

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(11) (2021) 799-802 DOI: 10.22060/mej.2019.16048.6261

Numerical Study on the Effect of Blower Location on the Maximum Temperature and Spread of Smoke In Case Of Fire inside Tunnels

S. O. Haghani, E. Barati*

Department of Mechanical Engineering, Khayyam University, Mashhad, Iran

ABSTRACT: Designing an efficient emergency ventilation system is one of the main approaches to prevent the perilous fire in tunnel phenomenon. One of the most considerable factors in smoke control is critical velocity. In the present work, a parameter is called a critical volume flux, which indicates at least a volumetric flow that prevents smoke from flowing upstream of the fire. In this study, fire in tunnel is simulated using fire dynamics simulator code and the effect of blower location on maximum temperature, spread of smoke and critical volume flux of fire in the tunnel have been investigated. The results show that the blower location has a significant effect on critical velocity and volumetric flux and it can reduce critical volumetric flux by at least 11 percent. Also, considering different conditions in the blower system, the effect of fire source height has been investigated. The results also show that increasing the fire source's height does not have a significant effect on volumetric flux and critical velocity. The results show that the approach of the blower to the fire would reduce the smoke backlayering length and increase the maximum temperature.

Review History:

Received: 2019/03/26 Revised: 2019/07/08 Accepted: 2019/09/02 Available Online: 2019/09/12

Keywords: Blower location Fire Critical volume flux Maximum temperature

1-Introduction

With the prompt development of road tunnels around the world, the chance of tunnel fires has been boosted, which leads to excessive hazards to human life and the destruction of assets. Tunnels are one of the engineered structures in the roads which have many benefits such as reduction of travel time, and fuel consumption abatement, etc. for transport system users. Each minuscule accident in the tunnel closed medium, which may lead to no hazard in the other locations of the road, has capability to be a serious catastrophe. Accordingly, the transport system designers must proceed to secure the appropriate safety and control and opposite accidents in such engineered structures.

Research has been conducted in recent years to reduce the risk of fire in tunnels. Wu and Bakar [1] studied the flow of smoke in a tunnel fire using longitudinal ventilation. Chow et al. [2] studied the effects of tunnel slope. Mounesan et al. [3] studied the effects of fire source shape. In this study, the effect of blower location on maximum temperature, spread of smoke and critical volume flux of fire in the tunnel have been investigated.

2- Methodology

The numerical modeling is performed in a tunnel model with dimensions of $0.25 \times 0.25 \times 12$ m. There is a fire occurring in a tunnel, a burner is used as the fire source. The squared gas burner with dimensions of 0.1 m is employed as a fire source

*Corresponding author's email: Barati@Khayyam.ac.ir

20 °C. Fig. 1 shows the geometrical representation of tunnel. outlet air fuel longitudinal velocity sensor

to supply continuous heat release rates. The burner is placed

on the center of the tunnel; ambient temperature is considered



Fig. 1. The geometrical representation of the tunnel

2-1-Numerical model

The computing power maturity and the extension of Computational Fluid Dynamics (CFD) have directed to the CFD applied to fire modeling. The numerical model is constructed by Fire Dynamic Simulator. The Fire Dynamics Simulator (FDS) has been developed at NIST to explore fire behavior and to analyze the efficiency of fire protection systems. Simulation of fire-driven flow can be conducted in FDS by employing the Large Eddy Simulation (LES) turbulence model. FDS has been extensively utilized in



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://mej.aut.ac.ir/article_3571.html.

research of smoke behavior and its validity has been broadly verified. Governing equations are solved numerically in FDS. The physical equations include Navier-Stokes equations for flow analysis, energy conservation equations for temperature distribution and other scalar equations for smoke and particulates transport.

To have a better calculation accuracy, mesh refining is performed. The FDS user guide proposes a non-dimensional

expression of $D^* = (\frac{\dot{Q}}{\rho_x T_x c_p \sqrt{g}})^{0.4}$ for assessing a mesh resolution with D*. The recommended value of $\frac{D^*}{\delta x}$ [4] is in the range of 4-16. Fire grid numbers are studied to confirm that the results are grid independent. Along with the numerical simulations described in the next section, other simulations are conducted with the precise target of verifying the model validity, by examining the agreement between experimental results and model predictions. Fig. 2 shows the distribution of temperature in various computational mesh and Fig. 3 illustrates the variation of critical velocity with Heat Release Rate (HRR) and a remarkable agreement is observed and the simulation is compared with Wu and Bakar [1] and Li et al. [5].



Fig. 2. Distribution of temperature in the various computationa



Fig. 3. Variation of critical velocity with HRR

3- Results and Discussion

Table 1 shows critical volume flux at different rates of heat release with four different blower systems.

Table 1. Critical volume flux at different rates of heat release

C	ritical volu	me flux (m^3/s))	
Upper half	linear	parabolic	uniform	HRR (kW)
0.020	0.021	0.046	0.023	0.7
0.025	0.026	0.054	0.028	2
0.028	0.030	0.066	0.033	5
0.034	0.035	0.076	0.038	9
0.035	0.036	0.079	0.039	16
0.036	0.037	0.08	0.040	22.5

The results show that the blower location has a significant effect on critical velocity and volumetric flux and it can reduce critical volumetric flux by at least 11 percent.

Table 2 shows the Critical velocity values at different height of the fire source.

Table	2.	Critical	velocity	values	at	different	height	of	the	fire
				sour	ce					

Increasing velocity	HRR critical volume	(5 kW) critical velocity	Height of fire
(m)	flux $(m3/s)$	(m/s)	source (III)
0	0.03	0.53	0
7.5%	0.035	0.57	0.1
11%	0.037	0.59	0.15

The results also show that increasing the fire source's height does not have a significant effect on volumetric flux and critical velocity.

Fig. 4 shows Maximum temperature in different conditions. As the blower system gets closer to the fire site, the maximum temperature increases.



Fig. 4. Maximum temperature in different conditions

4- Conclusion

In this study, the effect of blower location on the critical speed and maximum temperature in fire tunnels was investigated. The results showed that the blower location has a significant effect on critical velocity and volumetric flux and it can reduce critical volumetric flux by at least 11 percent. In the study of the longitudinal distance of the blower system from the fire source, in the case of back-layering smoke, the results showed that the approach of the blower to the fire would reduce the smoke back-layering length and increase the maximum temperature.

5- References

- Y. Wu, M.A. Bakar, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems–a study of the critical velocity, Fire Safety Journal, 35(4) (2000) 363-390.
- [2] W. Chow, K. Wong, W. Chung, Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling, Tunnelling

and Underground Space Technology, 25(2) (2010) 122-128.

- [3] M. Mounesan, M.R. Talaee, H. molatefi, Investigation of effective parameters on critical ventilation velocity in underground tunnels, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 48(1) (2016) 41-54 (In Persian).
- [4] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, R. McDermott, Fire dynamics simulator technical reference guide, National Institute of standards and technology, (2010).
- [5] Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason, Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, Fire safety journal, 45(6-8) (2010) 361-370.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۳۲۴۱ تا ۳۲۵۶ DOI: 10.22060/mej.2019.16048.6261

بررسی عددی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر بیشینه دما و گسترش جریان دود در آتشسوزی داخل تونلها

سيد اميد حقاني، ابراهيم براتي*

دانشکده مهندسی، دانشگاه خیام، مشهد، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۰۶–۰۱–۱۳۹۸ بازنگری: ۱۷–۰۴–۱۳۹۸ پذیرش: ۱۱–۰۶–۱۳۹۸ ارائه آنلاین: ۲۱–۰۶–۱۳۹۸

