



مطالعه پارامتریک بر روی سرعت بحرانی در زمان آتش‌سوزی درون تونل‌های دارای سیستم تهویه طولی

علی کاظمی‌پور^۱، مهیار پورقاسمی^۲، حسین افشن^{۳*}، بیژن فرهانیه^۴

- ۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
 - ۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
 - ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
 - ۴- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
afshin@sharif.edu
- * تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۵۵،

چکیده

هنگام آتش‌سوزی در تونل‌ها، ایجاد مسیر امن عاری از دود با استفاده از سیستم‌های تهویه، برای فرار مسافران و انجام عملیات نجات ضروری است. در تونل‌های دارای سیستم تهویه طولی، سرعت بحرانی تهویه به حداقل سرعتی اطلاق می‌شود که از برگشت دود به بالادست آتش جلوگیری و مسیر امن را ایجاد می‌کند. در این تحقیق، به بررسی عددی نحوه کنترل دود در تونل‌ها با تأکید بر پارامترهای مؤثر بر سرعت تهویه بحرانی پرداخته می‌شود. در ابتدا، سرعت بحرانی در نزدیکی رهایش گرمای مختلف محاسبه شده که تطابق مناسبی را با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی مقیاس کوچک نشان می‌دهد. در ادامه، تأثیر ضربی انسداد و محل عرضی منبع آتش، شب تول و رطوبت نسبی هوای تهویه بر مقدار سرعت بحرانی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حضور انسداد منبع آتش، کاهشی تقریباً معادل نسبت انسداد در سرعت بحرانی رخ می‌دهد. در بررسی سرعت بحرانی در تونل شب‌دار مشاهده شده است که بهارزی هر یک درصد شب منفی تونل، حدود ۲/۴ درصد به هوای تهویه مورد نیاز افزوده می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که رطوبت نسبی هوای تأثیر چندانی نداشته، ولی محل عرضی آتش دارای تأثیر زیادی است. به طوری که آتش در کنار دیواره تونل نسبت به آتش در وسط تونل نیازمند ۱۰ الی ۲۰ درصد هوای بیشتر برای جلوگیری از برگشت دود می‌باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دربافت: ۱۵ آذر ۱۳۹۲
پذیرش: ۱۲ بهمن ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۳۴ خرداد ۱۳۹۳
کلید واژگان:
سرعت بحرانی تهویه
نسبت انسداد
شب تونل
محل عرضی آتش
رطوبت نسبی

Parametric study on critical ventilation velocity in case of fire inside longitudinally ventilated tunnels

Ali Kazemipour¹, Mahyar Pourghasemi², Hossein Afshin^{3*}, Bijan Farhanieh⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

4- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 11155-9567, Tehran, Iran, afshin@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 December 2013
Accepted 01 February 2014
Available Online 14 June 2014

Keywords:
Critical Ventilation Velocity
Blockage Ratio
Tunnel Slope
Fire Lateral Location
Relative Humidity

ABSTRACT

Ventilation is essential to provide a smoke-free path for safe passenger evacuation and effective rescue services in case of a tunnel fire. The critical ventilation velocity, V_c , is defined as the minimum velocity which creates this safe passage by preventing smoke from spreading upstream in tunnels. This research discusses smoke flow control in tunnels with a focus on the important parameters affecting critical velocity. Critical velocity values are evaluated for different heat release rates and results show good compliance with model-scale experiments. The study is extended to investigate effects of fire source blockage ratio and lateral location, tunnel slope and ventilation air relative humidity on the behavior of critical velocity. Results show that a drop in V_c about equal to blockage ratio occurs in presence of fire source blockage. Investigation of critical velocity in sloped tunnels illustrates that for each %1 increment in negative slope, about 2.4% higher ventilation is required. Results also show that air relative humidity does not have significant effect. However, fire lateral location impacts critical ventilation velocity in such a way that about 10-20% higher airflow is necessary to suppress smoke in a near-wall fire in comparison with a middle-tunnel fire.

با آتش‌سوزی است. اما هزینه‌های بسیار هنگفت آن، محققان را به سمت

ساخت مدل در مقیاس کوچک‌تر و آزمایش بر روی آن سوق داده است.

آزمایش در مقیاس واقعی، مطمئن‌ترین روش برای مطالعه پدیده‌های مرتبط

۱- مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Kazemipour, M. Pourghasemi, H. Afshin, B. Farhanieh, Parametric study on critical ventilation velocity in case of fire inside longitudinally ventilated tunnels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 1-10, 2014 (In Persian)

نمی‌رسید، افزایش سرعت بحرانی مشاهده شد که به دلیل افزایش شدت آتش استخراجی در اثر بازگشت حرارت تابشی بوده است. کو و همکارانش [۹] اثر شیب را بر مقدار سرعت بحرانی در یک تونل مقیاس کوچک به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش شیب، سرعت بحرانی نیز افزایش می‌یابد و این خود باعث افزایش نرخ رهایش حرارت می‌شود.

تسای و همکارانش [۱۰]، با استفاده از افدي‌اس، به بررسی عددی اثر همزمان چند منبع آتش بر سرعت بحرانی تهويه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت بحرانی برای دو منبع مجزا کمتر از سرعت بحرانی برای یک منبع با مجموع نرخ رهایش حرارت آن‌ها می‌باشد و با افزایش فاصله دو منبع، مقدار سرعت بحرانی کاهش می‌یابد. بزرگ‌عصاره و همکارانش [۱۱] به بررسی تأثیر شکل منبع آتش بر سرعت بحرانی تهويه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت بحرانی با کشیدگی آتش (مشعل گازی) در راستای طول تونل، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و همچنین بیشینه سرعت بحرانی برای آتش مرتعی اتفاق نمی‌افتد. هو و همکارانش [۱۲] آتش در کنار دیواره تونل را با استفاده از افدي‌اس و همچنین به طور تحلیلی مطالعه کردند و نشان دادند که آتش کنار دیواره، به سرعت بحرانی بیشتری نیازمند است. نتایج عددی آن‌ها در آتش ۵۰۰ کیلووات، افزایش ۱۸ درصد را پیش‌بینی می‌کرد.

بررسی تحقیقات ذکر شده نشان‌دهنده آن است که تلاش‌های زیادی در زمینه مطالعه سرعت بحرانی و پارامترهای مؤثر بر آن به انجام رسیده است. که این امر به علت اهمیت کنترل دود در تونل‌های ریلی و جاده‌ای است. هرچند تأثیر پارامترهای مهمی چون ضریب انسداد، رطوبت نسبی هوای ورودی و محل آتش به طور کامل شناخته شده نیست و نیاز به تحقیقات بیشتر دارد. لذا در این پژوهش به صورت دقیق‌تر به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر سرعت بحرانی به عنوان مهم‌ترین مشخصه در تهويه طولی اضطراری در داخل تونل‌ها پرداخته شده و این تأثیرات به طور کمی و کیفی تشریح می‌گردد.

۲- معادلات حاکم

از نرم‌افزار منبع باز افدي‌اس برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی در تحقیق حاضر استفاده شده است. این کد توسط مؤسسه ملی فناوری و استانداردهای ایالات متحده امریکا^۱ منتشر شده است که در آن فرم ویژه‌ای از معادلات ناویر-استوکس برای جریان‌های سرعت پایین ناشی از آتش‌سوزی به همراه معادلات انرژی و احتراق حل می‌گردد. دقت و صحت نتایج حاصل از افدي‌اس در شبیه‌سازی‌ها توسط محققان زیادی به اثبات رسیده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات هو و همکاران [۱۳]، چالasanی و همکاران [۱۴]، رو و همکاران [۱۵] و هو و همکاران [۱۶] اشاره کرد. در ادامه، معادلات حاکم در این تحقیق به اختصار ارائه می‌شود.

۲-۱- معادلات جریان

معادلات فیلترگیری شده پیوستگی، مومنتوم، انرژی و حالت با استفاده از متوسط‌گیری فاور^۲ (برای دخیل کردن اثرات چگالی) به صورت روابط (۱) الی (۴) می‌باشد:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \bar{\rho} g_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} (\bar{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \right] \quad (2)$$

4- United States National Institute of Standards and Technology (NIST)
5- Favre averaging

پژوهشگران بسیاری با کار کردن با مدل‌های کوچک، نتایج قابل قبولی را در زمینه فیزیک آتش‌سوزی و کمیت‌های مربوط به آن همچون توزیع دما و دود به دست آورده‌اند. با پیشرفت قدرت محاسباتی در سال‌های اخیر، روش‌های عددی نیز پرکاربرد شده‌اند و تحقیقات فراوانی مرتبط با شبیه‌سازی در ادبیات فنی به‌چشم می‌خورد.

