



بررسی عددی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر بیشینه دما و گسترش جریان دود در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها

سید امید حقانی، ابراهیم براتی*

دانشکده مهندسی، دانشگاه خيام، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۰۶
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۱۷
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۲۱

کلمات کلیدی:

مکان دمنده
آتش‌سوزی
دبی حجمی بحرانی
حداکثر دما

خلاصه: طراحی یک سیستم تهویه اضطراری کارآمد یکی از راهکارهای اصلی مقابله با پدیده خطرناک آتش‌سوزی در تونل است. یکی از مهمترین پارامترها در مبحث کنترل دود، سرعت بحرانی تهویه می‌باشد. در کار حاضر پارامتری به نام دبی حجمی بحرانی معرفی می‌شود که بیانگر حداقل دبی حجمی می‌باشد که از برگشت دود به بالادست آتش جلوگیری می‌کند. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار اف دی اس آتش‌سوزی داخل تونل شبیه‌سازی شده و بررسی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر بیشینه دما، گسترش جریان دود و دبی حجمی بحرانی در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مکان قرارگیری دمنده تأثیر چشم‌گیری روی سرعت بحرانی و دبی حجمی بحرانی دارد. دبی حجمی بحرانی با قرار گرفتن سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به شرایطی که در کل مقطع تونل جریان یکنواخت ایجاد می‌کند، در نرخ‌های مختلف رهايش حرارت، حداقل ۱۱ درصد کمتر است. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر، با ایجاد شرایط متنوع در سیستم دمنده، اثر ارتفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی تحقیق شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع منبع آتش تأثیر چندانی بر روی دبی حجمی بحرانی و سرعت بحرانی نخواهد داشت. در بررسی فاصله طولی سیستم دمنده از منبع آتش نیز در شرایطی که برگشت جریان دود وجود دارد، نتایج نشان می‌دهد نزدیک شدن سیستم دمنده به منبع آتش منجر به کاهش طول جریان برگشتی دود و افزایش بیشینه دما خواهد شد.

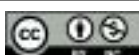
باشد. در یک تونل، راه کاربردی برای رسیدن به این هدف این است که سیستم تهویه اضطراری تونل، جریان هوای طولی مناسبی را روی آتش برقرار سازد طوری که دود و گازهای گرم در راستای دلخواه حرکت کنند.

تهویه هوا برای تونل‌ها می‌تواند با استفاده از شرایط طبیعی، ناشی از اثر پیستونی و یا با استفاده از سیستم‌های مکانیکی صورت پذیرد. در سیستم تهویه طبیعی از حرکت طبیعی هوا در داخل تونل استفاده می‌شود. این فرآیند در نتیجه اختلاف فشار در دو دهانه تونل انجام می‌گیرد که این اختلاف فشار، ناشی از اختلاف فشار و دما در این نقاط و یا در اثر باد است. پس این سیستم تهویه، به شرایط جوی محل بستگی دارد. متأسفانه هیچ یک از این عوامل برای مدت طولانی ثابت نیستند و یک تغییر ناگهانی در جهت وزش باد می‌تواند تمامی این اثرات را خنثی کند. در سیستم تهویه ناشی از اثر پیستونی هر وسیله‌ای که در داخل تونل حرکت می‌کند، اثری مشابه یک پیستون

۱ - مقدمه

تونل‌ها یکی از بناهای فنی راه‌ها هستند که استفاده از آن‌ها مزایای فراوانی از جمله کاهش زمان سفر و کاهش مصرف سوخت را برای کاربران سیستم حمل و نقل به دنبال خواهد داشت. هر سانحه کوچک در محیط بسته تونل، که شاید هیچ خطری در سایر نقاط جاده به وجود نیآورد، پتانسیل تبدیل به فاجعه‌ای انسانی را دارد. لذا تأمین ایمنی مناسب و مطلوب تونل‌ها و راهکارهای مقابله و کنترل حوادث در این بناها، باید در دستور کار طراحان سیستم حمل و نقل قرار گیرد. این سیستم باید قادر باشد در شرایط عادی، کیفیت هوای داخل تونل را کنترل کند و در شرایط اضطراری توانایی کنترل و استخراج دود را داشته باشد. در واقع سیستم تهویه در شرایط اضطراری باید قادر به کنترل جهت حرکت دود برای تأمین یک مسیر پاک و ایمن برای نجات مسافران و برای انجام عملیات اطفای حریق

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.barati@Khayyam.ac.ir



در داخل یک لوله بلند را دارد. در جلو وسیله نقلیه فشار زیاد و در پشت آن فشار کم اثر می‌کند و در نتیجه نیرویی ایجاد می‌شود که هوای داخل تونل را به حرکت در می‌آورد. سیستم‌های تهویه مکانیکی نیز به دو دسته سیستم تهویه طولی و سیستم تهویه عرضی تقسیم می‌شوند. این سیستم‌ها عموماً در تونل‌های طویل و تونل‌هایی که بار ترافیکی سنگین دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستم تهویه طولی هوا در طول تونل جریان می‌یابد و طی آن هوا از یک طرف دمیده و از طرف دیگر خارج می‌شود. شدت جریان هوای لازم به میزان آلودگی موجود بستگی دارد و از این جهت با افزایش طول تونل شدت جریان هوا افزایش می‌یابد. اما در سیستم تهویه عرضی هوای تازه از کف تونل به وسیله یک مجرای سرتاسری وارد تونل شده و از نزدیک سقف خارج می‌شود.

یک تحلیل آماری از سال ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۹ نشان می‌دهد کل آتش‌سوزی در تونل‌ها بین ۶۰ تا ۹۰ مورد در هر سال بوده است که این تعداد حدود ۰٫۱ درصد کل آتش‌سوزی وسایل نقلیه، ۰٫۳ تا ۰٫۴۵ درصد آتش‌سوزی وسایل نقلیه موتوردار و حدود ۶٫۷ تا ۱۰ درصد آتش‌سوزی در نتیجه تصادفات بوده است. هرچند تعداد آتش‌سوزی در تونل‌ها در مقایسه با تعداد کل آتش‌سوزی‌ها کم می‌باشد، اما خطرات و صدمات زیاد ناشی از آن‌ها اهمیت طراحی سیستم تهویه اضطراری را نشان می‌دهد [۱].

در سال‌های اخیر فعالیت‌های زیادی به منظور کاهش خطرات ناشی از آتش‌سوزی در تونل‌ها انجام شده است. وو و باکار [۲] در سال ۲۰۰۰ به بررسی جریان دود در آتش‌سوزی تونل با استفاده از تهویه طولی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه به صورت تجربی و عددی به مطالعه ۵ تونل با ارتفاع یکسان و با سطح مقطع متفاوت پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که مقدار سرعت بحرانی با هندسه تونل تغییر می‌کند. هو و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۶ توزیع دود در یک تونل جاده‌ای را بصورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از مقادیر میانگین نرخ حرارت آزاد شده که از داده‌های تجربی به دست آمده بود به عنوان ورودی به کد اف‌دی‌اس^۱ استفاده کردند. میان نتایج تجربی و عددی اختلافی در حدود ۴ درصد مشاهده شد که نشان از دقت کد اف‌دی‌اس بود.

هو و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۸ به مطالعه برگشت دود در

1 Fire Dynamics Simulator (FDS)

آتش‌سوزی تونل پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که، طول لایه برگشتی و سرعت بحرانی، با افزایش نرخ گرمای آزاد شده از سطح سوخت افزایش و با افزایش ارتفاع تونل، کاهش پیدا می‌کند. روح و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۸ در یک کار تجربی، با مدل هندسی ۲۰ به ۱ اثر سرعت تهویه را بر نرخ سوختن، آزادسازی انرژی و پدیده برگشت دود در تونل بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت تهویه در تونل نرخ سوختن سوخت افزایش می‌یابد که علت آن را افزایش در میزان دسترسی به اکسیژن بیان نمودند.

چو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰ در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی پدیده آتش‌سوزی در تونلی با مقیاس ۵۰ به ۱ پرداختند. آن‌ها در این تحقیق تونل را با سه شیب ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که شکل ستون آتش با تغییر زاویه تونل تغییر می‌کند. ستون آتش با تغییر زاویه تونل، به سمت کف تونل منحرف می‌شود. با افزایش شیب تونل ستون آتش به علت نیروی شناوری، بیشتر به کف تونل نزدیک می‌شود. نیکنام و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۲ به بررسی محاسبه سرعت بحرانی، در تونل البرز در آزادراه تهران - شمال، حین آتش‌سوزی با انرژی حرارتی آزاد شده برابر ۱۰۰ مگاوات به مدت ۹۶۰ ثانیه به کمک یک مدل عددی سه بعدی با نرم‌افزار پرداختند. آن‌ها بیان کردند با توجه به نتایج طراحی عددی و روابط تجربی، برای آتش‌سوزی درون تونل البرز با اندازه ۱۰۰ مگاوات، سرعت بحرانی ۳/۵ متر در ثانیه پیشنهاد می‌شود. این سرعت امکان خروج کاربران و انجام عملیات نجات را در کم‌ترین زمان ممکن فراهم می‌سازد.

