

شبیه‌سازی عددی رفتار حریق در تونل همراه با سیستم‌های تهویه و اطفاء

قاسم حیدری‌نژاد^{1*}، رقیه واشقانی‌فراهانی²

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

2- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* gheidari@modares.ac.ir, 14115-143

چکیده

موضوع ایمنی در مقابل آتش در تونل‌ها امری بسیار حیاتی است، چرا که بسته بودن محیط تونل عواقب ناشی از تصادفات و سوانح را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد؛ بنابراین لازم است که هنگام بروز آتش‌سوزی با انجام اقدامات مناسب توسعه آتش‌سوزی و گسترش دود در تونل کنترل گردد. سیستم تهویه به منظور کنترل دود و سیستم اطفاء برای جلوگیری از رشد و توسعه آتش در تونل استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از کد متن‌باز شبیه‌ساز دینامیک آتش (FDS)، آتش‌سوزی داخل تونل همراه با عملکرد سیستم‌های تهویه و اطفاء شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ جریان آب سبب افزایش ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء می‌شود، همچنین با افزایش نرخ جریان آب از 320 به 1280 لیتر بر دقیقه تضعیف شار تشعشعی رسیده به پایین‌دست آتش از 40% به بیش از 75% افزایش می‌یابد. با فعال‌سازی سیستم اطفاء با قطر میانگین 100 و 1000 میکرومتر، اختلاف دما با محیط به ترتیب حدود 70% و 34% کاهش می‌یابد. در مورد ناحیه پایین‌دست با کاهش اندازه قطر قطره از 1000 تا 100 میکرومتر تضعیف تشعشعی از 58% تا 93% افزایش می‌یابد. جریان هوا منجر به انتقال قطرات به پایین‌دست آتش می‌شود و افزایش نرخ جریان هوا باعث کاهش تضعیف تشعشعی این سیستم در مورد ناحیه بالادست آتش می‌گردد. موقعیت آبپاش‌های فعال شده نسبت به منبع آتش نیز بر توانایی خنک‌سازی و تضعیف تشعشعی سیستم اثر می‌گذارد. سیستم اطفاء با کاهش دمای دود، سیستم تهویه را قادر می‌سازد تا با سرعتی کمتر از سرعت تهویه بحرانی از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 اسفند 1396
پذیرش: 04 فروردین 1397
ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

تونل، آتش‌سوزی

سیستم تهویه

سیستم اطفاء

نرم‌افزار اف‌دی‌اس

Numerical Simulation of Fire in Tunnel with Ventilation and Suppression Systems

Ghasem Heidarinejad*, Roghaye Vasheghani Farahani

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 March 2018
Accepted 24 March 2018
Available Online 11 May 2018

Keywords:

Tunnel, Fire
Ventilation system
Suppression system
FDS

ABSTRACT

The issue of fire safety in tunnels is very essential because the closure tunnels increase consequences of accidents significantly. Therefore, it is necessary to control fire development and smoke propagation with appropriate measures when fire occur. The ventilation system is used to control smoke propagation and the suppression system is used to prevent fire spread in tunnel. In the present study, fire in the tunnel with operating ventilation and suppression systems are simulated using an open source fire dynamic simulator (FDS). The results show that increase water flow rate leads to increase cooling effect of suppression system, also, increasing the water flow rate from 320 to 1280 liters per minute lead to increase the reduction of radiation flux at the downstream of fire from 40% to more than 75%. With the activation of suppression system with a median diameter of 100 and 1000 micrometers, the temperature difference with the environment decreases by about 70% and 34%, respectively. In the case of downstream area, with decrease in size of droplet diameter from 1000 to 100 micrometers, the radiation attenuation increases from 58% to 93%. Air flow leads to transport the droplets to downstream and increase the air flow rate leads to decrease radiation attenuation of suppression system for upstream area. The relative position of activated sprinklers affect the cooling and radiation attenuation ability of system. The suppression system by reducing the smoke temperature enables the ventilation system to resist the smoke backlayering with a lower velocity than the critical ventilation velocity.

چشمگیری افزایش می‌یابد. در صورت وقوع آتش‌سوزی در این فضاهای بسته علاوه بر حرارت ناشی از احتراق، افراد داخل تونل با کمبود اکسیژن مواجه خواهند شد و در صورت نبود امکانات مناسب، جان افراد زیادی به خطر خواهد افتاد. خطر بزرگ دیگر وارد آمدن خسارت به تجهیزات و امکانات موجود در تونل‌هاست.

1- مقدمه

تونل‌ها نقش مهمی در سیستم‌های حمل و نقل ایفا می‌کنند. موضوع ایمنی و به طور خاص ایمنی در مقابل آتش‌سوزی در تونل‌ها با انشعاب‌های فراوان که اغلب در معرض ترافیک سنگین هستند، امری بسیار حیاتی است. به دلیل بسته بودن محیط تونل‌ها عواقب ناشی از تصادفات و سوانح به طور

آتش‌سوزی را در دو حالت با و بدون فعال‌سازی سیستم اطفاء در تونل بررسی کردند. نتایج نشان داد که بدون استفاده از سیستم اطفاء شار حرارتی بشدت افزایش می‌یابد و می‌تواند منجر به گسترش آتش به مواد قابل اشتعال اطراف شود.

لی و اینگاسون [7] عملکرد سیستم آبی‌پاش اتوماتیک را در یک تونل مدل مجهز به سیستم تهویه طولی مطالعه کردند. در این مطالعه 28 تست در تونل مدل با مقیاس 1:15 با استفاده از سیستم آبی‌پاش اتوماتیک دارای حباب‌های شیشه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که در آتش‌سوزی تونل دارای تهویه طولی، نرخ‌های تهویه بالا و نرخ‌های جریان آب پایین منجر به شکست عملکرد سیستم آبی‌پاش اتوماتیک می‌شوند. آن‌ها بیان کردند که دلیل اصلی این شکست اثر جریان تهویه بر توسعه آتش و جریان گاز داغ نزدیک آبی‌پاش‌هاست.

به منظور بررسی اثر سیستم‌های اطفاء بر مبنای آب بر کارایی سیستم تهویه طولی، در جلوگیری از تشکیل لایه برگشتی دود در تونل، کو و هادیسوفکلوس [8] مطالعه تجربی در مقیاس واقعی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از کد اف‌دی‌اس در تونلی به طول 37.5 متر انجام دادند. نتایج تست‌ها نشان داد که سیستم اطفاء سیستم تهویه را قادر می‌سازد تا با سرعت تهویه کمتری از سرعت تهویه بحرانی از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند.

جهت بررسی اطفاء آتش، شش تست مقیاس بزرگ در تونل ریونهامر [9] در سال 2013 انجام شد. آزمایش‌ها نشان داد که فعال‌سازی به موقع سیستم اطفاء اهمیت دارد. در این تست‌ها نرخ حرارت آزاد شده از آتش با فعال‌سازی سیستم اطفاء نسبت به حالتی که سیستم اطفاء فعال نشد 55 تا 80 مگاوات کاهش پیدا کرد و همچنین سیستم اطفاء از گسترش آتش جلوگیری کرد. یک مطالعه تجربی در مقیاس واقعی توسط چیونگ و همکاران [10] در تونلی به طول 600 متر انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از سیستم اطفاء با فشار کاری پایین می‌تواند باعث کاهش قابل توجه در مقدار نرخ حرارت آزاد شده ناشی از آتش‌سوزی شود، البته تا زمانی که سیستم اطفاء به موقع فعال گردد، همچنین اثر سیستم اطفاء بر تولید مونوکسیدکربن قابل توجه و افزایش غلظت مونوکسیدکربن در تست‌ها دیده شده است که نشان‌دهنده احتراق ناقص به دلیل اطفاء آتش توسط آب است.

بلاچارد و همکاران [11] اثر متقابل بین مه آب و گازهای داغ را در یک تونل با مقیاس 1:3 به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه ابتدا تست‌ها در تونل مدل انجام شده و بعد با استفاده از کد اف‌دی‌اس به صورت عددی شبیه‌سازی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که تقریباً نصف حرارت تولید شده از آتش توسط قطرات آب جذب می‌شود. از این مقدار گرمای جذب شده توسط قطرات، 73٪ آن از طریق انتقال حرارت از فاز گازی به قطرات، 9٪ توسط خنک‌سازی سطح تونل و 18٪ از طریق تضعیف تشعشی صورت می‌گیرد. براساس این نتایج انتقال حرارت از فاز گازی به قطرات به عنوان مکانیسم اصلی جذب گرما در تونل به دست آمد.

با توجه به تحقیقات انجام شده شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد هم‌زمان سیستم‌های تهویه و اطفاء در تونل نیاز به ارزیابی بیشتر دارد. در کار حاضر اثر خنک‌سازی و تضعیف تشعشی سیستم اطفاء بر مبنای آب همراه با عملکرد سیستم تهویه و وجود جریان هوای طولی ارزیابی شده است. از آن‌جا که پارامترهای زیادی بر عملکرد سیستم اطفاء تأثیرگذار هستند، نیاز است که نحوه تأثیرگذاری این پارامترها بر کارایی سیستم اطفاء داخل تونل

پس از وقوع حوادث آتش‌سوزی در تونل‌ها که منجر به خسارات مالی و جانی هنگفتی شده است، بحث ایمنی در مقابل آتش در این فضاهای بسته به موضوعی مهم در سطوح ملی و بین‌المللی تبدیل شده است.

سیستم‌های تهویه و اطفاء از جمله سیستم‌های ایمنی مقابله با آتش در تونل‌ها هستند. سیستم تهویه با برقراری جریان هوای طولی داخل تونل، گسترش دود را کنترل می‌کند. سیستم اطفاء نیز با تخلیه عامل خاموش‌کننده بر آتش بر کاهش نرخ حرارت آزاد شده و رشد آتش تأثیر می‌گذارد، اما با توجه به تأثیر کارکرد این دو سیستم بر هم لازم است نحوه عملکرد هم‌زمان هر دو سیستم با هم در هنگام آتش‌سوزی مورد بررسی قرار گیرد.

