



بررسی عددی دو آتش سوزی همزمان در یک تونل و ارزیابی اثر گرفتگی ناشی از خودروها با استفاده از نرم افزار FDS

مریم مایار^۱، قاسم حیدری نژاد^{۲*}، هادی پاسدارشهری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، gheidari@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله به مدل سازی دو حریق در تونل، با آرایش مختلفی از خودروها با ابعاد متفاوت، به کمک نرم افزار FDS پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که رفتار دو حریق درون تونل به فاصله آن ها از یکدیگر بستگی دارد. برای خودروهای کوچک با آرایش های مختلف سرعت بحرانی برای فواصل متفاوت آن ها از آتش تقریباً ثابت مانده ولی برای خودروهای متوسط اندازه گرفتگی در تونل بصورتی خواهد بود که باعث تقویت نیروی اینرسی ناشی از جریان باد نسبت به نیروی شناوری ناشی از پلوم آتش در آن مقطع از تونل می شود. با توجه به نتایج بدست آمده، زمانی که فاصله گرفتگی از حریق کم است به سرعت تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت دود در تونل نیاز است. همچنین هنگامی که فاصله مجموعه خودروها تا حریق به اندازه کافی زیاد باشد، اثر گرفتگی بر حریق خنثی می شود و سرعت تهویه بحرانی معادل سرعت تهویه بدون حضور خودرو است.

کلیدواژگان: تونل، حریق، گرفتگی توسط خودرو، شبیه سازی گردابه های بزرگ، سرعت بحرانی.

Numerical investigation of two simultaneous fires in a tunnel and evaluation of the obstructive influence of vehicles using FDS

M. Mapar¹, G. Heidarinejad^{2*}, H. Pasdarshahri³

1- MSc Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- PhD, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

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

Abstract- In this paper a simulation of two fires in a tunnel in which varied arrangements of different sized vehicles at the upstream of fires has been accomplished using FDS. The results reveal that the behavior of two fires is directly influenced by distance between them. The calculated critical velocity is not affected by the variations on the small vehicles arrangement and distance between the vehicles and fires. Interestingly, the presence of medium vehicles leads ventilation flow to strengthen inertial force rather than buoyant force of fire plume in tunnel. Accordingly, when there is a short distance between fires and obstructions, less air ventilation is needed to prevent smoke backlayering. Eventually, far distance between the vehicles and the fires results in vanishing obstruction effects. Consequently, the critical velocity is the same as the case in which there is no vehicle in the tunnel.

Keywords: Tunnel, Fire, Large Eddy Simulation, Critical Velocity.

۱- مقدمه

بطور کلی آتش‌سوزی درون تونل دارای یک جریان با ساختار پیچیده است. این پدیده فیزیکی که شامل واکنش شیمیایی، اغتشاش و تابش است، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند هندسه، شیب تونل، سرعت جریان تهویه، فشار هوای عبوری و غیره می‌باشد. در هنگام آتش‌سوزی در یک تونل، تنها تهدید برای افراد درون تونل تماس مستقیم با حریق نیست؛ بلکه استنشاق دود منتشر شده در تونل خطر جدی‌تری محسوب می‌شود. بنابراین کنترل بهینه گسترش دود یکی از موضوعات مهم در طراحی سیستم تهویه است و آشنایی کامل با مشخصات گسترش دود در تونل‌ها در طراحی موفق لازم است.

هنگام وقوع آتش‌سوزی، سیستم تهویه طولی وارد عمل می‌شود تا از برگشت دود در جهت بالادست جریان جلوگیری کند و یک ناحیه امن و عاری از هرگونه دود به منظور فرار افراد و همچنین عملکرد آتش‌نشان‌ها فراهم شود. اگر سرعت تهویه پایین باشد، محصولات حاصل از احتراق می‌توانند در خلاف جهت جریان تهویه حرکت کنند. اندازه سرعت تهویه بحرانی و نرخ حرارت آزاد شده یکی از معیارهای اولیه برای طراحی سیستم تهویه طولی در تونل هستند.

توماس [۱] اولین کسی بود که رابطه میان سرعت تهویه بحرانی و جریان لایه برگشتی را براساس تقابل میان نیروی شناوری ناشی از پلوم حریق و نیروی اینرسی ناشی از سرعت جریان سیال بصورت تحلیلی ارائه کرد.

محققان بسیاری روش توماس را تحت شرایط مختلف بررسی کردند. اوکا و آتکینسون [۲] حرکت دود را در مدلی از یک تونل واقعی با مقیاس ۱:۱۰ مطالعه کردند و مشاهده کردند که رفتار سرعت بحرانی در تونل مدل مشابه با رفتار سرعت بحرانی در تونل واقعی می‌باشد. آن‌ها اثر پارامترهای مختلفی از جمله شکل تونل، اندازه تونل و اثر گرفتگی را بر سرعت تهویه بحرانی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که زمانی که جسم مانع حدود ۱۲٪ از مقطع عرضی تونل را اشغال کرده باشد، نسبت کاهش سرعت بحرانی به سرعت بحرانی در حالت بدون مانع حدود ۱۵٪ و زمانی که جسم مانع حدود ۴۵٪-۴۰٪ از تونل را اشغال کرده باشد این نسبت حدود ۳۲٪ خواهد بود. مایار و همکاران [۳] با استفاده از کد FDS^۱ اثر موقعیت حریق بر

سرعت تهویه بحرانی را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش فاصله حریق از دهانه ورودی تونل، سرعت تهویه بحرانی کاهش می‌یابد. ویو و باکار [۴] اثر هندسه مقطع عرضی تونل بر سرعت تهویه بحرانی در تونلی با مقیاس کوچک را بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پیشنهاد دادند که برای اعمال اثر هندسه مقطع عرضی تونل از ارتفاع هیدرولیکی تونل در رابطه سرعت تهویه بحرانی برحسب نرخ حرارت آزاد شده استفاده شود. مودیک [۵] در رابطه ارائه شده توسط توماس اثر شیب کف تونل را لحاظ کرد. هاوینگ و ادواردز [۶] سرعت جریان سیال در ناحیه پلوم آتش و ناحیه جت سقفی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سرعت تهویه بحرانی (u_{cr}) متناسب با توان یک-پنجم نرخ حرارت آزاد شده حریق ($Q^{0.2}$) می‌باشد که این دستاورد آن‌ها مطابق با آنالیز صورت گرفته توسط کوئینتیر [۷] بود. کوئینتیر جریان سیال درون تونل را مورد بررسی قرار داد و بیان کرد که هندسه مقطع عرضی تونل بر سرعت تهویه بحرانی مؤثر است. هنگامی که این هندسه متفاوت باشد دینامیک حریق نیز متفاوت خواهد بود. لی و همکاران [۸] اثر خودرو ساکن بر سرعت تهویه بحرانی و طول لایه برگشتی را در حالی بررسی کردند که مقطع عرضی خودرو ساکن حدود ۲۰٪ از مقطع عرضی تونل را اشغال کرده باشد. آن‌ها بیان کردند که سرعت تهویه بحرانی در اثر گرفتگی توسط خودرو حدود ۲۳٪ کاهش یافته است. تسای و همکاران [۹] سرعت تهویه بحرانی را در حالتی که دو منبع حرارتی در تونل وجود داشته باشد، بصورت تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که سرعت تهویه بحرانی با افزایش فاصله میان دو منبع حرارتی کاهش می‌یابد. زمانی که اندازه دو منبع کاملاً متفاوت باشد، سرعت تهویه را فقط باید برای منبع بزرگتر بررسی کرد چرا که جریان دود ناشی از منبع بزرگتر به اندازه کافی قدرت دارد تا اثر جریان برگشتی دود ناشی از منبع کوچکتر را خنثی کند. لی و تسای [۱۰] اثر گرفتگی توسط خودرو بر سرعت تهویه بحرانی و طول لایه برگشتی را بصورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها در مطالعه خود چندین خودرو را در آرایش‌های مختلف بگونه‌ای قرار دادند که ۳۱٪-۳٪ مقطع عرضی تونل اشغال شود و بیان کردند زمانی که آرایش خودروها به گونه‌ای باشد که جریان تهویه طولی بصورت مستقیم به حریق دسترسی پیدا کند،

1. Fire Dynamics Simulator

شکل ۱ نشان داده شده است. هنگامی که آتش‌سوزی در یک تونل رخ می‌دهد دود و گازهای داغ حاصل از آتش در اثر نیروی شناوری به سمت بالا حرکت می‌کنند تا جایی که به سقف تونل رسیده و در این زمان به سمت طرفین تونل شروع به گسترش می‌کنند و بدین ترتیب حجم وسیعی از دود و حرارت در تونل پخش می‌شود.