یکی از کمیت‌های مورد بررسی، سرعت بحرانی است که جزو مهم‌ترین مشخصه‌ها در مبحث تهويه اضطراری در تونل‌ها بوده و به حداقل سرعتی اطلاق می‌شود که از برگشت دود^۱ به بالادست آتش جلوگیری می‌کند [۱]. از جمله تحقیقات در این زمینه می‌توان به مدل ساخته شده توسط وو و باکار [۲] و آزمایش آتش‌سوزی آن‌ها اشاره کرد. آن‌ها در یک نمونه مقیاس کوچک، به بررسی ۵ تونل با ارتفاع‌های یکسان و عرض‌های متفاوت پرداختند و نتایج متعددی از جمله پروفیل سرعت، کانتور دما و سرعت بحرانی استخراج نمودند. نمودار معروف سرعت بحرانی بی بعد بر حسب نرخ رهایش حرارت^۲ بی بعد آن‌ها از معتبرترین مراجع در زمینه کنترل دود می‌باشد.

در پژوهشی دیگر، لی و همکارانش [۳] آزمایش مشابه با کار وو و باکار طراحی نموده و سرعت بحرانی را برای نرخ‌های رهایش حرارت مختلف به دست آورده‌اند. علاوه بر سرعت بحرانی، طول برگشتی جریان نیز به دقت مورد بررسی قرار گرفت و روابطی برای محاسبه آن استخراج گردید. در یک تحقیق عددی، تایلی و همکارانش [۴] نتایج حاصل از شبیه‌سازی آتش‌سوزی را با داده‌های تجربی مقایسه کرده تا دقت و صحت کد افدي‌اس^۳ در این مورد سنجیده شود. آن‌ها ارتفاع دود از کف در یک آتش‌سوزی منزل مسکونی و سرعت بحرانی در یک آتش‌سوزی تونل را بررسی کردند. تطابق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مشاهده شده و ادعا شده است که در محاسبه سرعت بحرانی از طریق شبیه‌سازی، اگر از انتقال حرارت تشفع شرفنظر شود، نتایج قابل قبول خواهد بود و از طرفی در مدت زمان شبیه‌سازی صرفه‌جویی می‌گردد.

عوامل مختلفی در کنترل دود در تونل‌ها نقش دارند و محققان متعددی به بررسی این عوامل پرداخته‌اند. از جمله می‌توان به پژوهش واکوئلین [۵] اشاره نمود که دود حاصل از آتش‌سوزی در تونل مقیاس ۱ به ۲۰ را به صورت تجربی با استفاده از مخلوط هوا و هلیوم بررسی کرد. وی تأثیر عوامل مختلف مثل هندسه تونل، بعد و موقعیت آتش را بر سرعت بحرانی مورد مطالعه قرار داد. در تحقیق دیگری، لی و ریو [۶] اثر نسبت منظر را بر چگونگی توزیع دمای دود حاصل از آتش‌سوزی به صورت تجربی در تونل با مقیاس ۱ به ۲۰ بررسی کردند. آن‌ها همچنین آتش‌سوزی تونل را با افدي‌اس شبیه‌سازی داده و با نتایج تجربی اعتبارسنجی کردند.

وائوکلین و وو [۷] تأثیر عرض تونل بر سرعت بحرانی تهويه را بررسی کردند. آن‌ها از آزمایش‌های تجربی در مقیاس کوچک و شبیه‌سازی عددی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که اگر نسبت عرض به ارتفاع تونل بیشتر از ۱ باشد، سرعت بحرانی با عرض تونل رابطه معکوس دارد، اما اگر نسبت عرض به ارتفاع تونل کمتر از یک باشد، سرعت بحرانی با عرض تونل رابطه مستقیم دارد. لی و تسای [۸] به بررسی تجربی تأثیر انسداد بر پخش دود در یک تونل مقیاس کوچک پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در صورت وجود انسداد، سرعت بحرانی تقریباً به اندازه انسداد تونل کاهش می‌یابد. در کار تجربی آن‌ها، در مواردی که هوای تهويه به طور مستقیم به آتش

1- Smoke backlayering

2- Heat Release Rate (HRR)

3- Fire Dynamics Simulator (FDS)

است. کسر مخلوط (Z) نشان‌دهنده کسر جرمی تمامی گونه‌های است که از سوخت منشأ می‌گیرند (گونه‌های حاوی اتم کربن) و به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}}Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}}Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S}Y_S \quad (12)$$

۵، تعداد اتم کربن در فرمول سوخت و S ، معرف دوده^۷ می‌باشد. کسر مخلوط یک کمیت پاسیته^۸ است. با استفاده از این تعریف و جمع کردن معادلات پاسیتگی جرم^۹ تمام گونه‌های حاضر در دامنه حل که از سوخت منشأ می‌گیرند، معادله حاکم برای کمیت پاسیته کسر مخلوط، به صورت رابطه (۱۳) حاصل می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Z) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho D \frac{\partial Z}{\partial x_i}) \quad (13)$$

با فیلترگیری مکانی از این معادله، رابطه (۱۴) بدست می‌آید:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{Z})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho D \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i}[\bar{\rho}(\bar{u}_i Z - \bar{u}_i \tilde{Z})] \quad (14)$$

آخرین جمله در سمت راست معادله فوق با استفاده از پخش گردانی و درنظر گرفتن عدد اشمیت^{۱۰} برابر با $0/5$ محاسبه می‌گردد[۱۷]. از حل معادله فوق، مقادیر کسر مخلوط در دامنه حل به دست می‌آیند. کسر مخلوط به صورت ترکیب خطی از کسر جرمی گونه‌ها تعریف می‌گردد، لذا کسر جرمی گونه‌های شرکت‌کننده در دامنه حل نیز به صورت تابعی خطی از کسر مخلوط محاسبه می‌شوند. ارتباط دهنده بین کسر مخلوط و کسر جرمی گونه‌ها، روابط حالت^{۱۱} نامیده می‌شود. روابط حالت برای گاز پروپان در شکل ۱ رسم شده است (در این شکل، کسر جرمی دوده و مونوکسید کربن نزدیک به صفر است و در نمودار مشاهده نمی‌شود). نمودار فوق با درنظر گرفتن مقادیر $2/4$ و $0/5$ درصد برای نرخ تولید^{۱۲} دوده و مونوکسید کربن محاسبه شده است[۲۱]. همچنین نسبت رطوبت^{۱۳} هوای تهويه، 3 درصد درنظر گرفته شده است.

پس از تعیین کسر جرمی گونه‌ها در دامنه حل، نرخ رهایش حرارت ناشی از واکنش شیمیایی نیز در هر سلول محاسباتی از طریق رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد:

$$q_c = \frac{\rho \min(Y_F, V_0 Y_0) \frac{M_0}{M_F}}{\tau} \Delta H \quad (15)$$

که در آن، τ مقیاس زمانی اختلاط می‌باشد:

$$\tau = \frac{C(\delta x \delta y \delta z)^{\frac{2}{3}}}{D_{LES}} \quad (16)$$

ثابت C در رابطه (۱۶) برابر با $1/0$ درنظر گرفته می‌شود[۱۷].

۲-۳- انتقال حرارت تابشی

برای مدل کردن انتقال حرارت تشعشعی، معادله انتقال تابشی^{۱۴} حل می‌گردد. سیال به صورت جذب‌کننده و منتشرکننده تشعشع درنظر گرفته شده و لذا معادله انتقال تابشی به صورت رابطه (۱۷) خواهد بود:

$$s \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = \kappa(x, \lambda) [I_b(x) - I_\lambda(x, s)] \quad (17)$$

7- Soot

8- Conserved

9- Mass conservation

10- Turbulent Schmidt number

11- State relations

12- Yield

13- Humidity ratio

14- Radiation Transport Equation (RTE)

$$\frac{\partial(\bar{\rho}c_p \tilde{T})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}c_p \tilde{u}_i \tilde{T}) = \frac{D\bar{P}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i}(k \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}[-\bar{\rho}c_p (\bar{u}_i T - \bar{u}_i \tilde{T})] + \bar{q}_c + \bar{q}_r \quad (3)$$

$$\bar{P} = \bar{\rho} R T \sum_a \frac{\dot{V}_a}{M W_a} \quad (4)$$

به منظور مدل‌سازی تنش‌های زیرشیکه رینولدزی و شار حرارتی آشفته از مفهوم پخش گردانی استفاده می‌شود:

$$\tau'_{ij} = \rho (\bar{u}_i u_j - \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{1}{3} \tau'_{kk} \delta_{ij} - 2 \mu_t \tilde{S}_{ij} \quad (5)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}) \quad (6)$$

$$(\bar{u}_i T - \bar{u}_i \tilde{T}) = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad (7)$$

عدد پرانتل^۱ در این تحقیق برابر با $0/5$ درنظر گرفته می‌شود[۱۷]. به منظور محاسبه لزجت زیرشیکه از مدل اسمائوینسکی^۲ استفاده و از جمله اول سمت راست معادله (۵) صرف نظر می‌گردد[۱۸]. ثابت C_S نیز برابر $0/2$ درنظر گرفته شده است[۱۷].

$$\mu_t = \bar{\rho} (C_S \Delta)^2 |\tilde{S}| \quad (8)$$

$$\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

در مطالعات مربوط به آتش‌سوزی، تغییر قابل ملاحظه‌ای در چگالی با توجه به تغییرات شدید دما مورد انتظار می‌باشد. از طرف دیگر، سرعت‌های پلوم بالارونده حاصل از اثرات نیروی شناوری در محدوده‌ای است که جریان دارای عدد ماخ^۳ موضعی کوچک می‌باشد[۱۹]. لذا با فرض عدد ماخ کوچک که به معنای حرکت سریع تر موج‌های صوتی از سرعت پلوم دود در دامنه تحت تأثیر آتش می‌باشد، می‌توان فرض کرد که فشار موضعی برابر است با مجموع یک فشار بزرگ پس‌زمینه^۴ (P_m) و افتشارات کوچک فشار^۵ (P^*) ناشی از حرکت پلوم دود.

