

ارزیابی شبیه‌سازی FDS در تخمین سرعت بحرانی برای حریق

حوضچه‌ای کوچک مقیاس در تونل منحنی

یحیی شمس، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران
فرهنگ سرشکی (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

E-mail: Farhang-sereshki@shahroodut.ac.ir

رضا خالوکاکائی، استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

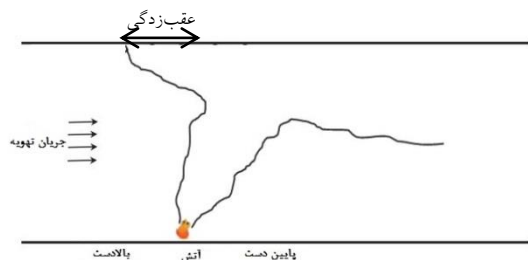
چکیده

تخمین صحیح سرعت بحرانی از مسائل پیچیده در طراحی ایمنی تونل‌ها است. چون سرعت بحرانی نباید از مقدار واقعی، بیشتر یا کمتر باشد برآورد آن پیچیده است. شبیه‌سازی کامپیوتری در مطالعه حریق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این مقاله مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار FDS در تخمین دو پارامتر مهم HRR (آهنگ رهائش گرما) و سرعت بحرانی در تونل منحنی با مقادیر حاصل از آزمایش‌های تجربی کوچک مقیاس است. ابتدا تحلیل حساسیت شبکه‌بندی و تاثیر آن در تخمین میزان HRR بررسی شده است که نتیجه آن بیانگر تأثیر قابل توجه ابعاد شبکه‌بندی در تخمین صحیح HRR و لزوم دقت در انتخاب آن است. سپس تأثیر لبه حوضچه در تخمین HRR مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که نبود لبه حوضچه حدود ۳۰٪ سبب کاهش مقدار تخمینی می‌شود. در بخش سوم نتایج حاصل از HRR مربوط به دو حوضچه با ابعاد معلوم مقایسه شد که در نتیجه نرم‌افزار به صورت مناسبی قادر به تخمین HRR است. در انتها یک تونل منحنی کوچک مقیاس ساخته و با استفاده از تجهیزات فیزیکی، سرعت بحرانی در این تونل مشخص شد. نتایج حاصل از آن با نتایج شبیه‌سازی FDS مقایسه و بررسی آن گویای دقت مناسب در تخمین سرعت بحرانی است. با در نظر داشتن این موضوع که سرعت بحرانی در تونل منحنی $0.92 m/s$ و در تونل مستقیم $0.82 m/s$ است می‌توان دریافت که در صورت وجود انحنای نیاز به سرعت جریان هوای بیشتری برای کنترل عقب‌زدگی دود است در نتیجه سرعت بحرانی مورد نیاز در تونل با هندسه منحنی از تونل مستقیم بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: حریق حوضچه‌ای، مدل‌سازی فیزیکی، آهنگ رهائش گرما، شبیه‌سازی FDS

۱. مقدمه

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



شکل ۱. طول عقب زدگی در آتش‌سوزی تونل [Zigar,

Jovanovic and Zdravkovic, 2011

به طور عمده از روش‌های بزرگ مقیاس، روش حل CFD و آزمایشگاهی برای تخمین سرعت بحرانی استفاده می‌شود. در این میان مرسوم‌ترین روش استفاده از ابزارهای CFD است زیرا نه تنها از هزینه پایینی برخوردار هستند بلکه در انتها نیز نتایج گسترده‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهند. علاوه بر این کاربرد آزمایش‌های کوچک مقیاس نیز به طور چشم‌گیری توسط محققین افزایش یافته است.

برخی نرم‌افزارهای تحلیل جریان سیال عبارتند از Ansys Fluent، CFX، PHOENICS، Star CCMT که هیچ یک برای مدل‌سازی آتش مناسب نیستند. نرم‌افزارهای ویژه CFD همچون FIRE FOAM، SOFIE، SMART FIRE، JASMINE، FIRE DYNAMIC SIMULATOR (FDS) برای مدل-

سازی آتش توسعه داده شده‌اند [مدنی، ۱۳۹۵] که در بین این نرم‌افزارهای تجاری، FDS از سوی انجمن جهانی آتش به عنوان نرم‌افزار استاندارد در نظر گرفته شده است [Ingason et al. 2015]. اطلاع از دقت تخمین FDS در برآورد پارامترهای مختلف در شرایط متفاوت سودمند خواهد بود. آهنگ رهایش گرمای و

سیستم حمل و نقل یکی از بخش‌های اساسی و مهم در جامعه‌ی امروزی است که تونل‌ها در این سیستم از اهمیت کلیدی برخوردارند. استفاده از تونل‌ها برای احداث خطوط مترو در سیستم حمل و نقل عمومی و در مناطق کوهستانی، برای ایجاد مسیرهای مناسب، غیرقابل‌گریز شده است. همین موضوع اهمیت تونل و مسائل وابسته به آن را بیش از پیش نشان می‌دهد. از آنجایی که محیط تونل‌ها بسته است، عواقب و خسارات ناشی از تصادف‌ها به علت امکان انتقال آتش‌سوزی به سایر وسایل و مواد موجود در آن نیز بیشتر بوده و خطر گسترش آتش‌سوزی در این محیط بیشتر از سایر جاده‌ها است [Bertola and Cafaro, 2009] بنابراین تمامی مطالعات مرتبط با آتش در چنین محیطی به دلیل ارتباط با ایمنی افراد از اهمیت برخوردار هستند.

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 فرایند بر مبنای هزینه‌های عملیاتی مجاز، برخورداری از شرایط قابل نصب در طول تونل و سطح ایمنی مورد نظر انجام می‌شود. زمانی که آتش در تونل رخ دهد، دود حاصل از احتراق در بالادست و پایین دست 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 مورد نیاز برای جلوگیری از این پخش‌شدگی یا به عبارت دیگر حداقل سرعت جریان مورد نیاز برای صفر شدن طول عقب‌زدگی با حفظ لایه‌بندی دود، برابر با سرعت بحرانی است.

سرعت بحرانی از جمله پارامترهای تخمینی در این ابزار به شمار می‌روند.

آهنگ رهایش گرما یکی از پارامترهای کلیدی در تمامی مطالعات عددی و آزمایش‌های فیزیکی آتش به شمار می‌رود. از این پارامتر 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 [Wang et al. 2017]. در بیشتر طراحی‌های مهندسی پیشرفته سیستم‌های محافظت در مقابل آتش، آهنگ رهایش گرما برای وسایل نقلیه موجود در تونل از مهم‌ترین ورودی‌ها به حساب می‌آید و میزان آن به فاکتورهای متعددی بستگی دارد [Karlsson and Quintiere, 2000]. تجارب به دست آمده از آتش‌سوزی تونل‌های بزرگ نشان دهنده‌ی آن است که میزان آهنگ رهایش گرما مهم‌ترین پارامتر برای توصیف گسترش و اثرات آتش در تونل است [Ko, 2011] لذا ارزیابی دقیق آن به عنوان ورودی مساله بسیار مهم است.