وجود ذرات دود باعث بوجود آمدن محیطی می‌شود که علاوه بر اینکه از نظر اکسیژن غنی نیست، میدان دید افراد را نیز برای فرار کردن کاهش می‌دهد. یکی از بهترین سناریوها برای فرار افراد زمانی است که در تونل از سیستم تهویه طولی بهره گرفته شود. منظور از تهویه طولی، جریان هوایی است که توسط سیستم تهویه که راستای محور آن‌ها در جهت طول تونل است، ایجاد شود. در این حالت هوای تازه از یک سمت تونل به سمت محل آتش دمیده می‌شود و بدین ترتیب مانع از توزیع دود و محصولات حاصل از احتراق در جهت بالا دست حریق می‌شود. به عبارت دیگر در تهویه طولی با کاهش دما و غلظت دود و جلوگیری از پدیده برگشت دود^۶ به سمت بالا دست جریان، راه برای فرار مسافران هموارتر می‌شود.

سرعت تهویه بحرانی به حداقل سرعت تهویه‌ای اطلاق می‌شود که به‌ازای آن پدیده برگشت دود بوجود نیاید یا به عبارتی طول جریان برگشتی^۷، که در شکل ۱ نشان داده شده است، برابر با صفر شود. بخش وسیعی از مطالعاتی که امروزه در سطح جهان در زمینه آتش‌سوزی در تونل انجام می‌شود، درباره سرعت بحرانی تهویه است. زیرا که یافتن دقیق‌ترین مقدار برای این کمیت و اعمال آن در سیستم تهویه اضطراری می‌تواند باعث شود تا با کمترین میزان انرژی بتوان از برگشت دود جلوگیری نمود.

۳- عدد بی بعد فرود

توماس پیشنهاد کرد که شکل جریان به نسبت نیروی اینرسی به نیروی شناوری در یک سطح مقطع مشخص از تونل بستگی دارد. او این نسبت را توسط پارامتر عدد فرود^۸ بیان کرد [۱]:

$$Fr = \frac{V^2}{gH} \frac{T}{\Delta T} \quad (1)$$

6. Backlayering
7. Backlayering Length
8. Froude Number

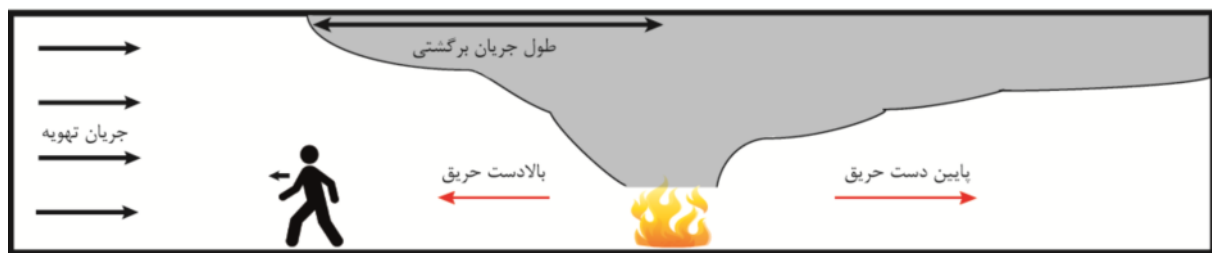
سرعت تهویه بحرانی کاهش می‌یابد. اما برای حالتی که آرایش خودروها به گونه‌ای باشد که مانع از دسترسی مستقیم جریان تهویه به منبع حرارتی شود، وجود این موانع منجر به افزایش نرخ حرارت آزاد شده و در نتیجه افزایش سرعت تهویه بحرانی می‌شود.

بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که تونل‌های دو مسیره شهری در هنگام ترافیک سنگین توسط خودروها مسدود می‌شوند و تصادف میان خودروها علت بسیاری از حادثه‌های آتش‌سوزی در تونل‌هاست [۱۱]. با توجه به مطالعات نگارندگان، تاکنون سناریو آتش‌سوزی برای حالتی که دو حریق هم‌زمان به همراه خودرو در تونل رخ دهد، مورد بررسی قرار نگرفته است. در حالی که تاریخچه حوادث رخ داده در تونل مانند آتش‌سوزی در تونل‌های منت بلانک [۱۲] و گدارد [۱۳] نشان می‌دهد که معمولاً تعداد حریق بیش از یکی بوده و همچنین خودروهای دیگری در هنگام وقوع حادثه درون تونل وجود دارند. بنابراین در پژوهش حاضر به منظور افزایش سطح ایمنی افرادی که از درون تونل عبور می‌کنند، به مطالعه سرعت تهویه بحرانی در حالتی که آرایش‌هایی متفاوت از خودروها با اندازه‌های متفاوت در بالادست دو حریق وجود داشته باشد، پرداخته شده است. برای انجام شبیه‌سازی از کد FDS نسخه ۶ استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی لی و تسای [۱۰] مقایسه گردید. همچنین تأثیر فاصله موانع از حریق و نیز فاصله دو حریق بر سرعت بحرانی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- فیزیک آتش‌سوزی در تونل

بر خلاف آتش‌سوزی در فضای باز، آتش‌سوزی فضای بسته به دلیل اثرات مرزهای جامد و بازشوها، دارای رژیم‌های مختلفی مانند اشتعال^۱، رشد^۲، سوزش^۳، آتش توسعه‌یافته^۴ و خاموشی^۵ است که به لحاظ ایمنی و پیچیدگی، بدترین شرایط، سناریوی آتش‌سوزی در مرحله کاملاً توسعه‌یافته است [۱۴]. این سناریو برای آتش‌سوزی در تونل در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. طرح‌واره جریان حاصل از این نوع آتش‌سوزی در

1. Ignition
2. Spread
3. Flashover
4. Fully-Developed Fire
5. Decay



شکل ۱ طرح‌واره جریان حاصل از آتش‌سوزی در تونل تحت تهویه طولی

معادله بقای مومنتم [۱۷]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - u \times \omega + \nabla \mathcal{H} - \tilde{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_n)g + \nabla \cdot \tau_{ij}] \quad (5)$$

در رابطه (۵) بیانگر تانسور تنش برای سیالات نیوتنی است [۱۶].

