

# تحلیل ابعادی و مطالعه روابط نیمه تجربی سرعت تهویه بحرانی و طول جریان لایه برگشتی برای آتش سوزی در تونل‌ها با تهویه طولی

مصطفی منفرد مسقانی<sup>۱</sup> و\*، رضا مهریار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۲</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز

\*مسئول مکاتبات: mmonfared@mut.ac.ir

## واژگان کلیدی

سرعت تهویه طولی بحرانی  
طول جریان لایه برگشتی  
آتش سوزی  
هندسه تونل  
تحلیل ابعادی  
شیب تونل

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۰۹  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

## چکیده

امنیت جانی یکی از اهداف اصلی طراحی مهندسی ایمنی در آتش سوزی در تونل‌ها بوده و این مسئله نیازمند ایجاد شرایط پایدار برای یک دوره زمانی مشخص می‌باشد. در آتش سوزی در تونل‌ها یکی از استراتژی‌های حفاظتی برای افراد و وسایل نقلیه، محدود کردن جریان دود و محصولات احتراق برای حرکت به سمت بالادست جریان می‌باشد. بنابراین سرعت تهویه طولی بحرانی و طول جریان لایه برگشتی دود در آتش سوزی در تونل‌ها دو پارامتر بسیار مهم در طراحی سیستم‌های تهویه طولی در تونل‌ها می‌باشند. در این پژوهش در ابتدا با بکارگیری روش تحلیل ابعادی، عبارات بدون بعد برای سرعت تهویه بحرانی و طول جریان لایه برگشتی بر حسب پارامترهای نرخ حرارت آزاد شده، مشخصات هندسی تونل، شرایط محیطی شامل دانسیته هوا، دمای هوا و ظرفیت حرارتی هوا و در نهایت شتاب جاذبه زمین به دست آمده است. سپس با بررسی پژوهش‌های آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سایر محققین، روابط نیمه تجربی ارائه شده برای سرعت تهویه طولی بحرانی و طول جریان لایه برگشتی مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه روابط نیمه تجربی مورد استفاده برای نشان دادن اثرات شیب تونل بر سرعت تهویه بحرانی ارائه شده توسط سایر دانشمندان نیز بررسی و ارائه شده است. همچنین در بخش پایانی، اثر هندسه تونل بر کاهش و یا افزایش نرخ حرارت آزاد شده نیز به صورت مجزا مورد بررسی قرار داده شده است.

## ۱ مقدمه

طرف دیگر خارج می‌شود. این سیستم معمولاً منحصر به تونل‌های کوتاه با طول کمتر از ۸۰۰ متر است، زیرا در تونل‌های بلندتر، افت فشار ناشی از اصطکاک زیاد می‌شود. گاهی نیز با نصب بادبزن‌های تقویتی در تونل به جریان هوا شتاب می‌دهند [۱].

سرعت بحرانی<sup>۱</sup> یک پارامتر بسیار مهم در ارتباط با سیستم تهویه طولی تونل‌ها می‌باشد. سرعت بحرانی، حداقل سرعت طولی مورد نیاز جریان هوا برای جلوگیری از انتشار دود در جهت بالادست آتش می‌باشد. این مقدار به‌طور ویژه در حالتی با تهویه طولی و عبور و مرور در مسیر یک جهته بسیار حائز اهمیت می‌باشد. هنگامی که سرعت جریان هوا کمتر از سرعت بحرانی باشد، نیروی شناوری ناشی از لایه داغ دود می‌تواند جریانی را در جهت مخالف جریان هوای طولی ایجاد نماید و در نتیجه دود به بالا دست آتش انتشار یابد که به چنین پدیده‌ای در اصطلاح جریان لایه برگشتی<sup>۲</sup> می‌گویند. بنابراین متناسب با این نوع جریان، طول جریان لایه برگشتی که بیانگر میزان گسترش جریان دود به بالادست آتش می‌باشد، تعریف می‌شود [۲].

استراتژی بهینه برای سیستم تهویه در زمان آتش سوزی، جلوگیری از انتشار دود به یک طرف از آتش می‌باشد. به عنوان مثال برای آتش سوزی در تونل یک جهته، وسایل نقلیه تا زمانی که دود به بالادست آتش منتشر نشده باشد می‌توانند از یک طرف تونل را ترک کنند. اما در صورتی که سرعت طولی

بر اساس مطالعات صورت گرفته از میان ۸۵ آتش سوزی بزرگ رخ داده در تونل‌های مختلف، تونل‌های مترو، جاده‌ای و راه‌آهن به ترتیب ۵۳٪، ۳۴٪ و ۱۳٪ از این آتش سوزی‌ها را شامل می‌شوند. عملکرد نامناسب سامانه تهویه تونل‌ها، نقش بسزایی در افزایش تلفات ناشی از آتش سوزی در تونل‌ها را داشته است. به‌طور کلی سه منبع اصلی ایجاد خطر در آتش سوزی در تونل‌ها شامل حرارت، دود و کمبود اکسیژن می‌باشد. اگر چه حرارت تولیدی در هنگام آتش سوزی مشهودترین خطر در ارتباط با آتش است، اما بیشترین تلفات ناشی از استنشاق دود می‌باشد. منظور از دود تمام محصولات تجزیه شده در اثر حرارت و احتراق مواد هستند [۱].

در صورت وقوع آتش سوزی در تونل، سیستم تهویه تونل می‌بایست قادر به خارج کردن دود و تأمین هوای لازم باشد. سیستم‌های تهویه تونل‌ها به روش‌های مختلفی نظیر سیستم تهویه طبیعی، تهویه طولی، تهویه ناشی از اثر پیستونی، تهویه عرضی، تهویه نیمه عرضی و تهویه به کمک مواد شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش تونل با تهویه طولی که مرسوم‌ترین نوع تهویه در تونل‌ها می‌باشد مورد بررسی قرار داده شده است. در این سیستم یک جریان طولی در تونل ایجاد شده و طی آن هوا از یک طرف دمیده و از

<sup>1</sup>critical velocity    <sup>2</sup>backlayering flow

## ۲ تحلیل ابعادی

ارتفاع تونل یکی از مهمترین پارامترهای اثرگذار بر روی حرکت جریان دود می‌باشد. اما ارتفاع تونل به تنهایی بیانگر اثرات هندسی تونل بر روی جریان دود نمی‌باشد. بر اساس مطالعات تجربی صورت گرفته، برای تونل‌هایی با ارتفاع یکسان، سرعت تهویه بحرانی، همراه با تغییر در عرض تونل، تغییر خواهد نمود. بنابراین ارتفاع تونل نمی‌تواند به‌عنوان یک طول مشخصه مناسب جهت تحلیل‌ها مورد استفاده قرار داده شود. در نتیجه قطر هیدرولیکی متوسط به‌وسیله‌ی دی‌ریس<sup>۶</sup> و همکارانش به‌عنوان یک طول مشخصه مناسب جهت ارزیابی جریان دود در تونل‌ها تعریف شد [۹]. بر اساس بررسی‌های انجام شده، دینامیک جریان سیال درون تونل، بیش از ارتفاع تونل، تابعی از قطر هیدرولیکی متوسط تونل بوده که تأثیرات عرض تونل نیز در آن لحاظ شده است. قطر هیدرولیکی تونل که با  $\bar{H}$  نشان داده می‌شود، به‌صورت چهار برابر مساحت سطح مقطع تونل  $A$  به محیط خیس شده تونل  $\chi$  تعریف می‌شود:

$$\bar{H} = \frac{4A}{\chi} \quad (1)$$

قطر هیدرولیکی متوسط معیاری از ظرفیت جریان دود درون تونل است. قطر هیدرولیکی بزرگ‌تر بیانگر طول نسبتاً کوچک‌تر تونل در تماس با جریان دود است (محیط خیس شده کمتر)، و بنابراین دیواره تونل دارای مقاومت کمتری نسبت به جریان بوده و در نهایت ظرفیت جریان دود بالاتر خواهد بود [۹]. همچنین شکل سطح مقطع تونل از دیگر پارامترهای مؤثر بر حرکت جریان دود در یک تونل می‌باشد. برای تونل‌ها با ارتفاع یکسان، اما با عرض‌های متفاوت، تونل با عرض بزرگ‌تر مقدار بیشتری از پلوم دود<sup>۷</sup> را به همراه خواهد داشت. برای تونل‌ها با سطح مقطع غیر مستطیلی، از ضریب منظری  $\xi$  که به‌صورت زیر تعریف می‌شود جهت مطالعه شکل مقطع تونل استفاده می‌شود:

$$\xi = \frac{A}{H^2} \quad (2)$$

ضریب منظری<sup>۸</sup> برای تونل‌های موجود در بزرگراه‌ها و تونل‌های تک جهته بزرگ‌تر از یک بوده و برای تونل‌های دو جهته کوچک‌تر از یک می‌باشد. بنابراین این ضریب به‌صورت یک قید تابعی قطعه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰].

بر اساس مطالعات انجام شده طول لایه برگشتی در یک تونل با تهویه طولی تحت تأثیر پارامترهای نرخ حرارت آزاد شده  $Q$ ، سرعت تهویه طولی  $V$ ، قطر هیدرولیکی تونل  $\bar{H}$ ، دانسیته هوا  $\rho_a$ ، دمای محیط  $T_a$ ، ظرفیت حرارتی هوا  $C_p$  و شتاب جاذبه زمین  $g$  می‌باشد. کمیت‌های فیزیکی مذکور و ابعاد مربوط به آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

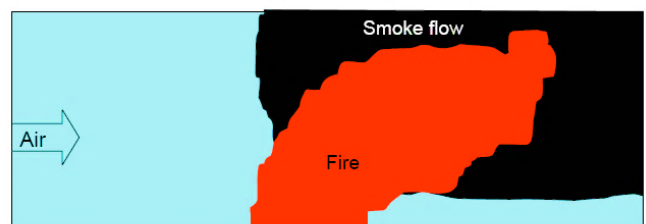
$$f(L, \bar{H}, Q, V, T_a, \rho_a, g, C_p) = 0 \quad (3)$$

بنابراین اگر  $L, M, T$  و  $\theta$  به‌عنوان بعدهای اصلی در نظر گرفته شوند، آن‌گاه معادلات بی‌بعد به‌صورت زیر نوشته خواهد شد:

جریان هوا پایین باشد، دود و محصولات احتراق می‌تواند به هر دو سمت منتشر شود. مقدار سرعت بحرانی به‌طور کلی به پارامترهای نظیر موقعیت، اندازه و میزان حرارت آزاد شده آتش، شیب تونل، سطح مقطع تونل و شرایط محیطی وابسته می‌باشد [۳].



(الف) سرعت تهویه کمتر از سرعت تهویه بحرانی



(ب) سرعت تهویه کمتر از سرعت تهویه بحرانی

شکل ۱: توزیع شماییک دود ناشی از آتش‌سوزی در یک تونل با تهویه طولی.

لی<sup>۳</sup> و همکارانش با استفاده از نتایج به دست آمده از تأثیر شیب تونل بر سرعت بحرانی، یک مدل یک به هشت از تونل جاده‌ای دو طرفه را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، سرعت بحرانی برای شیب و نرخ حرارت آزاد شده مختلف مطالعه شده است [۴]. گلاسا<sup>۴</sup> و والاسک<sup>۵</sup>، برای یک تونل جاده‌ای یک طرفه و همچنین آتش با قدرت ۵ MW، تأثیر شیب تونل روی حرکت دود در تونل را با استفاده از نرم افزار FDS مورد بررسی قرار دادند. شیب تونل در بازه ۲۰° - تا ۲۰° قرار داشت و تونل با سیستم تهویه طولی جت فن در این پژوهش مدل شده است [۳]. به‌طور کلی نتایج تجربی به دست آمده جهت تخمین سرعت تهویه بحرانی برای شرایط مختلف توسط دانشمندان جهت مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی مختلف مورد استفاده قرار داده شده است [۵-۸].

در این پژوهش در ابتدا یک تحلیل ابعادی روی طول جریان لایه برگشتی و سرعت تهویه طولی بحرانی انجام شده و تابعیت این دو پارامتر فیزیکی نسبت به سایر پارامترهای حائز اهمیت در آتش‌سوزی در تونل‌ها، استخراج شده است. سپس با بررسی پژوهش‌های موجود، روابط نیمه تجربی ارائه شده توسط سایر محققین برای محاسبه سرعت تهویه طولی بحرانی و طول جریان لایه برگشتی مورد مطالعه قرار داده شده است. در ادامه روابط نیمه تجربی موجود برای اعمال اثر شیب تونل بر روی سرعت تهویه بحرانی بررسی و تحلیل شده است. در بخش پایانی نیز با استفاده از یک متغیر بی‌بعد، تأثیر هندسه تونل بر نرخ حرارت آزاد شده بررسی شده است.

<sup>3</sup>Li <sup>4</sup>Glasa <sup>5</sup>Valasek <sup>6</sup>De Ris <sup>7</sup>smoke plume <sup>8</sup>aspect ratio

$$\begin{aligned}
 &= f\left(\frac{Q}{C_p T_a \rho_a g^{\frac{1}{3}} \bar{H}^{\frac{5}{3}}}, \frac{g^{\frac{2}{3}} \bar{H}^{\frac{2}{3}}}{V^{\frac{2}{3}}}\right) \\
 &= f\left(\frac{Q}{C_p T_a \rho_a g^{\frac{1}{3}} \bar{H}^{\frac{5}{3}}}, \left(\frac{V}{\sqrt{g \bar{H}}}\right)^{-2}\right) \\
 &= f\left(\frac{Q^*}{V^{*3}}\right) \quad (10)
 \end{aligned}$$

که در رابطه فوق  $Q^*$  و  $V^*$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Q^* = \frac{Q}{C_p T_a \rho_a g^{\frac{1}{3}} \bar{H}^{\frac{5}{3}}} \quad (11)$$

و

$$V^* = \frac{V}{\sqrt{g \bar{H}}} \quad (12)$$

در روشی مشابه، سرعت تهویه طولی تابعی از نرخ حرارت آزاد شده  $Q$ ، سرعت تهویه طولی  $V$ ، قطر هیدرولیکی تونل  $\bar{H}$ ، دانسیته هوا  $\rho_a$ ، دمای محیط  $T_a$ ، ظرفیت حرارتی هوا  $C_p$  و شتاب جاذبه زمین  $g$  می‌باشد. حداقل سرعت تهویه طولی که در آن از معکوس شدن جریان دود به سمت بالادست جریان در تونل جلوگیری کند را سرعت تهویه بحرانی طولی می‌نامند. این بدین مفهوم است که طول لایه برگشتی می‌بایست برابر با صفر شود تا سرعت تهویه برابر با سرعت تهویه بحرانی شود. بنابراین با توجه به معادله (۱۰)، رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$f\left(\frac{Q^*}{V^{*3}}\right) \Rightarrow V_c^* = f(Q^{*\frac{1}{3}}) \quad (13)$$

که  $V_c^*$  سرعت تهویه بحرانی بی‌بعد می‌باشد.