سرعت بحرانی نیز در شرایط رخداد آتش‌سوزی در ارتباط مستقیم با جان افراد حاضر در تونل است و عدم تامین دقیق این جریان و سرعت مناسب آن سبب بروز خسارات جبران‌ناپذیری می‌شود. به دلیل اهمیت ایمنی و سیستم‌های مرتبط با آن باید در نظر داشت که تخمین قابل قبول برای این پارامتر بسیار حائز اهمیت است.

بنابر توضیحات ذکر شده مهم است که از صحت مقادیر تخمینی توسط نرم‌افزار FDS آگاه شد. هدف این مقاله مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار FDS در تخمین پارامتر مهم آهنگ رهایش گرما و سرعت بحرانی در تونل منحنی با مقادیر حاصل از آزمایش‌های کوچک مقیاس است. لذا در ادامه به طور مختصر در زمینه توسعه آتش و مدل سازی فیزیکی مطالبی ارائه شده است. پس از آن به هدف این مطالعه پرداخته و نتایج حاصل از آن ارائه خواهد شد.

قابل ذکر است که تمامی مطالعات پیشین در رابطه با تونل‌های مستقیم است و سرعت بحرانی محاسبه شده در تمامی این تحقیقات بر مبنای مستقیم بودن تونل استوار است اما در بسیاری از تونل‌ها انحنای تونل با شعاع‌های مختلف دیده می‌شود و انحنای تونل سبب تغییر در جریان هوا از نظر سیالاتی است به عبارت 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 تونل‌های منحنی و در حالات مختلف بررسی شود تا بتوان به ارزیابی و برآورد دقیقی در شرایط آتش‌سوزی در این تونل‌ها دست یافت.

۲. توسعه آتش

توسعه آتش در یک محفظه معمولاً در مراحل و بخش‌های مختلف روی می‌دهد. برای توسعه آن عموماً چهار مرحله‌ی کلی در نظر گرفته می‌شود. در زیر این چهار مرحله برشمرده شده است [Blagojevi and Pesic, 2011]:

رشد، دوره‌ی گرگرفتگی (Flashover)، توسعه‌ی کامل، زوال و فروکش شدن

در شکل ۱ کلیه مراحل توسعه‌ی فرایند آتش‌سوزی نشان داده است. مرحله توسعه آتش با یک دوره رشد آغاز می‌شود و در صورتی که پدیده گرگرفتگی وجود نداشته باشد به مرحله‌ی زوال و خاموش شدن خواهد رسید [Drysdale, 2011]. اما در صورتی که این مرحله رخ دهد دوره‌ی توسعه‌ی کامل به عنوان سومین مرحله خواهد بود و پس از آن مرحله‌ی زوال آغاز می‌شود.

تعیین آن به صورت معادله ۱ نمایش داده می‌شود [Thomas, 1958]:

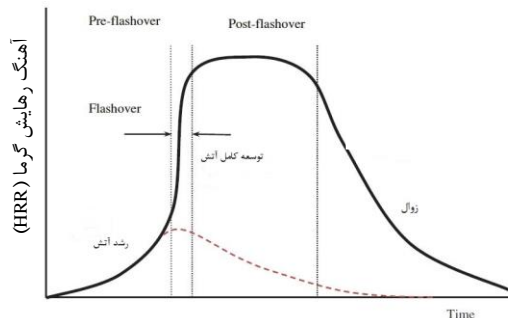
$$Fr_c^2 = \frac{v^2}{gD} \quad (1)$$

که در این معادله v مقدار سرعت جریان هوا، پارامتر g شتاب گرانشی بر حسب m/s^2 ، پارامتر D طول و برحسب m است. توماس پیشنهاد کرد در صورتی که عدد بحرانی فرود برابر با یک باشد در چنین حالتی عقب‌زدگی جریان دود به وجود نخواهد آمد. دانزیگر^۴ و کندی^۵ براساس آزمایش‌های لی^۶ و همکارانش عنوان کرده‌اند که محدوده‌ی عدد بحرانی فرود در حیطه‌ی $4/5$ تا $6/7$ تغییر می‌نماید بنابراین عدد بحرانی فرود در حدود $4/5$ توصیه می‌شود [Lee et al., 1979 and Danziger and Kennedy, 1982]. علاوه بر این باید از مقدار HRR همرفتی به جای مقدار کلی HRR استفاده کرد. این معادله به شکل زیر نشان داده می‌شود.

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

و در این معادله u_c سرعت بحرانی (m/s)، \dot{Q} آهنگ رهائش گرما کلی (HRR) بر حسب کیلو وات (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) و ρ_0 چگالی جریان (kg/m^3) است. لازم به ذکر است که از آنجایی که این مدل‌ها برپایه‌ی عدد فرود حاصل شده‌اند عمدتاً از ریشه سوم برای تعیین سرعت بحرانی استفاده می‌نمایند که در مجموع تئوری ریشه سوم برای آتش‌سوزی‌های بزرگ، پیش‌بینی مناسبی از سرعت بحرانی را به همراه نخواهد داشت.

محققین متعددی در زمینه مدل‌های بی‌بعد اقدام به ارائه مدل براساس آزمایش‌های کوچک مقیاس یا براساس مدل‌سازی‌های عددی کرده‌اند. از جمله اولین افراد در این زمینه اکا^۷ و آتکینسون^۸ می‌باشند. این دو محقق، یک سری آزمایش در مقیاس مدل^۹ برای تخمین رابطه‌ی بین سرعت بحرانی و HRR انجام داده‌اند [Oka



شکل ۲. فازهای مختلف آتش در یک محفظه [Blagojevi and Pesic, 2011]

۳. مطالعات پیشین

آتش‌سوزی درون تونل‌ها را می‌توان در سه دسته آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای، آتش‌سوزی تونل‌های راه‌آهن و مترو تقسیم‌بندی کرد. همانگونه که پیش از این بیان شد در تمامی مطالعات پیشین تمرکز تحقیقات بر روی تونل‌های بدون انحنا و مستقیم قرار دارد. اما در شرایط واقعی بسیاری از تونل‌ها دارای انحنای مختلف با شعاع‌های متفاوت هستند. انحنا در تونل سبب نامتقارن شدن جریان تهویه و دود حاصل از حریق می‌شود که در هیچ یک از مطالعات پیشین دیده نمی‌شود. در ادامه خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته بر روی تونل‌های مستقیم ارائه شده است. به طور کلی دو روش عمده برای تخمین سرعت بحرانی مورد استفاده قرار گرفته است، این دو مدل عبارتند از [Ingason et al. 2015]:

- مدل بحرانی فرود^۲
- مدل‌های بی‌بعد

اولین رابطه در این زمینه توسط توماس ارائه شده است و بدین صورت است که باید ارتفاع سرعت^۳ هوای تازه قابل قیاس یا بزرگتر از ارتفاع شناوری جریان دود به منظور جلوگیری از پدیده عقب‌زدگی باشد که این مقدار تحت عنوان عدد بحرانی فرود شناخته می‌شود و به صورت Fr_c نشان داده می‌شود و معادله‌ی

جدول ۱. خلاصه تحقیقات انجام شده برای تعیین سرعت بحرانی

ردیف	عنوان تحقیق	سال	محقق
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 گلنود	۱۹۸۲	دانزیگر و کندی
۵	کنترل جریان دود در آتش‌سوزی تونل	۱۹۹۵	اکا و آکتینسون
۶	کنترل دود در تونل‌های شبیدار	۱۹۹۶	آکتینسون 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 پنخس دود در تونل قطارهای زیرزمینی	۲۰۱۱	محمدی و حسینعلی-پور

and Atkinson, 1995]. وو^۱ و باکر^{۱۱} نیز یک سری آزمایش در مقیاس مدل آزمایشگاهی در زمینه‌ی سرعت بحرانی بر روی سطح مقطع‌های مختلف انجام داده‌اند آن‌ها نتایج خود را براساس قطر هیدرولیکی به انجام رسانده‌اند و در عوض ارتفاع تونل را حذف کرده‌اند [Wu and Bakar, 2000].