معادله بقای انرژی [۱۷]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s u) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon \quad (6)$$

که در آن h_s نماینده آنتالپی محسوس سیال است که تابعی از دماست. ε بیان‌گر ترم اتلاف در معادله انرژی، $\dot{q}'''$ نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم توسط واکنش شیمیایی و $\dot{q}''$ نرخ انتقال حرارت از طریق تابش و رسانش می‌باشند. معادله حالت گاز ایده‌آل [۱۷]:

$$\bar{p}_m(z, t) = \rho R T \sum_{\alpha} \frac{Y_{\alpha}}{W_{\alpha}} \quad (7)$$

۴-۱- انتقال حرارت تابشی

انتقال حرارت تابشی در نرم‌افزار FDS بصورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری^۵ حل می‌شود. معادله انتقال تابشی^۶ تابشی^۶ برای محیطی که شامل جذب^۷، نشر^۸ و انعکاس^۹ تشعشع است، بصورت رابطه (۸) خواهد بود [۱۷]:

$$S \cdot \nabla I_{\lambda}(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_{\lambda}(x, s) + B(x, s) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s^*) I_{\lambda}(x, s^*) ds^* \quad (8)$$

که در آن $I_{\lambda}(x, s)$ شدت تابش در طول موج λ می‌باشد. S بردار جهت تابش، $\kappa(x, \lambda)$ و $\sigma_s(x, \lambda)$

که در آن g نیروی حاصل از گرانش و V و H به ترتیب مقادیر مشخصه سرعت و طول هستند. T نیز دمای متوسط لایه گرم است که بصورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱].

$$T = \frac{Q}{\rho_0 C_p A V} + T_0 \quad (2)$$

در صورتی که در تونل گرفتگی توسط خودرو وجود داشته باشد، در روابط (۱) و (۲) باید از قطر هیدرولیکی و سطح مقطع اشغال نشده^۱ تونل استفاده کرد [۱۵].

۴- شبیه‌سازی عددی

نرم‌افزار FDS توسط موسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا^۲ در سال ۲۰۰۰ جهت مطالعه رفتار حریق و بررسی عملکرد سیستم‌های اطفاء حریق در ساختمان‌ها، منتشر شد. این نرم‌افزار معادلات ناویر-استوکس را برای جریان‌هایی با ماخ پایین با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۳ و یا شبیه‌سازی عددی مستقیم^۴ حل می‌کند [۱۶].

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارتند از:

معادله بقای جرم [۱۷]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (3)$$

معادله بقای گونه‌ها

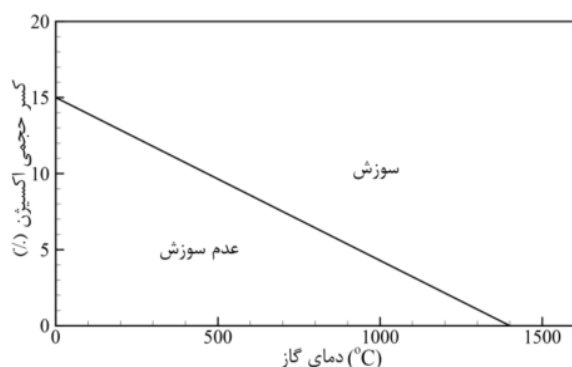
فرم کلی معادله پایستگی جرم گونه‌ها بصورت رابطه (۴) بیان می‌شود [۱۷].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\alpha}) + \nabla \cdot (\rho Y_{\alpha} u) = \nabla \cdot (\rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha}) + \dot{m}_{\alpha}''' \quad (4)$$

در رابطه (۴) $\dot{m}_{\alpha}'''$ نرخ تولید گونه‌ی α است که بصورت ترم چشمه در معادله ظاهر شده است.

5. Gray gas
6. Radiative Transport Equation
7. Absorption
8. Emitting
9. Scattering

1. Wetted Area
2. National Institute of Standards and Technology(NIST)
3. Large Eddy Simulation(LES)
4. Direct Numerical Simulation (DNS)



شکل ۲ نمودار غلظت حجمی اکسیژن بر حسب دما برای شعله‌وری و عدم شعله‌وری [۱۷]

$$Z_1 = \frac{Y_F}{Y_F^I} \quad (۱۰-الف)$$

$$Z_2 = \frac{1}{Y_F^I} \left(\frac{W_F}{x W_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{x W_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{x W_S} Y_S \right) \quad (۱۰-ب)$$

در رابطه (۱۰) تعداد اتم‌های کربن موجود در ملکول‌های سوخت است. بدین ترتیب در صورتی که سوخت و اکسیژن بصورت هم‌زمان وجود داشته باشند و شرایط مطابق شکل ۲ مساعد باشد، واکنش نشان داده شده در رابطه (۹) صورت می‌گیرد و Z_1 به Z_2 تبدیل می‌شود. در این حالت فرض می‌شود که نرخ تولید محصولات با نرخ مصرف سوخت برابر است؛ این بدان معنی است که به‌ازای هر یک از ملکول‌های سوخت مقادیر ثابتی از CO ، H_2O ، CO_2 و دوده تولید می‌شود [۱۷].

۳-۴- نرخ حرارت آزاد شده

در هر سلول از شبکه محاسباتی در صورتی که سوخت و اکسیژن بتوانند شرط سوزش را در شکل ۲ ارضا کنند، احتراق صورت می‌گیرد. در این حالت نرخ حرارت آزاد شده مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\dot{q}''' = \frac{\rho \min(Y_F, \frac{Y_{O_2}}{s})}{\tau} \Delta H$$

$$s = \frac{W_F}{v_{O_2} W_{O_2}} \quad (۱۱)$$

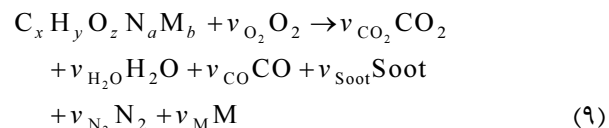
در رابطه (۱۱) ΔH گرمای احتراق سوخت و τ مقیاس زمانی اختلاط است که از رابطه (۱۲) بدست می‌آید [۱۶].

به ترتیب ضرایب موضعی جذب و انعکاس بوده و $B(x, s)$ چشمه نشر انرژی تشعشعی می‌باشد. عبارت انتگرال موجود در سمت راست معادله (۸) نماینده انرژی تشعشعی انعکاس یافته در دیگر جهات می‌باشد. نرم‌افزار FDS معادله انتقال تشعشع را بصورت پیش فرض با استفاده از زاویه گسسته شده حل می‌نماید. این تعداد جهت محاسباتی، قابل افزایش می‌باشد اما باید توجه داشت که بیش از ۲۰٪ زمان پردازش مربوط به حل معادله تشعشع می‌باشد و با افزایش زاویه، کل زمان لازم برای شبیه‌سازی افزایش چشم‌گیری می‌یابد [۱۷].

۲-۴- مدل احتراقی

در نرم‌افزار FDS دو روش برای مدل کردن احتراق تعریف شده است. در مدل اول که کسر مخلوط نامیده می‌شود با استفاده از کمیتی اسکالر، سوخت و محصولات حاصل از احتراق تعریف می‌شوند. در مدل دوم گونه‌های گازی شکل بر اساس رابطه آرنیوس با یکدیگر واکنش می‌دهند. این مدل بیشتر در شبیه‌سازی مستقیم عددی که نفوذ سوخت و اکسید کننده بطور مستقیم مدل می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالی که در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، که در آن شبکه محاسباتی به اندازه شبکه مورد استفاده در روش DNS ریز نیست تا نفوذ سوخت و اکسید کننده را به خوبی مدل کند، از مدل احتراقی کسر مخلوط استفاده می‌شود [۱۷].

انجام و یا عدم انجام واکنش شیمیایی میان سوخت و اکسیدکننده، با توجه به دما و غلظت اکسیژن، بر اساس شکل ۲ تعیین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، هنگامی که دما و یا غلظت اکسیژن از مقدار مشخصی کمتر باشد، احتراق صورت نمی‌گیرد در غیر این صورت واکنشی تک مرحله‌ای مطابق رابطه (۹) صورت خواهد گرفت [۱۷].



