



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۵۱ تا ۶۴  
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 51-64



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک  
AmirKabir Journal of Science & Research  
Mechanical Engineering  
(ASJR-ME)

## بررسی عوامل موثر بر سرعت بحرانی تهویه در تونل‌های مترو

مسعود مونسان<sup>۱</sup>، محمدرضا طلایی<sup>۲\*</sup>، حبیب الله ملاطفی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۹۳/۱/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۶)

### چکیده

با توجه به اهمیت ایمنی تونل‌های زیرزمینی و سلامتی مسافری، تحلیل و شبیه‌سازی آتش‌سوزی در تونل برای طراحی یک سیستم تهویه مناسب و کارآمد و مقابله با خطرات و کاهش آسیب‌های ناشی از آتش‌سوزی لازم و ضروری است. سیستم تهویه طولی به طور گسترده در تهویه تونل استفاده می‌شود و یکی از مهم‌ترین پارامترها برای ایمنی تونل در هنگام آتش‌سوزی در این نوع سامانه سرعت بحرانی تهویه است. سرعت بحرانی تهویه، حداقل سرعت جریان طولی هوا است که مانع از برگشت دود ناشی از آتش‌سوزی به سمت بالادست جریان می‌شود. اگر سرعت تهویه کمتر از سرعت بحرانی باشد، دود و اثرات ناشی از آتش‌سوزی در بالادست جریان پخش شده و مشکلاتی از جمله نبود دید مناسب و کمبود اکسیژن برای مسافران به وجود می‌آید. در سرعت جریان هوای برابر با سرعت بحرانی تهویه، دود و گرما به پایین‌دست تونل حرکت می‌کند و بدین ترتیب هوای تازه و یک مسیر امن برای فرار مسافران فراهم می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی سرعت بحرانی تهویه و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن است. در این مقاله از کد FDS که یک شبیه‌ساز دینامیک سیالات محاسباتی است برای مطالعه سرعت بحرانی استفاده شده است. سپس اثر شکل منبع آتش، وجود وسیله نقلیه مانند قطار درون تونل، شکل هندسی تونل و شیب تونل بر روی سرعت بحرانی تهویه مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی:

آتش‌سوزی در تونل، سرعت بحرانی تهویه، برگشت جریان

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، آتش‌سوزی‌های فاجعه باری در تونل‌های جاده‌ای و ریلی (مترو) روی داده است. از جمله این رویدادها میتوان به آتش‌سوزی در تونل مترو باکو<sup>۱</sup> و داگو<sup>۲</sup> کره جنوبی که به ترتیب سبب مرگ ۲۸۹ و ۱۸۹ نفر گردیدند اشاره کرد [۱]. از این رو ایمنی تونل در زمان آتش‌سوزی و کنترل جریان دود ناشی از آتش اهمیت فراوانی دارد.

با شروع آتش‌سوزی در تونل، ستونی از دود به دلیل نیروی شناوری به سمت سقف تونل حرکت میکند و سپس به طور متقارن در دو طرف تونل گسترش میابد. در تهویه طولی، راهبرد خروج دود ایجاد یک جریان طولی هوا در تونل است تا بدین ترتیب دود و گازهای داغ را مجبور به حرکت در راستای تونل و در جهت جریان دمیده شده کند. به این ترتیب بالادست منبع آتش از آلاینده‌ها و گازهای داغ و سمی مصون مانده و راهی امن برای خروج مسافران و رسیدن مأموران به منبع آتش ایجاد می‌شود. بنابراین تعیین ظرفیت سیستم فراوان دارد زیرا اگر ظرفیت سیستم پایین باشد دود و هوای آلوده در خلاف جهت جریان هوای ایجادشده توسط سیستم تهویه و به سمت بالادست منبع آتش حرکت میکند. این پدیده برگشت جریان دود<sup>۳</sup> نام دارد. حداقل سرعت جریان تهویه که از برگشت جریان دود به سمت بالادست منبع آتش جلوگیری میکند به عنوان سرعت بحرانی<sup>۴</sup> شناخته می‌شود. سرعت بحرانی تهویه به نرخ رهایش حرارت از منبع آتش، دمای هوای ورودی، چگالی هوای ورودی، ظرفیت گرمایی هوا، هندسه تونل و شیب تونل بستگی دارد [۲]. تعیین سرعت بحرانی پارامتر مهمی است که توسط پژوهشگران فراوانی مورد مطالعه قرار گرفته است. نخستین مطالعه بر روی این پارامتر توسط توماس و بر اساس عدد فرود<sup>۵</sup> صورت گرفته است [۳]. او به صورت تجربی نشان داد که سرعت بحرانی با توان یک سوم نرخ رهایش حرارت رابطه دارد و رابطه (۱) را برای تعیین سرعت بحرانی ارائه کرد:

$$V_c = k \left( \frac{gQH}{\rho_0 C_p T_0 A} \right)^{1/3} \quad (1)$$

که در آن:

$V_c$	سرعت بحرانی تهویه ( $m.s^{-1}$ )
$Q$	نرخ رهایش حرارت ناشی از آتش‌سوزی (kW)
$H$	ارتفاع تونل (m)
$g$	شتاب گرانشی زمین ( $m.s^{-2}$ )
$\rho_0$	چگالی هوای ورودی ( $kg.m^{-3}$ )
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه هوا ( $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$T_0$	دمای هوای ورودی (K)

$A$  مساحت سطح مقطع تونل ( $m^2$ )

اوکا و اتکینسن، رابطه توماس را برای نرخهای رهایش حرارت بزرگ اصلاح کردند [۴]. اتکینسن و وو اثر شیب تونل را بررسی کردند و یک رابطه اصلاحی برای محاسبه سرعت بحرانی ارائه دادند [۵]. وو و باکار با انجام یک سری آزمایش در مقیاس مدل به بررسی تأثیر هندسه تونل بر روی سرعت بحرانی پرداختند [۶]. آنها پیشنهاد دادند تا از قطر هیدرولیکی به جای ارتفاع تونل به عنوان طول مشخصه در روابط سرعت بحرانی تهویه استفاده شود و رابطه‌ی زیر را برای تعیین سرعت بحرانی در تونل با هندسه متفاوت ارائه کردند که در آن سرعت بحرانی تهویه و نرخ رهایش حرارت بر حسب قطر هیدرولیکی بی بعد شده است. این رابطه به صورت زیر است:

$$V_c'' = \begin{cases} 0.684Q''^{1/3} & Q'' \leq 0.2 \\ 0.4 & Q'' > 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

$$Q'' = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} H_D^{5/2}}$$

$$V_c'' = \frac{V_c}{\sqrt{gH_D}} \quad (3)$$

که در آن  $V_c''$  و  $Q''$  پارامترهای بدون بعد هستند که به صورت زیر تعریف میشوند و در آن  $H_D$  نشان‌دهنده قطر هیدرولیکی است: لی و همکارانش با آزمایش در مقیاس مدل، به مطالعه جریان برگشت دود و سرعت بحرانی در تونل پرداختند و رابطه (۴) برای تعیین سرعت بحرانی ارائه کردند [۲]:

$$V_c^* = \begin{cases} 0.81Q^*^{1/3} & Q^* \leq 0.15 \\ 0.43 & Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (4)$$

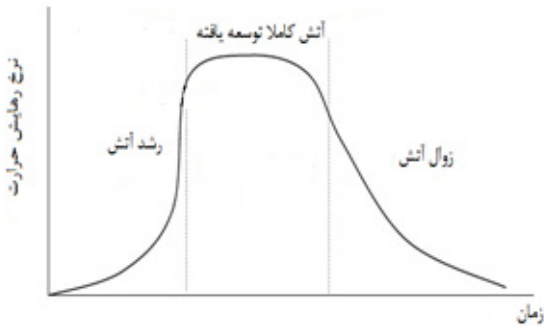
که در آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}}$$

$$V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{gH}} \quad (5)$$

کنگ اثر ضریب انسداد محیط بسته و عرض تونل را با استفاده از یک مدل کوچک تونل و مدل عددی مورد بررسی قراردادند [۷]. هو و همکاران طول جریان برگشت دود و سرعت بحرانی تهویه در آتش‌سوزیهای درون تونل را بررسی کردند. بررسی نشان داد که این طول با اندازه آتش نسبت مستقیم و با سرعت تهویه و ارتفاع تونل نسبت عکس دارد [۸]. روه و همکاران اثر سرعت تهویه را بر روی نرخ سوختن سوخت بررسی کردند. نتایج نشان میدهد که نرخ سوختن با افزایش سرعت تهویه افزایش میابد. بنابراین سرعت تهویه و نرخ رهایش حرارت باید به صورت کوپل محاسبه شود [۹]. هو و همکاران برای آتش‌سوزی‌های نزدیک به دیواره تونل سرعت بحرانی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وقتی منبع آتش در نزدیکی دیواره تونل روی دهد به سرعت بحرانی بیشتری نسبت به زمانی

- 1 Baku
- 2 Daegu
- 3 Backlayering
- 4 Critical velocity
- 5 Froude Number



شکل ۱: نمودار نرخ رهائش حرارت نسبت به زمان [۱]

ویژگی‌های از معادلات ناویر استوکس<sup>۶</sup> برای جریان‌های سرعت پایین ناشی از آتش‌سوزی به صورت عددی حل می‌کند [۱۸]. هسته اصلی الگوریتم حل یک طرح صریح<sup>۷</sup> پیشگویی - اصلاح گر<sup>۸</sup> با دقت مرتبه دوم در زمان و فضا است. این بدین معنی است که مشتقات جزئی موجود در معادلات پایستگی جرم، مومنتم و انرژی به کمک روش تفاضل محدود<sup>۹</sup> با دقت مکانی و زمانی مرتبه دوم گسسته شده و در زمان به صورت صریح حل می‌شود و پدیده‌ی تشعشع به کمک روش حجم کنترل<sup>۱۰</sup> محاسبه می‌شود [۱۹].