هو^{۱۲} و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به منظور مطالعه طول عقب‌زدگی و سرعت بحرانی تهویه طولی مدل نیمه تجربی را ارائه و آن را با برخی از فرمول‌های پیش از خود مقایسه کرده‌اند. آزمایش آن‌ها در یک تونل با حوضچه سوخت با قدرت ۳/۲ مگاوات انجام شده است که نتایج شبیه‌سازی خود را با آزمایش‌های بزرگ مقیاس مقایسه کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان دهنده‌ی 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 [Hu et al., 2008].

رابطه‌ی ارائه شده توسط آن‌ها به صورت زیر است:

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

در این رابطه d طول عقب‌زدگی، C_k ثابت معادله که از طریق آزمایش بزرگ مقیاس به دست آمده و در حدود ۱۹/ تا ۳۷/۰ و H ارتفاع تونل، u سرعت تهویه طولی، Fr عدد فرود است.

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

عمیق‌تری از تاثیر پارامترهای مختلف را برای محققین به ارمغان آورد. معادلات کنترلی برای جرم، اندازه حرکت و انرژی به صورت خلاصه به فرم زیر نوشته می‌شود:

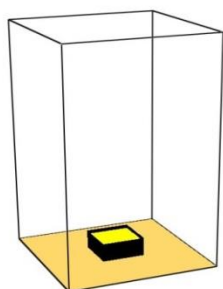
$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}(\phi)) + S \quad (4)$$

که ϕ یک متغیر (برای جرم، اندازه حرکت و انرژی)، u بردار سرعت و S بخش انرژی است. به عبارت دیگر معادلات حاکم بر جریان سیال بیانگر قوانین فیزیکی بقاء در تمامی سلول‌های کوچک محیط محاسباتی است.

ابزارهای مختلفی برای این منظور در دسترس است که در این میان از نرم‌افزار FDS به دلیل توانایی بالاتر و دقت مناسب به صورت گسترده‌تری برای مسائل آتش در تونل استفاده می‌شود [Ingason et al., 2015]. به همین دلیل نرم‌افزار FDS برای تخمین HRR و ارزیابی نتایج آن در تونل انتخاب شده است.

۴-۱ تنظیمات اولیه شبیه‌سازی

به منظور انجام ارزیابی، حریق حوضچه‌ای در نظر گرفته شده است. مشخصات گرافیکی این حوضچه‌ها مانند شکل ۳ است. ابعاد این حوضچه‌ها ۸×۸ و ۱۰×۱۰ سانتی‌متر با عمق ۵ سانتی‌متر می‌باشد. دو حوضچه مختلف با ابعاد معلوم که دارای HRR متفاوت هستند انتخاب شده است. در این تحقیق از معادلات جریان مغشوش LES استفاده شده است.



شکل ۳. تصویری از مدل حوضچه در نرم‌افزار FDS

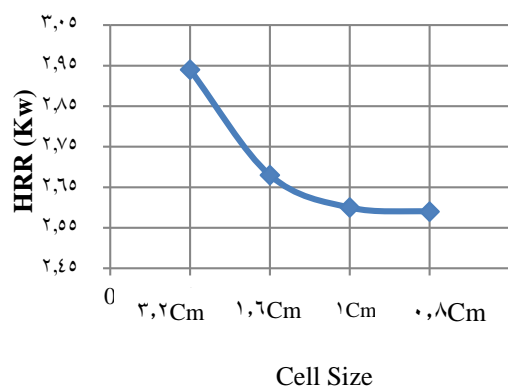
۴-۲ مش‌بندی

ردیف	عنوان تحقیق	سال	محقق
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 آتش-سوزی 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	دوازده امامی
۱۹	شبیه‌سازی عددی رفتار حریق در تونل	۲۰۱۳	ماپار و حیدری-نژاد
۲۰	بررسی تاثیر تهویه طولی روی آتش‌سوزی-های بزرگ در تونل‌های بین شهری	۲۰۱۳	رثوفی 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

۴. شبیه‌سازی CFD و شرایط مرزی

برای مدل‌سازی CFD آتش‌سوزی‌های تونلی می‌توان از مدل‌های مختلف یک بعدی تا سه بعدی، بسته به شرایط مسئله مورد نظر استفاده کرد [Weng et al. 2016]. این تکنیک می‌تواند درک

مختلف در اطراف این حوضچه تحت عنوان OPEN در نرم‌افزار تنظیم شده است. منبع آتش در نرم‌افزار با عنوان POOL FIRE تنظیم و ماده سوختنی آن متانول صنعتی می‌باشد. زمان شبیه‌سازی ۵۰۰ ثانیه است.



شکل ۴. تحلیل حساسیت مش‌بندی

۵. آزمایش‌های تجربی ونگ و همکاران

از آنجایی که یکی از اهداف این تحقیق به منظور ارزیابی نرم‌افزار FDS تخمین آهنگ رهایش گرما است بنابراین نیازمند انجام آزمایش‌های فیزیکی است تا بتوان نتایج حاصل از نرم‌افزار را با خروجی‌های حاصل از آزمایش تجربی مقایسه کرد و به ارزیابی مورد نظر دست یافت. بدین منظور از سری آزمایش‌های تجربی ونگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ استفاده شده است. در ادامه روش اندازه‌گیری آهنگ رهایش گرما توسط این محققین مطرح و سپس جدول آزمایشات ونگ ارائه خواهد شد.

ونگ و همکارانش برای حریق حوضچه‌ای از متانول ۹۵٪ صنعتی به عنوان ماده سوختنی استفاده کرده‌اند [Weng et al. 2016]. آنها چندین آزمایش را به انجام رسانده‌اند. روش کاری آنها بدین صورت است که بر مبنای معادله ۶ آهنگ رهایش گرما را به دست آورده‌اند [Users Guide for the CFI Software, 2008].

