

ارزیابی تاثیر آهنگ رهایش گرما بر تخمین سرعت بحرانی در حریق تونل‌های منحنی

یحیی شمس^۱، فرهنگ سرشکی^۲، رضا کاکائی^۲

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت ۱۳/۰۴/۱۳۹۹، پذیرش ۱۲/۱۲/۱۳۹۹)

چکیده

مساله سرعت بحرانی و تخمین صحیح آن از مسایل پیچیده در طراحی ایمنی تونل‌ها در شرایط اضطراری است. سرعت بحرانی باید به طور دقیق تعیین شود تا بر اساس سناریوی به وقوع پیوسته بتوان شرایط ایمن را در محیط بسته‌ای همچون تونل‌ها ایجاد کرد. کم یا زیاد بودن سرعت بحرانی سبب بروز مشکلاتی در رابطه با افراد حاضر در تونل خواهد شد. شبیه‌سازی کامپیوتری در تمامی مطالعات و آزمایش‌های مرتبط با حریق اهمیت ویژه‌ای دارد. از آنجا که مقدار HRR (آهنگ رهایش گرما) در تخمین سرعت بحرانی بسیار مهم است، هدف این مقاله ارزیابی میزان تاثیر آهنگ رهایش گرما بر مقدار سرعت بحرانی در تونل‌های منحنی است. به این منظور ابتدا یک تونل منحنی برای اعتبارسنجی نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار FDS در محیط آزمایشگاهی ساخته شد و سرعت بحرانی به دست آمده برای مدل فیزیکی ۰/۹۰ متر بر ثانیه و برای مدل عددی ۰/۹۲ متر بر ثانیه بود. پس از اعتبارسنجی داده‌ها، نتیجه‌گیری شد که افزایش HRR سبب افزایش سرعت بحرانی می‌شود، بنابراین بر اساس میزان تغییرات حاصل می‌توان دریافت که این پارامتر در تخمین سرعت بحرانی بسیار حایز اهمیت است، اما این روند تنها بر محدوده مشخصی حاکم است به طوری که تا رسیدن به حریق ۱۵ کیلوواتی سبب افزایش ۵۰ درصدی سرعت بحرانی خواهد شد و چنانکه از ارزیابی نتایج برمی‌آید، در خارج از این محدوده سرعت بحرانی مستقل از مقدار HRR است و افزایش آن تاثیر بالقوه‌ای در رشد یا کاهش سرعت بحرانی ندارد. از سوی دیگر روند افزایش سرعت بحرانی نسبت به آهنگ رهایش گرما در تونل منحنی نسبت به تونل مستقیم، با اختلاف حدودا ۱۰ درصدی، در جایگاه بالاتری قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی

تونل منحنی، مدل‌سازی فیزیکی، آهنگ رهایش گرما، شبیه‌سازی FDS.

۱- مقدمه

مورد نیاز جریان فن برای صفر شدن طول عقب‌زدگی با حفظ لایه‌بندی دود، برابر با سرعت بحرانی است.

مساله سرعت بحرانی و تخمین صحیح آن از مسایل پیچیده در طراحی ایمنی تونل‌ها در شرایط اضطراری است. به دلیل اهمیت این مساله که سرعت بحرانی نباید از مقدار مشخص خود بیشتر یا کمتر باشد، تخمین صحیح آن بر پیچیدگی موضوع می‌افزاید.

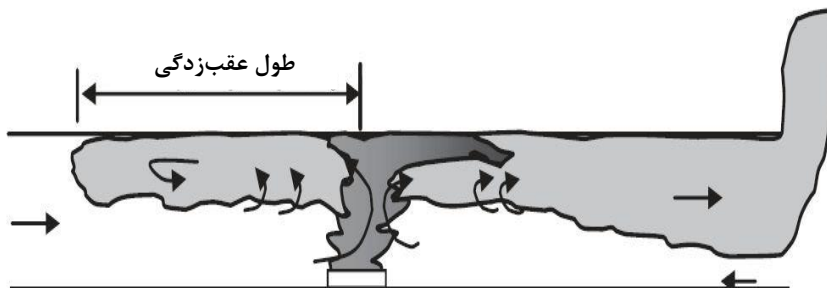
هیچ‌یک از نرم‌افزارهای تحلیل جریان سیال شامل Star CCMT، PHOENICS، CFX، Ansys Fluent برای مدلسازی آتش مناسب نیستند. نرم‌افزارهای ویژه FIRE همچون SMART FIRE، SOFIE، JASMINE، FIRE (FOAM، FIRE DYNAMIC SIMULATOR) برای مدلسازی آتش توسعه داده شده‌اند [۳] که در بین این نرم‌افزارهای تجاری، FDS از سوی انجمن جهانی آتش به عنوان نرم‌افزار استاندارد در نظر گرفته شده است [۲].

آهنگ رهایش گرما یکی از پارامترهای کلیدی در تمامی مطالعات عددی و آزمایش‌های فیزیکی آتش به شمار می‌رود که از آن در بسیاری از مدل‌های تخمین سرعت بحرانی استفاده می‌شود. در اکثر مدل‌های ارائه شده برای حریق‌های تونلی و حتی سایر مطالعات مرتبط، از این پارامتر به عنوان عنصر کلیدی یاد می‌شود [۴]. در بیشتر طراحی‌های پیشرفته مهندسی سیستم‌های محافظت در مقابل آتش، آهنگ رهایش گرما برای وسایل نقلیه موجود در تونل، از مهم‌ترین ورودی‌ها به حساب می‌آید که میزان آن به عوامل متعددی بستگی دارد [۵]. تجارب به دست آمده از آتش‌سوزی تونل‌های بزرگ نشان می‌دهد که میزان HRR مهم‌ترین پارامتر برای توصیف گسترش و اثرات آتش در تونل است [۶].

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه تخمین سرعت بحرانی در تونل‌ها انجام شده است. پژوهشگران مختلف

در دنیای امروز، تونلسازی به شدت در حال افزایش است. حریق ناشی از اتفاقات و حوادث منتج از این فرآیند، از مخاطرات مهم در حوزه ایمنی تونل‌ها به شمار می‌رود. همین موضوع اهمیت تونل و مسایل وابسته به آن را بیش از پیش نشان می‌دهد؛ زیرا حریق و دودهای حاصل از آن به شدت جان افراد حاضر در تونل را به خطر می‌اندازد. از آنجا که محیط تونل‌ها بسته است، عواقب و خسارات ناشی از حوادث در آن‌ها بیشتر است، زیرا امکان انتقال آتش‌سوزی به سایر وسایل و مواد موجود در آن نیز وجود دارد و خطر گسترش آتش‌سوزی در این محیط بسیار زیاد است [۱]. به عنوان مثال در حادثه رخ داده در تونل مونت بلانک در سال ۲۰۰۰ حدود ۱۵۵ نفر کشته شدند. در بیشتر حوادث آتش‌سوزی در تونل‌ها اکثر افراد کشته شده به دلیل استنشاق گازهای حاصل از احتراق جان خود را از دست می‌دهند، بنابراین طراحی سیستم تهویه تونل‌ها اهمیت خاصی دارد.

