

مطالعه عددی سیستم تهویه طولی همراه با شافت تخلیه برای کنترل آتش و جریان دود در تونل

مسعود مونسان، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران
محمد رضا طلایی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
حبیب‌الله ملاطفی، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: mrtalae@iust.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۵/۱۰ - پذیرش: ۹۵/۰۷/۳۰

چکیده

طراحی مناسب و کارآمد سیستم تهویه تونل برای افزایش ایمنی تونل‌ها در هنگام آتش‌سوزی ضروری و لازم است. هدف از طراحی یک سیستم تهویه، کنترل آتش و جریان دود برای ایجاد یک مسیر امن برای فرار مسافران است. نصب فن‌های جریان محوری، یا همان جت فن، از روش‌های مرسوم برای ایجاد جریان طولی تهویه در تونل است. اما کارایی سیستم تهویه طولی با افزایش طول تونل کاهش می‌یابد. در این مقاله، یک سیستم تهویه طولی با شافت تخلیه ترکیب شده و عملکرد آن در شرایط اضطراری در تونل‌های نسبتاً طویل مورد بررسی قرار گرفت. در سیستم تهویه با یک شافت تخلیه، هدف محدود کردن ناحیه آتش و دود در فاصله بین منبع آتش و شافت است. در این مقاله، از کد FDS، که یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی است، برای مطالعه حرکت جریان دود و توزیع دما در تونل استفاده شده است. سپس، اثر تغییر پارامترهایی نظیر دبی جریان خروجی از شافت، سرعت طولی ورودی، شیب تونل، ابعاد شافت تهویه، نرخ رهایش حرارت و محل وقوع آتش بر توزیع دما در زیر سقف تونل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد سیستم تهویه طولی با استفاده از شافت تخلیه بهبود یافته و تغییر شیب تونل، و به موجب آن تغییر در حرکت جریان دود در تونل، به خوبی با استفاده از سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تهویه قابل کنترل است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح مقطع خروجی شافت تهویه تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم ندارد. با توجه به این پارامتر، سناریوهای مختلف می‌تواند تعریف شده و امکان کنترل ناحیه آتش و جریان دود به خوبی به وجود بیاید.

واژه‌های کلیدی: تهویه تونل، ایمنی تونل، توزیع دما

۱. مقدمه

افزایش تلفات جانی، کاهش دید مسافری و به موجب آن کاهش افرادی که می‌توانند راه خروج را بیابند، و استنشاق گازهای سمی است. یکی از رایج‌ترین راه‌ها برای کنترل جریان دود، استفاده از سیستم تهویه طولی

کنترل آتش و جریان دود ناشی از آن برای افزایش ایمنی تونل‌ها، حفظ جان مسافری و کاهش تلفات انسانی اهمیت فراوان دارد. زیرا که از عوامل مهم در

مثال، این فرض در تونل جاده‌ای به این معناست که ترافیک در بالادست محل وقوع آتش متوقف شده و تهویه تونل سبب می‌شود که در بالادست آتش هیچ‌گونه جریان دودی وجود نداشته باشد. در عین حال، وسایل نقلیه در پایین دست تونل محل وقوع آتش نیز به راحتی به راه خود ادامه می‌دهند و هیچ سناریویی برای حفاظت و ایمنی افرادی که در پایین دست محل وقوع آتش قرار دارند در نظر گرفته نشده است. این چنین فرضی برای تونل‌های با طول زیاد از نوع جاده‌ای و ریلی مناسب نیست. علاوه بر این، در تونل‌های مترو که در پایین دست تونل ایستگاه قرار دارند و امکان تخلیه جریان دود به داخل ایستگاه ممکن نیست نمی‌توان به تنهایی از این سیستم تهویه استفاده کرد. افزایش کارایی سیستم تهویه طولی، به ویژه در هنگام آتش‌سوزی در تونل‌های طویل، استفاده از شافت تهویه طبیعی یا مکانیکی است، تا بدین ترتیب، جریان دود که توسط جریان تهویه طولی به سمت پایین دست منبع آتش حرکت می‌کند از طریق شافت به خارج از تونل هدایت شود. خروج بیشتر دود از طریق شافت، سبب کاهش دما و سرعت گسترش دود در تونل شده و به تعویض جریان هوای بین داخل و خارج تونل کمک کرده و منجر به افزایش کیفیت هوا می‌شود و در نهایت سبب حفاظت بهتر مسافران در برابر جریان دود و آسیب‌های ناشی از آن می‌گردد. بنابراین، امروزه در طراحی سیستم تهویه تونل معمولاً یک سیستم تخلیه^۵ در کنار سیستم تهویه طولی نصب می‌شود. کو و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از آزمایش در مقیاس نمونه، به بررسی سیستم تهویه طولی با شافت تهویه در زمان آتش‌سوزی برای یک تونل جاده-ای طویل پرداختند. نتایج بیانگر آن است که هنگامی که آتش‌سوزی بین شافت و خروجی تونل روی دهد برای جلوگیری از برگشت دود و جریان هوای داغ

است. سیستم تهویه طولی دارای پیکربندی‌های متفاوتی است که یکی از آنها نصب فن‌های جریان محوری^۱ یا همان جت فن^۲ در زیر سقف تونل است. در این نوع سیستم، هدف آن است که با ایجاد یک جریان طولی هوا در تونل، دود و گازهای داغ را مجبور به حرکت در راستای تونل و در جهت جریان دمیده شده کند و 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 شود. سناریوهای آتش‌سوزی در تونل‌های مترو که دارای سیستم طولی با فن‌های دمنده و مکنده می‌باشد به وسیله شافت میانی و محل آتش‌سوزی برنامه‌ریزی و کنترل می‌گردد. به این ترتیب که با ناحیه‌بندی تونل به نواحی مختلف، با توجه به حضور شافت میانی و ایستگاه تهویه در صورت بروز آتش‌سوزی در بین هر ایستگاه تهویه و شافت میانی و نزدیک بودن آتش به هر کدام، با تعویض جهت مکش و دمش، جریان دود به سمت مسیر کوتاه‌تر هدایت شده و مسیر فرار بدون دود برای مسافران ایجاد می‌گردد.

