



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

علی کاظمی‌پور^۱، مهیار پورقاسمی^۲، حسین افشین^{۳*}، بیژن فرحانیه^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
 * تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، afshin@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: ۱۵ آذر ۱۳۹۲
 پذیرش: ۱۲ بهمن ۱۳۹۲
 ارائه در سایت: ۲۴ خرداد ۱۳۹۳
 کلید واژگان:
 سرعت بحرانی تهویه
 نسبت انسداد
 شیب تونل
 محل عرضی آتش
 رطوبت نسبی

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 نرخ‌های رهش گرمای مختلف محاسبه شده که تطابق مناسبی را با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی مقیاس کوچک نشان می‌دهد. در ادامه، تأثیر ضریب انسداد و محل عرضی منبع آتش، شیب تونل و رطوبت نسبی هوای تهویه بر مقدار سرعت بحرانی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حضور انسداد منبع آتش، کاهش تقریباً معادل نسبت انسداد در سرعت بحرانی رخ می‌دهد. در بررسی سرعت بحرانی در تونل شیب‌دار مشاهده شده است که به ازای هر یک درصد شیب منفی تونل، حدود ۲/۴ درصد به هوای تهویه مورد نیاز افزوده می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که رطوبت نسبی هوا 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.

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.

۱- مقدمه

با آتش‌سوزی است. اما هزینه‌های بسیار هنگفت آن، محققان را به سمت آزمایش در مقیاس واقعی، مطمئن‌ترین روش برای مطالعه پدیده‌های مرتبط ساخت مدل در مقیاس کوچک‌تر و آزمایش بر روی آن سوق داده است.

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نمی‌رسید، افزایش سرعت بحرانی مشاهده شد که به دلیل افزایش شدت آتش استخری 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 افدی‌اس، به بررسی عددی اثر هم‌زمان چند منبع آتش بر سرعت بحرانی تهویه 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 تهویه 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 مربعی اتفاق نمی‌افتد. هو و همکارانش [۱۲] آتش در کنار دیواره تونل را با استفاده از افدی‌اس 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 تهویه طولی اضطراری در داخل تونل‌ها پرداخته شده و این تأثیرات به طور کمی و کیفی تشریح می‌گردد.

۲- معادلات حاکم

از نرم‌افزار منبع‌باز افدی‌اس برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی در تحقیق حاضر استفاده شده است. این کد توسط مؤسسه ملی فناوری و استانداردهای ایالات متحده آمریکا^۴ 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 افدی‌اس در شبیه‌سازی‌ها توسط محققان زیادی به اثبات رسیده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات هو و همکاران [۱۳]، چالاسانی و همکاران [۱۴]، روه 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^۵ (برای دخیل کردن اثرات چگالی) به صورت روابط (۱) الی (۴) می‌باشد:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j) = 0 \quad (1)$$

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

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 به‌دست آورده‌اند. با پیشرفت قدرت محاسباتی در سال‌های اخیر، روش‌های عددی نیز پرکاربرد شده‌اند و تحقیقات فراوانی مرتبط با شبیه‌سازی در ادبیات فنی به چشم می‌خورد.

یکی از کمیت‌های مورد بررسی، سرعت بحرانی است که جزو مهم‌ترین مشخصه‌ها در مبحث تهویه 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 بی‌بعد برحسب نرخ رهایش حرارت^۲ بی‌بعد آن‌ها از معتبرترین مراجع در زمینه کنترل دود می‌باشد.

در پژوهشی دیگر، لی و همکارانش [۳] آزمایشی مشابه با کار وو و باکار طراحی نموده و سرعت بحرانی را برای نرخ‌های رهایش حرارت مختلف به‌دست آوردند. 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، تاپلی و همکارانش [۴] نتایج حاصل از شبیه‌سازی آتش‌سوزی را با داده‌های تجربی مقایسه کرده تا دقت و صحت کد افدی‌اس^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 تشعشع صرف‌نظر 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 واکونلین [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، ابعاد 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 افدی‌اس شبیه‌سازی عددی و با نتایج تجربی اعتبارسنجی کردند.