در این راستا چهل تست آتش‌سوزی در مقیاس واقعی طی سال‌های 2000 و 2001 در تونل بنلاکس [1] انجام شد. در این مطالعه با فعال‌سازی سیستم اطفاء اثر این سیستم بر شرایط داخل تونل بررسی شد. بعد از فعال‌سازی آبی‌پاش‌ها، دمای هوا در پایین‌دست و بالادست آتش و همین‌طور دمای خودروهای مجاور به آتش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرد و بدین ترتیب از توسعه آتش به خودروهای دیگر جلوگیری شد. اینگاسون [2] آزمایش‌هایی را در مقیاس مدل انجام داد. در این مطالعه تست‌ها در تونل مدل به طول 10 متر با مقیاس 1:23 انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که اثر ضعیف‌سازی سیستم اسپری آب روی دما، شارهای حرارتی و نرخ حرارت آزاد شده به طور خطی با نسبت نرخ گرمای جذب شده توسط آب به نرخ حرارت آزاد شده از آتش بدون فعال‌سازی سیستم اطفاء تغییر می‌کند. چن و همکاران [3] اثر سرعت تهویه طولی بر کارایی سیستم‌های مه آب را در یک تونل به مقیاس مدل و دارای قطر هیدرولیکی 1.2 متر بررسی کردند. جهت بررسی اثر سیستم تهویه، جریان هوا با سرعت‌های مختلف داخل تونل برقرار شد. نتایج نشان داده است که سرعت تهویه طولی بر زمان خاموش‌سازی آتش تأثیر می‌گذارد و طراحی مناسب سیستم‌های تهویه طولی و اطفاء می‌تواند کارایی سیستم اطفاء را در سرکوب آتش به طور قابل ملاحظه افزایش دهد.

انامیرا و همکاران [4] کارایی سیستم مه آب را در تضعیف آتش‌سوزی‌های ترموپلاستیک در تونل به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ مدل اولری-اولری برای محیط دوفازی، مدل تجزیه گردابه آرنیوس برای احتراق توربولانسی و از معادله انتقال تشعشی چندفازی استفاده شد که شامل سهم دوده، محصولات احتراق و قطرات آب بود. اسپری آب با استفاده از ممان‌های تابع توزیع اندازه قطره مدل شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کارایی اسپری برای تضعیف آتش عمدتاً به دینامیک قطره، مشخصات اسپری و موقعیت آن بستگی دارد. ترلس و ماوینی [5] به منظور تکمیل نتایج حاصل از مطالعه تجربی انجام گرفته در تونل سن‌پدرو دی‌انس، تعدادی شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس¹ روی برش 140 متری از طول این تونل انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که با فعال‌سازی سیستم اطفاء، دماها و شارهای حرارتی بالا به محیط مجاور پالت‌های مشتعل محدود می‌شوند، همچنین در این مطالعه سناریوی آتش‌سوزی بدون فعال‌سازی سیستم اطفاء شبیه‌سازی و نتایج پیش‌بینی شده با شرایط حاصل از آتش‌سوزی همراه با فعال‌سازی سیستم اطفاء مقایسه شد. نتایج نشان داد که بدون فعال‌سازی سیستم اطفاء آتش‌سوزی می‌تواند عواقب مصیبت‌باری به همراه داشته باشد. ماوینی و ترلس [6] به منظور تکمیل کار پیشین خود [5] شبیه‌سازی‌های دیگری با استفاده از اف‌دی‌اس انجام دادند. آن‌ها شار حرارتی ناشی از

¹ Fire Dynamics Simulator (FDS)

2-1- شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ از شبکه (فیلتر) برای حل گردابه‌های بزرگ در جریان استفاده می‌شود. در این روش گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه فیلتر به صورت مستقیم در معادلات ظاهر نمی‌شوند، اما از نظر فیزیکی بین همه مقیاس‌های جریان تعامل و تأثیر متقابل وجود دارد؛ بنابراین برای در نظر گرفتن تأثیر مقیاس‌های کوچک بر مقیاس‌های بزرگ در جریان لازم است که گردابه‌های کوچک به وسیله مدل‌هایی در مقیاس زیرشبکه مدل شوند. برای مدل کردن گردابه‌های کوچک از روش اسماکورینسکی⁶ استفاده شده است.

2-2- مدل اسماکورینسکی

در این روش لزجت گردابه‌ای به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود [12].

$$\mu_t = \rho(C_s \Delta)^2 |S_{ij}| \quad (6)$$

که C_s ضریب اسماکورینسکی و یک ثابت تجربی و در افدی‌اس مقدار آن 0.2 در نظر گرفته شده است. Δ پهنای فیلتر است و که از رابطه (7) به دست می‌آید [12].

$$\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

پس از محاسبه لزجت گردابه‌ای، دیگر پارامترهای نفوذ، ضریب هدایت حرارتی و ضریب نفوذ ماده به صورت تابعی از لزجت گردابه‌ای به صورت روابط (9,8) مدل می‌شوند.

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \quad (8)$$

$$(\rho D)_t = \frac{\mu_t}{Sc_t} \quad (9)$$

در روابط (9,8) Pr_t و Sc_t به ترتیب معرف عدد پراختل توربولانسی و عدد اشمیت توربولانسی است که هر دو عدد مقداری ثابت فرض می‌شوند. در کد افدی‌اس هر دو مقدار برابر 0.5 در نظر گرفته شده است [12].

2-3- مدل احتراقی

در نرم‌افزار افدی‌اس دو روش برای مدل کردن احتراق تعریف شده است. در مدل اول واکنش سوخت و اکسیژن بی‌نهایت سریع است و فقط توسط اختلاط کنترل می‌شود. روش دیگر زمانی است که واکنش با نرخ محدود انجام می‌گیرد، در این حالت از مدل آرنیوس استفاده می‌شود. مدل دوم بیشتر در شبیه‌سازی مستقیم عددی که ابعاد شبکه خیلی ریز هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالی که در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ که در آن شبکه محاسباتی به اندازه شبکه مورد استفاده در روش DNS ریز نیست، از مدل احتراقی شیمی سریع استفاده می‌شود [13].

در نرم‌افزار افدی‌اس گونه‌های اولیه در سه دسته واکنشی سوخت، هوا و محصولات گنجانده می‌شوند که به آن‌ها گونه‌های فشرده گفته می‌شود؛ بنابراین معادله واکنش به صورت رابطه (10) ساده می‌شود.

$$\text{محصولات} \rightarrow \text{هوا} + \text{سوخت} \quad (10)$$

در واقع گونه‌های فشرده کمیت‌های اسکالر واکنشی هستند که مخلوطی از گونه‌های اولیه را نشان می‌دهند. گونه‌های اولیه براساس کسر حجمی در گونه‌های فشرده دسته‌بندی می‌شوند و ضرایب استوکیومتری گونه‌های فشرده از مجموع ضرایب استوکیومتری گونه‌های اولیه به دست می‌آیند.

در این روش فرض می‌شود که گونه‌های اصلی موجود در یک گونه فشرده همراه با هم انتقال می‌یابند و واکنش می‌دهند. در واقع از نقطه‌نظر

مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی تأثیر فعال‌سازی سیستم اطفاء بر کارایی سیستم تهویه در جلوگیری از تشکیل لایه برگشتی دود و همین‌طور تأثیر سرعت جریان تهویه بر عملکرد سیستم اطفاء بررسی می‌گردد، تا بتوان به درستی از این دو سیستم به منظور ایجاد ایمنی در مقابل آتش‌سوزی داخل تونل استفاده کرد.

2- شبیه‌سازی عددی

کد متن باز افدی‌اس یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی است که فرم ویژه‌ای از معادلات ناویر استوکس¹ را برای جریان‌هایی با ماخ پایین به صورت عددی حل می‌نماید. هسته اصلی الگوریتم نرم‌افزار افدی‌اس براساس تئوری صریح پیش‌بینی و تصحیح² و روش رانگ کوتا مرتبه دوم با دقت مرتبه دو زمان و مکان است. این کد معادلات بقاء را با روش اختلاف محدود³ حل می‌کند [12]. در نرم‌افزار افدی‌اس عبارات جابه‌جایی در مرحله پیش‌بینی به روش بالادست گسسته شده و در مرحله تصحیح به روش پایین‌دست گسسته شده‌اند. جملات دیورژانس یا نفوذ مواد و نفوذ گرمایی نیز در دو مرحله پیش‌بینی و تصحیح با استفاده از روش گسسته‌سازی مرکزی گسسته می‌شوند [12]. در نرم‌افزار افدی‌اس از دو روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و شبیه‌سازی مستقیم عددی برای حل معادلات استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار برهم‌کنش بین قطرات مایع گسسته و جریان هوای پیوسته با استفاده از مدل لاگرانژی مدل‌سازی می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال عبارت از موارد زیر است.

- معادله بقای جرم کل [12] به صورت رابطه (1) است.

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

در رابطه (1) ترم چشمه⁴ در سمت راست رابطه، افزایش جرم ناشی از تبخیر قطرات یا دیگر ذرات را نشان می‌دهد.

- معادله بقای جرم گونه‌ها [12] به صورت رابطه (2) است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Y_\alpha u) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha) + \dot{m}_{b,\alpha}''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (2)$$

در رابطه (2) $\dot{m}_{b,\alpha}''' = \sum \dot{m}_{b,\alpha}'''$ نرخ تولید گونه ناشی از تبخیر شدن قطرات یا ذرات است.

- معادله بقای اندازه حرکت [12] به صورت رابطه (3) است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) + \nabla P = \rho g + \nabla \cdot \tau_{ij} + f_b \quad (3)$$

در رابطه (3) f_b نیروی درگ⁵ اعمال شده توسط قطرات و ذرات را نشان می‌دهد و τ_{ij} تانسور تنش برای سیالات نیوتنی است.

- معادله بقای انرژی [12] به صورت رابطه (4) است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s u) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}''' \quad (4)$$

در رابطه (4) h_s آنتالپی محسوس سیال، \dot{q}''' نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم ناشی از واکنش شیمیایی، \dot{q}_b''' انرژی انتقال یافته به قطرات و ذرات است و \dot{q}''' معرف شارهای گرمایی ناشی از تابش و رسانش و پخش است.

- معادله حالت گاز ایده‌آل [12] به صورت رابطه (5) است.

$$\bar{p} = \rho RT \sum \frac{Y_\alpha}{W_\alpha} \quad (5)$$

¹ Navier-Stokes

² Explicit Predictor-Corrector

³ Finite Difference

⁴ Source Term

⁵ Drag Force

⁶ Smagorinsky

مدل عددی، گونه فشرده می‌تواند به عنوان یک گونه تک تلقی شود. این روش در معادله بقای جرم تغییری ایجاد نمی‌کند و معادلات انتقال برای گونه‌های فشرده، مشابه معادلات گونه‌های اولیه است. کسرهای جرمی گونه‌های فشرده به صورت $Z_i, i = 0, 1, \dots, N_z$ مشخص می‌شود که N_z تعداد گونه‌های فشرده است. در این روش فقط معادلات انتقال مربوط به سوخت و محصولات حل می‌شوند و پس از به دست آمدن کسر جرمی سوخت و محصولات، کسر جرمی هوا به صورت رابطه (11) محاسبه می‌گردد [12].