در این حالت کسر مخلوط بصورت روابط (۱۰-الف) و (۱۰-ب) تقسیم‌بندی می‌شود. در این رابطه Z_1 بیانگر سوخت سوخته نشده و Z_2 نیز بیانگر سوختی است که سوخته شده و به محصولات احتراق تبدیل شده است. Z_1 و Z_2 همواره از رابطه $Z = Z_1 + Z_2$ پیروی می‌کنند [۱۷].

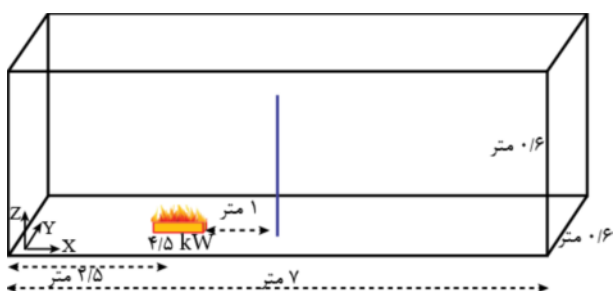
اغتشاشی و عدد اشمیت اغتشاشی است که هر دو عدد مقادیر ثابتی فرض می‌شوند. مگ گراتن و همکاران [۱۶] مقادیر ثابت مذکور را بصورت $Sc_T = 0.5$ و $Pr_T = 0.5$ ، $C_s = 0.2$ در نظر گرفتند. آن‌ها علت این انتخاب را نزدیکی مناسب میان نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از روش اسماکورینسکی، به کمک این مقادیر، بیان کردند.

۵- هندسه مورد بررسی

اثر گرفتگی توسط آرایشی از خودروها در حالی که یک آتش‌سوزی در داخل تونل به وقوع بپیوندد توسط لی و تسای [۱۰] بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش تجربی آن‌ها از تونلی با ابعاد کوچک مطابق شکل ۳ استفاده شده است. ملاحظه می‌شود که مدل مورد استفاده آن‌ها تونلی با مقطع مربعی $0.6m \times 0.6m$ می‌باشد که این ابعاد یک پانزدهم تونلهایی با ابعاد واقعی است [۱۰]. در این مقاله هندسه مورد بررسی، اندازه خودروها و نیز اندازه حریق کاملاً منطبق بر پژوهش آزمایشگاهی لی و تسای [۱۰] انتخاب شده است تا بتوان مقایسه مناسبی میان نتایج این مطالعه و نتایج تجربی آن‌ها انجام داد.

در شبیه‌سازی هندسه مذکور در ورودی تونل از شرط مرزی سرعت ورودی و در خروجی تونل از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. در نرم‌افزار FDS، شرط مرزی سرعت ورودی زمانی به کار می‌رود که میزان سرعت جریان ورودی به تونل مشخص باشد. در این شرط مرزی جریان یکنواختی از هوا با سرعتی که توسط کاربر تعریف شده است وارد تونل می‌شود. در شرط مرزی فشار خروجی، مقدار فشار کل در مرز مورد نظر بصورت رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\mathcal{H} = \frac{|u|^2}{2} + \frac{\tilde{p}}{\rho} \quad (18)$$



شکل ۳ نمایی از هندسه مورد بررسی

$$\tau = \frac{C(\delta x \delta y \delta z)^{\frac{2}{3}}}{D_{LES}} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) D_{LES} ضریب نفوذ ماده و C ضریب ثابتی است که در نرم‌افزار FDS بصورت پیش‌فرض ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۶].

پس از محاسبه نرخ حرارت آزاد شده، در هر گام زمانی مؤلفه‌های کسر مخلوط از رابطه (۸) محاسبه می‌شوند [۱۷].

$$Z_1^{n+1} = Z_1^n - \frac{\dot{q}''' \Delta t}{\rho \Delta H} ; Z_2^{n+1} = Z_2^n + \frac{\dot{q}''' \Delta t}{\rho \Delta H} \quad (13)$$

۴-۴- شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ از شبکه‌ای (یا فیلتری) استفاده می‌شود که گردابه‌های بزرگ مقیاس را که بر اختلاط گازها حاکم هستند، به طور مستقیم حل می‌کند اما قادر به حل مستقیم گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه فیلتر نمی‌باشد. بنابراین در دستگاه معادلات، در مقیاس زیرشبکه، عبارتهایی وجود دارد که برای بسته شدن آن‌ها لازم است که مدل زیرشبکه مناسبی برای این عبارته‌ها انتخاب شود [۱۸].

۴-۵- مدل اسماکورینسکی

در مدل ارائه شده توسط اسماکورینسکی مقدار لزجت گردابه‌ای با توجه به طول مشخصه و مقیاس سرعت بصورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود [۱۸].

$$\mu_T^{SGS} = \bar{\rho} C_s \Delta^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (14)$$

در این رابطه C_s بیانگر ضریب اسماکورینسکی است که یک مقدار ثابت است و Δ پهنای فیلتر است که از رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

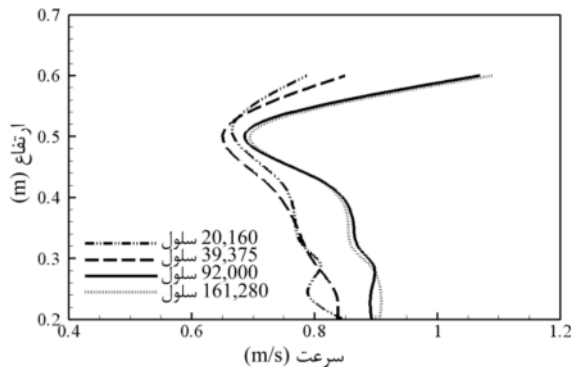
در این روش سایر پارامترهای نفوذ، ضریب رسانش حرارتی و ضریب نفوذ ماده، بصورت تابعی از لزجت گردابه‌ای مدل می‌شوند.

$$k_T^{SGS} = \frac{\mu_T^{SGS} C_p}{Pr_T} \quad (16)$$

$$(\rho D)_T^{SGS} = \frac{\mu_T^{SGS}}{Sc_T} \quad (17)$$

در روابط بالا Pr_T و Sc_T به ترتیب بیانگر عدد پرانتل

خط عمودی که ۱ متر پایین‌تر از حریق قرار گرفته است، نشان داده شده است.



شکل ۴ بررسی استقلال از شبکه برای تغییرات سرعت در امتداد خط عمودی $x = 3/5 m$

در ابتدا شبکه محاسباتی با میزان ۲۰,۱۶۰ سلول در نظر گرفته شد. این تعداد شبکه در چند مرحله تا میزان ۱۶۱,۲۸۰ سلول افزایش یافت. مشاهده می‌شود که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از ۹۲,۰۰۰ به ۱۶۱,۲۸۰ سلول، تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات سرعت متوسط حاصل نمی‌شود. از طرفی برای توان حرارتی ۹/۵ کیلووات طول مشخصه از مرتبه حدود ۱۵ سانتی‌متر است. بنابراین با توجه به رابطه (۲۰) لازم است که اندازه شبکه در محدوده $1 < \delta x < 4$ سانتی‌متر باشد. لذا انتخاب شبکه یکنواخت $3 \times 3 \times 3$ سانتی‌متری با تعداد ۹۲,۰۰۰ سلول شبکه مناسبی برای شبیه‌سازی مسئله مورد نظر خواهد بود.

۵-۱- صحت‌سنجی نتایج

لی و تسای [۱۰] برای ایجاد گرفتگی در تونل، موانعی با دو سایز متفاوت را که در جدول ۱ نشان داده شده است به عنوان خودروهایی با سایز کوچک و متوسط، در آرایش‌هایی دو ردیفه و سه ردیفه (مطابق با شکل‌های ۵-الف تا ۵-د)، در نظر گرفتند. قابل ذکر است که اندازه این موانع در مقیاس ۱:۱۵ خودروهای واقعی انتخاب شده است [۱۰].