> کلمات کلیدی: مکان دمنده آتشسوزی دبی حجمی بحرانی حداکثر دما

خلاصه: طراحی یک سیستم تهویه اضطراری کارآمد یکی از راهکارهای اصلی مقابله با پدیده خطرناک آتش سوزی در تونل است. یکی از مهمترین پارامترها در مبحث کنترل دود، سرعت بحرانی تهویه می باشد. در کار حاضر پارامتری به نام دبی حجمی بحرانی معرفی می شود که بیانگر حداقل دبی حجمی می باشد که از برگشت دود به بالادست آتش جلوگیری می کند. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار اف دی اس آتش سوزی داخل تونل شبیه سازی شده و بررسی تأثیر مکان قرار گیری دمنده بر بیشینه دما، گسترش جریان دود و دبی حجمی بحرانی در آتش سوزی داخل تونل ها مورد بررسی بحرانی دارد. دبی حجمی بحرانی با قرار گرفتن سیستم دمنده تأثیر چشم گیری روی سرعت بحرانی و دبی حجمی مقطع تونل جریان یکنواخت ایجاد می کند، در نرخهای مختلف رهایش حرارت، حداقل ۱۱ درصد کمتر است. همچنین به منظور بررسی دقیق تر، با ایجاد می کند، در نرخهای مختلف رهایش حرارت، حداقل ۱۱ درصد کمتر است. همچنین بعرانی شده است. نتایج نشان می دهد که مان قرار گیری دمنده دا نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به شرایطی که در کل مقطع تونل جریان یکنواخت ایجاد می کند، در نرخهای مختلف رهایش حرارت، حداقل ۱۱ درصد کمتر است. همچنین به منظور بررسی دقیق تر، با ایجاد شرایط متنوع در سیستم دمنده، اثر ار تفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی و سرعت بحرانی نخواهد داشت. در بررسی فاصله طولی سیستم دمنده از مناع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی و سرعت بردانی نخواهد داشت. در بررسی فاصله طولی سیستم دمنده از منع آتش نیز در شرایطی که برگشت جریان دود وجود برد، نتایج نشان می دهد نواصله طولی سیستم دمنده به منبع آتش منیز در شرایطی که برگشت جریان دود وجود برد، نتایج نشان می دهد نواصله طولی سیستم دمنده به منبع آتش منیز در شرایطی که برگشت جریان دود وجود

۱ – مقدمه

تونلها یکی از بناهای فنی راهها هستند که استفاده از آنها مزایای فراوانی از جمله کاهش زمان سفر و کاهش مصرف سوخت را برای کاربران سیستم حمل و نقل به دنبال خواهد داشت. هر سانحه کوچک در محیط بسته تونل، که شاید هیچ خطری در سایر نقاط جاده به وجود نیاورد، پتانسیل تبدیل به فاجعهای انسانی را دارد. لذا تأمین ایمنی مناسب و مطلوب تونلها و راهکارهای مقابله و کنترل حوادث در این بناها، باید در دستور کار طراحان سیستم حمل و نقل قرار گیرد. این سیستم باید قادر باشد در شرایط عادی، کیفیت هوای داخل تونل را کنترل کند و در شرایط اضطراری توانایی کنترل و استخراج دود را داشته باشد. در واقع سیستم تهویه در شرایط اضطراری باید قادر به کنترل جهت حرکت دود برای تأمین یک مسیر پاک و ایمن برای نجات مسافران و برای انجام عملیات اطفای حریق

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: e.barati@Khayyam.ac.ir

باشد. در یک تونل، راه کاربردی برای رسیدن به این هدف این است که سیستم تهویه اضطراری تونل، جریان هوای طولی مناسبی را روی آتش برقرار سازد طوری که دود و گازهای گرم در راستای دلخواه حرکت کنند.

تهویه هوا برای تونل ها می تواند با استفاده از شرایط طبیعی، ناشی از اثر پیستونی و یا با استفاده از سیستمهای مکانیکی صورت پذیرد. در سیستم تهویه طبیعی از حرکت طبیعی هوا در داخل تونل استفاده می شود. این فرآیند در نتیجه اختلاف فشار در دو دهانه تونل انجام می گیرد که این اختلاف فشار، ناشی از اختلاف فشار و دما در این نقاط و یا در اثر باد است. پس این سیستم تهویه، به شرایط جوی محل بستگی دارد. متأسفانه هیچ یک از این عوامل برای مدت طولانی ثابت نیستند و یک تغییر ناگهانی در جهت وزش باد می تواند تمامی این اثرات را خنثی کند. در سیستم تهویه ناشی از اثر پیستونی هر وسیلهای که در داخل تونل حرکت می کند، اثری مشابه یک پیستون

Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیر کبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

در داخل یک لوله بلند را دارد. در جلو وسیله نقلیه فشار زیاد و در پشت آن فشار کم اثر میکند و در نتیجه نیرویی ایجاد میشود که هوای داخل تونل را به حرکت در میآورد. سیستمهای تهویه مکانیکی نیز به دو دسته سیستم تهویه طولی و سیستم تهویه عرضی تقسیم میشوند. این سیستمها عموماً در تونلهای طویل و تونلهایی که بار ترافیکی سنگین دارند مورد استفاده قرار میگیرند. در سیستم تهویه طولی هوا در طول تونل جریان مییابد و طی آن هوا از یک طرف دمیده و از طرف دیگر خارج میشود. شدّت جریان هوای لازم به میزان آلودگی موجود بستگی دارد و از این جهت با افزایش طول تونل شدّت جریان هوا افزایش مییابد. اما در سیستم تهویه عرضی هوای تازه از کف تونل به وسیله یک مجرای سرتاسری وارد تونل شده و از نزدیک سقف خارج میشود.

یک تحلیل آماری از سال ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۹ نشان میدهد کل آتشسوزی در تونلها بین ۶۰ تا ۹۰ مورد در هر سال بوده است که این تعداد حدود ۲٫۱ درصد کل آتشسوزی وسایل نقلیه، ۲٫۳ تا ۴۵٫۲ درصد آتشسوزی وسایل نقلیه موتوردار و حدود ۲٫۷ تا ۱۰ درصد آتشسوزی در نتیجه تصادفات بوده است. هرچند تعداد آتشسوزی در تونلها در مقایسه با تعداد کل آتشسوزیها کم میباشد، امّا خطرات و صدمات زیاد ناشی از آنها اهمیّت طراحی سیستم تهویه اضطراری را نشان میدهد [۱].

در سالهای اخیر فعالیتهای زیادی به منظور کاهش خطرات ناشی از آتش سوزی در تونلها انجام شده است. وو و باکار [۲] در سال ۲۰۰۰ به بررسی جریان دود در آتش سوزی تونل با استفاده از تهویه طولی پرداختند. آنها در این مطالعه به صورت تجربی و عددی به مطالعه ۵ تونل با ارتفاع یکسان و با سطح مقطع متفاوت پرداختند. نتایچ تجربی نشان داد که مقدار سرعت بحرانی با هندسه تونل تغییر می کند. هو و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۶ توزیع دود در یک تونل جادهای را بصورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها از مقادیر میانگین نرخ حرارت آزاد شده که از دادههای تجربی به دست آمده بود به عنوان ورودی به کد اف دی اس^۱ استفاده کردند. میان نتایچ تجربی و عددی اختلافی در حدود ۴ درصد مشاهده شد که

هو و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۸ به مطالعه برگشت دود در

1 Fire Dynamics Simulator (FDS)

آتش سوزی تونل پرداختند. آنها مشاهده نمودند که، طول لایه برگشتی و سرعت بحرانی، با افزایش نرخ گرمای آزاد شده از سطح سوخت افزایش و با افزایش ارتفاع تونل، کاهش پیدا می کند. روح و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۸ در یک کار تجربی، با مدل هندسی ۲۰ به ۱ اثر سرعت تهویه را بر نرخ سوختن، آزادسازی انرژی و پدیده برگشت دود در تونل بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت تهویه در تونل نرخ سوختن سوخت افزایش می باد که علت آن را افزایش در میزان دسترسی به اکسیژن بیان نمودند.