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c \quad (6)$$

انتخاب دقیق اندازه سلول‌های شبکه‌بندی یکی از پارامترهای مهم در مطالعات عددی به حساب می‌آید. زیرا دقت نتایج به دست آمده مستقیماً به اندازه سلول‌ها بستگی دارد. بنابراین فاصله‌ها در شبکه‌بندی مهم بوده و مقدار آن در هر مسئله با سایر مسائل متفاوت است و معمولاً باید فواصل مش را تا حدی کوچک کرد تا تغییری در نتایج نهایی دیده نشود که اصطلاحاً به این فرایند تحلیل حساسیت مش‌بندی گفته می‌شود. در عین حال می‌توان از معادله ۵ که در راهنمای نرم‌افزار FDS ارائه شده است برای تعیین اندازه سلول‌ها استفاده کرد [FDS User Guide, 2017].

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

D^* مشخصه آتش (متر)، Q آهنگ رهایش گرما (KW)، C ظرفیت گرمایی ویژه و ρ_a و T : چگالی و دمای هوا

برای محاسبه اندازه سلول‌ها کافی است ۰/۱ مقدار مشخصه آتش را به عنوان اندازه سلول‌ها 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 [FDS User Guide, 2017]. اما با این وجود برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از مش‌بندی تحلیل حساسیت انجام شده است. بدین منظور مقدار حاصل از یک‌دهم رابطه ۴ (که برابر با ۸ میلی‌متر است) و مقادیر بزرگتر از آن به عنوان ابعاد مش‌بندی انتخاب و مقدار آهنگ رهایش گرمای میانگین برای هر یک در شکل ۴ ترسیم شده است. همانگونه که از شکل ۴ برمی‌آید مقدار HRR از ابعاد ۱ سانتی‌متر به بعد ثابت مانده است. در نتیجه به منظور کاهش حجم محاسبات ابعاد ۱ سانتی‌متر به عنوان ابعاد نهایی مش‌بندی انتخاب شده است.

۴-۳ شرایط مرزی

در این تحقیق حوضچه‌های به کار رفته از جنس فلز است و در فضای باز و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. وجوه

۶. مدل فیزیکی کوچک مقیاس

به منظور اعتبارسنجی نرم‌افزار FDS 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 ۵ نشان داده شده است. اما از آنجا که شرایط پیاده‌سازی آزمایش بزرگ مقیاس در این تونل فراهم نیست مدل کوچک مقیاس این تونل طراحی و ساخته شده است که آزمایش‌های سرعت بحرانی در این مدل کوچک شده پیاده‌سازی گردید. این تونل با مقیاس ۱:۲۰ طراحی و نمایی از طرح آن در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ قابل مشاهده است. روش مقیاس‌گذاری به کار رفته روش Froude است که در ادامه تشریح می‌شود. بدنه تونل ساخته شده از بتن است و انحنای آن نیز براساس مدل واقعی تنظیم شده است.

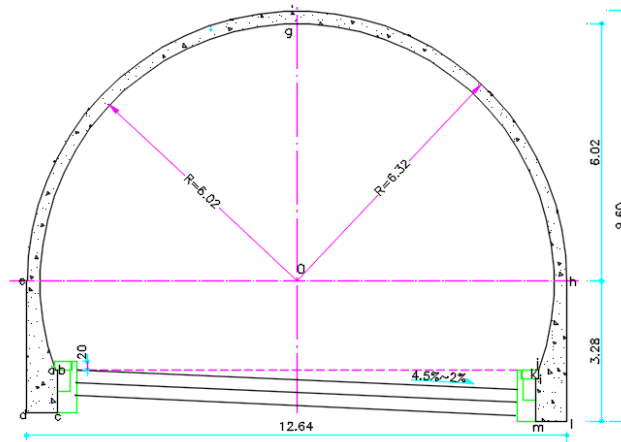
\dot{Q} آهنگ رهایش گرما و \dot{m}'' آهنگ مصرف جرم برای سوخت مورد نظر به صورت گرم بر واحد سطح بر ثانیه است. این مقدار بیانگر چگونگی مصرف سوخت در واحد زمان است و A سطح ماده سوختنی براساس مترمربع و ΔH_c گرمای موثر از احتراق براساس کیلوژول بر گرم.

ونگ و همکاران برای محاسبه آهنگ مصرف جرم ترازویی را طراحی کرده‌اند که این ترازو به نحوی است که به صورت خودکار وزن سوخت را ثبت می‌نماید. این ترازو تغییرات جرمی را با دقت ۰.۱ گرم، براساس زمان برداشت می‌کند و این تغییرات به عنوان \dot{m}'' در نظر گرفته خواهد شد. سپس گرمای موثر احتراق نیز براساس جداول استاندارد که برای انواع سوخت تهیه شده است قابل برداشت می‌باشد تنها پارامتر باقیمانده، سطح موثر سوخت است که این پارامتر نیز از مساحت حوضچه به دست می‌آید که در نتیجه مقدار رهایش گرما برای سوخت مورد نظر با توجه به معادله ۶ به دست آمده است. مشخصات هر یک از این حوضچه‌ها در جدول ۲ برای آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است.

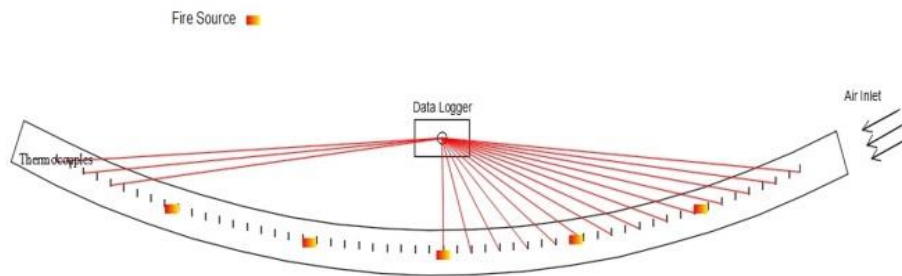
جدول ۲. مشخصات حریق‌های حوضچه‌ای [Weng et al. 2016]

آهنگ رهایش گرم (MW) در حالت بزرگ مقیاس	حداکثر آهنگ رهایش گرم (kw)	اندازه حوضچه (cm)
۰/۵	۱/۵۹	۸*۸
۱/۰۱	۳/۱	۱۰*۱۰
۲/۸۴	۸/۹	۱۵*۱۵

ارزیابی شبیه‌سازی FDS در تخمین سرعت بحرانی برای حریق حوضچه‌ای کوچک مقیاس در تونل منحنی



شکل ۵. مقطع تونل انتخاب شده (ابعاد به متر)



شکل ۶. تونل و ترموکوپل‌ها و منبع آتش



شکل ۷. تصویری از مدل نهایی ساخته شده

دلیل هزینه‌های پایین‌تر و دقت بالاتر در ثبت نتایج در میان محققین از اهمیت خاصی برخوردار هستند و در

برای انجام آزمایش تجربی، روش آزمایش بزرگ مقیاس و آزمایش کوچک مقیاس قابل کاربرد است. آزمایش‌های کوچک مقیاس به

[2016] در این جدول L بعد موجود بوده و اندیس های m و f به ترتیب نشان دهنده مدل مقیاس شده و بزرگ مقیاس می باشند. بر مبنای جدول ۳ طول تونل مقیاس شده ۱۵ متر است و تونل کوچک مقیاس با استفاده از بتن ساخته شده است. این تونل افقی بوده و یکی از دهانه ها به عنوان ورودی تونل در نظر گرفته شده است. یک فن محوری در ورودی نصب شده است. این فن جریان محوری را تأمین می کند و با استفاده از دیمر سرعت جریان هوا قابل تنظیم می باشد. دهانه ی دیگر مستقیماً با محیط بیرون در ارتباط است که می توان در این دهانه سرعت جریان هوا نیز تعیین شود.