بزرگ‌عصاره و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس به مطالعه عددی پدیده گسترش آتش‌سوزی از یک منبع آتش به جسم مجاور در تونل پرداختند. آن‌ها بیان کردند که با افزایش سرعت تهویه، زمان انتقال آتش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این پدیده به دلیل کارکرد همزمان اثرات خنک‌کنندگی و انحراف پلوم دود است. مونسان و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از کد اف‌دی‌اس به بررسی سرعت بحرانی تهویه و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن پرداختند. مشاهده شد که با افزایش عرض منبع آتش درحالی که طول آن ثابت است سرعت بحرانی تهویه کاهش می‌یابد. همچنین زمانی که عرض منبع آتش ثابت است، سرعت بحرانی تهویه با افزایش طول منبع آتش در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

سیستم دمنده در سطح مقطع تونل، بررسی فاصله طولی سیستم دمنده از منبع آتش نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل سازی میدان جریان و معادلات حاکم

در این تحقیق مدل سازی میدان جریان با استفاده از نرم افزار منبع باز اف دی اس انجام شده است. نرم افزار اف دی اس یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی است که اولین بار توسط موسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا در سال ۲۰۰۰ جهت مطالعه رفتار جریان های ناشی از آتش سوزی به ویژه چگونگی توزیع دما و دود ارائه شده است. از این نرم افزار می توان در طراحی دقیق سیستم اطفاء حریق (از قبیل محل مناسب قرارگیری تجهیزات مانند اسپرینکلر) و طراحی مسیر فرار استفاده کرد. این کد که به صورت نرم افزار منبع آزاد در دسترس می باشد، فرم ویژه ای از معادلات ناویر- استوکس را برای جریان هایی با ماخ پایین بصورت عددی حل می نماید. مشتقات جری می موجود در معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی با استفاده از روش تفاضل محدود با دقت مکانی و زمانی مرتبه دوم گسسته شده و در زمان به صورت صریح حل می گردند. اما پدیده تشعشع به کمک روش حجم کنترل محاسبه می گردد. در نرم افزار اف دی اس معادلات بقای جرم، بقای گونه ها، مومنتوم و انرژی به صورت روابط (۱) تا (۴) می باشد [۱۳]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Y_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla P = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon \quad (4)$$

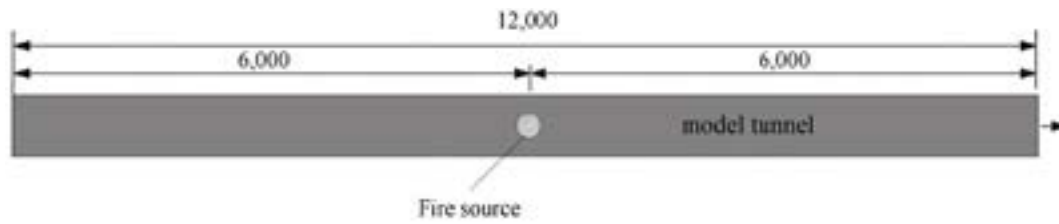
۳- مشخصات هندسه مورد مطالعه

در کار حاضر هندسه مورد مطالعه توسط لی و همکاران [۱۴] و یکی از آزمایش های وو و باکار [۲] مبنای مطالعه قرار گرفته است. لی و همکاران در مطالعه تجربی خود مطابق با شکل ۱ از تونلی با ابعاد

ژو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ به روش آزمایشگاهی، تأثیر مکان قرارگیری دمنده نسبت به منبع آتش را بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که فاصله بین دمنده و منبع آتش باید در بازه مشخصی باشد تا حداکثر بازده را از نظر کاهش دمای تونل داشته باشد. تانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷ در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی پدیده آتش سوزی در تونلی مجهز به سیستم اسپری آب با مقیاس ۱۴ به ۱ پرداختند. آن ها بیان داشتند پس از اسپری آب از نازل ها، سرعت بحرانی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. حداکثر کاهش در میزان سرعت بحرانی حدود ۳۱ درصد می باشد که به عواملی از جمله تعداد و محل قرارگیری نازل ها وابسته می باشد.

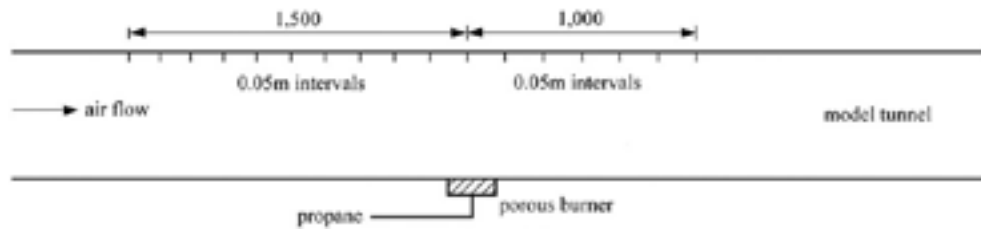
حیدری نژاد و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از کد متن باز شبیه ساز دینامیک آتش به بررسی آتش سوزی داخل تونل همراه با عملکرد سیستم تهویه و اطفاء پرداختند. نتایج نشان می دهد که افزایش نرخ جریان آب سبب افزایش ظرفیت خنک سازی سیستم اطفاء می شود، همچنین با افزایش نرخ جریان آب از ۳۲۰ به ۱۲۸۰ لیتر بر دقیقه تضعیف شار تشعشعی رسیده به پایین دست آتش از ۴۰٪ به بیش از ۷۵٪ افزایش می یابد.

بررسی تحقیقات ذکر شده نشان می دهد که تلاش های زیادی در زمینه سرعت بحرانی و پارامترهای مؤثر بر آن انجام شده است. در اکثر تحقیقات انجام شده، سیستم دمنده در دهانه ورودی تونل قرار گرفته و کل سطح مقطع تونل را شامل شده است، در حالی که در حالت عملی، معمولاً دمنده در زیر سقف قرار می گیرد. بنابراین جریان هوای ورودی عموماً به صورت یکنواخت کل مقطع تونل را شامل نمی شود. تاکنون بررسی عددی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی بیشینه دما، سرعت بحرانی و پدیده برگشت دود به سمت بالادست منبع آتش بررسی نشده است. همچنین در این پژوهش برای اولین بار دبی حجمی بحرانی ارائه شده است که می تواند جایگزین مناسبی برای سرعت بحرانی باشد زیرا سرعت بحرانی تنها برای جریان ورودی یکنواخت کاربرد دارد. به همین منظور در کار حاضر با استفاده از نرم افزار منبع باز اف دی اس، تأثیر مکان قرارگیری دمنده روی سرعت بحرانی و حداکثر دما در آتش سوزی درون تونل مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی دقیق تر، با ایجاد شرایط متنوع در سیستم دمنده، اثر ارتفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی تحقیق شده است. همچنین با انتخاب بهترین شرایط قرارگیری



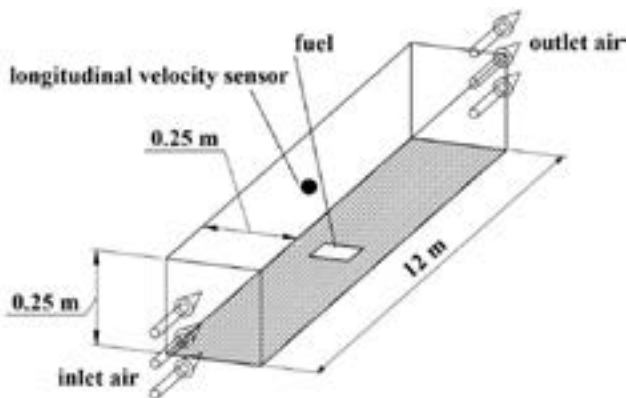
شکل ۱: تونل مورد آزمایش توسط لی و همکاران [۱۴] (ابعاد: میلی‌متر)

Fig. 1. Tunnel tested by Lee et al. [14] (Dimensions: mm)



شکل ۲: محل قرار گرفتن حسگرها در آزمایش لی و همکاران [۱۴] (ابعاد: میلی‌متر)

Fig. 2. Location of sensors in the work of Lee et al. [14] (Dimensions: mm)



شکل ۳: مشخصات هندسه مورد مطالعه

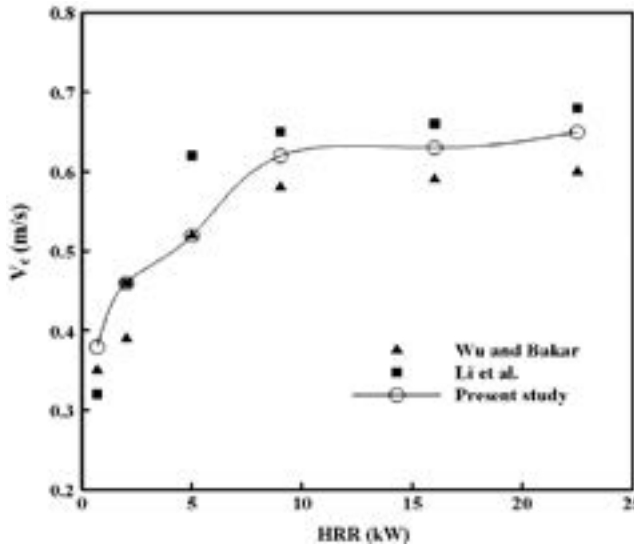
Fig. 3. The geometrical representation of tunnel