حداقل سرعت تهویه که از برگشت جریان دود به سمت بالادست جلوگیری می‌کند سرعت بحرانی تهویه^۳ نامیده می‌شود. در مطالعات صورت گرفته در زمینه آتش‌سوزی در تونل، سرعت بحرانی تهویه و جریان برگشتی^۴ (وو و باکار، ۲۰۰۰؛ روه و همکاران، ۲۰۰۷؛ لی و همکاران، ۲۰۱۰) و بیشینه دما در زیر سقف تونل (هو و همکاران، ۲۰۰۶a؛ لی و اینگاسون، ۲۰۱۲؛ بی و همکاران، ۲۰۱۳) به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. در این نوع سیستم تهویه تونل، فرض می‌شود که ایجاد یک مسیر امن برای مسافران در بالادست منبع آتش کافی است. به عنوان

¹- Axial flow fans

²- Jet fan

³- Critical velocity ventilation

⁴- Backlayering

⁵- Extraction system

مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها سیستم تخلیه با یک و دو شافت تهویه مکانیکی را بررسی کردند و عواملی نظیر سرعت طولی تهویه، ارتفاع تونل، نحوه‌ی آرایش سیستم تخلیه، نرخ رهایش حرارت، نرخ رشد آتش، گسترش آتش و دما در زیر سقف تونل را مورد مطالعه قرار دادند. جی و همکاران (۲۰۱۰) با انجام یک سری آزمایش، به بررسی اثر ارتفاع شافت خروجی دود و سرعت خروجی بر بازده شافت مکانیکی خروج دود پرداختند. آن‌ها نشان دادند که فرایند خروج دود، با افزایش ارتفاع شافت خروجی و کاهش سرعت خروجی افزایش می‌یابد. کیم و کیم (۲۰۰۹) به بررسی تأثیر موقعیت شافت‌های تهویه، در تونل مترو، بر عملکرد تهویه طبیعی یا اثر پیستونی قطار پرداختند. آن‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نشان دادند که بهترین موقعیت شافت تهویه در تونل، برای به‌دست آوردن بیشینه عملکرد تهویه طبیعی، قرار گرفتن این شافت‌های تهویه در نزدیکی ایستگاه‌هاست. در پژوهشی دیگر، هوانگ و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی اثر تعداد و هندسه شافت تهویه در محل اتصال به تونل بر عملکرد تهویه طبیعی در یک تونل مترو تک‌خطه پرداخته‌اند. افزایش تعداد داکت‌های تهویه و تغییر زاویه اتصال داکت تهویه از ۹۰ به ۴۵ درجه، سبب افزایش دبی جرمی هوای خروجی از طریق داکت‌ها شد. سطح مقطع مؤثر شافت و سرعت ورودی به شافت روی نرخ جریان خروجی یا مکشی برای جلوگیری از برگشت دود تأثیرگذار است. با اینکه تحقیقات بسیاری به صورت آزمایشگاهی و عددی در این زمینه صورت گرفته است، اما شرایط و ویژگی جریان دود در نزدیکی شافت و عوامل مؤثر بر آن کمتر بررسی شده است. بنابراین، در این مقاله، به بررسی و مطالعه سیستم تهویه طولی که از یک شافت تخلیه^۳ بهره می‌برد به‌عنوان یک روش مفید و سودمند برای

کافی است که فن شافت تهویه، جریان هوا را به داخل تونل بدمد. اما هنگامی که آتش‌سوزی بین ورودی تونل و شافت روی دهد، فن شافت باید با تمام ظرفیت خود کار کند و با ایجاد جریان مکشی به سیستم تهویه طولی در ایجاد مسیر ایمن برای مسافران کمک کند. هو و همکاران (۲۰۰۶b) با انجام آزمایش-هایی در یک راهروی طولانی زیرزمینی، اثر مکان‌های ورودی هوای تازه را بر کارایی سیستم تخلیه دود بررسی کردند. نتایج نشان داد که با قرار دادن ورودی-های هوا دورتر از خروجی‌های دود، تخلیه دود کارآمدتر خواهد بود. واکوئیلین و تله (۲۰۰۵) با یک کار آزمایشگاهی، به بررسی طول جریان برگشتی در پایین‌دست شافت تهویه در یک سیستم تهویه طولی و سرعتی که سبب مانع از برگشت جریان دود در پایین‌دست شافت تهویه می‌شود پرداخته‌اند. آن‌ها این سرعت را سرعت محدودکننده^۱ نامیدند و نشان دادند که این سرعت کمتر از سرعت بحرانی تهویه است. ژونگ و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی کارایی یک سیستم تهویه طولی، همراه با یک شافت تهویه طبیعی در یک تونل جاده‌ای در هنگام آتش‌سوزی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که اثر دودکشی^۲ عامل تعیین‌کننده بر عملکرد شافت تهویه طبیعی است. اینگاسون و سکو (۲۰۰۵) با استفاده از نرم‌افزار فلوننت یک سیستم تهویه طولی، که از یک شافت تهویه مکانیکی به‌عنوان سیستم تخلیه برای خروج جریان دود استفاده می‌کند، را مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل را با داده‌های تجربی حاصل از آزمایش در مقیاس مدل مقایسه کردند. نتایج عددی انطباق قابل قبولی با نتایج تجربی داشت. اینگاسون و لی (۲۰۱۱) در پژوهشی، با انجام یک سری آزمایش در مقیاس ۱:۲۳ تونل واقعی، یک سیستم تهویه طولی را که دارای سیستم تخلیه است

¹- Confinement velocity

²- Stack effect

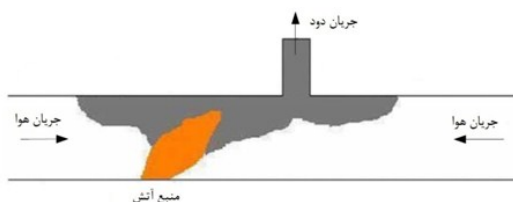
³- Extraction shaft

۲. مدل‌سازی مسئله

۲-۱. مدل‌سازی آتش و دود

منحنی‌های آتش‌سوزی در یک محیط بسته دارای قسمت‌های مختلفی است. اما به طور کلی از سه مرحله مجزا تشکیل می‌شوند. مرحله اول، مرحله رشد^۳ و گسترش آتش است و در آن میزان سوخت در دسترس پارامتر تعیین کننده است و از این رو آتش در این مرحله، سوخت‌کنترلی است. مرحله دوم، مرحله‌ای است که نرخ رهائش حرارت ناشی از آتش‌سوزی بیشترین مقدار خود را دارد و در این مرحله کل مواد اشتعال‌پذیر مشتعل می‌شوند که این امر به میزان اکسیژن در دسترس بستگی دارد. هرچه میزان اکسیژن بیشتر باشد، نرخ رهائش حرارت بیشتر خواهد بود و از این رو آتش در این مرحله، تهویه‌کنترلی است. این مرحله، به اصطلاح، آتش کاملاً توسعه‌یافته^۴ نامیده می‌شود. مرحله آخر، مرحله زوال^۵ یا خاموشی آتش است که سوخت به پایان خود نزدیک شده و آتش خاموش می‌شود (حیدری نژاد و همکاران، ۲۰۱۳). شکل ۲، نمونه‌ای از منحنی آتش درون یک محیط بسته را نشان می‌دهد. در آزمایش، بیان شده که آتش بعد از ۱ تا ۲ دقیقه به حالت پایا یا بیشینه نرخ رهائش حرارت می‌رسد. علاوه بر این، برای طراحی سیستم تهویه در بیشینه شرایط بحرانی، نرخ رهائش حرارت ثابت فرض می‌شود. بدین ترتیب، برای مدل کردن آتش و دود در شبیه‌سازی عددی، از منحنی درجه دوم برای رشد آتش به مدت ۱ دقیقه و یک مقدار ثابت بیشینه نرخ رهائش حرارت ۵۹/۶۴ kW استفاده شده است (اینگاسون و سکو، ۲۰۰۵). با توجه به اینکه طراحی و محاسبات سیستم‌های تهویه در حالت بحرانی و حداکثر بار دود و حرارت آتش‌سوزی