لی و تسای [۱۰] درصد انسداد را مطابق رابطه (۲۱) بصورت نسبت سطح مقطع اشغال نشده به سطح مقطع کلی تونل تعریف کردند. بدین ترتیب برای حالت‌های الف تا د شکل ۵، درصد انسداد در جدول ۲ نشان داده شده است.

در این رابطه u مقدار سرعت محاسبه شده در مرز مورد نظر، ρ و $\bar{p}$ به ترتیب چگالی و فشار محیط خارج از تونل می‌باشند. همچنین دیوارها نیز بصورت عایق ($\partial q / \partial n = 0$) در نظر گرفته شده‌اند و بر روی دیوار شرط عدم لغزش ($V = 0$) برقرار است. لازم بذکر است مقدار y^+ بر روی دیواره در محدود ۱۰ تا ۵۰ تغییر کرده است. در نرم‌افزار FDS، تابع دیواره از مدل ورنر و ونگل^۱ محاسبه می‌شود. هوای یکنواختی با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد از سمت چپ وارد تونل می‌شود. برای مدل کردن آتش فرض شده است که سوخت پروپان در مقطعی مربعی شکل در حال سوختن است. دبی سوخت ورودی با توجه به رابطه (۱۱) و اندازه نرخ حرارت آزاد شده، تعیین می‌شود.

به منظور دستیابی به نتایج مستقل از شبکه محاسباتی، لازم است در ابتدا شناخت کافی نسبت به محدوده مقیاس طولی حل حاصل شود. مقیاس طولی مناسب برای حل مسأله شامل پلوم آتش و جریان شناوری حاصل از آن بر اساس توان حرارتی آن، توسط رابطه (۱۹) تعریف می‌شود [۱۶]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} C_p \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (19)$$

این طول مشخصه در واقع برآوردی از ناحیه موثر در اطراف حریق است که از تغییرات آن، اثر می‌پذیرد. مک گراتن و همکاران در مرجع [۱۶] اشاره کردند هنگامی که نسبت این طول مشخصه به اندازه شبکه از رابطه (۲۰) پیروی کند؛ مقادیر بزرگ مقیاس که از حل مستقیم معادلات بدست می‌آیند، به درستی حل می‌شوند. البته توجه شود که این یک برآورد از میزان شبکه محاسباتی است و روند دستیابی به جواب‌های مستقل از اندازه شبکه محاسباتی باید در حل عددی انجام شود.

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (20)$$

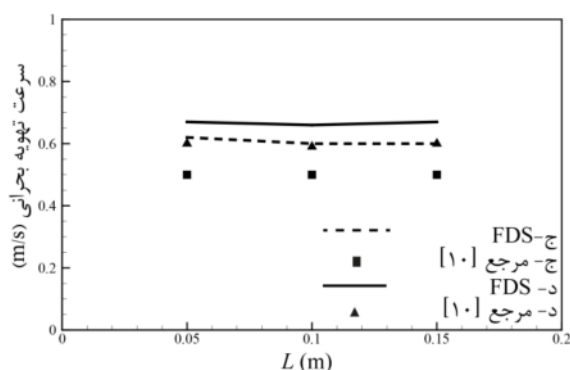
برای دستیابی به نتایج مستقل از اندازه شبکه محاسباتی، اثر تغییرات ابعاد شبکه بر پروفیل تغییرات کمیت‌های مختلف (نظیر دما، سرعت و غلظت گونه‌ها) در نقاط مختلف میدان محاسباتی بررسی شد. به عنوان نمونه در شکل ۴ توزیع سرعت برای شبکه‌های مختلف و توان حرارتی ۹/۵ کیلووات در امتداد

$$(21) \quad \text{انسداد (\%)} = \frac{A - A_{\text{Total Blocks}}}{A} \times 100$$

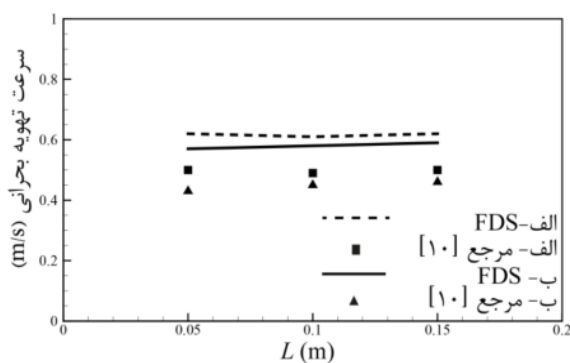
در رابطه (۲۱)، A مساحت عرضی تونل و $A_{\text{Total Blocks}}$ مساحت اشغال شده توسط مانع‌ها در مقطع عرضی تونل می‌باشد.

در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج شبیه‌سازی مطالعه حاضر با نتایج تجربی حاصل از پژوهش لی و تسای مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که روند نمودارها در هر دو شکل از رفتار نتایج تجربی کاملاً پیروی می‌کند.

در مجموع مقایسه میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که نتایج کد FDS سرعت بحرانی را حدود ۱۵٪ بیشتر از مقادیر تجربی تخمین زده است. اما از آنجا که روند نتایج بدست آمده در هر دو یکسان است بنابراین می‌توان بیان کرد که نتایج بدست آمده از نرم افزار FDS با در نظر گرفتن مقداری خطا قابل استناد است.



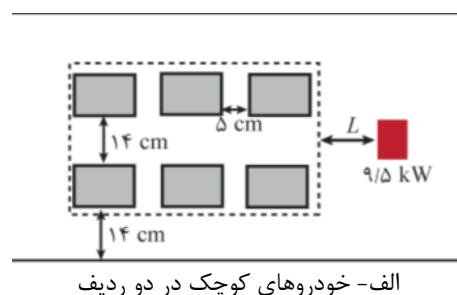
شکل ۶ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی تسای در حالت آرایش سه ردیف از خودروها



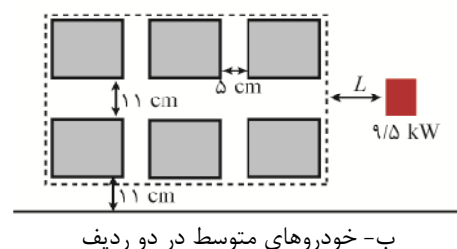
شکل ۷ ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی تسای در حالت آرایش دو ردیف از خودروها

جدول ۱ ابعاد خودروهای استفاده شده در شبیه‌سازی

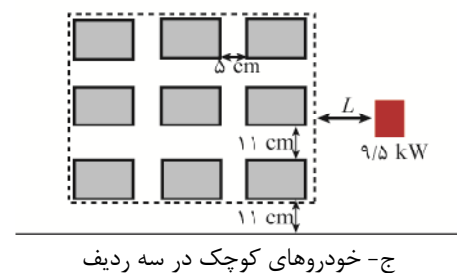
ارتفاع (m)	عرض (m)	طول (m)
۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۲۴
۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۶۱



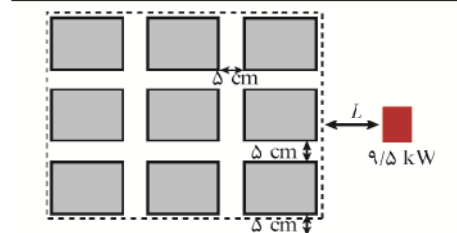
الف- خودروهای کوچک در دو ردیف



ب- خودروهای متوسط در دو ردیف



ج- خودروهای کوچک در سه ردیف



د- خودروهای متوسط در سه ردیف

شکل ۵ آرایش خودروها با اندازه‌های مختلف در مقابل حریق از نمای بالای تونل

جدول ۲ درصد انسداد برای آرایش مختلف خودروها

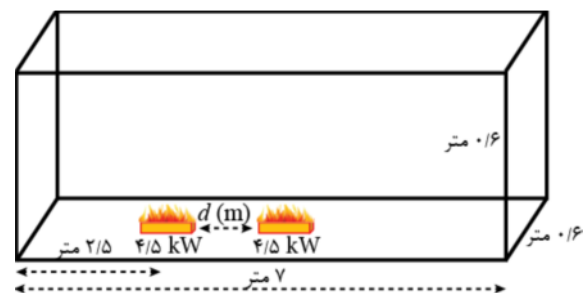
انسداد (%)	
۳/۵	خودرو کوچک در دو ردیف (حالت الف)
۱۶	خودرو متوسط در دو ردیف (حالت ب)
۵	خودرو کوچک در سه ردیف (حالت ج)
۲۴	خودرو متوسط در سه ردیف (حالت د)