سرعت به سمت بالادست می‌باشد. در حالت بحرانی، این سنسور باید سرعت تقریباً صفر را نشان دهد. لذا با تغییر مقدار سرعت تهویه، باید شرایطی ایجاد شود که این سنسور مقدار حدود صفر را نشان دهد. برای مدل کردن آتش‌سوزی، سطح سوخت پروپان در کف تونل در نظر گرفته شده است. سوخت پروپان در مقطعی مربعی شکل و با مساحتی معادل مشعل مورد استفاده در کار لی و همکاران در حال سوختن است. در واقع برای اعمال شرط مرزی سوخت، شدت گرمای آزاد شده از سطح سوخت تعریف می‌شود. در حالت بدون تهویه از شرایط محیطی و در حالت با تهویه، از سرعت ورودی به عنوان شرط مرزی در ورودی تونل استفاده شده است. در خروجی تونل از شرط مرزی محیط باز استفاده شده است. دمای محیط و هوای تهویه، ۲۰

درجه سانتیگراد استفاده کردند. دیوارها از جنس فولاد ضد زنگ به ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته شد. پروپان توسط مشعلی با مقطعی دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر در وسط تونل سوزانده شد، بطوری که سطح بالایی مشعل روی کف تونل قرار گرفته بود. جریان گاز به وسیله یک روتامتر با دقت ۱٪ اندازه‌گیری شده بود. آن‌ها هوای یکنواخت شده را از دهانه سمت چپ وارد تونل کردند. میزان جریان هوای عبوری در داخل تونل توسط یک جریان‌سنج با دقت ۱٪ و محدوده کاری ۳۰ تا ۵۴۰ متر مکعب بر ساعت محاسبه شده بود. لی و همکاران در این آزمایش سرعت تهویه بحرانی را به ازای نرخ‌های حرارت آزاد شده متفاوت محاسبه کردند. برای این کار آرایشی از حسگرها مطابق شکل ۲ در راستای طول تونل قرار داده شد. سرعت تهویه‌ای که به ازای آن حسگرهای دما طول لایه برگشتی را صفر نشان می‌دادند، به عنوان سرعت تهویه بحرانی در نظر گرفته شد.

۴- شرایط مرزی

تونل مقیاس کوچک نشان داده شده در شکل ۳ با استفاده از کد اف‌دی‌اس شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی هندسه مذکور تمامی شرایط مورد استفاده در آزمایش تجربی لی و همکاران اعمال شده است. برای تشخیص وقوع سرعت بحرانی، علاوه بر استفاده از سنسورهای دمایی یک سنسور سرعت در بالای منبع آتش قرار داده شده است تا مؤلفه محوری سرعت را اندازه‌گیری نماید. در صورت برگشت جریان، جهت

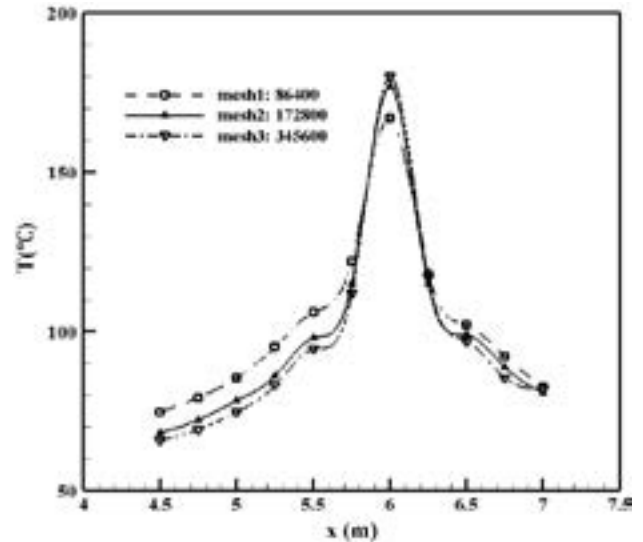


شکل ۵: سرعت بحرانی حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی
 Fig. 5. The critical velocity of simulation and comparison with experimental results

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (6)$$

در تحقیق حاضر، استقلال نتایج از شبکه نیز مورد بررسی قرار گرفته تا شبکه مناسب انتخاب شود. استقلال از شبکه برای نحوه توزیع دما در طول تونل و نزدیک به سقف تونل انجام شده است. نحوه اندازه‌گیری این توزیع دما در نزدیک سقف تونل مطابق شکل ۲ می‌باشد. این بررسی در نرخ رهایش حرارت ۲ کیلووات و در شرایط عدم استفاده از جریان هوای ورودی صورت گرفته است، زیرا طبق رابطه (۵) هرچه آتش کوچک‌تر باشد، به شبکه ریزتری نیازمند است. با بررسی استقلال از شبکه در آتش ۲ کیلووات با توجه به رابطه (۵) و با به کار بردن کمترین تعداد سلول‌های مورد قبول در رابطه (۶) مقدار δx برابر 0.2 متر و تعداد سلول‌های محاسباتی در جهت طول،

عرض و ارتفاع تونل 6.0 ، 1.2 و 1.2 در نظر گرفته شده‌اند. در این شرایط مطابق شکل ۴ نمودار تغییرات دمایی در نزدیک سقف تونل رسم شده است. همچنین همانطور که در شکل ۴ مشخص شده است به منظور دستیابی به جواب‌های مستقل از اندازه شبکه محاسباتی، نمودار دمایی در دو شبکه محاسباتی دیگر نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از 172800 به 345600 تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات دما حاصل نمی‌شود. بنابراین شبکه محاسباتی با تعداد 172800 سلول به عنوان شبکه



شکل ۴: توزیع دما در شبکه‌های مختلف محاسباتی
 Fig. 4. Distribution of temperature in various computational mesh

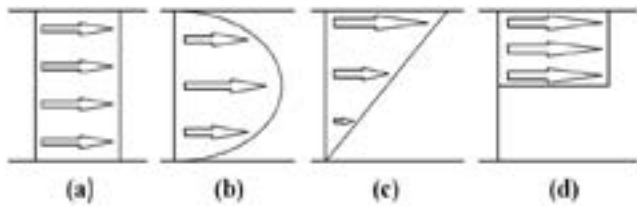
درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. شرط مرزی دیواره‌های تونل، دیوار فرض شده است.

۵- شبکه محاسباتی

برای شبیه‌سازی مناسب آتش‌سوزی که جریان آشفته آن با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شبیه‌سازی می‌شود، نیاز به تخمینی از ابعاد سلول‌های شبکه محاسباتی است تا پدیده‌های غالب نیز مدل‌سازی شوند. به همین منظور و به جهت دستیابی به نتایج مستقل از شبکه محاسباتی، لازم است در ابتدا شناخت کافی نسبت به محدوده مقیاس طولی حل حاصل شود. این طول مشخصه تعیین کننده اندازه‌ی ادی‌های بزرگ در پلوم دود و همچنین ارتفاع شعله می‌باشد. مقیاس طولی مناسب برای حل مسأله شامل پلوم آتش و جریان شناوری حاصل از آن که تابعی از توان حرارتی آتش است، توسط رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} c_p \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (5)$$

این طول مشخصه در واقع برآوردی از ناحیه مؤثر در اطراف حریق است که از تغییرات آن، اثر می‌پذیرد. با توجه به بررسی‌های انجام شده [۱۵]، اگر طول مشخصه با 4 تا 16 سلول محاسباتی پوشش یابد تخمین اولیه خوبی برای اندازه شبکه در نظر گرفته شده است. بنابراین داریم:



شکل ۶: سیستم‌های دمنده مورد مطالعه
Fig. 6. Studied blower systems

در کار حاضر، علاوه بر قرار گرفتن سیستم دمنده در کل سطح مقطع و نیمه بالایی سطح مقطع تونل، از دو شرایط پروفیل سرعت خطی و سهموی نیز در سیستم دمنده استفاده شده است. لازم به ذکر است مکان قرارگیری دمنده و همچنین فاصله دمنده و منبع آتش شکل عملی پروفیل سرعت هوا را مشخص می‌کند. با توجه به اینکه حالت‌های مختلفی می‌تواند در سیستم دمنده روی دهد دو حالت جریان ورودی یکنواخت و نیمه بالایی سطح مقطع تونل و دو حالت جریان ورودی خطی و سهموی واقعی نمی‌باشند، ترکیب جریان ورودی یکنواخت و جریان در نیمه بالایی می‌تواند یکی از دو حالت فرضی را شامل شود. همچنین با ایجاد همین شرایط متنوع در سیستم دمنده، اثر ارتفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی تحقیق شده است.

۷-۱- تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی سرعت بحرانی و

حداکثر دما

اولین پارامتر مورد بررسی، تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی سرعت بحرانی و حداکثر دما می‌باشد. به همین منظور در دو مرحله سیستم دمنده جریان هوا به صورت یکنواخت در کل سطح مقطع تونل و بار دیگر در نیمه بالایی سطح مقطع تونل قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر علاوه بر دو شرایط کاری فوق، از دو شرایط پروفیل سرعت خطی و سهموی نیز در سیستم دمنده استفاده شده است. برای مشاهده تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی حداکثر دما و سرعت بحرانی نمودار دما در ۷ نقطه نزدیک سقف تونل و ۷ نقطه وسط تونل در جهت طولی رسم می‌شود. به منظور داشتن دقت بیشتر در محاسبات و مشاهده دقیق‌تر اتفاقات رخ داده در داخل تونل نمودار دمایی در فاصله‌های ۴، ۶ و ۸ متری از ابتدا تونل در ۵ نقطه از تونل (از کف تا سقف تونل) نیز اندازه‌گیری و رسم شده است.