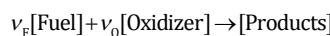
با توجه به کوچک بودن تغییرات فشار ناشی از حرکت پلوم دود، فشار پس‌زمینه تنها تابعی از زمان و ارتفاع (درجه شتاب گرانش)، فرض می‌گردد. لذا تنها تغییرات زمانی فشار پس‌زمینه (و نه فشار افتشاری) در معادلات انرژی و حالت (معادلات (۳) و (۴)) مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۹، ۲۰].

$$P(x, t) = P_m(Z, t) + P^*(x, t) \quad (10)$$

همچنین با توجه به ماهیت آشفته جریان‌های ناشی از آتش‌سوزی، می‌توان از ترم‌های پخش مولکولی نیز در معادلات حاکم (مومنتوم، انرژی و کمیت‌های اسکالر) صرف نظر نمود. با اعمال مجموعه فرضیات بیان شده، در رابطه‌های (۱) الی (۴)، فرم معادلات حاکم بر جریان‌های چگالی متغیر با عدد ماخ پایین^۶ به دست می‌آید[۱۹، ۲۰].

۲-۲- مدل احتراقی

معادله کلی واکنش احتراقی به صورت رابطه (۱۱) درنظر گرفته می‌شود:



برای جلوگیری از محاسبه نرخ مصرف یا تولید تک‌تک گونه‌ها و حل معادله پاسیتگی جرم برای هر یک از آن‌ها، از مدل کسر مخلوط^۷ استفاده شده است.

1- Turbulent Prandtl number

2- Smagorinsky model

3- Mach number

4- Background Pressure

5- The low Mach number assumption

6- Mixture fraction

نشان دهد. پس از تعیین این سرعت تهویه، کانتور دما و غلظت دود کنترل شده تا از عدم نفوذ دود به بالادست اطمینان حاصل شود. در شکل ۲، نمایی از هندسه تونل نشان داده است. شایان ذکر است هندسه کار حاضر مشابه دستگاه آزمایش تجربی لی و همکاران [۳] و یکی از آزمایش‌های وو و باکار [۲] می‌باشد.

۲-۳- شرایط مرزی و شبکه‌بندی

شرط مرزی دیوارهای تونل، «دیوار» فرض شده و انتقال حرارت هدایتی گذرا به محیط بیرون درنظر گرفته شده است. در ورودی تونل، شرط سرعت و در خروجی، شرط فشار اتمسفریک درنظر گرفته شده است. همان‌گونه که تشریح شد، منبع آتش نیز به صورت جرم ورودی از گاز پروپان اعمال شده است. دمای محیط و هوای تهویه، ۲۰ درجه سلسیوس درنظر گرفته شده است. برای تولید شبکه‌بندی مناسب، طول مشخصه‌ای به نام قطر مشخصه آتش^۴ تعریف می‌شود:

$$d^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 T_0 c_p \sqrt{g}} \right)^{1/5} \quad (18)$$

این طول مشخصه تعیین‌کننده اندازه ادیهای بزرگ در پلوم دود و همچنین ارتفاع شعله می‌باشد. این پارامتر معیاری برای تعیین اندازه شبکه حل برای جریان‌های ناشی از شناوری از طریق شبیه‌سازی گردابهای بزرگ می‌باشد. پیشنهاد شده است [۲۵] که این طول با حداقل چهار سلول (بهتر است بیش از هفت سلول) در تمام جهات در نزدیکی آتش جاروب شود. این بدین معنی است که در طول مشخصه بیشتر، با توجه به بزرگ‌تر بودن ادیهای ساختار بزرگ، امکان بزرگ‌تر کردن اندازه شبکه وجود دارد.

برای تعیین شبکه مناسب، علاوه‌بر استفاده از معیار فوق، استقلال حل از شبکه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. استقلال از شبکه برای پروفیل سرعت طولی در ارتفاع تونل و پروفیل دما در طول تونل انجام شده است. این بررسی در کمترین مقدار نرخ رهایش حرارت صورت گرفته است، زیرا آتش کوچک‌تر طبق رابطه (۱۸) به شبکه ریزتری نیازمند است. با بررسی استقلال از شبکه در آتش $0.7/0.7$ کیلووات، مقدار $d^* = 7/5$ تعیین شده است که معادل اندازه 0.7 میلی‌متر برای سلول محاسباتی می‌باشد. شبکه محاسباتی در نزدیک آتش 0.7 متر بالادست و 0.7 متر پایین‌دست) مطابق با اندازه مذکور $(0.7/0.7)$ میلی‌متر) بوده و بیرون از این ناحیه، اندازه شبکه بزرگ‌تر انتخاب شده است. شایان ذکر است که شبکه تولید شده برای آتش $0.7/0.7$ کیلووات، برای مقادیر بزرگ‌تر نرخ رهایش حرارت نیز به کار گرفته شده است.

۳-۳- اعتبارسنجی حل

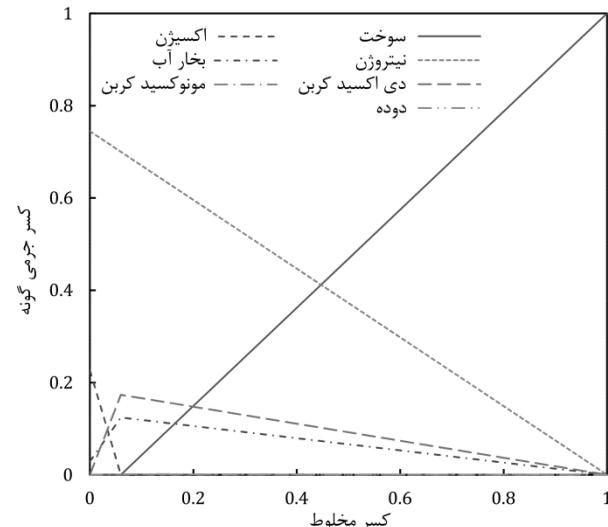
برای بررسی صحت شبیه‌سازی، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی لی و همکاران [۳] و وو و باکار [۲] مورد استفاده قرار گرفته است. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که برای محاسبه سرعت بحرانی، می‌توان از بدون بعدسازی به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) استفاده نمود:

$$Q'' = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g H^5}} \quad (19)$$

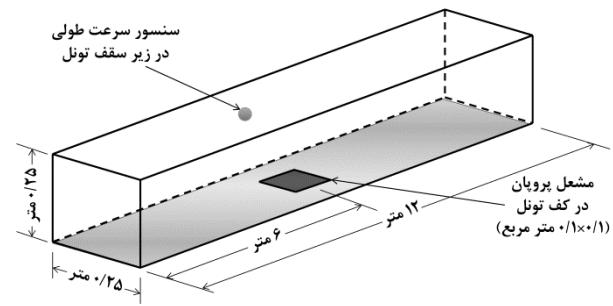
$$V'' = \frac{V_c}{\sqrt{g H}} \quad (20)$$

رابطه پیشنهاد شده توسط لی و همکاران برای سرعت بحرانی بدون بعد بر حسب نرخ رهایش حرارت بدون بعد به صورت رابطه (۲۱) می‌باشد:

4- Characteristic fire diameter



شکل ۱ روابط حالت برای کسر جرمی گونه‌های درگیر در احتراق پروپان. تولید دود و مونوکسید کربن و همچنین رطوبت در هوای ورودی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ هندسه تونل و محل قرارگیری منبع آتش و سنسور سرعت

برای حل این معادله، با توجه به وابستگی آن به طول موج، باید طیف تابشی به تعداد محدودی نوار^۱ تابشی تقسیم و برای هر کدام، معادله مجزایی را حل نمود. در این تحقیق، تنها یک معادله انتقال درنظر گرفته شده است (فرض گاز خاکستری) [۲۳، ۲۲]. همچنین برای حل معادله انتقال، از 100 زاویه^۲ (جهت) برای انگرال گیری استفاده شده است [۲۴].

