

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(7) (2021) 1045-1048 DOI: 10.22060/mej.2020.18513.6832

# Numerical simulation simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels

S. O. Haghani, E. Barati\*

Mechanical Engineering, Khayyam University, Mashhad, Iran

ABSTRACT: Ventilation is essential to provide a smoke-free path for safe passenger evacuation and effective rescue services in case of a tunnel fire, because the closure tunnels increase consequences of accidents significantly. In the present study, the simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels and physical phenomena has been investigated. Fire dynamics simulator will be used as a CFD tool. This simulation was performed to investigate the effect of the longitudinal distance of the smoke extraction system from the fire source on the smoke back-layering length and the maximum temperature in the two operating conditions used by this system downstream and upstream the fire source. In the present work, the smoke extraction system is located on the ceiling of the tunnel. The results show that using a smoke extraction system upstream of the fire source will increase the maximum temperature, but using the same system downstream will reduce the temperature throughout the tunnel and prevent smoke back-layering. However, attention to the smoke extraction velocity prevents the plug-holding phenomenon. The results also show that the simultaneous use of two smoke extraction systems at the upstream or downstream of the fire source will have a better result and The maximum temperature is reduced by 10%.

#### **Review History:**

Received: May. 30, 2020 Revised: Nov. 21, 2020 Accepted: Dec. 24, 2020 Available Online: Dec. 26, 2020

#### **Keywords:**

Tunnel fire Maximum temperature Smoke back-layering Smoke extraction system

### **1. INTRODUCTION**

Designing an efficient emergency ventilation system is one of the main approaches to prevent the perilous fire in tunnel phenomenon. For this purpose, firstly, fire behavior and its heat release rate should be investigated. Knowing about temperature distribution and smoke movement is the second step.

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 occurs. The ventilation system is used to control smoke propagation and the suppression system is used to prevent fire spread in tunnel. Ventilation is essential to provide a smoke-free path for safe passenger evacuation and effective rescue services in case of a tunnel fire.

Research has been conducted in recent years to reduce the risk of fire in tunnels. Heidarinejad et al. [1] studied fire in the tunnel with operating ventilation and suppression systems. The results showed that increase in water flow rate leads to increase in cooling effect of suppression system. Haghani and Barati [2] studied the effect of blower location on the maximum temperature and spread of smoke in case of fire inside tunnels. 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. Kong et al. [3] studied smoke back-layering length with different longitudinal fire locations in inclined tunnels under natural ventilation. The results showed that smoke back-layering length drops progressively with increasing downstream length.

In the present study, the simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels and physical phenomena has been investigated.

### 2. PROBLEM STATEMENT AND PHYSICAL DESCRIPTION

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 fire source to supply continuous heat release rates. The burner is placed on the center of the tunnel; ambient temperature is considered 20 °C. Fig. 1 shows the geometrical representation of tunnel.

### **3. NUMERICAL MODEL**

The numerical model is constructed by Fire Dynamic Simulator (FDS). The fire dynamics simulator has been developed at NIST to explore fire behavior and to analyze the efficiency of fire protection systems. Simulation of fire-

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





Fig.1. A geometrical representation of tunnel



Fig. 2. Distribution of temperature in various computational mesh

driven flow can be conducted in FDS by employing LES turbulence model. FDS has been extensively utilized in 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  $D^* = (\frac{\dot{Q}}{\rho_s T_s c_s \sqrt{g}})^{q_s}$  for assessing a mesh resolution with  $D^*$ . The recommended value of  $\frac{D^*}{\dot{\alpha}x}$  is in the range of 4-16 [4]. 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 distribution of temperature in various computational mesh and Fig. 3



Fig. 3 variation of critical velocity with HRR



Fig. 4. ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems upstream of fire source  $(V_L=0.53 \text{ m/s})$ 

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 [5] and Li et al. [6].

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 4 shows ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems upstream of fire source. The results show that using a smoke extraction system upstream the fire source will increase the maximum temperature.



### Fig. 5. ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems downstream of fire source $(V_1=0.53 \text{ m/s})$

Fig. 5 shows ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems downstream of fire source.

The results show that using a smoke extraction system downstream the fire source will reduce the temperature throughout the tunnel and prevent smoke back-layering.

### **5. CONCLUSIONS**

In this study, Numerical simulation Simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels was investigated. The results showed that using a smoke extraction system upstream of the fire source will increase the maximum temperature, but using the same system downstream will reduce the temperature throughout the tunnel and prevent smoke back-layering. However, attention to the smoke extraction velocity prevents the plug-holding phenomenon.

#### REFERENCES

- [1] G. Heidarinejad, R. Vasheghani Farahani, Numerical Simulation of Fire in Tunnel with Ventilation and Suppression Systems, Modares Mechanical Engineering, 18(8) (2018) 209-220(In Persian).
- [2]] S.O. Haghani, E. Barati, Numerical study on the effect of blower location on the maximum temperature and spread of smoke in case of fire inside tunnels, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 52(11) (2019) 171-180 (In Persian).
- [3] J. Kong, Z. Xu, W. You, B. Wang, Y. Liang, T. Chen, Study of smoke back-layering length with different longitudinal fire locations in inclined tunnels under natural ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, 107 (2021) 103663.
- [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. 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.
- [6] 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.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

*S.O.* Haghani, E. Barati , Numerical simulation simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 1045-1048.



DOI: 10.22060/mej.2020.18513.6832

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکسانــیک امسرکـسیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۴۱۱ تا ۴۴۲۸ DOI: 10.22060/mej.2020.18513.6832

# شبیهسازی عددی استفاده همزمان تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتشسوزی داخل تونلها

سیّد امید حقّانی، ابراهیم براتی\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه خیّام، مشهد، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۰ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶ ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶

> کلمات کلیدی: تونل آتشسوزی بیشینه دما جریان برگشتی دود سیستم مکش دود

خلاصه: هنگام آتش سوزی در تونل ها، ایجاد مسیر امن عاری از دود با استفاده از سیستمهای تهویه، برای فرار مسافران و انجام عملیات نجات ضروری است. چراکه بستهبودن محیط تونل عواقب ناشی از تصادفات و سوانح را به طور چشمگیری افزایش می دهد. در مطالعه حاضر، استفاده همزمان تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتش سوزی داخل تونل ها و پدیدههای فیزیکی حاکم بر آن مورد بررسی قرار می گیرد. روش تحقیق به صورت عددی است و از نرمافزار متن باز شبیه ساز دینامیک آتش (اف دی اس) استفاده می شود. این شبیه سازی به منظور بررسی تأثیر فاصله طولی سیستم مکش دود از منبع آتش بر روی طول جریان بر گشتی دود و حداکثر دما در دو شرایط کاری مورد استفاده این سیستم در پایین دست و بالادست منبع آتش انجام شده است. در کار حاضر سیستم مکش دود در سقف تونل قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد استفاده از یک سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش منجر به افزایش میزان بیشینه دما خواهد شد؛ اما استفاده از مین سیستم در پایین دست منبع آتش سبب کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت جریان دود خواهد شد؛ اما در استفاده از یک سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش منجر به افزایش میزان بیشینه دما خواهد شد؛ اما استفاده از مین سیستم در پایین دست منبع آتش سبب کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت جریان دود خواهد شد؛ اما در انتخاب سرعت مکش دود باید دقت شود تا از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود. همچنین بررسیها نشان داد استفاده فرامن از دو سیستم مکش دود در بالادست ما ۲۰ درصد کاهش دم می آن بیشینه دما خواهد شد؛ اما در انتخاب سرعت مکش دود در بالادست منبع آتش منجر عد اون و عدم برگشت جریان دود خواهد شد؛ اما در فراهر داشت و می تواند میزان بیشینه دما را تا ۱۰ درصد کاهش دهد.