کنترل آتش و جریان دود ناشی از آن، به ویژه در تونل‌های طولی ریلی و مترو، پرداخته می‌شود. شکل ۱، این نوع سیستم تهویه را نمایش می‌دهد. وظیفه شافت تخلیه، خارج کردن جریان دود و گازهای داغ ناشی از آتش‌سوزی و جلوگیری از حرکت جریان دود به سمت پایین‌دست تونل است. جریان خروجی از شافت تخلیه مکانیکی، جریان طولی را در دو طرف شافت و در خلاف جهت هم ایجاد می‌کند و بدین ترتیب در دو طرف شافت تخلیه جریان هوای تازه وجود خواهد داشت. در این سیستم، هدف، محدود کردن ناحیه آتش‌سوزی و جریان دود و گازهای داغ ناشی از آن در فاصله بین منبع آتش و شافت است. به این جهت، جریان خروجی از شافت باید به اندازه‌ای باشد تا با ایجاد یک جریان طولی از برگشت جریان دود در پایین‌دست شافت تخلیه جلوگیری کند. بنابراین، در دو طرف شافت تخلیه دو جریان مخالف هم وجود دارد که بر حرکت جریان دود در تونل اثرگذار است. برای مطالعه توزیع دما در زیر سقف تونل، از روش عددی و با کمک کد FDS^۱ نسخه ۵.۵.۳ استفاده شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. سپس، اثر پارامترهایی نظیر سرعت خروجی از شافت، سرعت جریان تهویه طولی، نرخ رهائش حرارت^۲، شیب تونل، ابعاد شافت تهویه و محل وقوع آتش بر حرکت جریان دود در تونل مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۱. سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تخلیه

^۳- Spread

^۴- Fully-Developed Fire

^۵- Decay

^۱- Fire Dynamic Simulation (FDS)

^۲- Heat Release Rate (HRR)

پیشگویی- اصلاح گر^۳ با دقت مرتبه دوم در زمان و مکان است. این بدین معنی است که مشتقات جزئی موجود در معادلات پایستگی جرم، تکانه و انرژی به کمک روش تفاضل محدود^۴ با دقت مکانی و زمانی مرتبه دوم گسسته شده و در زمان به صورت صریح حل می‌شوند و پدیده‌ی تشعشع به کمک روش حجم کنترل^۵ محاسبه می‌شود (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰). معادلات حاکم بر جریان سیال عبارت‌اند از معادله بقای جرم:

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

معادله بقای تکانه:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q} + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i \quad (3)$$

معادله بقای گونه‌ها:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i \quad (4)$$

انتقال حرارت تابشی در FDS به صورت یک معادله انتقال برای گازهای خاکستری^۶ حل می‌شود. معادله انتقال تابشی^۷ برای محیطی که شامل جذب^۸، نشر^۹ و انعکاس^{۱۰} تشعشع است، به صورت زیر است:

$$S \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[k(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_\lambda(x, s) + B(x, s) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_\lambda(x, s') ds' \quad (5)$$

که در آن $I_\lambda(x, s)$ شدت تابش در طول موج S و λ بردار جهت شدت تابش، $k(x, \lambda)$ و $\sigma_s(x, \lambda)$ به

³ - Predictor-Corrector

⁴ - Finite difference

⁵ - Finite volume

⁶ - Gray gas

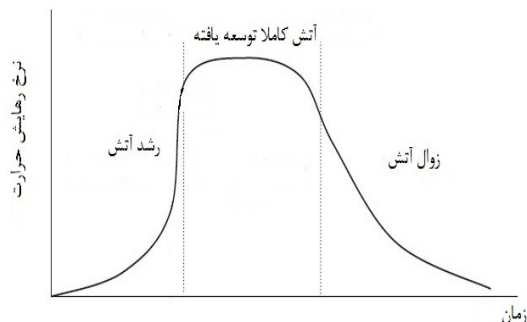
⁷ - Radiative Transport Equation

⁸ - Absorption

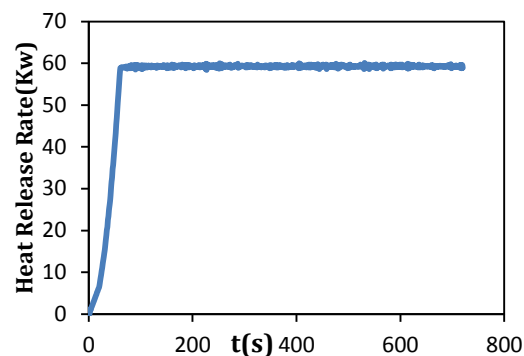
⁹ - Emitting

¹⁰ - Scattering

صورت می‌گیرد، لذا مقدار حداکثر نرخ رهائش در نمودار آتش‌سوزی در مسئله وارد شده است (کراول و بیرد-۲۰۰۵).



شکل ۲. نمودار نرخ رهائش حرارت به زمان



شکل ۳. نمودار نرخ رهائش حرارت نسبت به زمان با

ناحیه رشد درجه دوم، بیشینه نرخ رهائش حرارت kW

۵۹/۶۴

۲-۲. مدل‌سازی عددی جریان 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 ویژه‌ای از معادلات ناویر استوکس^۱ برای جریان‌های سرعت پایین ناشی از آتش‌سوزی را به صورت عددی حل می‌کنند (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰). هسته اصلی الگوریتم حل یک طرح صریح^۲

¹ - Navier-Stokes

² - Explicit

برای محاسبه مقیاس حرکت زیر شبکه لزجت، ضریب هدایتی و ضریب نفوذ مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. لزجت گردابه‌ای در FDS برابر است با (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 |S| \quad (6)$$

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

$$|S| = \left(2\bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u})^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

پارامترهای ضریب هدایت حرارتی^۶ و پخش ماده^۷ توسط رابطه زیر به لزجت مرتبط می‌شوند:

$$\left(\rho D \right)_{1,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t}, k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr_t} \quad (8)$$

Pr_t عدد پراتل^۸ و Sc_t عدد اشمیت^۹ توربولانسی نام دارند و مقادیر ثابتی هستند. C_s ثابت اسمانگورینسکی، یک پارامتر مهم و وابسته به جریان است. در کد FDS ثابت اسمانگورینسکی، عدد پراتل و عدد اشمیت به ترتیب ۰/۲، ۰/۲ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

برای تصدیق همگرایی نتایج در کد FDS از معیار کورانت-فردریک-لوی^{۱۰} (CFL) استفاده شده است. تخمین سرعت‌ها در هر مرحله زمانی^{۱۱} کنترل می‌شود تا از ارضای معیار CFL اطمینان حاصل شود (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰). این معیار به صورت زیر است:

$$\delta t \cdot \max \left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) < 1 \quad (9)$$

مرحله زمانی اولیه به صورت خودکار توسط FDS بر اساس اندازه شبکه تقسیم بر سرعت مشخصه جریان

ترتیب ضرایب محلی جذب و انعکاس بوده و $B(x, s)$ عبارت چشمه نشر انرژی تابشی است. عبارت انتگرال در سمت راست معادله (۵) بیانگر انرژی تابشی انعکاس یافته در جهات دیگر است. نرم‌افزار، معادله انتقال تشعشع را به طور پیش‌فرض 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 (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰).