جدول ۳. لیستی از ارتباط های مقیاس گذاری در

روش [Weng et al. 2016] Froude

مقیاس گذاری	واحد
$X_m/X_f = L_m/L_f$	هندسه (m)
$T_m = T_f$	دما (k)
$C_m = C_f$	جرم (mol)
$V_m/V_f = (L_m/L_f)^{1/2}$	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)

با استفاده از ترموکوپل های نوع K نصب شده در سقف تونل و دیتالاگر متصل به رایانه، دمای داخل تونل قابل اندازه گیری است و با بهره گرفتن از آن می توان میزان عقب زدگی دود را محاسبه نمود. زیرا دود حاصل از حریق دارای دمای بالاتری است. ترموکوپل های به کار رفته از نوع K با حداکثر دمای ۶۰- تا ۱۲۰۰ درجه سانتی-گراد هستند و سرعت جریان با استفاده از یک دیمر رومیزی با امکان کنترل جریان ورودی تنظیم می شود. تمامی اطلاعات دریافتی توسط ترموکوپل ها، با کمک یک دیتالاگر ۶۴ کاناله به رایانه منتقل شده است. از متانول ۹۵ درصد نیز به عنوان سوخت استفاده

پژوهش های متفاوتی از آن ها استفاده می شود. این روش بر پایه ی قانون تشابه است که این قانون در واقع یک پل ارتباطی بین وضعیت بزرگ مقیاس و واقعی با حالت مدل شده ی آن است [fire and smoke control in road tunnels, 1999] همان گونه که ذکر شد قانون تشابه عامل اصلی در ارتباط متناظر مدل آزمایشگاهی با وضعیت واقعی می باشد که اگر این ارتباط به درستی برقرار نشود نتایج حاصل از آن نیز قابل قبول نبوده و بیانگر شرایط بزرگ مقیاس نیز نمی باشد. باید توجه داشت که وضعیت مشاهده شده در خلال آتش سوزی به عنوان نتیجه ای از برخورد بین دو نیروی اصلی بروز می نماید که این دو نیرو عبارتند از [fire and smoke control in road tunnels, 1999]:

- حرکت طولی هوا که ناشی از اثر تهویه طبیعی یا مکانیکی است. این عامل توسط سرعت هوا موجود در بالادست آتش توصیف می شود که با عنوان نیروی U شناخته می شود.
- نیروی شناوری توسعه یافته توسط ستون آتش که بیشتر به واسطه گازهای پخش شده ی دارای دمای بالا به وجود می آید. ویژگی اصلی در این رابطه وجود اختلاف چگالی بین هوا و گازهای داغ است و با عنوان $\Delta\rho$ شناخته می شود.

به منظور نشان دادن ویژگی های جریان طولی، توجه به عدد رینولدز Re ضروری به نظر می رسد. که این عدد به صورت معادله ۷ نمایش داده می شود:

$$Re = \frac{U \cdot D_h}{\nu} \quad (7)$$

که در این رابطه D_h نشان دهنده قطر هیدرولیکی و U نشان دهنده ویسکوزیته سینماتیکی سیال، است.

همانگونه که پیش از این ذکر شد در این مقاله برای ساخت مدل فیزیکی کوچک مقیاس از روش مقیاس گذاری Froude استفاده شده است که ارتباط بین مدل مقیاس شده و واقعی بر مبنای روش Froude در جدول ۳ نشان داده شده است [Weng et al.]

شده است. ابعاد حوضچه حریق نیز $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر

می‌باشد.

۷. نتایج

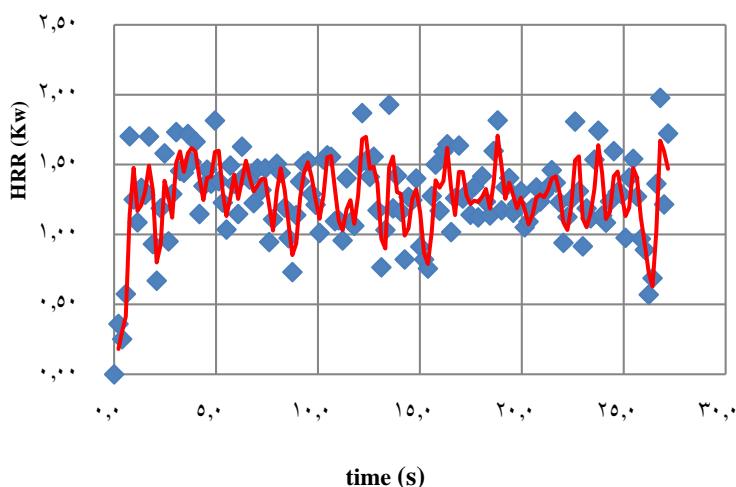
نتایج حاصل از شبیه‌سازی در چهار گروه قابل تقسیم است:

- تحلیل حساسیت شبکه‌بندی
- تاثیر لبه‌ی حوضچه
- ارزیابی تخمین HRR با مقادیر تجربی
- ارزیابی تخمین سرعت بحرانی برای مدل فیزیکی و

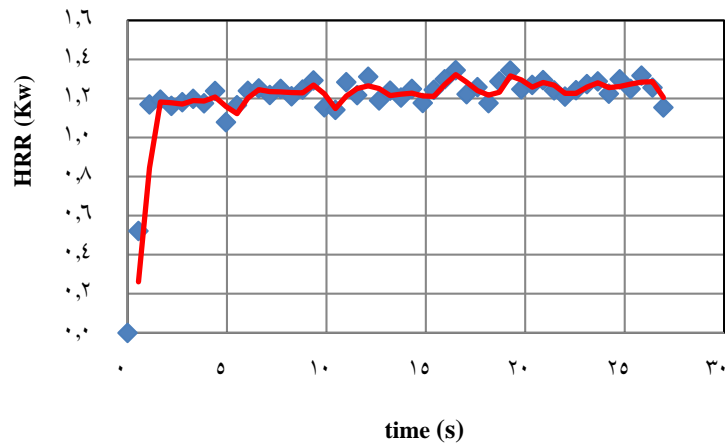
شبیه‌سازی FDS

۷-۱ تحلیل حساسیت شبکه‌بندی

نتایج به دست آمده برای تحلیل حساسیت در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. همانگونه که از این نمودار برمی‌آید در ابعاد بزرگتر از ۱ سانتی‌متر مقادیر آهنگ رهايش گرما بسیار پراکنده و در محدوده‌ی ۰/۹ تا ۲ کیلووات است در حالی‌که نتایج آزمایش‌های تجربی برای حوضچه‌ای با این ابعاد در حدود ۱/۵ کیلووات است که در حدود $\pm 35\%$ با مقدار واقعی اختلاف دارد. بنابراین اندازه سلول‌های شبیه‌سازی تاثیر به‌سزایی در تخمین مقدار HRR دارد و نتایج شبیه‌سازی شدیداً به مش‌بندی وابسته است.