۳-۴- مدل‌سازی عددی

۳-۴-۱- هندسه تونل

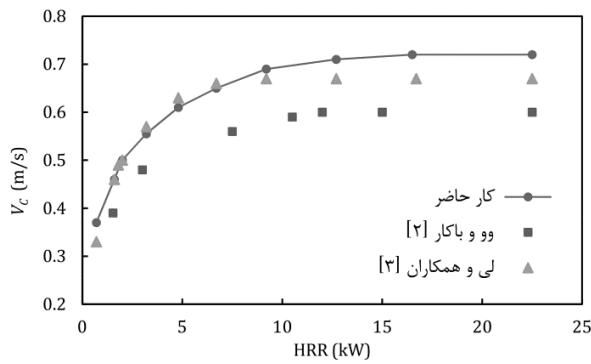
تونل مورد بررسی در این تحقیق، دارای مقطع با ابعاد $0.25 \times 0.25 \times 0.25$ مترمربع و طول 12 متر می‌باشد. دیوارهای تونل از جنس فولاد زنگ‌زن^۳ می‌باشد. منبع آتش، یک مشعل گازی با سوخت خروجی از $100/1$ مترمربع بوده و در میانه تونل و در وسط مقطع قرار گرفته است. دبی جرمی گاز خروجی از مشعل با استفاده از گرمایی احتراق گاز محاسبه شده و به تونل تزریق می‌شود. برای ایجاد شدت آتش بیشتر، دبی جرمی سوخت خروجی از مشعل افزایش می‌یابد.

برای تشخیص وقوع سرعت بحرانی، یک سنسور سرعت در بالای منبع آتش قرار داده شده است تا مؤلفه محوری سرعت را اندازه‌گیری نماید. در صورت برگشت جریان، جهت 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 صفر را

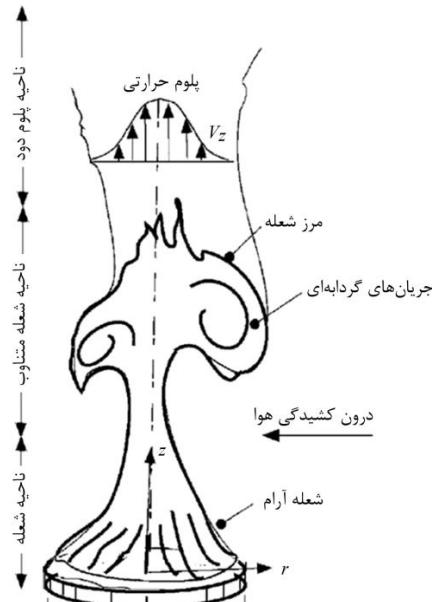
1- Band

2- Solid angle

3- Stainless steel



شکل ۳ سرعت بحرانی حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی



شکل ۴ نواحی مختلف جریان بالای یک منبع آتش [۲۷]

۴- نتایج

با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته و انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، در این بخش تأثیر چهار پارامتر نسبت انسداد، شیب تونل، رطوبت هوای تهويه و محل عرضی آتش بر روی سرعت بحرانی بررسی می‌شود.

۴-۱- اثر نسبت انسداد

اولین پارامتر مورد بررسی، ضریب انسداد می‌باشد. ضریب انسداد به صورت نسبت سطح مقطع عرضی منبع آتش به سطح مقطع عرضی تونل تعريف می‌گردد:

$$\phi = \frac{A_t}{A_L} \quad (۲۳)$$

در این رابطه، A_t سطح مقطع عرضی تونل، A_L سطح مقطع عرضی منبع آتش و ϕ ضریب نسبت انسداد می‌باشد. در کار حاضر، سرعت بحرانی در چهار ضریب انسداد از ۸ الی ۴۸ درصد (شکل ۵) مورد مطالعه قرار گرفته است. سطح مؤثر منبع آتش به گونه‌ای تغییر داده شده که در تمامی حالات مورد بررسی، سرعت سوخت خروجی از مشعل (یا نرخ رهایش حرارت بر واحد سطح) ثابت بماند.

5- Heat Release Rate Per Unit Area (HRRPUA)

$$\begin{cases} V'' = 0.81(Q'')^{1/3}, & Q'' \leq 0.15 \\ V'' = 0.43, & Q'' > 0.15 \end{cases} \quad (۲۱)$$

و و باکار، بهجای ارتفاع (H)، از قطر هیدرولیکی استفاده و رابطه (۲۲) را پیشنهاد نموده‌اند:

$$\begin{cases} V'' = 0.4 \times 0.2^{-1/3}(Q'')^{1/3}, & Q'' \leq 0.2 \\ V'' = 0.4, & Q'' > 0.2 \end{cases} \quad (۲۲)$$

برای تونل تشریح شده در بخش ۱-۳، نرخ رهایش حرارت از ۰/۷ تا ۲۲/۵ کیلووات تغییر و سرعت بحرانی، محاسبه و با نتایج تجربی لی و همکاران و وو و باکار مقایسه شده است. نرخ‌های رهایش حرارت مشابه مقادیر استفاده شده توسط لی و همکاران می‌باشد. نتایج بدست آمده در شکل ۳ ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی وجود دارد. مطالعه عددی، مقادیر سرعت بحرانی را در آتش‌های بزرگ بیشتر پیش‌بینی می‌کند. دلیل اختلاف بین نتایج عددی و تجربی را می‌توان ناشی از مدل توربولانسی مورد استفاده دانست. اول این که شرایط جریان بر روی ثابت مورد استفاده در مدل اسماگورینسکی تائیزگذار است و انتخاب یک مقدار از پیش تعیین شده برای آن می‌تواند باعث میرایی زیاد نوسانات آشفته شود و ایجاد خطای نماید. این امر منجر به آن می‌شود که با وجود انتخاب مناسب اندازه شبکه در نزدیکی دیواره، سرعت جریان در این ناحیه با دقت مناسب محاسبه نمی‌گردد. همچنین در مدل زیرشکنکه اسماگورینسکی، تنها تبادل انرژی از ادی‌های بزرگ به ادی‌های کوچک مورد توجه قرار می‌گیرد و این امر در حالتی که انتقال انرژی در مسیر عکس هم وجود داشته باشد، می‌تواند باعث ایجاد خطای گردد. شایان ذکر است پیش‌بینی بیشتر از مقدار واقعی برای سرعت بحرانی، توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (بخصوص در حالت سرعت فوق بحرانی) [۲۶, ۱۷].

همچنین در شکل ۳، مفهوم سرعت فوق بحرانی به درستی دیده شده است. این مفهوم تأکید می‌کند که رابطه توانی (توان یکسوم در روابط (۲۱) و (۲۲)) تنها در محدوده آتش‌های کوچک برقرار است و بعد از نرخ رهایش حرارت خاصی، سرعت بحرانی تقریباً ثابت می‌ماند. این مفهوم را می‌توان با توجه به نواحی مختلف شعله تشریح کرد. این نواحی در شکل ۴، نشان داده شاند.

جریان بالای یک منبع آتش را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد [۲۷]:

۱- ناحیه شعله: در این ناحیه، شعله به صورت دائم موجود می‌باشد و بیشترین قسمت واکنش شیمیایی در آن به اتجام می‌رسد. در این ناحیه گازهای حاصل از احتراق با دریافت انرژی دارای شتاب مثبت بالارونده هستند.

۲- ناحیه شعله متناوب: در این ناحیه، احتمال اینکه شعله در نقطه‌ای موجود باشد، بیش از ۵۰ درصد است. در این بخش، گازهای صعود کننده دارای سرعت تقریباً ثابتی خواهد بود.

۳- ناحیه پلوم دود: در این ناحیه، گازهای صعود کننده دارای شتاب کاهنده بوده و دمای آن‌ها نیز با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد.

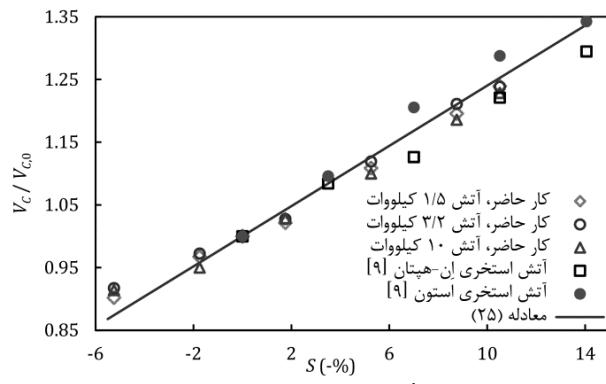
حال می‌توان دلیل ثابت ماندن سرعت تهويه مورد نیاز در محدوده فوق بحرانی را تشریح کرد. با افزایش شدت آتش، ارتفاع شعله نیز افزایش یافته تا این که به سقف برخورد می‌کند. تا قبل از برخورد، افزایش شدت آتش باعث بیشتر شدن سرعت پلوم در زیر سقف می‌گردد. لذا با تجاوز نرخ رهایش حرارت از مقدار بحرانی، افزایشی در سرعت پلوم بالارونده زیر سقف نشده و لذا سرعت بحرانی ثابت می‌ماند [۲۸, ۲].