روش‌های معمول که برای پیش‌بینی آشفگی در این کد محاسباتی استفاده می‌شود روش شبیه‌سازی مستقیم عددی^۱ (DNS) روش گردابه‌های بزرگ^۲ (LES) است. روش DNS هرچند 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 بر گیرد، نیازمند منابع محاسباتی گسترده‌ای است. بدین ترتیب، از مدل LES برای شبیه‌سازی آشفگی جریان‌های شناوری ناشی از آتش‌سوزی به طور گسترده استفاده می‌شود (ب‌ه و یوئن، ۲۰۰۹). 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^۳ مناسب در گردابه‌های کوچک استفاده شود. مدل زیر شبکه به کار رفته در LES توسط اسمانگورینسکی^۴ توسعه داده شده است. در روش LES لزجت گردابه‌ای^۵ با فرض تعادل مقیاس‌های کوچک به وسیله تعادل بین تولید و اتلاف انرژی به دست می‌آید. در کد FDS مدل اصلاح‌شده‌ی زیر شبکه دینامیک

⁶- Thermal conductivity

⁷- Material diffusivity

⁸- Prandtl number

⁹- Schmidt number

¹⁰- Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) criterion

¹¹- Time Step

¹- Direct Numerical Simulation (DNS)

²- Large Eddy Simulation (LES)

³- Sub-grid

⁴- Smagorinsky

⁵- Eddy viscosity

زیر سقف تونل در یک شرایط خاص به دست آمده و با نتایج تجربی حاصل از مرجع فوق مقایسه می‌شود. تونل مدل شده دارای طول 20 m ، عرض 2 m و ارتفاع 1 m است. جنس دیواره‌های تونل به غیر از یک طرف آن از تخته چندلایه و در یک طرف آن از شیشه‌ی ضد آتش ساخته شده است. شافت تهویه در فاصله $11/5$ متر از دهانه تونل قرار دارد و سطح مقطع خروجی آن $0/6 \times 0/6$ متر و ارتفاع آن 2 متر است. فاصله منبع آتش از ورودی تونل $2/5$ متر و سوخت مورد استفاده نفت سفید^۶ با فرمول شیمیایی به فرم $C_{12}H_{23}$ است. در مدل آزمایشگاهی بیان شده که در تمام تست‌ها شار جرمی سوخت تقریباً بعد از 1 تا 2 دقیقه به حالت پایای خود می‌رسد و کل مدت آزمایش 12 دقیقه است. مقدار شار جرمی سوخت در حالت پایا $1/51\text{ g.s}^{-1}$ که معادل با نرخ رهایش حرارت $59/64\text{ kW}$ است. مش‌بندی در ناحیه‌ای که آتش‌سوزی و تولید نرخ رهایش حرارت در آن صورت می‌گیرد به دلیل حل معادله توربولانسی با روش گردابه‌های بزرگ به اندازه کافی ریز زده شد تا نتایج قابل قبول باشد و از این رو اندازه مش δx به گونه‌ای تعیین گردید تا در روابط (۱۰) و (۱۱) صدق کند (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰). در مدل‌سازی یک مش با اندازه $0/05 \times 0/05 \times 0/05$ متر در سراسر تونل به کار گرفته شده و تعداد کل مش 327680 تولید گردید. در سیستم تهویه با یک شافت تخلیه، منبع آتش و شافت تخلیه در $2/5$ و $11/5$ متری از ورودی تونل قرار گرفته است. شکل ۴ هندسه تونل مدل شده در نرم‌افزار و شکل ۵ مش‌بندی صورت گرفته در تونل و نزدیک شافت را نشان می‌دهند.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (10)$$

⁶ - Kerosene

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 ارتفاع H ارتفاع کوچک‌ترین سلول شبکه، $\delta x, \delta y, \delta z$ ابعاد 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^۱ نام دارد، با استفاده از کمیت اسکالر، سوخت و محصولات حاصل از احتراق تعریف می‌شوند. در مدل دوم، گونه‌های گازی شکل بر اساس مدل آرنیوس با یکدیگر واکنش می‌دهند. این مدل در زمانی که مدل آشفتنگی (DNS) استفاده شود دارای درستی قابل قبول است. از این رو، در این شبیه‌سازی از مدل احتراقی کسر مخلوط و براساس نرخ رهایش حرارت بر واحد سطح^۲ استفاده شده است (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰). در شبیه‌سازی هندسه تونل مورد نظر، برای ورودی تونل از شرط سرعت ورودی^۳ و برای خروجی تونل از شرط فشار خروجی^۴ استفاده شده است. در شرط سرعت ورودی، جریان یکنواختی از هوا با سرعتی که توسط کاربر تعریف می‌گردد وارد تونل می‌شود. برای خروجی تخلیه نیز از شرط دبی جریان حجمی^۵ استفاده شده است. در این شرط نیز یک جریان یکنواخت هوا با دبی که تعیین می‌شود از طریق شافت خارج می‌شود. همچنین، دیواره‌ها نیز عایق فرض شده‌اند و روی دیواره‌های تونل شرط عدم لغزش برقرار است (مک‌گراتان و همکاران، ۲۰۱۰).

برای تصدیق حل و مدل‌سازی صورت گرفته در کد FDS از هندسه تونل موجود در کار (اینگاسون و سکو، ۲۰۰۵) استفاده می‌شود. برای این منظور، دما در

¹ - Mixture fraction

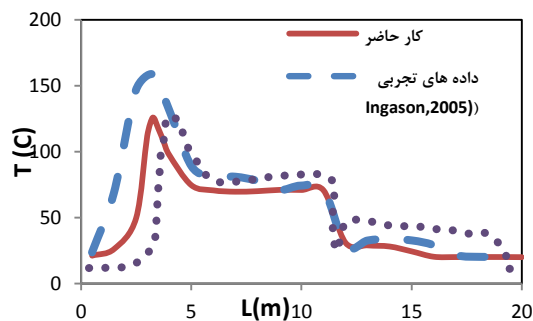
² - Heat Release Rate Per Unit Area (HRRPUA)

³ - Velocity inlet

⁴ - Pressure outlet

⁵ - Volumetric flow rate

دما در تونل به صورت همگن نیست و وابستگی شدیدی به فاصله از منبع آتش دارد. دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در پیش‌بینی سرعت بحرانی تهویه در شبیه‌سازی عددی کار حاضر و نتایج آزمایشگاهی باشد. این بدین معناست که در کار آزمایشگاهی در سرعت 1 m/s برگشت جریان به سمت بالادست روی می‌دهد و منجر به افزایش دما در این ناحیه می‌شود. این موضوع نشان دهنده آن است که به دلیل وجود عوامل تأثیرگذار بسیار روی نتایج حاصل از آزمایش، امکان به‌دست آوردن نتایج یکسان و دقیق از طریق کار عددی میسر نیست و همیشه اندکی اختلاف بین نتایج وجود دارد. اما آنچه که مهم است، داشتن یک تشابه کیفی بین نتایج است.