جدول ۱: نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی (پروفیل یکنواخت)

Table 1. Results obtained from numerical simulation (uniform profile)

Q_c (m ³ /s)	V_c (m/s)	HRR (kW)
۰٫۰۲۳	۰٫۳۷	۰٫۷
۰٫۰۲۸	۰٫۴۶	۲
۰٫۰۳۳	۰٫۵۳	۵
۰٫۰۳۸	۰٫۶۲	۹
۰٫۰۳۹	۰٫۶۳	۱۶
۰٫۰۴۰	۰٫۶۵	۲۲٫۵

بهینه برای شبیه‌سازی حریق در داخل تونل مذکور در نظر گرفته شده است.

۶- اعتبارسنجی حل

برای بررسی صحت شبیه‌سازی، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی وو و باکار [۲] و لی و همکاران [۱۴] مورد استفاده قرار گرفته است. برای تونل تشریح شده نرخ رهایش حرارت ۰٫۷، ۲، ۵، ۹، ۱۶ و ۲۲٫۵ کیلووات اعمال شده، سرعت بحرانی محاسبه و با نتایج تجربی لی و همکاران و وو و باکار مقایسه شده است. نتایج به دست آمده در شکل ۵ ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق مناسب بین نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی وجود دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به کمک نرم افزار اف‌دی‌اس با در نظر گرفتن مقداری خطا قابل استناد و با دقت نسبتاً خوبی قادر به پیش‌بینی فرآیندهای حاصل از آتش‌سوزی در داخل تونل می‌باشد. در جدول ۱ سرعت بحرانی و میزان دبی حجمی جریان ورودی به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت دود در نرخ‌های رهایش حرارت مختلف بیان شده است. در این جدول HRR، V_c و Q_c به ترتیب نرخ رهایش حرارت، سرعت و دبی حجمی بحرانی اعمال شده را نشان می‌دهند.

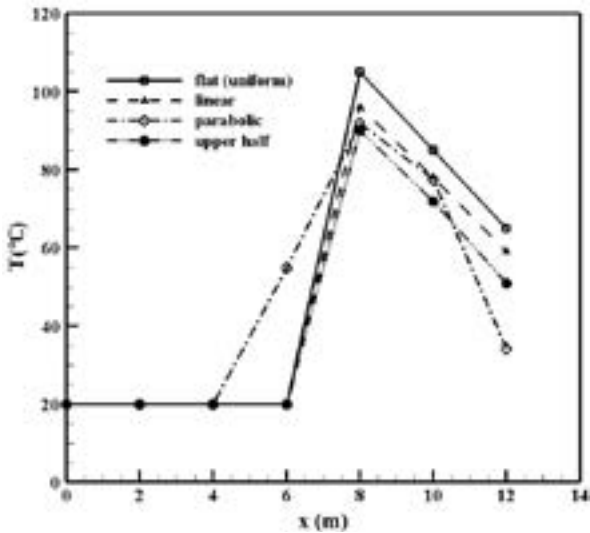
۷- نتایج

با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته و انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، در این بخش تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی سرعت بحرانی، دبی حجمی بحرانی و حداکثر دما در آتش‌سوزی درون تونل بررسی می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر

جدول ۲: حداکثر سرعت دمنده در پروفیل‌های جریان ورودی

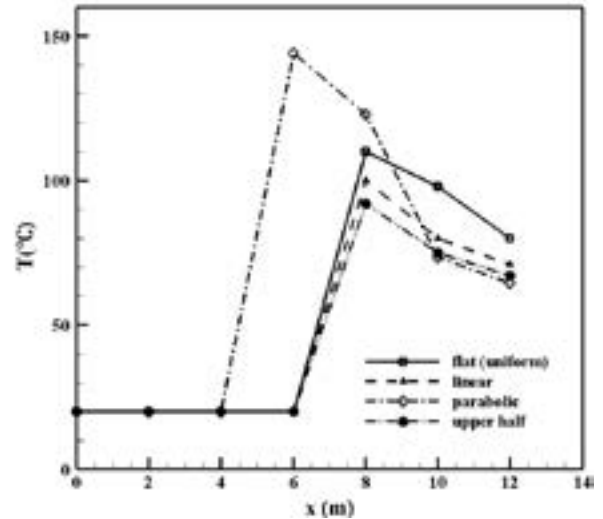
Table 2. Maximum blower velocity in the input flow profile

حداکثر سرعت ورودی (m/s)				نرخ حرارت (kW)
پروفیل یکنواخت نیمه بالایی	پروفیل خطی	پروفیل سهموی	پروفیل یکنواخت	
۰٫۷۴	۰٫۷۴	۰٫۸۰	۰٫۳۷	۰٫۷
۰٫۹۲	۰٫۹۲	۰٫۹۵	۰٫۴۶	۲
۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۱	۰٫۵۳	۵
۱٫۲۴	۱٫۲۴	۱٫۳	۰٫۶۲	۹
۱٫۲۶	۱٫۲۶	۱٫۴	۰٫۶۳	۱۶
۱٫۳	۱٫۳	۱٫۴۵	۰٫۶۵	۲۲٫۵



شکل ۸: تغییرات دما در وسط تونل $HRR = 5 \text{ kW}$

Fig. 8. Temperature variations in middle of the tunnel $HRR = 5 \text{ kW}$



شکل ۷: تغییرات دما نزدیک سقف تونل $HRR = 5 \text{ kW}$

Fig. 7. Temperature variations near the tunnel ceiling $HRR = 5 \text{ kW}$

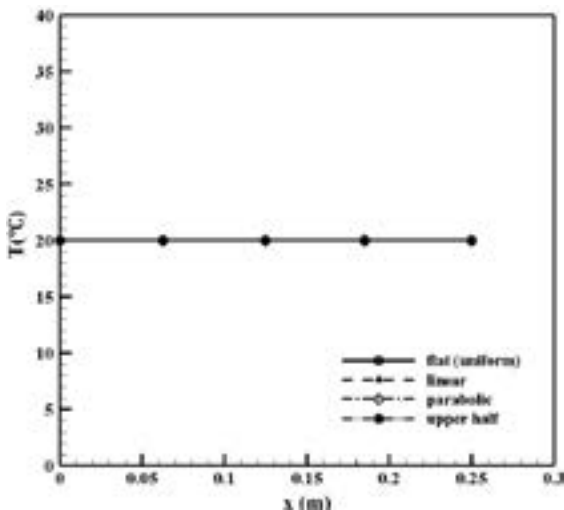
بخش با ثابت نگه داشتن دبی جریان ورودی به تونل که با قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل محاسبه شده است از شرایط پروفیل سرعت سهموی در سیستم دمنده به عنوان جریان هوای ورودی به تونل استفاده می‌شود. شکل ۶-b سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در داخل تونل را نشان می‌دهد. شرایط دیگری نیز که مورد بررسی قرار گرفته است، سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی می‌باشد. در این بخش نیز با ثابت نگه داشتن دبی جریان ورودی به تونل، از سیستم دمنده با شرایط پروفیل سرعت خطی به عنوان جریان هوای ورودی استفاده می‌شود. در این سیستم معادله سرعت جریان ورودی به صورت $u(y) = u \cdot y$ می‌باشد. شکل ۶-c سیستم

جهت بررسی و رسم نمودار دمایی در کلیه شرایط کاری سیستم دمنده، از نرخ رهایش حرارت ۵ کیلووات استفاده شده است. همچنین فاصله منبع آتش از دهانه ورودی تونل ۶ متر می‌باشد.

شکل ۶ نحوه قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل، قرارگیری در نیمه بالایی سطح مقطع و سیستم دمنده با پروفیل‌های سرعت خطی و سهموی را نشان می‌دهد. استفاده از سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل و به صورت یکنواخت مبنای کار اعتبارسنجی نیز بوده است. شکل ۶-a قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل را نشان می‌دهد. دومین شرایط کاری که مورد بررسی قرار می‌گیرد، استفاده از پروفیل سرعت سهموی در سیستم دمنده می‌باشد. در این

و قرارگیری در نیمه بالایی سطح مقطع بیشترین سرعت و دبی جریان ورودی متمرکز در قسمت بالا و نزدیک به سقف تونل است و در این نوع شرایط کاری نه تنها برگشت جریان دود اتفاق نیفتاده بلکه باعث کاهش دما در قسمت‌های میانی و بالای تونل نیز شده است. اما در زمان استفاده از سیستم دمنده با پروفیل یکنواخت در کل مقطع تونل با توجه به این که حجم زیادی از جریان ورودی (حدود نصف جریان ورودی) در قسمت پایینی تونل قرار می‌گیرد با وجود این که برگشت جریان دود اتفاق نمی‌افتد ولی بعد از منبع آتش محل اجتماع دود و گرما شده و دمای بیشتری را نسبت به دو پروفیل دیگر خواهد داشت. با توجه به این که در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیل خطی و یا استفاده از آن در نیمه بالایی سطح مقطع تونل بیشترین سرعت و دبی جریان ورودی متمرکز در قسمت بالایی تونل می‌باشد در نتیجه این نوع از پروفیل‌ها کمک خواهند کرد دود و گرمای ناشی از آتش‌سوزی که در نزدیک سقف تونل تجمع کرده است به سمت بیرون تونل هدایت شوند و کاهش دما در قسمت میانی و نزدیک سقف تونل بعد از منبع آتش ایجاد خواهد شد. البته این رفتار در به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع که هیچ گونه دبی جریانی در قسمت پایینی وجود ندارد و کلیه جریان متمرکز در قسمت بالایی می‌باشد چشمگیرتر خواهد بود.