۶- نتایج

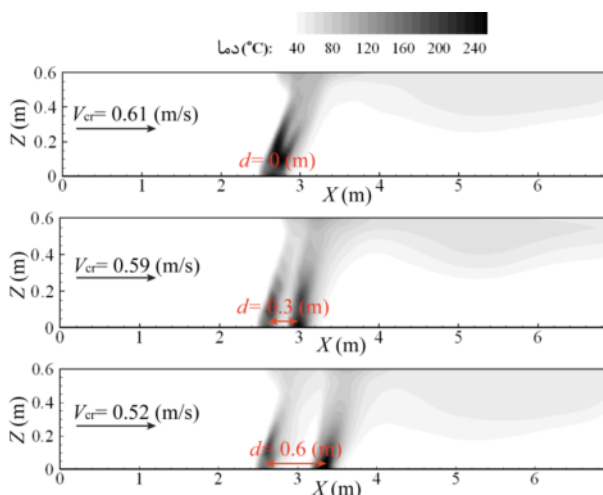
پس از اطمینان از صحت نتایج، سرعت تهویه بحرانی برای سناریو دو آتش‌سوزی با نرخ حرارت آزاد شده برابر و هم‌زمان که بصورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است، به‌ازای فواصل مختلف میان دو حریق، مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۹ تغییرات سرعت تهویه بحرانی به‌ازای تغییر فاصله میان دو حریق را نشان می‌دهد.

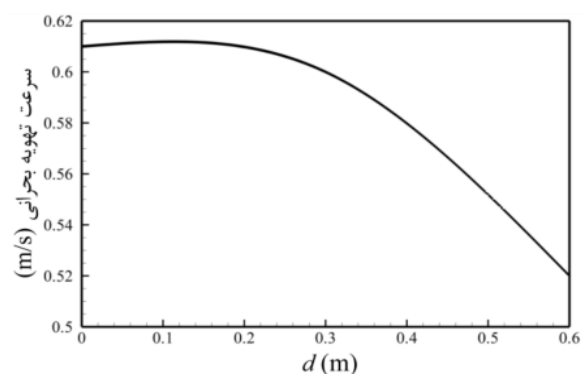
همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش فاصله میان دو حریق سرعت تهویه بحرانی کاهش می‌یابد. هنگامی که دو حریق کاملاً در مجاورت هم قرار گرفته باشند، سرعت تهویه بحرانی برابر 0.61 m/s بدست آمد که این مقدار دقیقاً برابر سرعت تهویه بحرانی برای آتش‌سوزی به بزرگی 9 kW است. همچنین برای فاصله 60 cm سرعت تهویه بحرانی برابر 0.52 m/s بدست آمد که این سرعت برابر حالتی که یک آتش‌سوزی به بزرگی 4.5 kW در حال سوختن باشد، محاسبه شد.



شکل ۸ طرحواره دو آتش‌سوزی هم‌زمان



شکل ۱۰ کانتور توزیع دمای حاصل از دو آتش‌سوزی هم‌زمان



شکل ۹ نمودار تغییرات سرعت بحرانی به‌ازای تغییر فاصله میان دو حریق با توان حرارتی یکسان 4.5 kW

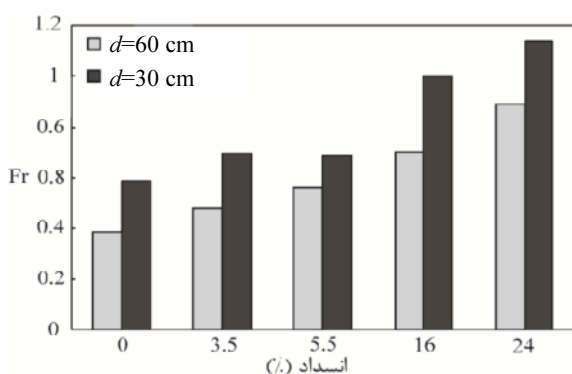
است به سرعت تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت دود در تونل نیاز است بطوری که برای فاصله $L=5\text{cm}$ این سرعت حدود ۷٪ از حالت بدون مانع کمتر است. زمانی که فاصله مجموعه خودروها تا حریق به اندازه کافی زیاد باشد، اثر گرفتگی بر حریق خنثی می‌شود و به سرعت تهویه بحرانی معادل سرعت تهویه بدون مانع نیاز است. لی و تسای [۱۰] نیز در بررسی اثر دو ردیف خودرو متوسط با ۱۶٪ انسداد بر روی یک حریق همین پدیده را مشاهده کردند. علت تغییرات بوجود آمده را می‌توان در تقابل میان دو نیروی اینرسی و شناوری دانست. بدین منظور تغییرات عدد فرود بر حسب درصد انسداد هرکدام از آرایش‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش درصد انسداد میزان عدد فرود بیشتر شده است. به بیان دیگر افزایش انسداد باعث تقویت نیروی اینرسی ناشی از جریان باد نسبت به نیروی شناوری ناشی از پلوم آتش در آن مقطع از تونل می‌شود.

جدول ۳ درصد تغییر سرعت تهویه بحرانی نسبت به حالت بدون مانع برای آرایش مختلف خودروها، فاصله دو حریق ۶۰ cm است

ϕ (%)				
L (cm)	حالت الف	حالت ب*	حالت ج	حالت د
۵	۰	-۷	۱	-۱۱
۱۰	۰	-۲	۰	-۴
۱۵	۰	۰	۰	۰
۲۰	۰	۰	۰	۰

* علامت منفی نشان می‌دهد که سرعت تهویه نسبت به حالت بدون مانع کاهش یافته است.



شکل ۱۲ تغییر عدد فرود بر حسب تغییر درصد انسداد هرکدام از آرایش‌ها در حالی که فاصله بین دو حریق ۳۰ cm یا ۶۰ cm باشد

شکل ۱۱ تغییرات سرعت بحرانی به‌ازای تغییرات فاصله میان خودروها از حریق را برای حالتی که فاصله میان دو حریق ۶۰ cm باشد، نشان می‌دهد. همان‌طور که در قسمت پیشین اشاره شد هنگامی که فاصله میان دو حریق ۶۰ cm باشد، دو پلوم اثر ناچیزی بر یکدیگر دارند.

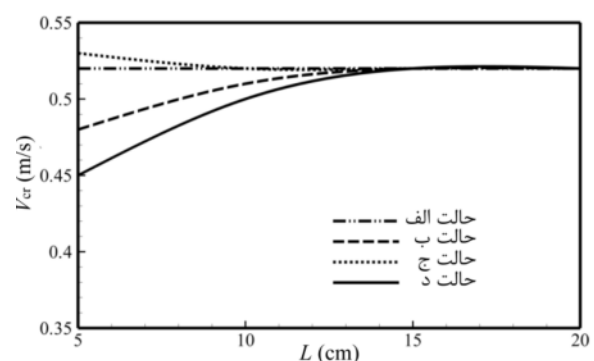
به منظور مقایسه کمی بهتر نتایج، پارامتر ϕ که بصورت رابطه (۲۲) تعریف شده است، برای هر چهار حالت در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$\phi = \frac{V'_{cr} - V_{cr}}{V'_{cr}} \times 100 \quad (22)$$

در این رابطه V'_{cr} سرعت تهویه بحرانی در حالت بدون گرفتگی و V_{cr} سرعت تهویه بحرانی در حالت وجود گرفتگی در تونل است.