معادلات حاکم بر جریان سیال به صورت زیر است:

معادله بقای جرم [۱۹]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = \dot{m}_b'' \quad (۶)$$

معادله بقای مومنتوم [۱۹]:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (۷)$$

معادله انرژی [۱۹]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon \quad (۸)$$

معادله بقای گونه‌ها [۱۹]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot \rho Y_\alpha u = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_{\alpha}''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (۹)$$

در معادلات بالا:

$\dot{m}_b'''$  مجموع نرخ تولید گونه‌ها در اثر تبخیر شدن قطرات مایع یا ذرات جامد می‌باشد که به صورت ترم چشمه جرمی در معادله ظاهر می‌شود.

$u$  بردار سرعت

$f_b$  نشان دهنده نیرو خارجی

$\tau_{ij}$  تانسور تنش برای سیالات نیوتنی

$h_s$  آنتالپی سیال و تابعی از دما است

- 6 Navier-Stokes
- 7 Explicit
- 8 Predictor-Corrector
- 9 Finite difference
- 10 Finite volume

که آتش در مرکز باشد نیاز است [۱۰]. تسای و همکاران این عامل را برای دو منبع آتش که در فواصل مختلف قرار دارند مطالعه کردند و نشان دادند که برای دو منبع آتش مجزا، سرعت بحرانی با افزایش فاصله بین آنها کاهش می‌یابد [۱۱]. در مطالعات دیگر، تسای و همکاران مطالعاتی را بر روی سرعت بحرانی برای آتش‌سوزی در نزدیکی خروجی تونل انجام دادند و بیان کردند با نزدیک شدن منبع آتش به خروجی تونل، سرعت بحرانی کاهش می‌یابد [۱۲]. هو و همکاران دوازده تست آزمایشگاهی را برای بررسی توزیع دما در زیر سقف تونل انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده آن است که تغییرات دما در طول و در زیر سقف تونل به صورت نمایی کاهش می‌یابد [۱۳]. هو و همکاران در پژوهشی دیگر نشان دادند که توزیع دما در زیر سقف تونل در هنگام آتش‌سوزی با استفاده از کد FDS با نتایج تجربی انطباق خوبی دارد [۱۴]. نیکنام و همکاران نیز با استفاده از کد FDS به مطالعه توزیع دما در یک تونل جاده‌ای و تعیین سرعت بحرانی تهویه برای آن پرداختند. نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج حاصل از رابطه تجربی اوکا و اتکینسن قابل قبول بود [۱۵]. همچنین مطالعاتی بر روی اثر شیب تونل و موقعیت عرضی منبع آتش در تونلبر روی نحوه توزیع دما در زیر سقف تونل صورت گرفته است [۱۶-۱۷]. در این مقاله با شبیه‌سازی عددی یک تونل به کمک کد FDS به مطالعه سرعت بحرانی تهویه و تأثیر پارامترهایی از جمله شکل منبع آتش، اثر وجود وسیله نقلیه مانند قطار درون تونل، شکل هندسی تونل و شیب تونل بر روی سرعت بحرانی و نحوه تغییرات آن پرداخته می‌شود.

## ۲- مدل‌سازی مسئله

### ۲-۱- مدل‌سازی آتش و دود

منحنی‌های آتش‌سوزی در یک محیط بسته معمولاً به سه ناحیه مختلف تقسیم می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌ای از منحنی آتش درون یک محیط بسته را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است بدترین شرایط از لحاظ ایمنی و پیچیدگی، آتش کاملاً توسعه یافته است. در این مرحله نرخ رهائش حرارت بیشینه است و در نتیجه نرخ دود تولیدشده نیز بیشترین مقدار خود را دارد و برای جلوگیری از برگشت جریان دود به سرعت تهویه بیشتری نیاز است. بنابراین اگر سرعت تهویه بر اساس بیشینه نرخ رهائش حرارت تعیین شود، در دیگر نرخ‌های رهائش حرارت نیز برگشت جریانی وجود نخواهد داشت. بنابراین این سناریو برای آتش‌سوزی در تونل در این مطالعه در نظر گرفته شد.

### ۲-۲- مدل عددی جریان دود در تونل

امروزه شبیه‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک وسیله سودمند در مهندسی آتش برای مدل کردن جریان‌های شناوری ناشی از آتش‌سوزی است. از بین کدهای مختلف برای شبیه‌سازی پدیده آتش‌سوزی کد FDS نسخه ۵,۵,۳ انتخاب شده است. این کد فرم

که در آن  $C_s$  ثابت تجربی است که به اصطلاح آن را ثابت اسمانگورینسکی نامند و  $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3}$  اندازه پهنای شبکه‌بندی حل است و

$$|S| = \left( 2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u})^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

پارامترهای ضریب هدایت حرارتی  $\tau$  و پخش ماده  $\tau_1$  توسط رابطه زیر به ویسکوزیته مرتبط می‌شوند:

$$(\rho D)_{i,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t}, k_{LES} = \frac{\mu_{LESC_p}}{Pr_t} \quad (13)$$

$Pr_t$  عدد پرانتل  $\tau_2$  و  $Sc_t$  عدد اشمیت  $\tau_3$  نام دارند و مقادیر ثابتی هستند.  $C_s$  ثابت اسمانگورینسکی، یک عامل مهم و وابسته به جریان است. در کد FDS ثابت اسمانگورینسکی، عدد پرانتل و عدد اشمیت به ترتیب ۰/۲، ۰/۲ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

برای همگرایی روش حل عددی در کد FDS از معیار کورانت-فریدیج-لوی  $\tau_4$  (CFL) استفاده شده است. تخمین سرعت‌ها در هر مرحله زمانی  $\tau_5$  چک میشوند تا از ارضای معیار (CFL) اطمینان حاصل شود [۱۸]. این معیار به صورت زیر است:

$$\delta t \cdot \max \left( \frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) < 1 \quad (14)$$

مرحله زمانی اولیه به صورت خودکار توسط FDS براساس اندازه شبکه تقسیم بر سرعت مشخصه جریان تعیین می‌شود. مقدار قراردادی مرحله زمانی اولیه برابر  $5(\delta x \delta y \delta z)^{1/3} / (g/H)^{1/2}$  است که در آن  $\delta x$ ،  $\delta y$  و  $\delta z$  ابعاد کوچک‌ترین سلول شبکه،  $H$  ارتفاع شبکه حل و  $g$  شتاب گرانش زمین است. در زمان حل، مرحله زمانی تغییر میکند تا معیار (CFL) تأمین شود.

در نرم‌افزار FDS دو روش برای مدل کردن احتراق وجود دارد. در مدل اول که کسر مخلوط  $\tau_6$  نام دارد با استفاده از کمیت اسکالر، سوخت و محصولات حاصل از احتراق تعریف می‌شوند. در این روش قدرت آتش با تعیین نرخ رهایش حرارت بر واحد سطح  $\tau_7$  مشخص شده و در صورتی که هیچ نوع واکنش دهنده‌ای تعریف نشود به صورت پیش فرض پروپان به عنوان سوخت در نظر گرفته می‌شود. در مدل دوم گونه‌های گازی شکل بر اساس مدل آرنیوس با یکدیگر واکنش می‌دهند. این مدل در زمانی که مدل آشفستگی (DNS) استفاده شود دارای درستی قابل قبول است. در این روش به داده‌های فراوانی در مورد سوخت یا واکنش دهنده نیاز است.

$q'''$  نماینده نرخ رهایش حرارت بر واحد حجم

$q'''_b$  نماینده انرژی منتقل شده ناشی از تبخیر قطرات موجود در سیال  
 $q''$  نماینده نرخ انتقال حرارت از طریق تشعشع و هدایت حرارتی یر شدن قطرات مایع یا ذرات جامد است که به صورت ترم چشمه جرمی در معادله ظاهر می‌شود.

$\varepsilon$  نماینده ترم اضمحلال در معادله انرژی

$Y_\alpha$  کسر جرمی گونه ام

انتقال حرارت تابشی در FDS به صورت یک معادله انتقال برای گازهای خاکستری  $\tau_1$  حل می‌شود. معادله انتقال تابشی  $\tau_2$  برای محیطی که شامل جذب  $\tau_3$ ، نشر  $\tau_4$  و انعکاس  $\tau_5$  تشعشع، به صورت زیر است [۱۹]:

$$S \cdot \nabla I_\lambda = -[k(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_\lambda(x, s) + B(x, s) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_\lambda(x, s') ds' \quad (10)$$

که در آن  $I_\lambda(x, s)$  شدت تابش در طول موج  $\lambda$  است.  $s$  بردار جهت شدت تابش،  $k(x, \lambda)$  و  $\sigma_s(x, \lambda)$  به ترتیب ضرایب محلی جذب و انعکاس بوده و جمله  $B(x, s)$  چشمه نشر انرژی تابشی است. ترم انتگرال در سمت راست معادله فوق بیانگر انرژی تابشی انعکاس یافته در جهات دیگر است. نرم‌افزار معادله انتقال تشعشع را به طور پیش فرض با استفاده از ۱۰۰ جهت گسسته شده حل می‌نماید. این تعداد جهت محاسباتی، قابل افزایش است اما باید توجه داشت که بیش از ۲۰٪ زمان پردازش مربوط به حل معادله انتقال تشعشع است و با افزایش تعداد زوایا کل زمان لازم برای شبیه‌سازی افزایش چشمگیری می‌یابد [۱۹].