چو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰ در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی پدیده آتش سوزی در تونلی با مقیاس ۵۰ به ۱ پرداختند. آنها در این تحقیق تونل را با سه شیب ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه بررسی کردند. آنها بیان داشتند که شکل ستون آتش با تغییر زاویه تونل منحرف میکند. ستون آتش با تغییر زاویه تونل، به سمت کف تونل منحرف میشود. با افزایش شیب تونل ستون آتش به علت نیروی شناوری، میشود. با افزایش شیب تونل ستون آتش به علت نیروی شناوری، بیشتر به کف تونل نزدیک میشود. نیکنام و همکاران [۷] در سال بیشتر به محاب محاسبه سرعت بحرانی، در تونل البرز در آزادراه تهران – شمال، حین آتش سوزی با انرژی حرارتی آزادشده برابر ۱۰۰ مگاوات به مدت ۹۶۰ ثانیه به کمک یک مدل عددی سه بعدی با نرمافزار پرداختند. آنها بیان کردند با توجه به نتایج طراحی عددی و سرعت بحرانی ۲۵ متر در ثانیه پیشنهاد میشود. این سرعت امکان مروابط تجربی، برای آتش سوزی درون تونل البرز با اندازه ۱۰۰ مگاوات، سرعت بحرانی ۵/۲ متر در ثانیه پیشنهاد میشود. این سرعت امکان خروج کاربران و انجام عملیات نجات را در کم ترین زمان ممکن فراهم می سازد.

بزرگعصاره و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از نرمافزار اف دی اس به مطالعه عددی پدیده گسترش آتش سوزی از یک منبع آتش به جسم مجاور در تونل پرداختند. آن ها بیان کردند که با افزایش سرعت تهویه، زمان انتقال آتش ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد که این پدیده به دلیل کارکرد همزمان اثرات خنککنندگی و انحراف پلوم دود است. مونسان و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از کد اف دی اس به بررسی سرعت بحرانی تهویه و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن پرداختند. مشاهده شد که با افزایش عرض منبع آتش درحالی که طول آن ثابت است سرعت بحرانی تهویه کاهش می یابد. همچنین زمانی که عرض منبع آتش ثابت است، سرعت بحرانی تهویه با افزایش طول منبع آتش در ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.

ژو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ به روش آزمایشگاهی، تأثیر مکان قرارگیری دمنده نسبت به منبع آتش را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که فاصله بین دمنده و منبع آتش باید در بازه مشخصی باشد تا حداکثر بازده را از نظر کاهش دمای تونل داشته باشد. تانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷ در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی پدیده آتش سوزی در تونلی مجهز به سیستم اسپری آب با مقیاس ۱۴ به ۱ پرداختند. آنها بیان داشتند پس از اسپری آب از نازلها، سرعت بعرانی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. حداکثر کاهش در میزان سرعت بحرانی حدود ۳۱ درصد می باشد که به عواملی از جمله تعداد و محل قرارگیری نازلها وابسته می باشد.

حیدری نژاد و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از کد متنباز شبیهساز دینامیک آتش به بررسی آتش سوزی داخل تونل همراه با عملکرد سیستم تهویه و اطفاء پرداختند. نتایج نشان میدهد که افزایش نرخ جریان آب سبب افزایش ظرفیت خنکسازی سیستم اطفاء میشود، همچنین با افزایش نرخ جریان آب از ۳۲۰ به ۱۲۸۰ لیتر بر دقیقه تضعیف شار تشعشعی رسیده به پاییندست آتش از ۴۰ (به بیش از ۲۵% افزایش مییابد.

بررسی تحقیقات ذکر شده نشان میدهد که تلاشهای زیادی در زمینه سرعت بحرانی و پارامترهای مؤثر بر آن انجام شده است. در اکثر تحقیقات انجام شده، سیستم دمنده در دهانه ورودی تونل قرار گرفته و کل سطح مقطع تونل را شامل شده است، درحالی که در حالت عملي، معمولاً دمنده در زير سقف قرار مي گيرد. بنابراين جريان هوای ورودی عموماً به صورت یکنواخت کل مقطع تونل را شامل نمیشود. تاکنون بررسی عددی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی بیشینه دما، سرعت بحرانی و پدیده برگشت دود به سمت بالادست منبع آتش بررسی نشده است. همچنین در این پژوهش برای اولین بار دبی حجمی بحرانی ارائه شده است که میتواند جایگزین مناسبی براي سرعت بحراني باشد زيرا سرعت بحراني تنها براي جريان ورودي یکنواخت کاربرد دارد. به همین منظور در کار حاضر با استفاده از نرم افزار منبع باز اف دی اس، تأثیر مکان قرارگیری دمنده روی سرعت بحرانی و حداکثر دما درآتشسوزی درون تونل مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی دقیقتر، با ایجاد شرایط متنوع در سیستم دمنده، اثر ارتفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی تحقيق شده است. همچنين با انتخاب بهترين شرايط قرارگيري

سیستم دمنده در سطح مقطع تونل، بررسی فاصله طولی سیستم دمنده از منبع آتش نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-مدلسازی میدان جریان و معادلات حاکم

در این تحقیق مدلسازی میدان جریان با استفاده از نرم افزار منبع باز اف دی اس انجام شده است. نرمافزار اف دی اس یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی است که اولین بار توسط موسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا در سال ۲۰۰۰ جهت مطالعه رفتار جریانهای ناشی از آتش سوزی به ویژه چگونگی توزیع دما و دود ارائه شده است. از این نرمافزار می توان در طراحی دقیق سیستم اطفاء حریق (از قبیل محل مناسب قرارگیری تجهیزات مانند اسپرینکلر) و طراحی مسیر فرار استفاده کرد. این کد که به صورت نرمافزار منبع آزاد در دسترس می باشد، فرم ویژه ای از معادلات ناویر – استوکس را برای جریانهایی با ماخ پایین بصورت عددی حل می نماید. مشتقات جرئی موجود در معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی با استفاده از روش تفاضل محدود با دقت مکانی و زمانی مرتبه دوم گسسته شده و در زمان به صورت مریح حل می گردند. اما پدیده تشعشع به کمک روش حجم کنترل گونهها، مومنتوم و انرژی به صورت روابط (۱) تا (۴) می باشد [۱۳]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{Y}_{\alpha}) + \nabla .(\rho \mathbf{Y}_{\alpha} \mathbf{u}) =$$

$$\nabla .(\rho D_{\alpha} \nabla \mathbf{Y}_{\alpha}) + \dot{m}_{\alpha}^{m}$$
(Y)

 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla .(\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) + \nabla P =$ $\rho g + f_b + \nabla .\tau_{ij}$ (\mathcal{T})

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{h}_s) + \nabla .(\rho \mathbf{h}_s \mathbf{u}) =$$

$$\frac{DP}{Dt} + \dot{q}'' - \nabla .\dot{q}'' + \varepsilon$$
(*)

۳-مشخصات هندسه مورد مطالعه

در کار حاضر هندسه مورد مطالعه توسط لی و همکاران [۱۴] و یکی از آزمایشهای وو و باکار [۲] مبنای مطالعه قرار گرفته است. لی و همکاران در مطالعه تجربی خود مطابق با شکل ۱ از تونلی با ابعاد



شکل ۲: محل قرار گرفتن حسگرها در آزمایش لی و همکاران [۱۴] (ابعاد: میلیمتر)

Fig. 2. Location of sensors in the work of Lee et al. [14] (Dimensions: mm)



شکل ۳ : مشخصات هندسه مورد مطالعه Fig. 3. The geometrical representation of tunnel