این روش در معادله بقای جرم تغییری ایجاد نمی‌کند و معادلات انتقال برای گونه‌های فشرده، مشابه معادلات گونه‌های اولیه است. کسرهای جرمی گونه‌های فشرده به صورت $Z_i, i = 0, 1, \dots, N_z$ مشخص می‌شود که N_z تعداد گونه‌های فشرده است. در این روش فقط معادلات انتقال مربوط به سوخت و محصولات حل می‌شوند و پس از به دست آمدن کسر جرمی سوخت و محصولات، کسر جرمی هوا به صورت رابطه (11) محاسبه می‌گردد [12].

$$Z_0 = 1 - \sum_{i=1}^{N_z} Z_i \quad (11)$$

در رابطه (11) Z_0 کسر جرمی هواست. کسر جرمی گونه‌های فشرده به طور خطی با کسر جرمی گونه‌های اولیه رابطه دارند؛ بنابراین تبدیل از یکی به دیگری با استفاده از ضرب ماتریس صورت می‌گیرد. یکی از روش‌ها برای مدل‌سازی نرخ‌های واکنش در یک شعله غیرپیش‌آمیخته با فرض شیمی سریع، مفهوم اتلاف گردابه‌ای¹ است [14]. در واقع در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته سوخت و اکسیدکننده در گردابه‌های جداگانه واقع شده‌اند. چون واکنش‌های شیمیایی در بیشتر موارد خیلی سریع هستند، می‌توان فرض کرد که نرخ واکنش توسط نرخ درهم آمیختن گردابه‌های سوخت و اکسیدکننده در مقیاس مولکولی، به عبارت دیگر توسط نرخ اتلاف گردابه‌ها تعیین می‌شوند. در بیشتر کاربردهای افدی‌اس این فرض که مخلوط می‌سوزد، برای مدل کردن سیستم واکنشی کافی است و ترم چشمه شیمیایی متوسط برای سوخت با استفاده از مفهوم اتلاف گردابه‌ای به صورت رابطه (12) مدل می‌شود [12].

$$\dot{m}_F''' = -\rho \frac{\min(Z_F, Z_A/s)}{\tau_{mix}} \quad (12)$$

در رابطه (12) Z_A و Z_F به ترتیب کسرهای جرمی گونه‌های فشرده سوخت و هوا، s ضریب استوکیومتری جرم هوا و τ_{mix} مقیاس زمانی برای اختلاط است که باید مدل شود [12]. گرمای آزادشده بر واحد حجم به صورت حاصل جمع نرخ تولید جرم گونه‌ها در گرمای تشکیل مربوطه به صورت رابطه (13) به دست می‌آید [12].

$$\dot{q}''' \equiv - \sum_{\alpha} \dot{m}_{\alpha}''' \Delta h_{f,\alpha} \quad (13)$$

که \dot{m}_{α}''' نرخ تولید و $\Delta h_{f,\alpha}$ گرمای تشکیل گونه α است.

4-2- انتقال حرارت تابشی

معادله انتقال تابشی² در نرم‌افزار افدی‌اس برای گاز خاکستری حل می‌شود و برای محیط شامل جذب³، نشر⁴ و پراکندگی⁵ به صورت رابطه (14) است [12].

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

که در آن $I_{\lambda}(x, s)$ شدت تابش⁶ در طول موج λ است. S بردار جهت شدت تابش، $\kappa(x, \lambda)$ و $\sigma_s(x, \lambda)$ به ترتیب ضرایب موضعی جذب و پراکندگی بوده و $B(x, \lambda)$ چشمه نشر انرژی تشعشعی و برابر با مقدار

2-5- جذب و پراکندگی تابش حرارتی توسط قطرات

قطرات و ذرات، تشعشع گرمایی را از طریق ترکیب جذب و پراکندگی ضعیف می‌کنند؛ بنابراین اثر متقابل بین اسپری و تشعشع باید برای پیش‌بینی دقیق میدان تابشی و تعادل انرژی ذره به صورت رابطه (15) حل شود [12].

$$S \cdot \nabla I_{\lambda}(x, s) = -[\kappa_p(x, \lambda) + \sigma_p(x, \lambda)] I_{\lambda}(x, s) + \kappa_p(x, \lambda) I_{b,p}(x, \lambda) + \frac{\sigma_p(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s', s) I_{\lambda}(x, s') ds' \quad (15)$$

κ_p ضریب جذب ذره، σ_p ضریب پراکندگی ذره، $I_{b,p}(x, \lambda)$ ترم نشر ذرات و $\Phi(s', s)$ تابع فاز پراکندگی است که کسر شدت منعکس‌شده از جهت s' به s را نشان می‌دهد. جذب و پراکندگی تابشی توسط ذرات به مساحت مقطع عرضی و خواص تشعشعی آن‌ها بستگی دارد.

2-6- ذرات لاگرانژی

در نرم‌افزار افدی‌اس برای نشان دادن قطرات مایع از ذرات لاگرانژی⁷ استفاده می‌شود. روابط مربوط به انتقال ذره در فاز گاز، توزیع اندازه، انتقال جرم، مومنتوم و انرژی به و از این ذرات به شکل زیر است.

– انتقال ذره در فاز گاز

در معادله اندازه حرکت فاز گاز، رابطه (3)، ترم f_b اندازه حرکت انتقال‌یافته از ذرات به گاز را نشان می‌دهد. این ترم از مجموع نیروهای انتقال‌یافته از هر ذره در سلول شبکه و تقسیم آن بر حجم سلول به صورت رابطه (16) به دست می‌آید [12].

$$f_b = \frac{1}{V} \sum \left[\frac{1}{2} \rho C_d A_p (u_p - u) |u_p - u| - \frac{dm_p}{dt} (u_p - u) \right] \quad (16)$$

C_d ضریب درگ، A_p مساحت سطح مقطع ذره، r_p شعاع ذره، u_p سرعت ذره و m_p جرم ذره است. شتاب ذره به صورت رابطه (17) به دست می‌آید.

$$\frac{du_p}{dt} = g - \frac{1}{2} \frac{\rho C_d A_p}{m_p} (u_p - u) |u_p - u| \quad (17)$$

– توزیع اندازه قطرات مایع

توزیع حجمی⁸ تجمعی⁹ برای اسپری سیال به صورت ترکیب توزیع لوگنرمال و روسین راملر¹⁰ نشان داده می‌شود [15].

برای $(D \leq D_{v,0.5})$ به صورت رابطه (18) است.

$$F_v(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^D \frac{1}{\sigma D'} \exp\left(-\frac{[\ln(D'/D_{v,0.5})]^2}{2\sigma^2}\right) dD' \quad (18)$$

و برای $(D_{v,0.5} < D)$ به صورت رابطه (19) است.

$$F_v(D) = 1 - \exp\left(-0.693 \left(\frac{D}{D_{v,0.5}}\right)^{\gamma}\right) \quad (19)$$

که $D_{v,0.5}$ قطر قطره حجمی میانگین¹⁰، γ و σ ثوابت تجربی هستند. در واقع نصف جرم مایع توسط قطرات با قطرهای $D_{v,0.5}$ و کمتر حمل می‌گردد.

– گرمایش و تبخیر قطرات مایع

طی گام زمانی حلگر فاز گاز، قطرات در سلول شبکه داده شده تبخیر

¹ Eddy Dissipation Concept (EDC)

² Radiative Transport Equation

³ Absorption

⁴ Emitting

⁵ Scattering

⁶ Radiation intensity

⁷ Lagrangian particles

⁸ Cumulative Volume Distribution

⁹ Lognormal and Rosin-Rummler

¹⁰ Median volumetric droplet diameter

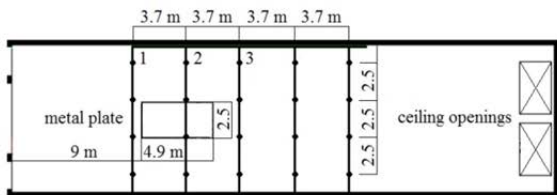


Fig. 2 The studied tunnel from the plan view [8]

شکل 2 تونل مورد مطالعه از نمای بالا [8]

اطفاء شامل پنج لوله موازی به طول 9 متر است و این لوله‌ها به فاصله 3.7 متر از یکدیگر قرار دارند. بر هر لوله چهار عدد آبپاش به فاصله 2.5 متر از یکدیگر نصب شده است. آبپاش‌های موجود روی شاخه‌های 1، 2 و 3 با فعال‌سازی سیستم اطفاء فعال می‌شوند، مشخصات آبپاش‌ها مطابق با مطالعه کو و هادیسوفکلوس [8] در نظر گرفته شده و در جدول 1 ارائه شده است. برای آبپاش‌های مورد استفاده در این مطالعه مقادیر ثابت γ و σ در رابطه توزیع حجمی تجمعی به ترتیب برابر با 2.04 و 0.58 در نظر گرفته شده است [16].

ترموکوپل‌ها در فاصله 16 سانتی‌متر از سقف روی خط مرکزی تونل نصب شده‌اند. در این سناریو ابتدا آتش‌سوزی تحت جریان هوای طولی بدون عملکرد سیستم اطفاء شروع می‌شود و پس از رسیدن به حالت شبه پایا، اطلاعات برای مدت 5 دقیقه متوسط‌گیری شده و بعد آبپاش‌ها فعال می‌گردند و دوباره اطلاعات برای مدت 5 دقیقه متوسط‌گیری می‌شود.

تونل نشان داده شده در شکل‌های 1 و 2 با استفاده از نرم‌افزار افدی‌اس شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی هندسه یادشده تمامی شرایط مورد استفاده در مطالعه کو و هادیسوفکلوس اعمال شده است. در محل دریچه سمت چپ تونل شرط مرزی فشار و در محل دریچه‌های سقفی شرط مرزی سرعت استفاده شده است. دیوارها به صورت عایق در نظر گرفته شده و بر دیوار شرط عدم لغزش برقرار است. دمای هوای ورودی و دمای اولیه محیط 20 درجه سانتی‌گراد است.

برای شبیه‌سازی مناسب آتش‌سوزی که جریان آشفته آن با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شبیه‌سازی می‌شود، نیاز به تخمینی قابل قبول از ابعاد سلول‌های شبکه محاسباتی است تا پدیده‌های غالب نیز مدل‌سازی شوند. مقیاس طولی مناسب برای حل مسأله شامل پلوم آتش و جریان شناوری حاصل از آن با استفاده از نرخ حرارت آزادشده به صورت رابطه (24) بیان می‌شود [17].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (24)$$

این طول مشخصه در واقع برآوردی از ناحیه مؤثر در اطراف آتش است که از تغییرات آن اثر می‌پذیرد. مک‌گراتان و همکاران [13] بیان کردند که اگر طول مقیاس مشخصه از رابطه (25) پیروی کند، مقادیر بزرگ مقیاس که از حل مستقیم معادلات به دست می‌آیند به‌درستی حل می‌شوند.

