مخلوط استفاده مى شود [15].

(7)

کسر مخلوط به صورت نسبت جرم هر یک از گونهها 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 میدهد، این نسبت متشکل از هر سوخت محترق نشده و قسمتی از محصولات احتراق است که از سوخت حاصل شدهاند. انجام و یا عدم انجام واکنش شیمیایی میان سوخت و اکسیدکننده، 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. واكنشى تك مرحلهاى مطابق رابطه (8) است [15].

 $C_x H_y O_z N_a M_b + \nu_{o2} O2 \rightarrow \nu_{CO2} CO_2 + \nu_{H_2} OH_2 O$

 $+\nu_{CO}CO + \nu_SS + \nu_{N_2}N_2 + \nu_MM$ (8) در واکنش یک مرحلهای، s دوده و M مربوط به ترکیبات غیر از کربن ،هیدروژن، اکسیژن موجود در سوخت است.

با توجه به اینکه روشهای RANS براساس متوسط گیری زمانی معادلات را حل می کنند، از آنجا که فرآیند آتش سوزی متشکل از سازو کارهای مختلفی نظير اغتشاش، احتراق، تابش و ... است، حذف اين نوسانات مي تواند موجب کاهش دقت شبیه سازی شود. از جمله مطالعات صورت گرفته بر فیزیک آتش توسط پاسدارشهری 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 ناویراستوکس بوده است. برای مدل-سازی توربولانس در این شبیهسازی از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ استفاده شده است. در این روش گردابههای بزرگ، به طور مستقیم و با استفاده از شبکه حل بدست میآید. برای مدل کردن گردابههای کوچک از مدل اسماگورینسکی^۵ استفاده شده است. انتقال حرارت تابشی در نرمافزار FDS بصورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری² حل می شود. معادله انتقال تابشی^۷ برای محیطی که شامل جذب^۸، نشر^{⁶ و انعکاس^{۱۰} تشعشع} است، این نرمافزار معادله انتقال تشعشع را بصورت پیش فرض با استفاده از 100 زاويه گسسته شده حل مىنمايد. اين تعداد جهت محاسباتى، جهت افزایش دقت محاسبات قابل افزایش است. در این پژوهش از دیدگاه اولری-لاگرانژی برای شبیهسازی فرایند تبخیر قطرات آب در هوا استفاده شده است. در این دیدگاه، هوا بهعنوان فاز پیوسته شناخته شده و معادلات حاکم بر آن در مختصات اولری نوشته می شود و قطرات آب به عنوان فاز گسسته شناخته

Fire Dynamic Simulator

Explicite Predictor-Corrector ³ Novier-Stockes

¹⁰ Scattering

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-26

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]. $m_{f}^{\prime\prime} = m_{f,o}^{\prime\prime}(t) e^{-\int k(t)dt}$ (9) $m_{f}^{\prime\prime} = m_{f,o}^{\prime\prime}(t) e^{-\int k(t)dt}$ (9) در رابطه (9) منزخ مصرف سوخت بر واحد سطح بدون حضور آب است و $k(t) = a m_{p/f}^{\prime\prime}$ (10) در رابطه (10) $m_{p/f}^{\prime\prime}(t)$ نشان دهنده میزان جرم آب بر واحد سطح که به سطح در رابطه (10) $m_{p/f}^{\prime\prime}(t)$ 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 خودبهخودی 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- شرايط مرزى

برای مدل کردن آتش سوزی، گرمای آزاد شده از سطح سوخت تعریف شده است. در انتهای شبکه محاسباتی از شرط مرزی محیط باز^۱ استفاده شده است. در واقع در این نوع شرایط مرزی با توجه به جهت جریان که وارد شونده^۲ یا خارج شونده^۳ 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].

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

$$P = \frac{\tilde{p}}{\rho}$$
(12)

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

3- صحت سنجی

برای شبیه سازی از نرمافزار FDS نسخه 6.3 استفاده شده است و نتایج حاصل از شبیهسازی، 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 تر⁶ 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 پیش-بینی شده عددی، 26 ثانیه است. خطای محاسبه 1 ثانیه بوده و تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد. شکل 3 مقایسه مقدار پیشبینیشده 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 نشان-دهنده تطابق مناسب نتایج FDS در پیشبینی دمای اتاق در حالت خشک با

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 می تواند 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 کاهشی 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 می تواند سبب عدم پیشبینی درست دما شود. پس از پاشش مهآب تغییرات دمای پیش بینی شده با زمان بالا بوده و خطای محاسبات دما پس از پاشش مهآب را می تواند در پی داشته باشد. بنابراین نوسانات دمای پیشبینی شده پس از پاشش، می تواند ناشی از عدم اعمال فیزیک درست حاکم بر حسگرها نيز 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

Open Boundary Condition

² Ingoing ³ Outgoing

⁴بدون حضور سیستم مهآب ⁵حضور سیستم مهآب

4- نتايج و بحث

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 در نظر گرفته شده است. کمینه اندازه قطره بررسی شده است.