### ۳ روابط نیمه تجربی سرعت تهویه طولی بحرانی و طول جریان لایه برگشتی

اولین بار توماس<sup>۹</sup> در سال ۱۹۵۸ پیشنهاد داد که جریان لایه برگشتی هنگامی که عدد فرود به سمت یک میل می‌کند، ناپدید می‌شود. بنابراین بر اساس این تحلیل رابطه زیر اولین بار برای محاسبه سرعت تهویه طولی بحرانی پیشنهاد داده شد [۱۱]:

$$Fr_c = \left(\frac{\Delta \rho g H}{\rho_a V_c^2}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad V_c = \left(\frac{g Q H}{\rho_a C_p T_f A}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$\rho_a$  دانسیته محیط و  $T_f$  دمای گاز می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_f = \left(\frac{Q}{\rho_a C_p V_c A}\right) + T_a \quad (15)$$

در ادامه اوکا<sup>۱۰</sup> و اتکینسون<sup>۱۱</sup> با استفاده از مجموعه تست‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک، رابطه‌ای میان سرعت تهویه بحرانی و نرخ حرارت آزاد شده را به دست آوردند [۱۲]. مدل مورد استفاده تونلی با مساحت سطح

جدول ۱: کمیت‌های فیزیکی مؤثر در طول لایه برگشتی

کمیت فیزیکی	علامت	بعد
طول لایه برگشتی	$L$	$L$
نرخ حرارت آزاد شده	$Q$	$ML^2 T^{-3}$
دمای محیط	$T_a$	$\theta$
شتاب جاذبه	$g$	$LT^{-2}$
ظرفیت حرارتی	$C_p$	$L^2 T^2 \theta$
دانسیته هوا	$\rho_a$	$ML^{-3}$
قطر هیدرولیکی	$\bar{H}$	$L$
سرعت تهویه طولی	$V$	$LT^{-1}$

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \bar{H}^{\alpha_1} V^{\beta_1} \rho^{\gamma_1} C_p^{\epsilon_1} L \\
 &= L^{\alpha_1} [LT^{-1}]^{\beta_1} [ML^{-3}]^{\gamma_1} [L^2 T^2 \theta^{-1}]^{\epsilon_1} L \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \pi_2 &= \bar{H}^{\alpha_2} V^{\beta_2} \rho^{\gamma_2} C_p^{\epsilon_2} Q \\
 &= L^{\alpha_2} [LT^{-1}]^{\beta_2} [ML^{-3}]^{\gamma_2} [L^2 T^2 \theta^{-1}]^{\epsilon_2} [ML^2 T^{-3}] \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \pi_3 &= \bar{H}^{\alpha_3} V^{\beta_3} \rho^{\gamma_3} C_p^{\epsilon_3} T_a \\
 &= L^{\alpha_3} [LT^{-1}]^{\beta_3} [ML^{-3}]^{\gamma_3} [L^2 T^2 \theta^{-1}]^{\epsilon_3} \theta \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \pi_4 &= \bar{H}^{\alpha_4} V^{\beta_4} \rho^{\gamma_4} C_p^{\epsilon_4} g \\
 &= L^{\alpha_4} [LT^{-1}]^{\beta_4} [ML^{-3}]^{\gamma_4} [L^2 T^2 \theta^{-1}]^{\epsilon_4} [LT^{-2}] \quad (7)
 \end{aligned}$$

که با برقراری اصل بقا، نمای کمیت‌های فیزیکی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= -1, \quad \beta_1 = 0, \quad \gamma_1 = 0, \quad \epsilon_1 = 0, \\
 \alpha_2 &= -2, \quad \beta_2 = -3, \quad \gamma_2 = -1, \quad \epsilon_2 = 0, \\
 \alpha_3 &= 0, \quad \beta_3 = -2, \quad \gamma_3 = 0, \quad \epsilon_3 = 1, \\
 \alpha_4 &= 1, \quad \beta_4 = -2, \quad \gamma_4 = 0, \quad \epsilon_4 = 0. \quad (8)
 \end{aligned}$$

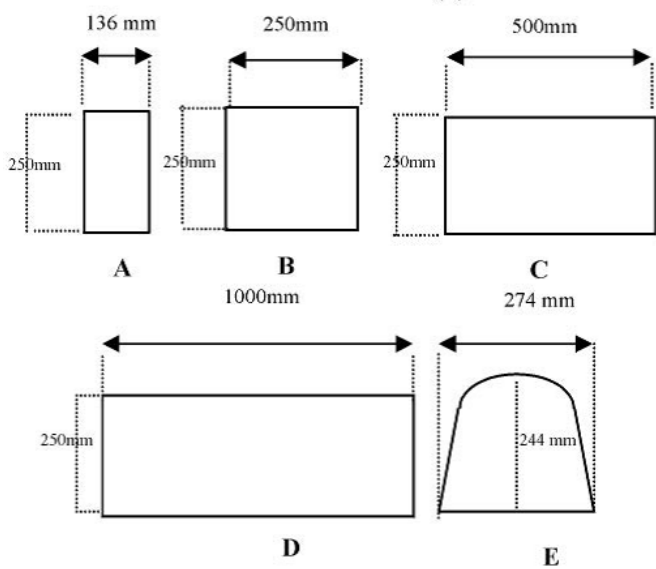
بنابراین اعداد بدون بعد در چنین حالتی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \frac{L}{\bar{H}}, \quad \pi_2 = \frac{Q}{\rho_a \bar{H}^2 V^3}, \\
 \pi_3 &= \frac{C_p T_a}{V^2}, \quad \pi_4 = \frac{g \bar{H}}{V^2}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

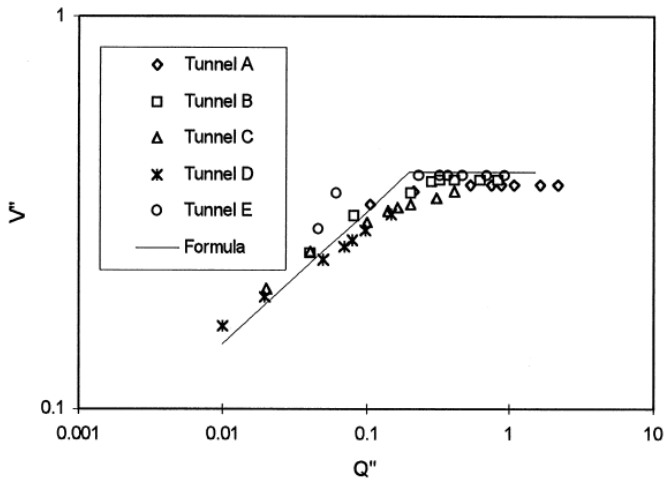
بنابراین معادلات بی‌بعد را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned}
 &f\left(\frac{L}{\bar{H}}, \frac{Q}{\rho_a \bar{H}^2 V^3}, \frac{C_p T_a}{V^2}, \frac{g \bar{H}}{V^2}\right) = 0 \\
 \Rightarrow \frac{L}{\bar{H}} &= f\left(\frac{Q}{\rho_a \bar{H}^2 V^3}, \frac{C_p T_a}{V^2}, \frac{g \bar{H}}{V^2}\right) \\
 &= f\left(\frac{Q}{\rho_a \bar{H}^2 V^3}, \frac{C_p T_a}{g \bar{H}}\right) = f\left(\frac{g Q}{\rho_a \bar{H} H V^3}, \frac{C_p T_a}{g \bar{H}}\right) \\
 &= f\left(\frac{g Q}{C_p T_a \rho_a \bar{H} V^3}\right) = f\left(\frac{Q g^{\frac{2}{3}} \bar{H}^{\frac{2}{3}}}{C_p T_a \rho_a g^{\frac{1}{3}} \bar{H}^{\frac{5}{3}} V^3}\right)
 \end{aligned}$$

<sup>9</sup>Thomas <sup>10</sup>Oka <sup>11</sup>Atkinson



شکل ۴: نمای شماتیک از مقطع مختلف تونل‌ها [۱۳].