شکل ۹ تغییرات دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۴ متری از ابتدای تونل را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که هیچ گونه



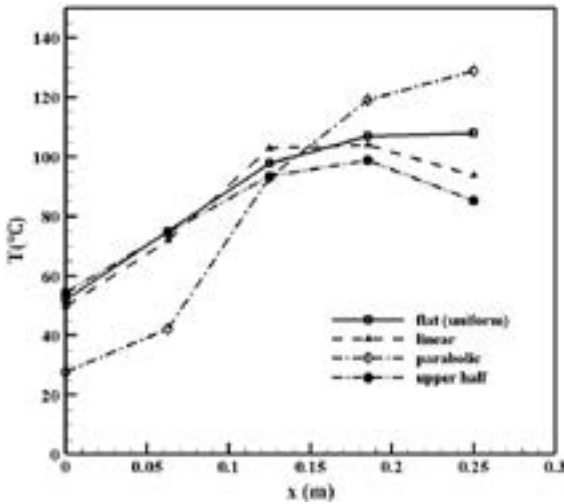
شکل ۹: توزیع دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۴ متری از ابتدای تونل

Fig. 9. Distribution of temperature from the floor to the tunnel ceiling at a distance of 4 meters from the beginning of the tunnel

دمنده با سرعت خطی را در داخل تونل نشان می‌دهد. چهارمین و آخرین شرایط کاری، قرارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع تونل می‌باشد. **شکل ۶-د** پروفیل سرعت خطی در نیمه بالایی سطح مقطع تونل را نشان می‌دهد.

در جدول ۲ حداکثر سرعت در هر کدام از این شرایط کاری با حفظ دبی جریان ورودی در هر یک از نرخ‌های رهایش حرارت نشان داده شده است. این حداکثر سرعت مطابق **شکل ۶** با قرارگیری سیستم دمنده در کل سطح مقطع به صورت یکپارچه در کل مقطع تونل، در سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در مرکز تونل، در سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی در نزدیک سقف تونل و با قرارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به صورت یکپارچه و یکنواخت در نیمه بالایی سطح مقطع تونل می‌باشد.

شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات دما در طول تونل را در نزدیک سقف و وسط تونل نمایش می‌دهند. با توجه به این که منبع آتش در فاصله ۶ متری از دهانه ورودی تونل است، با بررسی نمودارهای مربوط به سیستم دمنده با پروفیل سهموی در **شکل‌های ۷ و ۸** مشخص می‌شود که فرآیند برگشت جریان دود اتفاق افتاده است و هر دو سمت منبع آتش را دود فرا گرفته و مسیر ایمنی را برای خروج مسافران ایجاد نمی‌کند. به همین منظور استفاده از سیستم دمنده با پروفیل سهموی نمی‌تواند مکانیزم مطلوبی برای جلوگیری از برگشت جریان دود باشد. البته با صرف هزینه بیشتر و ایجاد دبی ورودی بیشتر در قسمت ابتدایی تونل می‌توان از فرآیند برگشت دود جلوگیری کرد. لازم به ذکر است که سرعت جریان ورودی نباید به حدی برسد که به عنوان مانعی برای عبور مسافران به سمت خارج تونل شود. علت برگشت جریان دود در این شرایط به این دلیل است که بیشترین سرعت در قسمت میانی تونل قرار دارد، در حالی که محل اجتماع دود و حداکثر دما در نزدیک سقف تونل می‌باشد. اما همانطور که در **شکل‌های ۷ و ۸** مشخص است در هر سه شرایط قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل، نیمه بالایی سطح مقطع و سیستم دمنده با سرعت خطی برگشت جریان دود اتفاق نمی‌افتد. به ترتیب نمودارهای دمایی در شرایطی که سیستم دمنده در کل مقطع تونل، با سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع قرار دارد دمای بیشتری را در قسمت وسط و بالای تونل نشان می‌دهند. علت بوجود آمدن نمودارهای دمایی به این **شکل** به این دلیل است که در مکانیزم سیستم دمنده با سرعت خطی



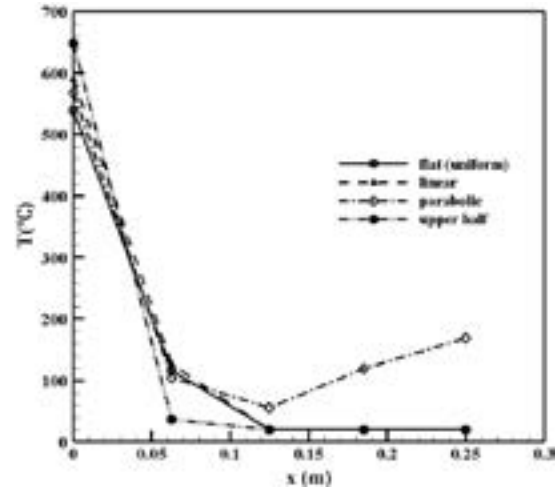
شکل ۱۱: توزیع دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۸ متری از ابتدای تونل
Fig. 11. Distribution of temperature from the floor to the tunnel ceiling at a distance of 8 meters from the beginning of the tunnel

تجمع دود و گرما در بالای منبع آتش و احتمالاً فرآیند برگشت جریان دود خواهد بود.

در شکل ۱۱ که نمودار تغییرات دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۸ متری از ابتدا تونل نمایش داده شده است، در مکانیزم‌های قرارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل، با پروفیل سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع شرایط نسبتاً مشابهی ایجاد شده است. البته در شرایط استفاده از سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به دلیل دبی جریان عبوری بیشتر در نزدیک سقف تونل دماهای کمتری ثبت شده است. کاهش دمای ثبت شده در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع در نقاط نزدیک به سقف تونل نیز می‌تواند به همین دلیل باشد.

۷-۲- بررسی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی دبی حجمی بحرانی

با به دست آوردن دبی حجمی بحرانی محاسبه شده از شرایط به کارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل و با اعمال این دبی حجمی در سایر شرایط به کارگیری سیستم دمنده نتایج متفاوتی ایجاد خواهد شد. به طوری که در زمان استفاده از سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی برگشت جریان دود اتفاق خواهد افتاد. این موضوع نشان می‌دهد که در این سیستم به دبی حجمی بیشتری به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز است. با اعمال کردن



شکل ۱۰: توزیع دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۶ متری از ابتدای تونل
Fig. 10. Distribution of temperature from the floor to the tunnel ceiling at a distance of 6 meters from the beginning of the tunnel

فرآیند برگشت دود در این ناحیه وجود ندارد و چنانچه در هر یک از شرایط کاری فرآیند برگشت جریان دود اتفاق افتاده باشد، طول این لایه برگشتی کمتر از دو متر قبل از منبع آتش می‌باشد. در شکل ۱۰ که نمودار دما از کف تا سقف تونل در فاصله ۶ متری از ابتدای تونل نمایش داده شده است، بیشترین دما در نقطه نزدیک به کف تونل ثبت شده است، که علت آن نزدیک بودن محل اندازه‌گیری دما به منبع آتش می‌باشد. البته در این نقطه بیشترین دمای ثبت شده مربوط به شرایط استفاده از سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع و کمترین دمای اندازه‌گیری شده نیز مربوط به استفاده از سیستم دمنده در کل مقطع تونل می‌باشد؛ زیرا در میان شرایط کاری انتخاب شده کمترین دبی جریان عبوری در نزدیک منبع آتش مربوط به قرارگیری دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع و بیشترین دبی جریان عبوری در نزدیک منبع آتش مربوط به استفاده از سیستم دمنده در کل مقطع تونل می‌باشد.