### ۱– مقدمه

با توجه به حرکت تعداد زیادی از وسایل نقلیه از داخل تونلها، آتش سوزی در این محیطها به دلیل بستهبودن فضا و احتمال وجود صدمات قابل توجه انسانی و مالی، از اهمیّت ویژهای برخوردار است. آتش سوزی در چنین محیطهای سربستهای دارای سه منبع اصلی خطر به دلیل ایجاد حرارت، تولید دود و کاهش اکسیژن میباشد. نسبت مشارکت هر کدام از خطرات به مشخصات فیزیکی آتش از قبیل نرخ حرارت آزاد شده، منبع سوخت و میزان اکسیژن موجود بستگی دارد. این مشخصات ذکر شده با برخی پارامترهای دیگر نظیر شکل ساختاری محل وقوع آتش سوزی و فاصله از منبع حرارت \*نویسنده عهدهدار مکانیات: E.Barati@Khayyam.ac.ir

ترکیب شده و ممکن است در هر لحظه صدمات جبران ناپذیری را وارد نمایند. در یک آتش سوزی واقعی، این مشخصهها به طور پیوسته تغییر میکنند. بدین ترتیب پیش بینی نحوه گسترش آتش سوزی، تولید دود و همچنین درصد کاهش اکسیژن در نقاطی که احتمال زیادی برای آتش سوزی وجود دارد و یا صدمات ناشی از آتش سوزی قابل توجه می باشد، حائز اهمیت خواهد بود.

مشهودترین خطر در ارتباط با آتشها، حرارت یا همان گرمای تولیدشده میباشد. یک قربانی در حال فرار از محل آتشسوزی در تونل جادهای و ریلی تحت تأثیر انتقال حرارت جابجایی و تشعشع قرار میگیرد. انتقال حرارت زیاد به پوست، سبب سوختن، درد شدید و در نتیجه عدم توانایی و در نهایت مرگ میشود. هنگام آتشسوزی،

اکسیژن موجود در هوا با سوخت واکنش داده و به سرعت درصد آن در هوا کاهش می یابد. اگر چه در حالت کلی کاهش اکسیژن مسئله اصلی ایجاد خطر در اثر آتش سوزی در تونل های جادهای و ریلی نمی باشد، اما خطرات ناشی از قطع شدن اکسیژن و تنفس بیش از ۳ دقیقه در چنین شرایطی بسیار دشوار است. سومین خطر در هنگام آتشسوزی تولید دود است. منظور از دود تمام محصولات تجزیه شده در اثر حرارت و احتراق مواد است که در فضای اطراف گسترش می یابد. دود شامل ذرات دوده، گازهای سمی و ذرات معلق در هوا میباشد. ترکیب شیمیایی دود تولیدشده به وسیله آتش به طبیعت سوخت آتش، حجم کل دود تولیدشده، ابعاد فیزیکی و محدودیتهای آتش بستگی دارد. دوده و ذرات معلق، از یک طرف باعث انتقال مواد سمی قابل جذب به بدن انسان و از طرف دیگر سبب کاهش میدان دید و در نهایت جلوگیری و به تأخیرانداختن فرار از محل وقوع آتشسوزی میشوند. اکثر مردم بر این باورند که حرارت عامل اصلی مرگ و میر در آتشسوزیها میباشد در صورتی که این دود و انتشار آن است که تهدیدکننده اصلی جان انسانها میباشد.

تهویه هوا برای تونلها 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. در سیستم تهویه ناشی از اثر پیستونی هر وسیلهای که در داخل تونل حرکت می کند، اثری مشابه یک پیستون 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 می شود 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. در سیستم تهویه طولی هوا در طول تونل جریان می ابد و طی آن هوا از یک طرف دمیده و از طرف دیگر خارج می شود؛ یکی از پارامترهای مهم و قابل بررسی در این سیستم سرعت بحرانی تهویه میباشد و طبق تعریف به حداقل سرعتی اطلاق می شود که از پدیده برگشت دود حاصل از آتش سوزی جلوگیری میکند. اما در سیستم تهویه عرضی هوای تازه از کف تونل توسط مجرایی سرتاسری وارد تونل شده و از نزدیک سقف خارج می شود.

در سالهای اخیر فعالیتهای زیادی به منظور کاهش خطرات

ناشی از آتش سوزی در تونلها انجام شدهاست. با توجه به طراحی سیستم تهویه در تونلها برای کاهش آلودگی و خطرات ناشی از آن، بحث آتش سوزی در تونل با سیستم تهویه مکانیکی ارتباط پیدا می کند. توماس [۱] اولین فردی بود که در سال ۱۹۶۸ از عدد فرود در موقعیتهای آتش سوزی استفاده کرد. او تأثیر سرعت تهویه را بر روی آتش سوزی مورد مطالعه قرارداد. او بیان کرد در شرایط بحرانی (شرایط آتش سوزی در تونل که با عنوان شرایط بحرانی یا اضطراری معرفی می شود و نیاز به جریان تهویه با سرعت بالاتر از حالت عادی است.) نیروی شناوری و نیروی اینرسی برابر بوده و برگشت جریان رخ نمی دهد.

نیکنام و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۲ به بررسی 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 روابط تجربی، برای آتش سوزی درون تونل البرز با اندازه ۱۰۰ مگاوات، سرعت بحرانی ۳/۵ متر در ثانیه پیشنهاد می شود. این سرعت امکان خروج کاربران و انجام عملیات نجات را در کم ترین زمان ممکن فراهم می سازد.

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 [۳] در سال ۲۰۱۳ مطالعه تجربی در مقیاس واقعی و شبیهسازی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از کد اف دی اس در تونلی به طول ۸/۷۷ متر انجام دادند. نتایج تستها نشان داد که سیستم اطفاء، سیستم تهویه را قادر می سازد تا با سرعت تهویه کمتری از سرعت تهویه بحرانی از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند. مونسان و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از بر روی آن پرداختند. مشاهده شد که با افزایش عرض منبع آتش در حالی 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.

تانگ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۷ در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی پدیده آتشسوزی در تونلی مجهز به سیستم اسپری آب با مقیاس۱۴ به ۱ پرداختند. آنها بیان داشتند پس از اسپری آب از

نازلها، سرعت بحرانی به طور قابل توجهی کاهش مییابد. حداکثر کاهش در میزان سرعت بحرانی حدود ۳۱ درصد میباشد که به عواملی از جمله تعداد و محل قرارگیری نازلها وابسته میباشد.

حیدری نژاد و همکاران [۶] 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

حقّانی و براتی [۷] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از کد افدیاس و به کارگیری سیستم تهویه طولی به بررسی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر بیشینه دما و گسترش جریان دود در آتش سوزی داخل تونلها پرداختند. در این پژوهش برای اولین بار پارامتری به نام دبی حجمی بحرانی معرفی شد. بررسیها نشان داد قرارگرفتن سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع تونل، منجر به کاهش ۱۱ درصدی در میزان دبی حجمی بحرانی خواهد شد. همچنین مشخص شد نزدیکشدن سیستم دمنده به منبع آتش منجر به کاهش طول جریان برگشتی دود و افزایش بیشینه دما می شود. ژانگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۰ در یک تونل با مقیاس ۱:۱۰ به مطالعه تجربی بیشینه دما در زیر سقف تونل در شرایط استفاده از دو منبع آتش پرداختند. نتایج نشان داد در شرایط عدم استفاده از سیستم تهویه طولی و وجود منابع آتش کوچک، پدیده ادغام شعله بین دو منبع آتش وجود دارد. به طور کلی، پدیده ادغام شعلههای آتش به تدریج و با افزایش فاصله منابع آتش ناپدید می شود و حداکثر دما در زیر سقف تونل با افزایش گام منبع آتش به تدريج كاهش مىيابد. همچنين تحت شرايط استفاده از سیستم تهویه طولی، حداکثر دما در زیر سقف تونل به طور قابل توجهی کاهش مییابد.

کنگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۰ به بررسی طول جریان برگشتی دود در داخل تونلهای شیبدار مجهز به سیستم تهویه طبیعی در شرایط قرارگیری منبع آتش در فاصلههای طولی مختلف پرداختند. شبیهسازی در داخل تونلی با شیب ۴ درصد و با استفاده از نرمافزار اف دی اس انجام شد. نتایج نشان داد جریان برگشت دود آتش در تونل شیبدار عمدتاً توسط طول پایین دست هدایت می شود.

همچنین یک رابطه جدید برای پیشبینی طول جریان برگشتی دود در داخل تونلهای شیبدار ارائه شد.

منگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثر انسداد بر سرعت تهویه بحرانی در آتش سوزی تونلهای مجهز به تهویه طولی پرداختند. نتایج نشان داد در شرایطی که انسداد به حالت افقی و در بالادست منبع آتش قرار گرفتهاست، با افزایش نسبت انسداد سرعت تهویه بحرانی کاهش می یابد. اما در شرایط که انسداد به حالت عمودی و در بالادست منبع آتش قرار گرفتهاست، سرعت بحرانی تهویه ابتدا کاهش سپس افزایش مییابد. همچنین در این پژوهش مقایسه سرعت تهویه بحرانی بین دادههای تجربی و نتایج حاصل از مطالعات قبلی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرعت تهویه بحرانی با وجود انسداد متفاوت تغییر می کند. موقعیت نسبی بین انسداد و محل آتش سوزی و نوع سوخت می تواند بر سرعت

بررسی تحقیقات ذکر شده نشان میدهد که تاکنون تلاشهای زیادی در زمینه محاسبه سرعت بحرانی، کنترل جریان دود و بیشینه دما در آتش سوزی داخل تونلها انجام شده است. در اکثر تحقیقات انجام شده، سیستم تهویه طولی تنها سیستم مورد استفاده در داخل تونل به جهت تهویه هوا و کنترل جهت جریان دود میباشد. به همین منظور در کار حاضر با استفاده از نرم افزار منبع باز اف دی اس، بررسی استفاده همزمان تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتش سوزی داخل تونلها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به جهت بررسی مکش دود و تعداد آن، سناریوهای مختلف آتش سوزی در داخل شبیه سازی شده است. در کار حاضر برای نخستین بار تأثیر استفاده شبیه سازی شده است. در کار حاضر برای نخستین بار تأثیر استفاده شبیه سازی شده است. مکش دود در بالادست و پایین دست منبع آتش شبیه سازی شده و پدیده پلاگ هلدینگ در این شرایط مورد بررسی قرار گرفته است.

# ۲- مدلسازی میدان جریان و معادلات حاکم

در این مطالعه از نرمافزار منبع باز اف دی اس که توسط موسسه ملی فناوری و استاندارهای ایالات متحده آمریکا منتشر شده است، برای انجام شبیه سازی های عددی استفاده شده است. در این نرم افزار،

<sup>1</sup> CFL (Courant friedrichs lewy)

شکلی از معادلات ناویر-استوکس برای جریانهای سرعت پایین ناشی از آتش سوزی به همراه معادلات انرژی و احتراق حل می شود. اف دی اس به عنوان یک ابزار عددی قدر تمند، به طور گسترده در تحقیقات مرتبط با گسترش آتش و دود مورد استفاده قرار گرفته است. دقت و صحت نتایج حاصل از اف دی اس در شبیه سازی ها تو سط محققان زیادی به اثبات رسیده است که از آن جمله می توان به تحقیقات چالاسانی و همکاران [۱۱] و فرایدی و مورر [۱۲] اشاره کرد.

در کد اف دی اس، 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 صریح حل می گردند. اما پدیده تشعشع به روش حجم کنترل محاسبه می گردد. در این نرمافزار شبکه محاسباتی مستقیم الخط بوده و سلولها به شکل مکعب مستطیل هستند. همچنین آشفتگی با روش شبیه سازی گردابه های بزرگ و مدل زیر شبکه اسماگورینسکی مدل می شود. معادله انتقال تشعشع نیز با فرض گاز خاکستری حل می شود. در نرمافزار اف دی اس معادلات بقای جرم، بقای گونه ها، مومنتوم و انرژی به صورت روابط (۱) تا (۴) می باشد [۱۳]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u = \dot{m}_{b}^{\prime\prime\prime} \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{Y}_{\alpha}) + \nabla .(\rho \mathbf{Y}_{\alpha}\mathbf{u}) = \nabla .(\rho D_{\alpha} \nabla \mathbf{Y}_{\alpha}) + \dot{m}_{\alpha}^{m} + \dot{m}_{b,\alpha}^{m}$$
(Y)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla .(\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) + \nabla P = \rho g + f_b + \nabla .\tau_{ij} \tag{(7)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{h}_s) + \nabla .(\rho \mathbf{h}_s \mathbf{u}) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \dot{q}'' - \dot{q}_b'''$$
(°)

$$\delta t = \frac{5(\delta \mathbf{x} \,\delta \mathbf{y} \,\delta \mathbf{z})^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{gH}} \tag{(\Delta)}$$

در این رابطه $\delta x$  ،  $\delta z$  و  $\delta z$  اندازه کوچکترین سلول شبکه محاسباتی و H ارتفاع دامنه محاسباتی میباشند. در شبیهسازی با استفاده از اف دی اس گام زمانی توسط سرعت انتقال جابجایی و نفوذ

از طریق دو شرط کنترل می شود. اولین شرط، شرط سی اف ال <sup>۱</sup> است. این شرط بیان می کند که گام زمانی نمی تواند از مدت زمان لازم برای عبور ذره ای از سیال از یک سلول شبکه محاسباتی، بزرگتر باشد. بر اساس این روش، عدد سی اف ال در هر سلول محاسباتی با ابعاد  $\delta x$ اساس این روش، عدد سی اف ال در هر سلول محاسباتی با ابعاد  $\delta x$ راساس این روش، عدد سی اف ال در هر سلول محاسباتی با ابعاد  $\delta x$ روشا و  $\delta z$  و مؤلفه های سرعت u، v، u در گام زمانی  $\delta t$  به صورت رابطه (۶) محاسبه می شوند:

$$CFL = \delta t \max(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z})$$
(%)

اگر عدد سیافال محاسبه شده در محدوده مقدار ماکزیمم و مینیمم خود که در نرم افزار افدیاس به صورت پیش فرض به ترتیب ۱ و ۰/۸ تعریف شدهاست قرار نگیرد، گام زمانی تغییر خواهد کرد تا در نهایت شرط سیافال ارضا شود.

در محاسباتی که در آن انتقال جابجایی بر نفوذ غالب است، شرط سیاف ال گام زمانی را کنترل می کند. اما در دامنه های کوچکتر با شبکه محاسباتی به اندازه کافی ریز شرط ون نیومن<sup>۲</sup> بر گام زمانی حکم فرما است. این شرط نیز مانند عدد سیاف ال در هر سلول از شبکه محاسبه می شود و اگر عدد ون نیومن در محدوده ۸/۰ تا ۱ نبود، گام زمانی کوچکتر می شود تا شرط مورد نظر را ارضا کند.

### ۳- مشخصات هندسه مورد مطالعه

در کار حاضر هندسه مورد مطالعه توسط لی و همکاران [۱۴] مبنای مطالعه قرار گرفتهاست. لی و همکاران در مطالعه تجربی خود مطابق با شکل ۱ از تونلی با ابعاد ۱۲×۲۵/۵۰×۲۵/۰ متر استفاده کردند. دیوارها از جنس فولاد ضد زنگ به ضخامت ۱ میلیمتر ساختهشد. پروپان توسط مشعلی با مقطعی دایرهای شکل به قطر ۱۰۰ میلیمتر در وسط تونل سوزاندهشد، بطوری که سطح بالایی مشعل روی کف تونل قرار گرفتهبود. آنها هوای یکنواختشده را از دهانه سمت چپ را به ازای نرخهای حرارت آزادشده متفاوت محاسبه کردند. برای این کار آرایشی از حسگرها مطابق شکل ۲ در راستای طول تونل قراردادهشد. سرعت تهویهای که به ازای آن حسگرهای دما طول لایه

<sup>1</sup> plug-holding

<sup>2</sup> Von neumann



میلی متر) Fig. 2. Location of sensors in the work of Lee and et al (Dimensions. mm)





اشاره کردند، هنگامی که نسبت این طول مشخصه به اندازه شبکه از رابطه (۸) پیروی کند، دقت کافی برای شبیهسازی بدست خواهد آمد.