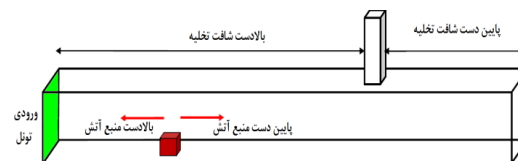
شکل ۶. نمودار تغییرات دما در زیر سقف تونل در سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تخلیه

نتایج

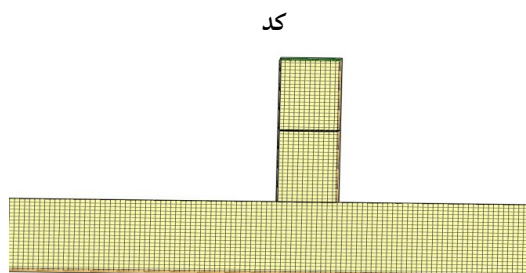
بعد از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش، به بررسی و مطالعه سیستم تهویه طولی که شامل یک شافت تخلیه است پرداخته می‌شود. در این بخش، با تغییر دادن پارامترهایی نظیر دبی جریان خروجی از شافت تخلیه، سرعت طولی ورودی، شیب تونل، ابعاد سطح خروجی شافت تخلیه، محل منبع آتش در تونل و نرخ رهایش حرارت، اثر آن بر حرکت جریان دود و توزیع دما در زیر سقف تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد و بدین ترتیب به ارزیابی

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (11)$$

که در آنها D^* قطر مشخصه آتش، Q نرخ رهایش حرارت و δx اندازه شبکه است.



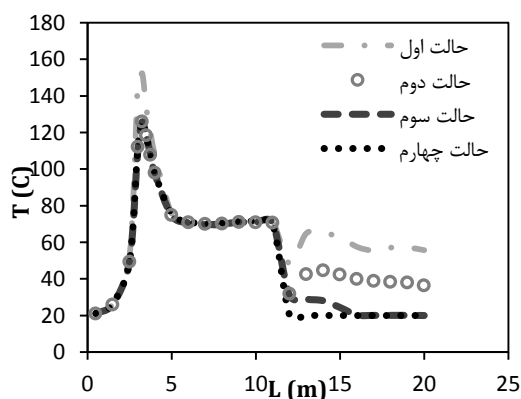
شکل ۴. هندسه تونل مدل شده با یک شافت تخلیه در



شکل ۵. مش‌بندی صورت گرفته در تونل و نزدیک شافت

شکل ۶ نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقایسه آن با کار تجربی و کار عددی مرجع (اینگاسون و سکو، ۲۰۰۵) در حالتی که نرخ رهایش حرارت از منبع آتش برابر با $59/64 \text{ kW}$ ، سرعت ورودی 1 m/s و دبی جریان عبوری از شافت تهویه $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ است نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، منحنی‌های توزیع دما در زیر سقف تونل از نظر شکل مشابه همدیگر هستند و تنها اختلاف در نتایج و در ناحیه نزدیک به آتش دیده می‌شود. اختلاف دمای ماکزیمم در کار آزمایشگاهی و حل عددی کار حاضر حدود 34°C (کمتر از ۲۰٪ اختلاف بین کار حاضر و نتایج اینگاسون و سکو (۲۰۰۵)، 30°C گزارش شده است. بعد از شافت تخلیه، خروجی دما در زیر سقف تونل شدیداً افت پیدا می‌کند که نشان‌دهنده تأثیر وجود شافت و خروج دود از طریق آن است. همچنین، توزیع

مستقیم از طریق شافت خارج شده و یا در پیرامون شافت جریان می‌یابد تا اینکه به خروجی تونل برسد. با افزایش نرخ دبی جریان خروجی می‌توان از برگشت جریان دود به سمت خروجی تونل جلوگیری کرد و برای یک نرخ جریان خروجی دیگر شاهد جریان دود در پایین‌دست شافت نخواهیم بود. همچنین، مشخص است که با افزایش دبی جریان خروجی از شافت، ضخامت لایه دود در شافت کوچک‌تر شده و در نهایت سبب خروج هوای تازه از طریق شافت می‌شود. بنابراین، در تعیین قدرت فن بهتر است دبی جریان حجمی فن بر اساس دبی جریان خروجی از شافت تخلیه که مانع از حرکت جریان دود به سمت خروجی تونل شده و جریان دود را در ناحیه‌ای در پایین‌دست شافت تهویه محدود می‌کند طراحی شود.

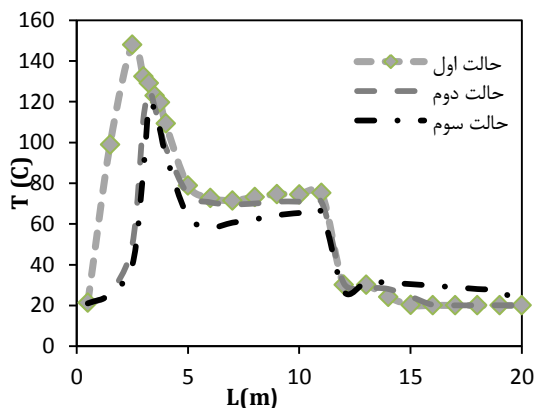


شکل ۷. نمودار تغییرات دما در زیر سقف تونل در دبی‌های خروجی متفاوت از شافت تخلیه: حالت اول) فن خاموش، حالت دوم) $1/25 \text{ m}^3/\text{s}$ ، حالت سوم) $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ و حالت چهارم) $3 \text{ m}^3/\text{s}$

شکل ۹ تغییرات دما در زیر سقف تونل در دبی جریان خروجی از شافت تخلیه $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ که در تمامی حالت‌ها ثابت است و سرعت طولی ورودی متفاوت را نشان می‌دهد. در سرعت تهویه طولی 1 m/s ، دما در سمت بالادست منبع آتش افزایش می‌یابد که بیانگر برگشت جریان دود به سمت بالادست منبع آتش است. در سرعت تهویه طولی $1/1 \text{ m/s}$ ، حرکت

عملکرد شافت تخلیه در هنگام آتش‌سوزی پرداخته می‌شود. برای این منظور، از همان تونل مدل شده با ابعاد $20 \times 1 \times 2$ متر که برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی به کار رفت استفاده شد.