یکی از پارامترهای مهم در طراحی تونل‌ها، تعیین نوع سیستم تهویه برای حذف دود در بالادست آتش و خروج آن از محیط تونل بدون برهم زدن لایه‌بندی دود است. طراحان معمولاً از سیستم تهویه طولی، عرضی و یا ترکیبی برای رسیدن به این هدف استفاده می‌کنند. این فرآیند بر مبنای هزینه‌های عملیاتی مجاز، بهره‌گیری از تهویه قابل نصب در طول تونل و سطح ایمنی مورد نظر انجام می‌شود و غالباً از سیستم تهویه طولی استفاده می‌شود. زمانی که آتش‌سوزی در تونل رخ دهد، دود حاصل از احتراق در بالادست و پایین‌دست آتش پخش خواهد شد. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، به پخش‌شدگی دود در بالادست، عقب‌زدگی دود گفته می‌شود و حداقل سرعت جریان تهویه طولی که برای جلوگیری از این پخش‌شدگی مورد نیاز است، یا به عبارت دیگر حداقل سرعت



شکل ۱: طول عقب‌زدگی در آتش‌سوزی تونل [۲]

ارتفاع شناوری جریان دود برای جلوگیری از پدیده عقب‌زدگی باشد که این مقدار تحت عنوان عدد بحرانی فرود شناخته می‌شود و به صورت Fr_c نشان داده می‌شود. معادله تعیین آن به صورت معادله ۱ نمایش داده می‌شود [۷]:

$$Fr_c^2 = \frac{v^2}{gD} \quad (1)$$

که در آن:

v : مقدار سرعت جریان هوا (m/s)

g : شتاب گرانشی (m/s^2)

D : طول (m) است.

توماس پیشنهاد کرد در صورتی که عدد بحرانی فرود برابر با یک باشد، عقب‌زدگی جریان دود به وجود نخواهد آمد. دانزگر^۴ و کندی^۵ بر اساس آزمایش‌های لی^۶ و همکارانش عنوان کرده‌اند که محدوده عدد بحرانی فرود در حیطه ۴٫۵ تا ۶٫۷ تغییر می‌کند و بنابراین عدد بحرانی فرود در حدود ۴٫۵ توصیه می‌شود [۹،۸]. علاوه بر این باید از مقدار HRR همرفتی به جای مقدار کلی HRR استفاده کرد. این معادله به شکل رابطه ۲ نشان داده می‌شود:

$$u_c = \left(\frac{g\dot{Q}H}{\rho_0 c_p T_f A Fr_c} \right)^{1/3} \quad (2)$$

که در آن:

u_c : سرعت بحرانی (m/s)

\dot{Q} : آهنگ رهایش گرمای کلی (KW)

c_p : ظرفیت حرارتی ($Kj/Kg.k$)

T_f : میانگین دمای پایین دست آتش (k)

A : مساحت سطح مقطع تونل (m^2)

H : ارتفاع تونل (m)

ρ_0 : چگالی جریان (kg/m^3) است.

لازم به ذکر است که از آنجا که این مدل‌ها بر پایه عدد فرود حاصل شده‌اند عمدتاً از ریشه سوم برای تعیین سرعت بحرانی استفاده می‌کنند که برای آتش‌سوزی‌های بزرگ، پیش‌بینی مناسبی از سرعت بحرانی را به همراه نخواهد داشت.

افراد مختلفی در زمینه مدل‌های بی‌بعد اقدام به ارائه مدل بر اساس آزمایش‌های کوچک‌مقیاس یا مدلسازی‌های عددی کرده‌اند. اکا^۸ و آتکینسون^۹ از اولین افرادی‌اند که در این زمینه فعالیت کرده‌اند. این پژوهشگران، یک سری آزمایش در مقیاس مدل^{۱۰} برای تخمین رابطه بین سرعت بحرانی و HRR انجام داده‌اند [۱۰]. وو^{۱۱} و باکر^{۱۲} نیز یک سری آزمایش در مقیاس

پارامترهای بسیاری را در تخمین سرعت بحرانی مورد ارزیابی قرار داده‌اند که در ادامه به طور خلاصه ارائه می‌شود، اما در تمام این مطالعات، تونل‌ها با ساختار هندسی مستقیم در نظر گرفته شده‌اند؛ به عبارت دیگر در تمامی این مطالعات تونل‌ها بدون پیچ و خم و انحنای، توصیف و نتایج نیز بر همین مبنا گزارش شده‌اند، اما در بسیاری از تونل‌ها، انحنایی با شعاع‌های مختلف دیده می‌شود که سبب تغییر نتایج خواهند شد؛ بر مبنای علم مکانیک سیالات، انحنای تونل سبب تغییر در جریان هوا از نظر سیالاتی می‌شود یا به بیان دیگر شکل نامتقارن تونل و جریان هوا سبب می‌شود که آتش‌سوزی در تونل منحنی با تونل مستقیم متفاوت باشد، بنابراین باید میزان سرعت بحرانی در این تونل‌ها نیز بررسی شود. هدف این مقاله ارزیابی تاثیر آهنگ رهایش گرما بر تخمین سرعت بحرانی در تونل منحنی است. این ارزیابی با استفاده از یک تونل کوچک‌مقیاس ساخته شده از بتن و با به کارگیری روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی موجود در نرم‌افزارهای عددی تحلیل جریان انجام شده است، بنابراین در ادامه به طور مختصر در زمینه پژوهش‌های گذشته و مدلسازی فیزیکی مطالبی عنوان می‌شود و پس از آن به هدف این مطالعه پرداخته و نتایج حاصل از آن ارائه خواهد شد.

۲- مطالعات پیشین

آتش‌سوزی درون تونل‌ها را می‌توان به سه دسته آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای، آتش‌سوزی تونل‌های راه‌آهن و آتش‌سوزی تونل‌های مترو تقسیم‌بندی کرد. همانگونه که پیش از این بیان شد در تمامی مطالعات پیشین تمرکز پژوهش‌ها بر روی تونل‌های بدون انحنا و مستقیم قرار داشته است. در حالی که در شرایط واقعی بسیاری از تونل‌ها انحنای مختلف با شعاع‌های متفاوت دارند. انحنا در تونل سبب نامتقارن شدن جریان تهویه و دود حاصل از حریق می‌شود که در هیچ یک از مطالعات پیشین به آن پرداخته نشده است. در ادامه خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده بر روی تونل‌های مستقیم ارائه خواهد شد.

به طور کلی دو روش عمده برای تخمین سرعت بحرانی مورد استفاده قرار گرفته است، این دو مدل عبارتند از [۲]:

• مدل بحرانی فرود^۲

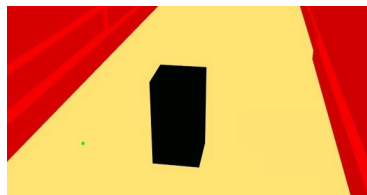
• مدل‌های بی‌بعد

اولین رابطه در این زمینه توسط توماس ارائه شده است؛ به طوری که باید ارتفاع سرعت^۳ هوای تازه قابل قیاس یا بزرگتر از

FDS با توجه به کاربرد گسترده‌ای که در این زمینه داشته‌است، به عنوان کد CFD انتخاب شده‌است [۱۴].

