

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

شبیه‌سازی فیزیکی و عددی سرعت بحرانی در آتش‌سوزی تونل راه تحت تهویه طولی

نگارنده: یحیی شمس

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر رضا کاکائی

شهریور ۱۴۰۰

فرم صورت جلسه دفاع

تقدیر و تشکر

پاک و منزّه است ربّ آسمان‌ها و زمین که در این راه، تنها او یاری دهنده بود و اگر جز رحمت و نیروی او در جریان نبود، هرگز مرا قدرت حرکت در هیچ مسیری نبود چه رسد به این که در راه تفصیل و دانش کام‌گذارم. اینک بر خود لازم می‌دانم که از تمامی کسانی که در این راه به لطف خداوند گرمی بخش بودند، تشکر و قدردانی نمایم.

از اساتید موقر و ارجمندم آقای دکتر فرهنگ سرشکی و آقای دکتر رضا لکائی به دلیل زحمات بی‌شائبه در تمامی مراحل تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

یهیی شمس

۱۴۰۰/۶/۱۰

تعهدنامه

اینجانب یحیی شمس دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله شبیه‌سازی فیزیکی و عددی سرعت بحرانی در آتش‌سوزی تونل تحت تهویه طولی تحت راهنمایی آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر رضا کاکائی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به کاربرد روزافزون تونل‌ها در دنیای امروزی و با توجه به محیط بسته و طولی آن‌ها، افزایش ایمنی و طراحی‌های مرتبط با کنترل حوادث حریق در آن‌ها دغدغه بسیاری از مهندسان طراح این سازه به شمار می‌رود. در این میان، کنترل سرعت جریان هوا در حین حریق در ارتباط مستقیم با جان افراد حاضر در تونل است و عدم تأمین دقیق این جریان و سرعت مناسب آن که به عنوان سرعت بحرانی شناخته می‌شود سبب بروز خسارت‌های جبران‌ناپذیری می‌شود. در این رساله تمرکز اصلی بر تعیین متغیرهای حائز اهمیت و کاربردی با در نظر گرفتن ارائه مدلی نزدیک‌تر به واقعیت بوده است تا بتوان با دقت بالاتری بر اساس شرایط هر تونل، سرعت بحرانی مورد نیاز را تخمین زده و گامی در راستای افزایش ایمنی برداشت. در این رساله در گام اول تعداد ۱۴ پارامتر مؤثر بر حریق شناسایی شد که تعدادی از این پارامترها حذف شد و در انتها پارامترهای طول تونل، سطح مقطع، جابه‌جایی عرضی، انحنای هندسی و HRR به عنوان متغیرهای اصلی و ورودی به مدل در نظر گرفته شده است و با کمک شبیه‌سازی‌های عددی در سناریوهای مختلف تأثیر پارامترهای متعددی بر سرعت بحرانی مورد ارزیابی قرار گرفت. در گام دوم، با ساخت مدل فیزیکی و شبیه‌سازی سناریوهای متفاوت، از روش‌های تخمین برای تخمین سرعت بحرانی بهره برده شد؛ بر اساس نتایج به دست آمده، ضریب تعیین به ترتیب برای رگرسیون چندگانه خطی، غیرخطی و روش شبکه عصبی مصنوعی برابر با ۰/۸۴، ۰/۹۵ و ۰/۹۷ و مجذور میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۰۸۲، ۰/۰۴۵ و ۰/۰۲ است که بیانگر کارایی بهتر مدل شبکه عصبی مصنوعی بوده و به عنوان مدل تخمین گر سرعت بحرانی انتخاب شده است. در گام سوم، به منظور ارزیابی مدل تخمین گر، داده‌های حریق واقعی در دو تونل بزرگ مقیاس با نتایج مدل نهایی مقایسه شده‌اند. نتایج مدل تخمین گر در حریق تونل مموریال با حدود ۰/۰۸ اختلاف کاهشی، مقدار سرعت بحرانی را ۲/۴۶ متر بر ثانیه تخمین زده شد. در حریق تونل رونهامر نیز با حدود ۰/۰۵ اختلاف افزایشی، مقدار سرعت بحرانی مساوی ۲/۵۵ متر بر ثانیه تعیین گردید. می‌توان با نتایج به دست آمده دریافت که مدل تخمین گر تا حد زیادی قابل اعتماد بوده و توان تخمینی مناسبی را از خود نشان داده است.

کلمات کلیدی: حریق تونلی، سرعت بحرانی، مدل کوچک مقیاس، تخمین سرعت بحرانی

لیست مقالات مستخرج از رساله

- شمس، ی.، سرشکی، ف.، کاکائی، ر.، ارزیابی شبیه‌سازی FDS در تخمین سرعت بحرانی برای حریق حوضچه‌ای کوچک مقیاس در تونل منحنی، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۲، شماره ۴، ۱۴۰۰.
- شمس، ی.، سرشکی، ف.، کاکائی، ارزیابی تأثیر آهنگ رهایش گرما بر تخمین سرعت بحرانی در حریق تونل‌های منحنی، نشریه مهندسی منابع معدنی، ۱۴۰۰.

فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات تحقیق
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- سؤال‌های اصلی پژوهش
۵	۱-۳- ضرورت انجام پژوهش
۵	۱-۴- هدف پژوهش
۶	۱-۵- فرضیات پژوهش
۶	۱-۶- ساختار رساله
۱۰	۱-۷- آتش‌سوزی در تونل
۱۳	۱-۸- توسعه آتش
۱۵	۱-۹- برآورد اندازه آتش
۱۷	۱-۱۰- انواع سیستم تهویه در تونل‌ها
۱۷	۱-۱۰-۱- تهویه طبیعی
۱۸	۱-۱۰-۲- تهویه با وسایل نقلیه (اثر پیستونی)
۱۸	۱-۱۰-۳- تهویه مکانیکی
۲۲	۱-۱۱- عملکرد سیستم‌های تهویه تحت آتش‌سوزی
۲۵	۱-۱۲- پارامترهای مهم آتش‌سوزی
۲۵	۱-۱۲-۱- دما
۲۷	۱-۱۲-۲- تابش
۲۸	۱-۱۲-۳- تمرکز گاز ناشی از آتش‌سوزی در تونل
۲۸	۱-۱۲-۴- آهنگ رهایش گرما از آتش
۲۹	۱-۱۲-۵- لایه‌بندی دود
۳۱	۱-۱۲-۶- طول شعله آتش
۳۲	۱-۱۳- روش‌های مطالعه‌ی آتش‌سوزی در تونل‌ها
۳۳	۱-۱۳-۱- روش شبیه‌سازی عددی
۳۵	۱-۱۳-۲- روش آزمایش‌های تجربی
۳۶	۱-۱۴- جمع‌بندی
۳۷	فصل دوم: بررسی سابقه‌ی علمی موضوع
۳۸	۲-۱- مقدمه
۳۸	۲-۲- آتش‌سوزی درون تونل‌ها
۴۲	۲-۳- آزمایش‌های آتش‌سوزی
۴۴	۲-۴- مدل‌های تخمین سرعت بحرانی
۴۵	۲-۴-۱- مدل بحرانی فرود
۴۸	۲-۴-۲- مدل‌های بی‌بعد
۵۶	۲-۵- جمع‌بندی
۵۷	فصل سوم: شبیه‌سازی حریق
۵۸	۳-۱- مقدمه
۵۹	۳-۲- شبیه‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس

۶۱	۳-۲-۱- مقیاس گذاری فشاری
۶۱	۳-۲-۲- مقیاس گذاری آنالوگ
۶۲	۳-۲-۳- مقیاس گذاری فرود
۶۳	۳-۳- مدل فیزیکی کوچک مقیاس
۷۲	۳-۳-۱- محاسبه میزان عقب زدگی در تونل کوچک مقیاس ملاوی
۷۴	۳-۳-۲- محاسبه سرعت بحرانی در تونل کوچک مقیاس ملاوی
۷۵	۳-۴- شبیه سازی عددی
۷۵	۳-۴-۱- ساختار برنامه های CFD
۷۷	۳-۴-۲- شبیه سازی عددی حریق
۸۳	۳-۵- شبیه سازی عددی حریق تونل
۸۶	۳-۵-۱- مقایسه نتایج عددی و فیزیکی تخمین سرعت بحرانی در تونل کوچک مقیاس
۹۰	۳-۵-۲- ارزیابی FDS در تخمین HRR
۹۲	۳-۵-۳- مقایسه سرعت بحرانی تونل منحنی و مستقیم
۹۳	۳-۵-۴- ارزیابی سرعت بحرانی بر اساس تغییر در HRR برای تونل منحنی
۹۴	۳-۵-۵- مقایسه تغییرات سرعت بحرانی بر مبنای HRR در تونل منحنی و تونل مستقیم
۹۵	۳-۵-۶- تأثیر جابه جایی طولی بر سرعت بحرانی در تونل منحنی
۹۷	۳-۵-۷- تأثیر جابه جایی عرضی بر سرعت بحرانی در تونل منحنی
۹۸	۳-۶- جمع بندی
۹۹	فصل چهارم: ارائه مدل تخمین سرعت بحرانی
۱۰۰	۴-۱- مقدمه
۱۰۰	۴-۲- عوامل مؤثر بر سرعت بحرانی
۱۰۴	۴-۳- تأثیر پارامترهای منتخب بر سرعت بحرانی
۱۰۴	۴-۳-۱- تأثیر طول تونل
۱۰۵	۴-۳-۲- تأثیر سطح مقطع تونل
۱۰۶	۴-۳-۳- تأثیر جابه جایی عرضی
۱۰۶	۴-۳-۴- تأثیر انحنای تونل
۱۰۷	۴-۳-۵- تأثیر HRR
۱۰۷	۴-۴- تخمین سرعت بحرانی
۱۰۷	۴-۴-۱- تخمین سرعت بحرانی با استفاده از رگرسیون
۱۱۸	۴-۴-۲- تخمین سرعت بحرانی با استفاده از شبکه عصبی
۱۲۳	۴-۵- انتخاب مدل نهایی سرعت بحرانی
۱۲۶	۴-۶- تأثیر پارامتر طول تونل بر مدل نهایی
۱۲۸	۴-۷- روند نهایی در تخمین سرعت بحرانی تونل حین حریق
۱۲۸	۴-۸- ارزیابی مدل نهایی در تخمین سرعت بحرانی برای حریق واقعی تونل
۱۲۹	۴-۸-۱- حریق تونل مموریال
۱۳۰	۴-۸-۲- حریق تونل رونهامر
۱۳۴	۴-۹- جمع بندی
۱۳۵	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۳۶	۵-۱- نتیجه گیری

فهرست جدول‌ها

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۱: مثال‌هایی از انرژی حاصل از احتراق در تونل	۱۵
جدول ۲-۱: اندازه آتش برای وسایل نقلیه مختلف	۱۶
جدول ۱-۲: آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای بدون تلفات	۳۹
جدول ۲-۲: آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای با تلفات جانی	۴۰
جدول ۳-۲: خلاصه‌ی حوادث آتش‌سوزی در تونل‌های راه‌آهن	۴۱
جدول ۴-۲: خلاصه‌ای حوادث آتش‌سوزی در تونل‌های مترو	۴۱
جدول ۵-۲: آزمایش‌های بزرگ مقیاس آتش‌سوزی در تونل	۴۳
جدول ۶-۲: خلاصه تحقیقات انجام شده برای تعیین سرعت بحرانی	۵۴
جدول ۷-۲: بررسی پارامترهای مؤثر توسط محققین گذشته	۵۵
جدول ۸-۲: بررسی پارامترهای مؤثر توسط محققین گذشته	۵۵
جدول ۱-۳: ارتباط مقیاس‌گذاری در روش فرود	۶۳
جدول ۲-۳: آزمایش‌های تجربی در تونل ساخته شده و طول عقب‌زدگی مرتبط	۷۴
جدول ۳-۳: ویژگی‌های حریق‌های حوضچه‌ای	۹۱
جدول ۴-۳: نتایج سرعت بحرانی در تونل مستقیم و منحنی بر مبنای FDS	۹۳
جدول ۵-۳: مقایسه نتایج سرعت بحرانی در تونل ملایم بر اساس مدل‌های مختلف	۹۸
جدول ۱-۴: بخشی از داده‌های ۸۴ تایی	۱۱۰
جدول ۲-۴: نتایج بررسی همبستگی متغیرها	۱۱۴
جدول ۳-۴: مقایسه ضریب تعیین مدل‌های مختلف غیرخطی	۱۱۶
جدول ۴-۴: مدل‌های مختلف و ویژگی‌های آن‌ها بر مبنای شبکه عصبی	۱۲۱
جدول ۵-۴: ارزیابی مدل‌های مختلف به منظور تخمین سرعت بحرانی	۱۲۳
جدول ۶-۴: داده‌های آزمایش T0	۱۳۳

فهرست شکل‌ها

عنوان	شماره صفحه
شکل ۱-۱: روند نمای تحقیق	۸
شکل ۲-۱: لایه‌بندی دود در محفظه‌ی آتش در مراحل اولیه آن	۱۲
شکل ۳-۱: لایه‌بندی دود در تونل با جریان طولی کم	۱۲
شکل ۴-۱: فازهای مختلف آتش در یک محفظه	۱۳
شکل ۵-۱: طرح شماتیک بین آتش‌سوزی تحت کنترل سوخت و تهویه در حالت محفظه و تونل	۱۴
شکل ۶-۱: تهویه طولی با استفاده از جت فن	۱۹
شکل ۷-۱: تهویه طولی با استفاده از دوپل و فن	۱۹
شکل ۸-۱: سیستم تهویه عرضی	۲۰
شکل ۹-۱: سیستم تهویه عرضی	۲۰
شکل ۱۰-۱: تهویه نیمه عرضی (تأمین هوا به صورت عرضی)	۲۱
شکل ۱۱-۱: تهویه نیمه عرضی (خروج هوا به صورت عرضی)	۲۱
شکل ۱۲-۱: تهویه نیمه عرضی	۲۱
شکل ۱۳-۱: آتش‌سوزی در تونل با تهویه طبیعی	۲۳
شکل ۱۴-۱: تأثیر سرعت طولی جریان هوا در عقب زدگی و انتشار دود	۲۴
شکل ۱۵-۱: منحنی‌های دمایی برای مواد مختلف برای مشخص شدن دمای آزاد شده در طی زمان	۲۶
شکل ۱۶-۱: تابش حاصل از آتش‌سوزی در آزمایش‌های بزرگ مقیاس	۲۷
شکل ۱۷-۱: طرحی ساده از لایه‌بندی دود در تونل با سرعت کم جریان هوا	۳۰
شکل ۱۸-۱: طرحی ساده از لایه‌بندی دود در تونل با سرعت متوسط جریان هوا	۳۰
شکل ۱۹-۱: طرحی ساده از لایه‌بندی دود در تونل با سرعت زیاد جریان هوا	۳۱
شکل ۲۰-۱: طول شعله در آتش‌سوزی‌های بزرگ تونلی تحت تهویه طبیعی	۳۲
شکل ۲۱-۱: طول شعله در آتش‌سوزی‌های بزرگ تونلی با تهویه سرعت بالا	۳۲
شکل ۲۲-۱: مدل‌سازی چند مقیاسی	۳۵
شکل ۱-۲: طرحی کلی از سرعت بحرانی در آتش‌سوزی	۴۵
شکل ۲-۲: مدل فیزیکی مدنظر توماس برای آتش‌سوزی درون تونل	۴۷
شکل ۳-۲: تأثیر انسداد در سرعت بحرانی (محور افقی: آهنگ رهایش گرما بی‌بعد، محور قائم سرعت بحرانی بی‌بعد)	۵۳
شکل ۱-۳: شبیه‌سازی دود با استفاده از محلول آب و نمک	۶۲
شکل ۲-۳: مقطع تونل ملاوی (ابعاد به متر)	۶۴
شکل ۳-۳: لوله بتنی ساخته شده	۶۵
شکل ۴-۳: تصویری از مدل ساخته شده	۶۵
شکل ۵-۳: ترموکوپل نوع k استفاده شده در سقف تونل	۶۶
شکل ۶-۳: ثبات داده نگار ۶۴ کاناله	۶۷
شکل ۷-۳: حوضچه حریق با ابعاد سطح ۱۰×۱۰ سانتی‌متری	۶۸
شکل ۸-۳: فن محوری تأمین‌کننده جریان هوا	۶۸
شکل ۹-۳: باکس جریان هوا	۶۹
شکل ۱۰-۳: دیمر رومیزی تغییر سرعت جریان هوا	۶۹
شکل ۱۱-۳: سرعت‌سنج جریان هوا	۷۰

- شکل ۳-۱۲: نرم افزار ثبت داده های دریافتی از ثبات داده نگار
- شکل ۳-۱۳: نمونه ای از عکس برداری حریق تونل توسط دوربین های مخصوص در تمام بخش ها
- شکل ۳-۱۴: پلان تونل و ترموکوپل های نصب شده در سقف تونل
- شکل ۳-۱۵: دود رنگی در حریق تونلی
- شکل ۳-۱۶: تصویری از محیط متن باز FDS
- شکل ۳-۱۷: تصویری از مدل حوضچه در نرم افزار FDS
- شکل ۳-۱۸: تحلیل حساسیت مش بندی
- شکل ۳-۱۹: مقادیر HRR برای حوضچه با ابعاد 8×8 سانتی متر و سلول های $1/6$ سانتی متر
- شکل ۳-۲۰: مقادیر HRR برای حوضچه با ابعاد 8×8 سانتی متر و سلول های 1 سانتی متر
- شکل ۳-۲۱: مدل ساخته شده از تونل کوچک مقیاس آزمایشگاهی در FDS
- شکل ۳-۲۲: مقطع تونل و حوضچه ی حریق
- شکل ۳-۲۳: تصاویر توسعه دود ناشی از حریق در سرعت های جریان متفاوت
- شکل ۳-۲۴: نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل ها در شبیه سازی برای سرعت جریان 0.72 متر بر ثانیه
- شکل ۳-۲۵: نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل ها در شبیه سازی برای سرعت جریان 0.92 متر بر ثانیه
- شکل ۳-۲۶: فن خاموش
- شکل ۳-۲۷: سرعت فن 50% سرعت بحرانی
- شکل ۳-۲۸: سرعت فن برابر با سرعت بحرانی
- شکل ۳-۲۹: مقایسه نتایج شبیه سازی FDS و آزمایش تجربی برای حوضچه 8×8
- شکل ۳-۳۰: مقایسه نتایج شبیه سازی FDS و آزمایش تجربی برای حوضچه 10×10
- شکل ۳-۳۱: دید از بالا (سمت چپ) و سطح مقطع (سمت راست) تونل مستقیم در FDS
- شکل ۳-۳۲: تغییرات سرعت بحرانی بر مبنای HRR
- شکل ۳-۳۳: مقایسه تغییرات HRR و سرعت بحرانی برای تونل مستقیم و منحنی
- شکل ۳-۳۴: طرح تونل ساخته شده در FDS برای شبیه سازی دو رژیم جریان
- شکل ۳-۳۵: تغییرات سرعت بحرانی با جابجایی طولی
- شکل ۳-۳۶: تغییرات نیم رخ سرعت در جریان آشفته
- شکل ۳-۳۷: تغییرات سرعت بحرانی با جابجایی عرضی حوضچه حریق
- شکل ۴-۱: مقایسه سرعت بحرانی در سطح مقطع D و مستطیلی با تغییر ابعاد حوضچه
- شکل ۴-۲: تغییرات سرعت بحرانی با جابجایی عرضی حوضچه حریق
- شکل ۴-۳: نمودار سرعت بحرانی نسبت به باقی مانده ها برای داده های آموزشی
- شکل ۴-۴: نمودار سرعت بحرانی نسبت به باقی مانده های پیش بینی شده از معادله
- شکل ۴-۵: تطبیق داده های حاصل از پیش بینی و نتایج واقعی برای داده های آموزشی
- شکل ۴-۶: تطبیق داده های حاصل از پیش بینی و نتایج واقعی برای داده های آزمون
- شکل ۴-۷: اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل در مدل رگرسیون چندگانه خطی
- شکل ۴-۸: نمودار تصمیم گیری وابستگی یا عدم وابستگی باقی مانده ها
- شکل ۴-۹: نمودار پله ای مقادیر باقی مانده
- شکل ۴-۱۰: مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده در تخمین سرعت بحرانی
- شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج به دست آمده از مدل غیرخطی با مقادیر واقعی برای داده های آزمون
- شکل ۴-۱۲: مقایسه مقادیر MSE برای داده های آموزش و آزمون
- شکل ۴-۱۳: مقایسه مقادیر تخمینی و اندازه گیری شده در نیمساز اول برای داده های آزمون

- شکل ۴-۱۴: مقایسه اختلاف مقادیر سرعت بحرانی تخمینی و اندازه‌گیری شده در داده‌های آزمون ۱۲۳
- شکل ۴-۱۵: نتیجه تحلیل حساسیت متغیرهای مستقل ورودی بر اساس مدل نهایی انتخاب شده ۱۲۴
- شکل ۴-۱۶: تحلیل حساسیت تک متغیره برای انحنای تونل ۱۲۴
- شکل ۴-۱۷: تحلیل حساسیت تک متغیره برای سطح مقطع تونل ۱۲۵
- شکل ۴-۱۸: تحلیل حساسیت تک متغیره برای محل عرضی حریق ۱۲۵
- شکل ۴-۱۹: تحلیل حساسیت تک متغیره برای HRR ۱۲۶
- شکل ۴-۲۰: نحوه اعمال ضرایب مختلف سرعت بحرانی در بخش در حال توسعه جریان ۱۲۷
- شکل ۴-۲۱: سطح مقطع تونل مموریال ۱۲۹
- شکل ۴-۲۲: سطح مقطع تونل رونهامر در آزمایش ۱۳۲
- شکل ۴-۲۳: حریق حوضچه‌ای آزمایش T0 در تونل رونهامر ۱۳۳
- شکل ۴-۲۴: دید از بالا و میزان انحنای تونل ۱۳۳

فصل اول

کلیات تحقیق

سیستم حمل و نقل یکی از بخش‌های اساسی و مهم در جامعه‌ی امروزی است که تونل‌ها در این سیستم از اهمیت کلیدی برخوردارند. در دنیای امروزی که زمان بسیار حائز اهمیت است، احداث تونل‌ها به ویژه در شهرهای بزرگ و با ترافیک گسترده یکی از مسائل قابل توجه و غیرقابل انکار است. استفاده از تونل‌ها برای احداث خطوط مترو در سیستم حمل و نقل عمومی و در مناطق کوهستانی، برای ایجاد مسیرهای مناسب، غیرقابل گریز شده است. همین موضوع اهمیت تونل و مسائل وابسته به آن را بیش از پیش نشان می‌دهد.

هم‌زمان با افزایش تعداد تونل‌هایی که در راه‌های بین‌شهری و شهری حفر می‌شود و با توجه به حجم وسایل نقلیه عبور کرده از آن‌ها، مسئله افزایش خطرات و سوانح در این تونل‌ها نیز افزایش می‌یابد. حریق ناشی از اتفاقات و حوادث منتج از آن، از مخاطرات مهم در حوزه ایمنی تونل‌ها به شمار می‌رود. از آنجایی که محیط تونل‌ها بسته است، عواقب و خسارات ناشی از تصادف‌ها در آن‌ها به علت پخش دود و امکان انتقال آتش‌سوزی به سایر وسایل و مواد موجود در آن بیشتر بوده و خطر گسترش آتش‌سوزی در این محیط بیشتر از سایر جاده‌ها است

با توجه به اهمیت تونل‌ها و تعداد افرادی که به صورت مستقیم (با عبور از فضای داخلی تونل) یا غیرمستقیم (ساختمان‌های نزدیک به تونل‌های شهری) در ارتباط با آن‌ها هستند، مسئله‌ی ایمنی تونل‌ها نیز از اولویت‌های دنیای امروزی به شمار می‌آید، زیرا هرگونه آتش‌سوزی، دود یا کمبود اکسیژن می‌تواند خطرات جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. بر طبق آمارهای منتشر شده از اروپا، از حوادث آتش‌سوزی درون تونل به عنوان حوادث نادر یاد نشده است، زیرا به ازای هر ۱۰۰ میلیون کیلومتر رانندگی در تونل چهار حادثه آتش‌سوزی رخ داده است (Haack, 2002). به عنوان مثال در حادثه‌ی تونل مونت‌بلانک^۱ در سال ۲۰۰۰ تعداد کشته‌ها ۱۵۵ نفر بوده است یا در سال ۲۰۱۴ در تونل یانهو^۲ ۳۹ نفر در اثر حریق تونل کشته شده‌اند (Zhang et al., 2019).