روش‌های معمول که برای پیش‌بینی آشفستگی در این کد محاسباتی استفاده میشوند روش شبیه‌سازی مستقیم عددی (DNS)  $\tau_6$  و روش گردابه‌های بزرگ (LES)  $\tau_7$  هستند [۱۹]. روش DNS هر چند میتواند جزئیات بیشتری از جریان را شبیه‌سازی کند اما از آنجا که شبکه حل در این روش باید به اندازه کافی ریز باشد تا بتواند کوچک‌ترین مقیاس‌های توربولانسی را در برگیرد نیازمند منابع محاسباتی گسترده‌ای است. بدین ترتیب از مدل LES برای شبیه‌سازی آشفستگی جریان‌های شناوری ناشی از آتش‌سوزی به طور گسترده استفاده می‌شود [۲۰]. برای پیش‌بینی حرکت دود در مدل LES دو نکته را باید مد نظر قرارداد؛ اول آنکه شبکه به اندازه کافی ریز باشد و ثانیاً از یک زیر شبکه  $\tau_8$  مناسب در گردابه‌های کوچک استفاده شود. در اینجا از مدل اسمانگورینسکی  $\tau_9$  دینامیکی برای مدل‌سازی مقیاس زیر شبکه استفاده شده است. لزجت دینامیکی در FDS برابر است با [۱۹]:

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 |S| \quad (11)$$

- 20 Thermal conductivity
- 21 Material diffusivity
- 22 Prandtl number
- 23 Schmidt number
- 24 Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) criterion
- 25 Time Step
- 26 Mixture Fraction
- 27 Heat Release Rate Per Unit Area (HRRPUA)

- 11 Gray gas
- 12 Radiative Transport Equation
- 13 Absorption
- 14 Emitting
- 15 Scattering
- 16 Direct Numerical Simulation (DNS)
- 17 Large Eddy Simulation (LES)
- 18 Sub-grid
- 19 Smagorinsky

سوخت و اکسیژن بتوانند شرط سوختن را در شکل ۲ برآورده کنند، احتراق صورت می گیرد [۱۹]. در این صورت نرخ رهایش حرارت مطابق روابط زیر خواهد بود:

$$\dot{q}''' = \frac{\rho \min(Y_F, \frac{Y_{O_2}}{S})}{\tau} \Delta H \quad (18)$$

$$S = \frac{W_F}{v_{O_2} W_{O_2}} \quad (19)$$

که در رابطه ی بالا  $\Delta H$  گرمای احتراق سوخت و  $\tau$  مقیاس زمانی اختلاط است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$\tau = \frac{C(\delta x \delta y \delta z)^{2/3}}{D_{LES}} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)  $D_{LES}$  ضریب نفوذ ماده وضریب ثابتی است که در پیش فرض نرم افزار FDS مقدار آن ۰/۱ است. پس از محاسبه نرخ رهایش حرارت، در هر گام زمانی مولفه های کسر مخلوط از رابطه زیر محاسبه می شوند [۱۹]:

$$Z_1^{n+1} = Z_1^n - \frac{\dot{q}''' \Delta t}{\rho \Delta H}; Z_2^{n+1} = Z_2^n + \frac{\dot{q}''' \Delta t}{\rho \Delta H} \quad (21)$$

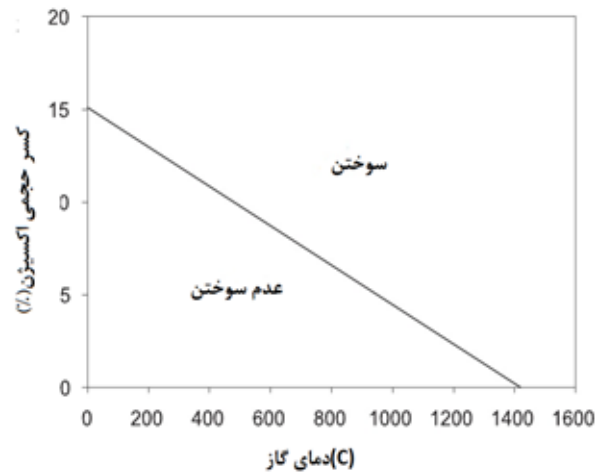
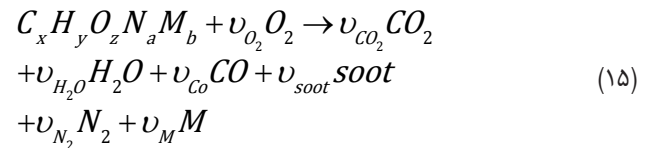
### ۲-۳- روش حل

برای بررسی درستی تصدیق حل و مدل سازی صورت گرفته در کد FDS از هندسه تونل موجود در منبع شماره استفاده می شود [۲]. برای این منظور سرعت بحرانی تهویه برای نرخ رهایش حرارت مختلف به دست آمده و با نتایج تجربی حاصل از مرجع فوق مقایسه می شود. تونل مدل شده دارای طول ۱۲m، عرض ۰.۲۵m، و ارتفاع آن ۰.۲۵m است. مش بندی در ناحیه ای که آتش سوزی و تولید نرخ رهایش حرارت در آن صورت میگیرد به دلیل حل معادله توربولانسی با روش گردابه های بزرگ باید به اندازه کافی ریز زده شود تا نتایج قابل قبولی بدست آید. از این رو باید اندازه مش  $\delta x$  به گونه ای تعیین شود تا در روابط (۲۲) و (۲۳) صدق کند. در مدل سازی ناحیه حل به سه قسمت تقسیم شده است بدین ترتیب در فاصله ۱.۵ قبل از منبع آتش و ۱ بعد از آن، مش ریزتر با اندازه مش ۰.۰۱ و در بقیه نواحی اندازه مش ۰.۰۲ استفاده شده است. شکل ۳ مش بندی به کاررفته در نرم افزار را نشان میدهد.

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (22)$$

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (23)$$

در این حالت نرخ اشتعال سوخت به گرمای خالص برگشتی به سطح سوخت وابسته است. به عبارتی نرخ اشتعال تابعی از انرژی برگشتی از آتش به واسطه جابجایی، تشعشع و هدایت از سوخت جامد یا مایع است. از آن جا که پدیده های پیچیده ی مختلفی وجود دارند که موضوع تحقیق های جاری اند، امکان وارد شدن خطاهای بزرگ در محاسبات وجود دارد. با در نظر گرفتن ویژگیهای جریانهای شناوری ناشی از آتش سوزی، ایجاد آتش با استفاده از نرخ رهایش حرارت بر واحد سطح سازگاری بیشتری با واقعیت دارد [۱۹]. از این رو در این شبیه سازی از روش اول برای مدل کردن احتراق استفاده شده است. در این مدل، انجام یا عدم انجام واکنش شیمیایی میان سوخت و اکسید کننده، با توجه به دما و غلظت اکسیژن، براساس شکل ۲ تعیین می شود. همان طور که مشخص است، هنگامی که دما و یا غلظت اکسیژن از مقدار مشخصی کمتر باشد، احتراق صورت نمی گیرد و در غیر این صورت واکنش تک مرحله ای مطابق رابطه (۱۵) صورت خواهد گرفت [۱۹]:



شکل ۲: نمودار غلظت حجمی اکسیژن برحسب دما برای اشتعال و عدم اشتعال [۱۹]

در این حالت کسر مخلوط به صورت روابط (۱۶) و (۱۷) تقسیم میشوند در این حالت  $Z_1$  بیانگر سوخت سوخته نشده و  $Z_2$  نیز بیانگر محصولات احتراق است.  $Z_1$  و  $Z_2$  همواره از رابطه زیر پیروی میکنند [۱۹].

$$Z_1 = \frac{Y_F}{Y_F'} \quad (16)$$

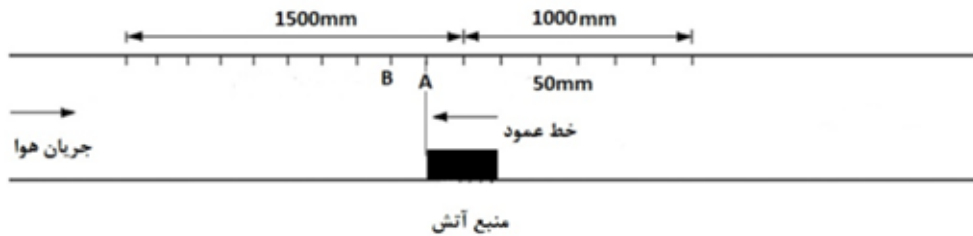
$$Z_2 = \frac{1}{Y_F'} \left( \frac{W_F}{XW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{XW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{XW_S} Y_S \right) \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)  $x$  تعداد اتم کربن موجود در مولکول سوخت و  $w_a$  وزن مولکولی گونه  $\alpha$  است. در هر سلول از شبکه محاسباتی در صورتی که



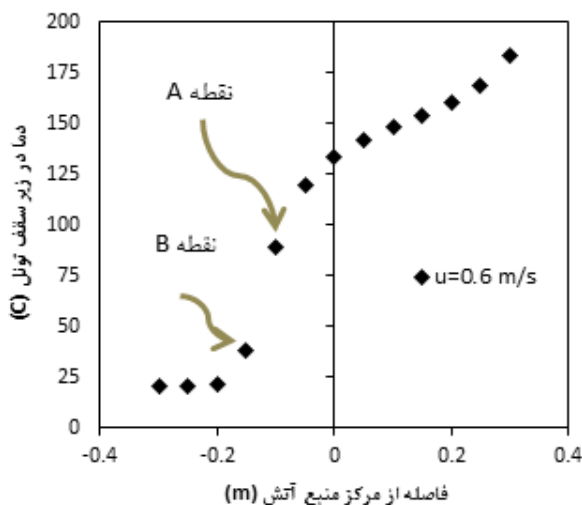


شکل ۳: نوع مش بندی در تونل



شکل ۴: محل اندازه گیری دما و سرعت

دهد. هنگامی که برگشت دود وجود ندارد، دما در بالادست منبع آتش (نقطه B) تقریباً برابر با دمای هوای ورودی خواهد بود. حداقل سرعتی که نشان‌دهنده عدم برگشت جریان دود باشد به عنوان سرعت بحرانی انتخاب می‌شود. نمونه‌های از این نمودارها در شکل ۵ و ۶ آورده شده است. در شکل ۵ در سرعت  $0.6 \text{ m.s}^{-1}$  برگشت جریان دود دیده می‌شود اما با افزایش سرعت و رسیدن آن به  $0.63 \text{ m.s}^{-1}$ ، برگشت جریان دود وجود نخواهد داشت.