شکل ۸ مقادیر HRR برای حوضچه با ابعاد 8×8 سانتی‌متر و سلول‌های $1/6$ سانتی‌متر

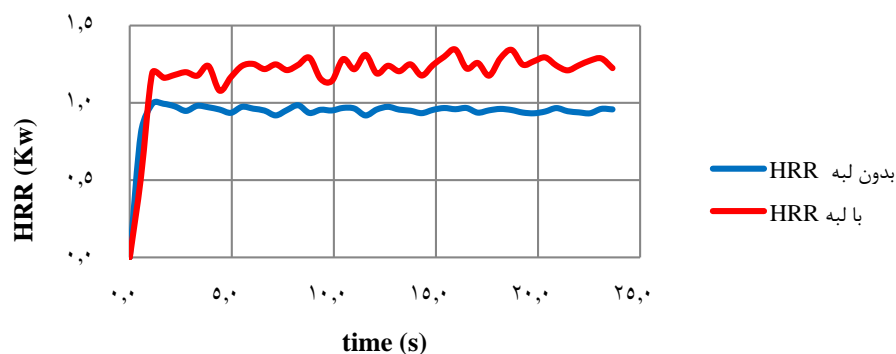


شکل ۹. مقادیر HRR برای حوضچه با ابعاد ۸*۸ سانتی متر و سلول‌های ۱ سانتی متر

مقدار حداکثر آهنگ رهائش گرما حدود ۳۰٪ افزایش داشته باشد که علت آن با افزایش تشعشع و تابش ناشی از وجود لبه توضیح داده می‌شود زیرا وجود لبه باعث می‌شود که تابش حاصل از آتش مجدداً به آن منعکس شود و دمای حاصل را بالا ببرد، از طرفی شرایط واقعی نیز با این حالت سازگاری بیشتری دارد.

۲-۷ تاثیر لبهی حوضچه

لبه‌ی حوضچه تاثیر قابل توجهی در میزان آهنگ رهائش گرما حاصل از سوختن دارد. در شکل ۱۰ تفاوت HRR در دو حالت نشان داده شده است. نمودار آبی رنگ در حوضچه‌ای است که لبه‌ی سوخت با لبه‌ی حوضچه برابر می‌باشد و نمودار قرمز رنگ در حوضچه‌ای با لبه‌ی ۵ سانتی متر بالاتر از سطح سوخت است. همانگونه که از شکل ۱۰ برمی‌آید لبه حوضچه سبب شده است که



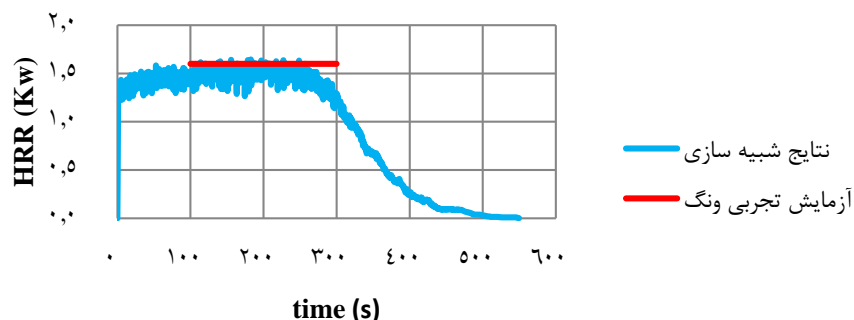
شکل ۱۰. مقایسه آهنگ رهائش گرما در حالت حوضچه لبه‌دار و بدون لبه

۳-۷ ارزیابی تخمین آهنگ رهائش گرما با مقادیر

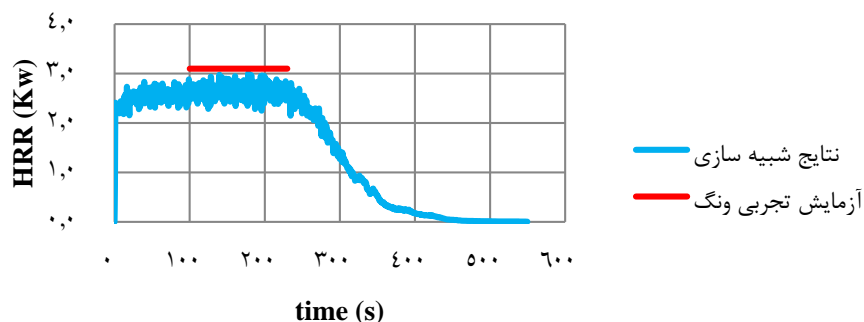
تجربی

مدنظر به دست آمد. همانگونه که در این اشکال مشخص است مقدار آهنگ رهائش گرما از صفر شروع شده و پس از مرحله گرگرفتگی به توسعه آتش و زوال ختم شده است.

پس از اعمال شرایط مرزی و انجام شبیه‌سازی، اشکال ۱۱ و ۱۲ به عنوان نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار FDS برای دو حوضچه



شکل ۱۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی FDS و آزمایش تجربی برای حوضچه ۸*۸



شکل ۱۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی FDS و آزمایش تجربی برای حوضچه ۱۰*۱۰

است نتایج حاصل از شبیه‌سازی FDS و آزمایشات تجربی ونگ و همکاران تطابق بسیار نزدیکی دارند و این نرم‌افزار با دقت مناسبی مقدار آهنگ رهائش گرما را تخمین زده است.

۴-۷ ارزیابی تخمین سرعت بحرانی در شبیه‌سازی

FDS

در شکل ۱۳ مدل ساخته شده در نرم‌افزار FDS نشان داده شده است. برای ارزیابی تخمین سرعت بحرانی توسط نرم‌افزار ابتدا در مدل فیزیکی ساخته شده یک حریق حوضچه‌ای با ابعاد مساوی ۱۰

نمودار آبی رنگ حاصل از شبیه‌سازی FDS و قرمز رنگ نتایج حاصل از آزمایشات تجربی است. برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مقادیر آزمایش‌های تجربی لازم است که بخش مربوط به توسعه یافتگی کامل آتش که از زمان ۱۰۰ تا ۲۰۰ ثانیه است در هر دو ملاک مقایسه باشد. زیرا اعداد حاصل از آزمایش‌های ونگ و همکاران در واقع حداکثر آهنگ رهائش گرما مربوط به حریق توسعه یافته است. لذا بخش میانی نمودارهای شبیه‌سازی با مقادیر تجربی مقایسه می‌شود. همانگونه که از اشکال ۱۱ و ۱۲ مشخص

جدول ۴. آزمایش‌های تجربی در تونل ساخته شده و طول

عقب‌زدگی مرتبط

شماره آزمایش	آهنگ رهایش گرما (KW)	شیب تونل	سرعت	طول
			جریان هوا (m/s)	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