¹ Mont Blank

² Yanhou

در تونل‌هایی که آتش‌سوزی رخ می‌دهد معمولاً افرادی که در پایین دست آتش قرار دارند می‌توانند به راحتی از تونل خارج شده و در شرایط ایمن قرار گیرند، اما افراد بالادست تونل به علت وجود آتش و بسته شدن مسیر رفت و از سوی دیگر وجود ترافیک در تونل و عدم توانایی در دور شدن از محل حادثه، در شرایط نایمی قرار خواهند گرفت. این افراد در مقابل دمای بالای حاصل از آتش و دود ناشی از آن خواهند بود که می‌تواند سبب خفگی آن‌ها شود. لذا سیستم تهویه تونل برای چنین وضعیت بحرانی باید توانایی کنترل دود متصاعد شده از آتش را داشته باشد به نحوی که با حفظ لایه‌بندی و هدایت آن به سمت مسیرهای خروجی از بروز حوادث ناگوار جلوگیری به عمل آورد.

۱-۲- سؤال‌های اصلی پژوهش

در مبحث مطالعه‌ی آتش و کنترل دود حاصل از آن در تونل‌ها، سرعت جریان هوا نیازمند توجه ویژه‌ای است. سرعت جریان هوا می‌تواند در بالادست آتش شرایط ایمنی را فراهم آورد به طوری که دود متصاعد شده در این بخش به کمترین مقدار خود رسیده و از پخش آن ممانعت نماید. به این سرعت جریان هوا که توسط سیستم تهویه تأمین می‌شود تا از پخش دود جلوگیری نماید اصطلاحاً «سرعت بحرانی» گفته می‌شود. سرعت بحرانی به منظور حفظ ایمنی و جان افراد در بالادست آتش استفاده می‌شود، بنابراین مبحث سرعت بحرانی از جمله مباحث مهم و کاربردی در طراحی سیستم‌های تهویه طولی به شمار می‌رود و در طراحی سیستم تهویه تونل‌ها برای شرایط اضطراری، طراحان به این پارامتر توجه ویژه‌ای می‌کنند.

سرعت بحرانی توسط محققین متعددی از جنبه‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است و کوشیده‌اند که با در نظر گرفتن حالات و شرایط مختلف، به ارزیابی سرعت بحرانی برای آن حالت خاص پرداخته شود و مقدار آن را بر اساس آزمایش‌های بزرگ مقیاس، شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌های آزمایشگاهی به دست آورند (Vauquelin and Wu, 2006). با مرور این تحقیقات و با توجه به ارتباط سرعت بحرانی با حفظ ایمنی و جان افراد در تونل، اهمیت این پارامتر و لزوم تعیین دقیق و متناسب آن با شرایط واقعی مشخص می‌شود. از سوی دیگر باید توجه کرد که مقدار سرعت بحرانی برای هر تونل و سناریو حریق آن عددی یکتاست بدین مفهوم که مقدار سرعت تهویه نباید از سرعت بحرانی کمتر یا بیشتر باشد، زیرا بدیهی است که در صورت کم

بودن آن دود در بالادست حریق جریان می‌یابد و سبب خفگی افراد محبوس شده در ترافیک خواهد شد و در صورت بیشتر بودن سرعت تهویه از مقدار سرعت بحرانی، لایه‌بندی دود در پایین دست نیز به هم خورده و به کف تونل می‌رسد و این شرایط نیز برای افراد در حال فرار در پایین دست خطرناک است (Guo et al., 2020). بدیهی است که آتش‌سوزی در تونل‌ها سبب بروز خسارات جبران‌ناپذیری خواهد شد در نتیجه آتش‌سوزی، دشمن اصلی تونل، سیستم تهویه، ایمنی افراد و کارکنان است.

بررسی تاریخی موضوع نشان‌دهنده این مهم است که تاکنون اکثر مطالعات انجام شده در این حوزه، متغیرهای اصلی تونل‌ها را از شرایط مبنایی خود خارج و در روند محاسبات سرعت بحرانی وارد کرده‌اند و همواره ساده‌سازی‌های بسیاری در آن‌ها اعمال شده است. از سوی دیگر نیز بیشتر مدل‌های ارائه شده بر مبنای بی‌بعدسازی متغیرها انجام شده که روند تحلیل حساسیت متغیرهای مورد مطالعه در این روش غیرممکن می‌شود؛ اما همان‌گونه که پیش از این بیان شد تعیین دقیق سرعت بحرانی به دلیل ارتباط مستقیم با جان افراد، بسیار حائز اهمیت است. بنابراین به کارگیری راهکاری برای واقعی کردن شرایط تونل‌ها با وجود پیچیدگی‌های منحصر به فرد خود و استفاده از روش حل مناسب با آن به منظور رسیدن به پاسخی دقیق‌تر در این‌گونه مسائل می‌تواند بسیار سودمند و کاربردی باشد.

با نگاهی به موارد مطرح شده، در این رساله تمرکز اصلی بر تعیین متغیرهای حائز اهمیت و کاربردی با در نظر گرفتن ارائه‌ی مدلی نزدیک‌تر به واقعیت است تا بتوان با دقت بالاتری بر اساس شرایط هر تونل، سرعت بحرانی مورد نیاز را تخمین زد و گامی در راستای افزایش ایمنی برداشته شود. در این رساله، طبق موارد مطرح شده به سه سؤال اساسی پاسخ داده می‌شود:

- مجموعه پارامترهای مؤثر بر سرعت بحرانی کدام‌اند و تأثیر آن‌ها به چه میزانی است؟
- شبیه‌سازی عددی رفتار آتش و دود در این رساله تا چه میزان مطابق با واقعیت است؟
- چگونه می‌توان رفتار آتش و دود حاصل از آن را با توجه به چند پارامتر به صورت هم‌زمان مطالعه

کرد و مدل نهایی تخمین سرعت بحرانی تا چه حد به واقعیت نزدیک است؟

۳-۱- ضرورت انجام پژوهش

طبق آمارهای منتشر شده از انگلیس، هر ساله حدود ۷۰۰۰ نفر بر اثر حوادث آتش‌سوزی دچار آسیب‌های متعدد می‌شوند (Fire & rescue incident statistics, 2019) که حوادث آتش‌سوزی تونل‌ها نیز جزئی از آن‌هاست. در دنیای امروزی نیز که محیط‌های شبه بسته و دراز همچون تونل‌ها به منظور کاهش بار ترافیک احداث می‌شوند در صورت بروز آتش‌سوزی در آن‌ها حوادث جبران‌ناپذیری به بار خواهد آمد (Zhai et al., 2020). همان‌گونه که اشاره شد سرعت بحرانی در شرایط رخداد آتش‌سوزی در ارتباط مستقیم با جان افراد حاضر در تونل است و عدم تعیین دقیق این جریان و سرعت مناسب آن سبب بروز خسارات جبران‌ناپذیری می‌شود. حوادث حریق تونل با در نظر گرفتن گستردگی آن‌ها عواقب جدی و تهدید مهمی برای ایمنی و جان انسان‌ها به حساب می‌آیند. یکی از این جنبه‌های مهم در شرایط اضطراری برای طراحی سیستم تهویه تونل، توجه به ایمنی افراد حاضر در آن است که سبب شود افراد بتوانند در بالا دست و پایین دست حریق شرایط ایمنی را داشته باشند. به عبارت دیگر افراد باید بتوانند از حادثه آتش‌سوزی جان سالم به در ببرند و دود ناشی از حریق سبب مرگ افراد نشود. در صورتی که سرعت بحرانی تخمین زده شده بر اساس حریق تونل صحیح باشد، می‌تواند ایمنی بالاتری را برای افراد در معرض خطر به بار آورد.

به دلیل اهمیت ایمنی و سیستم‌های مرتبط با آن می‌توان چنین عنوان کرد که ضرورت مطالعه سرعت بحرانی برای تهیه یک مدل کارآمد، به طوری که توانایی پیش‌بینی نزدیک به واقعیت را در شرایط متفاوت داشته باشد نه تنها امری بدیهی است بلکه بسیار ضروری است.

۴-۱- هدف پژوهش

در این پژوهش دو هدف اصلی دنبال می‌شود که اولین هدف آن، به دست آوردن اثر پارامترهای شکل سطح مقطع، طول تونل، انحنای هندسی تونل، جابه‌جایی عرضی حریق در تونل و میزان آهنگ رهایش گرما است که بر سرعت بحرانی تأثیر قابل‌توجهی دارند تا از طریق آن بتوان سرعت بحرانی را به صورت مناسبی پیش‌بینی کرد و معادله‌ی دقیق‌تری برای تأثیر هم‌زمان آن‌ها ارائه شود. هدف دوم این تحقیق، بررسی و اولویت‌بندی سطح تأثیر پارامترهای مطرح شده بر سرعت بحرانی است تا از طریق آن بتوان دید دقیق‌تر و

جامع‌تری را در تحلیل‌ها و طراحی‌های آتی به دست آورد. به طور خلاصه مهم‌ترین اهداف این تحقیق به قرار زیر است:

- استفاده از مطالعات بزرگ مقیاس پیشین و مدل‌های آزمایشگاهی سایر محققین برای شناسایی پارامترهای مؤثری که می‌توانند در میزان سرعت بحرانی و عقب‌زدگی حاصل از ناکافی بودن آن اثرگذار باشند.
 - ایجاد مجموعه داده برای تعیین سرعت بحرانی براساس شبیه‌سازی و تعیین این پارامتر بر اساس تغییر در عوامل مؤثر انتخاب شده.
 - تخمین سرعت بحرانی بر پایه‌ی مجموع اطلاعات به دست آمده از پارامترهای مدنظر.
 - اولویت‌بندی و شناسایی سطح تأثیر پارامترهای هدف.
 - ساخت مدل مناسب در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی و صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی.
- بر اساس مطالب ارائه شده و اهداف مدنظر، همچون روند نمای شکل ۱-۱ بخش‌های مختلفی برای رسیدن به معادله تخمین سرعت بحرانی در آتش‌سوزی‌های تونلی دنبال شده است.

۱-۵- فرضیات پژوهش

در این رساله، مطالعه رفتار آتش و تعیین سرعت بحرانی مرتبط با آن بر اساس مدل‌های آزمایشگاهی توسعه داده شده است. بدین مفهوم که مدل فیزیکی به صورت کوچک مقیاس ساخته و از سوی دیگر شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نیز با ابعاد مدل آزمایشگاهی، انجام می‌شود که در انتها با استفاده از روش مقیاس‌گذاری مناسب می‌توان نتایج آن را به نتایج واقعی تبدیل کرد.

۱-۶- ساختار رساله

در فصل اول کلیات تحقیق ارائه و به بیان سؤال‌های اصلی، ضرورت، اهداف، فرضیات و ساختار رساله پرداخته شده است.

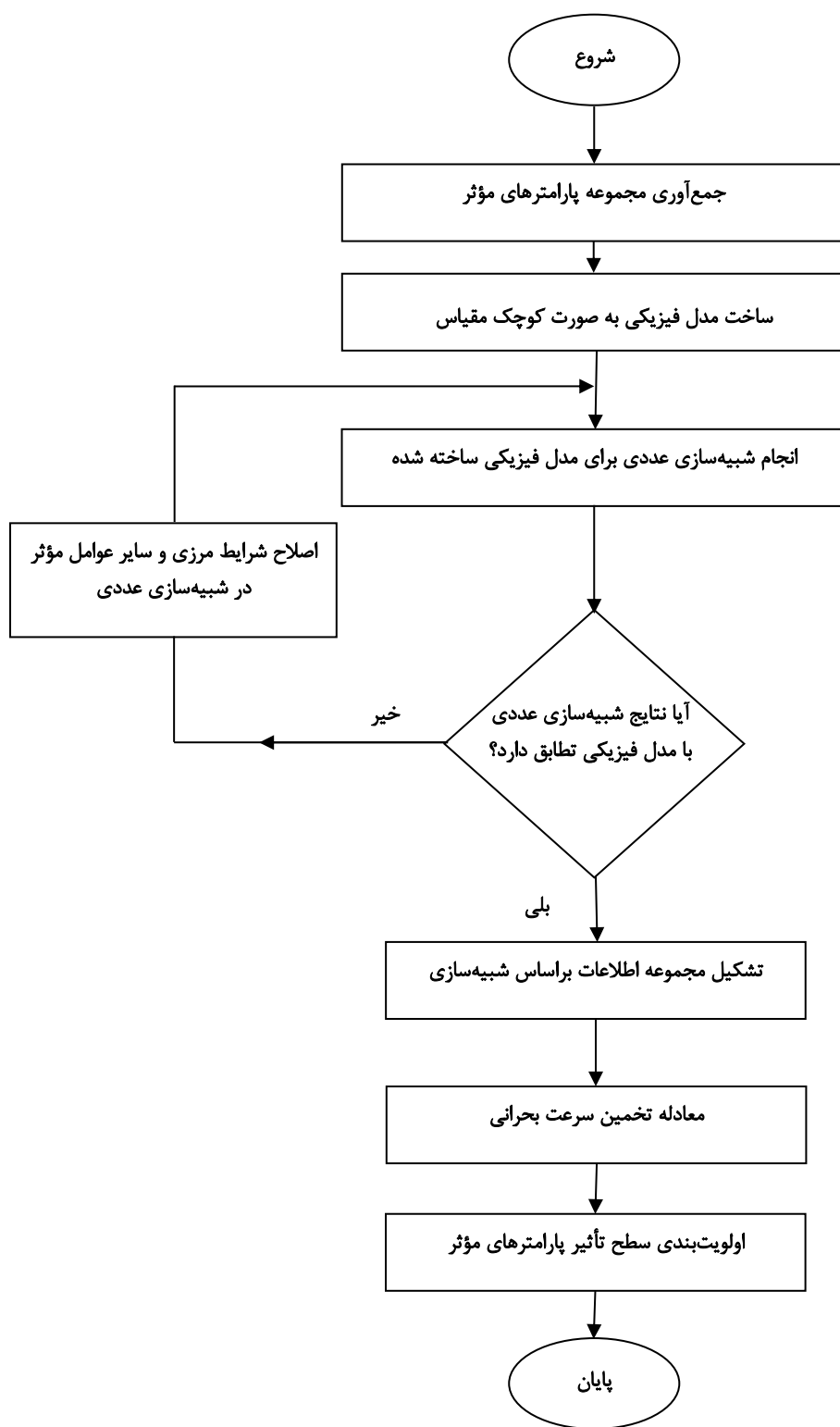
سپس کلیاتی در رابطه با معرفی سرعت بحرانی و اندرکنش سیستم‌های تهویه مختلف در شرایط حریق، پارامترهای مهم آتش‌سوزی و روش‌های مطالعه حریق در تونل‌ها ارائه می‌شود.

در فصل دوم، سابقه علمی موضوع از دیدگاه‌های مختلف بررسی و در این فصل مدل‌های مختلف تخمین سرعت بحرانی ارائه خواهد شد.

در فصل سوم به مبحث شبیه‌سازی حریق از منظرهای متفاوت نگاه شده است. در این فصل روش‌های مقیاس‌گذاری ارائه و سناریوهای مختلفی از حریق تونلی به صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود.

در فصل چهارم، با تعیین پارامترهای منتخب سرعت بحرانی و با بکارگیری روش‌های مختلف تخمین، مدل نهایی برای تخمین سرعت بحرانی معرفی می‌شود.

در فصل پنجم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادهای ادامه تحقیق ارائه شده است.



شکل ۱-۱: مراحل انجام پژوهش

همان‌گونه که در پیش از این ذکر شد تونل‌ها در حال حاضر از جمله سازه‌های مهمی به شمار می‌آیند که با توجه به حجم ترافیک و افراد حاضر در تونل‌ها مسئله‌ی ایمنی آن‌ها نیز از موارد ویژه به شمار می‌رود. از بخش‌های کلیدی و مخاطرات نگران‌کننده در این حوزه که جان و سلامتی افراد را در معرض خطر قرار

می‌دهد، حریق‌های ناشی از تصادفات و اتفاقات ناگهانی است. کنترل دود حریق، کاهش عوارض و آسیب‌های ناشی از آن در تونل‌ها با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها، استفاده از فن‌های موجود در تونل و به جریان انداختن هوا با سرعت ویژه‌ای است تا با حفظ لایه‌بندی دود در پایین دست حریق و جلوگیری از پخش آن در بالادست، افراد حاضر و محصور در ترافیک دچار سانحه و خفگی نشوند.

از دیدگاه ایمنی، دود حاصل از حریق اصلی‌ترین عامل مرگ در حوادث آتش‌سوزی تونل‌ها است و در شرایط اضطراری از این دست، افراد در مقابل دمای بالای حاصل از آتش و دود ناشی از آن خواهند بود که می‌تواند سبب خفگی افراد شود، لذا سیستم تهویه تونل باید توانایی کنترل دود متصاعد شده از آتش و ممانعت از پخش‌شدگی بی‌اساس آن را داشته باشد به گونه‌ای که با حفظ لایه‌بندی و هدایت آن به سمت مسیر خروجی از بروز حوادث ناگوار جلوگیری به عمل آورد.

در این باره پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شده است و محققین مختلف مفاهیم مهم و متعددی در این حوزه تعریف کرده‌اند. از جمله مهم‌ترین مفاهیم در این حوزه، سرعت بحرانی است. سرعت بحرانی پارامتر ویژه‌ای در طراحی تهویه تونل‌ها برای حفظ ایمنی در شرایط اضطراری است که مهندسین طراح بایستی آن را با دقت بالا و متناسب با شرایط رخداد حریق تخمین و اعمال کنند تا ایمنی افراد تأمین شود. در نتیجه تخمین صحیح و دقیق سرعت بحرانی بسیار حائز اهمیت است.

همان‌طور که ذکر شد محققین زیادی در رابطه با سرعت بحرانی تحقیق و هر یک عواملی را به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر آن انتخاب نموده‌اند و در نهایت معادله بی‌بعدی را برای تخمین سرعت بحرانی ارائه کرده‌اند؛ اما نکته مهمی که در تمامی این مطالعات نادیده گرفته شده این است که کدام پارامترها از اهمیت بیشتری برای تشکیل معادله تخمین سرعت بحرانی برخوردار هستند. به عبارت دیگر معادله‌ی نهایی باید شامل چه پارامترهایی باشد و همچنین در نظر داشت که معادله‌ی تخمین آن‌ها برای چند سناریوی مختلف قابلیت کاربرد را داراست. باید توجه داشت که حریق تونل از جمله پدیده‌های پیچیده به شمار می‌رود و از طرفی در معادلات تخمین نمی‌توان تعداد نامحدودی از پارامترها را گنجانده چرا که در صورت افزایش بیش از

حد متغیرها، معادله نهایی از حالت کاربردی خارج می‌شود. بنابراین انتخاب پارامترهای کاربردی برای افزایش دقت مدل تخمین نهایی و در عین حال افزایش تعداد سناریوهای تحت تخمین از مهم‌ترین مباحث پیش‌رو است.

با در نظر گرفتن توضیحات ارائه شده، در این فصل به تشریح مفاهیم حریق و انواع آن، عملکرد سیستم‌های تهویه، پارامترهای مهم حریق و روش‌های مطالعه آتش در تونل پرداخته خواهد شد که به عنوان مبنای انتخاب پارامترهای موثر بر مدل تخمین سرعت بحرانی خواهند بود.

۷-۱- آتش‌سوزی در تونل

عملکرد آتش را می‌توان در فضای باز و یا محیط‌های بسته (همچون محفظه‌ها و تونل‌ها) بررسی کرد. باید در نظر داشت که رفتار آتش درون تونل همچون آتش‌سوزی در یک محفظه، با رفتار آتش در محیط آزاد متفاوت است. با این وجود تفاوت‌هایی در تونل‌ها با محیط‌های بسته‌ی دیگر (مانند محفظه‌ها) نیز وجود دارد که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

به طور کلی می‌توان چهار تفاوت اصلی را برای این پدیده در محیط تونل و محفظه بسته برشمرد که عبارتند از (Ingason et al., 2014):

- احتراق ناقص

اولین تفاوت اصلی برای چنین پدیده‌ای این است که در محیط بسته به دلیل دیوارها و گرمای منعکس شده از آن‌ها تا حدودی نرخ سوختن بالا می‌رود و از آنجایی که اکسیژن کافی به این نرخ بالای سوختن نمی‌رسد در نتیجه احتراق آن به صورت ناقص بوده و باعث تولید گازهای سمی و مضر خواهد شد که در مورد تونل به علت وجود اکسیژن کافی این پدیده رخ نمی‌دهد.

- آهنگ رهایش گرما^۱ (HRR)

در محفظه‌های بسته و در حالت تهویه طبیعی حداکثر نرخ گرمای رها شده HRR توسط ظرفیت تهویه طبیعی کنترل می‌شود.

¹ Heat Release Rate

اما در مورد آتش‌سوزی تونل‌ها با توجه به اندازه‌ی مقطع تونل و جریان نهایی ایجاد شده توسط سیستم تهویه، اکسیژن موجود برای بخش آتش‌سوزی، حداقل یک برابر بزرگ‌تر از آتش‌سوزی محفظه است؛ بنابراین، در بحث آتش‌سوزی تونل عامل محدودکننده برای داشتن حداکثر HRR توسط شرایط سیستم تهویه بیان نمی‌شود بلکه توسط سوخت در دسترس کنترل می‌شود.

• احتمال رخداد پدیده‌ی گرگرفتگی^۱

این پدیده به صورت گذار از محل آتش‌سوزی و تبدیل آن به یک آتش‌سوزی بزرگ به صورت ناگهانی است و با جریانات تهویه کنترل می‌شود، بدیهی است که سیستم تهویه نقش مهمی در کنترل آتش‌سوزی تونل دارد و برخلاف محفظه‌های بسته که جریانات تهویه در آن بصورت طبیعی و ناچیز است، در تونل‌ها این پدیده توسط سیستم تهویه کنترل می‌شود و می‌تواند آن را تشدید کند (Carvel, 2010).

• لایه‌بندی دود^۲

لایه‌بندی دود پدیده‌ی اصلی و مهم در انواع مختلف سیستم‌های تهویه تونل به شمار می‌آید. به طور کلی این مورد، گستره‌ای از سیستم‌های تهویه عرضی، نیمه عرضی و حتی در شرایطی که جریان طولی در امتداد طول تونل کنترل شود یا نشود را در برمی‌گیرد (Boehm et al., 2008). مفهوم لایه‌بندی دود به طور معمول برای تونل‌هایی با تهویه طولی توسعه یافته است و در مواردی که امکان دارد وسایل نقلیه در هر طرف محل آتش در چنین تونل‌هایی مسدود شده باشد از این اصطلاح بیشتر استفاده می‌شود. این پدیده عمدتاً در موارد زیر مطالعه می‌شود:

- شرایط دلخواه و مطلوب برای ایجاد یک لایه‌بندی مناسب از دود در تونل‌ها

- بررسی پایداری و ثبات لایه‌بندی به عنوان تابعی از نرخ جریان‌های طولی متفاوت

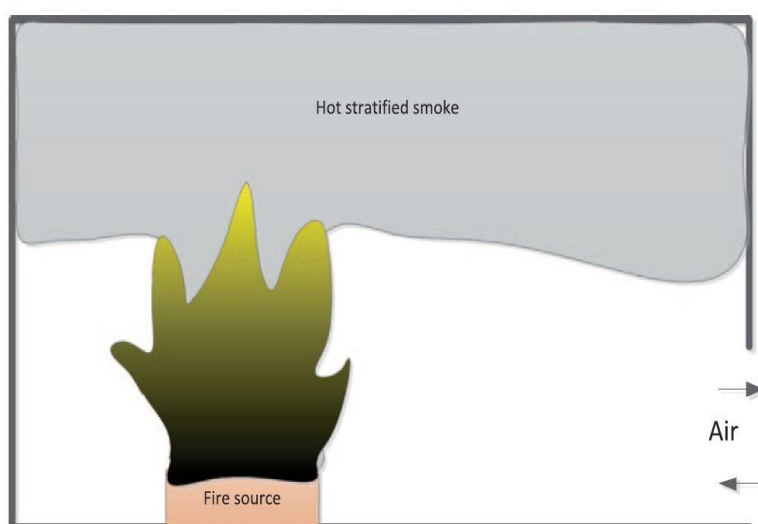
مراحل اولیه آتش‌سوزی درون محفظه توسط یک لایه از گازهای داغ در زیر سقف آن توصیف می‌شود. چنین الگویی نیز در آتش‌سوزی درون تونل قابل مشاهده است اما تنها در صورتی می‌توان چنین الگویی را تصور کرد که از تهویه استفاده نشود.