۳-۱- تنظیمات اولیه شبیه‌سازی

حریق در نظر گرفته شده برای انجام ارزیابی، حریق حوضچه‌ای است. مشخصات گرافیکی این حوضچه‌ها مشابه شکل ۲ است. ابعاد این حوضچه‌ها $۰,۰۸ \times ۰,۰۸$ ، $۰,۰۸ \times ۰,۱$ ، $۰,۱۸ \times ۰,۱۸$ ، $۰,۲۲ \times ۰,۲۲$ ، $۰,۲۴ \times ۰,۲۴$ و $۰,۲۸ \times ۰,۲۸$ متر با عمق $۰,۰۵$ تا $۰,۱۰$ متر است. میزان HRR در یک اتومبیل شخصی کمتر از ۲۰۰۰ کیلووات است، بنابراین ابعاد حوضچه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است تا بخوبی مقادیر کمتر تا بیشتر از این محدوده را پوشش دهد، زیرا HRR در ابعاد $۰,۰۸ \times ۰,۰۸$ حدود ۱۵۰۰ کیلووات است. در این پژوهش از معادلات جریان مغشوش LES استفاده شده است.



شکل ۲: تصویری از مدل حوضچه در نرم‌افزار FDS و مدل فیزیکی

۳-۲- مش‌بندی

انتخاب دقیق اندازه مش‌ها یکی از مراحل مهم در مطالعات عددی به حساب می‌آید، زیرا دقت نتایج به دست آمده مستقیماً به اندازه مش‌ها بستگی دارد. فاصله‌ها در مش‌بندی مهم بوده و مقدار آن در هر مساله با سایر مسایل متفاوت است. معمولاً باید فواصل مش را تا حدی کوچک کرد تا تغییری در نتایج نهایی دیده نشود که اصطلاحاً به این فرآیند تحلیل حساسیت مش‌بندی گفته می‌شود. در عین حال می‌توان از معادله ۴ که در راهنمای نرم‌افزار FDS ارائه شده است برای تعیین اندازه مش‌ها استفاده کرد [۱۵]:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (4)$$

که در آن:

D^* : مشخصه آتش (m)

Q: آهنگ ره‌ایش گرما (KW)

مدل آزمایشگاهی در زمینه سرعت بحرانی بر روی سطح مقطع‌های مختلف انجام داده‌اند. آن‌ها نتایج خود را به جای ارتفاع تونل بر اساس قطر هیدرولیکی ارائه دادند [۱۱].

هو^{۱۳} و همکارانش برای مطالعه طول عقب‌زدگی و سرعت بحرانی تهویه طولی، یک مدل نیمه تجربی را ارائه داده و آن را با برخی از فرمول‌های پیش از خود مقایسه کردند. آزمایش آن‌ها در یک تونل با استخر سوخت $۳,۲$ مگاوات انجام شد. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی خود را با آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس مقایسه کردند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این واقعیت است که طول عقب‌زدگی با افزایش اندازه آتش بیشتر می‌شود و با افزایش ارتفاع تونل و سرعت جریان هوا، مقدار آن کاهش خواهد یافت [۱۲].

رابطه ارائه شده توسط آن‌ها به صورت رابطه ۳ است:

$$d = \ln \left[K \cdot \left(\frac{C_k H}{u^2} \right) \right] / 0.019 \quad (3)$$

که در آن:

d: طول عقب‌زدگی (m)

C_k : ثابت معادله که از طریق آزمایش بزرگ‌مقیاس به دست آمده و مقدار آن در حدود $۰,۱۹$ تا $۰,۳۷$ است.

H: ارتفاع تونل (m)

u: سرعت تهویه طولی (m/s)

Fr: عدد فرود است.

در جدول ۱ خلاصه‌ای از بررسی‌های مختلف انجام شده توسط پژوهشگران در سال‌های گذشته نشان داده شده است.

۳-۳- شبیه‌سازی CFD و شرایط مرزی

برای مدل‌سازی CFD آتش‌سوزی‌های تونلی می‌توان بسته به شرایط مساله مورد نظر، از مدل‌های مختلف یک‌بعدی تا سه‌بعدی استفاده کرد [۱۳]. این تکنیک می‌تواند درک عمیق‌تری از تاثیر پارامترهای مختلف را برای پژوهشگران به ارمغان آورد.

به دلیل هزینه‌های بالای آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس، کاربرد روش‌های CFD می‌تواند نتایج دقیقی را از حریق تونلی در اختیار پژوهشگران قرار دهد. به طور کلی با استفاده از شبیه‌سازی‌های CFD و با تغییر شرایط مرزی مختلف، می‌توان اطلاعات دقیقی را در رابطه با نحوه توزیع دما، حرکت دود و سرعت جریان به دست آورد و این روند با استفاده از مقادیر مختلف HRR حاصل می‌شود. در این مطالعه، نرم‌افزار

C: ظرفیت گرمایی ویژه

ρ_a : چگالی

T: دمای هوا است.

وجود برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از مش‌بندی، تحلیل حساسیت نیز انجام شده است. به این منظور مقدار حاصل از یک‌دهم رابطه ۴ (که برابر با ۰٫۰۰۸ متر است) و مقادیر بزرگتر از آن به عنوان ابعاد مش‌بندی انتخاب و مقدار HRR میانگین برای هر یک در شکل ۳ ترسیم شده است. همانگونه که از شکل ۳ برمی‌آید مقدار HRR از ابعاد ۰٫۰۰۱ متر به بعد ثابت مانده است. در نتیجه برای کاهش حجم محاسبات، ابعاد ۰٫۰۰۱ متر به عنوان ابعاد نهایی مش‌بندی انتخاب شده است.

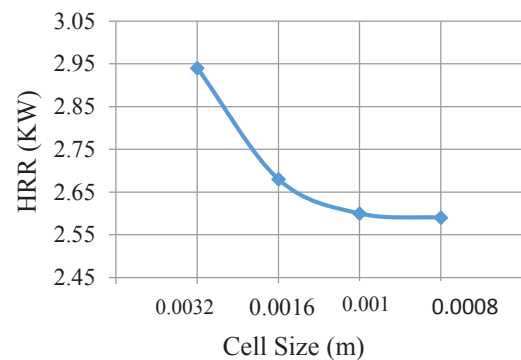
برای محاسبه اندازه مش‌ها کافی است ۰٫۱ مقدار مشخصه آتش را به عنوان اندازه مش‌ها در نظر گرفت. طبق توصیه راهنمای نرم‌افزار FDS این اندازه برای حالتی که از مش‌بندی چندگانه استفاده نمی‌شود، مقدار مناسبی را ارائه می‌دهد که طبق آن خروجی و نتایج مناسبی نیز قابل دریافت است [۱۵]، اما با این