واوکلین و وو [۷] تأثیر عرض تونل بر سرعت بحرانی تهویه 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 تهویه به طور مستقیم به آتش

1- Smoke backlayering
2- Heat Release Rate (HRR)
3- Fire Dynamics Simulator (FDS)

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

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

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

x ، تعداد اتم کربن در فرمول سوخت و S ، معرف دوده^۷ می‌باشد. کسر مخلوط یک کمیت پایسته^۸ است. با استفاده از این تعریف و جمع کردن معادلات پایستگی جرم^۹ تمام گونه‌های حاضر در دامنه حل که از سوخت منشأ می‌گیرند، معادله حاکم برای کمیت پایسته کسر مخلوط، به‌صورت 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) به‌دست می‌آید:

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

آخرین جمله در سمت راست معادله فوق با استفاده از پخش گرادیانی و در نظر گرفتن عدد اشمیت^{۱۰} برابر با ۰/۵ محاسبه می‌گردد[۱۷]. از حل معادله فوق، مقادیر کسر مخلوط در دامنه حل به‌دست می‌آیند. کسر مخلوط به‌صورت ترکیب خطی از کسر جرمی گونه‌ها تعریف می‌گردد، لذا کسر جرمی گونه‌های شرکت‌کننده در دامنه حل نیز به‌صورت تابعی خطی از کسر مخلوط محاسبه می‌شوند. ارتباط‌دهنده 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 در نظر گرفتن مقادیر ۲/۴ و ۰/۵ درصد برای نرخ تولید^{۱۲} دوده و مونوکسید کربن محاسبه شده است [۲۱]. هم‌چنین نسبت رطوبت^{۱۳} هوای تهویه، ۳ درصد در نظر 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:

$$q_c = \frac{\rho \min(Y_F, \nu_0 Y_O) \frac{M_O}{M_F}}{\tau} \Delta H \quad (15)$$

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 ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

۲-۳- انتقال حرارت تابشی

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

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

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

$$\bar{P} = \bar{\rho} R \bar{T} \sum_{\alpha} \frac{\bar{Y}_{\alpha}}{MW_{\alpha}} \quad (4)$$

به‌منظور مدل‌سازی تنش‌های زیرشبکه رینولدزی و شار حرارتی آشفته از مفهوم پخش گرادیانی استفاده می‌شود:

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

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

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

عدد پرناتل^۱ در این تحقیق برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. به‌منظور محاسبه لزجت زیرشبکه از مدل اسماکورینسکی^۲ استفاده و از جمله اول سمت راست معادله (۵) صرف‌نظر می‌گردد [۱۸]. ثابت C_s نیز برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است [۱۷].

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

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

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 سریع‌تر 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 اغتشاشات کوچک فشار (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 (در جهت شتاب گرانش) فرض می‌گردد. لذا تنها تغییرات زمانی فشار پس‌زمینه (و نه فشار اغتشاشی) 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 (مومنوم، انرژی و کمیت‌های اسکالر) صرف‌نظر نمود. با اعمال مجموعه فرضیات بیان شده، در رابطه‌های (۱) الی (۴)، فرم معادلات حاکم بر جریان‌های چگالی متغیر با عدد ماخ پایین^۵ به‌دست می‌آید [۱۹، ۲۰].

۲-۲- مدل احتراقی

معادله کلی واکنش احتراقی به‌صورت رابطه (۱۱) در نظر گرفته می‌شود:



برای جلوگیری از محاسبه نرخ مصرف یا تولید تک‌تک گونه‌ها و حل معادله پایستگی جرم برای هر یک از آن‌ها، از مدل کسر مخلوط^۶ استفاده شده است.

7- Soot
8- Conserved
9- Mass conservation
10- Turbulent Schmidt number
11- State relations
12- Yield
13- Humidity ratio
14- Radiation Transport Equation (RTE)

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 شده 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 دیواره‌های تونل، «دیوار» فرض شده و انتقال حرارت هدایتی گذرا به محیط بیرون در نظر گرفته شده است. در ورودی تونل، شرط سرعت و در خروجی، شرط فشار اتمسفریک در نظر 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 در نظر گرفته شده است.

برای تولید شبکه‌بندی مناسب، طول مشخصه‌ای به نام قطر مشخصه آتش^۴ تعریف می‌شود:

$$d^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (18)$$

این طول مشخصه تعیین‌کننده اندازه‌های 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 گردابه‌های 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، علاوه بر 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 ۰/۷ کیلووات، مقدار d^*/dx برابر ۷/۵ تعیین شده است که معادل اندازه ۰/۷ میلی‌متر برای سلول محاسباتی می‌باشد. شبکه محاسباتی در نزدیک آتش (۲ متر بالادست و ۲ متر پایین دست) مطابق با اندازه مذکور (۰/۷ میلی‌متر) بوده و بیرون از این ناحیه، اندازه شبکه بزرگتر انتخاب شده است. شایان ذکر است که شبکه تولید شده برای آتش ۰/۷ کیلووات، برای مقادیر بزرگ‌تر نرخ رهایش حرارت نیز به کار گرفته شده است.