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (25)$$

باید دقت کرد که این یک برآورد از میزان شبکه محاسباتی است و در حل عددی لازم است که بحث استقلال نتایج حل از شبکه بررسی گردد. به دلیل این‌که بیشتر پدیده‌های غالب و تغییرات شدید در ناحیه آتش‌سوزی رخ می‌دهد، در این مسأله شبکه محاسباتی غیریکنواخت انتخاب و اندازه شبکه در ناحیه آتش‌سوزی ریزتر در نظر گرفته شد. برای تولید شبکه غیریکنواخت در راستای x ، شبکه موردنظر در نقطه $x = -2$ ، با شیب 0.6 متراکم شده

می‌شوند و گونه‌گازی α را تشکیل می‌دهند. نرخ تبخیر تابعی از کسر جرمی بخار تعادل مایع $Y_{\alpha,l}$ ، کسر جرمی بخار فاز گاز موضعی $Y_{\alpha,g}$ ، دمای قطره T_p و دمای موضعی گاز T_g ، انتقال جرم و انرژی بین گاز و مایع به صورت روابط (21,20) است [12].

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p h_m \rho_g (Y_{\alpha,l} - Y_{\alpha,g}) \quad (20)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{m_p c_p} \left[A_p h (T_g - T_p) + \dot{q}_r + \frac{dm_p}{dt} h_v \right] \quad (21)$$

در روابط (21,20) m_p جرم قطره مایع، A_p مساحت سطح قطره، h_m ضریب انتقال جرم، h ضریب انتقال حرارت بین قطره و گاز، \dot{q}_r نرخ گرمایش تابشی قطره و h_v گرمای نهان تبخیر مایع است.

7-2- شرایط مرزی

در مرزی که سیال بسته به گرادین فشار موضعی به سمت داخل یا خارج از میدان محاسباتی جریان پیدا می‌کند از شرط مرزی محیط باز استفاده می‌شود. در این نوع شرط مرزی با توجه به جهت جریان، مقدار فشار بسته به واردشونده یا خارج‌شونده تعیین می‌شود. نحوه محاسبه فشار برای جریان خارج‌شونده به صورت رابطه (22) و برای جریان واردشونده به صورت رابطه (23) است [12].

$$H = \frac{\bar{p}}{\rho_{\infty}} + \frac{|u|^2}{2} \quad (22)$$

$$H = \frac{\bar{p}}{\rho_{\infty}} \quad (23)$$

u آخرین مقدار سرعت روی مرز، \bar{p} و ρ_{∞} به ترتیب فشار و چگالی محیط خارج از تونل هستند. در مرزی که مقدار سرعت و یا نرخ جریان حجمی مشخص باشد، شرط مرزی سرعت برقرار است.

3- هندسه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی‌ها براساس مطالعه کو و هادیسوفکلوس [8] انجام گرفته است. هندسه مورد مطالعه تونلی به ابعاد $37.5 \times 10 \times 5.5$ متر که در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. دیوارهای تونل از جنس بتن ساخته و از داخل عایق شدند. سه مشعل پروپان هرکدام به ابعاد 0.9×1.3 متر با نرخ حرارت آزادشده کل 10 مگاوات در فاصله 12 متر از دریچه ورودی بر خط مرکزی تونل قرار دارند. همان‌طور که در شکل 2 دیده می‌شود، روی این مشعل‌ها با یک ورق فلزی به ابعاد 2.5×4.9 متر پوشانده و این ورق در ارتفاع 2.8 متر بالای مشعل‌ها قرار داده شد. فن تخلیه دود را با دبی حجمی 66 مترمکعب بر ثانیه از طریق دو دریچه روی سقف به بیرون می‌کشد. دریچه اصلی تونل و دو دریچه هواکش در اطراف آن در ورودی تونل (سمت چپ) قرار دارد. ابعاد دریچه اصلی 3.8×4.3 متر و ابعاد هر یک از دریچه‌های هواکش 1.2×4.8 متر است.

آبپاش‌های نصب‌شده روی سقف تونل در شکل 2 دیده می‌شود. سیستم

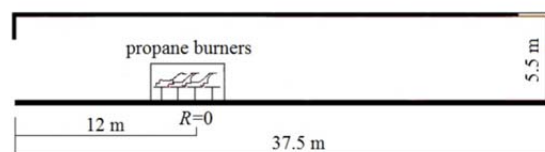


Fig. 1 The tunnel studied by the Ko and Hadjisophocleous from the section view [8]

شکل 1 تونل مورد مطالعه توسط کو و هادیسوفکلوس از نمای پهلو [8]

¹ Open Boundry Condition

شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود پیش از فعال‌سازی آبیاش‌ها نتایج شبیه‌سازی حاضر با دقت قابل قبولی با نتایج تجربی کو و هادیسوفکلوس مطابقت دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی در کار حاضر با خطای کمتری نسبت به کار عددی کو و هادیسوفکلوس به نتایج تجربی نزدیک است.

در شکل 5 پروفیل اختلاف دما با محیط، نزدیک سقف در امتداد طول تونل برای آتش‌سوزی با نرخ حرارت آزاد شده 10 مگاوات پس از فعال‌سازی آبیاش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی شده و با کار تجربی مقایسه شده است. در این شکل محور افقی فاصله طولی از محل آتش‌سوزی و محور عمودی اختلاف دما را با محیط بعد از فعال‌سازی آبیاش‌ها نشان می‌دهد. مشخصات آبیاش‌های فعال‌شده در این شبیه‌سازی مطابق با جدول 1 است. همان‌طور که دیده می‌شود پس از فعال‌سازی آبیاش‌ها نیز نتایج شبیه‌سازی حاضر با دقت قابل قبولی با نتایج تجربی کو و هادیسوفکلوس مطابقت دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی در کار حاضر با خطای کمتری نسبت به کار عددی کو و هادیسوفکلوس به نتایج تجربی نزدیک است؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار اف‌دی‌اس با در نظر گرفتن مقداری خطا قابل استناد است.

5- نتایج

در مطالعه حاضر جهت بررسی اثر خنک‌سازی و تضعیف تشعشعی مطلق سیستم اطفاء، فعال‌سازی آبیاش‌ها روی آتش‌سوزی ناشی از پروپان با توان حرارتی ثابت شبیه‌سازی شد. شرایط ایجاد شده توسط شبیه‌سازی‌ها موقعیتی را نشان می‌دهد که سیستم اطفاء با موفقیت از توسعه آتش جلوگیری کرده و نرخ حرارت آزاد شده را به زمان فعال‌سازی محدود می‌کند. بدین ترتیب برای بررسی اثر پارامترهای مختلف در تمام شبیه‌سازی‌ها از سه مشعل پروپان با توان حرارتی کل 10 مگاوات به عنوان منبع آتش‌سوزی که تحت جریان هوای طولی قرار دارد استفاده شد. در این شبیه‌سازی‌ها پس از گذشت 400 ثانیه از شروع آتش‌سوزی آبیاش‌ها فعال شدند و بعد از آن تا 300 ثانیه شبیه‌سازی ادامه یافت.

به منظور بررسی اثر خنک‌سازی سیستم اطفاء، کاهش نسبی دما مورد مطالعه قرار گرفت، بدین ترتیب که نسبت ماکزیمم اختلاف دمای گاز نزدیک سقف تونل با محیط بعد از فعال‌سازی آبیاش‌ها به این اختلاف دما در همان نقطه پیش از فعال‌سازی ($\Delta T_{ws}/\Delta T$) بررسی شد. همین‌طور به منظور

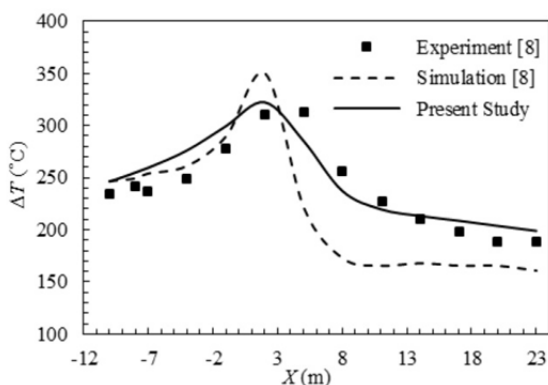


Fig. 4 The temperature difference with the ambient near the ceiling along the length of the tunnel before activating the sprinklers for the heat release rate of 10 MW

شکل 4 پروفیل اختلاف دما با محیط نزدیک سقف در امتداد طول تونل پیش از فعال‌سازی آبیاش‌ها برای نرخ حرارت آزاد شده 10 مگاوات

است.

در مجموع چهار شبکه محاسباتی با اندازه‌های 66 هزار، 132 هزار، 300 هزار و 420 هزار سلول تولید شد. نمودار توزیع دما در امتداد ارتفاع تونل در فاصله طولی 8 متری از محل آتش‌سوزی در ناحیه پایین‌دست و روی خط مرکزی برای این چهار شبکه در شکل 3 با هم مقایسه شده است. در این شکل محور عمودی مختصات ارتفاع تونل و محور افقی دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات دما مربوط به شبکه‌های 300 هزار و 420 هزار بسیار مشابه بوده و اختلاف نمودارهای تغییرات دما با افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی کاهش یافته است. روند کاهش اختلاف نمودارهای تغییرات دما، نشان می‌دهد که نتایج حل با استفاده از شبکه با تعداد 300 هزار سلول مستقل از شبکه محاسباتی است. از این‌رو شبیه‌سازی‌های انجام شده در کار حاضر با بهره‌گیری از شبکه با تعداد 300 هزار سلول انجام شده است.

4- اعتبارسنجی نتایج

جهت بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مطالعه حاضر، نتایج حل عددی به دست آمده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس با نتایج تجربی و عددی مرجع [8] مورد مقایسه قرار گرفت. نمودار اختلاف دما با محیط، نزدیک سقف در امتداد طول تونل برای آتش‌سوزی با نرخ حرارت آزاد شده 10 مگاوات پیش از فعال‌سازی آبیاش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی شده و در شکل 4 نشان داده شده است. در این شکل محور افقی فاصله طولی از محل آتش‌سوزی و محور عمودی اختلاف دما را با محیط پیش از فعال‌سازی آبیاش‌ها نشان می‌دهد و نتایج کار حاضر با نتایج تجربی و عددی مقایسه

جدول 1 مشخصات آبیاش [8]

Table 1 The characteristics of sprinkler [8]

| پارامتر | مقدار |
|------------------|---------------------------------|
| قطر قطره میانگین | 750 (μm) |
| قطر روزنه | 15 (mm) |
| فشار کاری | 117 (kPa) |
| نرخ جریان | 53.3 (l/min) |
| k فاکتور | 117 (l/min/bar ^{0.5}) |
| زاویه اسپری | 30°-80° |

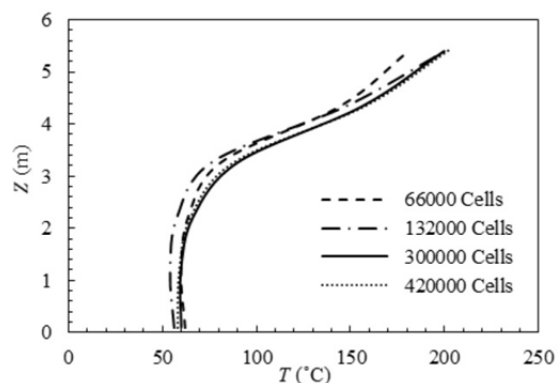


Fig. 3 Temperature distribution along the tunnel height at 8 m away from the fire in the downstream area for different computational grids for the heat release rate of 10 MW