سرعت به سمت بالادست میباشد. در حالت بحرانی، این سنسور باید سرعت تقریباً صفر را نشان دهد. لذا با تغییر مقدار سرعت تهویه، باید شرایطی ایجاد شود که این سنسور مقدار حدود صفر را نشان دهد. برای مدل کردن آتش سوزی، سطح سوخت پروپان در کف تونل در نظر گرفته شده است. سوخت پروپان در مقطعی مربعی شکل و با مساحتی معادل مشعل مورد استفاده در کار لی و همکاران در حال سوختن است. در واقع برای اعمال شرط مرزی سوخت، شدت گرمای آزاد شده از سطح سوخت تعریف میشود. در حالت بدون تهویه از شرایط محیطی و در حالت با تهویه، از سرعت ورودی به عنوان شرط مرزی در ورودی تونل استفاده شده است. در خروجی تونل از شرط مرزی محیط باز استفاده شده است. دمای محیط و هوای تهویه، ۲۰ ۱۲ ×۲۵، ۲۵، ۲۵، متر استفاده کردند. دیوارها از جنس فولاد ضد زنگ به ضخامت ۱ میلیمتر ساخته شد. پروپان توسط مشعلی با مقطعی دایرهای شکل به قطر ۱۰۰ میلیمتر در وسط تونل سوزانده شد، بطوری که سطح بالایی مشعل روی کف تونل قرار گرفته بود. جریان گاز به وسیله یک روتامتر با دقت ۱٪ اندازه گیری شده بود. آنها هوای یکنواخت شده را از دهانه سمت چپ وارد تونل کردند. میزان جریان هوای عبوری در داخل تونل توسط یک جریان سنج با دقت ۱% و محدوده کاری ۳۰ تا ۵۴۰ متر مکعب بر ساعت محاسبه شده بود. لی و همکاران در این آزمایش سرعت تهویه بحرانی را به ازای نرخهای حسگرها مطابق شکل ۲ در راستای طول تونل قرار داده شد. سرعت تهویهای که به ازای آن حسگرهای دما طول لایه برگشتی را صفر نشان میدادند، به عنوان سرعت تهویه بحرانی در نظر گرفته شد.

۴-شرایط مرزی

تونل مقیاس کوچک نشان داده شده در شکل ۳ با استفاده از کد اف دی اس شبیه سازی شد. در شبیه سازی هند سه مذکور تمامی شرایط مورد استفاده در آزمایش تجربی لی و همکاران اعمال شده است. برای تشخیص وقوع سرعت بحرانی، علاوه بر استفاده از سنسورهای دمایی یک سنسور سرعت در بالای منبع آتش قرار داده شده است تا مؤلفه محوری سرعت را اندازه گیری نماید. در صورت بر گشت جریان، جهت



شکل ۵: سرعت بحرانی حاصل از شبیهسازی و مقایسه با نتایج تجربی Fig. 5. The critical velocity of simulation and comparison with experimental results

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \tag{(6)}$$

در تحقیق حاضر، استقلال نتایج از شبکه نیز مورد بررسی قرار \mathcal{R} رفته تا شبکه مناسب انتخاب شود. استقلال از شبکه برای نحوه توزیع دما در طول تونل و نزدیک به سقف تونل انجام شده است. نحوه اندازه گیری این توزیع دما در نزدیک سقف تونل مطابق شکل ۲ میباشد. این بررسی در نرخ رهایش حرارت ۲ کیلووات و در شرایط میباشد. این بررسی در نرخ رهایش حرارت ۲ کیلووات و در شرایط عدم استفاده از جریان هوای ورودی صورت گرفته است، زیرا طبق رابطه (۵) هرچه آتش کوچکتر باشد، به شبکه ریزتری نیازمند است. با بررسی استقلال از شبکه در آتش ۲ کیلووات با توجه به رابطه (۵) با بررسی استقلال از شبکه در آتش ۲ کیلووات با توجه به رابطه (۶) و با به کاربردن کمترین تعداد سلولهای مورد قبول در رابطه (۶) مقدار x_{δ} برابر ۲ را متر و تعداد سلولهای محاسباتی در جهت طول،

عرض و ارتفاع تونل ۶۰۰، ۱۲ و ۱۲ در نظر گرفته شدهاند. در این شرایط مطابق شکل ۴ نمودار تغییرات دمایی در نزدیک سقف تونل رسم شده است. همچنین همانطور که در شکل ۴ مشخص شده است به منظور دستیابی به جوابهای مستقل از اندازه شبکه محاسباتی، نمودار دمایی در دو شبکه محاسباتی دیگر نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهده می شود که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از ۱۷۲۸۰۰ به ۳۴۵۶۰۰ تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات دما حاصل نمی شود. بنابراین شبکه محاسباتی با تعداد ۱۷۲۸۰۰ سلول به عنوان شبکه



شکل ۴: توزیع دما در شبکههای مختلف محاسباتی Fig. 4. Distribution of temperature in various computational mesh

درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. شرط مرزی دیوارههای تونل، دیوار فرض شده است.

۵-شبکه محاسباتی

برای شبیه سازی مناسب آتش سوزی که جریان آشفته آن با استفاده از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ شبیه سازی می شود، نیاز به تخمینی از ابعاد سلول های شبکه محاسباتی است تا پدیده های غالب نیز مدل سازی شوند. به همین منظور و به جهت دستیابی به نتایج مستقل از شبکه محاسباتی، لازم است در ابتدا شناخت کافی نسبت به محدوده مقیاس طولی حل حاصل شود. این طول مشخصه تعیین کننده اندازه ی ادی های بزرگ در پلوم دود و هم چنین ارتفاع شعله می باشد. مقیاس طولی مناسب برای حل مسأله شامل پلوم آتش و جریان شناوری حاصل از آن که تابعی از توان حرارتی آتش است، توسط رابطه (۵) تعریف می شود:

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

این طول مشخصه در واقع برآوردی از ناحیه مؤثر در اطراف حریق است که از تغییرات آن، اثر میپذیرد. با توجه به بررسیهای انجام شده [۱۵] ، اگر طول مشخصه با ۴ تا ۱۶ سلول محاسباتی پوشش یابد تخمین اولیه خوبی برای اندازه شبکه درنظر گرفته شده است. بنابراین داریم:



در کار حاضر، علاوه بر قرار گرفتن سیستم دمنده در کل سطح مقطع و نیمه بالایی سطح مقطع تونل، از دو شرایط پروفیل سرعت خطی و سهموی نیز در سیستم دمنده استفاده شده است. لازم به ذکر است مکان قرارگیری دمنده و همچنین فاصله دمنده و منبع آتش شکل عملی پروفیل سرعت هوا را مشخص میکند. با توجه به اینکه حالتهای مختلفی میتواند در سیستم دمنده روی دهد دو حالت جریان ورودی یکنواخت و نیمه بالایی سطح مقطع تونل و دو حالت جریان ورودی خطی و سهموی بررسی خواهد شد، زیرا اگرچه حالت جریان ورودی خطی و سهموی بررسی خواهد شد، زیرا اگرچه مالت جریان در نیمه بالایی میتواند یکی از دو حالت فرضی را شامل شود. همچنین با ایجاد همین شرایط متنوع در سیستم دمنده، اثر ارتفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی تحقیق شده است.

> ۱–۷- تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی سرعت بحرانی و حداکثر دما

اولین پارامتر مورد بررسی، تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی سرعت بحرانی و حداکثر دما میباشد. به همین منظور در دو مرحله سیستم دمنده جریان هوا به صورت یکنواخت در کل سطح مقطع تونل و بار دیگر در نیمه بالایی سطح مقطع تونل قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی دقیق ر علاوه بر دو شرایط کاری فوق، از دو شرایط پروفیل سرعت خطی و سهموی نیز در سیستم دمنده استفاده شده است. برای مشاهده تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی حداکثر دما و سرعت بحرانی نمودار دما در ۷ نقطه نزدیک سقف تونل و ۷ نقطه وسط تونل در جهت طولی رسم میشود. به منظور داشتن دقت بیشتر در محاسبات و مشاهده دقیق تر اتفاقات رخ داده در داخل تونل نمودار دمایی در فاصلههای ۴ ، ۶ و ۸ متری از ابتدا تونل در ۵ نقطه از تونل (از کف تا سقف تونل) نیز اندازه گیری و رسم شده است. جدول ۱: نتایج به دست آمده از شبیهسازی عددی (پروفیل یکنواخت)

 Table 1. Results obtained from numerical simulation (uniform profile)

$Q_c (m^3/s)$	$V_C (m/s)$	HRR (kW)
•,• ٣٣	• /٣٧	• , Y
۰,·۲۸	•,49	٢
•,• ٣٣	۰,۵۳	۵
• ، • ۳۸	۶۲,	٩
•,•٣٩	۶۳,	18
•,• *•	۰٫۶۵	۲۲٬۵

بهینه برای شبیهسازی حریق در داخل تونل مذکور در نظر گرفته شده است.