در شکل ۱۰ با افزایش ارتفاع و نزدیک شدن به سقف تونل و دور شدن از شعله‌های آتش، دما کاهش پیدا می‌کند که این کاهش دما در شرایط به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع تونل به دلیل تمرکز سرعت و دبی ورودی جریان در نقاط نزدیک به سقف چشمگیرتر خواهد بود. البته نکته مهم‌تر در شکل ۱۰ افزایش دما در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در فاصله ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ متری می‌باشد، که این موضوع نشان دهنده

جدول ۳: دبی حجمی بحرانی در نرخ‌های رهائش حرارت گوناگون

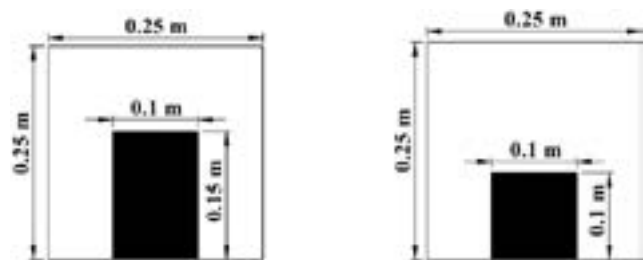
Table 3. Critical volume flux at different rates of heat release

دبی حجمی بحرانی (m ³ /s)				نرخ حرارت (kW)
پروفیل یکنواخت نیمه بالایی	پروفیل خطی	پروفیل سهموی	پروفیل یکنواخت	
۰٫۰۲۰	۰٫۰۲۱	۰٫۰۴۶	۰٫۰۲۳	۰٫۷
۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۶	۰٫۰۵۴	۰٫۰۲۸	۲
۰٫۰۲۸	۰٫۰۳۰	۰٫۰۶۶	۰٫۰۳۳	۵
۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۵	۰٫۰۷۶	۰٫۰۳۸	۹
۰٫۰۳۵	۰٫۰۳۶	۰٫۰۷۹	۰٫۰۳۹	۱۶
۰٫۰۳۶	۰٫۰۳۷	۰٫۰۸	۰٫۰۴۰	۲۲٫۵

شرایط کاری نیز به ترتیب سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی، سیستم دمنده در کل مقطع تونل و سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی به دبی ورودی کمتری به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز دارند. با توجه به این که محل اجتماع گرما و دود در نزدیک سقف تونل می‌باشد، در سیستم‌های دمنده هرچه دبی ورودی تمرکز بیشتری در نزدیک سقف داشته باشد، نیاز به دبی ورودی کمتری در قسمت ورودی تونل می‌باشد که این موضوع در به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به سایر شرایط کاری بیشتر خودنمایی می‌کند. البته با توجه به این که فاصله دهانه ورودی تونل تا محل قرارگیری منبع آتش ۶ متر می‌باشد، چنانچه از سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی یا سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نیز استفاده شود، جریان اعمال شده توسط هرکدام از این مکانیزم‌ها تا نزدیک شدن به منبع آتش کل سطح مقطع تونل را به صورت نسبتاً یکنواخت و یکپارچه فراگرفته و شرایطی همانند به کارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل ایجاد خواهند کرد. به همین دلیل مقادیر دبی حجمی بحرانی گزارش شده در این سه سیستم دمنده به هم نزدیک می‌باشد.

۳-۷- اثر ارتفاع منبع آتش

یکی از پارامترهای مؤثر بر روی سرعت بحرانی، دبی حجمی بحرانی و حداکثر دما در زمان آتش‌سوزی داخل تونل‌های مجهز به سیستم تهویه طولی، ارتفاع منبع آتش می‌باشد. در کار حاضر سرعت بحرانی در دو حالتی که ارتفاع منبع آتش از سطح زمین ۰٫۱ و ۰٫۱۵ متر و نرخ رهائش حرارت ۵ کیلووات می‌باشد با قرارگیری سیستم



شکل ۱۲: مقطع عرضی تونل در بررسی اثر ارتفاع ارتفاع منبع آتش

Fig. 12. Cross section of the tunnel in the study of the effect of height of the source fire source

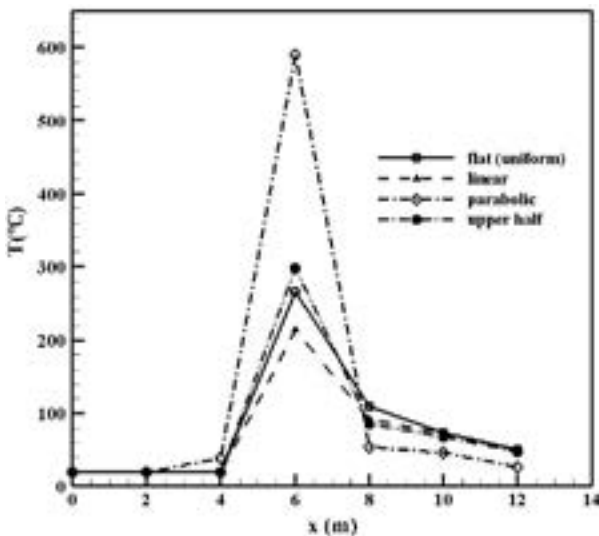
همین میزان از دبی حجمی در شرایط به کارگیری سیستم دمنده با پروفیل‌های سرعت خطی و یا قرارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نه تنها فرآیند برگشت جریان دود اتفاق نمی‌افتد بلکه منجر به افت بیشتر دما در نواحی اطراف آتش خواهد شد که نشان از بازده بالاتر این سیستم‌ها نسبت به استفاده از سیستم دمنده در کل مقطع تونل دارند. در واقع در این دو شرایط با کمتر شدن میزان دبی حجمی نیز می‌توان از برگشت جریان دود جلوگیری کرد. با توجه به اینکه معیار انتخاب نوع دمنده، دبی حجمی ایجاد شده توسط آن است به نظر می‌رسد بهتر است به جای مقدار سرعت، از پارامتر دبی حجمی استفاده شود. در نتیجه با استفاده از مفهوم دبی حجمی بحرانی (حداقل دبی حجمی که از پدیده برگشت دود حاصل از آتش جلوگیری کند)، میزان دبی حجمی بحرانی را برای هر یک از شرایط کاری سیستم دمنده محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق جدول ۳ از میان چهار شرایط کاری مورد بررسی، با قرارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به کمترین دبی حجمی جهت جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز دارد. از میان سایر

جدول ۴: مقادیر سرعت بحرانی در ارتفاع‌های مختلف منبع آتش

Table 4. Critical velocity values at different height of the fire source

درصد افزایش سرعت	آتش ۵ کیلووات		ارتفاع منبع آتش از سطح زمین (متر)
	دبی حجمی بحرانی (m ³ /s)	سرعت بحرانی (m/s)	
۰	۰٫۰۳۳	۰٫۵۳	۰
۷٫۵٪	۰٫۰۳۵	۰٫۵۷	۰٫۱
۱۱٪	۰٫۰۳۷	۰٫۵۹	۰٫۱۵

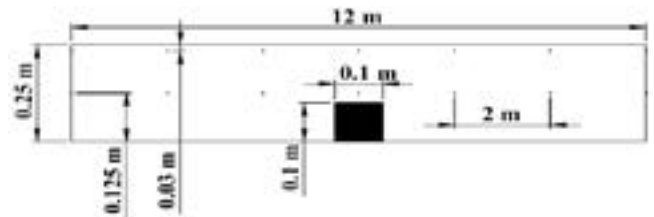


شکل ۱۵: نمودار دما در وسط تونل $HRR = 5 \text{ kW}$

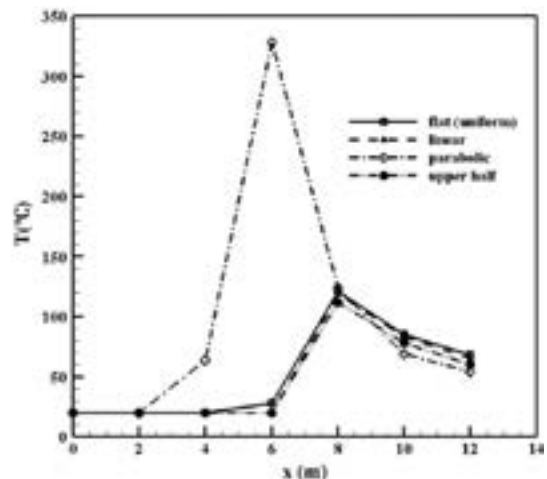
Fig. 15. Temperature graph in Middle Tunnel $HRR = 5 \text{ kW}$

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 حاصل از آتش‌سوزی سریع‌تر 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 اشغال شده بیشتر می‌شود و هوای دمیده شده در تونل برای عبور از جسم فضای کمتری دارد. بنابراین با ثابت بودن دبی و کمتر شدن سطح مقطع، سرعت تهویه کمتری لازم است. این دو پدیده اثر همدیگر را خنثی کرده و سرعت بحرانی افزایش چشمگیری نخواهد داشت.

با حفظ دبی جریان ورودی به تونل، مطابق شکل ۱۳ نمودار دما در وسط و نزدیک به سقف تونل در حالتی که منبع آتش در ارتفاع ۰٫۱ متر نسبت به سطح زمین قرار گرفته است و نرخ رهایش حرارت



شکل ۱۳: نقاط اندازه‌گیری دما در داخل تونل با افزایش ارتفاع منبع آتش
Fig. 13. The points where temperature is measured inside the tunnel with increasing the fire source's height



شکل ۱۴: نمودار دما نزدیک سقف تونل $HRR = 5 \text{ kW}$

Fig. 14. Temperature graph near to tunnel ceiling $HRR = 5 \text{ kW}$

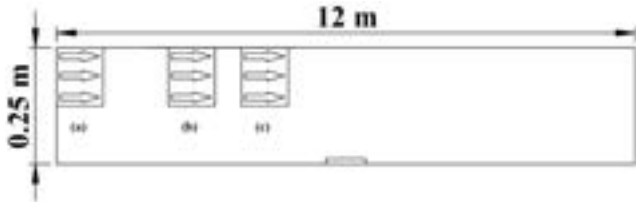
دمنده در کل سطح مقطع تونل مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱۲).