¹ Flashover

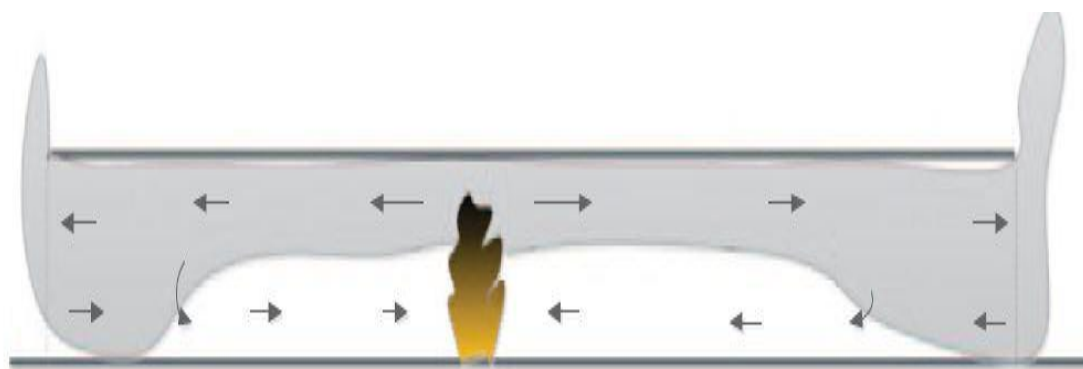
² The Smoke Stratification

در واقع ساختار لایه‌بندی دود در محفظه با وضعیت لایه‌های دود درون تونل متفاوت است. در مراحل اولیه آتش‌سوزی درون محفظه یک لایه شناور و ساکن از دود در بالا و با یک لایه سرد در پایین‌تر آن تشکیل می‌شود (شکل ۱-۲). به علت بسته بودن محفظه، لایه دود به آرامی به کمی پایین‌تر از سطح لبه‌ی در ورودی محفظه خواهد رسید؛ بنابراین حداقل در مراحل اولیه ارتفاع دهانه‌ی محفظه، ارتفاع لایه دود را کنترل می‌کند که در مورد تونل این‌گونه نیست (Ingason et al., 2014).

اما در رابطه با تونل‌ها باید در نظر داشت که در فاصله‌ی کوتاهی از نقطه‌ی آتش‌سوزی در زیر سقف تونل، جریان دود از جریان طولی عبور می‌کند و در دو سوی تونل که در آن تهویه طولی ضعیفی برقرار است (یا تهویه طبیعی در جریان باشد) و شیب تونل نزدیک به صفر باشد حرکت می‌کند (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۲: لایه‌بندی دود در محفظه‌ی آتش در مراحل اولیه آن (Bertola and Cafaro, 2009).



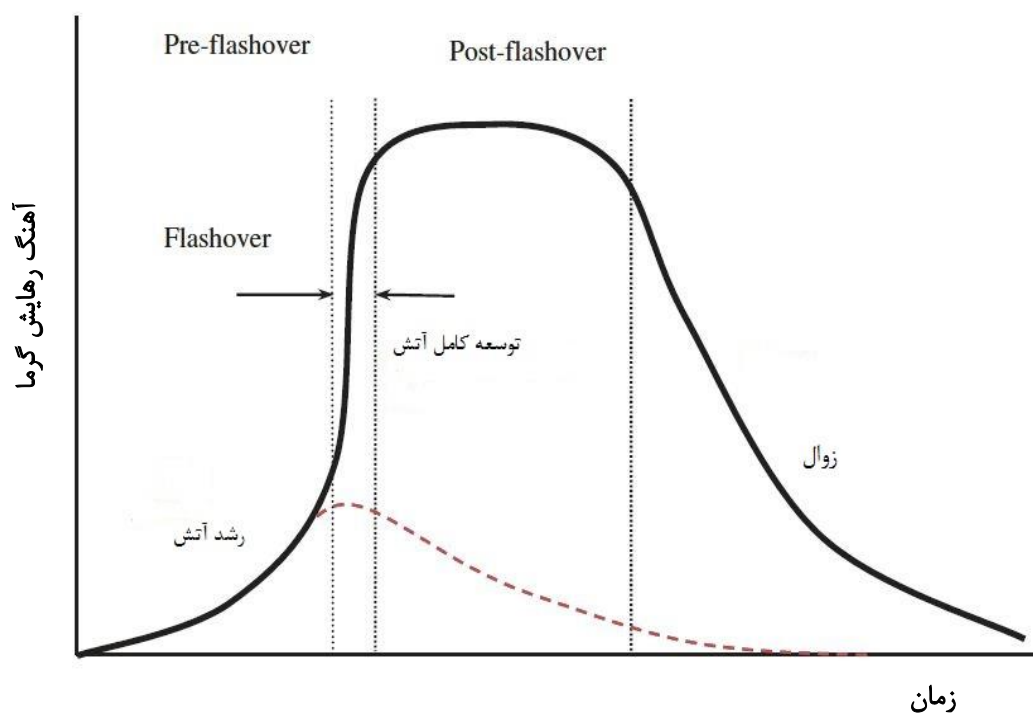
شکل ۱-۳: لایه‌بندی دود در تونل با جریان طولی کم (Ingason et al., 2014).

۸-۱- 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 شده است. در زیر این چهار مرحله برشمرده شده است (Blagojevi and Pesic, 2011):

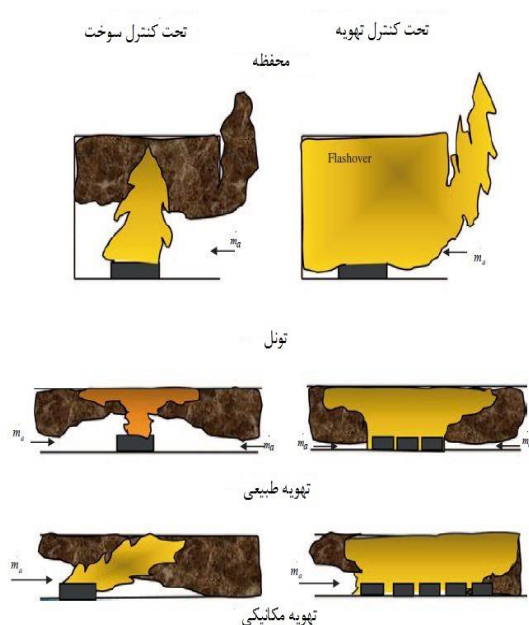
- مرحله رشد
- مرحله شعله‌وری (دوره‌ی گرگرفتگی) (Flashover)
- توسعه‌ی کامل
- زوال و فروکش شدن

در شکل ۴-۱ کلیه مراحل توسعه‌ی فرایند آتش‌سوزی نشان داده است. مرحله توسعه آتش با یک دوره رشد آغاز می‌شود و در صورتی که به مرحله شعله‌وری نرسد رو به زوال و خاموشی خواهد رفت (Karlsson and Quintiere, 2000)؛ 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.



شکل ۴-۱: فازهای مختلف آتش در یک محفظه (Blagojevi and Pesic, 2011).

معمولاً دوره‌ی رشد را به عنوان مرحله‌ی پیش از شعله‌وری^۱ و به مراحل توسعه‌ی کامل، پس از گرگرفتگی^۲ گفته می‌شود. مراحل توسعه آتش در تونل‌ها را به صورت ذکر شده نمی‌توان توصیف کرد زیرا اثرات و اندرکنش‌های دیواره‌های تونل با آتش شرایط متفاوتی را به وجود خواهد آورد. عمده‌تاً آتش‌سوزی درون محفظه را با عناوین تحت کنترل سوخت^۳ یا تحت کنترل تهویه^۴ تعریف می‌کنند. در مرحله رشد یا در بخش پیش از شعله‌وری (گرگرفتگی) در آتش‌سوزی محفظه، اکسیژن مناسب و کافی برای احتراق وجود دارد و رشد آتش کاملاً وابسته به اشتعال‌پذیری و ساختار سوخت در دسترس است. در خلال این مرحله آتش با عنوان تحت کنترل سوخت مطرح می‌شود؛ اما آتش تحت کنترل تهویه زمانی است که اکسیژن کافی برای اشتعال همه‌ی سوخت موجود در دسترس نیست. آتش‌سوزی درون تونل عمده‌تاً از نوع تحت کنترل سوخت می‌باشد زیرا به ندرت شرایطی پیش خواهد آمد که جریان هوا مسدود شود. تونل‌ها دو یا چند دهانه ارتباطی دارند، لذا آتش با هوای ناشی از اختلاف فشار بین گازهای آتش و اتمسفر تأمین خواهد شد. در شکل ۵-۱ تفاوت‌های شماتیک بین آتش‌سوزی تحت کنترل سوخت و تهویه در حالت محفظه و تونل نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: طرح شماتیک بین آتش‌سوزی تحت کنترل سوخت و تهویه در حالت محفظه و تونل (Ingason, 2012).

¹ Pre-Flashover

² Post-Flashover

³ Fuel-Controlled

⁴ Ventilation-Controlled

۹-۱- برآورد اندازه آتش

طراحی اندازه آتش یکی از مهم‌ترین پارامترهای آتش‌سوزی درون تونل است. موادی که اغلب در آتش‌سوزی تونل سوخته می‌شوند از وسایل نقلیه می‌باشند و شامل اجزای مختلف وسایل نقلیه همچون صندلی‌ها، مواد پلاستیکی، بارهای مختلف، سوخت وسایل نقلیه که شامل صدها لیتر است، تایرها و غیره می‌باشند. بارهای متفاوت می‌توانند انواع مختلفی از آتش‌سوزی را منجر شوند. در جدول ۱-۱ انرژی حاصل از برخی موارد آورده شده است.

جدول ۱-۱: مثال‌هایی از انرژی حاصل از احتراق در تونل (National Cooperative Highway Research Program, 2011).

انواع وسایل نقلیه	انرژی تقریبی خروجی از آتش بر حسب مگا ژول (MJ)	نکات قابل توجه
خودروی شخصی	۳۰۰۰ - ۳۹۰۰	آزمایش آتش‌سوزی در فنلاند
خودروهای شخصی	۶۰۰۰	آزمایش شده توسط آتش‌سوزی EUREKA ^۱
خودروهای حامل مواد پلاستیکی	۷۰۰۰	-
اتوبوس‌های همگانی	۴۱۰۰۰	-
وسایل باربری سنگین (HGV ^۲)	۸۸۰۰۰	آزمایش شده در آتش‌سوزی تونل Runehamar
بارهای مختلف برای HGV	۶۷۰۰۰ ۱۲۹۰۰۰ ۱۵۲۰۰۰ ۲۴۰۰۰۰	-
تانکرهایی با ظرفیت ۵۰ مترمکعب بنزین	۱۰۰۰۰۰۰ ۱۵۰۰۰۰۰	تانکر متوسط با فرض آتش‌سوزی مهیب

توسعه و گسترش آتش به عوامل متعددی وابسته است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره شده است (National Cooperative Highway Research Program, 2011):

- بار قابل اشتعال وسیله نقلیه
- منبع اصلی در ایجاد احتراق

^۱ این آزمایش در تونل Repparfjord در شمال کشور نروژ انجام شده است.

^۲ Heavy Goods Vehicle (HGV)

- شدت و توان منبع احتراق
 - توزیع بار قابل سوختن در وسیله نقلیه
 - نرخ گسترش و رشد آتش
 - تونل و شرایط محیطی (که در تأمین اکسیژن مورد نیاز تأثیرگذارند).
- قدرت آتش معمولاً بر اساس مگاوات (MW) بیان می‌شود، با این وجود بیشتر مرسوم است که مقدار حداکثر حرارت آزاد شده (HRR) را با نرخ رشد آتش ترکیب می‌کنند. برای مثال، آزمایش‌های تمام مقیاس بارهای HGV در تونل رونهامر^۱ نشان‌دهنده‌ی این است که نرخ گرمای رها شده HRR می‌تواند به مقادیر بیش از ۱۰۰ مگاوات در کمتر از ۱۰ دقیقه برسد. این نتیجه بدین معنی است که نرخ رشد آتش در مشخص شدن اینکه آیا افراد محبوس شده در آتش می‌توانند نجات یابند بسیار مهم و تعیین‌کننده است. در جدول ۱-۲ دامنه گرمای رها شده از حریق (اندازه آتش) خودروهای عبوری از تونل‌های راه که معمولاً در مطالعات شبیه سازی در نظر گرفته می‌شوند ارائه شده است.
- باید توجه داشت که اکثر نتایج حاصل از این جدول‌ها وابسته به شرایط اجرای آزمایش می‌باشند. این شرایط شامل وسایل ثبت نتایج در خلال اکثر آزمایش‌ها و یا نوع وسایل نقلیه مورد استفاده و تطابق آن با سایر وسایل می‌باشد که می‌تواند سبب بروز خطاهایی در ثبت داده‌های آزمایش شود.

جدول ۱-۲: اندازه آتش برای وسایل نقلیه مختلف (National Cooperative Highway Research Program, 2011).

نوع وسیله آتش‌سوزی	مقدار حرارت آزاد شده (MW)
اتومبیل‌ها	۵-۱۰
چندین اتومبیل (۲ تا ۴ وسیله نقلیه)	۱۰-۲۰
اتوبوس	۲۰-۳۰
وسایل HGV	۷۰-۲۰۰
تانکرها	۲۰۰-۳۰۰

¹ Runehamar

۱-۱۰-۱- انواع سیستم تهویه در تونل‌های راه

یکی از مهم‌ترین عناصر اصلی تونل‌ها سیستم تهویه است که برای مه‌پاشی هوای تازه در تونل برای فعالیت در شرایط نرمال و خروج دود و گازهای متصاعد شده ضروری است. در واقع فراهم آوردن هوا با کیفیت مناسب پارامتر اصلی برای کارکرد سیستم تهویه است (Pucher & Pucher, 2004). علاوه بر شرایط نرمال در موقعیت آتش‌سوزی نیز سیستم تهویه با ترقیق و بیرون راندن دود و گرما می‌تواند به تهویه مناسب کمک نماید (Sturm et al., 2015).

به طور کلی سیستم‌های مختلفی برای تهویه توسعه داده شده‌اند که هدف اصلی آن‌ها در موارد زیر خلاصه می‌شود (PIARC, 1999):

- ترقیق هوای آلوده (برای داخل تونل)
- کاهش پیامدهای محیطی (خارج تونل)
- کنترل دود در موارد آتش‌سوزی

سیستم‌های مورد استفاده در تهویه تونل‌ها را می‌توان در سه طبقه کلی به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد (Souza, 2002; Hartman et al., 1997) که در ادامه به اختصار هر یک مورد بررسی قرار گرفته است.

- تهویه طبیعی
 - تهویه توسط وسایل نقلیه (اثر پیستونی)
 - تهویه مکانیکی
 - طولی
 - عرضی
 - نیمه عرضی

۱-۱۰-۱- تهویه طبیعی

تهویه طبیعی وابسته به اختلاف فشار بین دهانه‌های تونل و یا تغییرات ارتفاع است؛ به عبارت دیگر حرکت طبیعی هوا در تونل‌ها در نتیجه اختلاف فشار ناشی از اختلاف ارتفاع و دما یا در اثر باد است (مدنی، ۱۳۸۲).

مشکل اصلی سیستم تهویه طبیعی این است که هیچ‌یک از عوامل ایجاد کننده آن در تمام طول سال ثابت نبوده و یک تغییر ناگهانی می‌تواند روند تهویه را خنثی کند.

در آلمان تونل‌هایی با طول ۳۵۰ تا ۴۰۰ متر نیز با تهویه طبیعی فعال هستند اما تهویه طبیعی به طور کلی برای تونل‌هایی با طول‌های بیشتر از ۴۰۰ متر کاربرد ندارد و چنین تونل‌هایی نیازمند تهویه مکانیکی می‌باشند، زیرا در فواصل بیش از این مقادیر، کنترل دود و آتش با تهویه طبیعی ممکن نیست (Carvel and Beard, 2012).

۱-۱۰-۲- تهویه با وسایل نقلیه (اثر پیستونی)

حرکت اتومبیل در داخل تونل با سرعتی متفاوت از سرعت هوا، موجب ایجاد اختلاف فشار در داخل تونل شده و به عبارت دیگر هر وسیله نقلیه که در داخل تونل حرکت می‌کند اثری مشابه یک پیستون در داخل یک لوله بلند را دارد و در نتیجه در جلو وسیله نقلیه فشار زیاد و در پشت آن فشار کم به وجود خواهد آمد که نیرویی ایجاد خواهد شد و این نیرو سبب حرکت هوای داخل تونل می‌شود (مدنی، ۱۳۸۲).

۱-۱۰-۳- تهویه مکانیکی

سیستم تهویه نصب شده در تونل باید میزان هوای قابل قبول و تحت شرایط نرمال را فراهم کند؛ بنابراین سیستم تهویه تا حد امکان باید از تشکیل ترکیبات انفجاری در طی آتش‌سوزی با ترقیق مناسب جلوگیری کند. اگرچه یک ترکیب انفجاری نمی‌تواند در موقعیت آتش‌سوزی رخ دهد اما در واقع در فاصله‌ی دورتر از طریق احتراق ناقص و در جریان گازهای داغ می‌تواند رخ دهد (PIARC, 1999). روش‌های اصلی در تهویه مکانیکی شامل روش تهویه طولی، عرضی و نیمه عرضی می‌باشد که در ادامه به تشریح هر یک پرداخته خواهد شد.

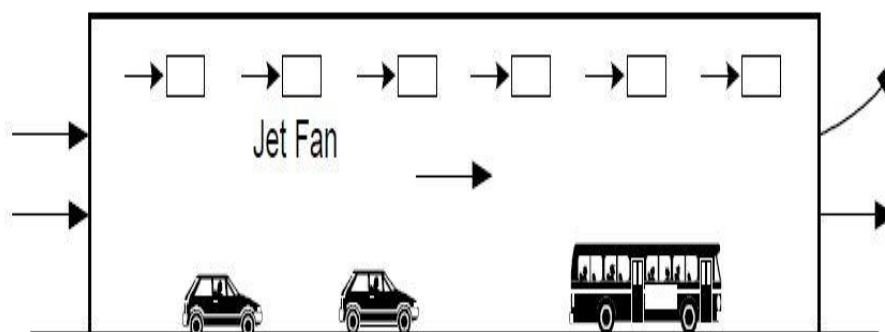
• تهویه طولی

تهویه طولی یکی از روش‌های ساده و ارزان برای نصب سیستم تهویه در تونل‌هاست و در کشورهای مختلف به عنوان تنها راه مورد قبول است. به طور ساده سیستم تهویه طولی چیزی جز به جریان انداختن یک جریان طولی از هوا در امتداد تونل نیست.

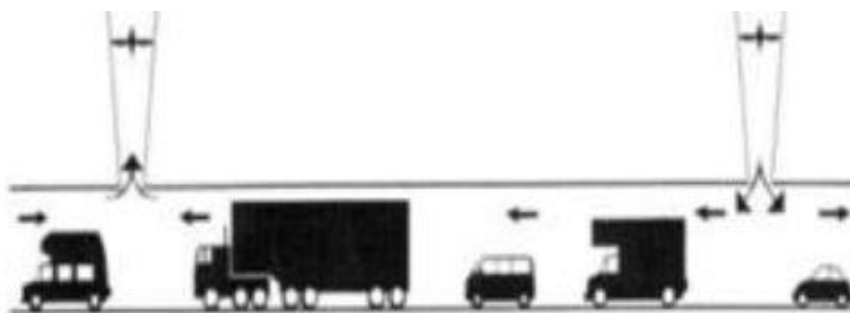
در چنین سیستمی هوای تمیز از یک دهانه تونل وارد شده و در اثر تماس با گازهای سمی و آلوده متصاعد شده، از دهانه دیگر خارج می‌شود. این سیستم برای تونل‌های یک‌طرفه که در آن‌ها اثر پیستونی نیز به جریان تهویه کمک می‌کند تا حد زیادی مناسب است (PIARC, 1999).

در این سیستم از نقطه نظر میزان ترقیق، تهویه مناسبی انجام خواهد شد و سیستم قادر است که میزان آلودگی را پایین‌تر از آستانه آلودگی قرار دهد. سرعت جریان هوا در تهویه طولی دارای یک مقدار حداقل است. از سوی دیگر بر اساس جریان ترافیک و شیب تونل، اندازه تونل برای هر تهویه طولی، یک محدوده ماکزیمم وجود دارد. این محدوده‌ی سرعت هوا، با اطلاع از سطح مقطع تونل قابل شناسایی است که در حدود ۸ تا ۱۰ متر بر ثانیه است (PIARC, 1999).

تهویه طولی عمدتاً با استفاده از جت فن‌های نصب شده در سقف انجام می‌گیرد. در بعضی موارد نیز با استفاده از شفت (دویل) و نصب بادبزن در آن می‌توان عمل تهویه را انجام داد. در شکل ۱-۶ و ۱-۷ تهویه طولی نشان داده شده است.



شکل ۱-۶: تهویه طولی با استفاده از جت فن (Souza, 2002).



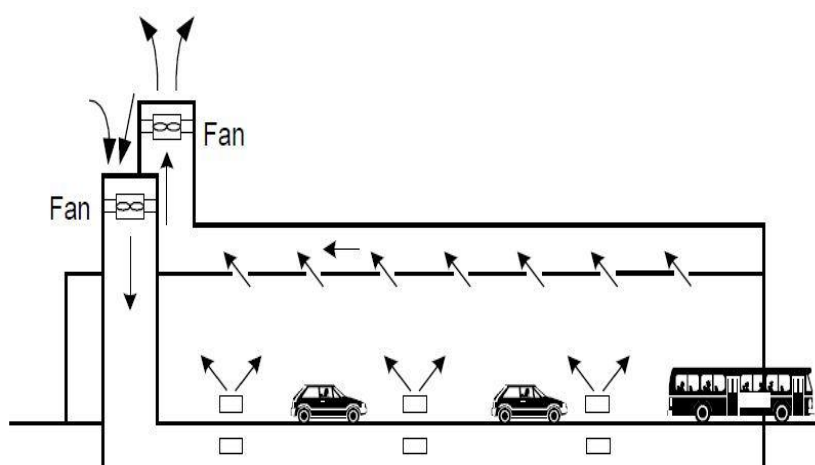
شکل ۱-۷: تهویه طولی با استفاده از شفت (دویل) و فن (Souza, 2002).

- تهویه عرضی

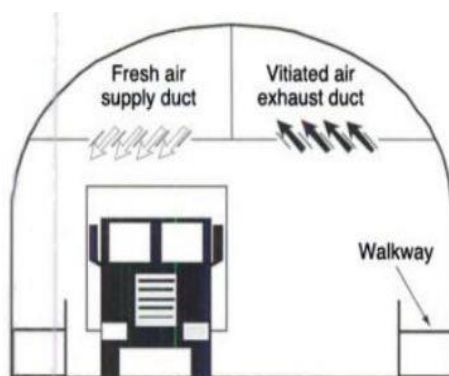
سیستم تهویه عرضی با تأمین یکنواخت هوای مورد نیاز و خروج هوای آلوده در تمام طول تونل با استفاده از کانال شناخته می‌شود. کانال تأمین‌کننده معمولاً در پایین تونل یا در بالای یک سقف کاذب نصب می‌شود. به علت وجود کانال‌های محل تهویه با هواکش‌های محوری تجهیز شوند. در تونل‌های با طول زیاد داکت‌ها به بخش‌های مختلف و در محدوده‌های مؤثر بر اساس فن‌های تهویه و سرعت هوا تقسیم‌بندی می‌شوند.

سرمایه‌گذاری اولیه (هزینه اجرای) این سیستم تهویه بالا می‌باشد (Colella, 2010).

به طور کلی سیستم‌های تهویه عرضی برای جلوگیری از پخش شدن دود در تونل به کار گرفته می‌شوند؛ که در شرایط آتش‌سوزی از سرعت ۱ متر بر ثانیه استفاده می‌شود. به اثبات رسیده است که تهویه عرضی در آتش‌سوزی‌هایی با ابعاد کمتر از ۲۰ مگاوات قابل کاربرد است (Colella, 2010). این سیستم در شکل‌های ۸-۱ و ۹-۱ نشان داده شده است.