۶–اعتبارسنجی حل

برای بررسی صحت شبیه سازی، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی وو و باکار [۲] و لی و همکاران [۱۴] مورد استفاده قرار گرفته است. برای تونل تشریح شده نرخ رهایش حرارت ۲٫، ۲، ۵، ۹، ۱۶و ۲۲٫۵ کیلووات اعمال شده، سرعت بحرانی محاسبه و با نتایج تجربی لی و همکاران و وو و باکار مقایسه شده است. نتایج به دست آمده در شکل ۵ ارائه شده است.

همانگونه که مشاهده میشود، تطابق مناسب بین نتایج شبیه سازی با داده های تجربی وجود دارد. بنابراین می توان بیان کرد که نتایج حاصل از این شبیه سازی به کمک نرم افزار اف دی اس با در نظر گرفتن مقداری خطا قابل استناد و با دقت نسبتاً خوبی قادر به پیش بینی فرآیندهای حاصل از آتش سوزی در داخل تونل می باشد. در جدول ۱ سرعت بحرانی و میزان دبی حجمی جریان ورودی به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت دود در نرخهای رهایش حرارت مختلف بیان شده است. در این جدول HRR ، v_c و v_c به تر تیب نرخ رهایش حرارت، سرعت و دبی حجمی بحرانی اعمال شده را نشان می دهند.

۷-نتايج

با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته و انطباق مناسب نتایج شبیهسازی عددی با نتایج تجربی، در این بخش تأثیر مکان قرارگیری دمنده روی سرعت بحرانی، دبی حجمی بحرانی و حداکثر دما درآتشسوزی درون تونل بررسی میشود. به منظور بررسی دقیقتر

	ىرعت ورودى (m/s)	حداکثر م		نرخ حرارت
پروفیل یکنواخت نیمه بالایی	پروفیل خطی	پروفیل سهموی	پروفيل يكنواخت	(kW)
٠٫٧۴	٠٫٧۴	۰ _/ ۸ ۰	•,٣٧	• , Y
•,9٢	۰,۹۲	۰٫۹۵	•,48	٢
۱٬۰۶	۹۶	١,١	۰٫۵۳	۵
١,٢۴	١,٢۴	١٫٣	• ,87	٩
١,٢۶	۱٫۲۶	١,۴	• ,8٣	18
١٫٣	١,٣	١,۴۵	۶۵ _۱ ۰	۲۲٬۵

جدول ۲ : حداکثر سرعت دمنده در پروفیلهای جریان ورودی Table 2. Maximum blower velocity in the input flow profile



HRR = 5 kW شكل ۸ : تغييرات دما در وسط تونل Fig. 8. Temperature variations in middle of the tunnel HRR = 5 kW

بخش با ثابت نگه داشتن دبی جریان ورودی به تونل که با قرار گیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل محاسبه شده است از شرایط پروفیل سرعت سهموی در سیستم دمنده به عنوان جریان هوای ورودی به تونل استفاده میشود. شکل ۶–ط سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در داخل تونل را نشان میدهد. شرایط دیگری نیز که مورد بررسی قرار گرفته است، سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی میباشد. در این بخش نیز با ثابت نگه داشتن دبی جریان ورودی به تونل، از سیستم دمنده با شرایط پروفیل سرعت خطی به عنوان جریان هوای ورودی استفاده میشود. در این سیستم معادله سرعت جریان ورودی به صورت u(y) = u(y) میباشد. شکل ۶–۵ سیستم



HRR = 5 kWشکل ۲ : تغییرات دما نزدیک سقف تونل Fig.7. Temperature variations near the tunnel ceiling HRR = 5 kW

جهت بررسی و رسم نمودار دمایی در کلیه شرایط کاری سیستم دمنده، از نرخ رهایش حرارت ۵ کیلووات استفاده شده است. همچنین فاصله منبع آتش از دهانه ورودی تونل ۶ متر میباشد.

شکل ۶ نحوه قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل، قرارگیری در نیمه بالایی سطح مقطع و سیستم دمنده با پروفیلهای سرعت خطی و سهموی را نشان میدهد. استفاده از سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل و به صورت یکنواخت مبنای کار اعتبارسنجی نیز بوده است. شکل ۶–۵ قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل را نشان میدهد. دومین شرایط کاری که مورد بررسی قرار می گیرد، استفاده از پروفیل سرعت سهموی در سیستم دمنده میباشد. در این

دمنده با سرعت خطی را در داخل تونل نشان میدهد. چهارمین و آخرین شرایط کاری، قرارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع تونل میباشد. شکل ۶-d پروفیل سرعت خطی در نیمه بالایی سطح مقطع تونل را نشان میدهد.

در جدول ۲ حداکثر سرعت در هرکدام از این شرایط کاری با حفظ دبی جریان ورودی در هر یک از نرخهای رهایش حرارت نشان داده شده است. این حداکثر سرعت مطابق شکل ۶ با قرارگیری سیستم دمنده در کل سطح مقطع به صورت یکپارچه در کل مقطع تونل، در سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در مرکز تونل، در سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی در نزدیک سقف تونل و با قرارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به صورت یکپارچه و یکنواخت در نیمه بالایی سطح مقطع تونل می.

شکلهای ۷ و ۸ تغییرات دما در طول تونل را در نزدیک سقف و وسط تونل نمایش میدهند. با توجه به این که منبع آتش در فاصله ۶ متری از دهانه ورودی تونل است، با بررسی نمودارهای مربوط به سیستم دمنده با پروفیل سهموی در شکلهای ۷ و ۸ مشخص می شود که فرآیند برگشت جریان دود اتفاق افتاده است و هر دو سمت منبع آتش را دود فرا گرفته و مسیر ایمنی را برای خروج مسافران ایجاد نمی کند. به همین منظور استفاده از سیستم دمنده با پروفیل سهموی نمی تواند مکانیزم مطلوبی برای جلوگیری از برگشت جریان دود باشد. البته با صرف هزينه بيشتر و ايجاد دبي ورودي بيشتر در قسمت ابتدایی تونل میتوان از فرآیند برگشت دود جلوگیری کرد. لازم به ذکر است که سرعت جریان ورودی نباید به حدی برسد که به عنوان مانعی برای عبور مسافران به سمت خارج تونل شود. علت برگشت جریان دود در این شرایط به این دلیل است که بیشترین سرعت در قسمت میانی تونل قرار دارد، در حالی که محل اجتماع دود و حداکثر دما در نزدیک سقف تونل میباشد. اما همانطور که در شکلهای ۷ و ۸ مشخص است در هر سه شرایط قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل، نیمه بالایی سطح مقطع و سیستم دمنده با سرعت خطی برگشت جریان دود اتفاق نمی افتد. به ترتیب نمودارهای دمایی در شرایطی که سیستم دمنده در کل مقطع تونل، با سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع قرار دارد دمای بیشتری را در قسمت وسط و بالاي تونل نشان مي دهند. علت بوجود آمدن نمودارهاي دمايي به اين شکل به این دلیل است که در مکانیزم سیستم دمنده با سرعت خطی

و قرارگیری در نیمه بالایی سطح مقطع بیشترین سرعت و دبی جریان ورودی متمرکز در قسمت بالا و نزدیک به سقف تونل است و در این نوع شرایط کاری نه تنها برگشت جریان دود اتفاق نیفتاده بلکه باعث کاهش دما در قسمتهای میانی و بالای تونل نیز شده است. اما در زمان استفاده از سیستم دمنده با پروفیل یکنواخت در کل مقطع تونل با توجه به این که حجم زیادی از جریان ورودی (حدود نصف جریان ورودی) در قسمت پایینی تونل قرار می گیرد با وجود این که برگشت جریان دود اتفاق نمیافتد ولی بعد از منبع آتش محل اجتماع دود و گرما شده و دمای بیشتری را نسبت به دو پروفیل دیگر خواهد داشت.