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

در تحقیق حاضر، برای تعیین شبکه مناسب علاوه بر استفاده از معیار فوق، استقلال حل از شبکه نیز مورد بررسی قرارگرفتهاست. استقلال از شبکه برای نحوه توزیع دما در طول تونل و نزدیک به سقف تونل انجامشدهاست. نحوه اندازهگیری این توزیع دما در نزدیک سقف تونل مطابق شکل ۲ میباشد. این بررسی در نرخ رهایش حرارت ۲ کیلووات و در شرایط عدم استفاده از جریان هوای ورودی صورت گرفتهاست، 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) و با به کاربردن کمترین تعداد سلول های مورد قبول در رابطه (۶) مقدار  $x\delta$  برابر ۲۰٫۰ متر و تعداد سلول های محاسباتی در جهت طول، عرض و ارتفاع تونل ۶۰۰ ۲ و ۱۲ در نظر گرفتهشدهاند. در این شرایط مطابق شکل ۴ نمودار تغییرات دمایی در نزدیک سقف تونل رسم شدهاست. همچنین همانطور که در شکل ۴ مشخص شدهاست به منظور دستیابی به جواب های مستقل



شکل ۱. تونل مورد آزمایش توسط لی و همکاران [۱۴] (ابعاد. میلی متر) Fig. 1. Tunnel tested by Lee and et al (Dimensions. mm)

نظر گرفتهشد.

## 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 مولفه محوری سرعت را اندازه گیری نماید. در حالت بحرانی، این سنسور باید سرعت تقریباً صفر را نشان دهد. برای مدل کردن آتش سوزی، سطح سوخت پروپان در کف تونل در نظر گرفته شده است. 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

### ۵- شبکه محاسباتی

برای تولید شبکهبندی مناسب، طول مشخصهای به نام قطر مشخصه آتش به صورت رابطه (۲) تعریف می شود:

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

این طول مشخصه تعیین کننده اندازه ادیهای بزرگ در پلوم دود و هم چنین ارتفاع شعله میباشد. این پارامتر معیاری برای تعیین اندازه شبکه حل برای جریانهای ناشی از شناوری از طریق شبیهسازی گردابههای بزرگ میباشد. مک گراتن و همکاران [۱۵]

از اندازه شبکه محاسباتی، نمودار دمایی در دو شبکه محاسباتی دیگر نیز مورد ارزیابی قرار گرفتهاست. 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 بهینه برای شبیه سازی حریق در داخل تونل مذکور در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ شبکه محاسباتی مورد استفاده نشان داده شده است.

## ۶- اعتبارسنجی حل

برای بررسی صحت شبیه سازی، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی لی و همکاران [۱۴] مورد استفاده قرار گرفته است. برای تونل تشریح شده نرخ رهایش حرارت ۰/۷، ۲، ۵، ۹، ۱۶و ۲۲/۵ کیلووات اعمال شده، سرعت بحرانی محاسبه و با نتایج تجربی وو و باکار [۱۶] لی و همکاران مقایسه شده است. نتایج به دست آمده در شکل ۶ ارائه شده است.

همان گونه که مشاهده می شود، میان مقادیر عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی خطای ۱۴ درصدی 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.

### ۷- نتايج

با توجه به اعتبارسنجی صورتگرفته و انطباق مناسب نتایج شبیهسازی عددی با نتایج تجربی، در این بخش شبیهسازی تأثیر استفاده همزمان از تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتشسوزی داخل تونلها انجام شدهاست. این شبیهسازی جهت بررسی تأثیر فاصله طولی سیستم مکش دود از منبع آتش بر روی طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در دو شرایط کاری مورد استفاده این سیستم در پاییندست و بالادست منبع آتش انجام شدهاست.

۲-۱- بررسی جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل با
 ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در بالادست
 منبع آتش

نخستین شرایط مورد بررسی به منظور مشخص شدن طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل قرارگرفتن سیستم



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



شکل ۵ . شبکه محاسباتی انتخاب شده Fig. 5. meshing in FDS code



شکل ۶. سرعت بحرانی حاصل از شبیه سازی و مقایسه با نتایج تجربی Fig. 6. The critical velocity of simulation and comparison with experimental results

مکش دود در بالادست منبع آتش میباشد. همانطور که در شکل ۷ مشخص شدهاست، در هندسه تونلی که در قسمت اعتبارسنجی مورد استفاده قرارگرفتهبود، سیستم مکش دود در قسمت بالادست منبع آتش قرارگرفتهاست. این سیستم دارای ابعاد ۱/۱ در ۱/۱ مترمربع بوده و فاصله مرکز این سیستم تا مرکز منبع آتش در دو شرایط کاری مختلف ۱ متر و ۳ متر در نظر گرفتهشدهاست. در داخل تونل وا ترموکوپل نزدیک به سقف تونل و با فاصله ۲/۱ متر از یکدیگر قرارگرفتهاست. با توجه به خاصیت شناوری، مسیر حرکت دود و گرما به سمت سقف تونل میباشد و عموماً حداکثر دما در این ناحیه اتفاق خواهد افتاد. این نقاط محلی مستعد به منظور خرابی ناشی از افزایش دما در داخل تونل میباشند؛ به همین منظور ترموکوپلها نزدیک به سقف تونل قرارگرفتهاند.

در تمامی مراحل شبیه سازی نرخ تولید حرارت ۵ کیلووات در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان سرعت بحرانی محاسبه شده در قسمت قبلی، سرعت بحرانی در نرخ رهایش حرارت ۵ کیلووات برابر با ۰/۵۳ متر بر ثانیه می باشد. به همین منظور، در فرآیند شبیه سازی

انجامشده در یک مرحله از سرعت بحرانی تهویه (سرعت ۵۳/۰ متر بر ثانیه) و در مرحله بعد از نصف سرعت بحرانی تهویه (سرعت ۱۲۶۵ متر بر ثانیه) به عنوان سرعت تهویه طولی استفاده شدهاست. همچنین جهت بررسی تأثیر استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در سقف تونل بر روی جریان برگشتی دود و حداکثر دما، از چهار سرعت مکش ۰، ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه در سیستم مکش دود سقفی استفاده شدهاست.

شکل ۸ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش دود و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصلههای ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۸۵/۰ متر بر ثانیه میباشد نشان میدهد. همانطور که در شکل ۸ مشخص شدهاست زمانی که سرعت سیستم مکش دود تعبیهشده در سقف تونل صفر میباشد، فرآیند برگشت جریان دود اتفاق نیفتادهاست و ترموکوپلهای قرارگرفته قبل از منبع آتش دمای ۱۰ درجه سانتی گراد (دمای محیط) را نشان میدهند و در این حالت افزایش دمای ثبتشده تنها مختص به ترموکوپلهای قرارگرفته در







شکل ۸. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی ( VL=۰/۳۵m/s)

Fig. 8. ceiling temperature distribution through the tunnel with the combination of ceiling extraction and longitudinal ventilation (V<sub>L</sub>=0.53 m/s)

پاییندست منبع آتش میباشد. زیرا با توجه به جریان هوای طولی برقرارشده در داخل تونل و در روی منبع آتش مسیر حرکت دود به سمت خارج تونل میباشد. البته حصول همچنین نتیجهای قابل انتظار نیز بودهاست. زیرا شرایط اعمالشده کاملاً مشابه با شرایط اعمالشده در قسمت قبلی کار بودهاست و انتظار میرفت با اعمال این شرایط فرآیند برگشت جریان دود اتفاق نیفتد.

با فعال شدن سیستم مکش دود، در سرعتهای مکش ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه و در هر یک از شرایط کاری که فاصله سیستم مکش دود از منبع آتش ۱ متر و ۳ متر میباشد مشاهده می شود که برگشت جریان دود اتفاق افتاده است. مطابق شکل ۸ هر چه سرعت مکش دود توسط سیستم بیشتر شده است، فرآیند برگشت جریان دود نیز افزایش یافته است. شایان ذکر است در شرایطی که سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته است، طول جریان برگشتی دود در تمامی سرعتهای مکش بیشتر از حالتی می باشد که سیستم مکش دود در فاصله ۱ متری قرار گرفته است.

با توجه به شکل ۸ با افزایش سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیه شده در سقف تونل میزان بیشینه دمای ثبت شده توسط ترموکو پلها در هریک از دو حالت افزایش مییابد. به طوری که بیشترین دماهای ثبت شده توسط ترموکو پلها به ترتیب مربوط به سرعت های مکش دود ۳، ۲ و ۱ متر بر ثانیه می با شد.