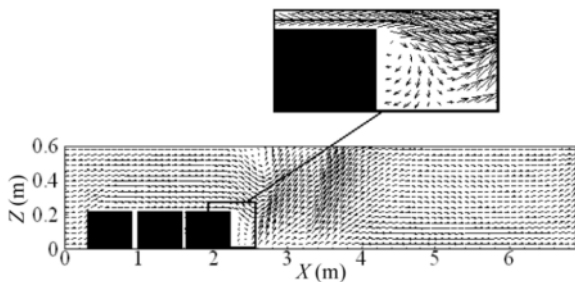
با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که :

- برای حالت‌های الف و ج، یعنی هنگامی که خودروهای کوچک به ترتیب در آرایش‌های دو و سه ردیفه با درصد انسداد ۳/۵٪ و ۵٪ در مقابل دو حریق قرار گرفته‌اند، سرعت تهویه بحرانی برای تمام فواصل L نسبت به حالت بدون مانع تغییری نداشته است. چرا که این درصد انسداد در تونل مانع دسترسی جریان تهویه به پلوم حریق نشده است. این نتیجه منطبق با نتیجه‌ای بود که لی و تسای [۱۰] در مطالعه تجربی خود برای اثر خودرو کوچک بر یک حریق بدست آورده بودند.



شکل ۱۱ تغییر سرعت بحرانی به‌ازای تغییر فاصله میان خودروها از حریق در حالت آرایش دو ردیفه و سه ردیفه از خودروهای کوچک و متوسط زمانی که فاصله میان دو حریق ۶۰ cm باشد

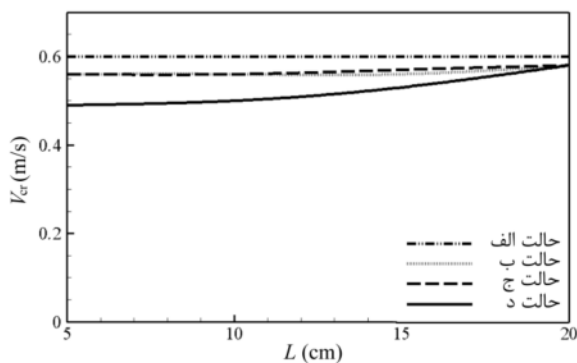
- برای حالت ب، دو ردیف خودرو متوسط با ۱۶٪ انسداد، مشاهده می‌شود زمانی که فاصله این گرفتگی از حریق کم



شکل ۱۴ ناحیه‌ای گردابه‌ای تولید شده توسط خودروهای متوسط در ۲۰ cm بالادست حریق

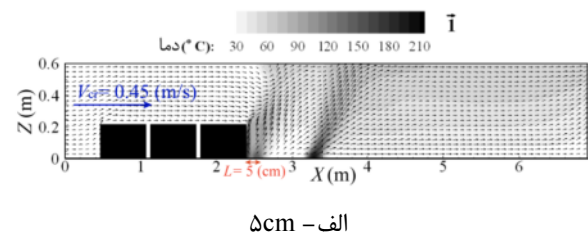
بررسی اثر حالت د (سه ردیف خودرو متوسط با ۲۴٪ انسداد) بر روی یک حریق در مرجع [۱۰] نشان داد که سرعت تهویه بحرانی نسب به حالت بدون مانع حدود ۲۰٪ درصد افزایش یافته است. در حالی که در این مقاله ۲۴٪ انسداد بر روی دو حریق، منجر به کاهش سرعت تهویه بحرانی نسبت به حالت بدون مانع شده است. شکل ۱۵ اثر گرفتگی توسط آرایش‌های مختلف از خودروها بر سرعت تهویه بحرانی، در حالتی که فاصله بین دو حریق ۳۰ cm باشد، برای مقادیر مختلف L را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه کمی بهتر نتایج برای هر چهار آرایش خودروها در مقابل دو حریق با فاصله ۳۰ cm، پارامتر ϕ در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۱۵ و جدول ۴ نشان می‌دهند که:

- وجود مانع در کل سرعت بحرانی را کاهش می‌دهد. علت این کاهش را می‌توان در عدد بدون بعد فرود جستجو کرد زیرا با توجه به شکل ۱۲ وجود گرفتگی در تونل باعث افزایش نیروی اینرسی نسبت به نیروی شناوری ناشی از حریق می‌شود.

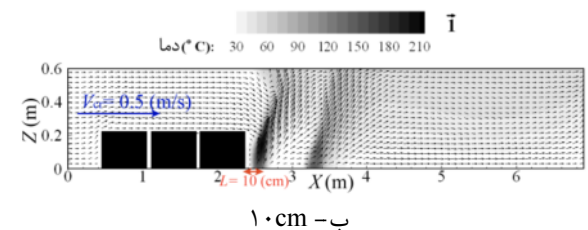


شکل ۱۵ تغییر سرعت بحرانی به‌ازای تغییر فاصله میان خودروها از حریق در حالت آرایش دو ردیفه و سه ردیفه از خودروهای کوچک و متوسط زمانی که فاصله میان دو حریق ۳۰ cm باشد

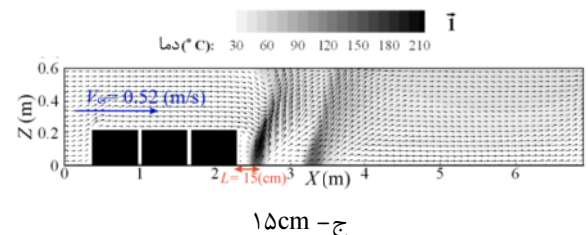
- در حالت د، سه ردیف خودرو متوسط با ۲۴٪ انسداد، علاوه بر اینکه عدد فرود خیلی بزرگ‌تر شده، گردابه‌ای نیز در بالادست حریق تولید خواهد شد. شکل‌های ۱۳-الف تا د نشان می‌دهد هنگامی که فاصله میان مجموعه خودروها تا حریق کم باشد بخشی از انرژی پلوم حریق اول درون گردابه بوجود آمده محبوس شده بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت تهویه بحرانی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد که با توجه به جدول ۳ برای $L=5\text{ cm}$ این کاهش یافتگی حدود ۱۱٪ می‌باشد. با افزایش L و خارج شدن پلوم آتش از این ناحیه گردابه‌ای سرعت تهویه بحرانی به مراتب افزایش می‌یابد. ناحیه گردابه‌ای با وضوح بیشتر در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



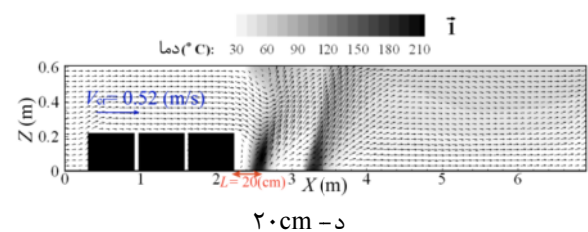
الف - ۵ cm



ب - ۱۰ cm



ج - ۱۵ cm



د - ۲۰ cm

شکل ۱۳ اثر گرفتگی توسط ۹ خودرو متوسط که با آرایش سه ردیفه در فاصله‌های مختلف بالا دست حریق قرار گرفته‌اند

شد که وجود خودروهای کوچک تأثیری بر سرعت بحرانی نداشته ولی زمانی که خودرو بزرگتر می‌شود سرعت بحرانی نیز کاهش پیدا می‌کند. در واقع می‌توان بیان کرد هنگامی که خودروها بزرگتر می‌شوند وجود گردابه در جلوی آن‌ها باعث می‌شود که مقداری از انرژی پلوم آتش در آن محبوس شده در نتیجه سرعت بحرانی کاهش پیدا کند.