شکل 3 توزیع دما در امتداد ارتفاع تونل در فاصله 8 متری از محل آتش‌سوزی در ناحیه پایین‌دست در شبکه‌های مختلف محاسباتی برای نرخ حرارت آزاد شده 10 مگاوات

جریان هوای طولی به سمت پایین‌دست آتش حرکت کرده، غلظت قطرات مایع آب در نواحی پایین‌دست بیشتر شده و تشعشع منتشرشده از آتش و گازهای داغ در ناحیه پایین‌دست به طور مؤثرتری توسط قطرات آب تضعیف

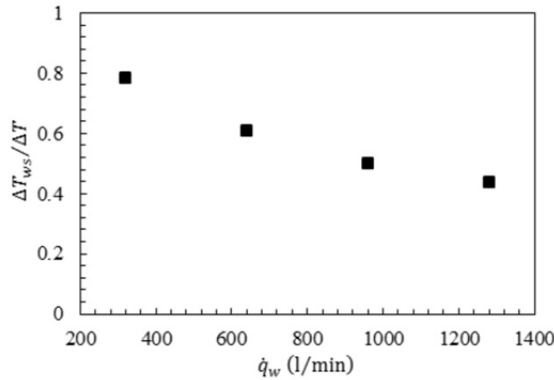


Fig. 6 The profile of the ratio of temperature difference after activating sprinklers to the temperature difference before activating them with the water flow rate

شکل 6 تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی آن‌ها با نرخ جریان آب

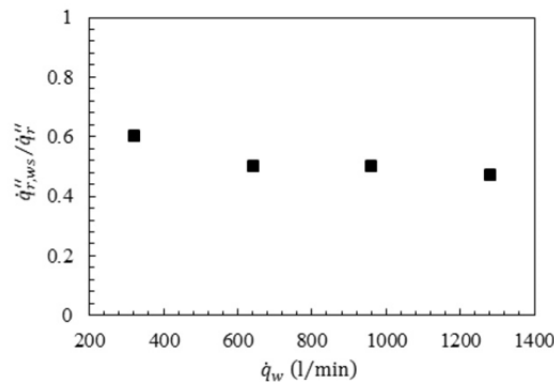


Fig. 7 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the water flow rate in the upstream area

شکل 7 تغییرات نسبت شار تشعشعی پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به شار تشعشعی پیش از فعال‌سازی آن‌ها با نرخ جریان آب در ناحیه بالادست

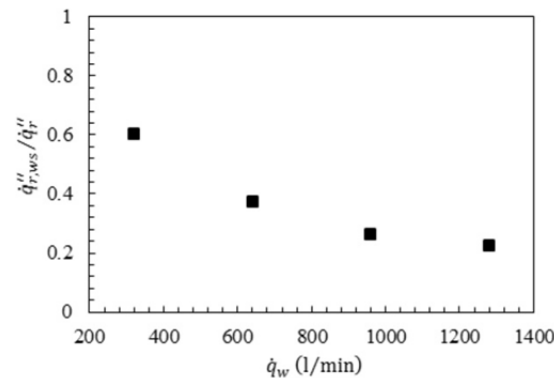


Fig. 8 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the water flow rate in the downstream area

شکل 8 تغییرات نسبت شار تشعشعی پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به شار تشعشعی پیش از فعال‌سازی آن‌ها با نرخ جریان آب در ناحیه پایین‌دست

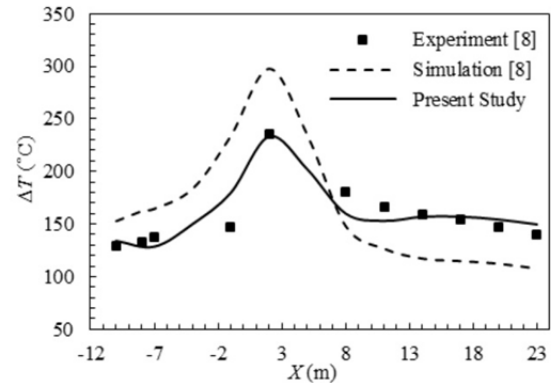


Fig. 5 The temperature difference with the ambient near the ceiling along the length of the tunnel after activating the sprinklers for the heat release rate of 10 MW

شکل 5 پروفیل اختلاف دما با محیط نزدیک سقف در امتداد طول تونل پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها برای نرخ حرارت آزادشده 10 مگاوات

بررسی تضعیف تشعشعی سیستم اطفاء، نسبت شار تشعشعی بعد از فعال‌سازی سیستم اطفاء به شار تشعشعی پیش از فعال‌سازی ($\dot{q}''_{r,ws}/\dot{q}''_r$) مورد مطالعه قرار گرفت. شارهای تشعشعی پیش و پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها در ارتفاع 1.5 متری تونل و در فاصله 8 متر بالادست و 8 متر پایین‌دست آتش به دست آمده است.

5-1- اثر نرخ جریان آب بر کارایی سیستم اطفاء

برای بررسی اثر نرخ جریان آب بر کارایی سیستم اطفاء، عملکرد سیستم اطفاء در خنک‌سازی و تضعیف تشعشع برای چهار نرخ جریان آب متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. در این شبیه‌سازی‌ها نرخ جریان هوا 66 مترمکعب بر ثانیه، قطر قطره میانگین 750 میکرومتر و مقادیر نرخ جریان آب کل 320، 640، 960 و 1280 لیتر بر دقیقه است. روند تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی برحسب نرخ جریان آب در شکل 6 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی سیستم اطفاء به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی کمتر از 1 است که نشان می‌دهد با فعال‌سازی سیستم اطفاء با وجود ثابت بودن نرخ حرارت آزادشده از آتش، دما در تونل کاهش می‌یابد، همچنین افزایش نرخ جریان آب ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء را افزایش می‌دهد. برای این‌که ماکزیمم اختلاف دمای گاز نزدیک سقف با محیط پس از فعال‌سازی سیستم اطفاء بیش از 50% کاهش یابد، لازم است سیستم اطفاء با نرخ جریان آب 1280 لیتر بر دقیقه فعال گردد.

شکل‌های 7 و 8 روند تغییرات نسبت شارهای تشعشعی پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به پیش از فعال‌سازی را با نرخ جریان آب به ترتیب برای ناحیه بالادست و پایین‌دست آتش نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های 7 و 8 مشاهده می‌شود، نسبت شار تشعشعی پس از فعال‌سازی سیستم اطفاء به شار تشعشعی پیش از فعال‌سازی در هر دو ناحیه بالادست و پایین‌دست آتش کمتر از 1 است. در واقع با فعال‌سازی سیستم اطفاء دیواری از قطرات آب بین منبع آتش و نواحی بالادست و پایین‌دست ایجاد می‌شود و با جذب تشعشع توسط قطرات و بخار آب موجود در هوا مقدار شار تشعشعی رسیده به نقاط بالادست و پایین‌دست آتش کاهش می‌یابد.

تضعیف تشعشع در ناحیه پایین‌دست آتش بیشتر از ناحیه بالادست است، در واقع جریان دوفازی شامل بخار آب، دود و قطرات مایع تحت تأثیر

انتقال حرارت بین قطرات آب و فاز گاز و همچنین غلظت آب در جریان دو فازی افزایش می‌یابد که اثر خنک‌سازی گاز و تضعیف تشعشعی سیستم اطفاء را ارتقا می‌دهد.

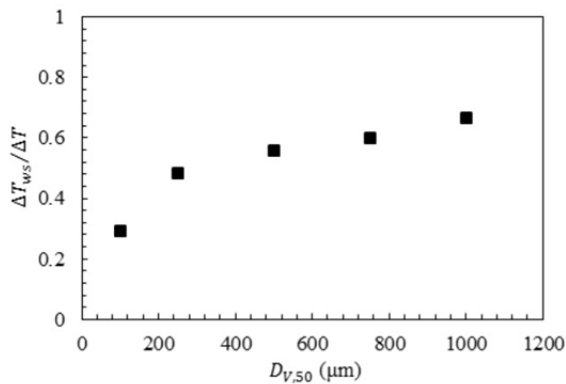


Fig. 9 The profile of the ratio of temperature difference after activating sprinklers to the temperature difference before activating them with the median droplet diameter

شکل 9 تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی آن‌ها با اندازه قطر قطره میانگین

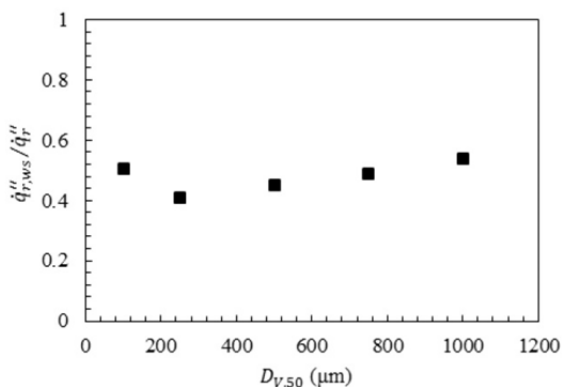


Fig. 10 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the median droplet diameter in the upstream area

شکل 10 تغییرات نسبت شار تشعشعی بعد از فعال‌سازی آبپاش‌ها به شار تشعشعی قبل از فعال‌سازی آن‌ها با اندازه قطر قطره میانگین در ناحیه بالادست

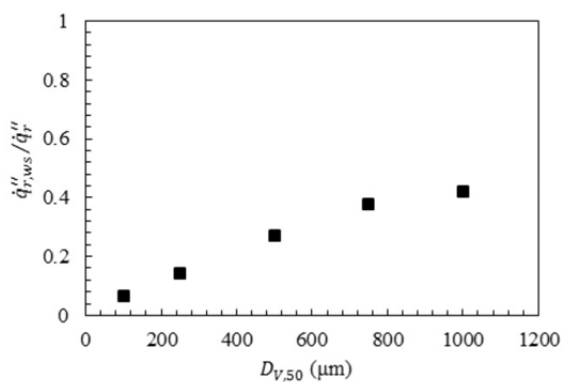


Fig. 11 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the median droplet diameter in the downstream area

شکل 11 تغییرات نسبت شار تشعشعی پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به شار تشعشعی پیش از فعال‌سازی آن‌ها با اندازه قطر قطره میانگین در ناحیه پایین‌دست

می‌گردد. تضعیف تشعشعی نیز به نرخ جریان آب بستگی دارد و در مورد ناحیه پایین‌دست با افزایش نرخ جریان آب تضعیف تشعشع توسط سیستم اطفاء افزایش می‌یابد. با فعال‌سازی سیستم اطفاء با نرخ جریان 320 لیتر بر دقیقه شار تشعشعی رسیده به فاصله 8 متر پایین‌دست آتش 40% کاهش می‌یابد، در حالی که با نرخ جریان 1280 لیتر بر دقیقه این کاهش بیش از 75% است.