نکته قابل توجه دیگر با توجه به شکل ۸ نزدیک شدن محل ثبت بیشینه دما به سیستم مکش دود با افزایش سرعت مکش دود در هریک از دو حالت قرارگیری سیستم مکش دود می باشد. با زیاد شدن سرعت مکش دود حجم بیشتری از دود به سمت مکانیزم مکش دود سقفی حرکت می کند؛ در نتیجه محل ثبت بیشینه دما با افزایش سرعت مکش به سمت بالادست منبع آتش تغییر وضعیت پیدا خواهد کرد.

در شرایطی که سیستم تعبیهشده در سقف تونل جهت مکش دود در بالادست منبع آتش قرارداشتهباشد، جریان هوای طولی که در داخل تونل به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود ایجاد شدهاست، قبل از رسیدن به منبع آتش تحت تأثیر سیستم مکش دود سقفی قرار گرفته و سرعت آن کم میشود؛ در نتیجه مطابق شکل ۹ زاویه انحراف شعله کاهش مییابد ( $\beta > \alpha$ ) و باعث میشود جریان دود مستقیماً در زیر سقف تونل قرار بگیرد. پس هر چه سرعت مکش دود در سقف تونل بیشتر باشد، میزان زاویه انحراف شعله نیز کمتر خواهد شد و





ب) استفاده از سیستم مکش

الف) عدم استفاده از سیستم مکش

شکل ۹. زاویه انحراف شعله Fig.9. Flame deflection angle

جریان بیشتری از دود مستقیماً در زیر سقف تونل قرار خواهد گرفت. به همین علت بیشینه دما مطابق شکل ۸ در سرعت مکش دود ۳ متر بر ثانیه اتفاق افتادهاست. از طرف دیگر با توجه به مکش سیستم قرار گرفته در سقف تونل، همانطور که در قسمت بالا نیز گفته شده حجم عمدهای از جریان دود جهت خارجشدن از داخل تونل به سمت این سیستم حرکت خواهند کرد و باعث میشوند بیشینه دما در زمان فعال بودن سیستم مکش سقف در قسمت بالادست منبع آتش اتفاق افتد.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصلههای ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۲۶۵/۰ متر بر ثانیه میباشد نشان میدهد. مطابق این شکل در تمامی سرعتهای مکش دود و حتی در شرایطی که سیستم مکش دود غیرفعال میباشد برگشت جریان دود اتفاق افتادهاست. زیرا سرعت تهویه طولی انتخابشده نصف سرعت بحرانی تهویه میباشد و قاعدتاً استفاده از این سرعت تهویه در شرایطی که سیستم تهویه دیگری نیز فعال نباشد منجر به برگشت جریان دود خواهد شد.

با فعال شدن سیستم مکش دود، در سرعتهای مکش ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه و در هر یک از شرایط کاری که فاصله سیستم مکش دود از منبع آتش ۱ متر و ۳ متر میباشد مشاهده می شود که حجم بیشتری از جریان دود به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهد کرد که این مسئله به وضوح با توجه به افزایش دمای ثبت شده توسط ترموکپل هایی که در بالادست منبع آتش قرار گرفته اند قابل مشاهده است. شایان ذکر است مطابق شکل ۱۰ در شرایطی که سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته است، طول جریان برگشتی دود در تمامی سرعتهای مکش بیشتر از حالتی می باشد که سیستم مکش دود در فاصله ۱ متری قرار گرفته است. در واقع با توجه

به محل قرارگیری سیستم مکش دود، با فعال شدن این سیستم حجم عمده از جریان دود و محصولات احتراق به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهند کرد و منجر به افزایش طول جریان برگشتی دود خواهند شد.

با توجه به شکل ۱۰ با افزایش سرعت مکش دود از ۱ تا ۲ متر بر ثانیه، میزان بیشینه دمای ثبتشده توسط ترموکوپلها در هریک از دو شرایط کاری که سیستم مکش دود در فاصلههای ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرارگرفته افزایش مییابد. به طوری که بیشترین دمای ثبتشده در هر دو حالت در سرعت مکش ۲ متر بر ثانیه اتفاق افتادهاست. همانطور که در قسمت قبل نیز گفته شد، زمانی که سیستم تعبیه شده در سقف تونل جهت مکش دود در بالادست منبع آتش قرار داشتهباشد، جریان هوای طولی قبل از رسیدن به منبع آتش تحت تأثیر سیستم مکش دود سقفی قرار گرفته و در نتیجه موجب کاهش زاویه انحراف شعله و افزایش دما خواهد شد. اما در سرعت مکش دود ۳ متر بر ثانیه با توجه بیشترشدن میزان جریان

دود خروجی توسط این سیستم از تجمع گرما و دود در بالای منبع آتش جلوگیری شده و سبب شدهاست که میزان بیشینه دما نسبت به شرایط قبل کاهش پیدا کند.

نکته قابل توجه دیگر در این شکل نسبت به شرایط قبل که از سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شدهبود، کاهش بیشتر دما در قسمت پاییندست منبع آتش میباشد. در این شرایط با توجه به این که از نصف سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شدهاست حجم عمدهای از محصولات احتراق به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهند کرد و توسط سیستم مکش دود سقف از داخل تونل خارج خواهند شد.

اما نکته حائز اهمیّت در زمان استفاده از سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش، گسترش جریان دود در هر دو سمت منبع آتش میباشد که این مسئله به وضوح در نمودارهای توزیع دما نیز مشخص شده بود. در این شرایط هیچ مسیر کاملاً ایمنی به منظور عبور افراد از داخل تونل به سمت بیرون و امدادرسانی وجود نخواهد داشت.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی ( VL=•/۲۵۶m/s)





Fig. 11. Geometry examined by placing the smoke extraction system downstream of the fire source

علاوه بر این مسئله همانطور که گفته شد با فعال شدن این سیستم و افزایش سرعت مکش جریان دود بیشینه دما نیز افزایش خواهد یافت. در نتیجه استفاده همزمان از این دو سیستم در زمان حریق در داخل تونلها چنانچه از سرعت بحرانی تهویه استفاده شود نمی تواند شرایط قابل قبولی را ایجاد کند.

۲-۷- بررسی جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل با ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در پاییندست منبع آتش

شرایط دیگری که در کار حاضر به منظور مشخص شدن طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته است، قرار گرفتن سیستم مکش دود در سقف تونل و در پایین دست منبع آتش میباشد. در این مرحله از کار همانطور که در شکل ۱۱ مشخص شده است، در هندسه تونلی که در قسمت اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفته بود، سیستم مکش دود بر خلاف شرایط کار قبلی در قسمت پایین دست منبع آتش قرار گرفته است. این سیستم مکش دود نیز همانند سیستم قبلی دارای ابعاد ۱/۰ در ۱/۱ مرم در بوده و فاصله مرکز این سیستم مکش دود تا مرکز منبع آتش در دو شرایط کاری مختلف ۱ متر و ۳ متر در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱۱ مشخص شده است، ۱۹ ترمو کوپل در داخل تونل و نزدیک به سقف تونل به منظور اندازه گیری دما با فاصله ۱/۴ متری از یکدیگر قرار گرفته است.