1- Super critical velocity

2- Flame zone

3- Intermittent flame

4- Buoyant plume



شکل ۷ تأثیر شیب تونل بر مقدار سرعت بحرانی

جدول ۱ مقادیر سرعت بحرانی محاسبه شده در حضور انسداد

سرعت بحرانی (m/s)			
نسبت انسداد، ϕ (%)	آتش ۱/۵ کیلووات	آتش ۳/۲ کیلووات	آتش ۱۰ کیلووات
۰/۷۰	۰/۵۵	۰/۴۶	.
۰/۶۶	۰/۵۲	۰/۴۳	۸
۰/۶۳	۰/۴۹	۰/۴۰	۱۶
۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۳۴	۳۲
۰/۴۱	۰/۳۱	۰/۲۵	۴۸

جدول ۲ مقادیر سرعت بحرانی محاسبه شده در شیب‌های مختلف

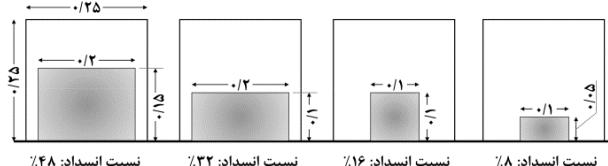
سرعت بحرانی (m/s)			
شیب تونل، S (%)	آتش ۱/۵ کیلووات	آتش ۳/۲ کیلووات	آتش ۱۰ کیلووات
۰/۶۴	۰/۵۰	۰/۴۲	+۵/۳
۰/۶۷	۰/۵۳	۰/۴۵	+۱/۸
۰/۷۰	۰/۵۵	۰/۴۶	بدون شیب
۰/۷۲	۰/۵۶	۰/۴۷	-۱/۸
۰/۷۷	۰/۶۱	۰/۵۱	-۵/۳
۰/۸۳	۰/۶۶	۰/۵۵	-۸/۸
۰/۸۶	۰/۶۸	۰/۵۷	-۱۰/۵

به منظور بررسی کمی تأثیر شیب تونل بر نحوه پخش دود، با درنظر گرفتن تونلی مشابه بخش‌های پیشین، مقدار سرعت بحرانی در نرخ‌های رهایش حرارت مختلف و در محدوده شیب +۵/۳ تا -۱۰/۵ درصد (معادل با شیب +۳ تا -۶ درجه) به کمک شبیه‌سازی عددی برآورد گردیده است. جدول ۲ نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی کیفی تأثیر شیب تونل بر مقدار سرعت بحرانی، شکل ۷ ارائه شده است. مقادیر سرعت بحرانی جدول ۲ بر حسب مقادیر مربوط به تونل بدون شیب بی بعد شده و بر حسب منفی شیب تونل ترسیم شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش اندازه آتش منفی تونل و بدليل اثر دودکشی، سرعت بحرانی تهویه افزایش می‌یابد. علاوه‌بر داده‌های تحقیق حاضر، نتایج تجربی کو و همکارانش [۹] نیز در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل می‌توان بیان نمود که بهمازی هر ۱ درصد تغییر در شیب تونل، ۲/۴ درصد تغییر در مقدار سرعت بحرانی ایجاد می‌شود. این تغییرات را می‌توان به صورت ضریب شیب ارائه نمود:

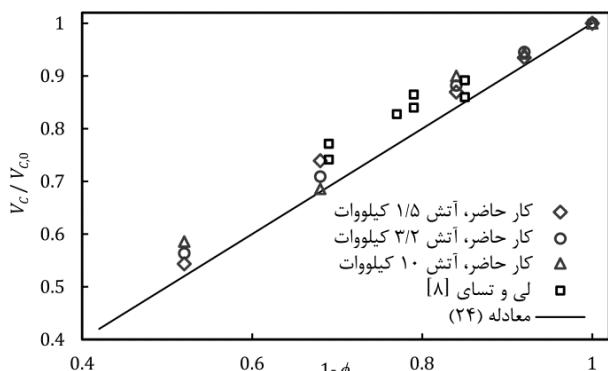
$$\begin{cases} K_S = 1 + (0.024 \times (-S)) \\ \frac{V_c}{V_{c,0}} = K_S \end{cases} \quad (25)$$

که در آن K_S ضریب شیب، V_c و $V_{c,0}$ به ترتیب سرعت بحرانی در حضور شیب و بدون آن می‌باشد. خط $y = 1 + 0.024x$ نیز جهت مقایسه در شکل ۷ ترسیم شده است.



شکل ۵ مقطع عرضی تونل‌های مورد استفاده در بررسی اثر انسداد به همراه اندازه

منبع آتش (بعد از متر)



شکل ۶ تأثیر ضریب انسداد بر مقدار سرعت بحرانی

جدول ۱ نتایج مقادیر سرعت بحرانی در حضور انسداد ناشی از منبع آتش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، سرعت بحرانی با افزایش ضریب انسداد کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب انسداد، سرعت هوای عبوری از روی منبع آتش نیز افزایش می‌یابد و لذا برای آتش یکسان، نیاز به حجم هوای کمتری به منظور جلوگیری از برگشت دود می‌باشد.

به منظور بررسی کیفی تأثیر ضریب انسداد بر کاهش سرعت بحرانی، شکل ۶ ارائه شده است. نتایج جدول ۱ نسبت به حالت بدون انسداد بی بعد شده و به همراه داده‌های تجربی لی و تسای [۸] در این شکل آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش سرعت ناشی از حضور منبع آتش در تونل تناسب مستقیم با ضریب انسداد دارد و این نتیجه در تطابق با نتایج تحقیقات تجربی اوکا و آنکینسون [۲۸] نیز می‌باشد. لذا می‌توان رابطه (۲۴) را به منظور اعمال تأثیر ضریب انسداد بر مقدار سرعت بحرانی ارائه داد:

$$V_c = V_{c,0} (1 - \phi) \quad (24)$$

که در آن، V_c و $V_{c,0}$ به ترتیب سرعت بحرانی در حضور انسداد و در عدم حضور انسداد می‌باشد. شایان ذکر است که خط $y = x$ نیز در شکل ۶ جهت مقایسه ترسیم شده است.

۲-۴ اثر شیب تونل

پارامتر دیگری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، تأثیر شیب تونل بر توزیع دود و سرعت بحرانی تهویه می‌باشد. بدليل چگالی پایین، مهم‌ترین نیرویی که رفتار پلوم دود حاصل از آتش‌سوزی را تعیین می‌نماید، نیروی شناوری است. دود به سبب این نیرو تمایل به حرکت به سمت ارتفاع بالا دارد.

هرگاه ورودی هوای تازه به داخل تونل بالاتر از منبع آتش باشد، شیب تونل منفی و هرگاه منبع آتش بالاتر از ورودی هوای تازه قرار گرفته باشد، شیب تونل خواهد بود. لذا در تونل با شیب مثبت، حرکت دود متتمایل به سمت خواهد بود. اما اگر شیب تونل منفی باشد، دود تمایل به حرکت به سمت ورودی تونل دارد. در این حالت به منظور عدم برگشت دود به بالادست، سرعت تهویه بیشتری مورد نیاز می‌باشد.

در اینجا نیز با فرض کم بودن جرم بخار در مقابل جرم هوای خشک، با افزایش یک درصد نسبت رطوبت، گرمای ویژه 0.08 درصد افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که در دمای‌های بالا، هم ضریب گرمایی ویژه بخار و هم ضریب گرمایی هوای خشک افزایش می‌یابد، ولی درصد فوق با دقت خوبی حفظ می‌شود.