شکل ۵: نمودار برگشت جریان دود در سرعت  $0.6 \text{ m.s}^{-1}$ ، دمای هوای ورودی  $20.8^\circ\text{C}$ ، نرخ رهائش حرارت  $6.7 \text{ kW}$

شکل ۷ نمودار تغییرات مؤلفه طولی سرعت در ارتفاع مختلف تونل در خط عمودی بالای منبع آتش به ازای سرعت های تهویه متفاوت را نشان می‌دهد. حداقل سرعت تهویه که به ازای آن مؤلفه طولی سرعت در ارتفاع های مختلف تونل در خط عمود بالای منبع آتش منفی نشود به عنوان سرعت بحرانی تهویه انتخاب می‌شود. همانطور که مشخص است در سرعت تهویه  $0.63 \text{ m.s}^{-1}$  مؤلفه طولی سرعت در هیچ ارتفاعی از تونل منفی نمی‌شود و این سرعت بعنوان سرعت بحرانی تهویه برای یک منبع آتش با نرخ رهائش حرارت  $6.7 \text{ kW}$  انتخاب می‌شود.

که در آن،  $D^*$  قطر مشخصه آتش،  $Q$  نرخ رهائش حرارت و  $\delta x$  اندازه سلول مش است [۱۹].

در شبیه‌سازی هندسه مذکور در ورودی تونل از شرط سرعت ورودی<sup>۲۸</sup> و برای خروجی تونل از شرط فشار خروجی<sup>۲۹</sup> استفاده شده است. در نرم افزار 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 تعیین می‌شود وارد تونل میگردد. در شرط مرزی فشار خروجی، فشار کل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{|u|^2}{2} + \frac{\tilde{p}}{\rho} \quad (24)$$

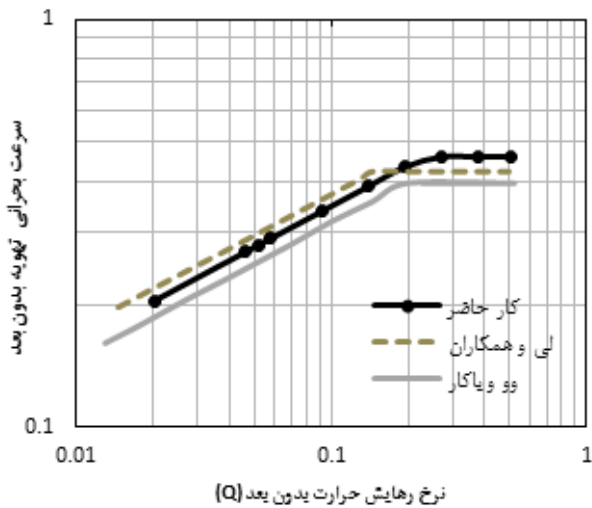
که در آن مقدار  $u$  سرعت محاسبه شده در مرز مورد نظر،  $\tilde{p}$  و  $\rho$  به ترتیب فشار و چگالی محیط خارج از تونل میباشد.

دیواره ها نیز به صورت عایق در نظر گرفته شدند. برای مدل کردن آتش فرض شده که سوخت پروپان در مقطعی مربعی شکل در حال سوختن است. دبی سوخت ورودی با توجه به رابطه ی (۱۸) و اندازه نرخ رهائش حرارت مورد نظر تعیین می‌شود. برای اندازه گیری دما سنسورهایی در فاصله  $1 \text{ cm}$  پایین تر از سقف و بر روی خط مرکزی تونل، با دامنه  $1.5$  در بالادست منبع آتش و  $1 \text{ m}$  پایین دست آن با گام های  $0.05 \text{ m}$  و برای اندازه گیری سرعت، سنسورهایی روی خط عمود در لبه بالایی منبع آتش مطابق شکل ۴ قرار داده شده اند.

برای تعیین سرعت بحرانی در هر نرخ رهائش حرارت، از دوروش، برون‌یابی به وسیله محاسبه طول جریان برگشت دود و بررسی کردن مؤلفه طولی سرعت در ارتفاع مختلف تونل در خط عمود بالای منبع آتش در سرعت تهویه متفاوت ورودی

استفاده شده است (شکل ۵، ۶، ۷). برای روش اول، نمودار توزیع دما در زیر سقف تونل رسم می‌شود. نقطه A، دما در لبه بالایی منبع آتش و نقطه B دما در  $0.5 \text{ m}$  از نقطه A در بالادست منبع آتش را نشان می

28 Velocity\_inlet  
29 Pressure\_outlet



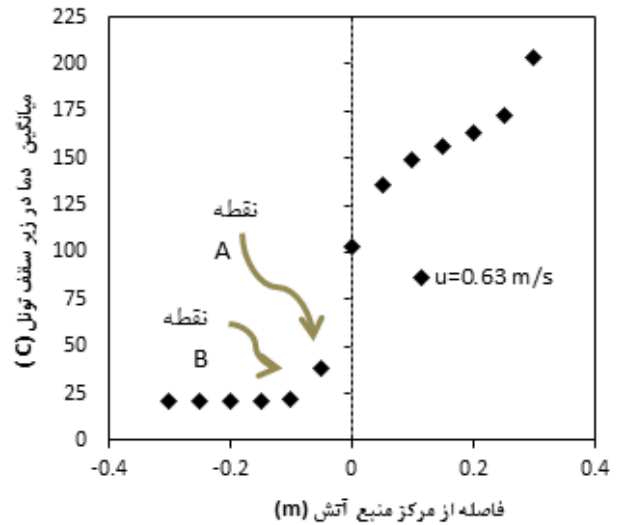
شکل ۸: نمودار تغییرات سرعت بحرانی تهویه بدون بعد در برابر نرخ رهائش حرارت

تهویه مورد بررسی قرار میگیرد. برای این منظور از همان تونل مدل شده با ابعاد  $12 \times 25 \times 0.25$  متر که برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی به کار رفت، استفاده شده است. نرخ رهائش حرارت ناشی از آتش و دمای هوای ورودی به تونل در تمامی حالت‌ها ثابت و برابر با  $6.7 \text{ kW}$  و  $20.8^\circ\text{C}$  است.

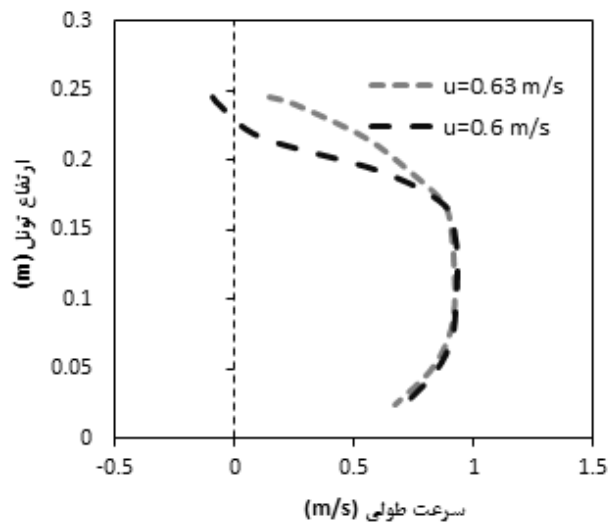
### ۳-۱- تاثیر شکل منبع آتش

شکل ۹، نتایج تغییرات سرعت بحرانی نسبت به عرض منبع آتش را نشان میدهد. افزایش عرض منبع آتش نشانه‌دهنده گسترش آتش در عرض تونل است. طول منبع آتش در تمامی حالتها ثابت و برابر با  $0.1 \text{ m}$  است و چگالی آتش  $20$  به گونهای تغییر داده می‌شود تا نرخ رهائش حرارت ثابت باقی بماند. نتایج نشان میدهند که با افزایش عرض منبع آتش، سرعت بحرانی کاهش مییابد. دلیل آن میتواند کاهش چگالی دود تولیدشده با گسترش منبع آتش در عرض تونل باشد. زیرا با نگاهی به سطح مقطع تونل و افزایش عرض منبع آتش، جریان هوا با ذرات دود کمتری مواجه است و به نیروی اینرسی یا سرعت تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز است. بنابراین با یک نرخ رهائش حرارت ثابت، هر چه آتش‌سوزی در عرض تونل وسیع تر باشد، چگالی دود حاصل از آن کمتر و در نتیجه سرعت بحرانی مورد نیاز کمتر خواهد بود.