4-1- تأثير 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 کوچک تر از ۲۱2m است به دلیل ریز بودن قطرات، سطح انتقال حرارت افزایش یافته است و قطرات مهآب بهسرعت تبخیر میشوند و با افزایش حجم صورت گرفته از رسیدن اکسیژن به سوخت جلوگیری می کنند و سبب خاموشی سریع شعله میشوند. در این بازه با کاهش اندازه قطره از ۲۱2۱ به ۲۵۳ وزمان اطفاء حریق از 26 ثانیه به به قطرات ریز بسیار کاهش یافته است. در قطرات برگ تر از سیدن اکسیژن 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 discharghe 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 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 ۳۵۵ و شکل 5 کانتور کسر جرمی بخار آب برای قطرات با قطر ۵۵س 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 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 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 حفرهای و در مجموع دبی 30 لیتر بر ثانیه و اندازه قطرات 121 میکرومتر،







Fig. 6 Contour of steam fraction after 5 second after mist injected a) 80 µm b) 1000 µm

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



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 برثانیه زمان اطفاء حريق به مقدار 7.4 ثانيه كاهش يافته است. مطابق شكل 7 مشاهده می شود 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 می شود 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 حريق دارد. در اندازه قطره 80 ميكرومتر زمان خاموشي شعله 6.2 ثانيه است که این میزان در قیاس با اندازه قطره 1000 میکرومتری با کاهشی 32 ثانیهای همراه بوده است و این امر بیانگر اهمیت اندازه قطرات بر زمان خاموشی شعله است.

4-2-تأثير زاويه پاشش

زاویه پاشش قطرات آب یکی از پارامترهای مهم در زمان اطفاء حریق است. زاویه پاشش اسپری پارامتری تأثیر گذار 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 مخروط توپر انجام شده است. زاویههای مخروطی در نظر گرفته شده دربازه 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

در زاویه پاشش نقشی اساسی را ایفا می کنند. با افزایش اندازه ذرات مومنتم آنها افزایش می یابد. در واقع قطرات بزرگتر به دلیل بزرگ بودن نسبت اینرسی به پسا^۱ وارد بر آنها بیشتر در هوا نفوذ میکنند. بنابراین سطح خیس کنندگی برای قطرات بزرگتر، وسیعتر 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 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 نيز سبب خفگي آتش ميشود علاوه بر اين، مومنتم پايين قطرات مهآب و کاهش سطح خیس کنندگی قطرات ریز نسبت به قطرات درشت در زاویههای نيز سبب كاهش زمان اطفاء حريق مى شود. در شكل 8 براى زاويه 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 می رسد. دبی آب در سیستم مهآب، 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 هزینههای جاری را بهبود بخشید. شبیه ازی سیستم مهآب 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 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 کاهشی زمان اطفاء حریق بر اساس دبی آب را به سه شکل 9 می توان روند کاهشی 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 نست به



Fig. 8 the effects of droplet cone angle on extingushing time. شكل 8 تأثير زاويه مخروطي پاشش بر زمان خاموشي شعله



Fig. 9 Water flow rate effect on fire extingushig 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 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 مهآب 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 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 توپر با دبی آب 6 لیتر بر ثانیه نسبت به ینج نازل مخروط حفرهای با مجموع دبی 30 لیتر بر ثانیه عملکرد بهتری داشته است. به عبارت دیگر با استفاده از یک نازل توپر و یکپنجم 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 π150μm تا 450μm، 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 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 مهآب بهبود یافته است و زمان اطفاء حريق در اندازه قطره 121 ميكرومتر و دبي 10 ليتر بر ثانيه به 2.7 ثانيه

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 علايم

- $(Jkg^{-1}K^{-1})$ گرمای ویژه در فشار ثابت C_P
 - طول مقياس چشمه آتش D^{*}
 - (kgm⁻¹s⁻²) نيروى خارجى f_b
 - g شتاب گرانش (m²s⁻¹)
 - (J) آنتالپی محسوس h_s
 - (kgm⁻³s⁻¹) شار جرمی (m^{'''}
 - //ˈmˈb شار جرمی گونه b ام (ˈkgm-³s-1
 - Q نرخ گرمای آزاد شده (Js⁻¹)
- (Js⁻¹m⁻²) انرژی منتقل شده برای تبخیر مایع ($\dot{q}_{
 m b}^{\prime\prime}$
 - (kgm⁻¹s⁻²) فشار P
 - Pr عدد یرانتل
 - (K) دما (T
 - کسر جرمی گونه lpha ام Y_{lpha}
 - (kgmol⁻¹) وزن مولکولی گونه α ام W_{lpha}

علائم يوناني

- (kgm⁻¹s⁻¹) لزجت دینامیکی μ
 - ρ چگالی (kgm⁻³)
 - (kgm⁻¹s⁻²) تانسور تنش au_{ii}
 - (Nm⁻¹) تنش سطحی σ

7- مراجع

- 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.

- [14]K. B. McGrattan, S. Hostikka, J. E. Floyd, *Fire dynamics simulator*, user's guid, Sixth Edittion, 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 فارسي)
- [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.