حاصل ضرب چگالی و گرمای ویژه، قابلیت ذخیره انرژی توسط جریان هوای می‌یاشد که در رابطه (19) و همچنین رابطه کندی $[30]$ مشاهده می‌گردد. بر طبق موارد ذکر شده، ظرفیت حرارتی هوا با بالا رفتن رطوبت، کمی افزایش می‌یابد. این افزایش باعث می‌شود که گردایان دمای ناشی از آتشسوزی کم شود و در نتیجه نیروی شناوری تولیدشده کمتر می‌گردد. این موضوع به کاهش سرعت تهویه مورد نیاز جهت جلوگیری از برگشت دود می‌اجتمد. این فرض طبق رابطه کندی (رابطه مورد تأیید استانداردهای انفپی‌ای^۱ و آشر^۲) که با استفاده از روابط یک بعدی انتقال حرارت محاسبه شده است) که فرض می‌کند گرمای حاصل از آتش، هوای تهویه را گرم کرده و باعث ایجاد شناوری در آن می‌گردد، قابل توجیه می‌یابد. کندی رابطه (31) و (32) را ارائه نموده است:

$$V_c = 0.606 K_g \left(\frac{gHQ}{\rho_0 c_p AT} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (31)$$

$$T = \frac{Q}{\rho_0 c_p A V_c} + T_0 \quad (32)$$

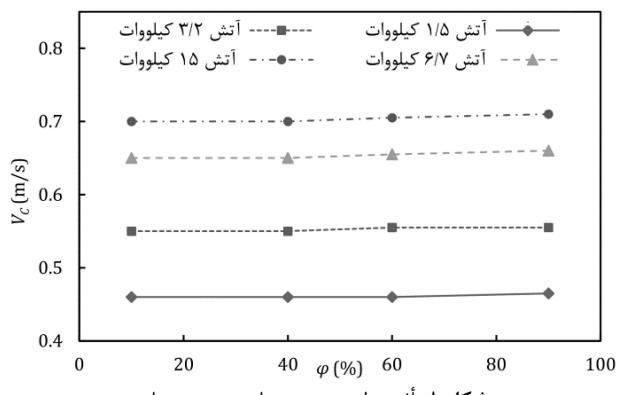
کاهش سرعت بحرانی با افزایش ظرفیت گرمایی در شکل 9 نشان داده شده است. در این شکل، مقادیر سرعت بحرانی با استفاده از رابطه کندی محاسبه شده‌است.

شایان ذکر است که دبی جرمی هوای تهویه در تونل، در حدود 10 الی 100 برابر دبی جرمی محصولات احتراق می‌یابد (این مقدار به بزرگی آتش نسبت به ابعاد تونل بستگی دارد). لذا بخش عمده دود حاصل از آتشسوزی را هوا تشکیل می‌دهد و در نتیجه مشخصات هوای تهویه تأثیر بهسزایی بر پخش دود دارد (این امر در روابط مربوط به سرعت بحرانی توسط محققین پیشین استفاده شده است). با جمع‌بندی موارد، می‌توان دریافت که مشخصات حرارتی هوای ورودی و محصولات احتراق با تغییر رطوبت هوای ورودی تغییر محسوسی نمی‌کند و لذا این پارامتر تأثیر اندکی بر سرعت بحرانی دارد.

نکته قابل توجه، تأثیر رطوبت بر آتش می‌یابد. همان‌گونه که از رابطه (15) مشخص است، غلظت اکسیژن بر نرخ سوزش تأثیرگذار است. با تغییر رطوبت، کسر جرمی اکسیژن تغییر کرده و در نتیجه نرخ تولید حرارت تغییر می‌کند (در نسبت رطوبت 5 درصد، کسر جرمی اکسیژن حدود 1 درصد کاهش می‌یابد که قابل ملاحظه نیست). همان‌گونه که در شکل 1 نیز به‌چشم می‌خورد، هوای ورودی (کسر مخلوط برابر صفر) دارای اندکی بخار می‌یابد. با توجه به موارد فوق می‌توان دریافت که رطوبت موجود در هوا، تأثیر چندانی بر مشخصات حرارتی سیال و واکنش احتراق سوخت ندارد و لذا این پارامتر بر پخش دود و سرعت بحرانی تأثیرگذار نیست.

۴-۴- اثر محل عرضی آتش در مقطع تونل

در تحقیقات پیشین در زمینه آتشسوزی تونل‌ها، آتش عموماً در مرکز مقطع تونل قرار داشته است. حال آن‌که حریق می‌تواند در نزدیکی دیواره تونل رخ دهد. در این بخش، تأثیر این پارامتر یعنی فاصله عرضی آتش تا دیواره تونل بررسی می‌گردد. هندسه تونل مشابه بخش‌های پیشین می‌یابد، با این تفاوت



شکل ۸ تأثیر رطوبت نسبی هوا بر سرعت بحرانی

۴-۳- اثر رطوبت هوای ورودی

پارامتر دیگری که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است، رطوبت هوای تهویه است. برای بررسی تأثیر این پارامتر بر عملکرد سیستم تهویه طولی، هوای کامل‌خشک تا هوا کاملاً مربوط به عنوان هوا تهווیه وارد تونل شده است. رطوبت نسبی به عنوان معیار برای مقدار رطوبت موجود در هوا مورد استفاده قرار گرفته است. رطوبت نسبی هوای ورودی از 0 تا 90 درصد تغییر نموده است.

نتایج تغییر سرعت بحرانی با تغییر رطوبت برای اندازه‌های مختلف آتش و دمای هوای ورودی 45 درجه سلسیوس در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش رطوبت نسبی، تغییر کوچکی در مقدار سرعت بحرانی رخ می‌دهد. برای تشریح دقیق‌تر نتایج فوق، مشخصات ترمودینامیکی هوای ورودی بررسی می‌گردد.

مقدار جرم بخار موجود در هوا، تأثیر مستقیم بر مشخصات مخلوط هوا و بخار دارد و لذا با تغییر مقدار بخار آب در هوا، چگالی و گرمای ویژه مخلوط تغییر می‌کند^[29]. این دو پارامتر، در رابطه (19) به‌چشم می‌خوند و بر مقدار سرعت بحرانی تأثیر می‌گذارند. نسبت رطوبت^۱ (یا نسبت جرم بخار آب به جرم هوای خشک) در دمای‌ها و رطوبت‌های نسبی مختلف محاسبه شده است. محاسبه نشان می‌دهد که درصد جرمی بخار اندک بوده و در دمای 45 درجه سلسیوس و رطوبت 90 درصد در حدود 6 درصد می‌باشد.

چگالی یک مخلوط با استفاده از روابط (26) و (27) محاسبه می‌گردد:

$$\rho_{\text{mix}} = \frac{P}{R_{\text{mix}} T} \rightarrow \frac{\rho_{\text{mix}}}{\rho_1} = \frac{R_{\text{mix}}}{R_1} \quad (26)$$

$$R_{\text{mix}} = Y_1 R_1 + Y_2 R_2 \quad (27)$$

لذا چگالی هوای تر (مخلوط هوای خشک و بخار آب) را می‌توان محاسبه نمود:

$$\frac{\rho_{\text{wet}}}{\rho_{\text{dry}}} = \frac{R_{\text{dry}}}{R_{\text{wet}}} = \frac{R_{\text{dry}}}{\frac{1}{1+\omega} R_{\text{dry}} + \frac{\omega}{1+\omega} R_{\text{vapor}}} \quad (28)$$

با توجه به این که نسبت رطوبت (ω) در مقایسه با واحد کوچک می‌یابد، چگالی هوای مربوط به‌ازای هر درصد جرمی رطوبت، طبق رابطه (28) ، 0.6 درصد کاهش می‌یابد.

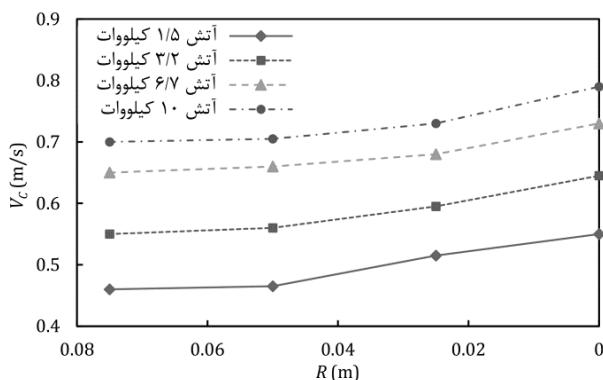
گرمای ویژه (جرمی) یک مخلوط، از رابطه (29) محاسبه می‌گردد:

$$c_{p,\text{mix}} = Y_1 c_{p,1} + Y_2 c_{p,2} \quad (29)$$

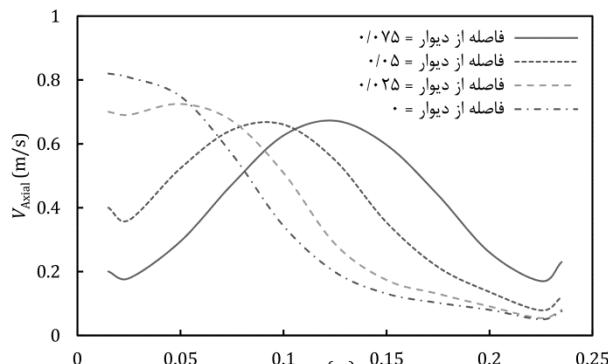
لذا گرمای ویژه هوای تر برابر است با:

$$\frac{c_{p,\text{wet}}}{c_{p,\text{dry}}} = \frac{\frac{1}{1+\omega} c_{p,\text{dry}} + \frac{\omega}{1+\omega} c_{p,\text{vapor}}}{c_{p,\text{dry}}} = 1 + \frac{\omega}{1+\omega} \left(\frac{c_{p,\text{vapor}}}{c_{p,\text{dry}}} - 1 \right) \quad (30)$$

1- Humidity ratio



شکل ۱۱ اثر محل عرضی وقوع آتش‌سوزی بر سرعت بحرانی



شکل ۱۲ تغییر سرعت طولی جبهه دود در عرض تونل برای چهار حالت آتش‌سوزی. شدت آتش ۱/۵ کیلووات بوده و تونل دارای تهویه طبیعی می‌باشد.