تغییرات سرعت بحرانی نسبت به طول منبع آتش در شکل ۱۰ آورده شده است. بررسی افزایش طول منبع آتش میتواند مدلی از آتش‌سوزی وسایل نقلیه مختلفی مانند قطار، اتوبوس و یا ماشین درون تونل باشد. برای این کار عرض منبع آتش ثابت و برابر با  $0.1 \text{ m}$  است و چگالی آتش تغییر داده می‌شود تا اینکه نرخ رهائش حرارت به سبب افزایش طول تغییر نکند و ثابت بماند. نتایج بیانگر آن است که سرعت بحرانی در ابتدا با افزایش طول آتش، افزایش مییابد. ولی با کشیدگی بیشتر آتش در راستای طول تونل،



شکل ۶: نمودار برگشت جریان دود در سرعت  $0.63 \text{ m.s}^{-1}$  دمای هوای ورودی  $20.8^\circ\text{C}$ ، نرخ رهائش حرارت  $6.7 \text{ kW}$



شکل ۷: نمودار میانگین سرعت طولی در ارتفاع تونل در خط عمود بالای منبع آتش، نرخ رهائش حرارت  $6.7 \text{ kW}$

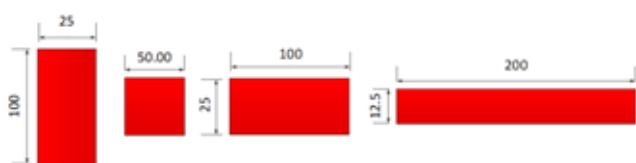
در اینجا با بدون بعد کردن نتایج عددی به دست آمده برای سرعت بحرانی در هر یک از نرخهای رهائش حرارت نسبت به ارتفاع تونل، به مقایسه آن با داده‌های تجربی موجود (کار آزمایشگاهی لی و همکاران و وو و باکار) پرداخته می‌شود (شکل ۸). همان‌طور که مشخص است نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی کار حاضر قابل قبول هستند. با توجه به این نتایج رابطه زیر برای پیش‌بینی سرعت بحرانی تهویه پیشنهاد می‌شود:

$$V_c^* = \begin{cases} 0.75Q^{*1/3} & Q^* \leq 0.2 \\ 0.46 & Q^* > 0.2 \end{cases} \quad (25)$$

### ۳- نتایج

در ادامه اثر عواملی مانند شکل منبع آتش، وجود وسیله نقلیه مانند قطار درون تونل، شکل هندسی تونل و شیب تونل، بر روی سرعت بحرانی

همان طور که مشخص است با تغییر شکل منبع آتش از یک مستطیل در عرض تونل تا یک مستطیل باریک در راستای تونل، سرعت بحرانی برای جلوگیری از برگشت جریان افزایش مییابد. زیرا با باریک شدن منبع آتش در راستای طول تونل، جریان تهویه باید جریان دود با چگالی بیشتری را در یک مسیر باریک در تونل به حرکت در آورد. از این رو به نیروی اینرسی و به عبارتی دیگر سرعت تهویه بیشتری نیاز است. در شکل ۹، ۱۰ و جدول ۱ مقدار سرعت بحرانی بر اساس رابطه (۲۵) آورده شده است. همان طور که مشخص است رابطه (۲۵) تأثیر عرض، طول و شکل منبع آتش را پیش‌بینی نمی‌کند و سرعت بحرانی فقط بر اساس نرخ رهایش حرارت محاسبه می‌شود. از این رو سرعت بحرانی در تمام حالات مقدار ثابتی پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۱۱: شکل منابع آتش با مساحت‌های یکسان، ابعاد بر حسب mm

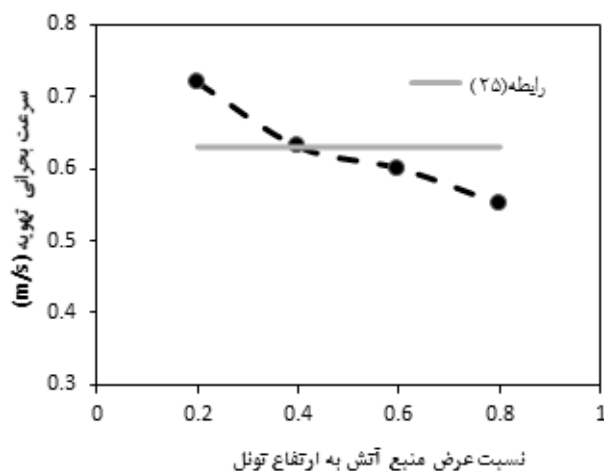
جدول ۱: مقادیر سرعت بحرانی برای هر یک از منابع آتش شکل ۱۱

ابعاد منبع آتش (mm) طول×عرض	سرعت بحرانی تهویه (m/s)	سرعت بحرانی - رابطه (۲۵) (m/s)
۱۰۰×۲۵	۰٫۶	۰٫۶۳
۵۰×۵۰	۰٫۶۹	۰٫۶۳
۲۵×۱۰۰	۰٫۷۲	۰٫۶۳
۱۲٫۵×۲۰۰	۰٫۷۷	۰٫۶۳

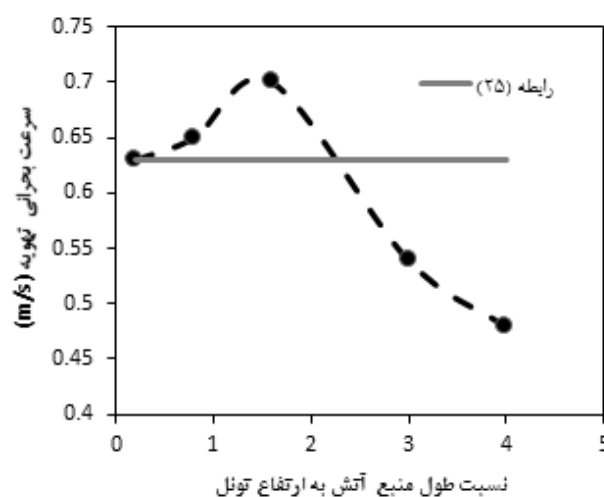
### ۳-۲- تأثیر وسیله نقلیه

قرار گرفتن یک وسیله نقلیه مانند قطار درون یک تونل سبب می‌شود تا مساحتی از سطح مقطع تونل توسط قطار اشغال شود. با تعریف نسبت انسداد<sup>۳۱</sup>، به صورت نسبت سطح مقطع جسم قرار گرفته در تونل به سطح مقطع تونل، تأثیر افزایش سطح مقطع اشغال‌شده توسط وسایل نقلیه مانند قطار بر روی سرعت بحرانی تهویه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی این پارامتر مانند شکل ۱۲ مکعب‌هایی با سطح مقطع مربعی که به ترتیب ۱۶، ۲۵، ۳۶، ۴۹ و ۶۴٪ از سطح مقطع تونل را اشغال می‌کنند، در نظر گرفته شده است. در همه حالتها، مدل‌سازی به گونه‌ای است که جریان تهویه مستقیماً به منبع آتش می‌رسد. به عبارتی منبع آتش بر روی سطح بالایی مکعب که مدلی از وسیله نقلیه است قرار می‌گیرد.

سرعت بحرانی کاهش مییابد. در ابتدا، با افزایش طول منبع آتش ذرات دود کمتری در عرض تونل منتشر میشوند به طوری که جریان هوای ورودی به تونل با ذرات بیشتری از دود در راستای طول تونل و در مرکز آن روبرو است. بنابراین به نیروی اینرسی یا سرعت تهویه بیشتری نیاز است. با افزایش بیشتر طول آتش، سرعت بحرانی کاهش مییابد. در آزمایش‌های سای دیده شد که با افزایش فاصله دو منبع آتش از هم سرعت بحرانی نسبت به حالتی که دو آتش متصل بودند کاهش مییافت. به نظر می‌رسد این پدیده در اینجا نیز وجود دارد و افزایش طول آتش موجب کاهش اثربخشی انتهایی منبع آتش و به عبارتی سطح موثر منبع آتش شده و در نهایت سرعت بحرانی کاهش مییابد [۱۱].