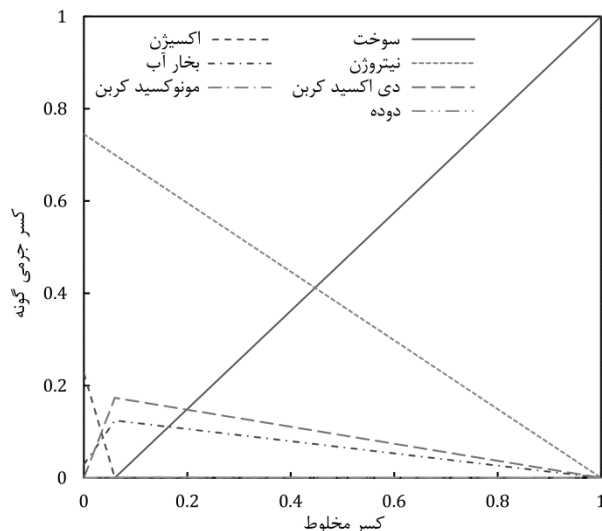
۳-۳- اعتبارسنجی حل

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:

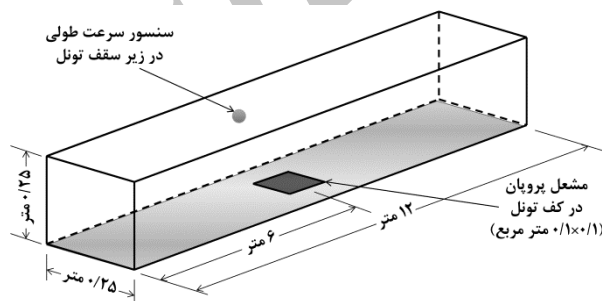
$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{gH^5}} \quad (19)$$

$$V^* = \frac{V_c}{\sqrt{gH}} \quad (20)$$

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



شکل ۱ روابط حالت برای کسر جرمی گونه‌های درگیر در احتراق پروپان. تولید دوده 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 در نظر گرفته شده است (فرض گاز خاکستری) [۲۲، ۲۳]. همچنین برای حل معادله انتقال، از زاویه^۲ جهت) برای انگرال گیری استفاده شده است [۲۴].

۳- مدل سازی عددی

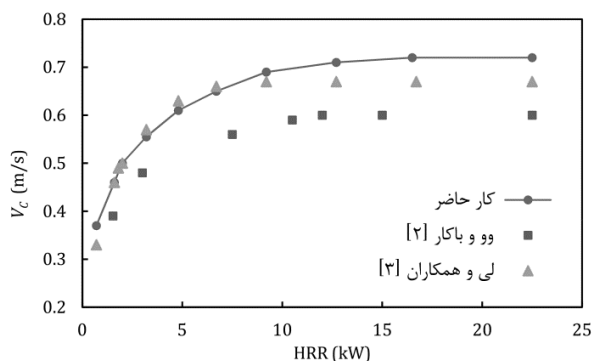
۳-۱- هندسه تونل

تونل مورد بررسی در این تحقیق، دارای مقطع با ابعاد ۰/۲۵×۰/۲۵ مترمربع و طول ۱۲ متر می‌باشد. دیواره‌های تونل از جنس فولاد زنگ‌نزن^۳ می‌باشد. منبع آتش، یک مشعل گازی با سوخت پروپان با ابعاد ۰/۱×۰/۱ مترمربع بوده و در میانه تونل و در وسط مقطع قرار گرفته است. دبی جرمی گاز خروجی از مشعل با استفاده از گرمای احتراق گاز محاسبه شده و به تونل تزریق می‌شود. برای ایجاد شدت آتش بیشتر، دبی جرمی سوخت خروجی از مشعل افزایش می‌یابد.