کانتور سرعت محوری نیز برای دو حالت آتش در مرکز و آتش در کنار دیوار برای مقطع عرضی قبل از آتش در شکل ۱۳ ارائه شده است. این کانتورها نیز مؤید مطالعه تشریح شده می‌باشند و افزایش سرعت طولی جبهه دود را نشان می‌دهند. شایان ذکر است که نتایج نمودارهای فوق (شکل ۱۲ و شکل ۱۳) مربوط به آتش ۱/۵ کیلووات و در حالت تهویه طبیعی (بدون تهویه طولی) می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

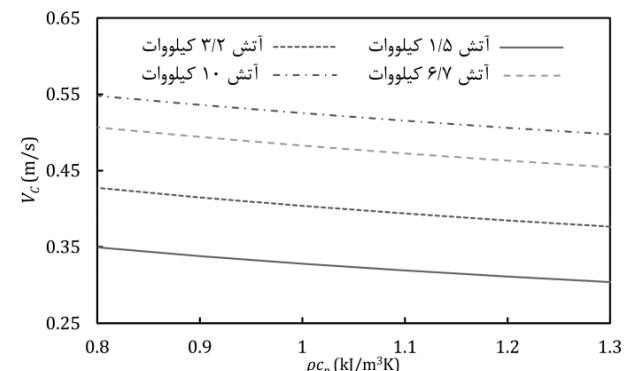
در این تحقیق، تأثیر چهار پارامتر مهم بر پخش دود و سرعت بحرانی در تونل‌های دارای سیستم تهویه طولی بررسی شده است. مطالعه به صورت عددی و بر روی یک تونل مقیاس کوچک انجام شده است. منحنی‌های ارائه شده به دقت بررسی شده و با ارائه توصیف فیزیکی برای پدیده‌ها، سعی در تشریح کامل نتایج شده است. برای اعتبارسنجی مدل و روند حل عددی، نتایج در ابتدا با داده‌های تجربی معروف مقایسه و تطابق مناسبی مشاهده گردیده است. پارامترهای بررسی شده در این تحقیق، جزء مواردی است که کمتر مورد توجه سایر محققان قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که سه پارامتر انسداد منبع آتش، شب تونل و فاصله آتش تا دیواره تونل اهمیت زیادی داشته، ولی روابط نسبی هوای ورودی تأثیر زیادی بر سرعت بحرانی ندارد. مقدار سرعت بحرانی رابطه معکوسی با انسداد منبع آتش دارد و مقدار کاهش تقریباً برابر نسبت انسداد است. علت این امر، افزایش موضعی سرعت هوای در عبور از روی آتش می‌باشد. در تونل‌های با شب منفی (ورودی هوای در ارتفاع بالاتر نسبت به آتش)، افزایش ۱ درصدی شب به افزایش ۲/۴ درصدی سرعت هوای مورد نیاز بر جلوگیری از پخش دود منجر می‌شود. این مقدار به صورت ضریب شب در روابط مربوط به سرعت بحرانی اعمال شده است. افزایش سرعت بحرانی به علت تمایل دود برای حرکت به سمت بالادست آتش در اثر نیروی شناوری می‌باشد.

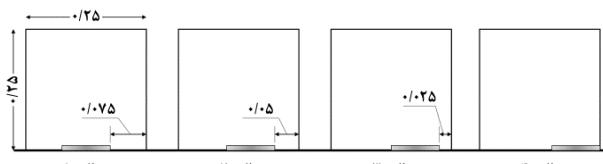
که محل مشغل پروپان از مرکز مقطع تونل به سمت دیواره حرکت داده می‌شود. در شکل ۱۰، شماتیکی از مقطع تونل و محل عرضی آتش نشان داده شده است. برای مطالعه این اثر، ۴ حالت تعریف شده است که در حالت ۱، آتش در وسط تونل قرار داشته و در حالت ۴، آتش در کنار دیواره تونل رخ می‌دهد.

نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن محل آتش‌سوزی به دیوار، سرعت بحرانی افزایش می‌یابد. البته با افزایش شدت آتش، تأثیر نسبی دیواره کمتر شده است. میزان افزایش سرعت بحرانی در آتش‌های کوچک‌تر حدود ۲۰ درصد و برای آتش‌های بزرگ‌تر، حدود ۱۵-۱۰ درصد محسوبه شده است. نتیجه فوق، در تطابق با مشاهدات هو و همکارانش [۱۲] می‌باشد. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی به این نتیجه رسیدند که سرعت بحرانی در آتش‌سوزی نزدیک به دیواره ۱ تا ۱/۱۸ برابر سرعت بحرانی در آتش‌سوزی در مرکز تونل می‌باشد. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که با افزایش شدت آتش، مقدار افزایش سرعت بحرانی برای آتش کنار دیواره کاهش می‌یابد و مقدار افزایش در نزدیکی رهایش حرارت بزرگ، حدود ۲ درصد می‌باشد. آن‌ها ضریب افزایش را با استفاده از روابط تحلیلی ۱/۲۶ تخمین زده بودند.

دلیل افزایش سرعت بحرانی را می‌توان به نحوه پخش پلوم دود در زیر سقف جستجو کرد. در نزدیک دیوار، پلوم دود پس از برخورد به سقف، تنها اجازه حرکت به یک سمت را دارد و به جای دایره، می‌باشیستی در یک نیم‌دایره پخش گردد. از طرف دیگر، پلوم دود از سمت دیوار امکان درون کشیدگی^۱ را نداشته و لذا مقدار هوای درون کشیده شده توسط پلوم کمتر می‌باشد. در نتیجه دمای پلوم و همچنین سرعت بالا رونده آن بیشتر بوده که این خود به افزایش سرعت جبهه دود پس از برخورد به سقف کمک می‌نماید. این پدیده در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. در این شکل، تغییرات سرعت طولی جبهه دود در عرض تونل نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، با نزدیک شدن آتش به سمت دیواره، سرعت بیشینه جبهه دود نیز افزایش می‌یابد. البته سرعت متوسط در تمامی حالات تقریباً برابر است که به معنای یکسان بودن دبی دود تولیدی می‌باشد.

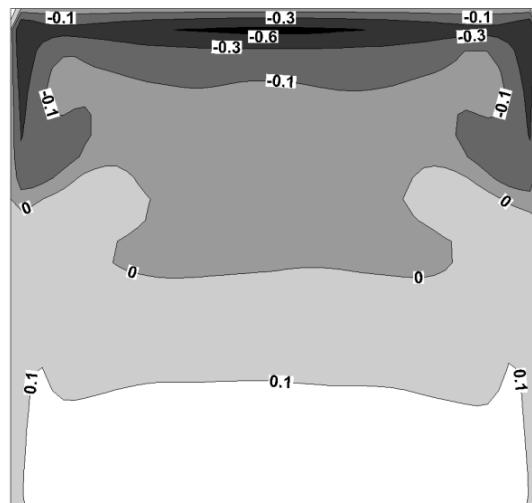


شکل ۹ کاهش سرعت بحرانی با افزایش ظرفیت حرارتی هوای تهویه (مقادیر از رابطه‌ی کنندی [۳۰] برای تونل ۰/۲۵×۰/۲۵ متر مربعی محاسبه شده‌اند).

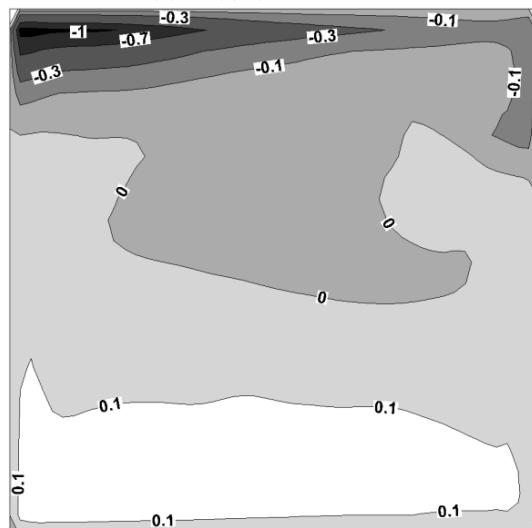


شکل ۱۰ هندسه‌های مورد استفاده در بررسی اثر محل عرضی آتش (ابعاد به متر)