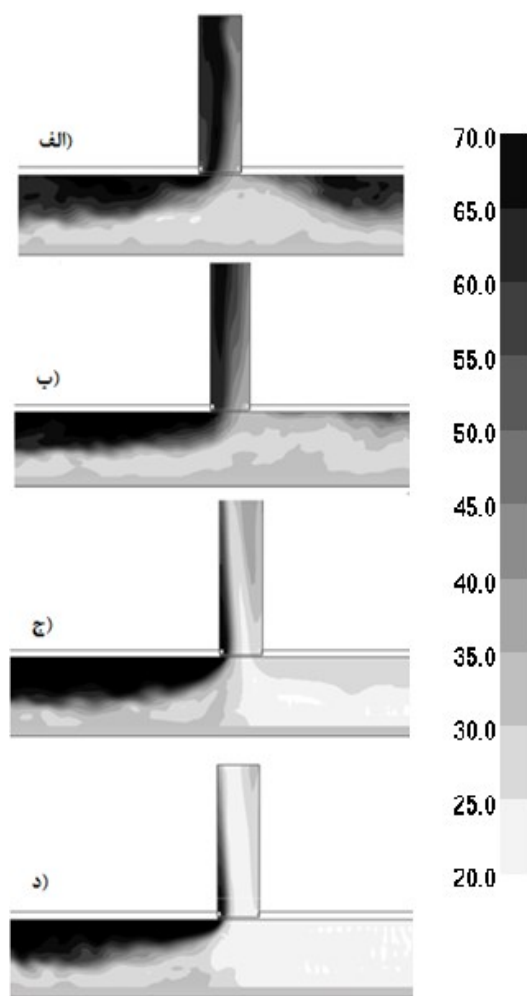
شکل ۷ تأثیر تغییرات دبی جریان خروجی از شافت تخلیه بر توزیع دما در زیر سقف تونل در حالی که سرعت تهویه طولی ورودی 1 m/s و در تمامی حالت‌ها ثابت است نشان می‌دهد که هنگامی که فن خاموش است (عملکرد طبیعی شافت)، به دلیل نیروی شناوری ناشی از اختلاف ارتفاع، یک جریان خروجی با سرعت متوسط $1/81 \text{ m/s}$ در شافت ایجاد شده و بدین ترتیب جریان دود از طریق شافت خارج می‌شود و یک افت دما در محل شافت تخلیه دیده می‌شود. ولی دما با فاصله گرفتن از شافت افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده برگشت جریان دود به سمت پایین‌دست شافت و حرکت جریان دود به سمت خروجی تونل است (شکل ۸-الف). با روشن شدن فن و اعمال دبی جریان خروجی $1/25 \text{ m}^3/\text{s}$ ، جریان طولی در دو طرف شافت و در خلاف جهت هم ایجاد می‌شود. سرعت جریان طولی ایجادشده در پایین‌دست شافت که در خلاف جهت جریان تهویه طولی ورودی است نمی‌تواند از برگشت جریان دود جلوگیری کند و از این رو یک افزایش دما در پایین‌دست شافت دیده می‌شود که متناظر با وجود جریان دود در این ناحیه است (شکل ۸-ب). با افزایش دبی جریان خروجی از شافت تخلیه به $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ ، یک جریان با سرعت طولی $0/32 \text{ m/s}$ در پایین‌دست شافت، از حرکت جریان دود به سمت خروجی تونل جلوگیری کرده و جریان دود را در ناحیه‌ای به طول $3/2$ متر محبوس می‌کند (شکل ۸-ج). با افزایش بیشتر و رسیدن دبی جریان حجمی به $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ، طول برگشت جریان دود در بالادست شافت تخلیه برابر با صفر خواهد شد (شکل ۸-د). بنابراین، می‌توان گفت که جریان دود ناشی از آتش‌سوزی یا به طور



شکل ۹. نمودار تأثیر سرعت تهویه طولی بر توزیع دما در زیر سقف تونل در سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تخلیه: حالت اول) 0.9 m/s ، حالت دوم) 1 m/s و حالت سوم) $1/1 \text{ m/s}$

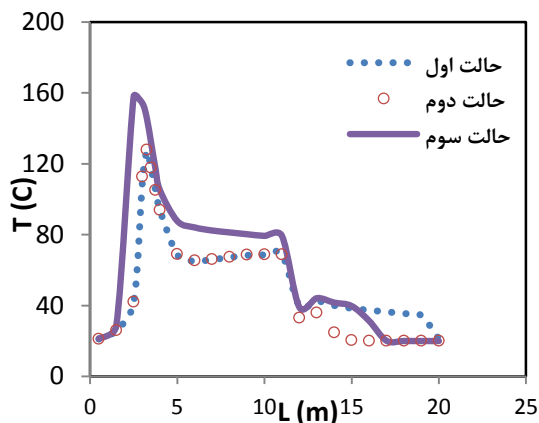
شکل ۱۰ اثر تغییر شیب تونل بر توزیع دما در زیر سقف تونل، در سیستم تهویه طولی، همراه با یک شافت تخلیه، در شرایطی که سرعت ورودی 1 m/s و دبی جریان خروجی $1/25 \text{ m}^3/\text{s}$ که در تمامی حالت‌ها یکسان است را نمایش می‌دهد. در شیب منفی 4% ، جریان دود به بالادست منبع آتش حرکت می‌کند. از این رو باید سرعت تهویه طولی افزایش یابد تا از این برگشت جریان دود جلوگیری شود. در شیب مثبت 4% نیز به دلیل نیروی شناوری یا همان اثر دودکشی برگشت جریان دود در پایین‌دست شافت دیده می‌شود. با افزایش بیشتر شیب مثبت تونل، دما در فاصله بین منبع آتش و شافت تخلیه کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش سرعت طولی در بالادست شافت است. این افزایش سرعت طولی سبب افزایش خروج دود و گازهای داغ از طریق شافت می‌شود. ولی از سوی دیگر، سبب حرکت جریان دود به سمت پایین‌دست شافت و خروجی تونل شده و از این رو دما در ناحیه پایین‌دست شافت تخلیه افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

جریان دود به سمت شافت تخلیه افزایش می‌یابد که موجب کاهش دما در فاصله بین منبع آتش و شافت می‌شود. اما ظرفیت خروج دود از طریق شافت تخلیه ثابت است که سبب برگشت جریان دود در سمت پایین‌دست شافت می‌شود. بنابراین، در طراحی سیستم تهویه طولی با یک شافت تهویه، کافی است مقدار سرعت تهویه طولی برابر با سرعت بحرانی تهویه و به عبارتی حداقل سرعت مورد نیاز برای جلوگیری از برگشت جریان دود باشد.



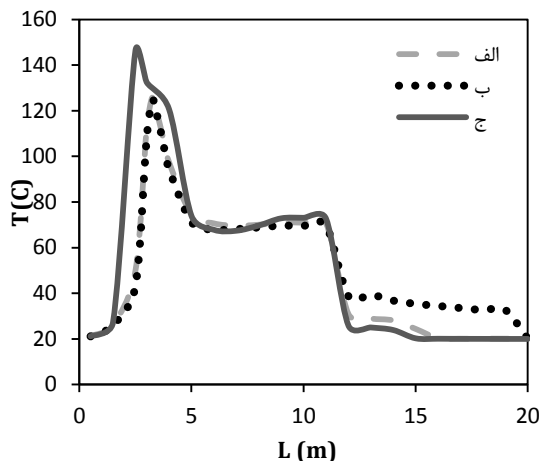
شکل ۸. کانتور توزیع دما در دبی‌های جریان متفاوت عبوری از شافت تهویه در سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تخلیه: الف) فن خاموش، ب) $1/25 \text{ m}^3/\text{s}$ ، ج) $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ و د) $3 \text{ m}^3/\text{s}$

پایین دست شافت محبوس بماند. همچنین، تغییر سرعت طولی ورودی از 1 m/s به 0.8 m/s و در حالی که دبی جریان خروجی از شافت ثابت است منجر می شود تا حرکت جریان دود در فاصله $5/2$ متر از شافت و در سمت پایین دست آن متوقف شود.