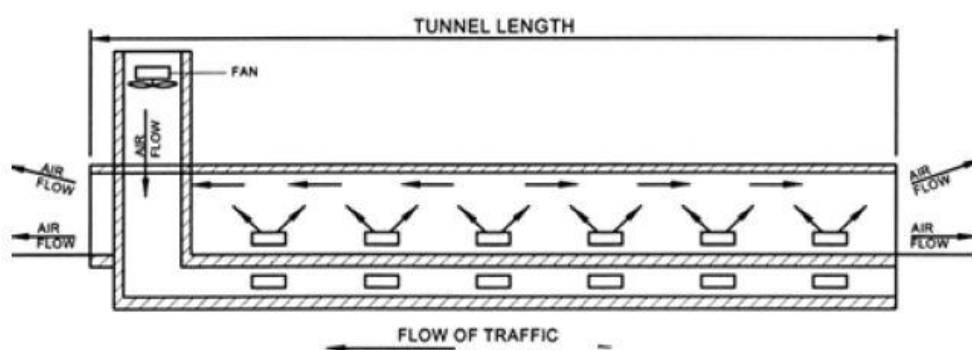
شکل ۸-۱: سیستم تهویه عرضی (Souza, 2002).



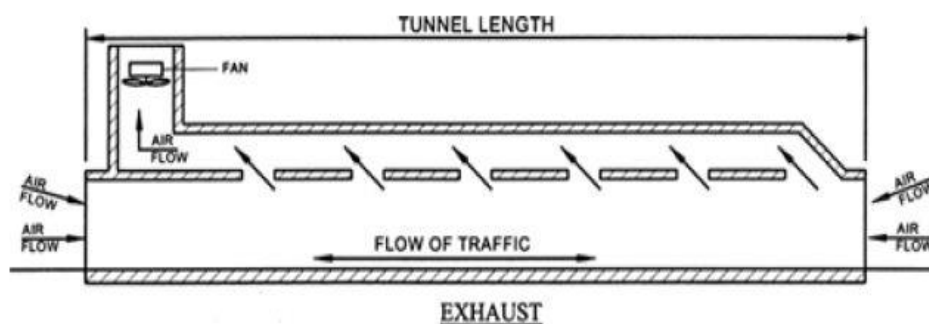
شکل ۹-۱: سیستم تهویه عرضی (Carvel and Beard, 2012).

- نیمه عرضی

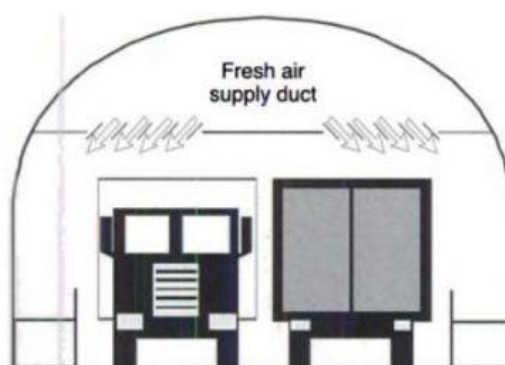
این سیستم تهویه هوای تازه را به صورت یکنواخت همچون سیستم تهویه عرضی تأمین می‌کند و هوای آلوده را در امتداد همین سیستم خارج می‌کند؛ بنابراین بر اساس ورود یا خروج هوا دو نوع سیستم تهویه عرضی شامل سیستم تهویه نیمه عرضی دهشی یا مکشی وجود دارد (Colella, 2010). در شکل‌های ۱۰-۱، ۱۱-۱ و ۱۲-۱ تهویه نیمه عرضی نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۱: تهویه نیمه عرضی (تأمین هوا به صورت عرضی) (Colella, 2010).



شکل ۱۱-۱: تهویه نیمه عرضی (خروج هوا به صورت عرضی) (Colella, 2010).



شکل ۱۲-۱: تهویه نیمه عرضی (Colella, 2010).

۱-۱- عملکرد سیستم‌های تهویه تونل در زمان آتش‌سوزی

سیستم‌های متفاوت تهویه بر آتش‌سوزی تأثیرهای متفاوتی دارند. هر یک از این سیستم‌ها با تأثیر بر نرخ گرمای رها شده HRR و روند رشد آتش‌سوزی به گونه‌ی خاص خود، سبب افزایش یا کاهش اثرات و پیامدهای آتش بر تونل و ایمنی افراد خواهد شد. در سناریوهای مختلف حرکات دود، لایه‌بندی و ترقیق آن و انتقال گرما شدیداً در ارتباط با جریان تهویه هستند. به همین دلیل دو بحث اصلی در رابطه با اندرکنش بین جریان تهویه و آتش‌سوزی باید در نظر گرفته شود (Colella, 2010):

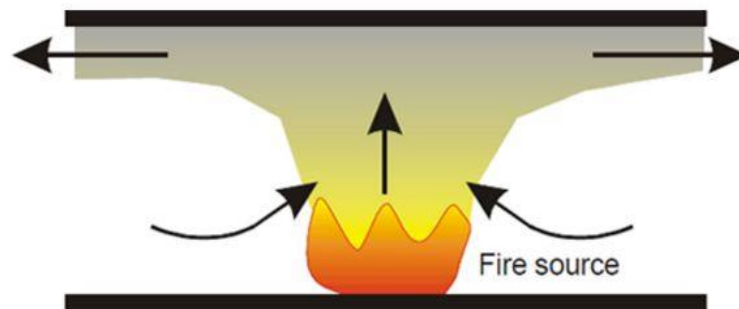
- کنترل جریان دود، لایه‌بندی و ترقیق آن در تونل
 - تأمین آتش با اکسیدکننده‌ی مورد نیازش از طریق سیستم تهویه
- بنابراین درک درست از چگونگی اندرکنش بین سیستم تهویه و آتش موجود در تونل می‌تواند در توسعه‌ی استراتژی‌های مناسب برای ایمنی و طراحی مناسب‌تر آن کمک شایانی کند؛ زیرا اگر سرعت جریان برابر با سرعت بحرانی باشد در نتیجه سیستم تهویه از انتشار دود در مسیرهای اضطراری و پخش آن در کل تونل جلوگیری به عمل خواهد آورد و حاصل چنین سیستمی، افزایش ضریب ایمنی برای افراد درون تونل و وسایل نقلیه اطراف خواهد بود. در ادامه به بررسی اندرکنش سیستم‌های مختلف تهویه با آتش پرداخته خواهد شد.

• عملکرد تهویه طبیعی در هنگام آتش‌سوزی در تونل

در تهویه طبیعی، تمامی روند تهویه بر اساس شرایط طبیعی همچون ارتفاع، باد، تغییرات فشار در دهانه‌ها و همچنین به علت پدیده اثر پیستونی است. به همین دلیل سیستم‌های تهویه طبیعی برای انجام ترقیق آلودگی‌ها به ویژه در تونل‌های یک‌طرفه در شرایط نرمال بسیار کارآمد است؛ اما تکیه بر این سیستم برای داشتن ایمنی مطلوب بسیار دشوار است. در حقیقت اکثر فاکتورهای این سیستم بسیار متغیر بوده و با زمان تغییر می‌کنند که خود سبب بروز عدم قطعیت خواهد شد.

در خلال حوادث آتش‌سوزی به دلیل سرعت نزدیک به صفر در امتداد تونل و نبود شدت جریان هوای کافی، دود در دو سوی تونل گسترش می‌یابد. این دود می‌تواند در مدت ۱۰ دقیقه فاصله‌ای در حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰

متر را بسته به هندسه تونل و شرایط آتش طی کند (شکل ۱-۱۳). لذا تهویه طبیعی گزینه‌ی مناسبی برای شرایط اضطراری و طراحی ایمنی تونل نیست (Maevski, 2016).



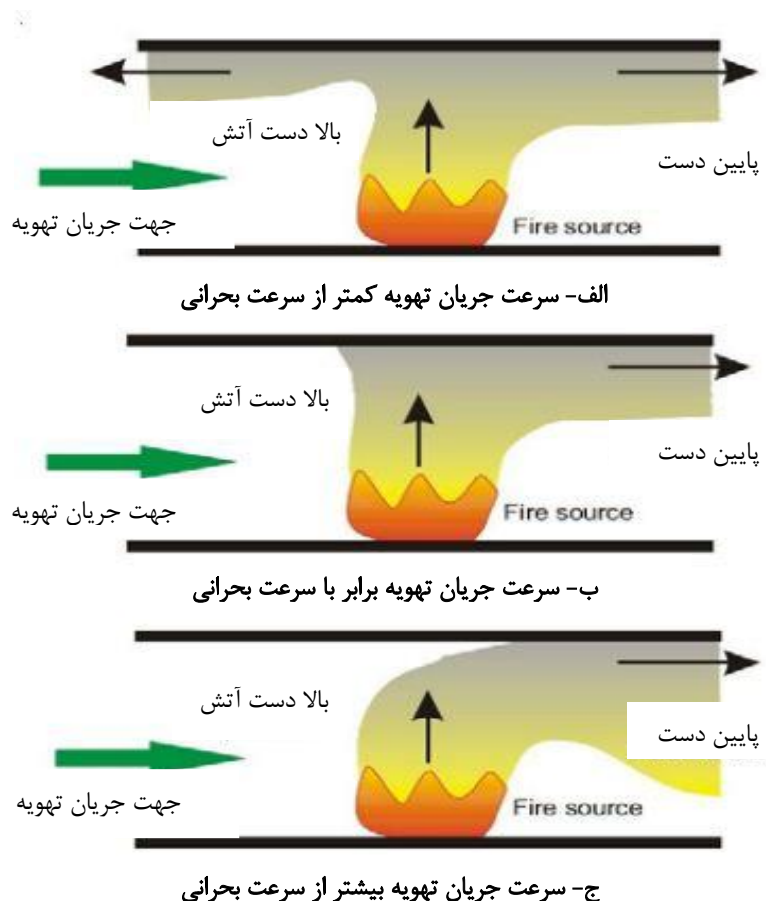
شکل ۱-۱۳: آتش‌سوزی در تونل با تهویه طبیعی (Zigar et al., 2011).

• عملکرد تهویه طولی در هنگام آتش‌سوزی در تونل

تهویه طولی، هوا را در داخل تونل وارد می‌کند یا دود و گازها را از تونل در چند نقطه‌ی محدود با تولید جریان طولی در امتداد طول تونل به سمت یک یا دو دهانه می‌راند. این سیستم باید سرعت هوا را به اندازه کافی افزایش دهد تا از پدیده عقب‌زدگی در تونل جلوگیری به عمل آورد. همان‌گونه که اشاره شد این سرعت با عنوان سرعت بحرانی شناخته می‌شود و از پارامترهای مهم در مطالعه آتش با تهویه طولی است (شکل ۱-۱۴). تهویه طولی برای تونل‌های یک‌طرفه مناسب است زیرا در زمان آتش‌سوزی افراد پایین دست می‌توانند از تونل خارج شوند اما افراد بالادست در پشت آتش متوقف خواهند شد (Maevski, 2016).

• عملکرد تهویه عرضی در هنگام آتش‌سوزی در تونل

این سیستم تهویه برای کنترل دود در زمان‌هایی کاربرد دارد که لایه‌بندی دود بدون کم یا زیاد شدن، هوای قابل تنفس و تمیز در زیر لایه دود در دو طرف آتش حفظ شود در حالی که دود از محل آتش‌سوزی خارج می‌شود. لایه دود از طریق دهانه‌های مکشی واقع در سقف تونل به خارج از آن منتقل خواهد شد. در طی آتش‌سوزی، فن‌های مکشی باید با بالاترین میزان ظرفیت کار کنند و فن تأمین‌کننده در کمترین میزان ظرفیت خود عمل کند (نصف یا $\frac{1}{3}$ تمام ظرفیت) که سرعت تهویه از ۳ متر بر ثانیه تجاوز نکند. این



شکل ۱-۴: تأثیر سرعت طولی جریان هوا در عقب زدگی و انتشار دود (Zigar et al., 2011).

موضوع به لایه‌بندی دود (در سقف تونل) اجازه می‌دهد که در بالاترین ارتفاع ممکن بماند و از طریق مکش با فن‌های مکشی بدون ترکیب شدن با هوای آزاد و با ایجاد یک محیط قابل تنفس در پایین خارج می‌شود. سرعت طولی جریان هوا در این سیستم تهویه معمولاً کمتر از ۲ متر بر ثانیه در محدوده‌ی آتش‌سوزی است. در سرعت‌های بالاتر اغتشاش و آشفتگی قائم در لایه بین دود و هوای تازه، به سرعت لایه بالایی را خنک کرده و دود در سراسر مقطع تونل ترکیب می‌شود. این ترکیب دود در سرتاسر سطح مقطع تونل قابل جلوگیری است در صورتی که خروج دود به اندازه کافی و در زمان مناسب آغاز شود.

عیب اصلی این سیستم تهویه در زمان آتش‌سوزی این است که خروج یکنواخت در امتداد طول تونل برای خروج کامل دود از محل آتش‌سوزی کارآمد نبوده و احتمال انتشار و گسترش دود در تونل وجود دارد و میزان هوای مورد نیاز برای خروج دود در تونل بسیار زیاد بوده و در تونل‌های بزرگ غیرعملی است. تأمین

چنین هوای مورد نیازی برای تونل‌های بزرگ سبب سرد شدن لایه دود و از بین رفتن لایه‌بندی آن می‌شود که در نتیجه در طول تونل دود پخش خواهد شد (Maevski, 2016).

• عملکرد تهویه نیمه عرضی در هنگام آتش سوزی در تونل

این سیستم حالت بهبود یافته سیستم تهویه عرضی است که با یک هوای یکنواخت مکشی با داکت در امتداد طول تونل و بدون سیستم تأمین‌کننده هوا است. در شرایط اضطراری این سیستم یک سرعت طولی در تونل ایجاد می‌کند و دود و گازها را در فواصل برابر خارج می‌کند. عیب اصلی این سیستم در خروج یکنواخت در تمام امتداد تونل است که زمینه خروج کامل دود را از محل آتش‌سوزی مهیا نمی‌کند و دود را در امتداد تونل پخش می‌کند. این روش نیز برای تأمین هوای مورد نیاز برای خروج دود ناکارآمد بوده و در تونل‌های بزرگ با آتش‌سوزی‌های بزرگ با مشکل مواجهه خواهد شد (Maevski, 2016).

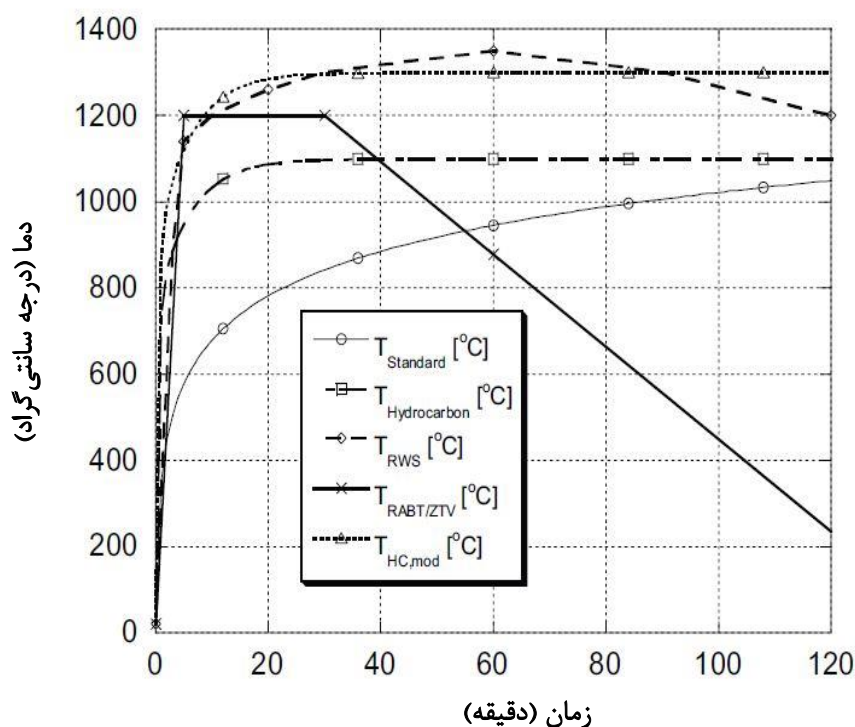
۱-۱۲- پارامترهای مهم آتش‌سوزی در تونل

۱-۱۲-۱- دما

دمای منتشر شده از آتش از پارامترهای اساسی در حوادث آتش‌سوزی تونلی است که امکان نزدیک شدن به آتش را از دو طرف با توجه به آن تعیین می‌کنند (Voeltzel and Dix, 2004). تونل‌های جاده‌ای عمدتاً با انواع مختلفی از پوشش‌ها نگهداری می‌شوند؛ اما هدف این پوشش‌ها از تونلی به تونل دیگر متفاوت است. در برخی موارد از این پوشش‌ها برای جلوگیری از ورود آب یا موارد دیگر استفاده می‌شود اما در برخی موارد این پوشش‌ها برای حفاظت سازه در مقابل آتش‌سوزی نصب می‌شوند؛ اما مسئله‌ای که در این رابطه وجود دارد تعیین این مورد است که سازه تونل چه آتش‌سوزی‌های احتمالی را می‌تواند تحمل کند یا به عبارت دیگر برای سازه تونل قابل تحمل است. در واقع این مسئله هم آتش‌سوزی و هم توزیع دمایی منتشر شده بر روی سازه را در برمی‌گیرد. از جمله منحنی‌های استاندارد برای آزمایش دمای منتشر شده منحنی ISO 834 است. این منحنی برای مواد موجود در ساختمان توسعه داده شده است و از آن برای تونل‌ها نیز استفاده می‌شده است، اما به وضوح مشخص است که این منحنی نماینده همه‌ی مواد همچون سلولزی، شیمیایی و غیره نیست در نتیجه در سال ۱۹۷۰ از یک منحنی ویژه دیگر تحت عنوان منحنی هیدروکربن (HC) که برای

مواد شیمیایی کاربرد دارد در تونل‌سازی نیز استفاده شد (Lonnermark, 2005). تفاوت اصلی این دو منحنی در توسعه سریع‌تر آتش و افزایش دمایی بالاتر در منحنی HC برای آتش‌سوزی‌های شیمیایی است.

منحنی‌های دمایی ویژه‌ای در برخی کشورها برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی تونل‌ها توسعه داده شده است. به عنوان مثال در آلمان منحنی RABT/ZTV و در هلند منحنی تونل RWS بر پایه مقیاس آزمایشگاهی توسعه یافته است. در فرانسه یک نمونه اصلاح شده از منحنی هیدروکربنی به دست آمده است که منحنی هیدروکربنی اولیه را توسط یک فاکتور ($1300/1100$ درجه سانتی‌گراد) افزایش داده‌اند. در شکل ۱-۱۵ پنج منحنی دمایی آتش‌سوزی نشان داده شده است.



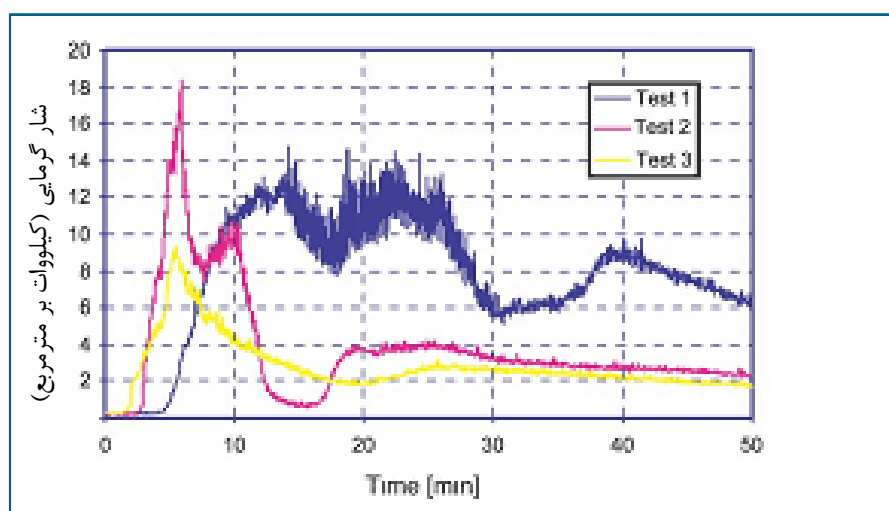
شکل ۱-۱۵: منحنی‌های دمایی برای مواد مختلف برای مشخص شدن دمای آزاد شده در طی زمان (Lonnermark, 2005).

باید به این نکته توجه کرد که اندازه‌گیری‌های دمایی با عدم قطعیت‌هایی همراه است. در آزمایش‌های آتش‌سوزی به طور معمول، ترموکوپل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. باید توجه داشت که علاوه بر عدم قطعیت‌هایی که در حس‌گرهای آن‌ها وجود دارد، ترموکوپل‌ها می‌توانند از تابش آتش نیز تحت تأثیر قرار

گیرند. این بدین مفهوم است که مقایسه دماهای اندازه‌گیری شده به علت اثر تابش، می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد و تا حدودی همراه با خطا باشد.

۱-۱۲-۲- تابش^۱

دمای بالا، تابش بیشتر را افزایش می‌دهد که این تابش از این نقطه نظر که آتش به سایر وسایل اطراف نیز منتقل شود بسیار حائز اهمیت است. از دیگر مسائل مهم در تابش، توجه به چگونگی نزدیک شدن آتش‌نشانان به آتش است زیرا تابش بالا در توانایی افراد برای نزدیک شدن به آن تأثیر فراوانی دارد. آزمایش‌های متفاوتی برای ارزیابی تابش گرما از آتش‌سوزی انجام شده است که بر اساس نتایج به دست آمده از این سری آزمایش‌ها مشخص شد که یک محدوده تقریباً ۵ کیلووات بر مترمربع وجود دارد و در مقادیر بیشتر از آن امکان نزدیک شدن به آتش بسیار مشکل است. اما بر اساس سری آزمایش‌های آتش‌سوزی تونل و اجرا شده در سه آزمایش که در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است مشخص شد که این مقدار بیشتر است و پس از پنج دقیقه دیگر توان تحمل برای آن‌ها باقی نخواهد ماند. آتش‌نشانان باید علاوه بر مقاومت در چنین وضعیتی توانایی کار و فعالیت نیز داشته باشند (www.promat-tunnel.com, 2016)؛ بنابراین پارامتر تابش عامل مهمی در کنترل آتش‌سوزی و انتقال آن به محیط‌های اطراف و وسایل موجود در آن‌ها به حساب می‌آید.



شکل ۱-۱۶: تابش حاصل از آتش‌سوزی در آزمایش‌های بزرگ مقیاس (www.promat-tunnel.com, 2016)

¹ Radiation

۱-۱۲-۳- تمرکز گازی ناشی از آتش‌سوزی در تونل

علت اصلی مرگ و میر در اکثر آتش‌سوزی‌های تونلی استنشاق گازهای متصاعد شده از آتش می‌باشد. در بسیاری از آتش‌سوزی‌ها افراد بدون تماس با آتش در وسایل نقلیه خود کشته می‌شوند که علت آن گازهای متصاعد شده است. در واقع افزایش دما می‌تواند بر سلامت فیزیکی و توانایی فرار افراد تأثیر داشته باشد. در این میان وجود منوکسید کربن (CO) به عنوان محصول جانبی آتش‌سوزی مهم‌ترین جزء و عامل اصلی مرگ و میر است، حتی با این وجود که اثر سیانید هیدروژن (HCN) در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Simonson et al., 2000; Purser, 2002)، اما در بررسی انجام شده توسط نلسون^۱ مشخص شده است که تمرکز بالای سیانید هیدروژن HCN در خون قربانیان را نیز می‌توان به دلیل تمرکز بالای منواکسید کربن CO دانست (Nelson, 1998).

بنابراین در چنین شرایطی باید به این نکته توجه داشت که عملکرد سیستم تهویه در تجمع، گسترش و توزیع گاز در تونل از اهمیت خاصی برخوردار است و سیستم تهویه مناسب با عملکرد به موقع و صحیح خود می‌تواند از بروز حوادث وخیم‌تر جلوگیری به عمل آورد.