با توجه به این که در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیل خطی و یا استفاده از آن در نیمه بالایی سطح مقطع تونل بیشترین سرعت و دبی جریان ورودی متمرکز در قسمت بالایی تونل میباشد در نتیجه این نوع از پروفیلها کمک خواهند کرد دود و گرمای ناشی از آتش سوزی که در نزدیک سقف تونل تجمع کرده است به سمت بیرون تونل هدایت شوند و کاهش دما در قسمت میانی و نزدیک سقف تونل بعد از منبع آتش ایجاد خواهد شد. البته این رفتار در به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع که هیچ گونه دبی جریانی در قسمت پایینی وجود ندارد و کلیه جریان متمرکز در قسمت بالایی میباشد چشمگیرتر خواهد بود.

شکل ۹ تغییرات دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۴ متری از ابتدای تونل را نمایش میدهد. مشاهده می شود که هیچ گونه



شکل ۹ : توزیع دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۴ متری از ابتدای تونل

Fig. 9. Distribution of temperature from the floor to the tunnel ceiling at a distance of 4 meters from the begin-.ning of the tunnel



شکل ۱۱ : توزیع دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۸ متری از ابتدای تونل

Fig. 11. Distribution of temperature from the floor to the tunnel ceiling at a distance of 8 meters from the begin-.ning of the tunnel

تجمع دود و گرما در بالای منبع آتش و احتمالاً فرآیند برگشت جریان دود خواهد بود.

در شکل ۱۱ که نمودار تغییرات دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۸ متری از ابتدا تونل نمایش داده شده است، در مکانیزمهای قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل، با پروفیل سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع شرایط نسبتاً مشابهی ایجاد شده است. البته در شرایط استفاده از سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به دلیل دبی جریان عبوری بیشتر در نزدیک سقف تونل دماهای کمتری ثبت شده است. کاهش دمای ثبت شده در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع در نقاط نزدیک به سقف تونل نیز میتواند به همین دلیل باشد.

۲-۲- بررسی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی دبی حجمی بحرانی

با به دست آوردن دبی حجمی بحرانی محاسبه شده از شرایط به کارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل و با اعمال این دبی حجمی در سایر شرایط به کارگیری سیستم دمنده نتایج متفاوتی ایجاد خواهد شد. به طوری که در زمان استفاده از سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی برگشت جریان دود اتفاق خواهد افتاد. این موضوع نشان می دهد که در این سیستم به دبی حجمی بیشتری به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز است. با اعمال کردن



شکل ۱۰ : توزیع دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۶ متری از ابتدای تونل

Fig .10. Distribution of temperature from the floor to the tunnel ceiling at a distance of 6 meters from the begin-...ning of the tunnel

فرآیند برگشت دود در این ناحیه وجود ندارد و چنانچه در هر یک از شرایط کاری فرآیند برگشت جریان دود اتفاق افتاده باشد، طول این لایه برگشتی کمتر از دو متر قبل از منبع آتش میباشد. در شکل ۱۰ که نمودار دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۶ متری از ابتدای تونل نمایش داده شده است، بیشترین دما در نقطه نزدیک به کف تونل نمایش داده شده است، بیشترین دما در نقطه نزدیک به کف مونل ثبت شده است، که علت آن نزدیک بودن محل اندازه گیری دما به منبع آتش میباشد. البته در این نقطه بیشترین دمای ثبت شده مربوط به شرایط استفاده از سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع و کمترین دمای اندازه گیری شده نیز مربوط به استفاده از سیستم شده کمترین دبی جریان عبوری در نزدیک منبع آتش مربوط به شده کمترین دبی جریان عبوری در نزدیک منبع آتش مربوط به قرار گیری دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع و بیشترین دبی جریان عبوری در نزدیک منبع آتش مربوط به استفاده از سیستم کل مقطع تونل میباشد.

در شکل ۱۰ با افزایش ارتفاع و نزدیک شدن به سقف تونل و دور شدن از شعلههای آتش، دما کاهش پیدا می کند که این کاهش دما در شرایط به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع تونل به دلیل تمرکز سرعت و دبی ورودی جریان در نقاط نزدیک به سقف چشمگیرتر خواهد بود. البته نکته مهمتر در شکل ۱۰ افزایش دما در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در فاصله ۱۰/۵ تا ۰/۲۵ متری میباشد، که این موضوع نشان دهنده

	می بحرانی (m ³ /s)	دبی حج		نرخ حرارت
پروفيل يكنواخت نيمه بالايي	پروفیل خطی	پروفیل سهموی	پروفيل يكنواخت	(kW)
•,•٢•	۰ _/ ۰۲۱	•,• *۶	۰,۰۲۳	• , Y
۰,۰۲۵	• /• ٢ ۶	۰٬۰۵۴	۰,۰۲۸	٢
۰,۰۲۸	•,• ٣•	• ₁ • <i>۶</i> ۶	• ٫ • ۳۳	۵
•,•٣۴	۰٬۰۳۵	۰,۰۷۶	۰,۰۳۸	٩
۰,۰۳۵	۰,۰۳۶	۰,۰ ۲ ٩	٠,٠٣٩	18
۰,۰۳۶	۰,۰۳۷	• / • A	•,• *•	۲۲/۵

جدول ۳ : دبی حجمی بحرانی در نرخهای رهایش حرارت گوناگون Table 3. Critical volume flux at different rates of heat release



بیشتری در نزدیک سقف داشته باشد، نیاز به دبی ورودی کمتری در قسمت ورودی تونل می باشد که این موضوع در به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به سایر شرایط کاری بیشتر خودنمایی می کند. البته با توجه به این که فاصله دهانه ورودی تونل تا محل قرار گیری منبع آتش ۶ متر میباشد، چنانچه از سیستم دمنده با یروفیل سرعت خطی یا سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نیز استفاده شود، جریان اعمال شده توسط هر کدام از این مکانیزمها تا نزدیک شدن به منبع آتش کل سطح مقطع تونل را به صورت نسبتاً یکنواخت و یکیارچه فراگرافته و شرایطی همانند به کارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل ایجاد خواهند کرد. به همین دلیل مقادیر

٣-٧- اثر ارتفاع منبع آتش

نزدیک میباشد.

یکی از پارامترهای مؤثر بر روی سرعت بحرانی، دبی حجمی بحرانی و حداکثر دما در زمان آتش سوزی داخل تونل های مجهز به سیستم تهویه طولی، ارتفاع منبع آتش می باشد. در کار حاضر سرعت بحرانی در دو حالتی که ارتفاع منبع آتش از سطح زمین ۰٫۱۵ و ۰٫۱۵ متر و نرخ رهایش حرارت ۵ کیلووات میباشد با قرارگیری سیستم



شکل ۱۲ : مقطع عرضی تونل در بررسی اثر ارتفاع ارتفاع منبع آتش Fig. 12. Cross section of the tunnel in the study of the .effect of height of the source fire source

همین میزان از دبی حجمی در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیلهای سرعت خطی و یا قرار گیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نه تنها فرآيند برگشت جريان دود اتفاق نمىافتد بلكه منجر به افت بیشتر دما در نواحی اطراف آتش خواهد شد که نشان از بازده بالاتر این سیستمها نسبت به استفاده از سیستم دمنده در کل مقطع تونل دارند. در واقع در این دو شرایط با کمتر شدن میزان دبی حجمی نیز می توان از برگشت جریان دود جلوگیری کرد. با توجه به اینکه معیار انتخاب نوع دمنده، دبی حجمی ایجاد شده توسط آن است به نظر می سد بهتر است به جای مقدار سرعت، از پارامتر دبی حجمی استفاده شود. در نتیجه با استفاده از مفهوم دبی حجمی بحرانی (حداقل دبی حجمی که از پدیده برگشت دود حاصل از آتش جلوگیری کند.) میزان دبی حجمی بحرانی را برای هریک از شرایط کاری سیستم دمنده محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق جدول ۳ از میان چهار شرایط کاری مورد بررسی، با قرار گیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به کمترین دبی حجمی جهت جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز دارد. از میان سایر