5-2- اثر اندازه قطره بر کارایی سیستم اطفاء

در این بخش با شبیه‌سازی آتش‌سوزی تحت جریان هوای طولی با نرخ ثابت و فعال‌سازی سیستم اطفاء با نرخ جریان آب ثابت، اما با اندازه قطر قطره میانگین متفاوت، تأثیر اندازه قطره بر کارایی سیستم اطفاء مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی‌ها نرخ جریان هوا 66 مترمکعب بر ثانیه، نرخ جریان آب کل 640 لیتر بر دقیقه و مقادیر قطر قطره میانگین 250، 100، 500، 750 و 1000 میکرومتر است. تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی برحسب اندازه قطر قطره میانگین در شکل 9 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود با فعال‌سازی سیستم اطفاء با قطر قطره میانگین کمتر اختلاف دما با محیط بیشتر کاهش می‌یابد، به طوری که با فعال‌سازی سیستم اطفاء با قطر قطره میانگین 100 میکرومتر، اختلاف دما با محیط حدود 70% نسبت به حالتی که سیستم اطفاء فعال نشده کاهش می‌یابد، در حالی که با فعال‌سازی سیستم اطفاء با قطر قطره میانگین 1000 میکرومتر این کاهش تنها 34% است. در حقیقت با کاهش اندازه قطرات مساحت سطح کل قطرات برای تبادل حرارت با فاز گاز افزایش می‌یابد، بدین ترتیب سبب افزایش ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء می‌شود. شکل‌های 10 و 11 تغییرات نسبت شارهای تشعشعی پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به پیش از فعال‌سازی آن‌ها با اندازه قطر قطره میانگین به ترتیب برای ناحیه بالادست و پایین‌دست آتش نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های 10 و 11 مشاهده می‌شود با کاهش اندازه قطرات، تضعیف تشعشعی در پایین‌دست آتش افزایش می‌یابد، اما در مورد بالادست آتش روند تغییرات چنین نیست. با کاهش اندازه قطرات زمان توقف آن‌ها در فاز گازی افزایش می‌یابد و با افزایش زمان توقف شار تشعشعی بیشتری توسط قطرات آب جذب می‌شود. در مورد ناحیه پایین‌دست با کاهش اندازه قطره از 1000 تا 100 میکرومتر تضعیف تشعشعی از 58% تا 93% افزایش می‌یابد، در حالی که در ناحیه بالادست با کاهش اندازه قطره از 1000 تا 250 میکرومتر تضعیف تشعشعی به صورت ناچیز افزایش یافته است، اما با کاهش اندازه به 100 میکرومتر دوباره کاهش می‌یابد. این روند تغییر تضعیف تشعشعی در ناحیه بالادست ناشی از وجود جریان تهویه است، در واقع با کاهش اندازه قطره امکان جابه‌جایی قطرات توسط جریان هوا و انتقال آن‌ها به ناحیه پایین‌دست آتش افزایش می‌یابد. با انتقال قطرات آب به پایین‌دست آتش و کاهش غلظت قطرات معلق در فاز گاز در فضای بین آتش و نقطه موردنظر در ناحیه بالادست، افزایش تضعیف تشعشعی به واسطه کاهش اندازه قطرات رخ نمی‌دهد.

شکل 12 توزیع غلظت قطرات آب مایع را روی مقطع میانی تونل برای دو اندازه قطر قطره میانگین 100 و 1000 میکرومتر، 200 ثانیه پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود با کاهش اندازه قطرات، زمان توقف و در نتیجه غلظت آب موجود در فاز گاز افزایش می‌یابد. در حقیقت با کاهش اندازه قطرات مساحت سطح

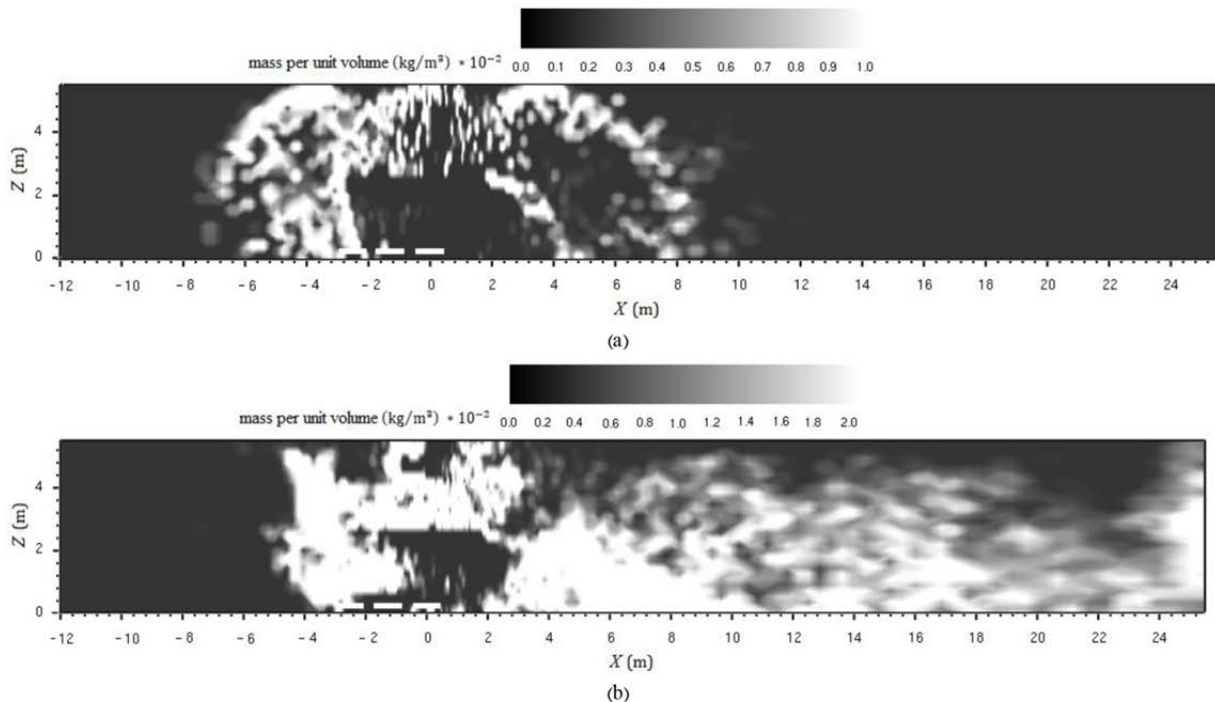


Fig. 12 Contour of liquid water concentration 200 second after activating the sprinklers. A-1000 μm , b- 100 μm

شکل 12 کانتور غلظت آب مایع 200 ثانیه پس از فعال‌سازی آبیاش‌ها. الف- 1000 میکرومتر، ب- 100 میکرومتر

ناحیه بالادست کاهش می‌یابد و چون قطرات با قطر کمتر بیشتر تحت تأثیر جریان تهویه قرار گرفته و ناحیه بالادست را ترک می‌کنند، با افزایش نرخ جریان هوا تضعیف تشعشعی در ناحیه بالادست در حالت قطر قطره میانگین 750 میکرومتر بیشتر خواهد بود، اما در مورد ناحیه پایین دست همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود تغییر نرخ جریان هوا برای هر دو اندازه قطر قطره میانگین تأثیر ناچیزی را روی تضعیف تشعشعی نشان می‌دهد. با افزایش جریان هوای طولی، قطرات آب به سمت پایین دست حرکت کرده و غلظت قطرات آب در ناحیه پایین دست افزایش می‌یابد، اما همین افزایش نرخ جریان تهویه سبب می‌شود که شار گرمایی بالادست آتش کاهش، در حالی که شار گرمایی پایین دست افزایش یابد.

4-5 اثر فاصله نسبی بین آبیاش‌ها و آتش بر کارایی سیستم اطفاء

جهت بررسی اثر فاصله نسبی، محل قرارگیری آبیاش‌ها نسبت به منبع آتش به دو صورت در نظر گرفته شد. محل قرارگیری آبیاش‌ها در شکل 16 نشان داده شده است. در موقعیت A با فعال‌سازی سیستم اطفاء، آبیاش‌های قرار گرفته روی لوله‌های 1، 2 و 3 و در موقعیت B آبیاش‌های قرار گرفته روی لوله‌های 2، 3 و 4 فعال می‌گردد. در این شبیه‌سازی‌ها نرخ جریان آب کل 640 لیتر بر دقیقه، قطر قطره میانگین 750 میکرومتر و مقادیر نرخ جریان هوا 33، 66، 99 و 132 مترمکعب بر ثانیه است، همچنین آبیاش‌ها در دو موقعیت A و B فعال می‌گردند. تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبیاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی برحسب نرخ جریان هوا برای دو موقعیت A و B در شکل 17 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 17 مشاهده می‌شود، با فعال‌سازی آبیاش‌ها در موقعیت B، ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء تا حدی نسبت به حالتی که آبیاش‌ها در موقعیت A فعال می‌شوند افزایش می‌یابد، زیرا با فعال‌سازی آبیاش‌ها در ناحیه بالادست، ناحیه‌ای که پلوم داغ در آن قرار دارد به طور

3-5 اثر جریان تهویه بر کارایی سیستم اطفاء

در این بخش به منظور بررسی اثر جریان تهویه بر کارایی سیستم اطفاء، سیستم تهویه با نرخ جریان هوای متفاوت فعال می‌گردد. در این شبیه‌سازی‌ها نرخ جریان آب کل 640 لیتر بر دقیقه و مقادیر نرخ جریان هوا 33، 66، 99 و 132 مترمکعب بر ثانیه و قطر قطره میانگین دو مقدار 100 و 750 میکرومتر است. تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبیاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی برحسب نرخ جریان هوا برای دو قطر قطره میانگین 100 و 750 میکرومتر در شکل 13 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 13 دیده می‌شود، با افزایش نرخ جریان هوا ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء افزایش می‌یابد. در واقع افزایش نرخ جریان هوا از سقوط سریع قطرات جلوگیری کرده و زمان توقف قطرات را در فاز گاز افزایش می‌دهد و بدین ترتیب فرصت بیشتری برای تبادل حرارت بین قطرات مایع و فاز گاز فراهم می‌گردد که منجر به کاهش بیشتر دمای گاز داغ می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود تأثیر جریان تهویه بر افزایش ظرفیت خنک‌سازی در مورد قطرات با قطر میانگین 100 میکرومتر بیشتر است، زیرا قطرات با قطر کمتر بیشتر تحت تأثیر جریان تهویه قرار می‌گیرند.

همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ جریان هوا در تونل تضعیف شار تشعشعی توسط قطرات آب برای ناحیه بالادست آتش کاهش می‌یابد. در واقع به دلیل افزایش نرخ جریان هوا انتقال قطرات به پایین دست آتش افزایش می‌یابد، بدین ترتیب غلظت قطرات آب در فضای بین منبع آتش و ناحیه بالادست کاهش یافته و شار تشعشعی کمتری توسط جریان دوفازی در ناحیه بالادست جذب می‌شود. در نرخ جریان هوای کم که انتقال قطرات آب به پایین دست آتش کمتر صورت می‌گیرد، تضعیف شار تشعشعی در مورد قطر میانگین 100 میکرومتر بیشتر است که به دلیل افزایش زمان توقف قطرات با قطر کمتر در فاز گاز است، اما با افزایش نرخ جریان هوا و انتقال قطرات مایع به پایین دست، غلظت قطرات مایع موجود در

داغ شوند، به زمین سقوط می‌کنند. شکل‌های 18 و 19 تغییرات نسبت شارهای تشعشی پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به پیش از فعال‌سازی را با نرخ جریان هوا به ترتیب در ناحیه بالادست و پایین‌دست آتش برای دو موقعیت A و B نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 18 و شکل 19 مشاهده می‌شود، زمانی که آبپاش‌ها در موقعیت A فعال می‌گردند، تضعیف تشعشع برای ناحیه بالادست بیشتر از حالتی است که آبپاش‌ها در موقعیت B فعال می‌گردند. در واقع با فعال‌سازی آبپاش‌ها در موقعیت A غلظت قطرات آب موجود در فضای بین منبع آتش و ناحیه بالادست بیشتر است. این افزایش توانایی سیستم اطفاء در تضعیف تشعشع زمانی که نرخ جریان هوا 132 مترمکعب بر ثانیه است بیشتر دیده می‌شود. همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، با افزایش نرخ جریان تهویه قطرات آب به ناحیه پایین‌دست حمل می‌شوند و غلظت قطرات مایع در فضای بین منبع آتش و ناحیه بالادست کاهش می‌یابد، اما با فعال‌سازی آبپاش‌های نصب‌شده در ناحیه بالادست آتش (موقعیت A) غلظت قطرات آب در این فضا افزایش می‌یابد. به طوری که با نرخ جریان هوای 132 مترمکعب بر ثانیه با فعال‌سازی آبپاش‌ها در موقعیت A شار تشعشی رسیده به فاصله 8 متر بالادست آتش 38% کاهش می‌یابد، در حالی که با فعال‌سازی آبپاش‌ها در محل B این کاهش تنها 4% است. در مورد ناحیه پایین‌دست آتش در حالتی که آبپاش‌ها در موقعیت A فعال شدند، توانایی سیستم اطفاء در تضعیف شار تشعشی رسیده به ناحیه پایین‌دست کاهش یافته است. در واقع با انتقال سیستم اطفاء به بالادست آتش غلظت قطرات آب در فضای بین منبع آتش و ناحیه پایین‌دست کم شده است.

5-5- اثر فعال‌سازی سیستم اطفاء بر کارایی سیستم تهویه
همان‌طور که پیشتر بیان شد سیستم تهویه با برقراری جریان هوای طولی

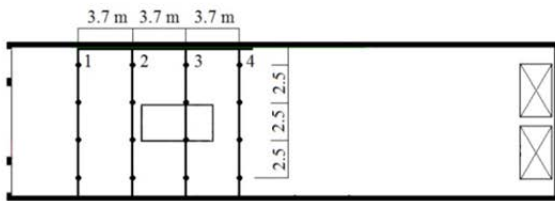


Fig. 16 The location of the sprinklers in the tunnel
شکل 16 محل قرارگیری آبپاش‌ها در تونل

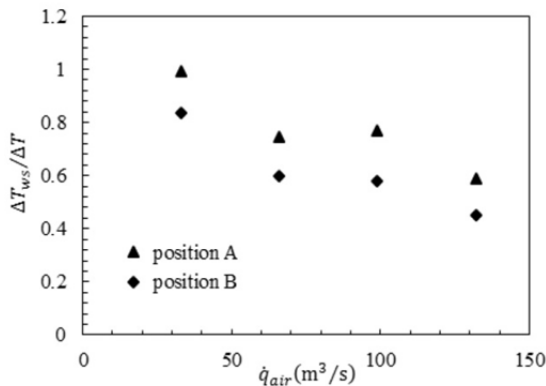


Fig. 17 The profile of the ratio of temperature difference after activating sprinklers to the temperature difference before activating them with the air flow rate for A and B locations

شکل 17 تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی آن‌ها با نرخ جریان هوا برای دو موقعیت A و B

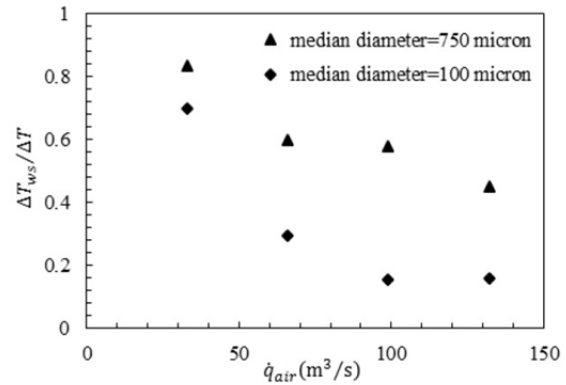


Fig. 13 The profile of the ratio of temperature difference after activating sprinklers to the temperature difference before activating them with the air flow rate

شکل 13 تغییرات نسبت اختلاف دما پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به اختلاف دما پیش از فعال‌سازی آن‌ها با نرخ جریان هوا

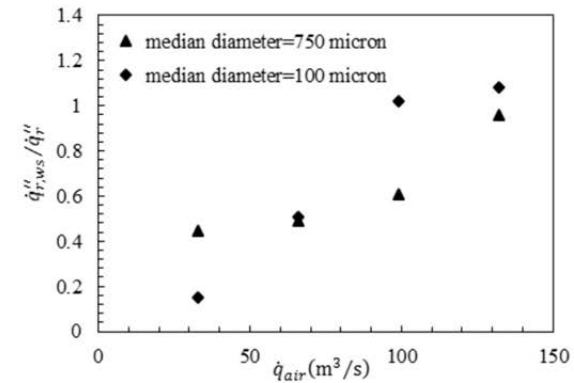


Fig. 14 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the air flow rate in the upstream area

شکل 14 تغییرات نسبت شار تشعشی بعد از فعال‌سازی آبپاش‌ها به شار تشعشی قبل از فعال‌سازی با نرخ جریان هوا در ناحیه بالادست

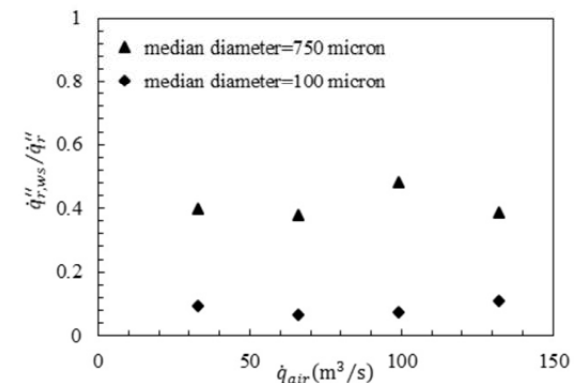


Fig. 15 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the air flow rate in the downstream area

شکل 15 تغییرات نسبت شار تشعشی پس از فعال‌سازی آبپاش‌ها به شار تشعشی پیش از فعال‌سازی با نرخ جریان هوا در ناحیه پایین‌دست

کامل تحت پاشش آب قرار نمی‌گیرد و قطرات در نواحی با دمای کمتر پاشیده می‌شوند، بدین ترتیب مقداری از ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء به هدر می‌رود و بخشی از قطرات تولیدشده بدون این‌که باعث کاهش دمای گاز

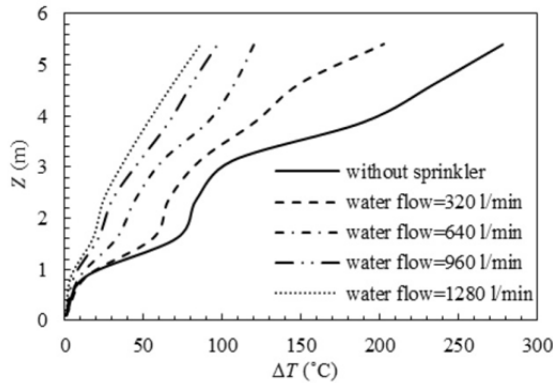


Fig. 20 The temperature difference with the ambient along the height of the tunnel at 6 m away from the fire in the upstream area for the heat release rate of 10 MW before/after activating the sprinklers for different water flow rate

شکل 20 اختلاف دما با محیط در امتداد ارتفاع تونل در فاصله 6 متری از محل آتش‌سوزی در ناحیه بالادست برای نرخ حرارت آزاد شده 10 مگاوات پیش و پس از فعال‌سازی آبیاش‌ها برای نرخ جریان آب مختلف

گسترش دود نیروی شناوری پلوم داغ است. با فعال‌سازی سیستم اطفاء، دمای پلوم کاهش می‌یابد، می‌توان انتظار داشت که نیروی محرک برای گسترش دود کاهش یابد؛ بنابراین سیستم تهویه طولی می‌تواند با سرعت کمتری از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند.

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به شبیه‌سازی آتش‌سوزی همراه با سیستم تهویه و فعال‌سازی سیستم اطفاء در تونل پرداخته شد. نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شد. اثر پارامترهای نرخ جریان آب، قطر قطره میانگین، نرخ جریان هوا، موقعیت نسبی آبیاش‌ها مورد مطالعه قرار گرفت، همچنین تأثیر سیستم اطفاء بر کارایی سیستم تهویه بررسی شد. از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- فعال‌سازی سیستم اطفاء هنگام بروز آتش‌سوزی در تونل می‌تواند به طور مؤثری دمای گاز داغ و شار تشعشعی رسیده از آتش به نواحی بالادست و پایین‌دست را کاهش دهد. به طوری که با فعال‌سازی سیستم اطفاء با نرخ جریان آب 1280 لیتر بر دقیقه اختلاف دمای گاز نزدیک سقف با محیط بیش از 50% کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش نرخ جریان آب اثر خنک‌سازی و تضعیف تشعشع سیستم اطفاء افزایش می‌یابد. با فعال‌سازی سیستم اطفاء با نرخ جریان 320 لیتر بر دقیقه شار تشعشعی رسیده به فاصله 8 متر پایین‌دست آتش 40% کاهش می‌یابد، در حالی که با نرخ جریان 1280 لیتر بر دقیقه این کاهش بیش از 75% است.