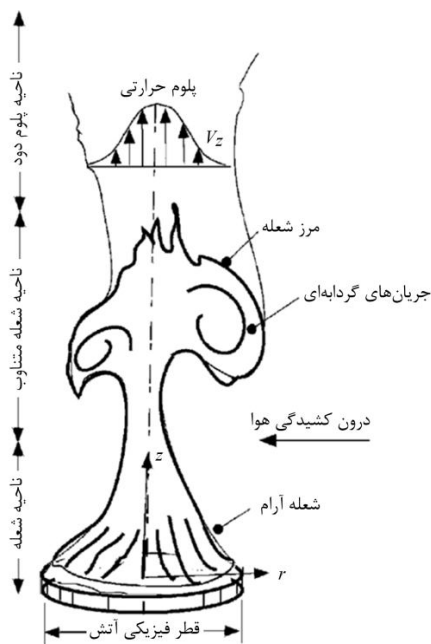
برای تشخیص وقوع سرعت بحرانی، یک سنسور سرعت در بالای منبع آتش قرار داده شده است تا مؤلفه محوری سرعت را اندازه‌گیری نماید. در صورت برگشت جریان، جهت سرعت به سمت بالادست می‌باشد. در حالت بحرانی، این سنسور باید سرعت تقریباً صفر را نشان دهد. لذا با تغییر مقدار سرعت تهویه، باید شرایطی ایجاد شود که این سنسور مقدار حدود صفر را

1- Band
2- Solid angle
3- Stainless steel

4- Characteristic fire diameter



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 تهویه 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 تعریف می‌گردد:

$$\phi = \frac{A_f}{A_t} \quad (23)$$

در این رابطه، A_f سطح مقطع عرضی تونل، A_t 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 رهائش حرارت بر واحد سطح) ثابت بماند.

$$\begin{cases} V^* = 0.81(Q^*)^{1/3} & , Q^* \leq 0.15 \\ V^* = 0.43 & , Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (21)$$

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

$$\begin{cases} V^* = 0.4 \times 0.2^{-1/3} (Q^*)^{1/3} & , Q^* \leq 0.2 \\ V^* = 0.4 & , Q^* > 0.2 \end{cases} \quad (22)$$

برای تونل تشریح شده در بخش ۳-۱، نرخ رهائش 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 رهائش حرارت مشابه مقادیر استفاده شده توسط لی و همکاران می‌باشد. نتایج به دست 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 اسماکورینسکی تأثیرگذار است و انتخاب یک مقدار از پیش تعیین شده برای آن می‌تواند باعث میرایی زیاد نوسانات آشفته شود و ایجاد خطا 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 زیرشبکه اسماکورینسکی، 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 خطا گردد. شایان ذکر است پیش‌بینی بیشتر از مقدار واقعی برای سرعت بحرانی، توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (به خصوص در حالت سرعت فوق بحرانی) [۱۷، ۲۶].

همچنین در شکل ۳، مفهوم سرعت فوق بحرانی به درستی دیده شده است.

این مفهوم تأکید می‌کند که رابطه توانی (توان یک سوم در روابط (۲۱) و (۲۲)) تنها در محدوده آتش‌های کوچک برقرار است و بعد از نرخ رهائش 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 شدند.

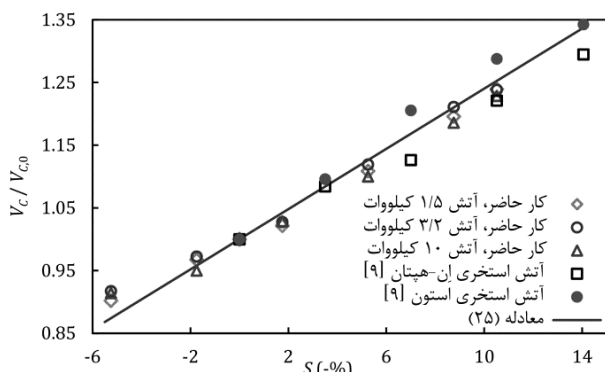
جریان بالای یک منبع آتش را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد [۲۷]:

- ۱- ناحیه شعله^۱: در این ناحیه، شعله به صورت دائم موجود می‌باشد و بیشترین قسمت واکنش شیمیایی در آن به انجام می‌رسد. در این ناحیه گازهای حاصل از احتراق با دریافت انرژی دارای شتاب مثبت بالارونده هستند.
- ۲- ناحیه شعله متناوب^۲: در این ناحیه، احتمال اینکه شعله در نقطه‌ای موجود باشد، بیش از ۵۰ درصد است. در این بخش، گازهای صعودکننده دارای سرعت تقریباً ثابتی خواهند بود.
- ۳- ناحیه پلوم دود^۳: در این ناحیه، گازهای صعودکننده دارای شتاب کاهشنده بوده و دمای آن‌ها نیز با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد.

حال می‌توان دلیل ثابت ماندن سرعت تهویه 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 رهائش حرارت از مقدار بحرانی، افزایشی در سرعت پلوم بالارونده زیر سقف نشده و لذا سرعت بحرانی ثابت می‌ماند [۲، ۲۸].