۱-۱۲-۴- آهنگ رهایش گرما از آتش

طول تونل و تراکم ترافیک معمولاً به عنوان پارامترهای کلیدی و اصلی طراحی در تعیین سطح ایمنی انواع تونل‌ها در نظر گرفته می‌شوند، اما با این وجود در بیشتر طراحی‌های مهندسی پیشرفته سیستم‌های محافظت در مقابل آتش، آهنگ رهایش گرمای آتش (HRR) برای وسایل نقلیه موجود در تونل از مهم‌ترین ورودی‌ها به حساب می‌آید. نرخ گرمای رها شده HRR به فاکتورهای متعددی بستگی دارد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Karlsson and Quintiere, 2000):

- منبع و عامل احتراق
- نوع وسیله نقلیه
- اندازه و هندسه یا شکل وسیله نقلیه
- نوع مواد موجود در تونل

¹ Nelson

- شرایط، عملکرد و نوع سیستم تهویه

تجارب به دست آمده از آتش‌سوزی تونل‌های بزرگ نشان‌دهنده‌ی آن است که نرخ گرمای رها شده HRR مهم‌ترین پارامتر برای توصیف گسترش و اثرات آتش در تونل است. به طور کلی سه سناریوی متفاوت برای آتش‌سوزی تونل‌ها وجود دارد (Ko, 2011):

- آتش‌سوزی خودروهای سواری (سبک) که به علت تصادفات یا خرابی آن‌ها رخ می‌دهد.
- آتش‌سوزی خودروهای باری سنگین (HGV^1) که سریعاً و با نرخ بسیار بالا به مواد موجود در تریلر منتقل می‌شود.

- آتش‌سوزی حوضچه حریق به علت تصادف یا خرابی وسیله نقلیه آن که این آتش به تانکر منتقل می‌شود.

هر کدام از این سناریوها مقدار گرمای آزاد شده مشخصی را دارا می‌باشند که در جدول ۱-۲ برحسب مگاوات ارائه شد. نتایج اندازه‌گیری‌های نرخ گرمای رها شده HRR در آتش‌سوزی تونل‌ها نشان می‌دهد که دقت این اندازه‌گیری‌ها متفاوت بوده و مقادیر آن‌ها با یکدیگر تفاوت دارند. خطای اندازه‌گیری‌ها در حدود ۱۵ تا ۲۵٪ در آزمایش‌های بزرگ مقیاس و در حدود ۷ تا ۱۱٪ در آزمایشگاه می‌باشد (Axelsson et al., 2001).

۱-۱۲-۵- لایه‌بندی دود

به طور کلی ساختار آتش‌سوزی تونل بسیار پیچیده است و به عوامل متعددی همچون شیب و هندسه تونل، ظرفیت سیستم تهویه، واکنش مواد شیمیایی و غیره وابسته است. در آتش‌سوزی تونل یکی از مهم‌ترین تهدیدات اصلی برای سلامت و جان افراد در معرض قرار گرفتن با آتش نیست بلکه همان‌گونه که ذکر شد استنشاق دود خطرناک‌تر است؛ بنابراین کنترل مناسب دود با استفاده از سیستم تهویه یکی از پارامترهای ارجح در طراحی سیستم تهویه تونل و درک درست از چگونگی انتشار و گسترش دود در تونل نکته کلیدی در طراحی سیستم تهویه است (Brahim et al., 2013).

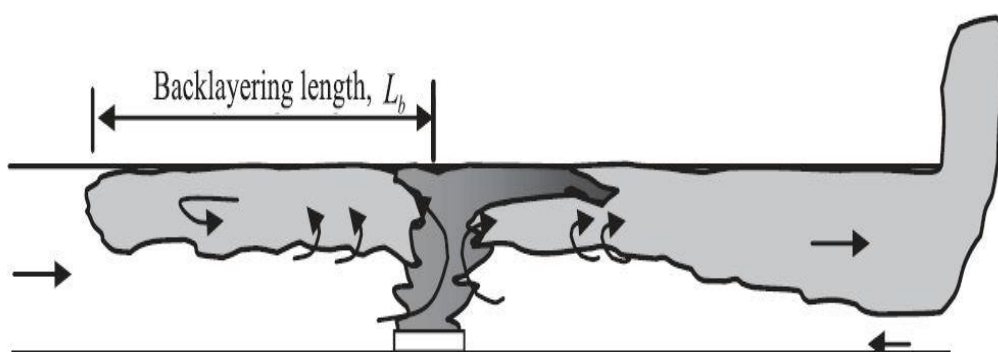
¹ Heavy Good Vehicle

در واقع لایه‌بندی دود وابسته به سرعت تهویه طولی و نیروی شناوری تولید شده توسط آتش است. به علت نیروهای شناوری، دودهای داغ به سمت بالا جریان می‌یابند و فضای بالای تونل را اشغال می‌کنند. در نتیجه یک لایه‌بندی واضح در برخی نواحی وجود خواهد داشت.

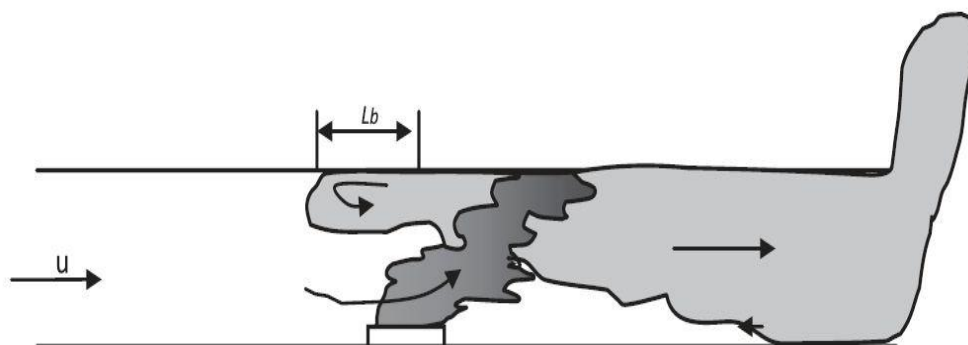
در آتش‌سوزی تونل، ویژگی‌های دود متصاعد شده شدیداً به سرعت هوای داخل تونل بستگی دارد. به ویژه در محدوده‌ی اطراف آتش این وابستگی بیشتر است. در تونل‌ها سه نوع محدوده‌ی سرعت هوا وجود دارد که به شرح زیر می‌باشند (Ingason et al., 2014):

- بدون سرعت یا سرعت بسیار پایین (۱-۰ متر بر ثانیه)
- سرعت متوسط جریان هوا (۳-۱ متر بر ثانیه)
- سرعت بالای جریان هوا (بیش از ۳ متر بر ثانیه)

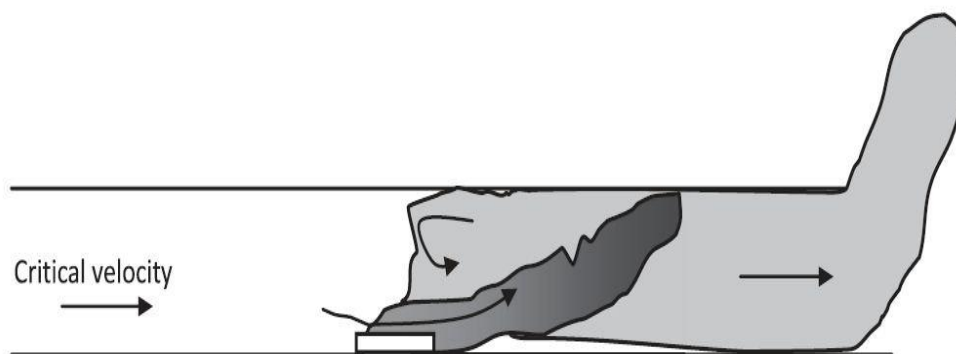
در شکل‌های ۱۷-۱ تا ۱۹-۱ نمای شماتیک از وضعیت سرعت‌های ذکر شده نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۱: طرحی ساده از لایه‌بندی دود در تونل با سرعت کم جریان هوا (Ingason et al., 2014).



شکل ۱۸-۱: طرحی ساده از لایه‌بندی دود در تونل با سرعت متوسط جریان هوا (Ingason et al., 2014).



شکل ۱-۱۹: طرحی ساده از لایه‌بندی دود در تونل با سرعت زیاد جریان هوا (Ingason et al., 2014).

۱-۱۲-۶- طول شعله آتش

در آتش‌سوزی‌های بزرگ، طول شعله و میزان گسترش آن در زیر سقف تونل نیازمند توجه خاصی است که در ارتباط با نرخ گرمای رها شده HRR با مقادیر بیش از ۲۰ مگاوات برای اکثر تونل‌ها است. به علت فضای بسته تونل، طول شعله زیر سقف به طور معمول بیشتر از فضای باز است. این کشیدگی افقی منجر به خطر بیشتر برای پخش و گسترش آتش به وسایل نقلیه اطراف خواهد شد. با در نظر گرفتن این حقیقت که خطر انتشار و گسترش آتش‌سوزی با طول شعله افزایش می‌یابد، لذا نیازمند دقت و توجه بیشتر به عنوان یک پارامتر اساسی در طراحی سیستم تهویه است (Zhen Li and Ingason, 2015).

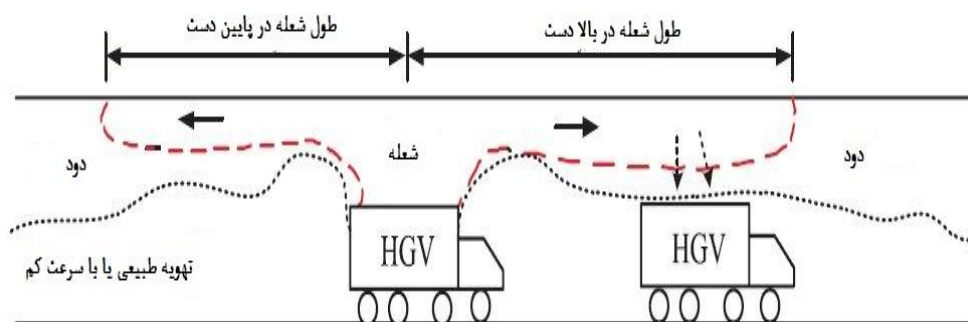
شعله، منطقه‌ای با دمای گازی بالا را نشان می‌دهد که در واقع شعله قابل رؤیت محصول احتراقی است که از تابش قابل رؤیت منتشر می‌شود.

احتراق سوخت در دو بخش دسته‌بندی می‌شود:

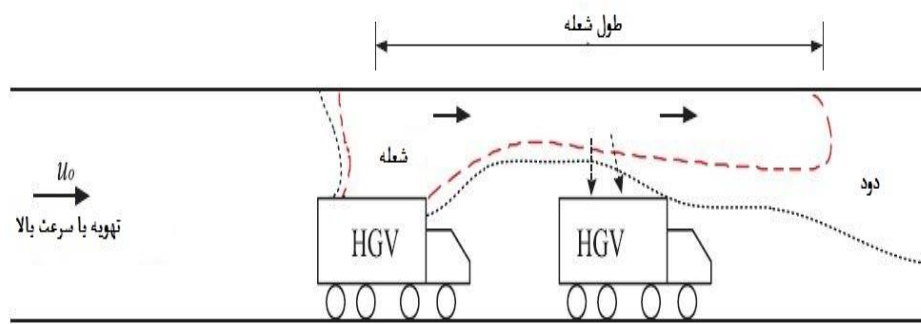
- در ناحیه قائم شعله، بخشی از گازهای قابل احتراق می‌سوزند و جریاناتی به سمت بالا تا رسیدن به سقف تونل به وجود خواهد آمد.

- در بخش افقی شعله، قسمت دیگری از گازهای قابل احتراق در امتداد سقف و با فاصله مشخص از پایین دست منبع آتش‌سوزی می‌سوزند.

در شکل‌های ۲۰-۱ و ۲۱-۱ شعله منتشر شده از جریان با سرعت تهویه کم و زیاد نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصاویر نیز مشخص شده است شعله‌ها عمدتاً در دو طرف با توزیع متقارن نیستند و تنها در شرایط تهویه با سرعت پایین یا تهویه طبیعی شعله‌ها به صورت تقریباً متقارن خواهند بود.



شکل ۲۰-۱: طول شعله در آتش‌سوزی‌های بزرگ تونلی تحت تهویه طبیعی (Zhen Li and Ingason, 2015).



شکل ۲۱-۱: طول شعله در آتش‌سوزی‌های بزرگ تونلی با تهویه سرعت بالا (Zhen Li and Ingason, 2015)

۱۳-۱- روش‌های مطالعه‌ی آتش‌سوزی در تونل‌ها

رفتار پدیده آتش تحت شرایط مختلف متفاوت است و از روش‌های متفاوتی نیز برای ارزیابی و سنجش این پدیده استفاده می‌شود. عموماً رفتار آتش در تونل تحت تأثیر شرایط و عوامل مختلف است و بدیهی است که تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر بر اساس محیط اجرا از تونلی به تونل دیگر متفاوت است. به دلیل همین پیچیدگی رفتاری آتش از روش‌های متناسب با چنین حالاتی نیز باید استفاده کرد تا بتوان نتایج به دست آمده را تا حد ممکن به واقعیت نزدیک کرد. هر یک از روش‌های موجود بر اساس اطلاعات و دقت اجرا در شرایط مختلف نتایج متفاوتی را ارائه خواهند کرد.

برای مطالعه‌ی رفتار آتش بایستی از علم دینامیک (مکانیک حرکت) آتش^۱ بهره برد. دینامیک آتش مطالعه‌ی چگونگی شیمی آن، چگونگی تعامل و اندرکنش مکانیک سیالات و انتقال حرارت در بررسی رفتار آتش است. به عبارت دیگر علم دینامیک حرکت آتش مطالعه‌ی چگونگی شروع، پخش، گسترش و توسعه‌ی آن است (www.nist.gov, 2013). با در نظر گرفتن تمامی پارامترها و پیچیدگی اندرکنش بین آن‌ها روش‌های زیر برای مطالعه‌ی آتش و تأثیر آن در تونل و محیط اطراف به کار برده می‌شود:

- روش شبیه‌سازی عددی^۲

استفاده از کامپیوتر به علت حجم محاسبات بالا

- روش تجربی (انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس یا آزمایش‌های کوچک مقیاس)

۱-۱۳-۱- روش شبیه‌سازی عددی

تحلیل و بررسی آتش و سیستم تهویه و پیامدهای ناشی از هر دو می‌تواند با استفاده از روش‌های عددی و بر پایه و بنیان محاسبات ریاضی از این پدیده‌های فیزیکی انجام شود. روش‌های عددی به علت تسلط طراح از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار هستند و از سایر روش‌های مطالعاتی در این زمینه ارزان‌تر و با قابلیت بررسی پارامترهای بیشتر در طراحی هستند که حتی می‌توان برای هر یک از پارامترها نیز به تحلیل حساسیت پرداخت.

دقت مدل‌های عددی باید بر اساس یافته‌ها و نتایج حاصل از آزمایش‌های واقعی و اطلاعات موجود مقایسه و بررسی شوند. روش‌های عددی متفاوتی برای بررسی ایمنی و پدیده آتش در تونل‌ها استفاده شده است. دسته‌بندی انواع روش‌های مرتبط با مدل‌سازی آتش به قرار زیر است (Colella, 2010):

- مدل‌سازی یک‌بعدی

رفتار کلی این پدیده‌ها را می‌توان با استفاده از مدل‌های سیالات دینامیکی یک‌بعدی (1D) تحت این فرض انجام داد که همه‌ی مقادیر حرکت سیال در هر مقطع از تونل یکنواخت است و افت‌ها تنها در امتداد طولی

¹ Fire Dynamics

² Numerical Simulation

تونل وجود دارند. مدل‌های یک‌بعدی نیاز به محاسبات کمتری دارند. اما تطابق این شبیه‌سازی با مبحث حریق سخت خواهد بود.

- **مدل‌سازی ناحیه‌ای (Zone Model)**

در مدل‌های ناحیه‌ای، فضای مربوط به مدل‌سازی را به یک یا چند ناحیه تقسیم‌بندی می‌کنند. اکثر مدل‌های استفاده شده برای آتش، تقسیم‌بندی را در دو ناحیه انجام می‌دهند. یک لایه در بالا دربرگیرنده محصولات داغ احتراق است و لایه پایینی هوای به نسبت سردتر را در خود جای داده است (Anthony and Putorti, 2015).

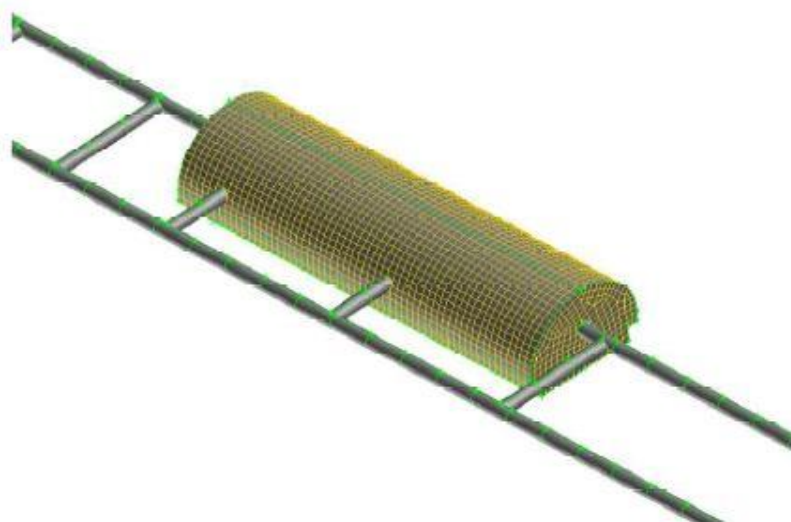
در واقع مدل‌های ناحیه‌ای بر پایه‌ی شواهد تجربی است و به طور گسترده برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی درون محفظه به کار می‌رود که البته کاربرد آن در سناریوهای مختلف آتش در تونل محدود است. این روش شبیه‌سازی قادر به شبیه‌سازی دینامیک دود در تونل نیست.

- **روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)**

این روش در علم ایمنی آتش در تونل که اطلاعات جریان مورد نیاز است به کار گرفته می‌شود. چنین روشی قادر است که جزئیات دمایی و سرعت، حرکات دود و لایه‌بندی آن، ارزیابی و سیر حرکت گازهای سمی در فضا، بررسی شار گرمایی و شرایط تحت زمان و دیگر متغیرهای مهم را فراهم آورد.

- **مدل‌سازی چند مقیاسی (Multi- Scale Modelling)**

در سطوح متفاوتی از پیچیدگی در محاسبات عددی سیستم از این روش استفاده می‌شود. مفهوم این روش گسترش و توسعه‌ی مدل‌های مرسوم یک‌بعدی و CFD با یکدیگر و به طور هم‌زمان است. مدل‌سازی چند مقیاسی یک شبکه‌بندی محاسباتی پیوندی را با ارتباط اجزای مدل یک‌بعدی با سه‌بعدی حل می‌کند. در واقع مدل سه‌بعدی با استفاده از CFD و مدل‌سازی‌های مرسوم یک‌بعدی صورت می‌گیرد. در شکل ۱-۲۲ نمایی از این مدل‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۱-۲۲: مدل سازی چند مقیاسی (Colella, 2010)

۱-۱۳-۲- روش آزمایش های تجربی

آزمایشات تجربی ممکن است بر روی تونل های موجود و عموماً غیرقابل استفاده برای ترابری (آزمایشات بزرگ مقیاس) و یا بر روی مدل های ساخته شده (آزمایشات مقیاس کوچک) انجام گیرد.

• آزمایش های بزرگ مقیاس

در واقع اکثر آزمایش های بزرگ مقیاس، در تونل های غیرقابل استفاده، اجرا می شوند. با وجود این که خطاهای به نسبت بالایی در اجرای این آزمایش ها به دلیل محدودیت در ثبت داده ها وجود دارد اما نتایج جالبی را به محققین ارائه می دهند؛ زیرا در مقیاس واقعی انجام می شوند و به علت هزینه های بالا تنها تعداد محدودی از این آزمایش ها انجام شده است.

• آزمایش های کوچک مقیاس^۱

آزمایش های کوچک مقیاس به دلیل هزینه های پایین تر و دقت بالاتر در ثبت نتایج در میان محققین از اهمیت خاصی برخوردار هستند و در پژوهش های متفاوتی از آن ها استفاده می شود. این آزمایش ها برای نمایش آتش در تونل های طراحی شده در یک مقیاس خاص به کار گرفته می شوند. این روش بر پایه قوانین

¹ Small Scale Experiment

تشابه هیدرولیکی می‌باشد. این قوانین در واقع یک پل ارتباطی بین شرایط و ویژگی‌های تونل واقعی با شرایط و ویژگی مدل ساخته شده آن است (PIARC, 1999). هدف چنین آزمایش‌هایی، نشان دادن پدیده‌هایی است که با گسترش آتش در خلال آتش‌سوزی درون تونل رخ می‌دهند. مقایسه هزینه‌های این آزمایش‌ها با هزینه‌های آزمایش‌های بزرگ مقیاس قابل توجه بوده و سبب صرفه‌جویی چشم‌گیری از نظر زمانی و پولی خواهد شد. یکی دیگر از اهداف چنین آزمایش‌هایی، امکان قابل رؤیت کردن و مشاهده دود از طرق مختلف (با استفاده از نور لیزر و جریان رنگی) و نحوه گسترش آن در تونل است. مدل‌های کوچک مقیاس می‌توانند برای توصیف اثرات دود در سقف تونل در شرایط متفاوت و یا برای تعیین وجود عقب‌زدگی در بالادست تونل در حین آتش‌سوزی به کار برده شوند (PIARC, 1999). همان‌گونه که ذکر شد قانون تشابه هیدرولیکی عامل اصلی در ارتباط متناظر مدل آزمایشگاهی با وضعیت واقعی است. اگر این ارتباط به درستی برقرار نشود نتایج حاصل از آن نیز قابل قبول نبوده و بیانگر شرایط بزرگ مقیاس نیز نیست.

۱-۱۴- جمع‌بندی

کنترل حریق، کاهش عوارض و آسیب‌های ناشی از آن در تونل‌ها با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها، استفاده از تهویه در شرایط اضطراری است. در این فصل کلیاتی در رابطه با مهم‌ترین عامل اخلاک‌کننده ایمنی تونل‌ها (آتش‌سوزی)، روند توسعه‌ی آتش، روش برآورد اندازه آتش و انواع سیستم تهویه ارائه شد و در ادامه آن پارامترهای مهم آتش‌سوزی و روش‌های مطالعه‌ی آتش‌سوزی در تونل‌ها تشریح شد. روش‌های مطالعه آتش‌سوزی مبنای مهمی در سایر پژوهش‌ها و این رساله است که نتایج گسترده و کاربردی را می‌توان براساس آن به دست آورد. در فصل بعدی در رابطه با بررسی سابقه‌ی علمی سرعت بحرانی و مطالعات مختلف آن توضیحاتی مطرح خواهد شد.

فصل دوم

بررسی سابقه‌ی علمی موضوع

۱-۲- مقدمه

با مرور حوادث مخرب در تونل‌ها که در سال‌های مختلف رخ داده است مشخص می‌شود که آتش‌سوزی مخرب‌ترین پدیده‌ی موجود است. به منظور درک بهتر از آتش‌سوزی‌های تونل و نتایج آن در شرایط مختلف، بررسی و تحلیل آتش‌سوزی‌های پیشین و بزرگ در تونل‌ها مهم است. تفاوت عمده بین آتش‌سوزی‌های مختلف از یک سو مرتبط با عوامل ایجاد و رخداد این آتش‌سوزی‌ها و از سوی دیگر مرتبط با نحوه‌ی توسعه و گسترش این احتراق است. هدف این فصل بررسی سابقه علمی سرعت بحرانی است، در همین راستا ابتدا به آتش‌سوزی‌های تونلی که در دهه‌های گذشته رخ داده است، اشاره خواهد شد سپس آزمایش‌های بزرگ مقیاسی مرور می‌شوند که به منظور مطالعه آتش در تونل انجام شده‌اند در بخش انتهایی این فصل نیز مطالعات صورت گرفته در شناخت و تخمین سرعت بحرانی آورده شده است.

۲-۲- آتش‌سوزی درون تونل‌ها

آتش‌سوزی درون تونل‌ها را می‌توان در سه دسته آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای، آتش‌سوزی تونل‌های راه‌آهن و آتش‌سوزی تونل‌های مترو تقسیم‌بندی کرد. در ادامه هر یک از آتش‌سوزی‌های مرتبط با این سه دسته بر اساس جزئیات مربوط به آن‌ها در جدول‌های ۱-۲ تا ۴-۲ آورده شده است.

• آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای

این آتش‌سوزی‌ها به علت تخلفات و حوادث رانندگی و با دخالت انسانی همچون عدم کنترل مناسب وسیله نقلیه رخ می‌دهند. از دیگر مسائلی که سبب افزایش خطرات و مشکلات این تصادفات می‌شود وجود وسایل نقلیه سنگین است، که علاوه بر بروز آتش‌سوزی سبب خسارات عدیده‌ای بر ساختار داخلی تونل نیز می‌شوند. در جدول‌های ۱-۲ و ۲-۲ خلاصه‌ای از آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای با ذکر جزئیات مربوطه آورده شده است.