جدول ۱: خلاصه پژوهش‌های انجام شده برای تعیین سرعت بحرانی

ردیف	عنوان پژوهش	سال	پژوهشگر
۱	حرکت سیال شناور و تهویه آتش‌سوزی زیرزمینی	۱۹۵۸	توماس
۲	حرکت دود در مسیرهای افقی برخلاف جریان هوا	۱۹۶۸	توماس
۳	اندرکنش بین آتش‌سوزی داکت و جریان تهویه	۱۹۷۹	لی و همکاران
۴	تحلیل تهویه طولی برای تونل‌های گلنوود	۱۹۸۲	دانزیگر و کندی
۵	کنترل جریان دود در آتش‌سوزی تونل	۱۹۹۵	اکا و آتکینسون
۶	کنترل دود در تونل‌های شیبدار	۱۹۹۶	آتکینسون و وو
۷	کنترل جریان دود در آتش‌سوزی تونل با استفاده از سیستم تهویه طولی	۲۰۰۰	وو و باکر
۸	شبیه‌سازی آتش در تونل‌های جاده‌ای	۲۰۰۳	مدیک
۹	مطالعه تجربی اثر نسبت‌های مختلف ویژگی‌های تونل در سرعت بحرانی برای تهویه طولی	۲۰۰۵	لی و ریو
۱۰	مطالعه جریان عقب‌زدگی شناور در آتش‌سوزی تونلی	۲۰۰۸	هو و همکاران
۱۱	مطالعه سرعت بحرانی و طول عقب‌زدگی در آتش‌سوزی‌های تونل‌های با تهویه طولی	۲۰۱۰	لی و اینگسون
۱۲	مطالعه تجربی در تاثیر شیب بر سرعت بحرانی تهویه تونل	۲۰۱۰	هیونگ کو و همکاران
۱۳	سرعت بحرانی برای آتش‌سوزی‌های چندگانه تونلی	۲۰۱۱	تیسای و همکاران
۱۴	شبیه‌سازی پخش دود در تونل قطارهای زیرزمینی	۲۰۱۱	محمدی و حسینعلی‌پور
۱۵	شبیه‌سازی عددی جریان سیال و انتقال حرارت همراه با انتشار دود ناشی از آتش‌سوزی در تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو	۲۰۱۱	مسقانی و مهریار
۱۶	طراحی سیستم تهویه تونل ملت و شبیه‌سازی آتش به کمک نرم‌افزار Fluent	۲۰۱۱	رشیدی و همکاران
۱۷	تعیین سرعت بحرانی در خلال آتش‌سوزی تصادف در تونل البرز	۲۰۱۲	نیکنام و همکاران
۱۸	شبیه‌سازی عددی آتش و دود در تونل با در نظر گرفتن اثرات تشعشع و جابه‌جایی آزاد	۲۰۱۳	پیربدایی، دوازده امامی
۱۹	شبیه‌سازی عددی رفتار حریق در تونل	۲۰۱۳	ماپار و حیدری‌نژاد
۲۰	بررسی تاثیر تهویه طولی روی آتش‌سوزی‌های بزرگ در تونل‌های بین شهری	۲۰۱۳	رئوفی و مظاهری
۲۱	حل تحلیلی، تجربی و شبیه‌سازی CFD برای تهویه آتش‌سوزی تونل	۲۰۱۴	گو و ژانگ
۲۲	طول جریان شناور عقب‌زدگی در تونل با تهویه طولی دارای نقاط تخلیه در سقف و با فواصل متفاوت از منبع حرارتی	۲۰۱۵	چن و همکاران
۲۳	مطالعه سرعت بحرانی در تونل شیبدار تحت تهویه طولی	۲۰۱۶	ونگ و همکاران
۲۴	روش‌های محاسباتی در طراحی تهویه طولی تونل	۲۰۱۸	بیوتو و الستون
۲۵	سرعت بحرانی و شرایط عقب‌زدگی در حریق تونل راه‌آهن	۲۰۱۹	حداد و همکاران
۲۶	مطالعه عددی و تجربی در سرعت بحرانی برای حریق در تونل‌های مرتبط مترو	۲۰۲۰	لیو و همکاران

۳-۳- شرایط مرزی

در این پژوهش حوضچه‌های به کار رفته از جنس فلز بوده و در فضای باز و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. در نرم‌افزار یکی از دهانه‌های تونل به عنوان ورودی هوا و دهانه دیگر تحت عنوان OPEN تنظیم شده است؛ منبع آتش نیز در نرم‌افزار POOL FIRE در نظر گرفته شده است. ماده سوختنی آن متانول صنعتی و زمان شبیه‌سازی ۵۰۰ ثانیه است.



شکل ۳: تحلیل حساسیت مش‌بندی

۳-۴- مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس

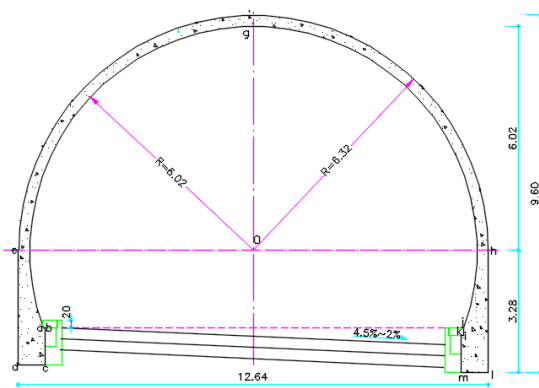
برای اعتبارسنجی نرم‌افزار FDS در رابطه با ارزیابی تاثیر مقدار HRR در تخمین سرعت بحرانی تونل‌های منحنی، یک تونل در استان لرستان با طول ۳۰۰ متر و شعاع انحنای ۴۰۰ متر انتخاب شده است. شکل سطح مقطع این تونل در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجا که شرایط پیاده‌سازی آزمایش بزرگ‌مقیاس در این تونل فراهم نیست، مدل کوچک‌مقیاس این تونل در آزمایشگاه شبیه‌سازی تهویه تونل دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شده و آزمایش‌های سرعت بحرانی و HRR در این مدل کوچک‌مقیاس پیاده‌سازی شده‌اند. این تونل با مقیاس ۱:۲۰ طراحی شده و ماهایی از طرح آن و آزمایشگاه در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ قابل مشاهده است. روش مقیاس‌گذاری به کار رفته روش فرود است که در ادامه تشریح خواهد شد. بدنه تونل ساخته شده از بتن است و انحنای آن نیز بر اساس مدل واقعی تنظیم شده است.

برای انجام آزمایش تجربی، روش آزمایش بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس کاربرد دارد. آزمایش‌های کوچک‌مقیاس به دلیل هزینه‌های پایین‌تر و دقت بالاتر در ثبت نتایج، اهمیت

خاصی در میان پژوهشگران دارند و در پژوهش‌های متفاوتی از آن‌ها استفاده می‌شود. این روش بر پایه قانون تشابه است که در واقع یک پل ارتباطی بین وضعیت بزرگ‌مقیاس واقعی با حالت مدل شده آن است [۱۷].

همانگونه که پیش از این ذکر شد، در این مقاله برای ساخت مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس از روش مقیاس‌گذاری فرود استفاده شده است. ارتباط بین مدل مقیاس شده و واقعی بر مبنای روش فرود در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۳]. در این جدول L نشان‌دهنده ابعاد موجود و اندیس‌های m و f به ترتیب نشان‌دهنده مدل مقیاس شده و بزرگ‌مقیاس هستند.

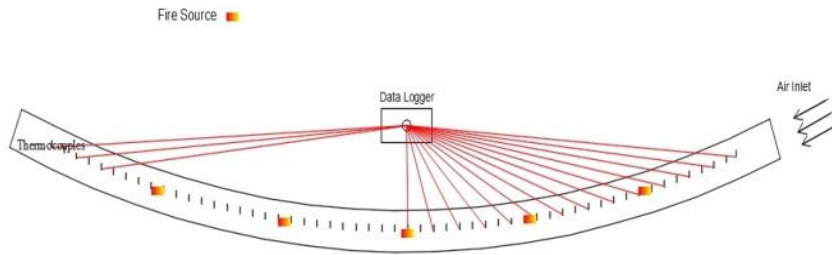
بر مبنای جدول ۲، طول تونل مقیاس شده ۱۵ متر بوده و با استفاده از بتن ساخته شده است. یکی از دهانه‌های این تونل افقی، به عنوان ورودی تونل در نظر گرفته شده است؛ یک فن محوری نیز در ورودی نصب شده است. این فن جریان محوری را تامین می‌کند و با استفاده از دیمر سرعت جریان هوا قابل تنظیم است. دهانه دیگر مستقیماً با محیط بیرون در ارتباط است و می‌توان سرعت جریان هوا را نیز در این دهانه