جدول ۴ تأثیر افزایش ارتفاع منبع آتش بر روی سرعت بحرانی را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که افزایش ارتفاع منبع آتش بر روی سرعت بحرانی تهویه تأثیر دارد. زیرا با افزایش ارتفاع منبع آتش در دو حالت ۰٫۱ و ۰٫۱۵ متر، سرعت بحرانی تهویه به ترتیب به میزان ۷٫۵ و ۱۱ درصد افزایش یافته است. افزایش ارتفاع منبع آتش دو

جدول ۵: دبی حجمی بحرانی در نرخ رهائش حرارت ۵ کیلووات و ارتفاع ۰٫۱ متر

Table 5. Critical volume flux at the heat release rate of 5 kW and a height of 0.1 meter

دبی حجمی بحرانی (m ³ /s)				نرخ حرارت (kW)
پروفیل یکنواخت نیمه بالایی	پروفیل خطی	پروفیل سهموی	پروفیل یکنواخت	
۰٫۰۳۱	۰٫۰۳۳	۰٫۰۷۲	۰٫۰۳۵	۵



شکل ۱۶: محل قرارگیری سیستم دمنده

Fig. 16. Blower system location

بیان شد با توجه به این که محل اجتماع گرما و دود در نزدیک سقف تونل می‌باشد، در شرایط متنوع قرارگیری سیستم دمنده هرچه دبی ورودی تمرکز بیشتری در نزدیک سقف داشته باشد، نیاز به دبی ورودی کمتری در قسمت ورودی تونل نیاز است که این موضوع در شرایط استفاده از سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به سایر شرایط کاری بیشتر خودنمایی می‌کند.

۴-۷- اثر تغییر مکان طولی دمنده

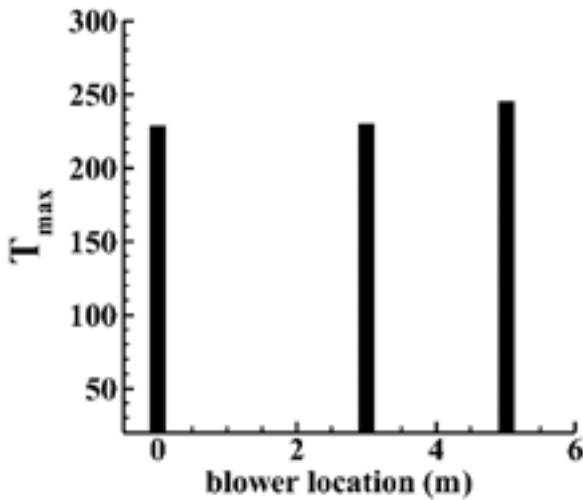
بر اساس بررسی‌های انجام شده مشخص شد به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع بهترین عملکرد و بیشترین بازدهی را نسبت به سایر شرایط قرارگیری سیستم دمنده در سطح مقطع تونل خواهد داشت. اما همانطور که بیان شد قرارگیری این سیستم در دهانه ورودی تونل با توجه به این که فاصله دهانه ورودی تونل تا محل قرارگیری منبع آتش ۶ متر می‌باشد، جریانی را به صورت نسبتاً یکنواخت و یکپارچه در زمان رسیدن به آتش ایجاد خواهد کرد که مشابه با شرایط به کارگیری سیستم دمنده در کل مقطع تونل می‌باشد. به همین منظور و به جهت بررسی دقیق‌تر نحوه عملکرد این سیستم مطابق شکل ۱۶ میزان برگشت جریان دود و حداکثر دما در سه شرایط کاری که سیستم دمنده در دهانه ورودی تونل و در فاصله‌های ۳ و ۶ متری از ورودی تونل می‌باشد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همچنین جهت مشخص شدن میزان حداکثر دما در داخل تونل

نیز ۵ کیلووات می‌باشد، در چهار شرایط متنوع که سیستم دمنده در کل مقطع تونل، در نیمه بالایی سطح مقطع، با پروفیل سرعت خطی و با پروفیل سرعت سهموی می‌باشد رسم شده است. این دبی حجمی جریان ورودی همان مقداری است که با اعمال شدن آن در شرایط قرارگیری سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل (سرعت ۰٫۵۷ متر بر ثانیه) برگشت جریان دود اتفاق نمی‌افتد.

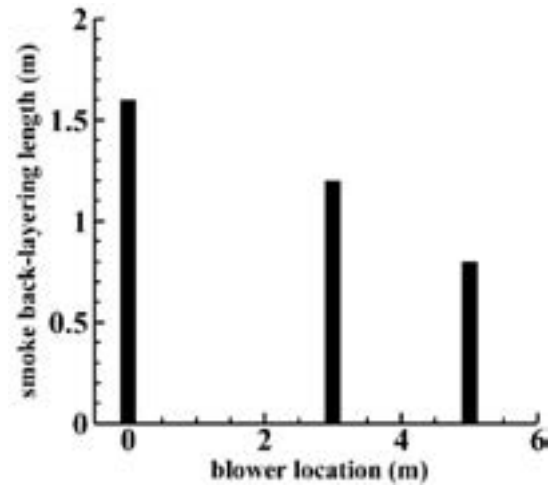
همانطور که شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند بیشینه دما در قسمت میانی تونل و در فاصله ۶ متری از ابتدا تونل اتفاق افتاده است. علت این موضوع نزدیک بودن نقاط اندازه‌گیری دما به منبع آتش می‌باشد. سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی در قسمت قبل و محل قرارگیری منبع آتش نسبت به سایر شرایط کاری دمای محلی بیشتری را نشان می‌دهد. علت این رخداد تجمع گرما و دود در قسمت بالایی منبع آتش و قبل از آن می‌باشد، زیرا این سیستم دمنده قادر به حرکت دادن گرما و دود جمع شده در سقف به سمت بیرون نمی‌باشد. اما بر خلاف این موضوع همان‌طور که نمودارها نیز نشان می‌دهند، کمترین دمای ثبت شده بعد از منبع آتش نیز مربوط به همین شرایط کاری می‌باشد. علت این موضوع حرکت مقدار زیادی از دود به سمت بالادست منبع آتش می‌باشد که باعث می‌شود از شدت گرما در پایین دست منبع آتش کاسته شود.

میزان دبی حجمی بحرانی برای هر چهار شرایط کاری در حالی که فاصله منبع آتش از سطح زمین ۰٫۱ متر می‌باشد در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول ۵ از میان چهار سیستم مورد بررسی، سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به کمترین دبی حجمی جهت جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز دارد. از میان سایر شرایط کاری نیز به ترتیب سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی، سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل با پروفیل سرعت یکنواخت و سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی به دبی ورودی کمتری به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز دارند. همانطور که در قسمت‌های قبل نیز



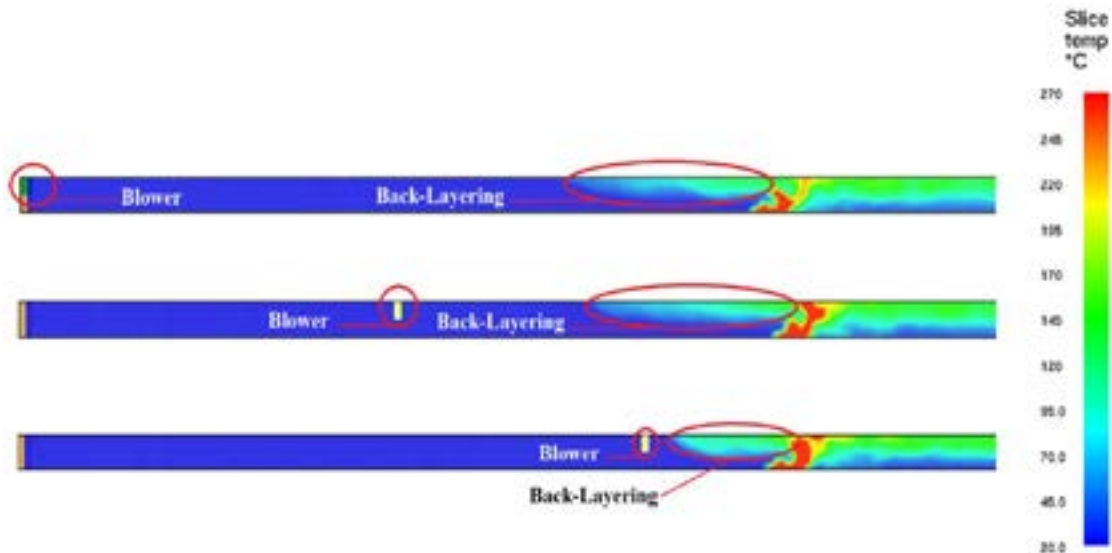
شکل ۱۸: بیشینه دما در شرایط مختلف

Fig. 18. Maximum temperature in different conditions



شکل ۱۷: طول جریان برگشت دود

Fig. 17. Smoke back-layering length



شکل ۱۹: توزیع دما در داخل تونل

Fig. 19. Distribution of temperature inside the tunnel

میزان برگشت جریان دود کاهش یافته است. به طوری که کمترین میزان جریان برگشتی دود در شرایط به کارگیری سیستم دمنده در فاصله ۱ متری منبع آتش و بیشترین جریان برگشتی دود در شرایط استفاده از سیستم در دهانه تونل گزارش شده است. در نتیجه مطابق گزارشات فوق چنانچه در زمان آتش‌سوزی سیستم دمنده قادر به ایجاد دبی حجمی بحرانی نباشد و فرآیند برگشت جریان دود اتفاق افتد، هرچه فاصله این سیستم از محل حادثه کمتر باشد تأثیر مطلوب‌تری به منظور جلوگیری از گسترش جریان دود به سمت بالادست خواهد داشت.