در تمامی مراحل شبیه سازی همانند شرایط قبل، نرخ تولید حرارت ۵ کیلووات و سرعت جریان ورودی نیز در دو حالت مختلف ٥/٨٣ و ٢/٢٤٥ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تأثیر استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در سقف تونل بر جریان برگشتی دود و حداکثر دما، با استفاده از چهار سرعت مکش ۰، ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۲ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصلههای ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۲۵/۰ متر بر ثانیه میباشد نشان میدهد. همانطور که در این شکل مشخص شدهاست و با توجه به این که ترموکوپلهای قرار گرفته در بالادست منبع آتش در هر چهار سرعت مکش دود و در هر یک از دو شرایط کاری دمای ۲۰ درجه سانتی گراد را نشان میدهند، فرآیند برگشت جریان دود در هیچ یک از حالات اتفاق نیفتادهاست. قرار گرفتن سیستم تعبیهشده در سقف تونل و همچنین راستای مکش دود سقفی در پاییندست ما ۲۰ سیستم مکش دود مقویه طولی جست و جو کرد. مطابق شکل ۱۲ سیستم باعث میشود در زمان به کار گیری این سیستم جریان دود نیز به همین سمت هدایت شود. از طرفی جهت جریان هوا در سیستم تهویه طولی نیز از بالادست منبع آتش به سمت پاییندست آن میباشد. این



شکل ۱۲– نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی ( V<sub>L</sub>=۰/۵۳m/s)

Fig. 12. ceiling temperature distribution through the tunnel with the combination of ceiling extraction and longitudinal ventilation (V<sub>1</sub>=0.53 m/s)

همراستایی در هدایت جریان دود باعث می شود برگشت جریان دود به سمت بالادست اتفاق نیفتد. در شرایطی هم که مکش جریان دود توسط سیستم سقفی انجام نشده است (سرعت مکش صفر)، با توجه به بکارگیری سرعت بحرانی در سیستم تهویه طولی باز هم برگشت جریان دود نخواهیم داشت. در نتیجه استفاده از سیستم مکش دود در پایین دست منبع آتش با توجه به این که منجر به برگشت جریان دود نمی شود می تواند یک مسیر کاملا ایمن و عاری از دود و محصولات احتراق را برای عبور و فرار مسافران و همچنین فرآیند امدادرسانی ایجاد کند.

همانطور که در شکل ۱۲ مشخص شدهاست هرچه سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیهشده در سقف تونل بیشتر شدهاست دماهای ثبتشده بعد از این سیستم در هر یک از دو حالت کاهش یافتهاست. هرچه سرعت مکش دود سیستم قرار گرفته در سقف تونل بیشتر باشد، حجم بیشتری از دود و محصولات احتراق توسط این سیستم از سقف تونل خارج میشود و حجمی کمتری از دود به سمت پاییندست این سیستم حرکت خواهد کرد. به همین علت به ترتیب در سرعت های مکش سقفی ۲، ۲ و ۱ متر بر ثانیه که حجم بیشتری از دود و این سیستم دماهای کمتری توسط ترموکوپلها ثبت شدهاست. البته این کاهش دما در قسمت پاییندست سیستم مکش دود در شرایطی که این سیستم در فاصله ۱ متری از منبع آتش قرار گرفتهاست بیشتر

خودنمایی می کند. زیرا بعد از این سیستم فاصلهای حدودا ۵ متری از تونل در معرض هوای خنک قرار خواهد گرفت؛ اما زمانی که سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش قرار دارد این فاصله از ۵ متر به ۳ متر کاهش خواهد یافت و سبب افزایش خطرات ناشی از دما بالا در طول تونل خواهد شد.

شکل ۱۳ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصلههای ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه میباشد نشان میدهد. همانطور که در این شکل مشخص شدهاست در هر چهار سرعت مکش و در هر یک از دو شرایط کاری فرآیند برگشت جریان دود اتفاق افتادهاست. علت اصلی فرآیند برگشت جریان دود به بالادست منبع آتش، استفاده از سرعت تهویه طولی کمتر از سرعت بحرانی تهویه میباشد. این عامل باعث شدهاست که هر دو سمت منبع آتش را جریان دود فرا بگیرد و مسیری ایمن جهت خروج مسافران و فرآیند امدادرسانی وجود نداشتهباشد. اما نکته حائز اهمیّت طول جریان برگشتی دود در هر یک از شرایط کاری مختلف می باشد که سیستم مکش دود در فاصله ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفتهاست. در هریک از این دو شرایط کاری با وجود این که سرعت تهویه طولی نسبت به حالت سرعت بحرانی تهویه نصف شدهاست و انتظار برگشت جریان دود چشمگیر مى باشد اما طول اين لايه برگشتى حدوداً ٢ متر مى باشد.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی( V<sub>L</sub>=•/<sup>Y & Δ</sup>m/s)

Fig. 13. ceiling temperature distribution through the tunnel with the combination of ceiling extraction and longitudinal ventilation ( $V_1$ =0.265 m/s)

احتراق از سقف تونل خارج شدهاست در قسمت پاییندست این سیستم مکش دود دماهای کمتری توسط ترموکوپلها ثبت شدهاست. مطابق شکل ۱۴ بررسی کانتورهای دمایی بدستآمده در شرایط مختلف کاری نشاندهنده پدیده پلاگ هلدینگ میباشند. این پدیده در شرایطی که سرعت تهویه طولی ۱۵/۳ متر بر ثانیه، سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش و فرآیند مکش دود نیز با سرعت ۳ متر بر ثانیه درحال انجام میباشد و همچنین در تمامی مواردی که سرعت تهویه طولی ۱۲۶۵ متر بر ثانیه میباشد اتفاق افتادهاست.

همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، پدیده پلاگ هلدینگ زمانی اتفاق می افتد که هوا تازه از لایه پایین تر به طور مستقیم به داخل سیستم مکش دود کشیده می شود. این پدیده که وابسته به پارامترهایی از جمله سرعت مکش دود و ضخامت لایه دود در زیر سقف می باشد باعث می شود حجم زیادی از هوای داخل تونل به جای دود و محصولات احتراق از داخل تونل خارج شود و سبب کاهش چمگیر کارایی سیستم مکش دود خواهد شد. در نتیجه به علت کمبودن طول جریان برگشتی دود را در زمان کاهش سرعت تهویه طولی میتوان در محل قرارگیری سیستم مکش دود سقف جستوجو کرد. با وجود این که سرعت تهویه طولی به طور چشمگیری کاهش پیدا کردهاست اما سیستم مکش سقف به صورت سیستمی مکمل عمل کردهاست و مانع از گسترش جریان دود به سمت بالادست منبع آتش شدهاست. این سیستم با مکش جریان دود و محصولات احتراق به سمت پاییندست منبع آتش، کاهش سرعت ایجادشده در سیستم تهویه طولی را جبران کرده و مانع از گسترش هرچه بیشتر جریان دود به سمت بالادست منبع آتش می شود.

همانطور که در شکل ۱۳ مشخص شدهاست و همانند شرایط قبل که از سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شدهبود، هرچه سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیهشده در سقف تونل بیشتر شدهاست، دماهای ثبتشده بعد از این سیستم در هر یک از دو حالت کاهش یافتهاست. به طوری که به ترتیب در سرعت های مکش سقفی ۳، ۲ و ۱ متر بر ثانیه که حجم بیشتری از دود و محصولات



Fig. **\**<sup>\$</sup>. Plug-holding Phenomenon in tunnel

منظور جلوگیری از این پدیده در داخل تونلهای مجهز به سیستم مکش دود سقفی باید دقت کافی در انتخاب سرعت مکش دود لحاظ شود. در مجموع در زمان استفاده ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش از سقف در پاییندست منبع آتش با وجود کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت جریان دود در زمان استفاده از سرعت بحرانی تهویه باید در انتخاب سرعت مکش دود دقت شود تا از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشتهباشد.

۲-۳- بررسی جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل در
 زمان استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و دو سیستم مکش دود

آخرین شرایطی که در کار حاضر به منظور مشخص شدن طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرارمی گیرد، استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود می باشد. در این مرحله از کار همانطور که در شکل ۱۶ مشخص شده است، با قرار گرفتن دو سیستم مکش دود در بالادست و پایین دست منبع آتش در دو شرایط کاری مجزا مدل سازی آتش سوزی داخل تونل انجام شده است. این سیستمها دارای ابعاد ۰/۱ در ۰/۱ متر مربع بوده و فاصله هر یک از این سیستمها تا مرکز منبع آتش ۱ متر و

۳ متر میباشد. ابعاد تونل در این مرحله از شبیهسازی نیز همانند شبیهسازیهای قبل هم اندازه با هندسه تونل مورد استفاده در قسمت اعتبارسنجی میباشد. همانطور که در شکل ۱۶ مشخص شدهاست، ۱۹ ترموکوپل در داخل تونل و با فاصله ۲۰/۳ متری از سقف تونل در دو شرایط کاری مختلف به منظور اندازه گیری دما با فاصله ۲/۴ متری از یکدیگر قرار گرفتهاست.