شکل ۴: مقطع تونل انتخاب شده، ابعاد به متر [۱۶]

جدول ۲: لیستی از ارتباط‌های مقیاس‌گذاری در روش فرود [۱۳]

مقیاس‌گذاری	واحد
$X_m/X_f = L_m/L_f$	هندسه (m)
$T_m = T_f$	دما (k)
$V_m/V_f = (L_m/L_f)^{1/2}$	سرعت (m/s)
$V_m/V_f = (L_m/L_f)^{5/2}$	حجم جریان (m^3/s)
$Q_m/Q_f = (L_m/L_f)^{5/2}$	آهنگ رهایش گرما (KW)
$T_m/T_f = (L_m/L_f)^{1/2}$	زمان (s)



شکل ۵: تونل، ترموکوپل‌ها و منبع آتش



شکل ۶: تصاویری از مدل نهایی ساخته شده

تونل منحنی

- مقایسه نیمرخ تغییرات HRR در تونل منحنی و تونل مستقیم
- مقایسه نیمرخ سرعت جریان در تونل حین سرعت بحرانی

۴-۱- ارزیابی تخمین سرعت بحرانی و اعتبارسنجی نتایج

در شکل ۸ مدل ساخته شده در نرم‌افزار FDS نشان داده شده است. برای ارزیابی تخمین سرعت بحرانی و اعتبارسنجی نتایج عددی با مقادیر فیزیکی به این ترتیب عمل شده است: ابتدا در مدل فیزیکی ساخته شده یک حریق حوضچه‌ای با ابعاد مساوی ۱۰ سانتی‌متری در مرکز محوری تونل در نظر گرفته شد، سپس به کمک فن محوری و دیمر سرعت جریان هوا افزایش یافت تا زمانی که مقدار عقب‌زدگی دود مرتبط با دمای برداشت شده به وسیله ترموکوپل‌ها به صفر برسد. برای این منظور ترموکوپل‌ها در بالادست و پایین‌دست آتش نصب شده‌اند و عدم عقب‌زدگی دود حالتی است که در آن ترموکوپل‌های نصب شده در بالادست آتش، دمایی بالاتر از

تعیین کرد. طبق آیین‌نامه هندسی راه، هر انحنای طول کمانی از یک دایره با شعاع مشخص است که برای مقیاس کردن آن بر مبنای جدول ۲ کافی است که با حفظ اصول مهندسی، طول کمان اولیه را با کاربرد واحد هندسه در جدول ۲ به راحتی مقیاس‌گذاری کرد.

با استفاده از ترموکوپل‌های نوع K نصب شده در سقف تونل و دیتالاگر متصل به رایانه، دمای داخل تونل قابل اندازه‌گیری است و با بهره گرفتن از آن می‌توان میزان عقب‌زدگی دود را محاسبه کرد؛ زیرا دود حاصل از حریق دمای بالاتری دارد. در شکل ۷ تصاویری از تجهیزات نشان داده شده و از متانول ۹۵ درصد نیز به عنوان سوخت استفاده شده است. ابعاد حوضچه حریق در تونل ساخته شده نیز $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر است.

۴- نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به چهار گروه تقسیم می‌شود:

- ارزیابی تخمین سرعت بحرانی و اعتبارسنجی نتایج
- ارزیابی سرعت بحرانی بر اساس تغییر در HRR برای

دمای اولیه محیط را ثبت نکنند. نتایج آزمایش فیزیکی در جدول ۳ نشان داده شده است. برای تشخیص سرعت بحرانی در آزمایش‌های فیزیکی از ترموکوپل‌های نصب شده کمک گرفته می‌شود. همانگونه که پیش از این ذکر شد، روش کار به صورت زیر است: سرعت جریان تهویه با استفاده از دیمر افزایش می‌یابد؛ اولین آزمایشی که ترموکوپل‌های بالادست حریق در آن دمایی معادل با شرایط محیطی را ثبت کنند، حاکی از وجود سرعت بحرانی در تونل است. همانگونه که از نتایج جدول ۳ مشخص است، سرعت بحرانی در آزمایش فیزیکی برابر با ۰٫۹۰ متر بر ثانیه است.

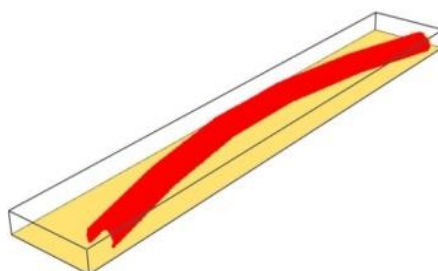
در شبیه‌سازی‌های عددی نیز به همین روش سرعت بحرانی مشخص شده است. برخی از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی FDS نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که نتیجه ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌های نصب شده (ترموکوپل ۴ و ۵) در بالادست حریق را به ترتیب در سرعت کمتر از سرعت بحرانی و برابر با سرعت بحرانی نشان می‌دهند.

ترموکوپل ۴ در فاصله ده سانتی‌متر قبل از آتش (مستقر در بالادست) در سقف تونل و ترموکوپل ۵ در فاصله پنج سانتی‌متر قبل از آتش (مستقر در بالادست) قرار دارد. اگر در هر آزمایش ترموکوپل ۴ و ۵ دمایی بالاتر از دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) را ثبت کنند به معنای وجود عقب‌زدگی دود



ARTIMAN Temperature Data Logger Calibration Factors						
CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5	CH 6	CH 7
1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000
750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750
500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500
250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250
0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0
93.38	-0.25	-0.25	26.97	0.25	-0.25	-0.25
CH 21	CH 22	CH 23	CH 24	CH 25	CH 26	CH 27
1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000	1000 - 1000
750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750	750 - 750
500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500	500 - 500
250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250	250 - 250
0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0

شکل ۷: تجهیزات استفاده شده (از راست به چپ ردیف اول): دیتالاگر، فن محوری، سرعت سنج و فشارسنج، دیمر