جدول ۴: مقادیر سرعت بحرانی در ارتفاعهای مختلف منبع آتش

Tab	ole 4. Critical velocity value	es at different height	of the fire source
	ل ۵ کیلووات	آتش	(ت.) بين جام بنا متآم بيوانته ا
فرضه افرايس شرعت	دبی حجمی بحرانی (m ^{3/} s)	سرعت بحرانی (m/s)	ارتفاع منبع انش از تشطع زمین (منز)
•	•,• ٣٣	• ،۵۳	•
	• /• ۳۵	• ۲۵۲	• , ١
117.	•,• * Y	۰ _ا ۵۹	۰,۱۵





پدیده را به طور همزمان موجب می شود؛ از یک طرف افزایش ارتفاع منبع آتش سبب نزدیکتر شدن سطح آتش گرفته به سقف تونل شده و بدین ترتیب دود حاصل از آتش سوزی سریعتر به سقف رسیده و پخش می شود؛ بنابراین به سرعت تهویه بیشتری نیاز است تا از برگشت جریان دود جلوگیری شود. اما از سوی دیگر هر چه ارتفاع منبع افزایش یابد، سطح مقطع اشغال شده بیشتر می شود و هوای دمیده شده در تونل برای عبور از جسم فضای کمتری دارد. بنابراین با ثابت بودن دبی و کمتر شدن سطح مقطع، سرعت تهویه کمتری لازم است. این دو پدیده اثر همدیگر را خنثی کرده و سرعت بحرانی افزایش چشمگیری نخواهد داشت.

با حفظ دبی جریان ورودی به تونل، مطابق شکل ۱۳ نمودار دما در وسط و نزدیک به سقف تونل در حالتی که منبع آتش در ارتفاع ۱٫۰ متر نسبت به سطح زمین قرار گرفته است و نرخ رهایش حرارت



شکل ۱۳ : نقاط اندازه گیری دما در داخل تونل با افزایش ارتفاع منبع آتش Fig. 13. The points where temperature is measured inside the tunnel with increasing the fire source's height.



HRR = 5 kWشکل ۱۴ : نمودار دما نزدیک سقف تونل



دمنده در کل سطح مقطع تونل مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱۲).

جدول ۴ تأثیر افزایش ارتفاع منبع آتش بر روی سرعت بحرانی را نشان میدهد و بیانگر آن است که افزایش ارتفاع منبع آتش بر روی سرعت بحرانی تهویه تأثیر دارد. زیرا با افزایش ارتفاع منبع آتش در دو حالت ۰٫۱۰ و ۱۵٫۰ متر، سرعت بحرانی تهویه به ترتیب به میزان ۸٫۷ و ۱۱ درصد افزایش یافته است. افزایش ارتفاع منبع آتش دو

جدول ۵ : دبی حجمی بحرانی در نرخ رهایش حرارت ۵ کیلووات و ارتفاع ۰٫۱ متر Table 5. Critical volume flux at th heat release rate of 5 kW and a height of 0.1 meter

	جمی بحرانی (m³/s)	دبی ح		نرخ حرارت
پروفیل یکنواخت نیمه بالایی	پروفیل خطی	پروفیل سهموی	پروفيل يكنواخت	(kW)
۰٫۰۳۱	•,• ٣٣	•,• ٧٢	۰,۰۳۵	۵

نیز ۵ کیلووات میباشد، در چهار شرایط متنوع که سیستم دمنده در کل مقطع تونل، در نیمه بالایی سطح مقطع، با پروفیل سرعت خطی و با پروفیل سرعت سهموی میباشد رسم شده است. این دبی حجمی جریان ورودی همان مقداری است که با اعمال شدن آن در شرایط قرارگیری سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل (سرعت ۵۲, متر بر ثانیه) برگشت جریان دود اتفاق نمیافتد.

همانطور که شکلهای ۱۴ و ۱۵ نشان میدهند بیشینه دما در قسمت میانی تونل و در فاصله ۶ متری از ابتدا تونل اتفاق افتاده است. علت این موضوع نزدیک بودن نقاط اندازه گیری دما به منبع آتش میباشد. سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در قسمت قبل و محل قرار گیری منبع آتش نسبت به سایر شرایط کاری دمای محلی بیشتری را نشان میدهد. علت این رخداد تجمع گرما و دود در قسمت بالایی منبع آتش و قبل از آن میباشد، زیرا این سیستم دمنده قادر به حرکت دادن گرما و دود جمع شده در سقف به سمت بیرون نمیباشد. اما بر خلاف این موضوع همان طور که نمودارها نیز نشان همین شرایط کاری میباشد. علت این موضوع حرکت مقدار زیادی از دود به سمت بالادست منبع آتش میباشد که باعث میشود از شدت گرما در پاییندست منبع آتش کاسته شود.

میزان دبی حجمی بحرانی برای هر چهار شرایط کاری در حالی که فاصله منبع آتش از سطح زمین ۱٫۰ متر میباشد در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول ۵ از میان چهار سیستم مورد بررسی، سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به کمترین دبی حجمی جهت جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز دارد. از میان سایر شرایط کاری نیز به ترتیب سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی، سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل با پروفیل سرعت یکنواخت و سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی به دبی ورودی کمتری به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز دارند. همانطور که در قسمتهای قبل نیز

	12 m	
E		
-		
444	dhi iri)	

شکل ۱۶ : محل قرارگیری سیستم دمنده Fig. 16. Blower system location

بیان شد با توجه به این که محل اجتماع گرما و دود در نزدیک سقف تونل میباشد، در شرایط متنوع قرارگیری سیستم دمنده هرچه دبی ورودی تمرکز بیشتری در نزدیک سقف داشته باشد، نیاز به دبی ورودی کمتری در قسمت ورودی تونل نیاز است که این موضوع در شرایط استفاده از سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به سایر شرایط کاری بیشتر خودنمایی میکند.

۴-۷- اثر تغییر مکان طولی دمنده

بر اساس بررسیهای انجام شده مشخص شد به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع بهترین عملکرد و بیشترین بازدهی را نسبت به سایر شرایط قرارگیری سیستم دمنده در سطح مقطع تونل خواهد داشت. اما همانطور که بیان شد قرارگیری این سیستم در دهانه ورودی تونل با توجه به این که فاصله دهانه ورودی تونل تا محل قرارگیری منبع آتش ۶ متر میباشد، جریانی را به صورت نسبتاً یکنواخت و یکپارچه در زمان رسیدن به آتش ایجاد خواهد کرد که مشابه با شرایط به کارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل میباشد. به همین منظور و به جهت بررسی دقیق تر نحوه عملکرد این سیستم مطابق شکل ۱۶ میزان برگشت جریان دود و حداکثر دما در سه شرایط کاری که سیستم دمنده در دهانه ورودی تونل و گره در سه شرایط کاری که سیستم دمنده در دهانه ورودی تونل و

همچنین جهت مشخص شدن میزان حداکثر دما در داخل تونل



Fig. 18. Maximum temperature in different conditions







میزان برگشت جریان دود کاهش یافته است. به طوری که کمترین میزان جریان برگشتی دود در شرایط به کارگیری سیستم دمنده در فاصله ۱ متری منبع آتش و بیشترین جریان برگشتی دود در شرایط استفاده از سیستم در دهانه تونل گزارش شده است. در نتیجه مطابق گزارشات فوق چنانچه در زمان آتش سوزی سیستم دمنده قادر به ایجاد دبی حجمی بحرانی نباشد و فرآیند برگشت جریان دود اتفاق افتد، هرچه فاصله این سیستم از محل حادثه کمتر باشد تأثیر مطلوب تری به منظور جلوگیری از گسترش جریان دود به سمت بالادست خواهد داشت.

و طول جریان برگشتی دود، دما در نزدیکی سقف و در سرتاسر تونل اندازه گیری شده است. در تمامی شرایط مورد بررسی از نرخ رهایش حرارت ۵ کیلووات استفاده شده است و میزان دبی حجمی اعمال شده در سیستم دمنده نیز ۲۰٫۰۱۴ متر مکعب بر ثانیه میباشد. این میزان از دبی حجمی نصف دبی حجمی بحرانی محاسبه در نرخ نرخ رهایش حرارت ۵ کیلووات و شرایط به کار گیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع میباشد.