در تمامی مراحل شبیه سازی نرخ تولید حرارت ۵ کیلووات و سرعت تهویه طولی نیز در دو شرایط مختلف ۵۳/۰ متر بر ثانیه (سرعت بحرانی تهویه) و ۲۶۵/۰ متر بر ثانیه (نصف سرعت بحرانی تهویه) در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تأثیر استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در سقف تونل بر جریان برگشتی دود و حداکثر دما، با استفاده از چهار سرعت مکش ۰ ۵/۰، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه در هر یک از سیستمهای مکش دود، طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرحله از کار حاضر علاوه بر بررسی تأثیر استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در بالادست و پایین دست منبع آتش بر جریان برگشتی دود و حداکثر دما در ماه مقایسه عملکرد استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در بالادست و پایین دست منبع مقارم از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از یک



ب) عدم وجود پدیدہ plug-holding

الف) يديده plug-holding

شکل ۱۵. بررسی پدیده پلاگ هلدینگ در داخل تونل Fig. 15. Investigation of the plug-holding phenomenon inside the tunnel



دبی حجمی هوای مکششده توسط این دود سیستم برابر با دبی حجمی خارجشده توسط یک فن میباشد که در شرایط کاری قبل مورد بررسی قرارگرفتهاست.

شکل ۱۷ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سرعت سیستم تهویه طولی ۰/۵۳ و ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه می باشد و سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش قرار گرفته نشان میدهد. مطابق این شکل در شرایطی که سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شدهاست و سیستم مکش دود نیز غیر فعال می باشد برگشت جریان دود اتفاق نیفتادهاست. با فعال شدن سیستم مکش دود در این سرعت تهویه طولی در تمامی سرعتهای مکش دود ۱٬۰۰۵ و ۱/۵ متر بر ثانیه برگشت جریان دود اتفاق افتادهاست. مطابق شکل ۱۷ هرچه سرعت مکش دود توسط سیستمهای قرار گرفته در سقف تونل بیشتر شدهاست، فرآیند برگشت جریان دود نیز افزایش یافتهاست. اما نکته قابل بررسی در این سیستم نسبت به شرایط استفاده مجزا از دو سیستم در فاصلههای ۱ و ۳ متری تغییر در میزان بر گشت جریان دود می باشد. در زمان استفاده از دو سیستم تهویه همزمان طول جریان برگشتی دود نسبت به شرایط استفاده از سیستم منفرد در فاصله ۳ متری کاهش و نسبت به شرایط استفاده از سیستم منفرد در فاصله ۱ متری افزایش یافتهاست.

استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شدهاست افزایش سرعت مکش دود سبب شدهاست میزان بیشینه دمای ثبتشده توسط ترموکوپلها افزایش یابد؛ به طوری که بیشترین دمای ثبتشده در سرعت مکش ۱/۵ متر بر ثانیه اتفاق افتادهاست. همانطور که در قسمت قبلی کار نیز توضیح دادهشد این مسئله به دلیل تأثیرگذاری سیستم مکش دود بر روی سرعت تهویه طولی و کاهش زاویه انحراف شعله میباشد. اما نکته حائز اهمیّت در این شرایط کاهش میزان بیشینه دما نسبت به شرایطی میباشد که از سیستمهای منفرد در فاصلهای ۱ و ۳ متری استفاده شدهاست.

در شکل ۱۷ در شرایطی که سرعت ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه در سیستم تهویه طولی استفاده شدهاست در تمامی سرعتهای مکش و حتی در شرایطی که سیستم مکش دود غیر فعال میباشد برگشت جریان دود اتفاقاست؛ زیرا سرعت تهویه طولی انتخاب شده نصف سرعت بحرانی تهویه میباشد و این امر سبب برگشت جریان دود خواهد شد. با فعال شدن سیستم مکش دود مشاهده می شود که با افزایش سرعت مکش دود حجم بیشتری از جریان دود به سمت بالادست منبع آتش مکش دود حجم بیشتری از جریان دود به سمت بالادست منبع آتش در کت خواهد کرد و این امر منجر به افزایش طول جریان برگشتی دود خواهند شد. طول این لایه برگشتی دود نسبت به شرایط مشابهی که از سیستم منفرد در فاصله ۳ متری استفاده شدهاست کمتر و نسبت به شرایطی که از سیستم منفرد در فاصله ۱ متری استفاده شدهاست بیشتر خواهدبود.

در همین شرایط که سرعت بحرانی تهویه به عنوان سرعت مورد



شکل ۱۷. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش Fig. 17. ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems upstream of fire

source

در همین شرایط که سرعت ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه به عنوان سرعت مورد استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شدهاست میزان بیشینه دما نسبت به شرایطی که از سیستمهای منفرد در فاصلهای ۱ و ۳ متری استفادهشده کاهش پیدا کردهاست.

شکل ۱۸ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سرعت سیستم تهویه طولی ۰/۵۳ و ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه میباشد و سیستم مکش دود در پاییندست منبع آتش قرار گرفته نشان میدهد. مطابق این شکل در شرایطی که سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شدهاست، در تمامی سرعتهای مکش دود و همچنین شرایطی که سیستم مکش سقف غیر فعال می باشد نشانه ای از بر گشت جریان دود دیده نمی شود؛ زیرا تمامی ترمو کوپل های قرار گرفته در بالادست منبع آتش دمای ۲۰ درجه سانتی گراد را نشان میدهند. این موضوع با توجه به بکارگیری سرعت بحرانی در سیستم تهویه طولی و همچنین همراستایی جریان ایجادشده توسط سیستم تهویه طولی و سیستم مکش سقف قابل توجیه می باشد. عدم برگشت جریان دود به سمت بالادست سبب می شود مسیری ایمن و عاری از دود و محصولات احتراق برای عبور و فرار مسافران و همچنین فرآیند امدادرسانی ایجاد شود. در این مرحله از کار تفاوت به نسبت چشمگیری در لایه برگشتی دود در زمان استفاده از دو سیستم مکش دود فعال و سیستمهای مکش دود مجزا در در فاصلههای ۱ و ۳ متری دیده نمی شود.

در همین شرایط که سرعت بحرانی تهویه به عنوان سرعت مورد استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شدهاست افزایش سرعت مکش دود در میزان بیشینه دمای ثبتشده در داخل تونل تأثیر زیادی نخواهدداشت. استفاده از سیستم مکش دود همزمان سبب شده در قسمت پاییندست این سیستم هوای نسبتاً خنکتری در داخل تونل جریان داشتهباشد. البته این شرایط نسبت به شرایط مشابهی که از سیستم منفرد در فاصله ۳ متری استفاده شدهاست مطلوبتر و نسبت به شرایطی که از سیستم منفرد در فاصله ۱ متری استفاده شدهاست کارایی کمتری خواهدداشت.

امّا نکته حائز اهمیّتی که در زمان استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در پاییندست منبع آتش مشاهده میشود ازبینرفتن پدیده پلاگ هلدینگ میباشد. همانطور که در قسمت قبل بیان شد در شرایطی که سرعت تهویه طولی ۸۵/۰ متر بر ثانیه، سیستم مکش دود در فاصله ۳ متر از منبع آتش و فرآیند مکش دود نیز با سرعت ۳ متر بر ثانیه در حال انجام بودهاست پدیده پلاگ هلدینگ رخ داده و حجم زیادی از هوای داخل تونل به جای دود و محصولات احتراق از داخل تونل خارج شدهاست. در این مرحله از کار مشاهده شد که استفاده از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از یک سیستم منفرد میتواند از این پدیده جلوگیری کند و از خروج هوای داخل تونل به جای دود و محصولات احتراق از داخل تونل جلوگیری شود. همچنین مشاهده شد که با جلوگیری از پدیدهی پلاگ هلدینگ



شکل ۱۸. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در پاییندست منبع آتش Fig. 18. ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems downstream of fire source

عملکرد سیستم مکش دود نیز بهتر شده و کاهش دمای ۵ درجهای توسط ترموکوپلها ثبت شدهاست.