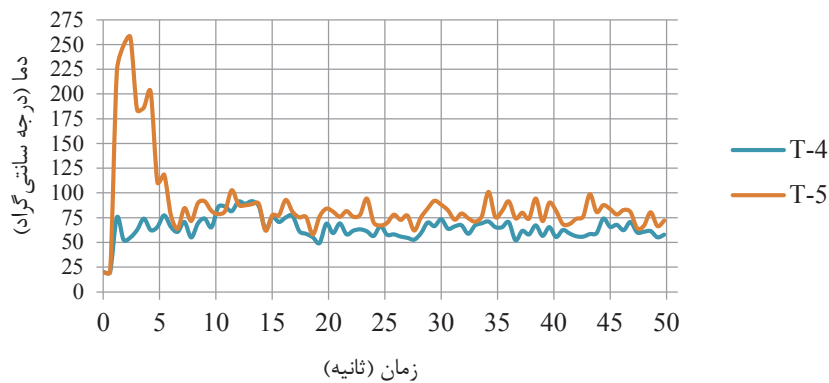


شکل ۸: مدل ساخته شده در نرم‌افزار FDS

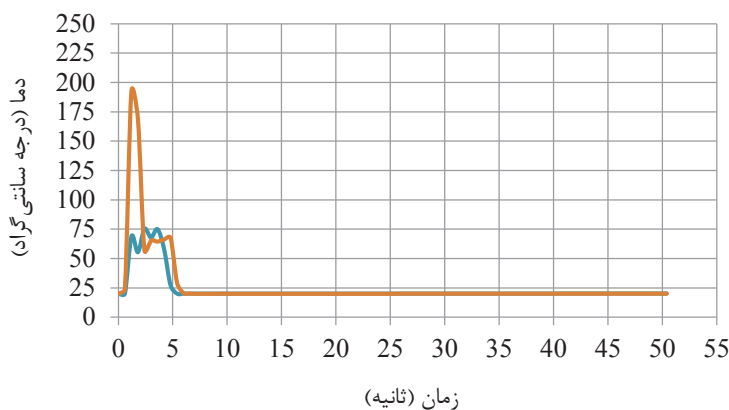
خواهد بود. در شکل ۹ نتایج ثبت دمایی برای ترموکوپل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. سرعت جریان برای این آزمایش ۰٫۷۲ متر بر ثانیه بوده و مشهود است که ترموکوپل ۴ و ۵ که در بالادست آتش است دمای بالاتری از محیط را ثبت کرده‌اند که بیانگر وجود عقب‌زدگی دود است. در شکل ۱۰ سرعت جریان آزمایش ۰٫۹۲ متر بر ثانیه است.

جدول ۳: آزمایش‌های تجربی در تونل ساخته شده و طول عقب‌زدگی مرتبط

شماره آزمایش	آهنگ رهایش گرما (KW)	شیب تونل	سرعت جریان هوا (m/s)	طول عقب‌زدگی (m)
۱	۳٫۱	۰	۰٫۵۵	۱ <
۲	۳٫۱	۰	۰٫۶۰	۱ <
۳	۳٫۱	۰	۰٫۶۵	۱
۴	۳٫۱	۰	۰٫۷۰	۰٫۷۰
۵	۳٫۱	۰	۰٫۷۵	۰٫۴۰
۶	۳٫۱	۰	۰٫۸۰	۰٫۲۰
۷	۳٫۱	۰	۰٫۸۵	۰٫۱۰
۸	۳٫۱	۰	۰٫۹۰	۰
۹	۳٫۱	۰	۰٫۹۵	۰



شکل ۹: نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌ها در شبیه‌سازی برای سرعت جریان ۰٫۷۲ متر بر ثانیه



شکل ۱۰: نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌ها در شبیه‌سازی برای سرعت جریان ۰٫۹۲ متر بر ثانیه

برای دو تونل منحنی و مستقیم نشان داده شده است. قابل ذکر است که برای مقایسه نیمرخ تغییرات سرعت بحرانی بر مبنای HRR علاوه بر تونل منحنی مشخص شده، یک تونل مستقیم با سطح مقطع و طول برابر با تونل منحنی در محیط نرم‌افزار FDS طراحی شده است. روند برای هر دو تونل صعودی است که بیانگر رابطه مستقیم افزایش سرعت بحرانی با افزایش HRR است. این افزایش برای تونل مستقیم نیز تا حد مشخصی وجود دارد، اما روند کلی تغییرات سرعت بحرانی نسبت به HRR برای تونل مستقیم کمتر از تونل منحنی است و این اختلاف در اینجا ۱۰ درصد است.

۴-۴- مقایسه نیمرخ سرعت جریان در تونل حین سرعت بحرانی

در شکل ۱۳، نیمرخ سرعت در شرایط وجود سرعت بحرانی در تونل، نشان داده شده است. برای تعیین نیمرخ سرعت جریان، بخش بالادست حریق انتخاب شده است. هدف از ترسیم نیمرخ سرعت در بالادست حریق، بررسی روند آن در ابعاد مختلف حریق حوضچه‌ای است تا بتوان در رابطه با تاثیر حریق حوضچه‌ای و ابعاد آن و یا آهنگ‌های مختلف رهایش گرما بر وضعیت جریان در بالادست حریق اطلاعات کافی به دست آورد. همانگونه که از تصویر ۱۳ مشهود است، یک روند مشابه در نیمرخ‌های مختلف جریان و در آهنگ‌های مختلف رهایش گرما وجود دارد.

این نیمرخ‌ها برای محور مرکزی تونل و مستقر در بالادست حریق ترسیم شده‌اند. بر اساس تصویر ۱۳ این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش آهنگ رهایش گرما، میانگین سرعت جریان در محور ارتفاعی تونل افزایش می‌یابد و نیمرخ‌های

در این آزمایش ترموکوپل ۵ (T-5) و ترموکوپل ۴ (T-4) دمایی بالاتر از محیط را ثبت نکرده‌اند که نشان‌دهنده عدم عقب‌زدگی دود است. بر اساس این نتایج سرعت ۰٫۹۲ متر بر ثانیه به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که از نتایج برمی‌آید و با توجه به نزدیکی مقادیر آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار با دقت مناسبی سرعت بحرانی را تخمین زده است.

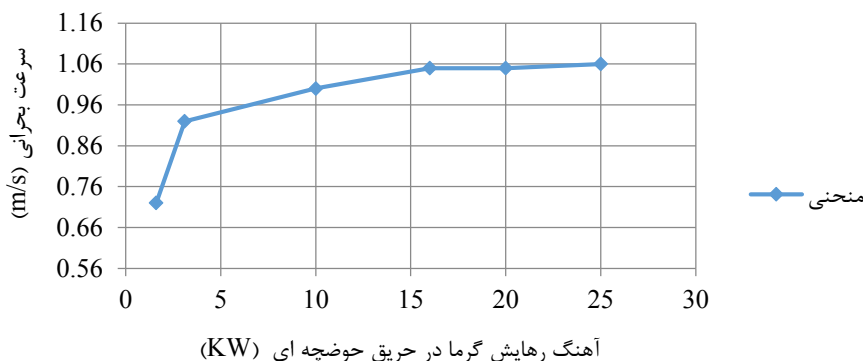
۴-۲- ارزیابی سرعت بحرانی بر اساس تغییر در HRR برای تونل منحنی

در شکل ۱۱ تغییرات سرعت بحرانی نسبت به HRR نشان داده شده است. همانگونه که از این نمودار برمی‌آید با افزایش اندازه دهانه حوضچه حریق که به افزایش آهنگ رهایش گرما منجر می‌شود، میزان سرعت بحرانی در تونل منحنی ساخته شده نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده رشد حدوداً ۵۰ درصدی است و پس از یک مقدار مشخص (حدود ۱۵ کیلووات) به حد تقریباً ثابتی می‌رسد.

بررسی دقیق‌تر این منحنی حاکی از آن است که افزایش میزان HRR تا مرز مشخصی سبب افزایش سرعت بحرانی خواهد شد و پس از آن، میزان سرعت بحرانی مستقل از مقدار HRR است، بنابراین از سوی دیگر می‌توان دریافت که در یک محدوده مشخص، مقدار سرعت بحرانی بسیار تاثیرپذیر از میزان HRR است.