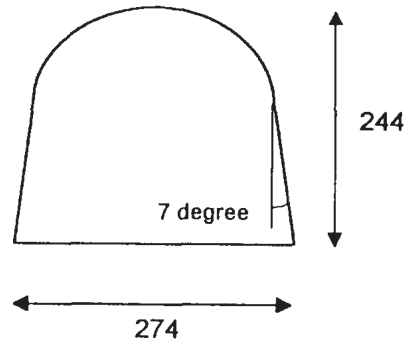


شکل ۵: سرعت تهویه طولی بحرانی بدون بعد بر حسب نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد [۱۳].

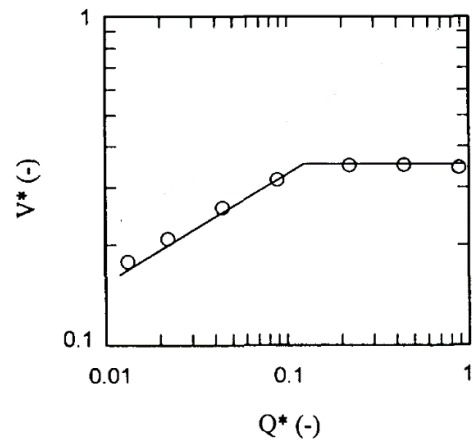
$$V_c^* = \begin{cases} 0.4 \left( \frac{Q^*}{0.12} \right)^{\frac{1}{4}} & Q^* < 0.12 \\ 0.4 & Q^* \geq 0.12 \end{cases} \quad (17)$$

لی ۱۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ مطالعات تجربی و نظری را بر روی طول جریان لایه‌برگشتی و سرعت تهویه طولی بحرانی انجام دادند [۱۴]. آزمایش‌ها در دو تونل مختلف A و B با سطح مقاطع مختلف با تهویه طولی انجام شده است (شکل ۶). منبع آتش مورد استفاده در تونل A و B به ترتیب دارای قطرهای ۱۰۰ mm و ۱۵۰ mm بوده و از پروپان به عنوان منبع سوخت استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی اثر وجود یک مانع در تونل بر روی سرعت بحرانی و طول جریان لایه‌برگشتی، از یک مدل وسیله به طول ۸ m، عرض ۱۵ m و ارتفاع ۲ m درون تونل استفاده شده است. مدل وسیله در حدود ۲۰٪ از سطح مقطع تونل را اشغال نموده است.

مقطع  $0.569 \text{ m}^2$  و طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵ m، ۲۷۴ mm و ۲۴۴ mm بوده است. از پروپان به عنوان منبع سوخت استفاده شده است (شکل ۲).



شکل ۲: نمای شماتیک از مقطع تونل [۱۲].



شکل ۳: سرعت تهویه طولی بحرانی بدون بعد بر حسب نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد [۱۲].

بخشی از نتایج حاصله از مجموع تست‌های انجام شده برای شرایط مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تست‌ها شرایط مختلفی نظیر محل آتش‌سوزی مورد بررسی قرار داده شده است و نتایج زیر به دست آمده است:

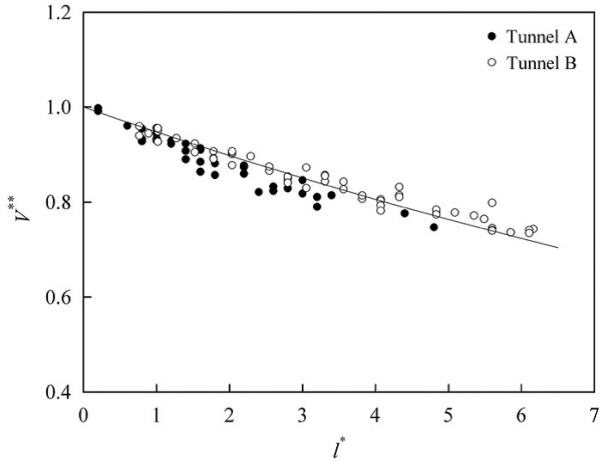
$$V_c^* = \begin{cases} k_v \left( \frac{Q^*}{0.12} \right)^{\frac{1}{4}} & Q^* < 0.12 \\ k_v & Q^* \geq 0.12, \end{cases} \quad (16)$$

که  $k_v$  ثابتی است که در بازه ۰/۲۲ تا ۰/۳۸ قرار دارد. و با کار ۱۳ تحقیقات آزمایشگاهی دیگری در مقیاس کوچک بر روی پنج مدل مختلف را انجام دادند [۱۳]. در این آزمایش تأثیر هندسه تونل بر روی سرعت بحرانی مطالعه شده است. مدل تونل‌ها دارای ارتفاع‌های یکسان و عرض‌های مختلف بوده‌اند (شکل ۴). از گاز پروپان به عنوان منبع سوخت استفاده شده است. نتایج حاصل از داده‌های تجربی در شکل ۵ مشخص می‌باشد. بر اساس نتایج حاصله، رابطه زیر برای محاسبه سرعت تهویه طولی بحرانی پیشنهاد شده است:

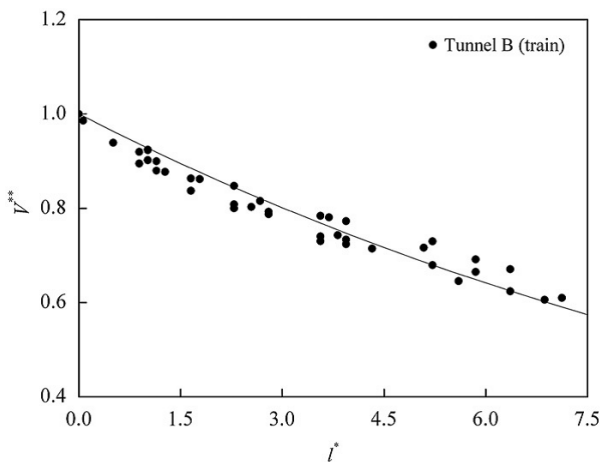
است:

$$L^* = \begin{cases} 1.875 \ln \left( \frac{0.81 Q^* \frac{1}{3}}{V^*} \right)^{\frac{1}{3}} & Q^* < 0.15 \\ 1.875 \ln \left( \frac{0.43}{V^*} \right) & Q^* \geq 0.15 \end{cases} \quad (20)$$

که  $L^* = \frac{L}{H}$  می‌باشد.



شکل ۸: طول جریان لایه برگشتی برای تونل‌های A و B [۱۴].