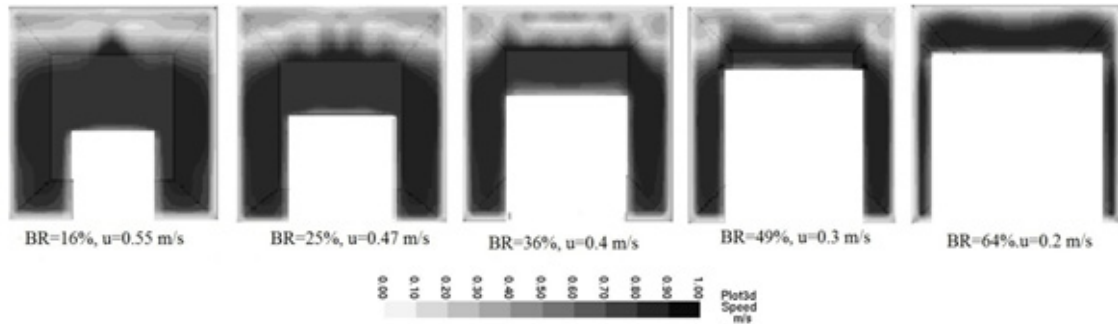
شکل ۹: نمودار تأثیر عرض منبع آتش بر روی سرعت بحرانی تهویه



شکل ۱۰: نمودار تأثیر عرض منبع آتش بر روی سرعت بحرانی تهویه

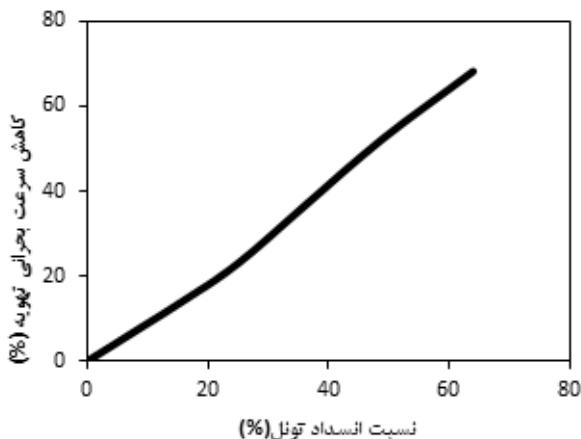
شکل ۱۱ منابع آتش با مساحت یکسان را نشان می‌دهد که نرخ رهایش حرارت در همه آن‌ها ثابت است بدین ترتیب چگالی آتش نیز برای منابع آتش یکسان است. مقادیر سرعت بحرانی برای هر یک از منابع آتش که در شکل ۱۱ نشان داده شده، در جدول ۱ آورده شده است.



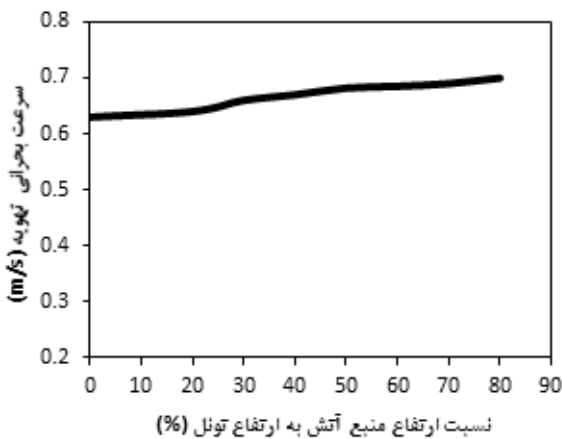


شکل ۱۲: کانتور سرعت در صفحه عرضی تونل و در نسبت انسداد متفاوت

حاصل از آتش‌سوزی سریع تر به سقف رسیده و پخش می‌شود؛ بنابراین به سرعت تهویه بیشتری نیاز است تا از برگشت جریان دود جلوگیری شود. اما از سوی دیگر هر چه ارتفاع منبع افزایش یابد، سطح مقطع اشغال‌شده توسط مکعب بیشتر شده و هوای دمیده شده در تونل برای عبور از جسم فضای کمتری دارد و به عبارتی نسبت انسداد تونل با افزایش ارتفاع منبع آتش افزایش می‌یابد بنابراین با ثابت بودن دبی و کمتر شدن سطح مقطع، سرعت تهویه کمتری لازم است. این دو پدیده اثر همدیگر را تقریباً خنثی کرده و حداقل سرعت تهویه برای جلوگیری از برگشت دود تغییر چندانی نمی‌یابد (شکل ۱۵).



شکل ۱۳: نمودار اثر نسبت انسداد تونل بر روی سرعت بحرانی تهویه



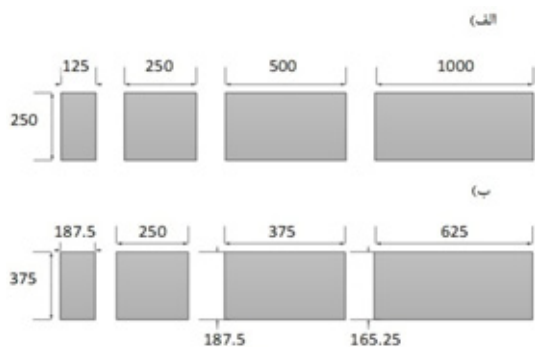
شکل ۱۴: اثر ارتفاع منبع آتش بر روی سرعت بحرانی تهویه

شکل ۱۳ تأثیر افزایش نسبت انسداد بر روی سرعت بحرانی را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که سرعت تهویه مورد نیاز برای جلوگیری از برگشت جریان دود با افزایش میزان نسبت انسداد، کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش سرعت بحرانی با استفاده از معادله پیوستگی، رابطه (۲۶)، (رابطه بقای جرم) میتوان توضیح داد. با فرض اینکه جریان تهویه درون تونل یک جریان پایدار تراکم ناپذیر است، دبی جرمی در داخل یک تونل با یک ورودی و یک خروجی ثابت است؛ بنابراین برای دو موقعیت در داخل تونل میتوان نوشت:

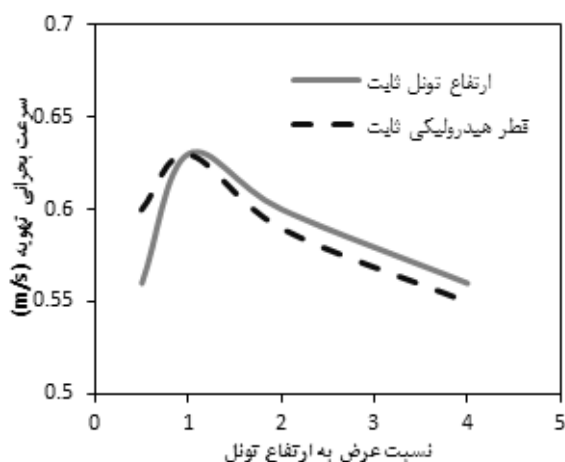
$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \Rightarrow V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 \quad (26)$$

با فرض اینکه جریان تهویه در تونل‌ها یک جریان پایدار تراکم ناپذیر است، سرعت با سطح مقطع تونل، تغییر می‌کند. همان‌طور که رابطه فوق نشان می‌دهد به دلیل وجود وسیله نقلیه در تونل، سطح مقطع جریان تهویه کاهش یافته و موجب افزایش سرعت جریان تهویه در تونل می‌شود. این بدین معنی است که به دلیل وجود وسیله نقلیه در تونل و درحالی‌که جریان تهویه به منبع آتش برسد به سرعت جریان تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز است. (شکل ۱۲)

از سوی دیگر با افزایش نسبت انسداد تونل، تأثیر تغییر ارتفاع منبع آتش که درون تونل قرار گرفته نیز بررسی می‌شود. این کار مدل‌سازی عددی اثر ارتفاع وسیله نقلیه مانند واگن قطار در هنگام آتش‌سوزی بر روی سرعت بحرانی است. هدف از بررسی مشاهده تأثیر افزایش ارتفاع جسمی که درون تونل می‌سوزد بر روی سرعت لازم برای جلوگیری از برگشت جریان دود است. برای این کار مکعبی با عرض یکسان و با ارتفاع‌های مختلف از ۰٫۲ تا ۰٫۸ ارتفاع تونل در نظر گرفته شده است. شکل ۱۴ تأثیر افزایش ارتفاع آتش‌سوزی بر روی سرعت بحرانی را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که افزایش ارتفاع منبع آتش بر روی سرعت بحرانی تهویه تأثیر چندانی ندارد. زیرا با افزایش ارتفاع منبع آتش به اندازه ۸۰٪ ارتفاع تونل، سرعت بحرانی تهویه تنها به میزان ۱۱٪ افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع منبع آتش دو پدیده را به طور همزمان موجب می‌شود. از یک طرف افزایش ارتفاع منبع آتش سبب نزدیکتر شدن سطح آتش گرفته به سقف تونل شده و بدین ترتیب دود

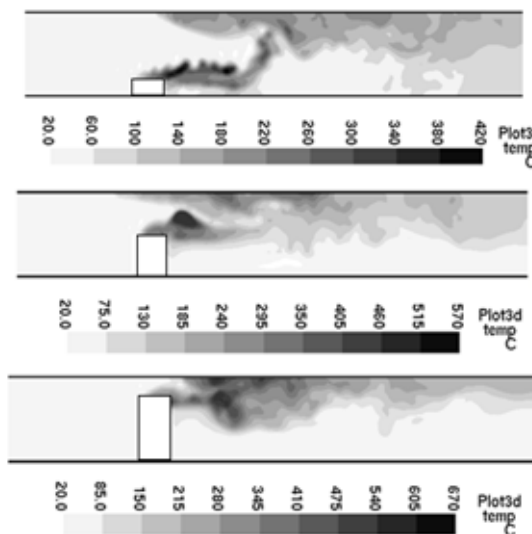


شکل ۱۶: سطح مقطع تونل با نسبت منظرهای متفاوت، ارتفاع (الف) تونل ثابت، (ب) قطر هیدرولیکی ثابت، ابعاد بر حسب میلی متر



شکل ۱۷: تغییرات سرعت بحرانی تهویه با نسبت منظر تونل در شرایط ارتفاع تونل ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت

تونل را گرفته و بدین ترتیب جریان هوا با تراکم بسیار زیاد جریان دود مواجه شده و به سرعت تهویه بیشتری نیاز باشد. با افزایش نسبت منظر تونل، سطح مقطع تونل پهن می‌شود و این خود موجب زودتر رسیدن دود به سقف تونل و جریان یافتن آن در عرض تونل می‌شود. بدین ترتیب لایه دود در محدوده‌ای کوچک در نزدیکی سقف تونل تشکیل می‌شود و در چنین شرایطی به سرعت تهویه کمتری نیاز است. دلیل دیگری که می‌تواند این نحوه تغییرات سرعت بحرانی با نسبت منظر تونل را، چه در حالتی که ارتفاع تونل ثابت و چه در حالتی که قطر هیدرولیکی ثابت است توجیه کند تأثیر اثر محدودیت عرضی<sup>۳۳</sup> است. در زمانی که نسبت منظر تونل کوچک‌تر از واحد است سطح مقطع تونل باریک است و دیوارهای تونل به منبع آتش نزدیک اند. این نزدیکی دیوارهای تونل سبب برگشت حرارت و دود به منبع آتش می‌شود و منجر به افزایش نرخ رهایش حرارت از منبع آتش می‌شود، بنابراین به سرعت تهویه بیشتری نیاز است. اما هنگامی که نسبت منظر تونل بزرگ‌تر از واحد است، تأثیر این اثر بر منبع آتش و نرخ رهایش حرارت کمتر می‌شود و بدین ترتیب به سرعت تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت جریان دود لازم است.