۴-۳- مقایسه نیمرخ تغییرات سرعت بحرانی بر مبنای HRR در تونل منحنی و تونل مستقیم

در شکل ۱۲ مقایسه تغییرات HRR و سرعت بحرانی



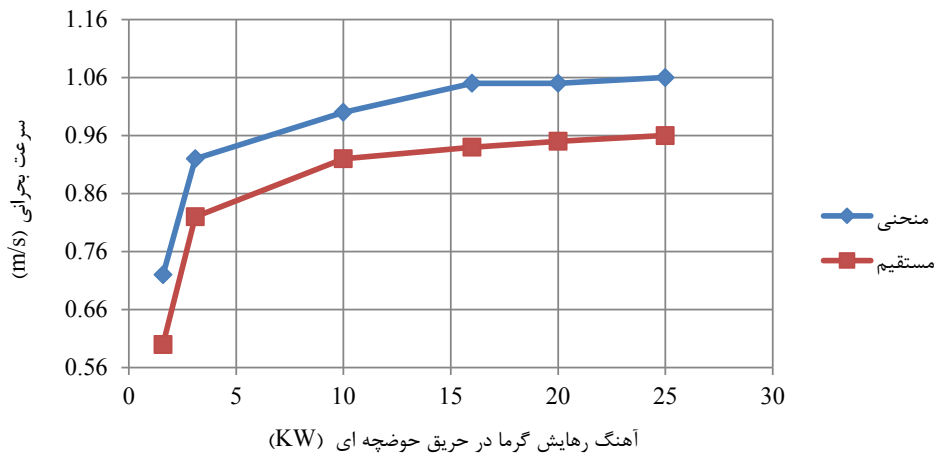
شکل ۱۱: تغییرات سرعت بحرانی با افزایش HRR

ارایه شد. در بخش اول، سرعت بحرانی برای تونل منحنی در دو حالت عددی و فیزیکی به دست آمده است. تطابق مناسبی بین نتایج مدل‌های عددی و فیزیکی مشاهده شد و نتایج سرعت بحرانی به یکدیگر نزدیک بود. در مدل فیزیکی سرعت بحرانی ۰٫۹۰ متر بر ثانیه و در مدل عددی ۰٫۹۲ متر بر ثانیه به دست آمد. در ادامه به بررسی تاثیر آهنگ رهائش گرما بر میزان سرعت بحرانی پرداخته شد که به عنوان هدف اصلی این مقاله در نظر گرفته شده است. همانگونه که از نتایج برمی‌آید در هر دو تونل منحنی و مستقیم با افزایش HRR مقدار سرعت بحرانی نیز افزایش می‌یابد و این افزایش تا حد مشخصی ادامه پیدا می‌کند و پس از آن مقدار سرعت بحرانی از میزان HRR مستقل است. از سوی دیگر مقدار سرعت بحرانی تونل‌های منحنی از

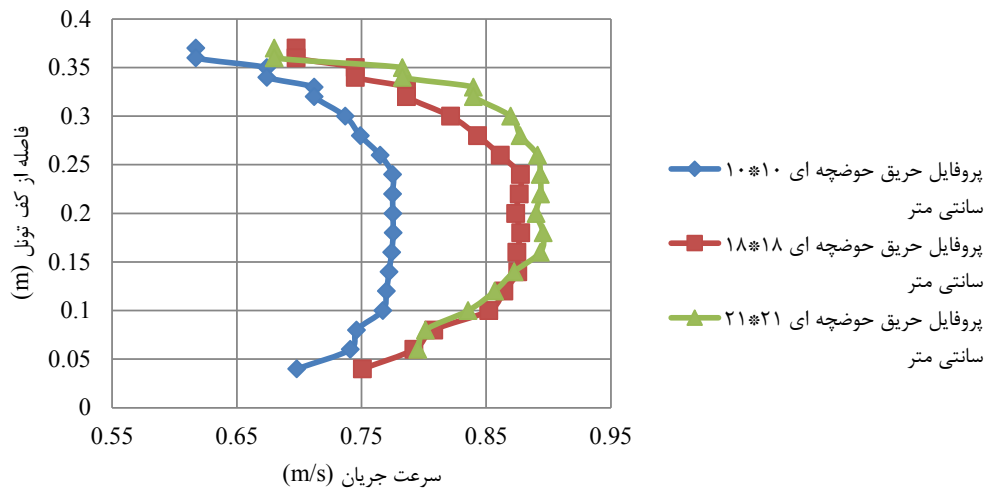
مختلف کاملاً شبیه به یکدیگر هستند. از سوی دیگر در آهنگ رهائش گرمای بزرگتر از ۳٫۱ کیلووات (حوضچه ۰٫۱۰×۰٫۱۰ متری) نیمرخ‌های سرعت تقریباً بر روی هم قرار گرفته‌اند و این امر ناشی از وابستگی ضعیف سرعت بحرانی به آهنگ رهائش گرما در ابعاد بزرگ HRR است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آهنگ رهائش گرما به عنوان یک پارامتر کلیدی در تخمین سرعت بحرانی تونل‌ها پرداخته شد. تونل اصلی مطالعه یک تونل منحنی است. برای اعتبارسنجی نتایج یک تونل منحنی در ابعاد آزمایشگاهی ساخته شد و نتایج آن با نتایج نرم‌افزار FDS مقایسه گردید. نتایج در چهار بخش



شکل ۱۲: مقایسه تغییرات HRR و سرعت بحرانی برای تونل مستقیم و منحنی



شکل ۱۳: نیمرخ سرعت جریان در حریق‌های حوضچه‌ای مختلف

in tunnel fires using longitudinal ventilation systems a study of the critical velocity". Fire Safety Journal, 35(4): 363-390.

[12] Hu, L., Huo, R., and Chow, W. (2008). "Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires". Experimental Thermal and Fluid Science, 32: 1468-1483.

[13] Weng, M., Lu, X., Liu, F., and Du, C. (2016). "study on the critical velocity in a sloping tunnel fire under longitudinal ventilation". Applied Thermal Engineering, 94: 422-434.

[14] Weng, M., Yu, L., Liu, F., and Nielsen, P. (2014). "Full-scale experiment and CFD simulation on smoke movement and smoke control in a metro tunnel with one opening portal". Tunneling and Underground Space Technology, 42: 96-104.

[15] FDS User Guide and FDS Technical Reference Guide. (2017).

[۱۶] شرکت مهندسی مشاور پونر، پویندگان نوین راهسازی؛ ۱۳۸۹؛ "گزارشات دفتر فنی". احداث باند دوم بابازید - ملاوی.

[17] Road Safety Manual - World Road Association, (1999). "Fire and smoke control in road tunnels". PIARC Committee on Road Tunnels.

مستقیم بیشتر است. در انتها نیز نیمرخ سرعت در بالادست حریق برای آهنگ‌های مختلف رهایش گرما ترسیم شد و نتایج آن وابستگی ضعیف سرعت بحرانی و HRR برای تونل‌های منحنی در ابعاد مشخصی از آهنگ رهایش گرما را نشان داد.

۶- مراجع

[1] Bertola, V., and Cafaro, E. (2009). "Deterministic-stochastic approach to compartment fire modeling". Proceedings of the Royal Society Journal, 465: 1029-1041.

[2] Ingason, H., Li, Y., and Lönnemark, I. (2015). "Tunnel Fire Dynamics". Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 100-150.

[۳] مدنی، ح؛ ۱۳۹۵؛ "تونلسازی". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، جلد پنجم، ۱۰۰ صفحه.

[4] Wang, F., Wang, M., Carvel, R., and Wang, Y. (2017). "Numerical study on fire smoke movement and control in curved road tunnels". Tunneling and Underground Space Technology, 67: 1-7.

[5] Karlsson, B., and Quintiere, J. (2000). "Enclosure Fire Dynamics". CRC Press, 38-60.

[6] KO, Y. (2011). "A Study of the Heat Release Rate of Tunnel Fires and the Interaction between Suppression and Longitudinal Air Flows in Tunnels". Ph.D Thesis.