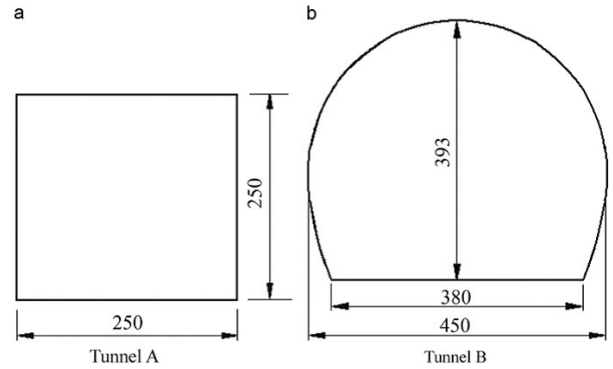


شکل ۹: طول جریان لایه برگشتی برای تونل B همراه با مدل وسیله [۱۴].

همچنین شکل ۹ بیانگر نتایج برای حالتی است که مدل وسیله در تونل B قرار داده شده است. بنابراین در این حالت طول جریان لایه برگشتی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L^* = \begin{cases} 1.375 \ln \left( \frac{0.63 Q^* \frac{1}{3}}{V^*} \right)^{\frac{1}{3}} & Q^* < 0.15 \\ 1.375 \ln \left( \frac{0.33}{V^*} \right) & Q^* \geq 0.15 \end{cases} \quad (21)$$

و ننگ ۱۵ و همکارانش با بکارگیری شبیه‌سازی عددی و تست‌های آزمایشگاهی، طول جریان لایه برگشتی و سرعت تهویه طولی بحرانی را در سال ۲۰۱۵ مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. همان‌طور که در شکل ۱۰



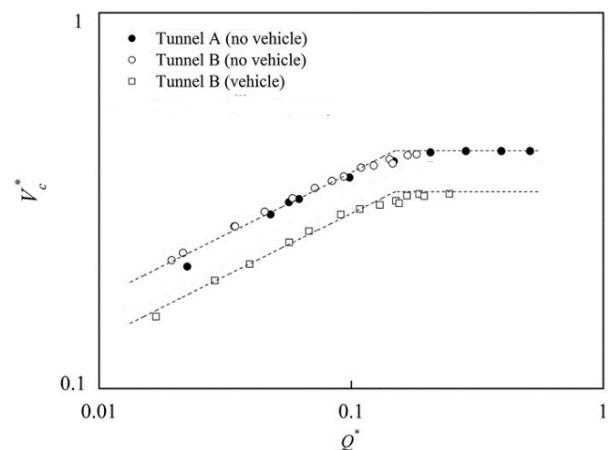
شکل ۶: سطح مقطع تونل‌های A و B [۱۴].

نتایج مربوط به سرعت تهویه طولی بحرانی بدون بعد بر حسب نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد در نمودار ۷ نمایش داده شده است. سرعت بحرانی با افزایش نرخ حرارت آزاد شده افزایش یافته است و هنگامی که مقدار نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد به سمت مقدار ۰/۱۵ نزدیک شده است، مقدار سرعت تهویه طولی بدون بعد تقریباً ثابت شده و مستقل از نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد شده است. بنابراین نتایج بیانگر رابطه زیر برای محاسبه سرعت تهویه طولی بحرانی می‌باشد:

$$V_c^* = \begin{cases} 0.81 \left( Q^* \frac{1}{3} \right) & Q^* < 0.15 \\ 0.43 & Q^* \geq 0.15 \end{cases} \quad (18)$$

و برای حالتی که مدل وسیله در تونل B قرار داده شده است، سرعت تهویه طولی بحرانی کاهش یافته و رابطه زیر را حاصل شده است:

$$V_c^* = \begin{cases} 0.63 \left( Q^* \frac{1}{3} \right) & Q^* < 0.15 \\ 0.33 & Q^* \geq 0.15 \end{cases} \quad (19)$$



شکل ۷: سرعت تهویه طولی بحرانی بدون بعد بر حسب نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد [۱۴].

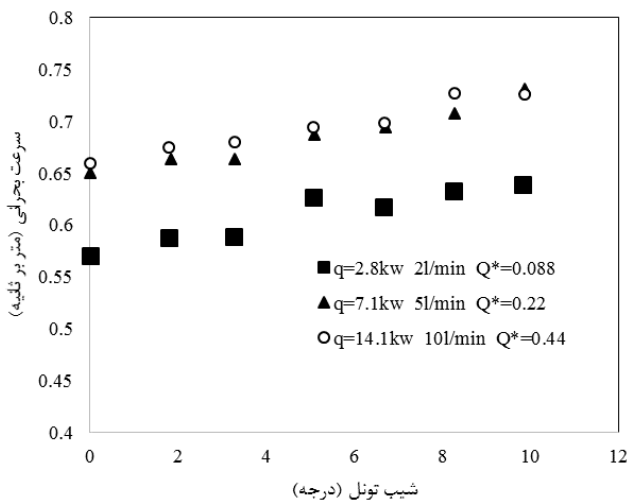
همچنین نتایج مربوط به طول جریان لایه برگشتی برای تونل‌های A و B در شکل ۸ نشان داده شده است. در این نمودار  $V^* = \frac{V}{V_c}$  می‌باشد. با بررسی داده‌های تجربی، رابطه زیر برای طول جریان لایه برگشتی به دست آمده

تولیدی معادل با ۲/۸ kW، ۷/۱ kW و ۱۴/۱ kW بوده است. با بکارگیری تشابه هندسی، قدرت آتش‌های تولیدی برای یک تونل به قطر ۵ متر، در بازه ۵ تا ۳۰ MW قرار دارد. نتایج حاصله از این تحقیق را می‌توان در شکل ۱۲ برای نرخ‌های حرارت آزاد شده بدون بعد مختلف، برای مقادیر متفاوتی از شیب تونل مشاهده نمود. در این نمودار نسبت میان سرعت بحرانی در تونل شیب‌دار نسبت به تونل افقی محاسبه شده است. با بکارگیری برآزش منحنی، رابطه زیر برای نشان دادن اثر شیب تونل بر سرعت تهویه طولی بحرانی استخراج شده است:

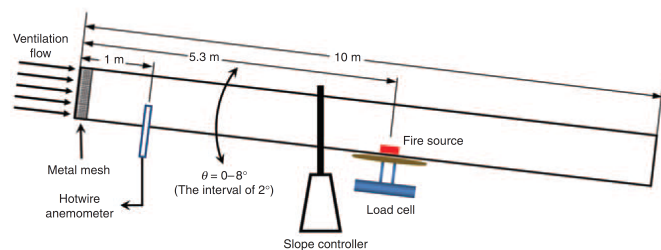
$$\frac{V_{c,\alpha}}{V_c} = (1 + 0.14\alpha) \quad (24)$$

که  $V_{c,\alpha}$  سرعت تهویه بحرانی برای تونل با شیب  $\alpha$  می‌باشد. در پژوهشی دیگر برای سه نوع سوخت مختلف استون، هپتان و متانول به عنوان منبع تأمین‌کننده آتش، اثر شیب تونل بر روی سرعت تهویه طولی بحرانی بررسی شده است. در این پژوهش شیب تونل در بازه ۰ تا ۱۰ درجه قرار گرفته است [۱۷]. نمای مربوط به ابعاد و هندسه مدل تست شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج تجربی در نمودار ۱۴ مشخص شده است. همان‌طور که نمایان است مقادیر سرعت بحرانی برای انواع سوخت و قدرت‌های مختلفی از آتش به ازاء شیب‌های مختلف برآورد شده است. پس از تحلیل نتایج رابطه زیر به عنوان معادله‌ای برای نشان دادن اثر شیب بر سرعت تهویه طولی بحرانی پیشنهاد شده است:

$$\frac{V_{c,\alpha}}{V_c} = (1 + 0.33\alpha) \quad (25)$$



شکل ۱۲: سرعت تهویه طولی بحرانی در تونل شیب‌دار نسبت به تونل افقی بر حسب شیب تونل برای نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد مختلف [۱۶].