جدول ۱-۲: آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای بدون تلفات

سال	نام تونل، طول تونل	موقعیت	علت آتش‌سوزی	مدت زمان	تعداد افراد آسیب‌دیده	وسایل نقلیه	وضعیت ساختار تونل
۱۹۶۸	Moorfleet, L=243m	آلمان	شکسته شدن جعبه دنده	1h 30 min	-	1 HGV	آسیب شدید در شعاع ۳۴ متر
۱۹۷۶	B6, L=430m	فرانسه	-	1h	۱۲ زخمی	1 HGV	آسیب در شعاع ۱۵۰ متر
۱۹۸۳	Frejus, L=12868m	فرانسه	شکسته شدن جعبه دنده	1h 50min	-	1 HGV	آسیب در شعاع ۲۰۰ متر
۱۹۸۴	Gotthard, L=16322m	سوئیس	آتش‌سوزی در موتور	24min	-	1 HGV	آسیب در شعاع ۱۵۰ متر
۱۹۹۳	Frejus, L=12868m	فرانسه	آتش‌سوزی در موتور	2h	-	1 HGV	-
۱۹۹۴	Gotthard, L=16322m	سوئیس	اصطکاک لاستیک	2h	-	1 HGV	بسته شدن تونل به مدت ۲,۵ روز
۱۹۹۶	Channel, L=50000m	فرانسه	موارد مشکوک	-	۳۰ زخمی	10 HGV	آسیب شدید در سقف تونل
۱۹۹۷	Gotthard, L=16322m	سوئیس	آتش‌سوزی در محفظه موتور	1h 20min	-	1 HGV	آسیب شدید شعاع در ۱۰۰ متر
۲۰۰۰	Seljestads, L=1272m	نروژ	محفظه موتور	45min	۶ زخمی	1 HGV 6cars 1MC	آسیب شدید
۲۰۰۲	Tauern, L=6400m	استرالیا	نقص موتور	-	-	1 HGV	آسیب شدید
۲۰۰۴	Frejus, L=12868m	فرانسه	موتور	2.5h	۳۰ زخمی	1 HGV	-
۲۰۰۶	Mastrafjord	نروژ	نقص موتور	0.5h	-	1 HGV	-
۲۰۰۸	Sodra Lanken	سوئد	نقص موتور	0.5h	-	1 HGV	-
۲۰۱۰	Trojane, L=3000m	اسلوواکی	برخورد ۶ HGV	<1h	۵ زخمی	2 HGV	آسیب به پوشش داخلی
۲۰۱۱	Oslofjord, L=7230m	نروژ	مشکل موتور	<1h	۴ زخمی	1 HGV	-
۲۰۱۱	Oslofjord, L=7230m	نروژ	شکسته شدن موتور	<1h	۱۲ زخمی	1 HGV	آسیب به پوشش داخلی
۲۰۱۳	Gudvange	نروژ	مشکل موتور	1h	۷۰ زخمی	1 HGV	آسیب به پوشش داخلی
۲۰۲۱	آزادراه تهران پردیس	ایران	مشکل موتور	-	-	اتومبیل	-
۲۰۲۱	تونل گردنه خان	ایران	مشکل موتور	-	-	اتومبیل	-

جدول ۲-۲: آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای با تلفات جانی

سال	نام تونل، طول تونل	موقعیت	تعداد افراد آسیب‌دیده	وسایل نقلیه	وضعیت ساختاری تونل
۱۹۷۸	Velsen, L=770m	هلند	۵ کشته ۵ زخمی	2 HGV ۴ اتومبیل	تخریب شدید ۳۰ متر
۱۹۷۹	Nihonzaka, L=2045m	ژاپن	۷ کشته ۲ زخمی	127 HGV ۴۶ اتومبیل	تخریب ۱۱۰۰ متر
۱۹۸۰	Kajiwara, L=740	ژاپن	۱ کشته	۲ کامیون	تخریب ۲۸۰ متر
۱۹۸۲	Caldecott, L=1083 m	آمریکا	۷ کشته ۲ زخمی	1 HGV ۱ اتوبوس ۴ اتومبیل	تخریب ۵۸۰ متر
۱۹۸۷	Gumefens, L=340 m	سوئیس	۲ کشته	2 HGV ۱ اتومبیل	تخریب جزئی
۱۹۹۳	Serra, L=442 m	ایتالیا	۴ کشته ۴ زخمی	4 HGV ۱۱ اتومبیل	آسیب شدید به پوشش داخلی
۱۹۹۶	Isola, L=150m	ایتالیا	۵ کشته ۳۴ زخمی	۱ تانکر سوخت ۱ اتوبوس ۱۸ اتومبیل	آسیب شدید به پوشش داخلی
۱۹۹۹	Mont Blanc, L=11600m	فرانسه-ایتالیا	۳۹ کشته	23 HGV ۱ کامیون کوچک ۹ اتومبیل	بسته شدن تونل به مدت ۳ سال
۱۹۹۹	Tauren, L=6400m	استرالیا	۱۲ کشته	16 HGV ۲۴ اتومبیل	بسته شدن تونل به مدت ۳ ماه
۲۰۰۱	Gleinalm, L=8320m	استرالیا	۵ کشته ۴ زخمی	1 HGV ۱ اتومبیل	-
۲۰۰۱	Gotthard, L=16322m	سوئیس	۱۱ کشته	13 HGV ۱۰ اتومبیل	بسته شدن تونل به مدت ۲ ماه
۲۰۰۳	Baregg	سوئیس	۱ کشته ۱ زخمی	-	-
۲۰۰۵	Frejus, L=12900m	فرانسه/ایتالیا	۲ کشته ۲۱ زخمی	4 HGV	طول ۱۰ کیلومتر نیازمند تعمیرات
۲۰۰۶	Eidsvoll, L=1200m	نروژ	۱ کشته ۲ زخمی	HGV	آسیب به سیستم نور رسانی
۲۰۰۶	Viamala, L=700m	سوئیس	۹ کشته ۵ زخمی	۱ اتوبوس ۲ اتومبیل	آسیب به پوشش داخلی
۲۰۰۷	Burnley, L=3400m	استرالیا	۳ کشته ۲ زخمی	۳ کامیون ۴ اتومبیل	بدون آسیب
۲۰۰۷	San Martino, L=4800m	ایتالیا	۲ کشته ۱۰ زخمی	1 HGV	-
۲۰۰۷	Newhall, L=167m	آمریکا	۳ کشته ۱۰ زخمی	30 HGV ۱ اتومبیل	آسیب شدید
۲۰۰۹	Follo, L=900m	نروژ	۱ کشته	تخریب ۴۲ وسیله نقلیه	آسیب شدید
۲۰۱۴	Yanhou	چین	۳۱ کشته	-	-

• آتش‌سوزی تونل‌های راه‌آهن و مترو

این آتش‌سوزی‌ها به دلیل نقص فنی در ریل‌ها یا خطای لوکوموتیوران، اشکالات سیستم الکتریکی تونل، خرابی لوکوموتیو و یا آتش‌سوزی‌های عمدی رخ داده‌اند. پتانسیل حوادث خطرناک با مرگ‌ومیر بالا در تونل‌های راه‌آهن و مترو بیشتر از تونل‌های جاده‌ای است که عمده دلیل آن در ارتباط با تعداد مسافران و افراد درگیر در آن است. در جدول‌های ۲-۳ و ۲-۴ خلاصه‌ای از آتش‌سوزی تونل‌های راه‌آهن و مترو آورده شده است.

جدول ۲-۳: خلاصه حوادث آتش‌سوزی در تونل‌های راه‌آهن (Carvel and Beard, 2012).

سال	نام/کشور/طول	پیامدها
۱۹۲۱	Batignolles / فرانسه / 1 km	۲۸ کشته
۱۹۷۱	Wranduk / یوگسلاوی	۳۴ کشته و ۱۲۰ زخمی
۱۹۷۲	Hokoriko / ژاپن	۳۰ کشته
۱۹۷۶	Baocheng / چین	۵ کشته
۱۹۸۴	Summit / انگلستان / 2.6 km	تعطیلی چندین ماه تونل
۱۹۹۱	Dayaoshan / چین / 14.3 km	۱۲ کشته
۱۹۹۶	Channel / فرانسه / 51 km	۳۴ زخمی و آسیب شدید به تونل
۱۹۹۸	Guizhou / چین / 0.8 km	۶ کشته و ۲۰ زخمی
۱۹۹۹	Salerno / ایتالیا / 9km	۴ کشته و ۹ زخمی
۲۰۰۰	Kitzsteinhorn / اتریش / 3.3 km	۱۵۵ کشته
۲۰۰۸	Channel / فرانسه / 51 km	خسارت به ۶۵۰ متر

جدول ۲-۴: خلاصه حوادث آتش‌سوزی در تونل‌های مترو (Carvel and Beard, 2012).

سال	کشور	پیامدها
۱۹۰۳	فرانسه	۸۴ کشته
۱۹۷۲	ژاپن	۳۰ کشته و ۶۹۰ زخمی
۱۹۷۹	آمریکا	۱ کشته و ۵۸ زخمی
۱۹۸۷	انگلستان	۳۱ کشته
۱۹۹۰	آمریکا	۲ کشته و ۲۰۰ زخمی
۱۹۹۱	روسیه	هفت کشته و ۱۰ زخمی
۱۹۹۵	آذربایجان	۲۸۹ کشته
۲۰۰۳	کره جنوبی	۱۹۸ کشته

از آنجایی که پدیده آتش‌سوزی بسیار پیچیده است، لذا شناخت آن به طور کامل انجام نشده است و به همین دلیل انجام آزمایش‌های تجربی با مقیاس‌های متفاوت بر روی این پدیده در تونل‌ها همواره مدنظر بوده است. در این راستا مطالعاتی در مقیاس آزمایشگاهی نیز صورت پذیرفته است که در مجموع همه‌ی این آزمایش‌ها در حد خود، توانایی درک بهتر از پدیده‌ی آتش‌سوزی را فراهم می‌آورند. در ادامه به آزمایش‌های مختلفی که برای شناخت دینامیک آتش طراحی و اجرا شده است پرداخته خواهد شد.

۲-۳- آزمایش‌های آتش‌سوزی

آزمایش‌های بزرگ مقیاس معمولاً پرهزینه و زمان‌بر هستند، به همین دلیل تعداد و درخواست برای انجام چنین آزمایش‌هایی کم و محدود است؛ اما چنین آزمایش‌هایی می‌توانند نتایج تا حدی قابل قبول در مقیاس واقعی ارائه کنند. با توجه به محدودیت‌های موجود برای اجرا و نیاز به ابزار و وسایل خاص برای ثبت داده‌های حاصل از این آزمایش‌ها که معمولاً به دلیل محدودیت در نصب وسایل ثبت، اطلاعات به درستی برداشت نمی‌شوند، لذا تمایل به انجام آزمایش‌های مدل شده در مقیاس آزمایشگاهی بیشتر است.

تمرکز بیشتر آزمایش‌های بزرگ مقیاس بر روی پارامترهای زیر است:

- اندازه‌گیری مقدار و نرخ گرمای آزاد شده (HRR)
- نرخ مصرف سوخت
- اندازه‌گیری بیشترین دمای گاز
- طول شعله آتش

اولین آزمایش‌های انجام شده در زمینه آتش‌سوزی در تونل، در سال ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ در اروپا انجام شد که به منظور حل مشکل آتش‌سوزی برای تونل‌های جاده‌ای اروپا به اجرا درآمدند. از جمله می‌توان به آزمایش‌های تونل اوفنگ^۱ و گلسگو^۲ اشاره کرد. در این میان آزمایش‌های دیگری نیز در کشور ژاپن در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ انجام شد که در خلال این سال‌ها استفاده از گرماسنجی مصرف اکسیژن این امکان را فراهم آورد تا آسان‌تر و دقیق‌تر نرخ گرمای رها شده HRR در آتش‌سوزی‌های تونل محاسبه شود

^۱ Ofenegg

^۲ Glasgow

(Huggett, 1980). از دیگر آزمایش‌های مهم در مقیاس بزرگ، سری آزمایشات تونل مموریال^۱ در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۵ است که منبع اصلی سوخت در این آزمایش‌ها، سوخت با میزان سولفور پایین بوده است و آزمایش‌ها بدون استفاده از وسایل نقلیه واقعی انجام شد (Kelly and Giblin, 1997). در سال ۲۰۰۳ نیز در تونل رونهامر^۲ آزمایش‌های بزرگ مقیاسی انجام گرفت که با استفاده از خودروهای باربری سنگین HGV عملیات آتش‌سوزی اجرا شد. این آزمایش‌ها اطلاعات مفیدی در رابطه با توسعه و گسترش آتش در حالات مختلفی از وجود وسایل و بارهای متفاوت به دست آورد (Ingason et al., 2015).

در جدول ۲-۵ خلاصه‌ای از آزمایش‌های بزرگ مقیاس آتش‌سوزی در تونل‌ها با ذکر جزئیاتی از آن‌ها همراه است که شامل نام و محل انجام آزمایش، تعداد آزمایش‌های انجام شده، منبع سوخت انتخاب شده برای اجرای آن، سطح مقطع تونل انتخاب شده، ارتفاع تونل، طول تونل، پارامترهای اندازه‌گیری شده و حداکثر نرخ گرمای رها شده HRR است. در این جدول، m نرخ مصرف جرم، T دما، PT صفحات گرماسنج، v سرعت، OD چگالی است.

جدول ۲-۵: آزمایش‌های بزرگ مقیاس آتش‌سوزی در تونل (Ingason et al., 2014).

نام تونل / کشور / سال	تعداد آزمایش	منبع سوخت	سطح مقطع (m^2)	ارتفاع تونل (m)	طول تونل (m)	پارامترهای اندازه‌گیری	حداکثر HRR
Ofenegg، سوئیس، ۱۹۶۵	۱۱	استخر بنزین	۲۳	۶	۱۹۰	T, CO, O ₂ , V, Visibility	۸۰-۱۱
Glasgow, 1970	۵	استخر نفت	۳۹,۵	۵,۲	۶۲۰	T, OD	۸-۲
Zwenberg، استرالیا، ۱۹۷۴	۳۰	استخر بنزین	۲۰	۳,۹	۳۹۰	T, CO, CO ₂ , NO _x , CH ₄ , O ₂ , v, OD	۲۱-۸
P.W.R.I، ژاپن، ۱۹۸۰	۱۶	استخر بنزین	۵۷,۳	۶,۸	۷۰۰	T, CO, CO ₂ , v, OD radiation	۱۴-۹
TUB-VTT، فنلاند، ۱۹۸۵	۲	چوب	۲۴	۵	۱۴۰	HRR, T, m, CO, CO ₂ , O ₂ , v, OD	۸-۱,۸
EUREKA، نروژ، ۱۹۹۰	۲۱	چوب، استخر هپتان، HGV، قطار مترو	۳۵-۲۵	۴,۸-۵,۵	۲۳۰۰	HRR, T, CO, m, CO ₂ , O ₂ , SO ₂ , C _x H _y , NO, visibility, soot m, v	۱۲۰-۲

¹ - Memorial

² - Runehammar

ادامه جدول ۵-۳

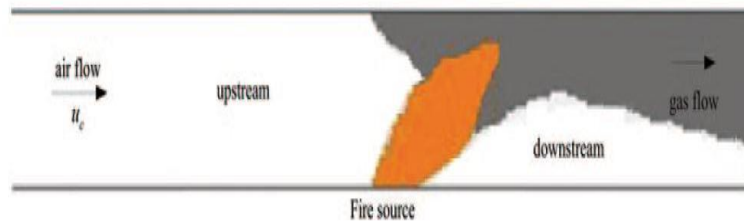
۱۰- ۱۰۰	,HRR, T, CO,CO2,v visibility	۸۵۳	۴,۳ و ۷,۴	۳۶	نفت سیاه	۹۸	Memorial, آمریکا, ۱۹۹۳
۳۰-۲	T, v, OD, radiation	۱۱۲۰	۸,۵	۱۱۵	استخر بنزین	۱۰	Shimizu, ژاپن, ۲۰۰۱
۲۶-۳	,HRR, T, m, radiation v, OD, visibility	۸۷۲	۵,۱	۵۰	هپتان، اتومبیل، HGV	۱۴	Benelux, نیوزلند, ۲۰۰۲
۷۰- ۲۰۳	,HR, T,PT, CO ,CO2,O2,HCN, H2O ,isocyanates, OD radiation	۱۶۰۰	۵,۸	۴۷-۳۲	پلاستیک، چوب، سلولز	۴	Runehammar, نروژ، ۲۰۰۳-۲۰۱۳
۷۷	,HRR, T,PT, CO CO2,O2, OD, radiation	۲۷۶	۶,۹	۴۴	قطار مترو	۲	Brunsborg, سوئد, ۲۰۱۱
۱۵۰	,HRR, T,PT, CO CO2,O2, OD, radiation	۶۰۰	۵,۲	۳۷	HGV	۱	San Pedro, ۲۰۱۲
۵۵-۳۲	HRR, T, CO, CO2,O2	۳۷	۵,۵	۵۵	قطار مترو	۲	Carleton, ۲۰۱۱

۴-۲- مدل‌های تخمین سرعت بحرانی

همان‌گونه که پیش از این عنوان شد در حوادث آتش‌سوزی تونلی، سیستم تهویه طولی برای ایجاد یک محیط ایمن در بالادست آتش، ایجاد توانایی در حرکت آتش‌نشانان برای نزدیک شدن به منبع آتش‌سوزی و کاهش دود در محیط تونل به کار برده می‌شود. در صورتی که سرعت جریان تهویه کم باشد، دود حاصل از منبع آتش‌سوزی در هر دو مسیر تونل به سمت پایین دست و بالا دست آتش‌سوزی حرکت خواهد کرد. به حرکت دود در جهت بالادست آتش، پدیده عقب‌زدگی^۱ دود گفته می‌شود (Wu and Bakar, 2000).

اصطلاح سرعت بحرانی برای نشان دادن مقدار سرعتی از جریان تهویه استفاده می‌شود که قادر به جلوگیری از پدیده عقب‌زدگی است و دود را وادار به جابه‌جا شدن در مسیر پایین دست منبع آتش‌سوزی می‌کند. این مقدار از سرعت بحرانی اصلی‌ترین شاخص در طراحی سیستم‌های تهویه تونلی است. در واقع سرعت بحرانی میزان سرعتی است که مقدار عقب‌زدگی درون تونل برابر با صفر شود. در شکل ۱-۲ طرحی کلی از نقش سرعت بحرانی در آتش‌سوزی تونلی آورده شده است.

¹ Backlayering



شکل ۱-۲: طرحی کلی از سرعت بحرانی در آتش‌سوزی (Ingason et al., 2011).

به طور کلی دو روش عمده برای تخمین سرعت بحرانی مورد استفاده قرار گرفته است، این دو مدل عبارت‌اند از (Ingason et al., 2014):

- مدل بحرانی فرود^۱
- مدل‌های بی‌بعد

در ادامه به بررسی هر یک از مدل‌های مذکور پرداخته خواهد شد.

۲-۴-۱- مدل بحرانی فرود

اولین رابطه در این زمینه توسط توماس^۲ ارائه شده است و بدین صورت است که باید فشار سرعت^۳ هوای تازه قابل قیاس یا بزرگ‌تر از فشار شناوری جریان دود به منظور جلوگیری از پدیده عقب‌زدگی باشد که این مقدار تحت عنوان عدد بحرانی فرود شناخته و به صورت Fr_c مشخص می‌گردد. این عدد از رابطه ۱-۲ محاسبه می‌شود (Thomas, 1958):

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

که در این معادله v مقدار سرعت جریان هوا، g شتاب گرانشی برحسب m/s^2 ، D طول 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. معادله پیشنهاد شده برای پیش‌بینی سرعت بحرانی توسط توماس نیز به صورت معادله ۲-۲ نشان داده شد:

¹ Critical Froude Model

² Thomas

³ Velocity Head

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

در این معادله u_c سرعت بحرانی (m/s)، $\dot{Q}$ آهنگ رهائش گرما کلی (HRR) برحسب کیلووات (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. در ادامه از پارامترهای ذکر شده، در فرمول‌های مختلف استفاده شده است که واحدهایی مشابه با موارد ذکر شده را دارند.

دانیگر^۱ و کندی^۲ بر اساس آزمایش‌های لی^۳ و همکارانش عنوان کرده‌اند که محدوده‌ی عدد بحرانی فرود در حیطه‌ی ۴/۵ تا ۶/۷ تغییر می‌کند و بنابراین عدد بحرانی فرود در حدود ۴/۵ توصیه می‌شود (Lee et al., 1979; 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.

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

و میانگین دمای پایین دست با معادله زیر به دست می‌آید:

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 c_p A u_0} + T_0 \quad (2-4)$$

در معادله‌ی بالا Q_c مقدار HRR همرفتی (در حدود ۶۰ تا ۸۰٪ HRR)، Fr_c عدد بحرانی فرود و T_0 دمای محیط (دمای هوای تازه وارد شده) است.

اما بر طبق تحقیقات لی و همکارانش که تأثیر آتش‌سوزی چوب را در یک داکت با عرض ۰/۳، ارتفاع ۰/۳ و طول ۱۰ متر با جریان طولی مکانیکی به انجام رسانده‌اند و در مطالعه‌ی خود مقادیر نرخ تغییرات دبی جرمی گاز درون تونل، سرعت، فشار و دما را برای یک مدل اندازه‌گیری کرده‌اند و با مقایسه این اندازه‌گیری‌های حاصل شده در قبل از آتش‌سوزی و در خلال آن و در سرعت‌های متفاوت جریان تهویه، اطلاعات مفیدی در رابطه با اندرکنش بین آتش‌سوزی و جریان تهویه به دست آورده‌اند. از جمله نتایج این آزمایش این بود که عدد بحرانی فرود تقریباً برابر با ۱/۱۵ برای آتش‌سوزی‌های کوچک است که تغییرات چشم‌گیری با مقدار

¹ Danziger

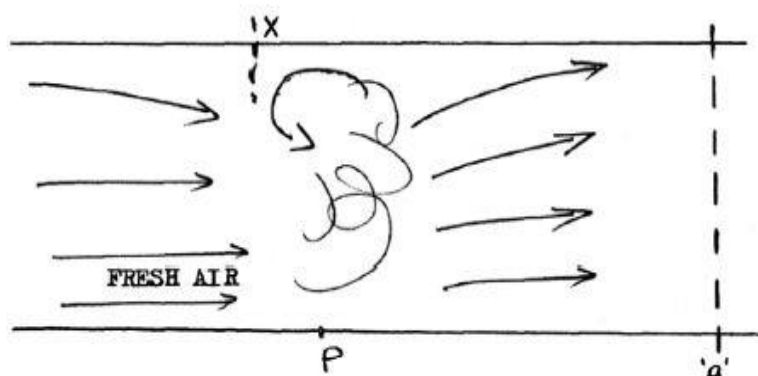
² Kennedy

³ Lee

HRR در آتش‌سوزی‌های مختلف دارد و مقدار آن برای آتش‌سوزی‌های تونل‌های خیلی بزرگ در حدود ۴/۵ است (Lee et al., 1979).

لازم به ذکر است که از آنجایی که این مدل‌ها بر پایه‌ی عدد فرود حاصل شده‌اند عمدتاً از ریشه سوم برای تعیین سرعت بحرانی استفاده می‌کنند که در مجموع نظریه ریشه سوم برای آتش‌سوزی‌های بزرگ پیش‌بینی مناسبی از سرعت بحرانی را به همراه نخواهد داشت. در شکل ۲-۲ تصویر اصلی از مدل فیزیکی توماس نشان داده شده است که برای توسعه نظریه ریشه سوم از آن استفاده کرده است که در آن P محل آتش‌سوزی است، X و a نقاط بالادست و پایین دست محل آتش‌سوزی هستند. مدل مدنظر توماس یک‌بعدی، افقی و بدون لایه‌بندی گرمایی در نظر گرفته شده است. ریشه سوم ضرورتاً به نیروی شناوری مرتبط نیست. با این تفاسیر مشخص می‌شود که علت عدم توانایی آن در پیش‌بینی سرعت بحرانی در آتش‌سوزی‌های بزرگ تونلی مربوط به همین موضوع است (Guo and Zhang., 2014).

به طور خلاصه می‌توان بیان کرد که عدد بحرانی فرود به صورت یک عدد یا مقدار ثابت و قابل استناد وجود ندارد و بنابراین یک روش معقول برای تخمین سرعت بحرانی در فرایند کنترل دود در تهویه طولی تونل‌ها نیست.