و طول جریان برگشتی دود، دما در نزدیکی سقف و در سرتاسر تونل اندازه‌گیری شده است. در تمامی شرایط مورد بررسی از نرخ رهائش حرارت ۵ کیلووات استفاده شده است و میزان دبی حجمی اعمال شده در سیستم دمنده نیز ۰٫۱۴ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. این میزان از دبی حجمی نصف دبی حجمی بحرانی محاسبه در نرخ رهائش حرارت ۵ کیلووات و شرایط به کارگیری سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع می‌باشد.

بر اساس بررسی‌های انجام شده و همانطور که در شکل ۱۷ مشخص شده است با نزدیکتر شدن سیستم دمنده به منبع آتش

اما همانطور که در شکل ۱۸ مشخص شده است با نزدیک‌تر شدن سیستم دمنده به محل حادثه میزان بیشینه دما افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۹ در شرایطی که سیستم دمنده در دهانه ورودی تونل قرار گرفته است میزان طول جریان برگشتی دود افزایش می‌یابد و حجم عمده‌ای از محصولات احتراق به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهد کرد. اما در شرایطی که سیستم دمنده به منبع آتش نزدیک می‌شود از گسترش جریان دود به سمت بالادست منبع آتش جلوگیری کرده و طول لایه برگشتی کاهش پیدا می‌کند. در این شرایط بیشتر محصولات احتراق به سمت پایین دست تونل حرکت کرده و نواحی اطراف آتش محلی مستعد به منظور تجمع گرما و دود خواهد بود.

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر روی سرعت بحرانی و حداکثر دما در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق برای اولین بار پارامتر مهم دیگری به نام دبی حجمی بحرانی معرفی شد. در کار حاضر مشاهده شد که با حفظ دبی حجمی محاسبه شده از شرایط قرارگیری سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل و اعمال همین میزان از دبی حجمی در سیستم‌های دمنده متنوع دیگر شرایط مختلفی ایجاد خواهد شد. به طوری که در زمان استفاده از سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی با حفظ دبی جریان ورودی به تونل فرآیند برگشت جریان دود اتفاق خواهد افتاد. اما چنانچه همین میزان از دبی حجمی در سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی و سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع اعمال شود نه تنها فرآیند برگشت جریان دود اتفاق نمی‌افتد بلکه شاهد کاهش دما نیز در نواحی اطراف منبع آتش خواهیم بود که این مسئله بازده بالاتر این دو شرایط را نسبت به سایر سیستم‌های دمنده مورد استفاده در جریان ورودی نشان می‌دهد.

در این تحقیق، با استفاده از مفهوم دبی حجمی بحرانی، میزان حداقل دبی لازم برای هریک از سیستم‌های دمنده مورد استفاده به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت جریان دود در نرخ‌های رهایش حرارت مختلف محاسبه شد. مشاهده شد که بیشترین دبی حجمی مورد نیاز به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت دود

مربوط به سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی می‌باشد که نشان می‌دهد این سیستم دمنده به منظور جلوگیری از فرآیند برگشت جریان دود مناسب نمی‌باشد. در بین سایر سیستم‌های دمنده نیز سیستم دمنده در کل مقطع تونل، با پروفیل سرعت خطی و در نیمه بالایی سطح مقطع به ترتیب بیشترین میزان دبی حجمی بحرانی را به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد هرچه در سیستم دمنده مورد استفاده دبی حجمی بیشتری در نزدیک به سقف تونل جریان داشته باشد نتیجه مطلوب‌تری حاصل خواهد شد و بازده بالاتری خواهیم داشت.

برای این چهار سیستم دمنده، اثر ارتفاع منبع آتش نیز بر روی دبی حجمی بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع منبع آتش تأثیر چندانی بر روی دبی حجمی بحرانی و سرعت بحرانی نخواهد داشت. از میان چهار سیستم دمنده مورد استفاده نیز با افزایش ارتفاع منبع آتش به ترتیب سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع، سیستم دمنده با پروفیل سرعت خطی، سیستم دمنده در کل سطح مقطع تونل و سیستم دمنده با پروفیل سرعت سهموی به کمترین میزان دبی حجمی به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود نیاز داشتند که نشان از بازدهی بالاتر سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع نسبت به سایر سیستم‌های دمنده دارد.

همچنین بررسی فاصله طولی سیستم دمنده از منبع آتش نیز در شرایطی که برگشت جریان دود وجود دارد، نشان داد نزدیک شدن سیستم دمنده به منبع آتش منجر به کاهش طول جریان برگشتی دود و افزایش بیشینه دما خواهد شد. با توجه به اینکه جهت مدل‌سازی تهویه طولی معمولاً سیستم دمنده به صورت یکنواخت و در کل سطح مقطع تونل در نظر گرفته شده است، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مناسب است جهت مدل‌سازی، سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع را در نظر گرفت، زیرا سرعت بحرانی، دبی حجمی بحرانی و حداکثر دما در این نوع سیستم دمنده کاملاً متفاوت با سیستم دمنده مورد استفاده در کل سطح مقطع تونل است. درحالی که سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع به واقعیت نزدیک‌تر است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

- [4] L. Hu, R. Huo, W. Chow, Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(8) (2008) 1468-1483.
- [5] J.S. Roh, S.S. Yang, H.S. Ryou, M.O. Yoon, Y.T. Jeong, An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires—heptane pool fire case, *Building and Environment*, 43(7) (2008) 1225-1231.
- [6] W. Chow, K. Wong, W. Chung, Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2) (2010) 122-128.
- [7] B. Niknam, H. madani, H. Salarirad, Determining Critical Wind Velocity During Fire Accident in Alborz Tunnel, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 44(1) (2012) 47-55(In Persian).
- [8] H. Bozorgasareh, A. Kazemipour, H. Afshin, B. Farhanieh, Numerical Investigation of Fire Spread from a Fire Source to a Near Body in a Tunnel, *Modares Mechanical Engineering*, 15(10) (2015) 1-11(In Persian).
- [9] M. Mounesan, M.R. Talaee, H. molatefi, Investigation of effective parameters on critical ventilation velocity in underground tunnels, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(1) (2016) 41-54 (In Persian).
- [10] T. Zhou, J. Liu, Q. Chen, X. Chen, J. Wang, Characteristics of smoke movement with forced ventilation by movable fan in a tunnel fire, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 64 (2017) 95-102.
- [11] Z. Tang, Y. Liu, J. Yuan, Z. Fang, Study of the critical velocity in tunnels with longitudinal ventilation and spray systems, *Fire Safety Journal*, 90 (2017) 139-147.
- [12] G. Heidarinejad, R. Vasheghani Farahani, Numerical Simulation of Fire in Tunnel with Ventilation and Suppression Systems, *Modares Mechanical*

گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK	C_p
طول مقیاس چشمه آتش	$*D$
ضریب نفوذ گونه α ام	D_α
نیروی خارجی، kgm/s ²	f_b
شتاب گرانشی، m/s ²	g
آنتالپی محسوس، J	h_s
نرخ تولید گونه α ام، kg/m ³ s	\dot{m}_α''
فشار، kg/ms ²	P
نرخ گرمای آزاد شده، J/s	Q
نرخ انرژی آزاد شده بر واحد حجم، J/sm ³	\dot{q}'''
بردار شار حرارتی، kW/m ²	\dot{q}''
سرعت در جهت طولی، m/s	u
کسر جرمی	Y

علائم یونانی

چگالی، kg/m ³	ρ
تنش برشی، kg/m ²	τ
نرخ اتلاف انرژی، kg/ms ³	ε
گونه‌ها	α

زیرنویس

شرایط هوای اتمسفری	∞
دوده	S

مراجع

- [1] Y. ASHRAE Handbook 2007 - HVAC Applications (SI). chapter 13 (Enclosed Vehicular Facilities)
- [2] Y. Wu, M.A. Bakar, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity, *Fire Safety Journal*, 35(4) (2000) 363-390.
- [3] L. Hu, R. Huo, W. Peng, W. Chow, R. Yang, On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6) (2006) 650-655.

- and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, *Fire safety journal*, 45(6-8) (2010) 361-370.
- [15] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, R. McDermott, *Fire dynamics simulator technical reference guide*, National Institute of standards and technology, (2010).
- Engineering, 18(8) (2018) 209-220(In Persian).
- [13] J. Floyd, G. Forney, S. Hostikka, T. Korhonen, R. McDermott, and K. B. McGrattan, *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide vol. Volume 1: Mathematical Model*, NIST special publication, 1018, (2012).
- [14] Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason, *Study of critical velocity*