بر اساس بررسیهای انجام شده و همانطور که در شکل ۱۷ مشخص شده است با نزدیکتر شدن سیستم دمنده به منبع آتش

اما همانطور که در شکل ۱۸ مشخص شده است با نزدیک تر شدن سیستم دمنده به محل حادثه میزان بیشینه دما افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۹ در شرایطی که سیستم دمنده در دهانه ورودی تونل قرار گرفته است میزان طول جریان برگشتی دود افزایش مییابد و حجم عمدهای از محصولات احتراق به سمت دود افزایش مییابد و حجم عمدهای از محصولات احتراق به سمت مست منبع آتش حرکت خواهد کرد. اما در شرایطی که سیستم دمنده به منبع آتش نزدیک میشود از گسترش جریان دود به سمت بالادست منبع آتش جلوگیری کرده و طول لایه برگشتی کاهش پیدا میکند. در این شرایط بیشتر محصولات احتراق به سمت پاییندست تونل حرکت کرده و نواحی اطراف آتش محلی مستعد به منظور تجمع گرما و دود خواهد بود.

۸-نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی سرعت بحرانی و حداکثر دما درآتش سوزی داخل تونلها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق برای اولین بار پارامتر مهم دیگری به نام دبی حجمی بحرانی معرفی شد. در کار حاضر مشاهده شد که با حفظ دبی حجمی محاسبه شده از شرایط قرارگیری سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل و اعمال همین میزان از دبی حجمی در سیستمهای دمنده متنوع دیگر شرایط مختلفی ایجاد خواهد شد. به طوری که در زمان استفاده از سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی با حفظ دبی جریان ورودی به تونل فرآیند برگشت جریان دود اتفاق خواهد افتاد. اما چنانچه همین میزان از دبی حجمی در سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی و سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع اعمال شود نه تنها فرآیند برگشت جریان دود اتفاق نمیافتد بلکه شاهد براده بالاتر این دو شرایط را نسبت به سایر سیستم های دمیده استفاده در نواحی اطراف منبع آتش خواهیم بود که این مسئله استفاده در جریان ورودی نشان میدهد.

در این تحقیق، با استفاده از مفهوم دبی حجمی بحرانی، میزان حداقل دبی لازم برای هریک از سیستمهای دمنده مورد استفاده به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت جریان دود در نرخهای رهایش حرارت مختلف محاسبه شد. مشاهده شد که بیشترین دبی حجمی مورد نیاز به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت دود

مربوط به سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی میباشد که نشان میدهد این سیستم دمنده به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت جریان دود مناسب نمیباشد. در بین سایر سیستمهای دمنده نیز سیستم دمنده در کل مقطع تونل، با پروفیل سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع به ترتیب بیشترین میزان دبی حجمی بحرانی را به خود اختصاص دادهاند. این موضوع نشان میدهد هرچه در سیستم دمنده مورد استفاده دبی حجمی بیشتری در نزدیک به سقف تونل جریان داشته باشد نتیجه مطلوبتری حاصل خواهد شد و بازده بالاتری خواهیم داشت.

برای این چهار سیستم دمنده، اثر ارتفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع منبع آتش تأثیر چندانی بر روی دبی حجمی بحرانی و سرعت بحرانی نخواهد داشت. از میان چهار سیستم دمنده مورد استفاده نیز با افزایش ارتفاع منبع آتش به ترتیب سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع، سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی، سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل و سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی به کمترین میزان دبی حجمی به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز داشتند که نشان از بازدهی بالاتر سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به سایر سیستمهای دمنده دارد.

همچنین بررسی فاصله طولی سیستم دمنده از منبع آتش نیز در شرایطی که برگشت جریان دود وجود دارد، نشان داد نزدیک شدن سیستم دمنده به منبع آتش منجر به کاهش طول جریان برگشتی دود و افزایش بیشینه دما خواهد شد. با توجه به اینکه جهت مدلسازی تهویه طولی معمولاً سیستم دمنده به صورت یکنواخت و در کل سطح مقطع تونل در نظر گرفته شده است، نتایج این تحقیق نشان میدهد که مناسب است جهت مدلسازی، سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع را در نظر گرفت، زیرا سرعت بحرانی، دبی حجمی بحرانی و حداکثر دما در این نوع سیستم دمنده کاملاً متفاوت با سیستم دمنده مورد استفاده در کل سطح مقطع تونل است. درحالی که سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به واقعیت نزدیکتر است.

- [4] L. Hu, R. Huo, W. Chow, Studies on buoyancydriven back-layering flow in tunnel fires, Experimental Thermal and Fluid Science, 32(8) (2008) 1468-1483.
- [5] J.S. Roh, S.S. Yang, H.S. Ryou, M.O. Yoon, Y.T. Jeong, An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires heptane pool fire case, Building and Environment, 43(7) (2008) 1225-1231.
- [6] W. Chow, K. Wong, W. Chung, Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling, Tunnelling and Underground Space Technology, 25(2) (2010) 122-128.
- [7] B. Niknam, H. madani, H. Salarirad, Determining Critical Wind Velocity During Fire Accident in Alborz Tunnel, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 44(1) (2012) 47-55(In Persian).
- [8] H. Bozorgasareh, A. Kazemipour, H. Afshin, B. Farhanieh, Numerical Investigation of Fire Spread from a Fire Source to a Near Body in a Tunnel, Modares Mechanical Engineering, 15(10) (2015) 1-11(In Persian).
- [9] M. Mounesan, M.R. Talaee, H. molatefi, Investigation of effective parameters on critical ventilation velocity in underground tunnels, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 48(1) (2016) 41-54 (In Persian).
- [10] T. Zhou, J. Liu, Q. Chen, X. Chen, J. Wang, Characteristics of smoke movement with forced ventilation by movable fan in a tunnel fire, Tunnelling and Underground Space Technology, 64 (2017) 95-102.
- [11] Z. Tang, Y. Liu, J. Yuan, Z. Fang, Study of the critical velocity in tunnels with longitudinal ventilation and spray systems, Fire Safety Journal, 90 (2017) 139-147.
- [12] G. Heidarinejad, R. Vasheghani Farahani, Numerical Simulation of Fire in Tunnel with Ventilation and Suppression Systems, Modares Mechanical

 C_{p} گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK *D طول مقياس چشمه آتش ضریب نفوذ گونه α ام D_{i} نیروی خارجی، kgm/s² f_h شتاب گرانشی، m/s² g آنتاليي محسوس، J h, kg/m^3s نرخ تولید گونه α ام، m''' Р فشار، kg/ms² نرخ گرمای آزاد شده، J/s Q J/sm^3 نرخ انرژی آزاد شده بر واحد حجم، ġ‴ بردار شار حرارتی، kW/m² ġ" سرعت در جهت طولی، m/s u Y کسر جرمی علائم يوناني چگالی، kg/m³ ρ تنش برشی، kg/m² τ

۲ تنش برشی، kg/m² ۵ نرخ اتلاف انرژی، kg/ms³ ۵ گونهها زیرنویس

دوده

مراجع

S

- Y. ASHRAE Handbook 2007 HVAC Applications (SI). chapter 13 (Enclosed Vehicular Facilities)
- [2] Y. Wu, M.A. Bakar, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity, Fire Safety Journal, 35(4) (2000) 363-390.
- [3] L. Hu, R. Huo, W. Peng, W. Chow, R. Yang, On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires, Tunnelling and Underground Space Technology, 21(6) (2006) 650-655.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, Fire safety journal, 45(6-8) (2010) 361-370.

[15] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, R. McDermott, Fire dynamics simulator technical reference guide, National Institute of standards and technology, (2010). Engineering, 18(8) (2018) 209-220(In Persian).

- [13] J. Floyd, G. Forney, S. Hostikka, T. Korhonen, R. McDermott, and K. B. McGrattan, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide vol. Volume 1: Mathematical Model, NIST special publication, 1018, (2012).
- [14] Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason, Study of critical velocity