شکل ۲-۲: مدل فیزیکی مدنظر توماس برای آتش‌سوزی درون تونل (Guo and Zhang., 2014).

۲-۴-۲- مدل‌های بی‌بعد

افراد مختلفی در زمینه ارائه مدل‌های بی‌بعد بر اساس آزمایش‌های کوچک مقیاس یا بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی اقدام کرده‌اند. از جمله اولین افرادی که در این زمینه فعالیت نموده است اکا^۱ و آتکینسون^۲ می‌باشند. این محققین، یک سری آزمایش در مقیاس مدل^۳ برای تخمین رابطه‌ی بین سرعت بحرانی و نرخ گرمای رها شده HRR انجام داده‌اند (Oka and Atkinson, 1995). آن‌ها شکل‌ها و محل‌های مختلفی را برای منبع آتش در نظر گرفته‌اند و مقادیر نرخ گرمای رها شده HRR بی‌بعد و سرعت بحرانی بی‌بعد توسط آن‌ها تعریف شده است و داده‌های موجود را به یکدیگر ارتباط داده‌اند.

آن‌ها با استفاده از سوخت و محدوده‌ی وسیعی از مقادیر نرخ گرمای رها شده HRR بی‌بعد آزمایش کوچک مقیاس خود را طراحی کرده‌اند که قانون توان یک‌سوم (مربوط به عدد فرود) تحت مقادیر خاصی از نرخ گرمای رها شده HRR به دست آمده است. نتایج آن‌ها منجر به این فرض شد که سرعت بحرانی تهویه مستقل از نرخ گرمای رها شده HRR است. همچنین نتیجه گرفتند که کاربرد نظریه فرود بسیار محدود است و نمی‌توان از آن برای پیش‌بینی سرعت بحرانی در آتش‌سوزی‌های بزرگ استفاده کرد. علاوه بر این، فرمول ارائه شده توسط آن‌ها برای انواع مختلفی از مقاطع تونلی با اشکال مختلف قابل تعمیم نیست (Roh et al., 2007).

رابطه پیشنهادی آن‌ها به صورت زیر است:

$$v^* = V_{\max}^* (0.12^{-\frac{1}{3}}) Q^{*\frac{1}{3}} \quad \text{for } Q^* < 0.12 \quad (۵-۲)$$

$$V^* = V_{\max}^* \quad \text{for } Q^* > 0.12 \quad (۶-۲)$$

و در این روابط بر اساس فرمول توماس داریم:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}} \quad (۷-۲)$$

$$V^* = \frac{V_{\text{critical}}}{\sqrt{gH}} \quad (۸-۲)$$

^۱ Oka

^۲ Atkinson

^۳ Model-Scale

در این معادلات g شتاب گرانش، Q آهنگ رهایش گرما، H ارتفاع تونل، ρ_0 چگالی جریان، T_0 دمای ورودی، v^* سرعت بحرانی بی‌بعد، Q^* آهنگ رهایش گرما بی‌بعد است.

به طور کلی، اکا و آتکینسون بر اساس نتایج خود دریافتند که در آتش‌سوزی‌های بزرگ سرعت بحرانی مستقل از نرخ گرمای رها شده است.

وو^۱ و باکر^۲ نیز یک سری آزمایش در مقیاس مدل آزمایشگاهی در زمینه‌ی سرعت بحرانی بر روی سطح مقطع‌های مختلف انجام داده‌اند، آن‌ها نتایج خود را بر اساس قطر هیدرولیکی به جای ارتفاع تونل به انجام رساندند (Wu and Bakar, 2000).

در مطالعات آن‌ها یک سری از آزمایش‌های کوچک مقیاس در پنج مدل مختلف انجام شد که دارای ارتفاع یکسان و هندسه سطح مقطع متفاوت بودند. جزئیات دمایی و توزیع سرعت در تونل‌ها برداشت شد. آن‌ها برپایه پژوهش‌های خود بیان کردند که نتایج آزمایش نشان‌دهنده‌ی این است که سرعت بحرانی با تغییر هندسه مقطع تونل، به شدت تغییر می‌کند و نتایج بیانگر آن است که دو رژیم متفاوت برای سرعت بحرانی در مقابل آهنگ رهایش گرما وجود دارد که در نرخ‌های حرارت پایین، سرعت بحرانی با توان یک‌سوم آهنگ رهایش گرمای بی‌بعد تغییر می‌کند و در نرخ‌های بالاتر آهنگ رهایش گرما، سرعت بحرانی مستقل از آهنگ رهایش گرما است.

وو و باکر همچنین از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی CFD برای درک رفتار جریان درون تونل‌ها استفاده کردند که اعتبارسنجی نتایج تجربی نشان‌دهنده‌ی این است که خروجی شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی CFD (نتایج به دست آمده برای سرعت جریان سیال، میزان حرکت دود در بالادست و پایین دست و غیره) تا حدودی پایین‌تر از مقادیر واقعی بوده اما پیش‌بینی رضایت‌مندی از سرعت جریان را ارائه کرده است.

با این وجود، در واقع آزمایش‌های آن‌ها برای نسبت ابعاد بیش از یک، در قطر هیدرولیکی پاسخگو نیست. قابل ذکر است که این دو سری آزمایش اکا و آتکینسون و وو و باکر در بالای منبع آتش از پاشنده (اسپری)

¹ Wu

² Bakar

آب برای خنک کردن دیواره تونل استفاده کرده‌اند که این روش به علت وجود اسپری آب دچار نقص در نتایج می‌شود و داده‌های حاصل از آن مشکوک است زیرا آب پاشیده شده به طور چشم‌گیری اتلاف حرارتی را افزایش می‌دهد.

هو^۱ 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 کردند. آزمایش آن‌ها در یک تونل با حوضچه حریق ۳/۲ مگاوات انجام شد. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی خود را با آزمایش‌های بزرگ مقیاس مقایسه کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی این واقعیت بود 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:

$$d = \ln \left[K \cdot \left(\frac{C_k H}{u^2} \right) \right] / 0.019 \quad (9-2)$$

در این رابطه d طول عقب‌زدگی، C_k ثابت معادله که از طریق آزمایش بزرگ مقیاس به دست آمده و در حدود ۱۹/۰ تا ۳۷/۰ و H ارتفاع تونل، u سرعت تهویه طولی، Fr عدد فرود و K با استفاده از عدد فرود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K = g \cdot \gamma \left(\frac{Q^{2/3}}{Fr^{1/3}} \right) \quad (10-2)$$

لی^۲ و همکارانش تحلیل‌های نظری و آزمایش‌هایی را برای محاسبه و تخمین طول عقب‌زدگی و سرعت بحرانی در آتش‌سوزی‌های بزرگ انجام دادند (Li et al., 2010). دو سری از این آزمایش‌ها در مقیاس مدل کوچک مقیاس انجام شده است. پس از این مراحل از نتایج حاصل از آزمایش‌های بزرگ مقیاس نیز برای مقایسه استفاده کردند. نتایج آن‌ها یک ارتباط بین نرخ گرمای رها شده HRR بی‌بعد و سرعت بحرانی بی‌بعد نشان می‌دهد که یک تابع دو ضابطه‌ای از ارتباط داده‌های تجربی در دو تونل به دست آمده که به صورت زیر است:

¹ Hu
² Li

$$u_c^* = \begin{cases} 0.81Q^{*1/3}, & Q^* \leq 0.15 \\ 0.43, & Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (11-2)$$

و در این رابطه HRR یا Q^* بی‌بعد و سرعت بحرانی u_c^* نیز بی‌بعد است و همچنین داریم:

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}} \quad (12-2)$$

کو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی در رابطه با تأثیر شیب تونل بر سرعت بحرانی در آتش‌سوزی‌های تونلی تحقیقاتی را به انجام رساندند. آن‌ها یک مدل با مقیاس $\frac{1}{20}$ بر اساس قانون مقیاس فرود (Froude) ساختند. در این مطالعه از متانول، استون (acetone) و هپتان (heptane) به عنوان حوضچه حریق استفاده شد. محدوده آهنگ رهایش گرما از $1/11$ تا $1/85$ ، $3/13$ تا $5/21$ و $9/16$ تا $15/6$ کیلووات برای هر یک از سوخت‌های نامبرده متغیر بود. شیب تونل نیز در پنج زاویه مختلف (۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درجه) متغیر بود. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب تونل سرعت بحرانی افزایش می‌یابد که علت آن می‌تواند انباشته شدن دود و اثرات آن باشد و نتیجه حاصل از این تحقیق رابطه‌ی زیر است (Hyung Ko et al., 2010):

$$\frac{V_{C,\theta}}{V_{C,0}} = (1 + 0.033\theta) \quad (13-2)$$

که در این رابطه:

$V_{C,\theta}$: سرعت بحرانی در تونل با شیب θ

$V_{C,0}$: سرعت بحرانی در تونل افقی

ونگ^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ یک مطالعه‌ی بی‌بعد بر روی میزان عقب‌زدگی و سرعت بحرانی دود درون تونل و با استفاده از تحلیل ابعادی انجام دادند. آن‌ها برای توصیف ویژگی‌های هندسی مقاطع تونل از یک ضریب مقطع و برای ارتفاع از قطر هیدرولیکی استفاده کردند. در مرحله بعدی با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی CFD در ۹ تونل با شکل‌های مقطعی مختلف به پیش‌بینی عقب‌زدگی و سرعت بحرانی در

¹ Ko

² Weng

حالت شیب‌دار پرداختند. در این مطالعه برای صحت‌سنجی نتایج از تونلی با مقیاس ۱/۱۰ استفاده شد (Weng et al., 2016).

مدل پیش‌بینی سرعت بحرانی بی‌بعد در مطالعات ونگ و همکاران به صورت معادله ۱۴-۲ نشان داده شده است:

$$V_c^* = \begin{cases} 0.83Q^{*1/3} & \gamma \geq 1 \\ 0.79Q^{*1/3} & \gamma < 1 \end{cases} \quad (14-2)$$

در این رابطه قابل ذکر است که:

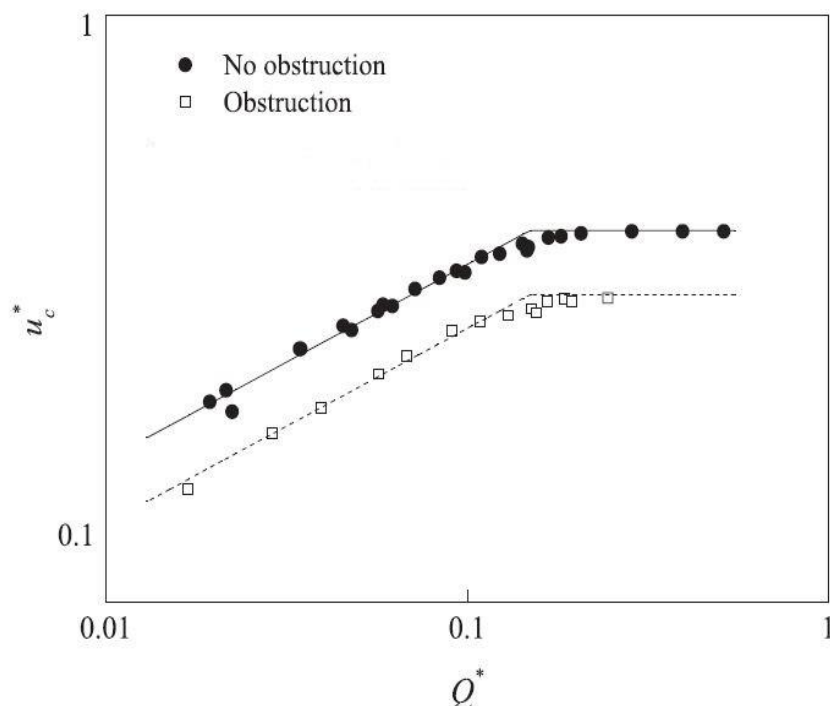
$$Q^* = \frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2} H^{5/2}}, \quad V_c^* = \frac{V}{(gH)^{1/2}} \quad (15-2)$$

روابط مربوط به معادله ۱۴-۲ برای تونل‌های افقی توسعه داده شده است که برای تونل‌های شیب‌دار از معادله ۱۶-۲ استفاده خواهد شد (Weng et al., 2016):

$$\frac{V_{c,\beta}}{V_{c,0}} = \begin{cases} 1 + 1.008\beta & \gamma \geq 1 \\ 1 + 2.355\beta & \gamma < 1 \end{cases} \quad (16-2)$$

به دلیل انتخاب تونل‌های مترو و انجام مطالعه بر روی آن‌ها تنها از نرخ گرمای رها شده HRR با قدرت کمتر از ۷/۵ مگاوات استفاده شده است. دلیل آن‌ها برای این انتخاب وجود مواد نسوز در تونل‌های مترو برای جلوگیری از گسترش آتش عنوان شده است که نتیجتاً به عنوان یک محدودیت در اعمال این روابط در نرخ گرمای رها شده HRR مختلف محسوب می‌شود.

در زمینه بررسی وجود انسداد در تونل در حین آتش‌سوزی و تأثیر آن بر سرعت بحرانی لی و همکارانش دریافتند که بایستی یک نسبت کاهش برای سرعت بحرانی در حین انسداد وسایل نقلیه تحت عنوان ε در نظر گرفته شود. نتایج مقایسه سرعت بحرانی در تونل با وجود انسداد وسایل نقلیه در وضعیت آتش‌سوزی و حالت بدون انسداد در شکل ۳-۲ که به عنوان نتیجه کار لی و همکارانش است، نشان داده شده است. نسبت کاهش سرعت بحرانی در حالت انسداد به میزان ۲۳٪ است (Li et al., 2010).



شکل ۲-۳: تأثیر انسداد در سرعت بحرانی (محور افقی: آهنگ رهائش گرما بی‌بعد، محور قائم سرعت بحرانی بی‌بعد) (Li et al., 2010).

در جدول ۲-۶ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در تعیین سرعت بحرانی آورده شده است. در جدول ۲-۷ و ۲-۸ خلاصه‌ای از بررسی‌های پارامتری مختلف انجام شده توسط محققین در سال‌های گذشته نشان داده شده است. همان‌گونه که از این جدول‌ها برمی‌آید، این افراد در اکثر موارد به بررسی دو یا سه پارامتر پرداخته‌اند که انتخاب و ارزیابی پارامترها در هر یک از این پژوهش‌ها براساس این هدف تنظیم نشده است که مدل تخمین مناسب و کارآمد ارائه شود و این گونه نیست که پارامترهای نهایی مدل، توان تخمین شرایط مختلف و سناریوهای متفاوت را داشته باشد.

تنها در مورد آقای اینگسون بررسی برای چهار پارامتر صورت گرفته که آن هم در سری تحقیق‌های جداگانه‌ای است که اثر هم‌زمان در آن‌ها اعمال نشده است و یا در تحقیق انجام شده توسط مایار به بررسی پنج پارامتر اقدام شده است که البته در این مطالعه اثر پارامترها به صورت چند سناریو مجزا در نظر گرفته شده است. همچنین از نتایج تجربی مناسبی برای تحلیل و صحت‌سنجی نتایج عددی استفاده نشده و در انتهای این تحقیق نیز مدل تخمین مناسبی ارائه نشده است که بتواند اثرات هم‌زمان را پیش‌بینی کند.

جدول ۲-۶: خلاصه تحقیقات انجام شده برای تعیین سرعت بحرانی.

ردیف	محقق	سال	عنوان تحقیق
۱	توماس	۱۹۵۸	حرکت سیال شناور و تهویه آتش سوزی زیرزمینی
۲	توماس	۱۹۶۸	حرکت دود در مسیرهای افقی برخلاف جریان هوا
۳	لی و همکاران	۱۹۷۹	اندرکنش بین آتش سوزی داکت و جریان تهویه
۴	دانزیگر و کندی	۱۹۸۲	تحلیل تهویه طولی برای تونل‌های گلنوود
۵	اکا و آتکینسون	۱۹۹۵	کنترل جریان دود در آتش سوزی تونل
۶	آتکیتسون و وو	۱۹۹۶	کنترل دود در تونل‌های شیب‌دار
۷	وو و باکر	۲۰۰۰	کنترل جریان دود در آتش سوزی تونل با استفاده از سیستم تهویه طولی
۸	مدیک	۲۰۰۳	شبیه سازی آتش در تونل‌های جاده‌ای
۹	لی و ریو	۲۰۰۵	مطالعه تجربی اثر نسبت‌های مختلف ویژگی‌های تونل در سرعت بحرانی برای تهویه طولی
۱۰	رو و همکاران	۲۰۰۷	سرعت بحرانی و نرخ سوخت در استخر آتش در خلال تهویه طولی تونل
۱۱	هو و همکاران	۲۰۰۸	مطالعه جریان عقب‌زدگی شناور در آتش سوزی تونلی
۱۲	لی و اینگسون	۲۰۱۰	مطالعه سرعت بحرانی و طول عقب‌زدگی در آتش سوزی‌های تونل‌های با تهویه طولی
۱۳	هیونگ کو و همکاران	۲۰۱۰	مطالعه تجربی در تأثیر شیب بر سرعت بحرانی تهویه تونل
۱۴	تیسای و همکاران	۲۰۱۰	سرعت بحرانی برای آتش سوزی‌های چندگانه تونلی
۱۵	محمدی و حسینعلی پور	۲۰۱۱	شبیه سازی پخش دود در تونل قطارهای زیرزمینی
۱۶	تیلی و همکاران	۲۰۱۱	صحت‌سنجی دقت شبیه‌سازی CFD در تونل کوچک مقیاس و وضعیت آتش در آن‌ها
۱۷	مسقانی و مهریار	۲۰۱۱	شبیه‌سازی عددی جریان سیال و انتقال حرارت همراه با انتشار دود ناشی از آتش- سوزی در تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو
۱۸	رشیدی و همکاران	۲۰۱۱	طراحی سیستم تهویه تونل ملت و شبیه‌سازی آتش به کمک نرم‌افزار Fluent
۱۹	نیکنام و همکاران	۲۰۱۲	تعیین سرعت بحرانی در خلال آتش سوزی تصادف در تونل البرز
۲۰	پیربدایی، دوازده امامی	۲۰۱۳	شبیه‌سازی عددی آتش و دود در تونل با در نظر گرفتن اثرات تشعشع و جابه‌جایی آزاد
۲۱	ماپار و حیدری‌نژاد	۲۰۱۳	شبیه‌سازی عددی رفتار حریق در تونل
۲۲	رئوفی و مظاهری	۲۰۱۳	بررسی تأثیر تهویه طولی روی آتش سوزی‌های بزرگ در تونل‌های بین‌شهری
۲۳	گو و ژانگ	۲۰۱۴	حل تحلیلی، تجربی و شبیه‌سازی CFD برای تهویه آتش سوزی تونل
۲۴	چن و همکاران	۲۰۱۵	طول جریان شناور عقب‌زدگی در تونل با تهویه طولی دارای نقاط تخلیه در سقف و با فواصل متفاوت از منبع حرارتی
۲۵	ونگ و همکاران	۲۰۱۶	مطالعه سرعت بحرانی در تونل شیب‌دار تحت تهویه طولی
۲۶	ژانگ و همکاران	۲۰۱۷	مطالعه طول عقب زدگی و سرعت بحرانی در تونل منحنی مترو با شعاع انحنای مختلف
۲۷	ژانگ و همکاران	۲۰۱۹	سرعت بحرانی برای دو منبع حریق با فواصل مختلف در تونل جاده‌ای
۲۸	لو و همکاران	۲۰۲۰	تأثیر انحنای تونل بر گسترش دود در حریق تونلی

جدول ۷-۲: بررسی پارامترهای مؤثر توسط محققین گذشته

هیونگ	اینگسون	هو	رو	لی، ریو	مدیک	وو، باکر	اکا	دانیگر	لی	توماس	
											بررسی نیمه تحلیلی
											سوخت جامد
											نوع سوخت و شکل آن
											شکل سطح مقطع
											دمای دیواره
											نسبت منظر (برای مستطیلی)
											نرخ سوختن
											HRR
											شیب
											انسداد

جدول ۸-۲: بررسی پارامترهای مؤثر توسط محققین گذشته

ونگ	چن	رئوفی	ماپار	پیربداقی	تیلی	مسقانی	محمدی	تیسای	
									شکل سطح مقطع
									HRR
									شیب
									آتش سوزی چندگانه
									تشعشع
									موقعیت حریق در طول تونل
									انسداد
									نقاط تخلیه متفاوت در سقف

۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی روش‌های مختلف برای تخمین سرعت بحرانی پرداخته شد. مدل‌های بر مبنای عدد فرود و مدل‌های بی‌بعد از جمله روش‌های تقسیم‌بندی تخمین سرعت بحرانی عنوان شد و سپس به معرفی تعدادی از مدل‌ها و ارائه کلیاتی بسنده شد. مدل‌های بر مبنای عدد فرود در نهایت برای تخمین سرعت بحرانی مناسب به نظر نمی‌رسند. با توجه به عدم استفاده از پارامترهای ضروری و جامع در مدل‌های بی‌بعد برای پوشش دادن سناریوهای متفاوت و مهم، از آن‌ها نیز به عنوان یک مدل کارآمد در تخمین سرعت بحرانی نمی‌توان بهره برد و کلیه مدل‌های ارائه شده قادر به تخمین سرعت بحرانی در سناریوهای متفاوت نبوده و برخی از پارامترهای اساسی در آن‌ها جای داده نشده است.

فصل سوم

شبه سازی حریق

۳-۱- مقدمه

شبیه‌سازی یکی از روش‌های پژوهشی مهم و کاربردی در زمینه آتش‌سوزی تونلی است که اکثر محققین از روش‌های مختلف آن برای مطالعه بخش‌های گوناگون از شعله تا اطفای حریق استفاده می‌کنند. تکنیک‌های شبیه‌سازی با توجه به سادگی روش‌های آن و هزینه‌های کم‌تر، بسیار کاربردی است و سطح دانش پژوهشگر را بسیار افزایش می‌دهد.

شبیه‌سازی در دو بخش مجزا و وابسته به هم انجام می‌شود. این دو بخش در کنار یکدیگر می‌توانند نیاز محققین را در به‌دست‌آوری نتایج و اعتبارسنجی آن‌ها مرتفع کنند. به‌طور کلی مطالعه حریق با استفاده از شبیه‌سازی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- شبیه‌سازی عددی

- شبیه‌سازی تجربی

- شبیه‌سازی بزرگ‌مقیاس

- شبیه‌سازی کوچک‌مقیاس

در روش‌های عددی از سیستم‌های کامپیوتری برای فرایند شبیه‌سازی استفاده می‌شود که این روش در بخش‌های بعدی تشریح خواهد شد.

در روش‌های تجربی از آزمایش‌های واقعی برای درک پدیده مورد مطالعه استفاده می‌شود. این روش برای صحت‌سنجی نتایج عددی، کاربرد مهمی دارد. این آزمایش‌ها بر مبنای توانایی محققین در هزینه‌های آن، به دو روش بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس انجام می‌شود. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارا هستند؛ اما عموماً در اجرای آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس محدودیت‌های بیشتری وجود دارد؛ زیرا در اجرای این آزمایش‌ها هزینه‌های بالایی باید صرف شود و همچنین امکان ثبت کامل و با جزئیات زیاد در این آزمایش‌ها محدود است. به‌دلیل هزینه‌های بالا و توان عملیاتی آن، محققین از این نوع آزمایش‌ها کم‌تر استقبال می‌کنند؛ اما از طرفی آزمایش‌های کوچک‌مقیاس به‌دلیل هزینه‌های کم‌تر و دقت بیشتر در ثبت داده‌ها، مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است.

بنا بر توضیحات مطرح شده، در این رساله از شبیه سازی فیزیکی کوچک مقیاس استفاده شده است تا بتوان به نتایج تجربی در فهم سرعت بحرانی برای حریق تونل دست یافت و از داده های حاصل از آن به منظور صحت سنجی نتایج عددی بهره برد. بنابراین لازم است قبل از وارد شدن به مبحث تعیین سرعت بحرانی، اطلاعات کلی در رابطه با شبیه سازی عددی و فیزیکی و مدل فیزیکی کوچک مقیاس ساخته شده در این رساله ارائه شود؛ بنابراین در ادامه، ابتدا اصول و کلیات شبیه سازی فیزیکی کوچک مقیاس و مدل فیزیکی ساخته شده در این رساله تشریح و در انتها، شبیه سازی عددی حریق و نتایج به دست آمده از آن توضیح داده می شود.