شکل ۱۵: نحوه توزیع دود با افزایش ارتفاع منبع آتش در تونل

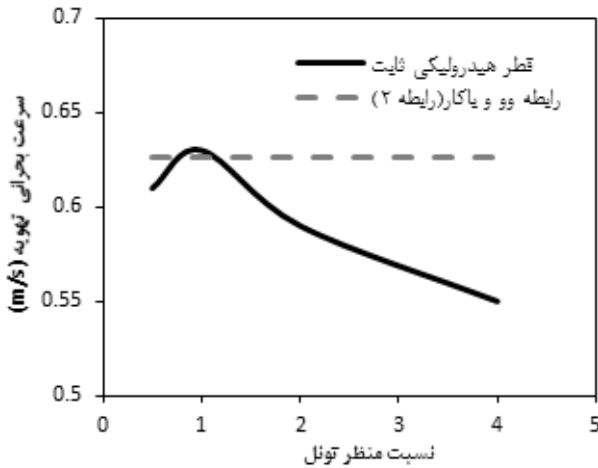
### ۳-۳- تأثیر نسبت منظر تونل

شکل هندسی تونل به ویژه عرض و ارتفاع آن، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی سرعت بحرانی تهویه هستند. برای بررسی عرض و ارتفاع تونل از نسبت منظر<sup>۳۲</sup> تونل که به صورت نسبت عرض به طول تونل تعریف می‌شود، استفاده می‌شود. نسبت منظر تونل واحد می‌تواند نشان‌دهنده تونل‌های یک خطه باشد و نسبت منظرهای بزرگتر از واحد بیانگر تونل‌های دو و چند خطه باشد.

برای بررسی اثر نسبت منظر تونل بر روی سرعت بحرانی تهویه، یک تونل به طول ۱۲ m و با سطح مقطع متفاوت به صورت شکل ۱۶ در نظر گرفته شده است. این شکل سطح مقطع تونل با نسبت منظر متفاوت درحالی که یک بار ارتفاع تونل ثابت است و بار دیگر قطر هیدرولیکی ثابت است را نشان می‌دهد. منبع آتش، مربعی شکل با ابعاد ۰/۱ m × ۰/۱ m است. در تمام این شبیه‌سازی‌ها مش بندی به نحوی است که در تمامی حالتها اندازه‌های سلول‌های محاسباتی در نزدیکی منبع آتش یکسان و برابر با ۰/۰۱ m باشد. نحوه تغییرات سرعت بحرانی تهویه با تغییر نسبت منظر در هر دو حالت ارتفاع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است در ابتدا با افزایش نسبت منظر، سرعت بحرانی تهویه افزایش می‌یابد اما با عریض تر شدن سطح مقطع تونل یا افزایش نسبت منظر، سرعت بحرانی کاهش می‌یابد. تونل با سطح مقطع مربعی ناحیه گذار در الگوی جریان عرضی دود در تونل در نزدیکی منبع آتش به خاطر تغییر نسبت منظر است.

برای روشن شدن دلیل این روند تغییرات سرعت بحرانی، توزیع دما برای دو تونل با نسبت منظرهای ۰/۵ و ۴ در شکل ۱۸ آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است هنگامی که نسبت منظر تونل کوچک‌تر از واحد است و سطح مقطع تونل باریک است، سبب می‌شود تا لایه دود که حاوی گازهای داغ با دمای بالاست تقریباً کل فضای قسمت پایینی

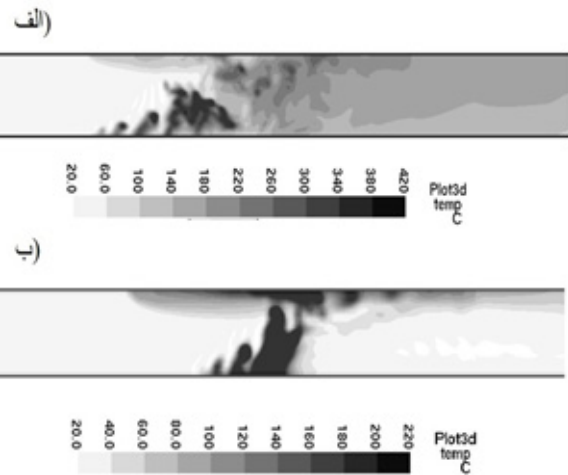
قطر هیدرولیکی ثابت است ولی نسبت منظرهای متفاوتی دارند یکسان پیش‌بینی میکند. بنابراین میتوان گفت رابطه وو و باکار نیز اثر نسبت منظر تونل را به درستی پیش‌بینی نمی‌کند و به عبارتی این رابطه تنها زمانی که ارتفاع تونل ثابت است اثر تغییر عرض تونل را به خوبی پیش‌بینی میکند. از این رو میتوان نتیجه گرفت که اثر عرض و ارتفاع تونل عامل مهم و تأثیرگذاری بر روی سرعت بحرانی تهویه بوده و بنابراین میتوان با بررسیهای بیشتر به تصحیح روابط ارائه‌شده برای در نظر گرفتن تأثیر تغییر نسبت منظر تونل بر روی سرعت بحرانی تهویه پرداخت.



شکل ۲۰: مقایسه تغییرات سرعت بحرانی با نسبت منظر تونل حاصل از شبیه‌سازی و رابطه وو و باکار

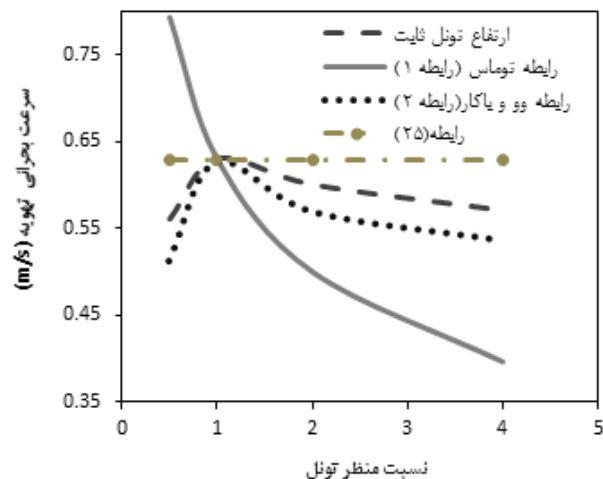
### ۳-۴- تأثیر شیب تونل

یکی دیگر از عامل تأثیرگذار بر روی سرعت بحرانی تهویه شیب تونل است. برای یک تونل دو نوع شیب، مثبت و منفی تعریف می‌شود. هرگاه ورودی هوای تازه به داخل تونل در ارتفاع بالاتری از منبع آتش قرار داشته باشد شیب تونل منفی و هرگاه ورودی هوای تازه در ارتفاع پایینتری نسبت به منبع آتش قرار گرفته باشد شیب تونل مثبت است. حرکت دود درون تونل و شکل متقارن توزیع دود در سمت بالادست و پایین‌دست تونل تحت اثر نیروی شناوری است. به موجب نیروی شناوری، دود حاصل از آتش‌سوزی به دلیل دمای زیاد و چگالی کم تمایل دارد به سمتی از تونل حرکت کند که در ارتفاع بالاتری قرار دارد. این حرکت جریان دود را به اصطلاح اثر دودکشی<sup>۳۴</sup> می‌نامند. بنابراین اگر شیب تونل مثبت باشد نیروی شناوری به حرکت دود به سمت خروجی تونل کمک میکند و به سرعت تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت دود به بالادست لازم است. اما اگر شیب تونل منفی باشد دود تمایل به حرکت به سمت ورودی تونل دارد و در نتیجه به سرعت تهویه بیشتری جهت جلوگیری از برگشت دود احتیاج است. به همین دلیل به بررسی تأثیر شیب منفی تونل بر روی سرعت بحرانی تهویه پرداخت می‌شود. تغییر شیب تونل با تعیین مولفه‌های بردار جاذبه گرانش به کد وارد می‌شود.



شکل ۱۸: توزیع دما در دو تونل با ارتفاع ثابت، (الف) نسبت منظر ۰.۵ و سرعت طولی ۰.۵۶ m/s (ب) نسبت منظر ۴ و سرعت طولی ۰.۵ m/s

شکل ۱۹ تغییرات سرعت بحرانی با افزایش نسبت منظر تونل را درحالی‌که ارتفاع تونل ثابت است بر اساس روابط موجود و شبیه‌سازی عددی نشان میدهد. همان‌طور که مشخص است نحوه تغییرات سرعت بحرانی نسبت به عرض تونل متناسب با رابطه توماس نیست و رابطه توماس اثر نسبت منظر تونل و به عبارتی عرض آن را حتی در زمانی که نسبت منظر بزرگ‌تر از واحد است به خوبی پیش‌بینی نمی‌کند. از طرف دیگر تعیین سرعت بحرانی تهویه بر اساس رابطه (۲۵) که از ارتفاع تونل به عنوان طول مشخصه برای بی بعد کردن سرعت بحرانی و نرخ رهایش حرارت استفاده میکند، مناسب نیست و بهتر است از قطر هیدرولیکی به جای ارتفاع تونل به عنوان طول مشخصه استفاده شود.