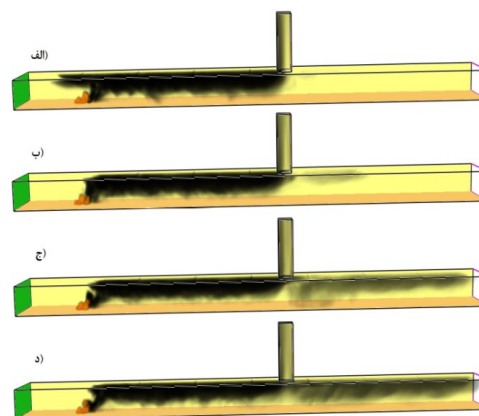


شکل ۱۲. نمودار توزیع دما در زیر سقف تونل در شیب مثبت $8/8$ سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تخلیه: حالت اول) سرعت طولی 1 m/s و دبی جریان خروجی $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ ، حالت دوم) سرعت طولی 1 m/s و دبی جریان خروجی $3 \text{ m}^3/\text{s}$ (حالت سوم) سرعت طولی 0.8 m/s و دبی جریان خروجی $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$

شکل ۱۳ نمودار تغییرات ماکزیمم دما در زیر سقف تونل نسبت به فاصله منبع آتش از ورودی تونل را نشان می دهد. همان طور که مشخص است، دمای ماکزیمم در تونل شدیداً به محل وقوع آتش بستگی دارد. با نزدیک شدن منبع آتش به شافت، ماکزیمم دما در زیر سقف تونل کاهش می یابد که بیانگر خروج دود و گازهای داغ از تونل توسط شافت است. با قرار گرفتن منبع آتش بعد از شافت تهویه، ماکزیمم دما در تونل افزایش چشمگیری می یابد که بیانگر آن است که جریان دود به سمت پایین دست منبع آتش و یا خروجی تونل حرکت می کند و به عبارتی جریان دود از طریق شافت تهویه خارج نمی شود. با فرض اینکه در خروجی تونل ایستگاه وجود داشته باشد، جریان

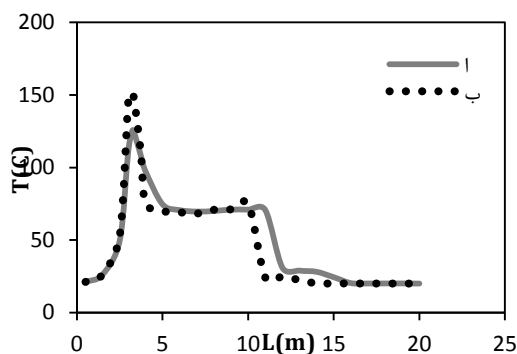


شکل ۱۰. نمودار تأثیر شیب بر دما در زیر سقف تونل در سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تخلیه: الف) تونل بدون شیب، ب) تونل با شیب مثبت $4/4$ و ج) تونل با شیب منفی $4/4$

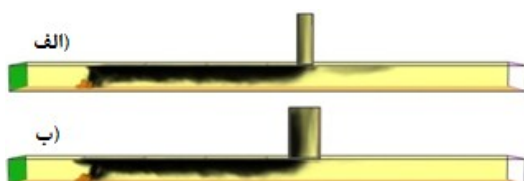


شکل ۱۱. حرکت جریان دود در تونل در شیب های متفاوت: الف) تونل شیب منفی $4/4$ ، ب) تونل بدون شیب، ج) تونل شیب مثبت $4/4$ و د) تونل شیب مثبت $8/8$

در شکل ۱۲، مشاهده می شود که برای جلوگیری از برگشت جریان دود در پایین دست شافت در زمانی که شیب تونل مثبت است دو سناریو می توان در نظر گرفت. سناریوی اول افزایش دبی جریان خروجی از شافت تهویه است و سناریوی دوم کاهش سرعت طولی ورودی است. به عنوان نمونه، برای تونل با شیب مثبت $8/8$ ، افزایش دبی جریان خروجی از $2/5$ به $3 \text{ m}^3/\text{s}$ و در حالی که سرعت ورودی تغییر نمی کند سبب می شود جریان دود در فاصله $2/2$ متر در



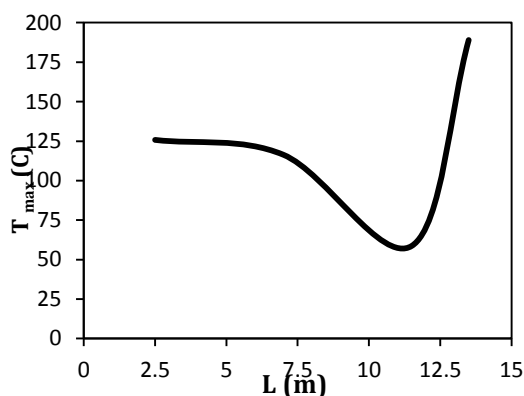
شکل ۱۴. نمودار تأثیر ابعاد مختلف شافت تهویه بر توزیع دما در زیر سقف تونل در سیستم تهویه طولی همراه با یک شافت تهویه: الف) سطح مقطع شافت تهویه ۰/۶×۰/۶ متر و ب) ۱/۲×۱/۲ متر



شکل ۱۵. توزیع جریان دود در تونل: الف) سطح مقطع شافت تهویه ۰/۶×۰/۶ متر و ب) ۱/۲×۱/۲ متر

شکل ۱۶ توزیع دما در زیر سقف تونل برای دو نرخ رهائش حرارت متفاوت و در حالتی که دبی جریان خروجی و سرعت ورودی در دو حالت به ترتیب برابر با $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ و 1 m/s است را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش نرخ رهائش حرارت، دما در زیر سقف تونل افزایش می‌یابد و دمای ماکزیمم در زیر سقف تونل از 125°C به 161°C می‌رسد. همچنین، با افزایش نرخ رهائش حرارت، مقدار دود تولید شده افزایش می‌یابد و با ثابت بودن سرعت ورودی و دبی جریان خروجی از شافت، جریان دود به سمت بالادست منبع آتش حرکت می‌کند که برای جلوگیری از این برگشت جریان دود لازم است سرعت طولی افزایش یابد. این افزایش نرخ رهائش حرارت سبب افزایش طول جریان برگشت دود در پایین‌دست شافت شده و مقدار آن از $3/5$ متر برای

دود وارد ایستگاه می‌شود و این مطلوب نخواهد بود. بنابراین، می‌توان گفت که اگر آتش‌سوزی در نزدیکی شافت قرار بگیرد، بهترین سناریو و اگر بعد از شافت تخلیه قرار بگیرد، بدترین سناریو خواهد بود.