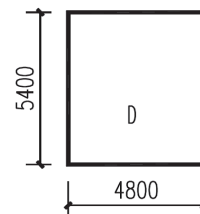
شکل ۱۳: نمای شماتیک از مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی [۱۷].

مشاهده می‌کنید، مدل مورد استفاده دارای سطح مقطع مستطیلی شکل بوده و دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵ m، ۰/۴۸ m و ۰/۵۴ m می‌باشد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FDS و مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ LES انجام شده است. متانول به عنوان منبع سوخت برای تولید نرخ حرارت آزاد شده مورد نیاز بکار گرفته شده است. همچنین یک فن محوری، جریان تهویه طولی را تولید نموده است. نتایج مربوط به طول جریان لایه برگشتی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با بکارگیری روش برآزش منحنی، رابطه زیر برای طول جریان لایه برگشتی به دست آمده است:

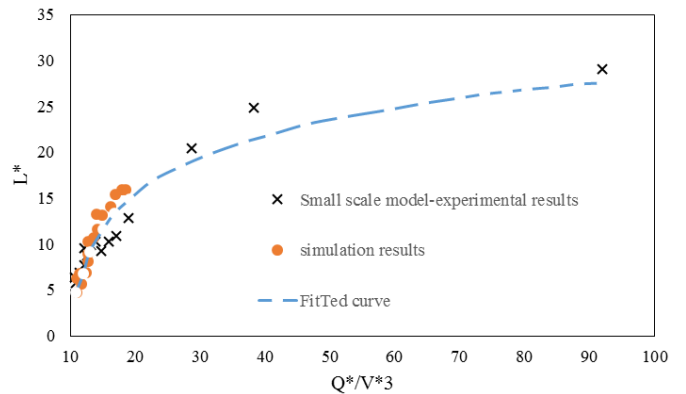
$$L^* = 7.13 \ln \left( \frac{Q^*}{V^{*3}} \right) - 4.36 \quad (22)$$

و با توجه به رابطه فوق، سرعت تهویه بحرانی زمانی حاصل می‌شود که طول جریان لایه برگشتی صفر شود، بنابراین با توجه به رابطه فوق، سرعت تهویه طولی بحرانی برابر است با:

$$V_c^* = 0.81 Q^{*1/3} \quad (23)$$



شکل ۱۴: نمای شماتیک از مقطع تونل [۱۵].



شکل ۱۵: نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی برای طول جریان لایه برگشتی [۱۵].

#### ۴ اثر شیب تونل بر سرعت تهویه طولی بحرانی

یکی از پارامترهای مؤثر بر سرعت تهویه طولی بحرانی، شیب تونل می‌باشد. یکی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به پژوهش انجام شده توسط اتکینسون و همکارانش در سال ۱۹۹۶ اشاره نمود. مدل تونل مورد استفاده در این پژوهش مشابه با مدل استفاده شده توسط اوکا و همکارانش می‌باشد [۱۶]. در این تحقیق شیب تونل در بازه ۰ تا ۱۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین منبع آتش از سوخت گازی پروپان با نرخ جریان ۲ تا ۱۰ لیتر بر دقیقه تأمین شده است. بنابراین قدرت آتش

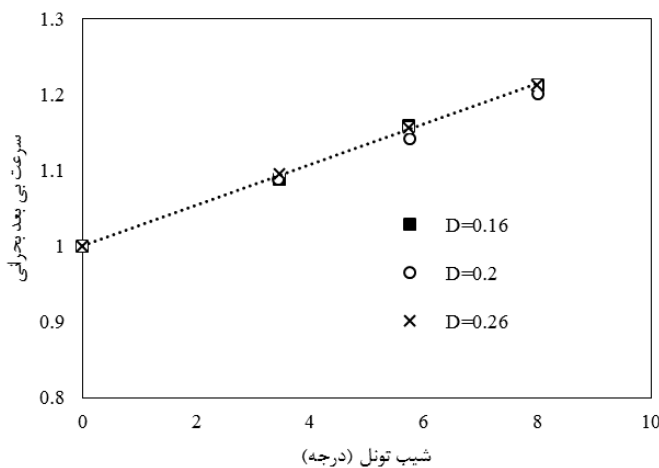


است، معادله زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{V_{c,\alpha}}{V_c} = (1 + 0.22\alpha) \quad (27)$$



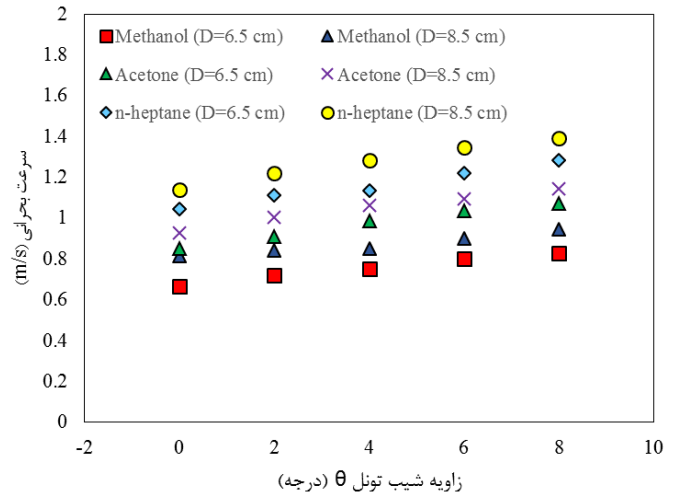
شکل ۱۶: تونل مورد استفاده جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی [۱۹].



شکل ۱۷: سرعت تهویه طولی بحرانی در تونل بر حسب شیب تونل برای نرخ حرارت آزاد مختلف [۱۹].

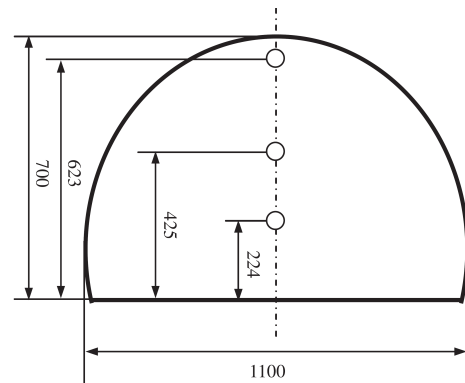
## ۵ ضریب هندسه تونل

نرخ حرارت آزاد شده از یک ماده سوختنی در یک فضای بسته مانند تونل نسبت به فضای باز می‌تواند متفاوت باشد. در بعضی حالات تونل سبب کاهش نرخ حرارت آزاد شده و در برخی دیگر باعث افزایش نرخ حرارت آزاد شده می‌شود. برای نمونه یک اتومبیل سواری کوچک در هوای آزاد با حداکثر نرخ حرارت آزاد شده ۱/۵ تا ۲ MW می‌سوزد در صورتی که یک اتومبیل کوچک در یک تونل با تهویه طبیعی می‌تواند با حداکثر نرخ حرارت آزاد شده ۴ MW، یعنی دو برابر آن چیزی که در هوای آزاد تولید می‌شود بسوزد [۲۰]. علت این است که هنگام آتش‌سوزی، نرخ حرارت آزاد شده به مقدار زیادی وابسته به شار حرارتی است که توسط پلوم دود و شعله‌ها به منبع



شکل ۱۴: سرعت تهویه طولی بحرانی در تونل بر حسب شیب تونل برای نرخ حرارت آزاد مختلف [۱۷].