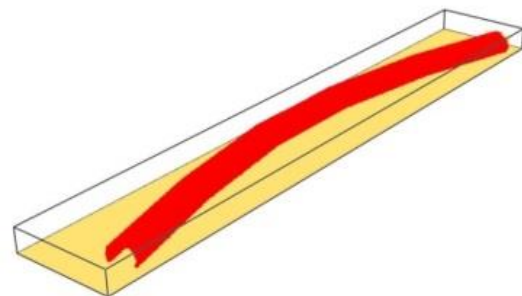


شکل ۱۴. حریق تونل فیزیکی

ترموکوپل ۴ در ده سانتی‌متر قبل از آتش (مستقر در بالادست) در سقف تونل و ترموکوپل ۵ در پنج سانتی‌متر قبل از آتش (مستقر در بالادست) قرار دارد. اگر در هر آزمایش ترموکوپل ۴ و ۵ دمایی بالاتر از محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) را ثبت کنند به معنای وجود عقب‌زدگی دود خواهد بود. در شکل ۱۵ نتایج ثبت دمایی برای ترموکوپل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. سرعت جریان برای این

سانتی‌متری در مرکز محوری تونل در نظر گرفته شده است سپس به کمک فن محوری و دیمر سرعت جریان هوا افزایش یافته است تا زمانی که مقدار عقب‌زدگی دود مرتبط با دمای برداشت شده توسط ترموکوپل‌ها به صفر برسد. برای این منظور ترموکوپل‌ها در بالادست و پایین دست آتش نصب شده‌اند و در صورتی که ترموکوپل‌های نصب شده در بالادست آتش، دمای بالاتر از محیط اولیه را ثبت نکنند به مفهوم عدم عقب‌زدگی دود خواهد بود و در شکل ۱۴ نمایی از حریق درون تونل نشان داده شده است.

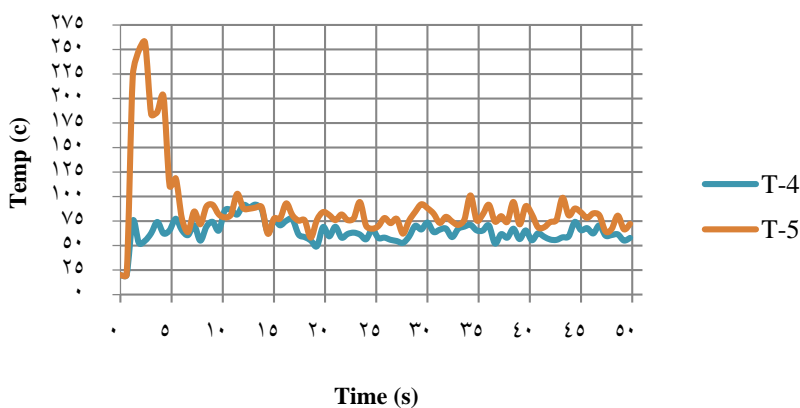
در جدول ۴ نتایج آزمایش فیزیکی نشان داده شده است. برای تشخیص سرعت بحرانی در آزمایش‌های فیزیکی از ترموکوپل‌های نصب شده کمک گرفته می‌شود. همانگونه که پیش از این ذکر شد روش کار بدین صورت است که با افزایش سرعت جریان تهویه با استفاده از دیمر، در اولین آزمایشی که ترموکوپل‌های بالادست حریق در تونل، دمایی معادل با شرایط محیطی را ثبت نمایند به منزله وجود سرعت بحرانی در تونل است. همانگونه که از نتایج جدول ۴ مشخص است، سرعت بحرانی برابر با ۰/۹۰ متر بر ثانیه خواهد بود. برخی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی FDS نیز در شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است که نتیجه ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌های نصب شده در بالادست حریق را به ترتیب در سرعت کمتر از سرعت بحرانی و در سرعتی برابر با سرعت بحرانی نشان می‌دهند.



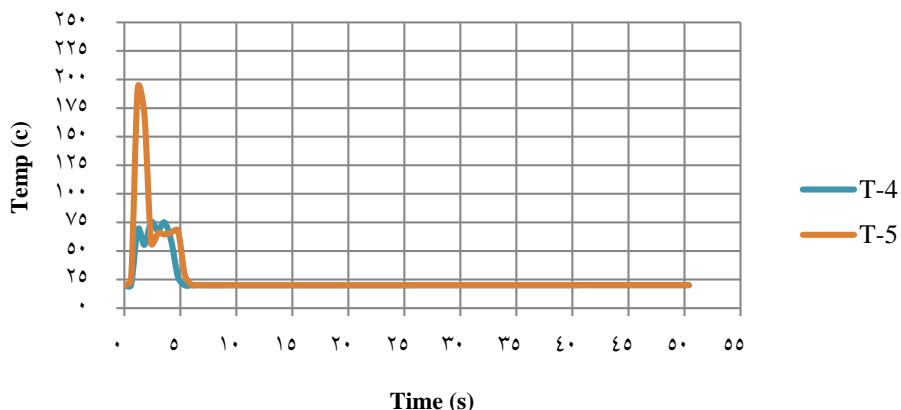
شکل ۱۳. مدل ساخته شده در نرم‌افزار FDS

۱۰*۱۰ سانتی‌متر قرار داده شده است و در شکل ۱۷ نیز نمایی از مدل این تونل قابل مشاهده است. نتایج به دست آمده حاکی از نیاز به سرعت جریان هوای بیشتر در صورت وجود انحنا می‌باشد. علت این تغییر در سرعت بحرانی را باید حاکی از تغییرات به وجود آمده در خط نیمرخ سرعت دانست زیرا در انحناها پروفایل سرعت جریان از حالت تقارن خارج و سبب تغییر در مقدار سرعت بحرانی می‌شود. در نتیجه سرعت بحرانی مورد نیاز در تونل با هندسه منحنی از تونل مستقیم بیشتر است. در جدول ۵ مقایسه سرعت بحرانی در حالت منحنی و مستقیم نشان داده شده است.

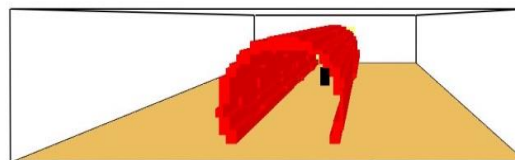
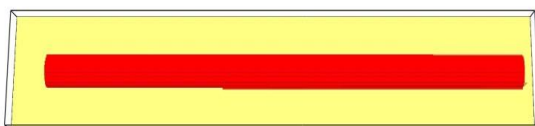
آزمایش ۰/۷۲ متر بر ثانیه بوده و مشهود است که ترموکوپل ۴ و ۵ که در بالادست آتش است دمای بالاتری از محیط را ثبت نموده و بیانگر وجود عقب‌زدگی دود است. در شکل ۱۶ نیز سرعت جریان برای این آزمایش ۰/۹۲ متر بر ثانیه است و ترموکوپل ۵ (T-5) و ترموکوپل ۴ (T-4) دمایی بالاتر از محیط را ثبت نکرده و نشان دهنده عدم عقب‌زدگی دود می‌باشد. براساس این نتایج سرعت ۰/۹۲ به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که از نتایج برمی‌آید نرم‌افزار با دقت مناسبی سرعت بحرانی را تخمین زده است. اما برای مقایسه سرعت بحرانی در تونل منحنی با تونل مستقیم در محیط نرم‌افزار FDS یک تونل با سطح مقطع مدل فیزیکی ساخته شده که طول آن ۱۵ متر و در مرکز آن حریق حوضچه‌ای با ابعاد