در شکل ۱۸ در شرایطی که سرعت ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه در سیستم تهویه طولی استفاده شدهاست در تمامی سرعتهای مکش و حتی در شرایطی که سیستم مکش دود غیرفعال میباشد برگشت جریان دود اتفاق افتادهاست؛ زیرا سرعت تهویه طولی انتخاب شده نصف سرعت بحرانی تهویه میباشد و این امر سبب برگشت جریان دود خواهد شد. اما نکته حائز اهمیّت جلوگیری سیستم مکش دود از گسترش شد. اما نکته حائز اهمیّت جلوگیری سیستم مکش دود از گسترش زیاد جریان دود برگشتی به سمت بالادست منبع آتش میباشد. در این شرایط مشابه به شرایط قبلی که از سیستمهای منفرد و مجزا در فاصلهای ۱ و ۳ متری استفاده شدهاست، با وجود این که سرعت تهویه طولی به طور چشمگیری کاهش پیدا کردهاست امّا سیستم مکش سقف به صورت سیستمی مکمل عمل کرده و مانع از گسترش جریان

در همین شرایط که سرعت ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه به عنوان سرعت مورد استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شدهاست افزایش سرعت مکش دود در میزان بیشینه دمای ثبتشده در داخل تونل تأثیر زیادی نخواهدداشت امّا هرچه سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیهشده در سقف تونل بیشتر شدهاست، دماهای ثبتشده بعد از این سیستم کاهش یافتهاست. به طوری که به ترتیب در سرعتهای مکش سقفی ۱/۱، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه که حجم بیشتری از دود و محصولات احتراق از سقف تونل خارج شدهاست در قسمت پاییندست این سیستمها دماهای کمتری توسط ترموکوپلها ثبت شدهاست. در این شرایط بر خلاف شرایط قبل که در تمامی سرعت تهویه طولی این شرایط بر ثانیه پدیده پلاگ هلدینگ اتفاق افتاده بود تا حد زیادی از این پدیده جلوگیری شدهاست.

در مجموع می توان گفت استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود نسبت به استفاده از سیستمهای مجزا می تواند مزیتهای قابل توجهی را ایجاد کند. همانطور که بررسی شد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال در بالادست منبع آتش به جای استفاده از سیستمهای منفرد می تواند در میزان ثبت بیشینه دما تاثیر گذار باشد. به طوری که استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود سبب کاهش میزان بیشینه دما شدهاست. همچنین بررسیها نشان داد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال در پاییندست منبع آتش نیز می تواند مفید

باشد. استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از سیستمهای منفرد و مجزا سبب می شود تا حد زیادی از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود که این امر سبب می شود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشتهباشد.

# ۸- نتیجهگیری

در این پژوهش بررسی تأثیر استفاده همزمان از تهویه طولی و مکش از سقف در آتش سوزی داخل تونل ها مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی در دو شرایط متفاوت که سیستم مکش سقف در بالادست و پایین دست منبع آتش قرار گرفته بود انجام شد. شبیه سازی آتش سوزی برای هند سه مورد نظر با استفاده از نرم افزار منبع باز اف دی اس صورت گرفت. بررسی آتش سوزی در داخل تونل در زمان استفاده همزمان از تهویه طولی و مکش از سقف نشان داد:

۱ – در زمان استفاده از سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش، گسترش جریان دود در هر دو سمت منبع آتش میباشد. در این حالت هیچ مسیر کاملاً ایمنی به منظور عبور افراد از داخل تونل به سمت بیرون و امدادرسانی وجود نخواهد داشت. علاوه بر این مسئله با فعال شدن سیستم مکش دود و افزایش سرعت مکش جریان دود بیشینه دما نیز افزایش خواهد یافت. در نتیجه استفاده همزمان از این دو سیستم در زمان حریق در داخل تونلها نمی تواند شرایط قابل قبولی را ایجادکند.

۲- در زمان استفاده ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود از سقف در پاییندست منبع آتش با وجود کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت جریان دود در زمان استفاده از سرعت بحرانی تهویه باید در انتخاب سرعت مکش دود دقت شود تا از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشتهباشد.

۳– استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود نسبت به استفاده از سیستمهای مجزا میتواند مزیتهای قابل توجهی را ایجاد کند. همانطور که بررسی شد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال در بالادست منبع آتش به جای استفاده از سیستمهای منفرد میتواند در میزان ثبت بیشینه دما تاثیرگذار باشد. به طوری استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود سبب کاهش میزان بیشینه دما شدهاست. همچنین بررسیها نشان داد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال Wind Velocity During Fire Accident in Alborz Tunnel, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 1)44) (2012) 55-47(In Persian).

- [3] Y.J. Ko, G.V. Hadjisophocleous, Study of smoke backlayering during suppression in tunnels, Fire safety journal, 58 (2013) 247-240.
- [4] M. Mounesan, M.R. Talaee, H. molatefi, Investigation of effective parameters on critical ventilation velocity in underground tunnels, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 1)48) (2016) 54-41 (In Persian).
- [5] 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) 147-139.
- [6] G. Heidarinejad, R. Vasheghani Farahani, Numerical Simulation of Fire in Tunnel with Ventilation and Suppression Systems, Modares Mechanical Engineering, 8)18) (2018) 220-209(In Persian).
- [7] S.O. Haghani, E. Barati, Numerical study on the effect of blower location on the maximum temperature and spread of smoke in case of fire inside tunnels, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 11)52) (2019) 180-171 (In Persian).
- [8] Y. Zhang, S. Xing, R. Chen, L. Chen, T. Li, P. Mao, Experimental study on maximum temperature beneath tunnel ceiling under the condition of double fire sources, Tunnelling and Underground Space Technology, 106 (2020) 103624.
- [9] J. Kong, Z. Xu, W. You, B. Wang, Y. Liang, T. Chen, Study of smoke back-layering length with different longitudinal fire locations in inclined tunnels under natural ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, 107 (2021) 103663.
- [10] N. Meng, X. Hu, M. Tian, Effect of blockage on critical ventilation velocity in longitudinally ventilated tunnel fires, Tunnelling and Underground Space Technology, 106 (2020) 103580.
- [11] N. Chalasani, M. Greiner, A. Suo-Anttila, Benchmarking of Container Analysis Fire Environment simulation using the memorial tunnel fire ventilation tests, Journal of Fire Protection Engineering, 1)22) (2012) 70-45.

در پاییندست منبع آتش نیز میتواند مفید باشد. استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از سیستمهای مجزا سبب میشود تا حد زیادی از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود که این امر موجب میشود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشتهباشد.

# فهرست علائم

## علائم انگلیسی

- J/kgk گرمای ویژه در فشار ثابت،  $C_{_P}$ 
  - طول مقياس چشمه آتش  $D^*$ 
    - ضريب نفوذ گونه  ${\mathfrak a}$  ام  $D_{_{\! lpha}}$
  - ${
    m Kgm/s^2}$ نيروى خارجى،  $f_b$ 
    - ${
      m m/s^2}$  شتاب گرانشی، g
    - J آنتالپی محسوس،  $h_s$
  - kg/m<sup>3</sup>s ،نرخ توليد گونه α ام، m<sup>""</sup><sub>α</sub>
    - $kg/ms^2$ فشار، P
    - J/s نرخ گرمای آزاد شده، Q
- J/sm<sup>3</sup> نرخ انرژی آزاد شده بر واحد حجم،  $\dot{q}$  ""
  - $\operatorname{Kw/m^2}$ بردار شار حرارتی، q''
  - سرعت در جهت طولی، m/s
    - Y کسر جرمی

## علائم يونانى

- $\, kg/m^3$  چگالی، ho
- $\mathrm{kg/m^2}$  تنش برشی، au
- $\mathrm{kg/ms^3}$ نرخ اتلاف انرژی،  $\varepsilon$ 
  - α گونهها

### **زیر بویس** ∞ شرایط هوای اتمسفری

دوده S

# مراجع

- P.H. Thomas, The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, Fire Safety Science, 723 (1968) -1--1.
- [2] B. Niknam, H. madani, H. Salarirad, Determining Critical

fires, Fire safety journal, 8-6)45) (2010) 370-361.

- [15] K.B. McGrattan, H.R. Baum, R.G. Rehm, Large eddy simulations of smoke movement, Fire Safety Journal, 2)30) (1998) 178-161.
- [16] 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, 4)35) (2000) 390-363.
- [12] F.W. Mowrer, P.A. Friday, Comparison of FDS Model Predictions With FM/SNL Fire Test Data, (2001).
- [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 and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم S.O. Haghani, E. Barati , Numerical simulation simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4411-4428. DOI: 10.22060/mej.2020.18513.6832