در پژوهش انجام شده توسط بی<sup>۱۶</sup> و همکارانش، یک مدل ۱۰ : ۱ از یک تونل قوسی شکل به طول ۵۲/۵ m و مساحت سطح مقطع ۰/۶۵ m<sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱۵) [۱۸].

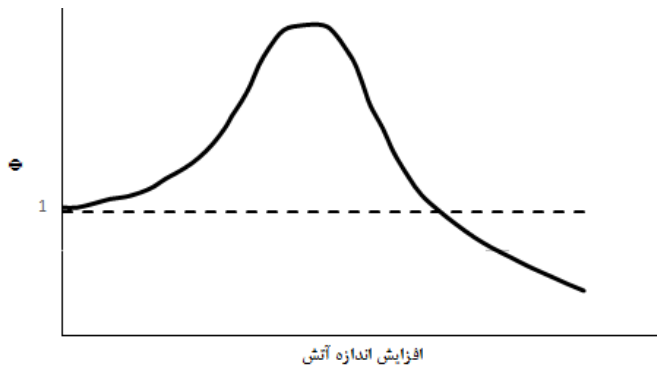


شکل ۱۵: نمایی از مقطع تونل به همراه نقاط اندازه‌گیری دما و سرعت [۱۸].

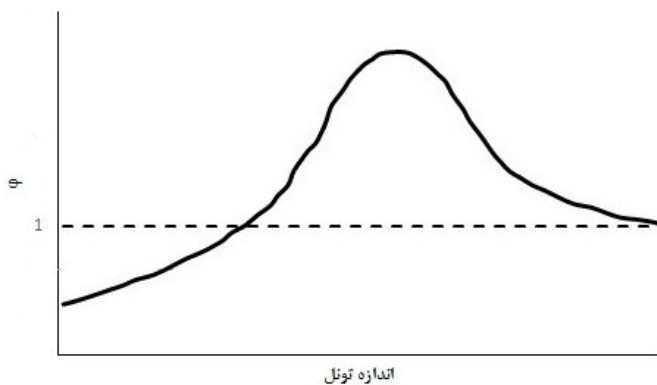
در این تحقیق اثر شیب تونل در بازه ۳٪- تا ۳٪ بر روی سرعت تهویه بحرانی بررسی شده است. متانول به عنوان منبع سوخت مایع مربعی در دو ابعاد ۴۷۵ mm × ۴۷۵ mm و ۶۰۰ mm × ۶۰۰ mm به کار گرفته شده و از یک فن جریان محوری جهت تأمین تهویه طولی با حداکثر سرعت ۱/۸ m/s استفاده شده است. پس از تحلیل داده‌های تجربی رابطه زیر به دست آمده است:

$$\frac{V_{c,\alpha}}{V_c} = (1 + 0.34\alpha) \quad (26)$$

چو<sup>۱۷</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۵ اثر شیب تونل بر سرعت تهویه بحرانی را برای یک تونل مقیاس شده با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۸ m، ۱/۵ m و ۱ m مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. شیب تونل از ۰ تا ۹ درجه تغییر داده شده و بنزین به عنوان منبع سوخت در قطرهای ۰/۱۶ m، ۰/۲ m و ۰/۲۶ m با عمق ۵ cm استفاده شده است. با توجه به داده‌های تجربی استخراج شده که در شکل ۱۷ نشان داده شده



شکل ۱۸: تغییرات  $\phi$  با اندازه آتش برای یک تونل با هندسه ثابت



شکل ۱۹: تغییرات  $\phi$  با اندازه تونل برای یک تونل با اندازه آتش ثابت.

## ۶ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- طول جریان لایه‌برگشتی در یک تونل با سامانه تهویه طولی به پارامترهای نرخ حرارت آزاد شده، سرعت تهویه طولی، قطر هیدرولیکی تونل، دانسیته هوا، دمای محیط، ظرفیت حرارتی هوا و شتاب جاذبه زمین  $g$  وابسته می‌باشد.
- برای تونل با تهویه طولی و بدون شیب، سرعت تهویه طولی بی‌بعد  $V_c^*$  متناسب با ریشه سوم نرخ حرارت آزاد شده بی‌بعد  $Q^*$  تا یک مقدار حدی برای نرخ حرارت آزاد شده بی‌بعد افزایش یافته و پس از آن مقدار ثابتی را شامل می‌شود. مقدار حدی مذکور در شرایط مختلف متفاوت بوده و در بازه ۰/۱۲ تا ۰/۲ قرار دارد.
- طول بی‌بعد جریان لایه‌برگشتی تابعی از نرخ حرارت آزاد شده بی‌بعد و سرعت تهویه بی‌بعد می‌باشد. اما برای مقدار حدی مشخص از نرخ حرارت آزاد شده بی‌بعد، تنها به سرعت تهویه بی‌بعد وابسته می‌باشد.
- روابط تجربی مختلف ارائه شده توسط محققین برای بررسی تأثیر شیب تونل بر سرعت تهویه طولی بحرانی ارائه شده است.
- در شرایطی که مقدار  $\phi$  در حدود یک باشد، وجود تونل اثری روی شدت آتش‌سوزی نخواهد داشت، لذا نرخ حرارت آزاد شده از آتش با نرخ حرارت آزاد شده از همان آتش در فضای باز تقریباً یکسان خواهد بود. برای شرایطی که  $\phi < 1$  است، آتش در مقایسه با تونل خیلی بزرگ بوده و نرخ حرارت آزاد شده در اثر کمبود جریان هوا محدود

سوختمنتقل می‌شود. برای یک آتش در هوای باز درصد زیادی از حرارت تولید شده در شعله و پلوم دود توسط هوای محیط پراکنده می‌شود و مقدار کمی از حرارت به سوخت منتقل می‌شود. اما در فضاهای بسته مانند تونل‌ها چنین وضعیتی رخ نخواهد داد و سقف تونل از لایه‌ای از دود با دمای بالا پوشیده شده و این گازها مقدار زیادی حرارت را به محل آتش از طریق تشعشع منتقل می‌کنند. به علاوه آتش و پلوم آن تمایل به دادن حرارت به دیواره‌ها و سقف تونل را دارند که مجدداً مقداری از آن را به سمت محل آتش به صورت تشعشع منتقل خواهد شد و بدین ترتیب نرخ حرارت آزاد شده یا شدت آتش سوزی افزایش خواهد یافت. اما در اثر وجود تونل همیشه بدین‌گونه نیست. در بعضی حالات نرخ حرارت آزاد شده یک آتش به وسیله تونل کاهش می‌یابد و علت اصلی ایجاد محدودیت برای جریان هوای ورودی به محل آتش می‌باشد. بنابراین محدود شدن جریان اکسیژن ورودی به آتش باعث کاهش حداکثر نرخ حرارت آزاد شده می‌شود.