شکل ۱۵. نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌ها در شبیه‌سازی برای سرعت جریان ۰/۷۲ متر بر ثانیه



شکل ۱۶. نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌ها در شبیه‌سازی برای سرعت جریان ۰/۹۲ متر بر ثانیه



شکل ۱۷. دید از بالا (سمت چپ) و سطح مقطع (سمت راست) تونل مستقیم در محیط FDS

جدول ۵. مقایسه نتایج سرعت بحرانی در تونل مستقیم و منحنی

براساس شبیه‌سازی FDS

سرعت بحرانی (m/s)	HRR (Kw)	شیب تونل	طول تونل (متر)	نوع تونل
۰/۹۲	۳/۱	۰	۱۵	منحنی
۰/۸۲	۳/۱	۰	۱۵	مستقیم (بدون انحنای)

گرما بررسی شد و مشخص گردید که ابعاد شبکه‌بندی در میزان تخمین آهنگ رهائش گرما بسیار موثر است. در بخش دوم تاثیر لبه‌حوضچه در تخمین بررسی گردید و نبود لبه حوضچه حدود ۳۰٪ سبب کاهش تخمین شد. در بخش سوم نتایج حاصل از آهنگ رهائش گرما مربوط به دو حوضچه با ابعاد معلوم مقایسه شد و معلوم گردید که نرم‌افزار به صورت مناسبی قادر به تخمین آهنگ رهائش گرما است. در بخش چهارم یک تونل کوچک مقیاس ساخته شد و با استفاده از تجهیزات مختلف سرعت بحرانی در این تونل مشخص گردید. نتایج حاصل از آن با نتایج شبیه‌سازی FDS مقایسه شد و بررسی آن گویای دقت مناسب و قابل اعتماد در تخمین سرعت بحرانی است. همچنین سرعت بحرانی در تونل منحنی با تونل مستقیم مقایسه شد و نتایج به دست آمده حاکی از نیاز به سرعت جریان هوای بیشتر در صورت وجود انحنای می‌باشد.

۸. جمع‌بندی

در این تحقیق به ارزیابی نرم‌افزار FDS در شبیه‌سازی حریق حوضچه‌ای و سرعت بحرانی در تونل منحنی پرداخته شد. نتایج در چهار بخش مجزا دسته‌بندی گردید. در بخش اول تحلیل حساسیت شبکه‌بندی و تاثیر آن در تخمین میزان آهنگ رهائش

-“fire and smoke control in road tunnels”, (1999).
PIARC Committee on Road Tunnels.

-Hu, L., Huo, R., Chow, W., (2008). “Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires”, *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 32. pp. 1468–1483.

-Ingason, H., Li, Y., Lönnemark, I., (2015). “Tunnel Fire Dynamics”, Springer New York Heidelberg Dordrecht London.

-Karlsson, B. and Quintiere, J. (2000). “Enclosure Fire Dynamics”, *CRC Press*.

-KO, Y. (2011). “A Study of the Heat Release Rate of Tunnel Fires and the Interaction between Suppression and Longitudinal Air Flows in Tunnels”, Phd thesis.

-Lee, C., Chaiken, R., Singer, M., (1979). “Interaction between Duct Fires and Ventilation Flow: An Experimental Study”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 20. pp. 59-72.

-Oka, Y., Atkinson, G., (1995), “Control of Smoke Flow in Tunnel Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 25. pp. 305-322.

-Thomas, P., (1958), “the movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires”.

-Users Guide for the CFI software, (2008).

-Wang, F., Wang, M., Carvel, R. & Wang, Y. (2017). “Numerical study on fire smoke movement and control in curved road tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 67. pp. 1-7.

در نتیجه سرعت بحرانی مورد نیاز در تونل با هندسه منحنی از تونل مستقیم بیشتر است.

۹. پی‌نوشت‌ها

- 1- Heat Release Rate
- 2- Critical Froude Model
- 3- Velocity head
- 4- Danziger
- 5- Kennedy
- 6- Lee
- 7- Oka
- 8- Atkinson
- 9- Model-Scale
- 10- Wu
- 11- Bakar
- 12- Hu
- 13- Reynolds number

۱۰. منابع

-Bertola, V. and Cafaro, E. (2009). “Deterministic–stochastic approach to compartment fire modeling”, *Proc. Royal Society journal*. vol. 465. pp. 1029-1041.

-Blagojevi, M., Pesic, D. (2011). “a new curve for temperature-time relationship in compartment fire”, *Thermal Science journal*. Vol. 15. No. 2. pp. 339-352.

-Danziger, H., Kennedy, D., (1982). “longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels”, in: *Proceedings of the Fourth International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 169-186.

-Drysedale, D. (2011). “An introduction to fire dynamics”, *Library of Congress Cataloguing-in-Publication Data John Wiley & Sons*.

-FDS User Guide. (2017).

systems a study of the critical velocity”, Fire Safety Journal. Vol. 35. Issue 4. pp. 363–390.

-Zigar, D., Jovanovic, D., Zdravkovic, M. (2011). “Cfd Study Of Fire Protection Systems In Tunnel Fires”, Safety Engineering. Vol. 1. No.1. pp. 11-16.

- مدنی. حسن، (۱۳۹۵). "تونلسازی". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

-Weng, M. L. (2016). “study on the critical velocity in a sloping tunnel fire under longitudinal ventilation”, Applied Thermal Engineering. Vol. 94. pp. 422-434.

-Weng, M., Lu, X., Liu, F., Du, C. (2016). “study on the critical velocity in a sloping tunnel fire under longitudinal ventilation”, Applied Thermal Engineering. Vol. 94. pp. 422-434.

-Wu, Y., Bakar, M., (2000). “Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation

یحیی شمس، درجه کارشناسی از مهندسی معدن را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی بیرجند و درجه کارشناسی ارشد را در همان رشته در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی معدن در دانشگاه صنعتی شاهرود است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل‌سازی حریق در تونل‌ها و بررسی ایمنی و همچنین ارزیابی سیستم‌های تهویه در تونل‌های جاده‌ای و معدنی است و در حال حاضر رئیس معادن شرکت عطارد شاهرود می‌باشد.



فرهنگ سرشکی، درجه کارشناسی از مهندسی معدن را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد را در همان رشته در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی معدن از دانشگاه ولنگونگ استرالیا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تهویه و انفجار بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه صنعتی شاهرود است.



رضا خالوکاکی، درجه کارشناسی از مهندسی معدن را در سال ۱۳۶۳ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد را در همان رشته در سال ۱۳۶۵ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۷۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی معدن از دانشگاه لیدز انگلستان گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری چند متغیره و کاربرد کامپیوتر در طراحی معادن و تهیه نرم افزارها بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه صنعتی شاهرود است.