1- Super critical velocity
2- Flame zone
3- Intermittent flame
4- Buoyant plume

5- Heat Release Rate Per Unit Area (HRRPUA)



شکل ۷ تأثیر شیب تونل بر مقدار سرعت بحرانی

جدول ۱ مقادیر سرعت بحرانی محاسبه شده در حضور انسداد

نسبت انسداد، ϕ (%)			
سرعت بحرانی (m/s)			
آتش ۱/۵ کیلووات آتش ۳/۲ کیلووات آتش ۱۰ کیلووات			
۰/۷۰	۰/۵۵	۰/۴۶	۰
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

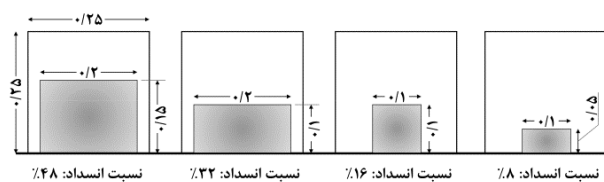
شیب تونل، S (%)			
سرعت بحرانی (m/s)			
آتش ۱/۵ کیلووات آتش ۳/۲ کیلووات آتش ۱۰ کیلووات			
۰/۶۴	۰/۵۰	۰/۴۲	+۵/۳
۰/۶۷	۰/۵۳	۰/۴۵	+۱/۸
۰/۷۰	۰/۵۵	۰/۴۶	بدون شیب
۰/۷۲	۰/۵۶	۰/۴۷	-۱/۸
۰/۷۷	۰/۶۱	۰/۵۱	-۵/۳
۰/۸۳	۰/۶۶	۰/۵۵	-۸/۸
۰/۸۶	۰/۶۸	۰/۵۷	-۱۰/۵

به منظور بررسی کمی تأثیر شیب تونل بر نحوه پخش دود، با در نظر 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.

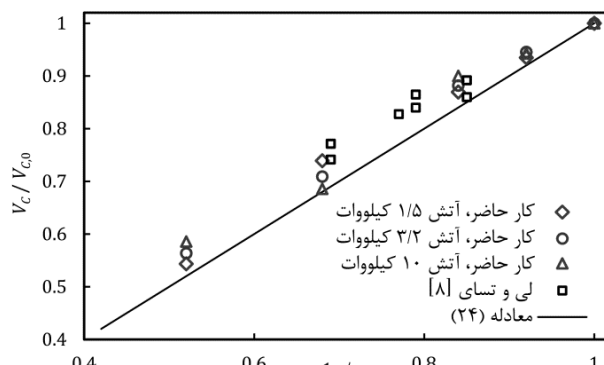
به منظور بررسی کیفی تأثیر شیب تونل بر مقادیر سرعت بحرانی، شکل ۷ ارائه شده است. مقادیر سرعت بحرانی جدول ۲ بر حسب مقادیر مربوط به تونل بدون شیب بی‌بعد شده و بر حسب منفی شیب تونل ترسیم شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش اندازه شیب منفی تونل و به دلیل اثر دودکشی، سرعت بحرانی تهویه افزایش می‌یابد. علاوه بر 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 به ازای 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:

$$\begin{cases} K_S = 1 + (0.024 \times (-S)) \\ \frac{V_c}{V_{c0}} = K_S \end{cases} \quad (25)$$

که در آن K_S ضریب شیب، V_c و V_{c0} 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 (ابعاد به 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 بی‌بعد 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 آتکینسون [۲۸] نیز می‌باشد. لذا می‌توان رابطه (۲۴) را به منظور اعمال تأثیر ضریب انسداد بر مقدار سرعت بحرانی ارائه داد:

$$V_c = V_{c0}(1 - \phi) \quad (24)$$

که در آن، V_c و V_{c0} 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.

۴-۲- 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. به دلیل چگالی پایین، مهم‌ترین نیروی که رفتار پلوم دود حاصل از آتش‌سوژی را تعیین می‌نماید، نیروی شناوری است. دود به سبب این نیرو تمایل به حرکت به سمت ارتفاع بالا را 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 مثبت خواهد بود. لذا در تونل با شیب مثبت، حرکت دود متمایل به سمت خروجی است و لذا به سرعت تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت دود نیاز است. 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 0.8 درصد افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که در دماهای 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 هوا می‌باشد که در رابطه (۱۹) و هم‌چنین رابطه کندی [۳۰] مشاهده می‌گردد. بر طبق موارد ذکر شده، ظرفیت حرارتی هوا با بالا رفتن رطوبت، کمی افزایش می‌یابد. این افزایش باعث می‌شود که گرادیان 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 می‌انجامد. این فرض طبق رابطه کندی (رابطه مورد تأیید استانداردهای ان‌اف‌پی‌ای^۲ و آشر^۳ که با استفاده از روابط یک‌بعدی 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 می‌باشد. کندی رابطه (۳۱) و (۳۲) را ارائه نموده است:

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

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

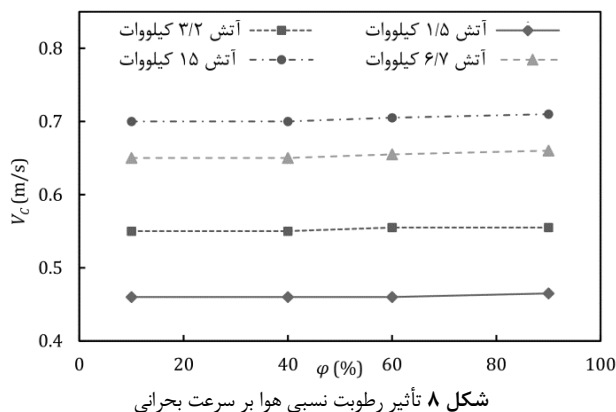
کاهش سرعت بحرانی با افزایش ظرفیت گرمایی در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل، مقادیر سرعت بحرانی با استفاده از رابطه کندی محاسبه شده‌است.

شایان ذکر است که دبی جرمی هوای تهویه در تونل، در حدود 10 الی 100 برابر دبی جرمی محصولات احتراق می‌باشد (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 می‌باشد. همان‌گونه که از رابطه (۱۵) 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 ۱ نیز به چشم می‌خورد، هوای ورودی (کسر مخلوط برابر صفر) دارای اندکی بخار می‌باشد. 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 می‌باشد، 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 کاملاً خشک تا هوای کاملاً مرطوب به‌عنوان هوای تهویه وارد تونل شده است. رطوبت نسبی به‌عنوان معیار برای مقدار رطوبت موجود در هوا مورد استفاده قرار گرفته است. رطوبت نسبی هوای ورودی از 0 تا 90 درصد تغییر نموده‌است.

نتایج تغییر سرعت بحرانی با تغییر رطوبت برای اندازه‌های مختلف آتش و دمای هوای ورودی 45 درجه سلسیوس در شکل ۸ 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 [۲۹]. این دو پارامتر، در رابطه (۱۹) به چشم می‌خورند و بر مقدار سرعت بحرانی تأثیر می‌گذارند. نسبت رطوبت^۱ (یا نسبت جرم بخار آب به جرم هوای خشک) در دماها 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 حداکثر 6 درصد می‌باشد. چگالی یک مخلوط با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) 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 این‌که نسبت رطوبت (ω) در مقایسه با واحد کوچک می‌باشد، چگالی هوای مرطوب به‌ازای هر درصد جرمی رطوبت، طبق رابطه (۲۸)، 0.06 درصد کاهش می‌یابد.

گرمای ویژه (جرمی) یک مخلوط، از رابطه (۲۹) محاسبه می‌گردد:

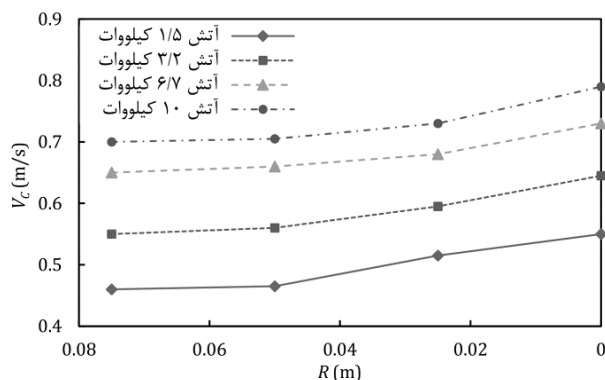
$$c_{p,\text{mix}} = Y_1 c_{p,1} + Y_2 c_{p,2} \quad (29)$$

لذا گرمای ویژه هوای تر برابر است با:

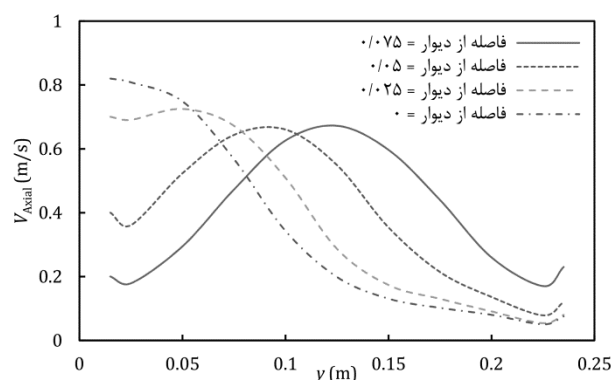
$$\frac{c_{p,\text{wet}}}{c_{p,\text{dry}}} = \frac{1}{1+\omega} c_{p,\text{dry}} + \frac{\omega}{1+\omega} c_{p,\text{vapor}} = 1 + \frac{\omega}{1+\omega} \left(\frac{c_{p,\text{vapor}}}{c_{p,\text{dry}}} - 1 \right) \quad (30)$$

2- National Fire Protection Association (NFPA)
3- ASHRAE

1- Humidity ratio



شکل ۱۱ اثر محل عرضی وقوع آتش سوزی بر سرعت بحرانی



شکل ۱۲ تغییر سرعت طولی جبهه دود در عرض تونل برای چهار حالت آتش سوزی. 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 مطالب 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.

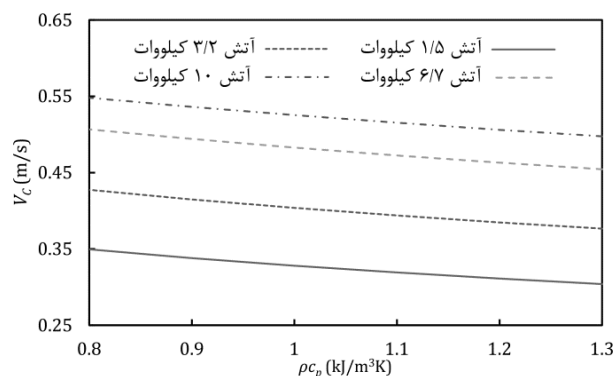
نتایج نشان می‌دهد که سه پارامتر انسداد منبع آتش، شیب تونل و فاصله آتش تا دیواره تونل اهمیت زیادی داشته، ولی رطوبت نسبی هوای ورودی تأثیر زیادی بر سرعت بحرانی ندارد. مقدار سرعت بحرانی رابطه معکوسی با انسداد منبع آتش دارد و مقدار کاهش تقریباً برابر نسبت انسداد است. علت این امر، افزایش موضعی سرعت هوا در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

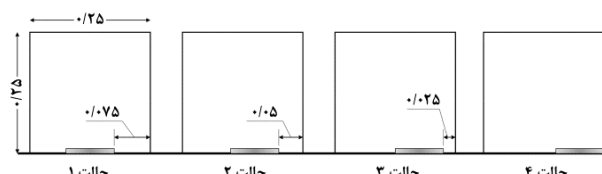
نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن محل آتش سوزی به دیوار، سرعت بحرانی افزایش می‌یابد. البته با افزایش شدت آتش، تأثیر نسبی دیواره کمتر شده است. میزان افزایش سرعت بحرانی در آتش‌های کوچک‌تر حدود ۲۰ درصد و برای آتش‌های بزرگ‌تر، حدود ۱۰-۱۵ درصد محاسبه شده است. نتیجه فوق، در تطابق با مشاهدات هو و همکارانش [۱۲] می‌باشد. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی به این نتیجه رسیدند که سرعت بحرانی در آتش سوزی نزدیک به دیواره ۱ تا ۱/۱۸ برابر سرعت بحرانی در آتش سوزی در مرکز تونل می‌باشد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شدت آتش، مقدار افزایش سرعت بحرانی برای آتش کنار دیواره کاهش می‌یابد و مقدار افزایش در نرخ‌های 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، می‌بایستی در یک نیم‌دایره پخش گردد. از طرف دیگر، پلوم دود از سمت دیوار امکان درون کشیدگی را نداشته و لذا مقدار هوای درون کشیده شده توسط پلوم کمتر می‌باشد. در نتیجه دمای پلوم و همچنین سرعت بالارونده 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.