در بیشتر تونل‌ها هر دو عامل فوق روی نرخ حرارت آزاد شده تأثیر می‌گذارند. افزایش دمای دیواره‌های تونل سبب افزایش نرخ حرارت آزاد شده و کمبود اکسیژن باعث محدود شدن حداکثر نرخ حرارت آزاد شده برای یک آتش می‌شوند. در وضعیت‌های مختلف تأثیرات متفاوت غالب و حکم‌فرما خواهند بود. به عنوان نمونه زمانی که آتش نسبت به تونل بزرگ می‌باشد کمبود اکسیژن تأثیر حکم‌فرما می‌باشد. برای این منظور ضریب بی‌بعدی به نام ضریب نرخ حرارت آزاد شده  $\phi$  تعریف می‌شود که توصیف‌کننده تأثیر هندسه تونل روی نرخ حرارت آزاد شده خواهد بود:

$$\phi = \frac{\dot{Q}_{\text{tunnel}}}{\dot{Q}_{\text{open}}} \quad (28)$$

که در این رابطه  $\dot{Q}_{\text{tunnel}}$  نشان‌دهنده نرخ حرارت آزاد شده یک آتش در تونل و  $\dot{Q}_{\text{open}}$  نشان‌دهنده نرخ حرارت آزاد شده برای همان آتش در فضای باز می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که برای یک تونل با شرایط ثابت،  $\phi$  به صورت تابعی از اندازه آتش تغییر می‌کند. این تغییرات در شکل زیر نشان داده شده است.

از شکل ۱۸ این‌گونه استنباط می‌شود که در آتش‌هایی که در مقایسه با تونل خیلی کوچک هستند، وجود تونل اثری روی شدت آتش‌سوزی نخواهد داشت، لذا نرخ حرارت آزاد شده از آتش با نرخ حرارت آزاد شده از همان آتش در فضای باز یکسان خواهد بود به این معنی که مقدار  $\phi$  برابر با یک می‌باشد. اگر آتش در مقایسه با تونل خیلی بزرگ باشد، نرخ حرارت آزاد شده در اثر کمبود جریان هوا محدود خواهد بود و  $\phi$  در واقع کوچک‌تر از یک خواهد بود. در محدوده میان این دو حالت حدی، شرایطی وجود خواهد داشت که تأمین اکسیژن تأثیر چندانی روی آن نخواهد داشت بلکه هندسه تونل است که باعث افزایش نرخ حرارت آزاد شده از آتش می‌شود. البته تحلیل فوق را می‌توان از منظر دیگری نیز مشاهده نمود به این نحو که نحوه تغییرات  $\phi$  با ابعاد تونل را با ثابت فرض کردن اندازه آتش بررسی نمود (شکل ۱۹). نتایج حاصله از شکل ۱۹ نیز دقیقاً مشابه با تحلیل مربوط به نمودار ۱۸ می‌باشد.



[10] cheng Weng, Miao, ling Lu, Xin, Liu, Fang, and xian Du, Cheng. Study on the critical velocity in a sloping tunnel fire under longitudinal ventilation. *Applied Thermal Engineering*, 94:422 – 434, 2016.

[11] Thomas, PH. The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires. *Fire safety science*, 351:1-1, 1958.

[12] Oka, Yasushi and Atkinson, Graham T. Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 25(4):305 – 322, 1995.

[13] Wu, Y and Bakar, M.Z.A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity. *Fire Safety Journal*, 35(4):363 – 390, 2000.

[14] Li, Ying Zhen, Lei, Bo, and Ingason, Haukur. Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 45(6):361 – 370, 2010.

[15] cheng Weng, Miao, ling Lu, Xin, Liu, Fang, peng Shi, Xi-ang, and xing Yu, Long. Prediction of backlayering length and critical velocity in metro tunnel fires. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47:64 – 72, 2015.

[16] Atkinson, G.T. and Wu, Y. Smoke control in sloping tunnels. *Fire Safety Journal*, 27(4):335 – 341, 1996.

[17] Ko, Gwon Hyun, Kim, Seung Ryul, and Ryou, Hong Sun. An experimental study on the effect of slope on the critical velocity in tunnel fires. *Journal of Fire Sciences*, 28(1):27-47, 2010.

[18] Yi, Liang, Xu, Qiqi, Xu, Zhisheng, and Wu, Dexing. An experimental study on critical velocity in sloping tunnel with longitudinal ventilation under fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43:198 – 203, 2014.

[19] Chow, W.K., Gao, Y., Zhao, J.H., Dang, J.F., Chow, C.L., and Miao, L. Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, 75:14 – 22, 2015.

[20] Carvel, Ricky. *Fire Size in Tunnels*. Ph.D. thesis, Heriot-Watt University, 2004.

خواهد شد. همچنین برای محدوده میان این دو حالت حدی، هندسه تونل باعث افزایش نرخ حرارت آزاد شده از آتش می‌شود.

### علائم و اختصارات

$L$	طول جریان لایه برگشتی، m
$Q$	نرخ حرارت آزاد شده، W
$T_a$	دمای محیط، K
$T_f$	دمای گاز، K
$\rho_a$	دانسیته، $\text{kg/m}^3$
$g$	شتاب جاذبه زمین، $\text{m/s}^2$
$C_p$	ظرفیت حرارتی، $\text{J/kg} \cdot \text{K}$
$H$	ارتفاع تونل، m
$\bar{H}$	قطر هیدرولیکی تونل، m
$V$	سرعت تهویه طولی، m/s
$V_c$	سرعت تهویه طولی بحرانی، m/s
$Q^*$	نرخ حرارت آزاد شده بدون بعد
$V^*$	سرعت تهویه طولی بدون بعد
$V_{c,\alpha}$	سرعت تهویه طولی بحرانی در تونل شیب‌دار، m/s
$\alpha$	شیب تونل، °
$\phi$	ضریب نرخ حرارت آزاد شده بی‌بعد

### مراجع

[1] Haack, Alfred et al. Technical report-part 1-design fire scenarios. *Thematic network on fires in tunnels (FIT)*, European Commission under the 5th Framework Program, 2004, 2001.

[2] Pei, Gui-hong and Zhang, Qiu-yi. Review of research on critical velocity in tunnel fire. *E3S Web Conf.*, 79:02001, 2019.

[3] Weisenpacher, Peter, Glasa, Jan, and Valasek, Lukas. Influence of slope and external temperature on smoke stratification in case of fire in bi-directional road tunnel. *ITM Web Conf.*, 16:02002, 2018.

[4] Li, Junmei, Tian, Yang, Li, Yanfeng, Zhao, Yuhang, and Huang, Youbo. Numerical and experimental study on the effects of the slope on the critical velocity in titled tunnels. *Procedia Engineering*, 205:1864 – 1870, 2017. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China.

[5] Tang, Z., Liu, Y.J., Yuan, J.P., and Fang, Z. Study of the critical velocity in tunnels with longitudinal ventilation and spray systems. *Fire Safety Journal*, 90:139 – 147, 2017.

[6] Kesadian, Jabar and Adamian, Armen. Numerical simulation of critical velocity in ventilation. *Modern Applied Science*, 11(2), 2017.

[7] Kim, Ji Tae, Hong, Ki-Bae, and Ryou, Hong Sun. Numerical analysis on the effect of the tunnel slope on the plug-holing phenomena. *Energies*, 12(1), 2018.

[8] Brahim, Kalech, Mourad, Bouterra, Afif, EC, and Ali, B. Control of smoke flow in a tunnel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 6(1), 2013.

[9] RIS, JOHN DE. Duct fires. *Combustion Science and Technology*, 2(4):239-258, 1970.