۸- فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه فشار ثابت هوا ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
C_s	ضریب اسماگورینسکی
d	فاصله دو حریق از یکدیگر (m)
D	ضریب نفوذ ماده
h_s	آنتالپی محسوس (kJm^{-3})
$\mathcal{H}$	فشار کل تقسیم بر چگالی (m^2s^{-2})
L	فاصله مجموعه خودروها تا حریق (m)
$\dot{m}_b'''$	نرخ تولید گونه‌ها در اثر تبخیر شدن ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
Pr	عدد پرانتل
$\dot{q}'''$	نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم (kWm^{-3})
$\dot{q}''$	بردار شار حرارتی (kWm^{-2})
$\dot{q}_r''$	شار حرارتی در اثر تابش (kWm^{-2})
R	ثابت عمومی گازها ($\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$)
Sc	عدد اشمیت
T	دما (K)
u	بردار سرعت (ms^{-1})
V_{cr}	سرعت تهویه بحرانی (ms^{-1})
W_α	وزن ملکولی گونه α ام (kgmol^{-1})
Y_α	کسر جرمی گونه α ام

علائم یونانی:

Δ	اندازه فیلتر (m)
ρ_0	چگالی هوای ورودی (kgm^{-3})
μ_T	لزجت دینامیکی گردابه‌ای ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
τ_{ij}	تانسور تنش ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
ε	نرخ اضمحلال انرژی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-3}$)

بالانویس‌ها:

-	کمیت فیلتر شده
SGS	مقیاس زیر شبکه

جدول ۴ درصد تغییر سرعت تهویه بحرانی نسبت به حالت بدون مانع برای آرایش مختلف خودروها، فاصله دو حریق ۳۰cm است

L (cm)	ϕ (%)			
	حالت الف	حالت ب*	حالت ج	حالت د
۵	۰	-۶	-۷	-۱۸
۱۰	۰	-۶	-۷	-۱۶
۱۵	۰	-۶	-۵	-۱۱
۲۰	۰	۰	-۳	-۳

* علامت منفی نشان می‌دهد که سرعت تهویه نسبت به حالت بدون مانع کاهش یافته است.

- در این حالت نیز با افزایش فاصله خودروها، سرعت تهویه بحرانی افزایش و به مقدار بدون مانع نزدیک می‌شود.
- زمانی که سه ردیف خودرو جلوی پلوم آتش قرار می‌گیرند در واقع دسترسی هوای ورودی به پلوم آتش به علت وجود ردیف وسط کمتر شده و این امر باعث می‌شود که در این حالت میزان سرعت بحرانی زمانی که فاصله خودروها تا حریق کم است به مراتب کاهش پیدا کند.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار حریق در تونل و تأثیر وجود مانع در بالادست، زمانی که دو حریق وجود داشته باشد، پرداخته شد. مقایسه نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج تجربی، نشان‌دهنده صحت مطالعات عددی انجام شده است. با شبیه‌سازی دو حریق برای حالتی که مانعی در تونل وجود نداشته باشد، مشاهده شد که سرعت بحرانی با افزایش فاصله میان دو پلوم آتش کاهش پیدا می‌کند. زمانی که فاصله میان آن‌ها صفر است سرعت تهویه بحرانی مورد نیاز برای خنثی کردن لایه برگشتی معادل سرعت تهویه مورد نیاز برای حرقی با قدرت دو برابر است. همچنین زمانی که فاصله میان آن‌ها زیاد می‌شود تأثیر دو پلوم آتش بر یکدیگر از بین رفته و سرعت بحرانی برابر حالتی می‌شود که فقط یک حریق در آنجا وجود داشته باشد. نتایج حاصل زمانی که مانع در تونل وجود دارد نشان می‌دهد که وجود مانع سرعت بحرانی را به علت افزایش نیروی اینرسی هوا نسبت به نیروی شناوری، کاهش می‌دهد و زمانی که موانع از حریق فاصله می‌گیرند به علت اینکه دسترسی جریان هوا به دو حریق بیشتر می‌شود، میزان سرعت بحرانی به حالت بدون مانع نزدیک می‌شود. همچنین مشاهده

۹- مراجع

- longitudinally ventilated tunnels”, *Fire Safety Journal*, Vol. 53, 2012, pp. 35-42.
- [11] Ingason H., “State of the art of tunnel fire research”, *Proceeding of the Ninth IAFSS symposium*, Germany, 2008.
- [12] Henke A., Gagliardi M., “The 2001 Gotthard Road Tunnel Fire”, *Tunnel Management International*, Vol. 7, No. 1, 2004, pp. 33-39.
- [13] Vuilleumier F., Weatherill A., Crausaz B., “Safety Aspects of Railway and Road Tunnel: Example of the Lotschberg Railway Tunnel and Mont-Blanc Road Tunnel”, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 17, 2002, pp. 153-158.
- [14] Heidarinejad G., Pasdarsahri H., Mazaheri K., “Evaluation of Induced-Flow in a Two-Room Compartment Fire Using Large Eddy Simulation”, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, 2013, pp. 74-85, in Persian.
- [15] Kang, K., “Characteristic length scale of critical ventilation velocity in tunnel smoke control”, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 25, No. 3, 2010, pp. 205-211.
- [16] Floyd J., Forney G., Hostikka S., Korhonen T., McDermott R., McGrattan K.B, *Fire Dynamics Simulator User’s Guide*, NIST Special Publication 1019, 2012.
- [17] Floyd J., Forney G., Hostikka S., Korhonen T., McDermott R., McGrattan K.B, *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018, 2012.
- [18] Pasdarsahri H., *Development of Compatible Sub-grid Scale Model of LES in Numerical Simulation of Compartment Fires*, Ph.D. Thesis, Tehran, Tarbiat Modares University, 2013. (In Persian)
- [19] Heidarinejad G., *an Introduction to Turbulence*, Tarbiat Modares University, 2009. (In Persian)
- [1] Thomas P.H., “The movement of smoke in horizontal passages against an air flow”, *Fire Research Station*, Note No. 723, 1968.
- [2] Oka Y., Atkinson G.T., “Control of smoke flow in tunnel fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 25, No. 4, 1995, pp. 305-322.
- [3] Mapar M., Heidarinejad, G., Zargartalebi H., “Numerical Investigation of Fire and Developing an Analytical Equation For Critical Velocity in Tunnel”, *21st Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, 2013. (In Persian)
- [4] Wu Y., Bakar M.Z.A., “Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity”, *Fire Safety Journal*, Vol. 35, No. 4, 2000, pp. 363-390.
- [5] Modic J., “Fire simulation in road tunnels”, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 18, No. 5, 2003, pp. 525-530.
- [6] Hwang C.C., Edwards J.C., “The critical ventilation velocity in tunnel fires—a computer simulation”, *Fire Safety Journal*, Vol. 40, No. 3, 2005, pp. 213- 244.
- [7] Quintiere J.G., “Scaling applications in fire research”, *Fire Safety Journal*, Vol. 15, No. 1, 1989, pp. 3-29.
- [8] Li Y.Z., Lei B., Ingason H., “Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 45, No. 6-8, 2010, pp. 361-370.
- [9] Tsai K.C., Chen H.H., Lee S.K., “Critical Ventilation Velocity for Multi-Source Tunnel Fires”, *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No. 10-11, 2010, pp. 650-660.
- [10] Lee Y.P., Tsai K.C., “Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and fire behavior in