شکل ۱۹: مقایسه تغییرات سرعت بحرانی با نسبت منظر تونل

در شکل ۲۰ سرعت بحرانی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برای تونلهایی با نسبت منظر متفاوت ولی با قطر هیدرولیکی یکسان و همین عامل بر اساس رابطه وو و باکار آورده شده است و بیانگر آن است که این رابطه سرعت بحرانی تهویه را برای تمام تونلهایی که در آن

بحرانی تهویه با افزایش طول منبع آتش در ابتدا افزایش و سپس کاهش مییابد. در هر دو حالت فوق، نرخ رهایش حرارت بر واحد سطح به گونه‌ای تغییر داده شد تا با افزایش سطح آتش، نرخ رهایش حرارت کل تغییر نکند. همچنین با تغییر شکل منبع آتش از مستطیلی در راستای عرض تونل تا نوار باریک در طول تونل در شرایطی که سطح آتش در همه حالت یکسان است، سرعت بحرانی افزایش مییابد.

اثر وجود وسیله نقلیه، با دو عامل ارتفاع و نسبت انسداد در تونل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت انسداد تونل، سرعت مورد نیاز برای جلوگیری از برگشت جریان دود کاهش مییابد. دلیل وقوع این پدیده پیوستگی جریان است زیرا که با کاهش سطح مقطع به دلیل افزایش نسبت انسداد تونل سبب می‌شود که به سرعت تهویه کمتری برای جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز باشد. افزایش ارتفاع وسیله نقلیه تأثیر چندانی بر روی سرعت بحرانی تهویه نمیگذارد.

شیب تونل میتواند هم اثر مثبت و هم اثر منفی بر روی سرعت بحرانی تهویه داشته باشد. اگر تونل دارای شیب منفی باشد، یعنی جریان تهویه از ارتفاع بالاتری به سمت منبع آتش برسد، به سرعت تهویه بیشتری نیاز است. اما در شیب مثبت به دلیل حرکت جریان دود در جهت جریان تهویه به دلیل نیروی شناوری به سرعت تهویه کمتری برای برگشت جریان دود لازم است.

برای بررسی شکل هندسی تونل و تأثیر عرض و ارتفاع تونل، نسبت منظر تونل که به صورت نسبت عرض به ارتفاع تونل تعریف می‌شود در نظر گرفته شد. نسبت منظر واحد میتواند نشان‌دهنده‌ی تونل‌های یک خطه باشد و نسبت منظرهای بزرگتر از واحد بیانگر تونل‌های دو و چند خطه باشد. نسبت منظر تونل به دو شیوه تغییر داده شد. یک بار ارتفاع تونل ثابت بوده و نسبت منظر با افزایش عرض تونل تغییر میکند. در روش دیگر این نسبت به گونه‌ای تغییر میکند تا قطر هیدرولیکی ثابت بماند. در هر دو حالت زمانی که نسبت منظر کوچکتر از واحد است با افزایش نسبت منظر سرعت بحرانی افزایش مییابد و برای نسبت منظر بزرگتر از واحد، با افزایش نسبت منظر سرعت بحرانی کاهش مییابد و نسبت منظر برابر با واحد بیانگر یک حالت گذار در الگوی جریان عرضی در نزدیکی منبع آتش است.

## ۵- مراجع

- [1] R. Carvel and A. Beard, The Handbook of Tunnel Safety: Thomas Telford, 2005.
- [2] Y. Z. Li, et al., "Study of critical velocity and back layering length in longitudinally ventilated tunnel fires", Fire Safety Journal, vol. 45, pp. 361- 370, 2010.
- [3] P. H. Thomas, et al., "The Movement of Smoke in Horizontal Passages Against an Air Flow", BRE Trust. Fire Research Station, 1968.
- [4] Y. Oka and G. T. Atkinson, "Control of smoke flow

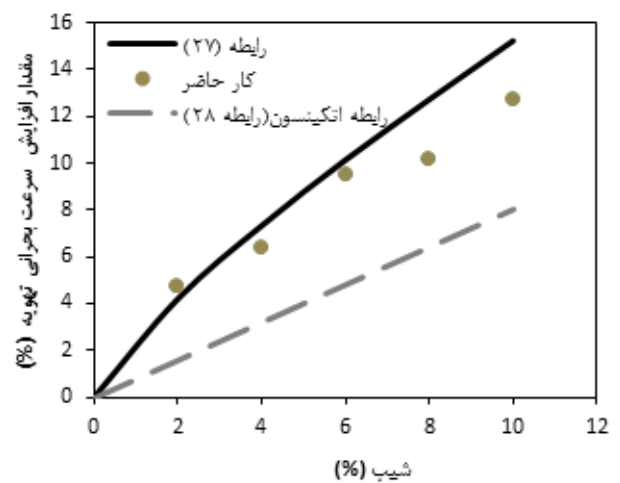
برای راحتی کار شیب به صورت اختلاف ارتفاع در ۱۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۲۱ تغییرات سرعت بحرانی تهویه بر اثر شیب نسبت به سرعت بحرانی تهویه در حالت بدون شیب نشان داده شده است و بیانگر آن است که با افزایش شیب منفی تونل، به سرعت تهویه بیشتری برای جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با رابطه ارائه‌شده توسط سازمان شبیه‌سازی محیط حمل و نقل زیرزمینی (مترو)، (رابطه ۲۷) و رابطه پیشنهادی اتکینسن، (رابطه ۲۸) برای اصلاح سرعت بحرانی تهویه در تونل‌های دارای شیب مقایسه شده و بیانگر انطباق مطلوب نتایج عددی با روابط موجود برای تعیین اثر شیب است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی بین نتایج به دست آمده از رابطه ارائه‌شده توسط سازمان شبیه‌سازی محیط حمل‌ونقل زیر زمینی و اتکینسن قرار میگیرد.

$$K_g = 1 + 0.0374(w)^{0.8} \quad (27)$$

$$u_c(w) = u_c(0)[1 + 0.014w] \quad (28)$$

که در آن  $w$  شیب تونل است.



شکل ۲۱: اثر شیب تونل بر روی تغییرات سرعت بحرانی تهویه

## ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، رابطه‌ای بی بعد شده برای تعیین سرعت بحرانی تهویه بر اساس نرخ رهایش حرارت به دست آمد که به صورت زیر است:

$$V_c^* = \begin{cases} 0.75Q^{*1/3} & Q^* \leq 0.2 \\ 0.46 & Q^* > 0.2 \end{cases} \quad (29)$$

شکل منبع آتش نحوه گسترش آتش و دود در تونل را نشان میدهد. با افزایش عرض منبع آتش درحالی‌که طول آن ثابت است سرعت بحرانی تهویه کاهش مییابد. زمانی که عرض منبع آتش ثابت است، سرعت

- Journal, vol. 46, pp. 556- 557, 2011.
- [13] L. H. Hua, et al., “Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling”, *Building and Environment*, vol. 42, pp. 3905- 3915, 2007.
- [14] L. H. Hu, et al., “On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, pp. 650- 655, 2006.
- [15] B. Niknam, et al., “Determining Critical Wind Velocity During Fire Accident in Alborz Tunnel”, *Amirkabir Journal of science and Technology*, vol. 44, pp. 47- 55, 2012.
- [16] C. G. Fan, et al., “Experimental study on transverse smoke temperature distribution in road tunnel fires”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 37, pp. 89- 95, 2013.
- [17] L. H. Hua, et al., “An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a slopping tunnel fire”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, pp. 246- 254, 2013.
- [18] K. McGrattan, et al., “Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide”, vol. 1, ed: National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [19] K. McGrattan , et al., “Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide”, vol. 1, ed: National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [20] G. H. Yeoh and K. K. Yuen, “Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering: Theory, Modelling and Practice”, Elsevier Science, 2009.
- in tunnel fires”, *Fire Safety Journal*, vol. 25, pp. 305- 322, 1995.
- [5] G. T. Atkinson and Y. Wu, “Smoke Control in Sloping Tunnels”, *Fire Safety Journal* vol. 27, pp. 335- 341, 1996.
- [6] Y. Wu and 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, pp. 363- 390, 2000
- [7] K. Kang, “Characteristic length scale of critical ventilation velocity in tunnel smoke control”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, pp. 205- 211, 2010.
- [8] L. H. Hu, et al., “Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, pp. 1468- 1483, 2008.
- [9] S. S. Y. Jae Seong Roh, Hong Sun Ryou, Myong O Yoon, Youn Tae Jeong, “An experimental study on the effect of ventilation velocity on burningrate in tunnel fires heptane pool fire case”, *Building and Environment* vol. 43, pp. 1225- 1231, 2008.
- [10] L. H. Hu, et al., “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 pp. 68–75, 2008.
- [11] K.-C. Tsai, et al., “Critical ventilation velocity for multi-source tunnel fires,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 98, pp. 650- 660, 2010.
- [12] K.-C. Tsai, et al., “Critical ventilation velocity for tunnel fires occurring near tunnel exits”, *Fire Safety*