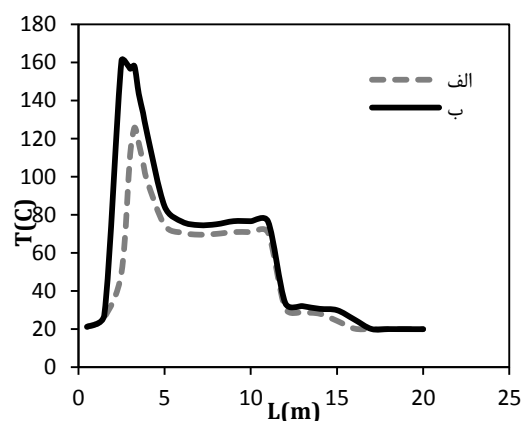


شکل ۱۳. نمودار ماکزیمم دما در زیر سقف تونل در فواصل مختلف محل وقوع آتش از ورودی تونل

شکل ۱۴ تأثیر ابعاد مختلف شافت تخلیه بر توزیع دما در زیر سقف تونل در حالتی که دبی جریان خروجی و سرعت ورودی در دو حالت به ترتیب برابر با $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ و 1 m/s است را نشان می‌دهد. با افزایش سطح مقطع شافت تخلیه، دمای ماکزیمم در تونل افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده برگشت جریان دود به سمت بالادست شافت تخلیه است. در این پدیده، می‌توان گفت که با افزایش سطح خروجی و در حالی که دبی جریان ایجاد شده توسط فن ثابت است، سرعت خروجی از شافت کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت خروجی از شافت تخلیه سبب کاهش سرعت طولی ایجاد شده در بالادست شافت می‌شود و لذا یک انباشتگی دود در بالادست شافت تهویه به وجود می‌آید که مانع از خروج دود از طریق شافت می‌شود (شکل ۱۵).

بحرانی تهویه برابر باشد و دبی جریان حجمی خروجی از شافت تخلیه نیز طوری تعیین شود تا با ایجاد یک سرعت طولی، مانع از حرکت جریان دود به سمت خروجی تونل شده و ناحیه برگشت جریان دود در پایین دست شافت در یک طول مشخص محدود شود. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که در آتش سوزی های بسیار بزرگ، جریان دود و گازهای داغ ناشی از آن به خوبی با استفاده از این نوع سیستم تهویه و با تغییر دو پارامتر فوق به خوبی کنترل می شود و خطر گسترش آتش کاهش می یابد. همچنین، مزیت اصلی این نوع سیستم تهویه آن است که در بالادست محل وقوع آتش و پایین دست آن ناحیه ای عاری از جریان دود وجود دارد و جریان هوای تازه از دو سمت شافت تأمین می شود. تغییر شیب تونل، شیب منفی و مثبت و به موجب آن تغییر در حرکت جریان دود در تونل به خوبی با استفاده از سیستم تهویه طولی، همراه با یک شافت تهویه، قابل کنترل است. همچنین، نتایج نشان می دهد که افزایش سطح مقطع خروجی شافت تهویه تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم ندارد. این در حالی است که موقعیت منبع آتش در تونل روی عملکرد سیستم تهویه تأثیرگذار بوده و با توجه به این پارامتر باید سناریوهای مختلف تعریف و عملکرد تهویه بررسی شود.

نرخ رهایش حرارت $59/64 \text{ kW}$ به $5/5$ متر برای نرخ رهایش حرارت $64/39$ می رسد.



شکل ۱۶. تغییرات توزیع دما در زیر سقف تونل در نرخ رهایش حرارت متفاوت: الف) $59/64 \text{ kW}$ و ب) $64/39 \text{ kW}$

نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی و مطالعه سیستم تهویه طولی که از یک شافت تخلیه برای خروج جریان دود بهره می برد، به عنوان یک روش مفید و سودمند برای کنترل آتش و جریان دود ناشی از آن، به ویژه در تونل های ریلی و مترو، پرداخته شد. نتایج نشان می دهد که انتخاب مناسب نرخ جریان خروجی از شافت تهویه و سرعت جریان تهویه طولی ورودی سبب می گردد تا جریان دود در ناحیه ای بین شافت و منبع آتش محدود بماند. برای این منظور، در این سیستم کافی است سرعت جریان تهویه در بالادست منبع آتش با سرعت

مراجع

- Carvel, R. and Beard, A. N. 2005. "The Handbook of Tunnel Fire Safety". Thomas Telford.
- Heidarinejad, G., Pasharshahri, H. and Mazaheri, K. 2013. "Evaluation of induced-flow in a two-room compartment fire using large eddy simulation". *J. Modares Mech. Eng.*, 13(4): 74-85.
- Hu, L. H., Huo, R., Peng, W., Chow, W. K. and Yang, R. X. 2006a. "On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 21(6): 650-655.
- Hu, L. H., Li, Y. Z., Huo, R., Yi, L. and Chow, W. K. 2006b. "Full-scale experimental studies on mechanical smoke exhaust efficiency in an underground corridor". *Build. Environ.*, 41(12): 1622-1630.
- Huang, Y. D., Gong, X. L., Peng, Y. J., Lin, X. Y. and Kim, C. N. 2011. "Effects of the ventilation duct arrangement and duct geometry on ventilation performance in a subway tunnel". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 26(6): 725-733.
- Ingason, H. and Seco, F. 2005. "Numerical simulation of a model scale tunnel fire test". Swedish National Testing and Research Institute.
- Ingason, H. and Li, Y. Z. 2011. "Model scale tunnel fire tests with point extraction ventilation". *J. Fire Prot. Eng.*, 1042391510394242.
- Jie, J., Kaiyuan, L., Wei, Z. and Ran, H. 2010. "Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency". *J. Hazard. Mater.*, 177(1): 209-215.
- Kim, J. Y. and Kim, K. Y. 2009. "Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 97(5): 174-179.
- Ko, J. S., Yoon, C. H., Yoon, S. W. and Kim, J. 2010. "Determination of the applicable exhaust airflow rate through a ventilation shaft in the case of road tunnel fires". *Safety Sci.*, 48(6): 722-728.
- Li, Y. Z., Lei, B. and Ingason, H. 2010. "Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires". *Fire Safety J.*, 45(6): 361-370.
- Li, Y. Z. and Ingason, H. 2012. "The maximum ceiling gas temperature in a large tunnel fire". *Fire Safety J.*, 48: 38-48.
- McGrattan, K. B., Hostikka, S. and Floyd, J. E. 2010. "Fire dynamics simulator, user's guide". NIST Special Publication, 1019.
- McDermott, R., McGrattan, K. and Hostikka, S. 2008. "Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide". NIST Special Publication, 1018, 5.
- Roh, J. S., Ryou, H. S., Kim, D. H., Jung, W. S. and Jang, Y. J. 2007. "Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 22(3): 262-271.
- Vauquelin, O. and Telle, D. 2005. "Definition and experimental evaluation of the smoke "confinement velocity" in tunnel fires". *Fire Safety J.*, 40(4): 320-330.
- Wu, Y. and Bakar, M. A. 2000. "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—A study of the critical velocity". *Fire Safety J.*, 35(4): 363-390.
- Yeoh, G. H. and Yuen, K. K. 2009. "Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering: Theory, Modelling and Practice". Butterworth-Heinemann.
- Yi, L., Niu, J. L., Xu, Z. S. and Wu, D. X. 2013. "Experimental studies on smoke movement in a model tunnel with longitudinal ventilation". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 35: 135-141.
- Zhong, W., Fan, C. G., Ji, J. and Yang, J. P. 2013. "Influence of longitudinal wind on natural ventilation with vertical shaft in a road tunnel fire". *Int. J. Heat Mass Transfer*, 57(2): 671-678.