[7] Thomas, P. (1958). "The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires". Report 351, 3-5.

[8] Lee, C., Chaiken, R., and Singer, M. (1979). "Interaction between Duct Fires and Ventilation Flow: An Experimental Study". Combustion Science and Technology, 20: 59-72.

[9] Danziger, H., and Kennedy, D. (1982). "Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels". In Proceedings of the Fourth International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 169-186.

[10] Oka, Y., and Atkinson, G. (1995). "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires". Fire Safety Journal, 25: 305-322.

[11] Wu, Y., and Bakar, M. (2000). "Control of smoke flow

¹ Heat Release Rate (HRR)

² Critical Froude Model

³ Velocity head

⁴ Danziger

⁵ Kennedy

⁶ Lee

⁷ HRR

⁸ Oka

⁹ Atkinson

¹⁰ Model-Scale

¹¹ Wu

¹² Bakar

¹³ Hu



Imam Khomeini International University
Vol. 6, No. 4, Winter 2021, pp. 12-14



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/JMRE.2021.10360.1425

Research Paper

The Assessment of heat release rate in Estimation of Critical Velocity in Curved Tunnel fire

Shams Y.¹, Sereshki F.^{2*}, Kakaie R.³

1- Ph.D Student, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

yahya.shams@ymail.com

2- Professor, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Farhang-sereshki@shahroodut.ac.ir

3- Professor, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

r_kakaie@shahroodut.ac.ir

(Received: 03 Jul. 2020, Accepted: 02 Mar. 2021)

Abstract: In terms of longitudinal ventilation design, critical velocity and its estimation are the two most important parameters in a tunnel fire. Critical velocity must be accurately selected to provide safe conditions in a closed environment such as tunnels. This study is focused on fires in curved tunnels using a small-scale model (in a 1/20 scale) experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Heat Release Rate (HRR) is considered as one of the key parameters in all numerical studies and physical experiments of the fire. In this study, a numerical study was carried out to evaluate the Heat Release Rate in pool fire Simulation in FDS software and small physical scale experiment. In the first step, grid sensitivity analysis and its impact on HRR estimation were investigated. The critical velocity of the physical model was equal to 0.90m/s and 0.92m/s in the numeric model. After data validation, it was concluded that increasing the HRR increases the critical velocity, so based on the results of the changes, it can be seen that this parameter is very important in estimating the critical velocity. But, this trend only dominates a certain range and the results show that outside of this range, the critical velocity is independent of the amount of HRR. On the other hand, the trend of increasing the critical velocity compared to the heat release rate for the curved tunnel, with a difference of about 10%, is in a higher position than the straight tunnel.

Keywords: Curved tunnel, small-scale model, Heat Release Rate, FDS simulation.

INTRODUCTION

Fires caused by incidents and accidents are one of the most important dangers in the field of tunnel Safety. Tunnels are closed spaces, which makes the consequences and damages of these incidents much more intense [1]. The smoke caused by tunnel fires will spread upstream and downstream the fire.



There are mainly two types of models to estimate the critical velocity, that is, the critical Froude model and the non-dimensional model. Thomas proposed that the velocity head of fresh air flow should be comparable or greater than the buoyancy head of smoke flow in order to prevent backlayering, and defined a critical Froude number, which could be expressed as follows [2]:

$$Fr_c^2 = \frac{v^2}{gD} \quad (1)$$

METHODS

Pool fires were selected for this analysis. The meshing distances are important and different in each case. These distances are calculated according to Equation 2 [3]:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (2)$$

Therefore, the 0.001 meters value was selected as the final meshing dimension to reduce the calculation volume according to Figure 1.

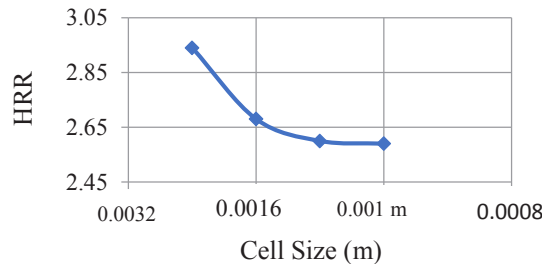


Figure 1. Meshing sensitivity analysis

The physical critical velocity determination tests use the help of the installed Thermocouples. They determined the critical velocity as 0.90 m/s. Figure 2 shows the thermal Thermocouple results at the critical velocity during numeric simulations.

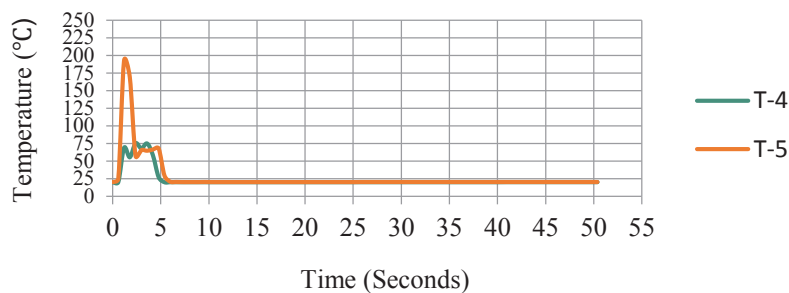


Figure 2. Thermal results of some Thermocouples in 0.92 m/s velocity flow simulation

Closer analysis of the curve from Figure 3 shows that an increasing HRR value increases the critical velocity up to a certain threshold after which, the critical velocity is independent of the HRR value. The general critical velocity change trend based on HRR is lower for straight tunnels than curved tunnels with a 10% difference.

CONCLUSION

This study analyzed Heat Release Rate (HRR) as a key parameter in estimating tunnel critical velocity. The main tunnel studied in this paper is curved. The results of a curved tunnel were created in laboratory dimensions were compared with the FDS software results for validation. In the first section, there was a

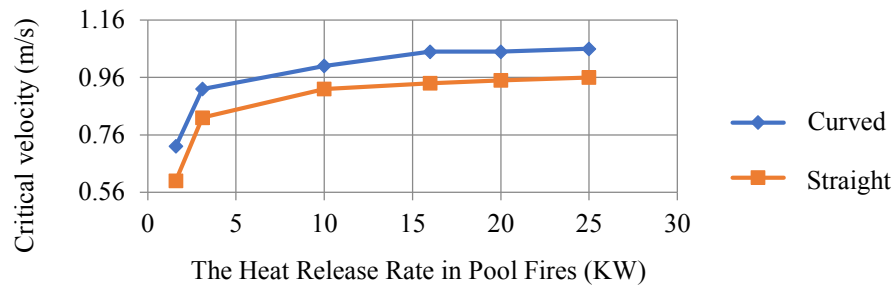


Figure 3. Comparing HRR changes and the critical velocity for straight and curved tunnels

proper correlation between the numeric and physical results while the critical velocity results were close. The critical velocity of the physical model was equal to 0.90 m/s and 0.92 m/s in the numeric model. Later on, the effect of the heat release rate on the critical velocity was analyzed as the main goal of this paper. The results showed that the critical velocity of straight and curved tunnels increases alongside the critical velocity until a certain point, after which the critical velocity is independent of the HRR value.

REFERENCES

- [1] Bertola, V., and Cafaro, E. (2009). "Deterministic-stochastic approach to compartment fire modeling". Proceedings of Royal Society Journal, 465: 1029-1041.
- [2] Thomas, P. (1958). "The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires". Report 351, 3-5.
- [3] FDS User Guide. (2017).