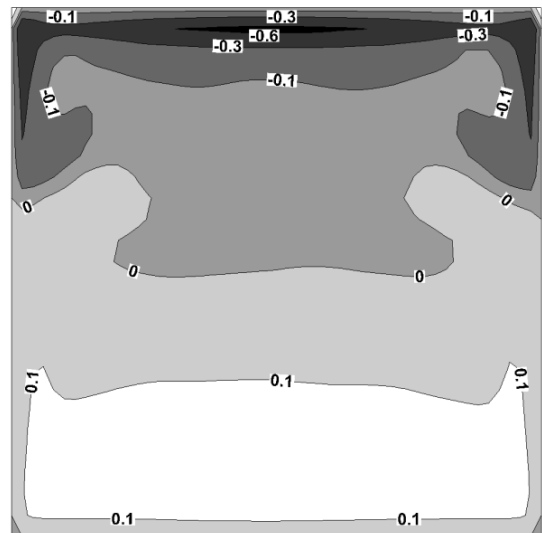


شکل ۹ کاهش سرعت بحرانی با افزایش ظرفیت حرارتی هوای تهویه (مقادیر از رابطه‌ی کندی [۳۰] برای تونل ۰/۲۵×۰/۲۵ مترمربعی محاسبه شده‌اند).

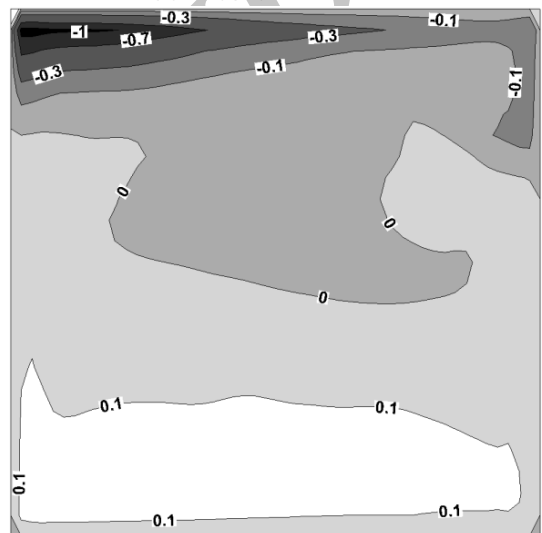


شکل ۱۰ هندسه‌های مورد استفاده در بررسی اثر محل عرضی آتش (ابعاد به متر)

ضریب نفوذپذیری (m^2s^{-1})	D
شتاب گرانش (ms^{-2})	g
ارتفاع تونل (m)	H
آنتالپی احتراق ($kJkg^{-1}$)	ΔH
چشمه نشر انرژی تشعشعی (Wm^{-2})	I_b
شدت تابش در طول موج λ (Wm^{-2})	I_λ
ضریب شیب	K_S
جرم مولکولی ($grmol^{-1}$)	MW
فشار (Pa)	P
فشار پس‌زمینه (Pa)	P_m
فشار اغتشاشی (Pa)	P^*
عدد پراتل	Pr
نرخ رهایش حرارت منبع آتش (kW)	Q
نرخ رهایش حرارت بدون بعد شده	Q''
نرخ رهایش حرارت واکنش شیمیایی بر واحد حجم (Wm^{-3})	q_c
نرخ جذب خالص حرارت تشعشعی (Wm^{-3})	q_r
ثابت جهانی گازها ($Jmol^{-1}K^{-1}$)	$^{(1)}R$
فاصله آتش از مرکز (m)	$^{(2)}R$
بردار جهت شدت تابش	s
شیب (%)	S
نسبت استوکیومتری	s^*
تانسور 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)	$z, y, ^{(1)}x$
تعداد اتم‌های کربن در مولکول سوخت	$^{(2)}x$
کسر جرمی گونه ($kgkg^{-1}$)	Y
کسر مخلوط ($kgkg^{-1}$)	Z
علائم یونانی	
پهنای فیلتر (m)	Δ
ضریب موضعی جذب تابشی	κ
طول موج (m)	λ
لرخت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
ثابت استفان-بولتزمن ($Wm^{-2}K^{-4}$)	σ
طول مقیاس زمانی اختلاط (s)	τ
تانسور تنش (Pa)	τ_{ij}
تانسور تنش زیر شبکه (Pa)	τ'_{ij}
درصد انسداد	$^{(1)}\phi$
رطوبت نسبی (%)	$^{(2)}\phi$
نسبت رطوبت ($kgkg^{-1}$)	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.

رطوبت نسبی تغییر محسوسی در پخش دود نداشته و با توجه به افزایش اندک 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 ۱۰-۱۵ درصد می‌باشد.

۶- فهرست علائم

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

بالانویس‌ها

~ کمیت متوسط با متوسط‌گیری فاویر
- کمیت فیلترگیری شده

زیرنویس‌ها

∞ شرایط هوای آتسمفری
dry هوای خشک
F سوخت
mix مخلوط
O اکسیدکننده
S دوده
t آشفته
wet هوای مرطوب

۷- مراجع

- [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. Ryou, 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. Pasdarsahri, 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.
- [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. Ryou, 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. Ryou, 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.