- با فعال‌سازی سیستم اطفاء با قطر قطره میانگین 100 میکرومتر، اختلاف دما با محیط حدود 70% کاهش می‌یابد، در حالی که با قطر قطره میانگین 1000 میکرومتر این کاهش تنها 34% است. در مورد ناحیه پایین‌دست، با کاهش اندازه قطره از 1000 تا 100 میکرومتر تضعیف تشعشعی از 58% تا 93% افزایش می‌یابد؛ بنابراین وقتی آبیاش‌ها قطرات با اندازه کوچک‌تری تولید می‌کنند، توانایی سیستم اطفاء در خنک‌سازی دود و تضعیف تشعشع در مورد ناحیه پایین‌دست افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سطح تبادل حرارت بین قطرات مایع و فاز گاز و همچنین افزایش زمان توقف و غلظت

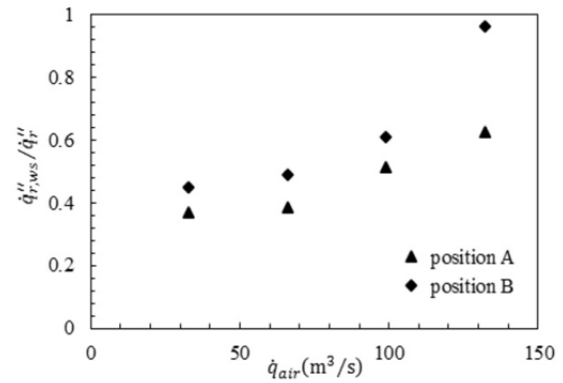


Fig. 18 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the air flow rate in the upstream area for A and B locations

شکل 18 تغییرات نسبت شار تشعشعی بعد از فعال‌سازی آبیاش‌ها به شار تشعشعی قبل از فعال‌سازی با نرخ جریان هوا در ناحیه بالادست برای دو موقعیت A و B

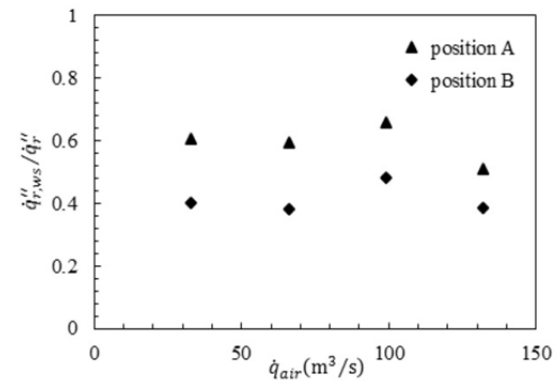


Fig. 19 The profile of the ratio of radiative flux after activating the sprinklers to the radiative flux before activating them with the air flow rate in the upstream area for A and B locations

شکل 19 تغییرات نسبت شار تشعشعی پس از فعال‌سازی آبیاش‌ها به شار تشعشعی پیش از فعال‌سازی با نرخ جریان هوا در ناحیه پایین‌دست برای دو موقعیت A و B

مانع از توزیع دود و محصولات حاصل از احتراق در جهت بالادست آتش می‌شود. به عبارت دیگر تهویه طولی با کاهش دما و جلوگیری از تشکیل لایه برگشتی دود در بالادست جریان، فضایی ایمن برای افراد گیرافتاده در ناحیه بالادست آتش فراهم می‌کند. سرعت تهویه بحرانی به حداقل سرعتی اطلاق می‌شود که به ازای آن پدیده برگشت دود به وجود نیاید [18]. چون سیستم‌های تهویه و اطفاء به عنوان سیستم‌های ایمنی هنگام بروز آتش‌سوزی در تونل مورد استفاده قرار می‌گیرند، لازم است اثر فعال‌سازی سیستم اطفاء بر کارایی سیستم تهویه مورد بررسی قرار گیرد.

تغییرات اختلاف دما با ارتفاع تونل برای آتش با نرخ حرارت آزاد شده 10 مگاوات و جریان هوای طولی با نرخ 66 مترمکعب بر ثانیه، در فاصله 6 متر بالادست آتش و در خط مرکزی تونل، پیش از فعال‌سازی آبیاش‌ها و پس از فعال‌سازی با مقادیر نرخ جریان آب 320، 640، 960 و 1280 لیتر بر دقیقه در شکل 20 نشان داده می‌شود.

همان‌طور که در شکل 20 مشاهده می‌شود با فعال‌سازی سیستم اطفاء توزیع دما در بالادست آتش کاهش پیدا می‌کند و با افزایش نرخ جریان آب میزان این کاهش دما بیشتر می‌شود. سیستم اطفاء با خنک‌سازی دود، سیستم تهویه را قادر می‌سازد تا با سرعت کمتر از سرعت تهویه بحرانی از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند. در واقع نیروی محرک برای

| | |
|---|-------------|
| وزن مولکولی گونه α -ام (kgmol^{-1}) | W_α |
| کسر جرمی گونه α -ام | Y_α |
| علائم یونانی | |
| لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) | μ |
| چگالی (kgm^{-3}) | ρ |
| تانسور تنش لزجی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) | τ_{ij} |
| زیرنویس‌ها | |
| ذره/قطره | P |

8- مراجع

[1] T. Lemaire, Y. Kenyon, Large scale fire tests in the second Benelux tunnel, *Fire Technology*, Vol. 42, No. 4, pp. 329-350, 2006.

[2] H. Ingason, Model scale tunnel tests with water spray, *Fire Safety Journal*, Vol. 43, No. 7, pp. 512-528, 2008.

[3] L. Chen, W. Zhu, X. Cai, L. Pan, G. Liao, Experimental study of water mist fire suppression in tunnels under longitudinal ventilation, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 3, pp. 446-455, 2009.

[4] F. Nmira, J. L. Consalvi, A. Kaiss, A. Fernandez-Pello, B. Porterie, A numerical study of water mist mitigation of tunnel fires, *Fire Safety Journal*, Vol. 44, No. 2, pp. 198-211, 2009.

[5] J. Trelles, J. R. Mawhinney, CFD investigation of large scale pallet stack fires in tunnels protected by water mist systems, *Fire Protection Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 149-198, 2010.

[6] J. R. Mawhinney, J. Trelles, Testing water mist systems against large fires in tunnels: integrating test data with CFD simulations, *Fire technology*, Vol. 48, No. 3, pp. 565-594, 2012.

[7] Y. Z. Li, H. Ingason, Model scale tunnel fire tests with automatic sprinkler, *Fire Safety Journal*, Vol. 61, No. 1, pp. 298-313, 2013.

[8] Y. J. Ko, G. V. Hadjisophocleous, Study of smoke backlayering during suppression in tunnels, *Fire Safety Journal*, Vol. 58, No. 1, pp. 240-247, 2013.

[9] H. Ingason, Y. Z. Li, G. Appel, U. Lundström, C. Becker, Large scale tunnel fire tests with large droplet water-based fixed fire fighting system, *Fire Technology*, Vol. 52, No. 5, pp. 1539-1558, 2016.

[10] M. Cheong, W. Cheong, K. Leong, A. Lemaire, L. Noordijk, Heat release rate of heavy goods vehicle fire in tunnels with fixed water based fire-fighting system, *Fire Technology*, Vol. 50, No. 2, pp. 249-266, 2014.

[11] E. Blanchard, P. Boulet, P. Fromy, S. Desanghere, P. Carlotti, J. Vantelon, J. Garo, Experimental and numerical study of the interaction between water mist and fire in an intermediate test tunnel, *Fire Technology*, Vol. 50, No. 3, pp. 565-587, 2014.

[12] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, *Fire dynamics simulator: technical reference guide*: NIST special publication 1018, 2014.

[13] K. McGrattan, R. McDermott, C. Weinschenk, K. Overholt, *Fire Dynamics Simulator-User's Guide*: NIST special publication 1019, 2014.

[14] T. Poinsot, D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, pp. 41-44, Philadelphia: RT Edwards, Inc., 2005.

[15] T.-S. Chan, Measurements of water density and drop size distributions of selected ESFR sprinklers, *Fire Protection Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 79-87, 1994.

[16] D. T. Sheppard, D. T. Sheppard, *Spray characteristics of fire Sprinklers*, pp. 117-119: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2002.

[17] G. Heidarinejad, 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.

[18] M. Mapar, G. Heidarinejad, H. Pashdarshahri, Numerical investigation of two simultaneous fires in a tunnel and evaluation of the obstructive influence of vehicles using FDS, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 15, pp. 10-22, 2014. (in Persian farsi)

قطرات مایع در جریان دوفازی است.

- افزایش نرخ جریان تهویه بر زمان اقامت قطرات در جریان دوفازی تأثیر می‌گذارد و ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء را افزایش می‌دهد. تأثیر جریان تهویه بر افزایش ظرفیت خنک‌سازی در مورد قطرات با قطر میانگین 100 میکرومتر بیشتر است، زیرا قطرات با قطر کمتر بیشتر تحت تأثیر جریان تهویه قرار می‌گیرند، همچنین با انتقال قطرات به ناحیه پایین‌دست توانایی این سیستم در تضعیف شار تشعشعی در ناحیه بالادست کاهش می‌یابد.

- پاشش آب در نواحی با دمای کمتر باعث کاهش اثر خنک‌سازی گاز توسط سیستم اطفاء می‌گردد، همچنین توانایی سیستم اطفاء در تضعیف شار تشعشعی نواحی بالادست و پایین‌دست به موقعیت نسبی آبپاش‌های فعال شده بستگی دارد. با فعال‌سازی آبپاش‌ها در ناحیه بالادست توانایی سیستم اطفاء در تضعیف شار تشعشعی رسیده به ناحیه بالادست افزایش می‌یابد.

- سیستم تهویه با فعال‌سازی سیستم اطفاء و کاهش دمای پلوم داغ توسط قطرات آب قادر خواهد بود با سرعتی کمتر از سرعت تهویه بحرانی از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند.

7- فهرست علائم

| | |
|---------------|---|
| A_p | مساحت سطح ذره/قطره (m^2) |
| C_d | ضریب درگ |
| C_s | ثابت اسمانگورینسکی |
| c_p | گرمای ویژه فشار ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| D | قطر ذره/قطره (m) |
| D_α | ضریب نفوذ گونه α -ام (m^2s^{-1}) |
| $D_{V,0.5}$ | قطر قطره میانگین حجمی (μm) |
| f_b | بردار نیروی خارجی ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$) |
| h_m | ضریب انتقال جرم (ms^{-1}) |
| h_s | آنتالپی محسوس (Jkg^{-1}) |
| \dot{m}''' | نرخ تولید گونه‌ها ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$) |
| \dot{m}''_b | نرخ تولید گونه‌ها بر اثر تبخیر ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$) |
| P | فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) |
| Pr | عدد پرانتل |
| \dot{q}''' | نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم (kWm^{-3}) |
| \dot{q}'' | بردار شار حرارتی (kWm^{-2}) |
| R | ثابت عمومی گازها ($\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$) |
| Sc | عدد اشمیت |
| T | دما (K) |