ضریب نفوذپذیری ($m^2 s^{-1}$)	D
شتاب گرانش (ms^{-2})	g
ارتفاع تونل (m)	H
آنالپی احتراق ($kJ kg^{-1}$)	ΔH
چشممه نشر انرژی تشتعشی ($W m^{-2}$)	I_b
شدت تابش در طول موج λ ($W m^{-2}$)	I_λ
ضریب شیب	K_s
جرم مولکولی ($gr mol^{-1}$)	MW
فشار (Pa)	P
فشار پسزینه (Pa)	P_m
فشار اغتشاشی (Pa)	P^*
عدد پرانتل	Pr
نرخ رهایش حرارت منبع آتش (kW)	Q
نرخ رهایش حرارت بدون بعد شده	Q''
نرخ رهایش حرارت واکنش شیمیایی بر واحد حجم ($W m^{-3}$)	q_c
نرخ جذب خالص حرارت تشتعشی ($W m^{-3}$)	q_r
ثبت جهانی گازها ($J mol^{-1} K^{-1}$)	$(^1)R$
فاصله آتش از مرکز (m)	$(^3)R$
بردار جهت شدت تابش	s
شیب (%)	S
نسبت استوکیومتری	S^*
تансور کرنش (s^{-1})	S_{ij}
عدد اشمیت	Sc
زمان (s)	t
دما (K)	T
سرعت (ms^{-1})	u_i
سرعت بحرانی بدون بعد شده	V''
سرعت بحرانی (ms^{-1})	V_C
سرعت بحرانی در حالت پایه (بدون شیب یا انسداد)	$V_{C,0}$
بردار مختصات مکان (m)	x
مؤلفه‌های مختصات کارتزین (m)	z
تعداد اتم‌های کربن در مولکول سوخت	$(^1)x$
کسر جرمی گونه ($kg kg^{-1}$)	Y
کسر مخلوط ($kg kg^{-1}$)	Z
علایم یونانی	
پهنهای فیلتر (m)	Δ
ضریب موضعی جذب تابشی (m)	κ
طول موج (m)	λ
لزجت دینامیکی ($kg m^{-1} s^{-1}$)	μ
چگالی ($kg m^{-3}$)	ρ
ثبت استغان-بولترمن ($W m^{-2} K^{-4}$)	σ
طول مقیاس زمانی اختلاط (s)	τ
تансور تنفس (Pa)	τ_{ij}
تансور تنفس زیر شبکه (Pa)	τ_{ij}
درصد انسداد	$(^1)\phi$
رطوبت نسبی (%)	$(^3)\phi$
نسبت رطوبت ($kg kg^{-1}$)	ω



(الف) حالت ۱ (آتش در وسط تونل)



(ب) حالت ۴ (آتش چسبیده به دیوار)

شکل ۱۳ کانتور مؤلفه سرعت طولی (متر بر ثانیه) در مقطع عرضی تونل. شدت آتش ۱/۵ کیلووات بوده و تونل دارای تهویه طبیعی می‌باشد.

روطوبت نسبی تغییر محسوسی در پخش دود نداشته و با توجه به افزایش انک ظرفیت ذخیره حرارتی هوای ورودی، مقدار سرعت بحرانی را کمی کاهش می‌دهد. مطالعه محل آتش‌سوزی نشان داده است که با نزدیک شدن آتش به دیواره تونل، سرعت بحرانی افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان به سرعت بالاتر جبهه دود در زیر سقف برای آتش‌های نزدیک دیواره مربوط دانست که این امر خود به علت تفاوت در درون کشیدگی و پخش دود در زیر سقف می‌باشد. میزان افزایش سرعت بحرانی برای آتش کنار دیوار نسبت به آتش در مرکز، برای آتش‌های کوچک حدود ۲۰ درصد و برای آتش‌های بزرگ حدود ۱۵-۱۰ درصد می‌باشد.

۶- فهرست علائم

سطح مقطع عرضی منبع (m^2)	A_L
سطح مقطع عرضی تونل (m^2)	A_t
ظرفیت گرمایی ($J kg^{-1} K^{-1}$)	c_p
ثبت اسموگرانسکی	C_S
قطر مشخصه آتش	d^*

- [13] L. Hu, R. Huo, W. Chow, Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, No. 8, pp. 1468-1483, 2008.
- [14] 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*, Vol. 22, No. 1, pp. 45-70, 2012.
- [15] J. S. Roh, H. S. Ryoo, D. H. Kim, W. S. Jung, Y. J. Jang, Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 262-271, 2007.
- [16] L. H. Hu, F. Tang, D. Yang, S. Liu, R. Huo, Longitudinal distributions of CO concentration and difference with temperature field in a tunnel fire smoke flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 13, pp. 2844-2855, 2010.
- [17] E. Kim, J. P. Woycheese, N. A. Dembsey, Fire dynamics simulator (version 4.0) simulation for tunnel fire scenarios with forced, transient, longitudinal ventilation flows, *Fire Technology*, Vol. 44, No. 2, pp. 137-166, 2008.
- [18] G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, K. Mazaheri, Evaluation of induced-flow in two-room compartment fire using large eddy simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 74-85, 2013. (In Persian)
- [19] R. G. Rehm, H. R. Baumt, The equations of motion for thermally driven, buoyant flows, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 83, No. 3, pp. 297-308, December, 1978.
- [20] K. B. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, a. et, *Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical reference guide*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, pp. 2010.
- [21] A. Tewarson, *Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires*, in: *SFPE handbook of fire protection engineering*, Eds., Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002.
- [22] Y. Ferng, C. Lin, Investigation of appropriate mesh size and solid angle number for CFD simulating the characteristics of pool fires with experiments assessment, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 4, pp. 816-822, 2010.
- [23] C. Lin, Y. Ferng, W. Hsu, Investigating the effect of computational grid sizes on the predicted characteristics of thermal radiation for a fire, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 11, pp. 2243-2250, 2009.
- [24] G. Severino, J. Elicer-Cortés, A. Fuentes, Characterization of a diffusion flame inside a scale tunnel using double stream-twin jets air curtains, *Fire Safety Journal*, Vol. 62, pp. 264-271, 2013.
- [25] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, a. et, *Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, pp. 2010.
- [26] L. Li, X. Cheng, Y. Cui, S. Li, H. Zhang, Effect of blockage ratio on critical velocity in tunnel fires, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 30, No. 5, pp. 413-427, 2012.
- [27] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [28] Y. Oka, G. T. Atkinson, Control of smoke flow in tunnel fires, *Fire Safety Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 305-322, 1995.
- [29] O. Cramer, The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 93, No. 5, pp. 2510-2516, 1993.
- [30] W. D. Kennedy, J. A. Gonzalez, J. Sanchez, Derivation and application of the SES critical velocity equations, *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Air-Conditioning Engineers*, Vol. 102, pp. 40-44, 1996.

بالانویس‌ها

كمیت متوسط با متوسط‌گیری فاور	~
كمیت فیلتر‌گیری شده	-

زیرنویس‌ها

شرابط هوای اتمسفری	∞
هوای خشک	dry
سوخت	F
مخلوط	mix
اکسیدکننده	0
دوهد	S
آشفته	t
هوای مرطوب	wet

-مراجع-

- [1] ASHRAE, *Chapter 13, Enclosed Vehicular Facilities*, in: ASHRAE, *HVAC Applications 2007*, Eds., Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, 2007.
- [2] Y. Wu, M. Z. A. Bakar, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity, *Fire Safety Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 363-390, 2000.
- [3] Y. Z. Li, B. Lei, H. Ingason, Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, *Fire Safety Journal*, Vol. 45, No. 6-8, pp. 361-370, 2010.
- [4] N. Tilley, P. Rauwoens, B. Merci, Verification of the accuracy of CFD simulations in small-scale tunnel and atrium fire configurations, *Fire Safety Journal*, Vol. 46, No. 4, pp. 186-193, 2011.
- [5] O. Vauquelin, Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an "air-helium reduced scale model": Principle, limitations, results and future, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 171-178, 2008.
- [6] S. R. Lee, H. S. Ryoo, An experimental study of the effect of the aspect ratio on the critical velocity in longitudinal ventilation tunnel fires, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 23, No. 2, pp. 119-138, 2005.
- [7] O. Vauquelin, Y. Wu, Influence of tunnel width on longitudinal smoke control, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, No. 6, pp. 420-426, 2006.
- [8] Y. P. Lee, K. C. Tsai, Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels, *Fire Safety Journal*, Vol. 53, pp. 35-42, 2012.
- [9] G. H. Ko, S. R. Kim, H. S. Ryoo, An experimental study on the effect of slope on the critical velocity in tunnel fires, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 28, No. 1, pp. 27-47, 2010.
- [10] K. C. Tsai, H. H. Chen, S. K. Lee, Critical ventilation velocity for multi-source tunnel fires, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No. 10-11, pp. 650-660, 2010.
- [11] H. Bozorgasareh, A. Sojoudi, H. Afshin, B. Farhanieh, A study on effect of fire source geometry on critical velocity in tunnels with longitudinal ventilation, in *3rd National Ventilation and Hygiene Conference*, Tehran, Iran, 2012. (In Persian)
- [12] L. Hu, W. Peng, R. Huo, Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 150, No. 1, pp. 68-75, 2008.