۳-۲- شبیه سازی فیزیکی کوچک مقیاس

شبیه سازی در صورتی که به درستی درک شود و با توجه به گستردگی و ظرافت خود پیاده سازی شود، یک ابزار قدرتمند است. طبق گفته شانون، شبیه سازی به صورت زیر تعریف می شود:

فرایند طراحی یک مدل از یک سیستم واقعی و انجام آزمایش ها با این مدل به منظور تحت مطالعه قرار دادن رفتار سیستم یا ارزیابی سناریوهای مختلف، شبیه سازی تعریف می شود (Shannon, 1975).

با توجه به آن چه گفته شد، برای کوچک مقیاس کردن نیاز به روش مقیاس گذاری مناسب است. مقیاس گذاری فیزیکی به صورت گسترده در پژوهش های ایمنی حریق استفاده می شود. این حوزه در تمامی بخش های آن بکار گرفته می شود. تکنیک مقیاس گذاری زمانی که با شبیه سازی ترکیب می شود دید بسیار کاملی را از دینامیک حریق ارائه می نماید. هسکستاد^۱ روش های مقیاس گذاری را بررسی کرده و آن ها را در

سه بخش زیر خلاصه کرده است (Ingason et al., 2015):

- مقیاس گذاری فشاری
- مقیاس گذاری آنالوگ
- مقیاس گذاری فرود

¹ Heskestad

افراد زیادی در این زمینه تحقیق کرده‌اند و با استفاده از روش‌های مختلف مقیاس‌گذاری، حریق تونل را مطالعه و نتایج آن را با سایر پژوهش‌ها مقایسه کرده‌اند. به‌عنوان مثال، کویینتر با مدل کوچک‌مقیاس، حریق محفظه‌ای، جت‌فن‌های نصب‌شده در سقف و پخش شعله را بررسی کرده است (Quintiere, 1989). اینگاسون بررسی‌هایی را درباره‌ی نتایج عددی و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج شبیه‌سازی کوچک‌مقیاس در زمینه توسعه حریق تونلی انجام داده است (Ingason, 1997). پریکان و همکارانش در زمینه گرمای حریق، تحقیق کرده‌اند (Perricone *et al.*, 2007). کراس و شین، مقیاس‌گذاری حریق ناشی از الوارهای چوبی را شبیه‌سازی کرده‌اند و نتایج بسیار خوبی را از مقیاس‌گذاری به دست آورده‌اند (Croce and Xin, 2005). در زمینه ایمنی حریق تونل نیز روش شبیه‌سازی با استفاده از مقیاس‌گذاری فیزیکی به‌صورت وسیعی استفاده شده است. اصلی‌ترین دلیل کاربرد گسترده این روش، هزینه‌های بسیار بالا و مخاطرات آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس است. مهم‌ترین و اصلی‌ترین نکته در کاربرد روش‌های مقیاس‌گذاری در مطالعه حریق تونلی این است که الزاماً باید نسبت طول تونل به ارتفاع آن به اندازه کافی بزرگ باشد تا مقیاس در نظر گرفته‌شده برای حریق تونل، نتایج را به درستی و با دقت مناسب ارائه دهد (Ingason *et al.*, 2015). تعداد بسیار زیادی از آزمایش‌های کوچک‌مقیاس حریق تونلی در چند سال گذشته انجام شده است. در هر یک از این پژوهش‌ها جنبه‌های مختلفی از حریق و تونل تحت مطالعه قرار گرفته است. برخی از این بررسی‌ها در زمینه نوع حریق بر مبنای وسیله نقلیه است. تعدادی در رابطه با تأثیر اندازه دهانه‌های تونل بر سرعت بحرانی بوده است. برخی دیگر درباره‌ی تعبیه نقاط تخلیه مختلف در سقف و اثر آن بر سرعت بحرانی است. پژوهش‌های دیگری نیز در رابطه با اثر حداکثر دمای دود در سقف و بررسی کنترل دود در مقطع عبور افراد است و تعدادی دیگر در زمینه سرعت بحرانی در تونل‌های مترو و تأثیر شبکه‌بندی آن‌ها و تونل‌های راه‌آهن تلاش کرده‌اند. در تحقیق برخی از محققین تأثیر شیب نیز دیده می‌شود که چگونه شیب، سرعت بحرانی مورد نیاز را تغییر می‌دهد. بررسی‌هایی نیز در زمینه مقایسه‌ی دود و بررسی نتایج حاصل از پخش‌شدگی آن در تونل‌های کوچک‌مقیاس در قبال بزرگ‌مقیاس انجام شده است.

در ادامه، سه روش مقیاس گذاری شامل مقیاس گذاری فشاری، مقیاس گذاری آنالوگ و مقیاس گذاری فرود تشریح شده است.

۳-۲-۱- مقیاس گذاری فشاری

مقیاس گذاری فشاری می تواند عدد رینولدز و عدد فرود را در بستر آزمایش با تنظیم فشار حفظ کند. در جریان مقیاس گذاری با این روش، همچنین عدد گراشف نیز حفظ می شود؛ بنابراین نیروی شناوری و میدان سیال به خوبی مقیاس می شوند. با این وجود در شرایط واقعی، مقیاس گذاری فشاری بسیار دشوار است و در واقع در این مقیاس گذاری باید فشار به صورت توان $1/5$ برابری مقیاس طول در نظر گرفته شود که با این اوصاف مدل سازی با این روش نیازمند سطح بسیار بالایی از پیچیدگی است (Ge et al., 2003). مثلاً برای مقیاس گذاری $1:10$ فشار محیطی 32 اتمسفر نیاز است؛ بنابراین، این بحث محدودیت مهمی در مدل سازی آتش خواهد بود؛ زیرا با وجود مزایای بسیار زیاد و سطح تطبیق بالای این روش با شرایط واقعی، به دلیل محدودیت های جدی آن، در مدل سازی کوچک مقیاس حریق کاربردی ندارد.

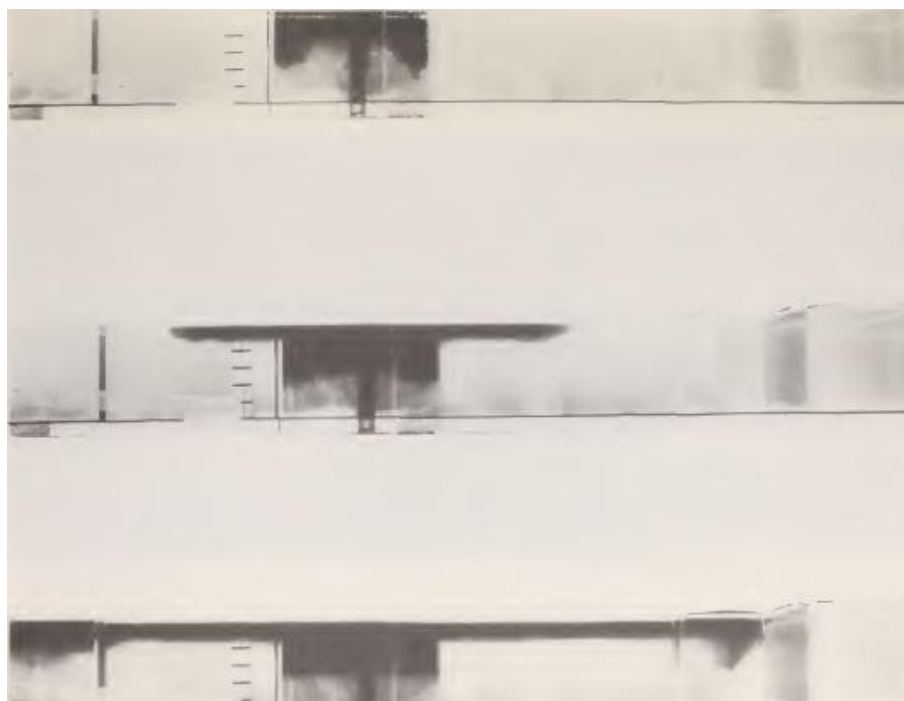
۳-۲-۲- مقیاس گذاری آنالوگ

این مقیاس گذاری برای دو سیال با چگالی متفاوت برای شبیه سازی حرکات دود در سناریوهای حریق بکار گرفته می شود. این دو سیال می توانند هوا و هلیوم باشند یا آب و محلول آب و نمک انتخاب شود. این روش حریق را با استفاده از تفاوت چگالی نسبت به تفاوت دمایی شبیه سازی می کند. در این روش نیز عمدتاً عدد فرود حفظ می شود. در شکل ۳-۱ نمایی از این روش مقیاس گذاری توسط محلول آب و نمک نشان داده شده است.

این روش در عین سادگی، معایب و ایرادهای مختلفی دارد. از جمله ایرادهای این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- چگالی سیال ها بر اساس مراجع دمایی تعیین می شود؛ در حالی که دماها در شرایط حریق بسیار متفاوت هستند و چگالی ها نیز متغیر می باشند؛ در سناریوهای حریق، دما همواره در حال تغییر است؛

- اتلاف حرارتی در این روش در نظر گرفته نمی‌شود و تنها شبیه‌سازی حرکت دود در نظر گرفته خواهد شد؛ بر این مبنا اختلاف‌های زیادی با شرایط واقعی به وجود می‌آید.



شکل ۳-۱: شبیه‌سازی دود با استفاده از محلول آب و نمک (Steckler *et al.*, 1986).

با توجه به مسائل ذکرشده، این روش برای شبیه‌سازی کامل حریق و مقایسه کردن نتایج با شرایط واقعی مناسب نیست که به معنی زیاد بودن میزان خطا در این روش مقیاس‌گذاری است. کاربرد اصلی این روش می‌تواند برای درک اولیه از حرکات دود ناشی از حریق باشد.

۳-۲-۳- مقیاس‌گذاری فرود

مقیاس‌گذاری فرود نشان می‌دهد که گروه بی‌بعد اصلی که در آزمایش‌های حریق باید حفظ شود عدد فرود است که نشان‌دهنده نسبت نیروی اینرسی به نیروی شناوری است. باید به این نکته مهم دقت کرد که تمامی جریان‌های دود، توسط نیروی شناوری هدایت می‌شوند؛ از این‌رو دلیل اصلی استفاده از عدد فرود در این روش مقیاس‌گذاری، همین موضوع است.

طبق روش مقیاس گذاری فرود، آزمایش های کوچک مقیاس را می توان در دمای محیط انجام داد. در این روش، عدد رینولدز در روند آزمایش ها حفظ نمی شود.

در این روش، گروه های بی بعد تشکیل و با حفظ آن در مدل و حالت واقعیت، روابط بین آن ها به دست می آید. در جدول ۳-۱، خلاصه حالت ها بین حالت واقعی و مقیاس شده، نشان داده شده است.

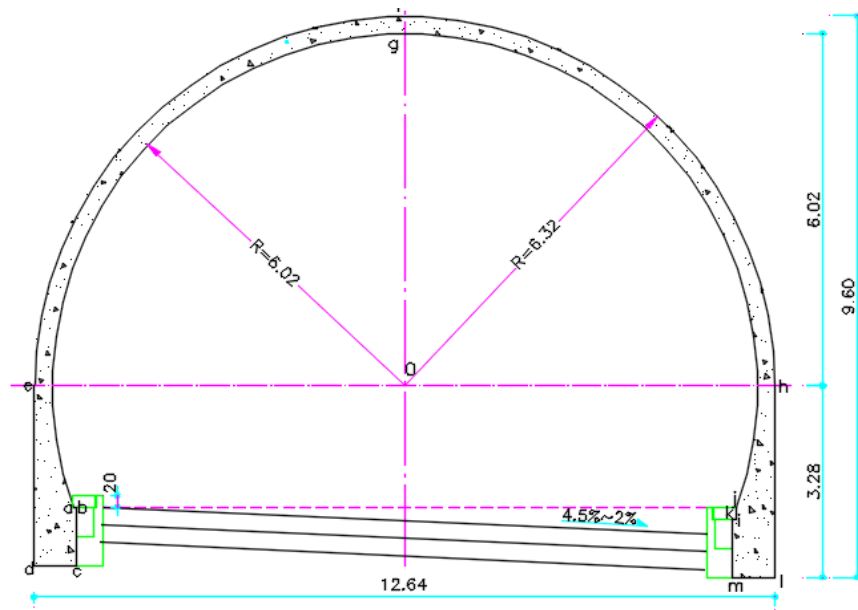
به عنوان مثال در این جدول، برای مقیاس گذاری طولی و هندسی تونل، طبق رابطه موجود، نسبت طول در حالت واقعی و کوچک شده برابر با نسبت بین دو تونل کوچک و بزرگ است؛ یا دربارهی سرعت، این نسبت به صورت ریشه دوم همان نسبت ذکر شده خواهد بود.

جدول ۳-۱: ارتباط مقیاس گذاری در روش فرود.

واحد	مقیاس گذاری
هندسه (m)	$X_m/X_f = L_m/L_f$
دما (k)	$T_m = T_f$
جرم (mol)	$C_m = C_f$
سرعت (m/s)	$V_m/V_f = (L_m/L_f)^{1/2}$
حجم جریان (m^3/s)	$V_m/V_f = (L_m/L_f)^{5/2}$
آهنگ رهايش گرما (kw)	$Q_m/Q_f = (L_m/L_f)^{5/2}$
زمان (s)	$T_m/T_f = (L_m/L_f)^{1/2}$

۳-۳- مدل فیزیکی کوچک مقیاس

تونل ملاوی یک تونل جاده ای در استان لرستان در محور پلدختر- خرم آباد و با طول ۳۰۰ متر و شعاع انحنای ۴۰۰ متر است. این تونل مبنای تمامی شبیه سازی های عددی و فیزیکی این رساله قرار گرفته است. شکل سطح مقطع این تونل در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است این تونل نعل اسبی (D) شکل می باشد.



شکل ۳-۲: مقطع تونل ملاوی (ابعاد به متر).

با استفاده از داده‌های تونل ملاوی، فرایند طراحی و ساخت مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس آن انجام شده است. بر اساس شرایط آزمایشگاهی و امکانات فراهم‌شده توسط دانشگاه صنعتی شاهرود، مقیاس ۱:۲۰ برای آن انتخاب شده است. دلیل انتخاب این مقیاس موارد زیر است:

- یکی از موارد مهم در انتخاب مقیاس مناسب برای مقیاس‌گذاری، به‌دست‌آوری نتایج قابل‌قبول از آن مقیاس است؛ زیرا با کوچک‌کردن هر پدیده با روش‌های مقیاس‌گذاری، خطاهایی در نتایج رخ می‌دهد. از این‌رو اطمینان از مقیاس مناسب پیش‌شرط مهمی در این فرایند است. با مرور بررسی‌های گذشته این نکته حاصل می‌شود که مقیاس‌های ۱:۱۰ و ۱:۲۰ در بسیاری از پژوهش‌ها استفاده شده است که نتایج به‌دست‌آمده توسط این محققین قابل‌قبول و کاربردی می‌باشد.

- توانایی بالفعل و شرایط مهیاشده به‌منظور پیاده‌سازی مدل برای محققین، یکی از محدودیت‌های اصلی و مهم در مقیاس‌گذاری است. با توجه به شرایط موجود، مقیاس ۱:۲۰ به‌عنوان مقیاس مناسب در طراحی مدل، انتخاب شد.

بر مبنای جدول ۳-۱، طول تونل مقیاس‌شده ۱۵ متر و با استفاده از بتن ساخته شده است. لوله‌های بتنی با قطر مقیاس‌شده به‌عنوان دیواره تونل ساخته شده‌اند که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. این تونل افقی بوده و یکی از دهانه‌ها به‌عنوان ورودی تونل در نظر گرفته شده و یک فن محوری در ورودی نصب شده است.

این فن، جریان محوری را تأمین می‌کند و دهانه دیگر مستقیماً با محیط بیرون در ارتباط است. با در نظر گرفتن مقیاس ۱:۲۰، قطر دهانه مورد نیاز ۶۰ سانتی‌متر است. لوله‌های ساخته‌شده به یکدیگر متصل شده‌اند و در بخش تحتانی لوله‌ها در ارتفاع مناسب، ساختار کف تونل ساخته شده است تا در انتها مقطع تونل به درستی پیاده‌سازی شود. طول مورد نظر برای تونل کوچک مقیاس ملاوی ۱۵ متر است که طول این تونل نسبت به قطر دهانه آن به اندازه کافی بزرگ بوده و شرایط شبیه‌سازی در آن قابلیت اجرا دارد.



شکل ۳-۳: لوله بتنی ساخته شده.

در شکل ۳-۴ نمایی کلی از تونل ساخته‌شده و سطح مقطع آن نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: تصویری از مدل ساخته‌شده.

به منظور ثبت داده‌های حاصل از آزمایش‌های حریق در تونل کوچک مقیاس ساخته شده، نیاز به ابزارهای متفاوتی است. به کمک این ابزارها می‌توان داده‌های اصلی را برداشت کرد و پس از آن، سناریوهای مختلف را تفسیر نمود. این ابزارها عبارتند از:

- ترموکوپل نوع K

برای ثبت دما و بررسی روند پخش دود در نواحی مختلف تونل نیاز به ترموکوپل‌هایی است که در صورت تماس با شعله حریق نیز کارکرد صحیح خود را از دست ندهند؛ بنابراین بهترین گزینه در این حوزه دمایی که تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کاربرد دارند، ترموکوپل‌های نوع K است. این ترموکوپل‌ها با غلاف استیل و نوع جوش استفاده شده در سنسور خود توانایی عملکرد مناسب با خطای قابل‌پذیرش را دارا هستند که یک نمونه مورد استفاده در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. ترموکوپل‌های تهیه شده در سقف تونل و با فواصل مناسب از یکدیگر نصب شده‌اند. فواصل باید با توجه به مقیاس‌گذاری انتخاب شود؛ اما براساس هزینه‌های اقتصادی تعداد آن‌ها دارای محدودیت است و معمولاً در نزدیکی محدوده حریق تعداد آن‌ها برای تعیین دقیق‌تر عقب‌زدگی دود، افزایش داده می‌شود. فواصل ترموکوپل‌ها از یکدیگر در بخش مرکزی و نزدیک به حریق ۵ سانتی‌متر و در سایر بخش‌ها ۲۰ سانتی‌متر است.



شکل ۳-۵: ترموکوپل نوع K استفاده شده در سقف تونل.

- **ثبات داده‌نگار**

راه مناسب برای دریافت داده‌های حاصل از سنسورهای دمایی و رابط بین این سنسورها با کامپیوتر، ثبات داده‌نگار است. در این تحقیق از ثبات داده‌نگار ۶۴ کاناله استفاده شده است. این ثبات، توانایی ثبت داده‌های ورودی از ترموکوپل‌ها را در هر ثانیه داراست و به‌صورت سیستم وای‌فای، با رایانه اصلی در ارتباط است. ثبات داده‌نگار مورد استفاده، در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: ثبات داده‌نگار ۶۴ کاناله.

- **حوضچه حریق**

برای شبیه‌سازی حریق نیاز به حوضچه با ابعاد معلوم است. زیرا ابعاد حوضچه در نرخ گرمای رها شده HRR آن تأثیر مستقیم دارد. از این‌رو تهیه دقیق آن در روند شبیه‌سازی فیزیکی و حتی عددی بسیار حائز اهمیت است تا بتوان با اطمینان خاطر نتایج را مقایسه کرد. در شکل ۳-۷ نمایی از حوضچه حریق ۱۰×۱۰ سانتی‌متری نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: حوضچه حریق با ابعاد سطح ۱۰×۱۰ سانتی‌متری.

• سوخت

از متانول ۹۵ درصد به عنوان سوخت استفاده شده است. انتخاب سوخت بر مبنای در دسترس بودن و داشتن اطلاعات آن شامل نرخ گرمای رها شده HRR و مواد حاصل از احتراق صورت گرفته است.

• فن محوری

به منظور تأمین جریان محوری و در واقع تهویه طولی تونل از یک فن با سرعت گردش موتور ۲۲۰۰ دور بر دقیقه و با توان ۱۴۰ وات استفاده شده است. این فن به جریان برق AC متصل و به صورت دهشی جریان هوا را به داخل تونل می‌دمد. نمایی از این فن در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸: فن محوری تأمین‌کننده جریان هوا.

• جعبه جریان

به منظور تبدیل جریان وارد شده به تونل به جریان کاملاً توسعه یافته از یک جعبه با چشمه های ریز استفاده شده است. جریان هوا در شرایط عادی باید طول مشخصی از تونل را طی کند تا به جریان کاملاً توسعه یافته تبدیل شود، اما با نصب این جعبه در ابتدای مسیر می توان روند تبدیل شدن جریان در حال توسعه را به جریان کاملاً توسعه یافته تسریع بخشید. در شکل ۳-۹، جعبه جریان مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۳-۹: جعبه جریان هوا.

• دیمر

برای تغییر سرعت جریان هوا توسط فن به ابزاری نیاز است تا بتوان جریان برق ورودی به فن را تغییر داد. از این طریق می توان سرعت دورانی فن و در نتیجه ی آن سرعت های جریان ورودی را از صفر تا مقدار دلخواه تغییر داد. برای به دست آوردن سرعت بحرانی در تونل کوچک مقیاس نیاز به ثابت نگه داشتن سرعت جریان در مقادیر مختلف است تا بتوان وضعیت دود و انتشار آن را ارزیابی و تحلیل کرد. وظیفه تغییر سرعت جریان به عهده دیمر است که در شکل ۳-۱۰، دیمر استفاده شده در خلال آزمایش ها، نشان داده شده است. این دیمر به صورت رومیزی بوده و با کمک آن می توان سرعت جریان را کنترل کرد.



شکل ۳-۱۰: دیمر رومیزی تغییر سرعت جریان هوا.

- دماسنج

برای ثبت دمای محیط در زمان آزمایش نیاز به دماسنج است. ثبت دمای محیط در زمان شبیه‌سازی‌های عددی نیز مؤثر است و به‌عنوان یکی از شرایط اولیه در بحث عددی خواهد بود.

- سرعت‌سنج و فشارسنج

برای ثبت برخی از پارامترهای مورد نیاز در آزمایش‌های عددی و تجربی به ابزاری مشخص نیاز است. به عنوان مثال به فشارسنج برای ثبت میزان فشار هوا به‌عنوان پارامتر اولیه نیاز است.

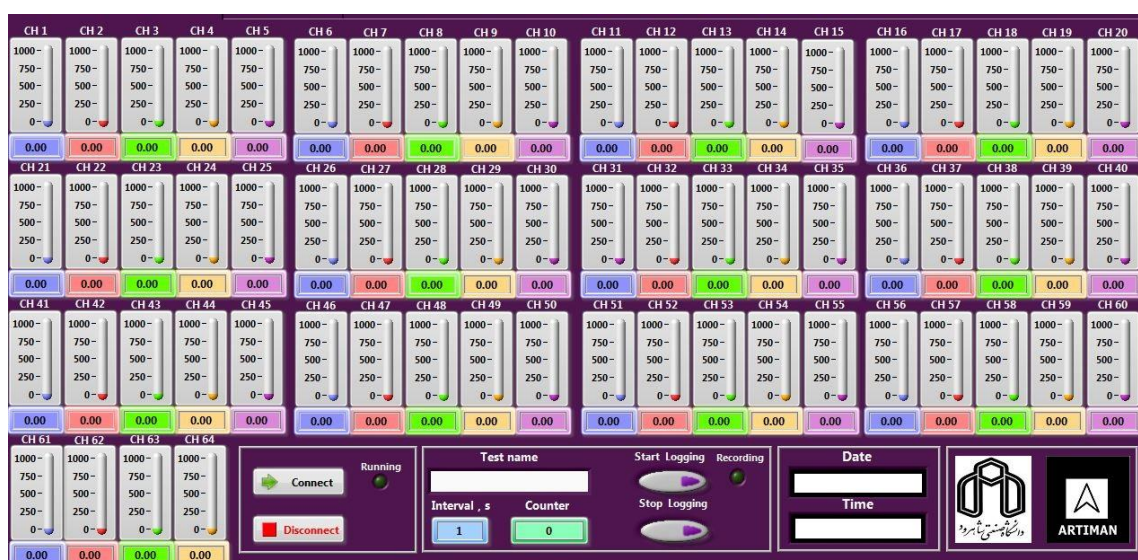
در خلال آزمایش‌های تجربی حریق تونل، به سرعت‌سنج نیاز است تا میزان سرعت جریان هوا در طول تونل مشخص شود و بتوان بر اساس آن برای هر سناریو داده‌های کافی را به ثبت رساند. در شکل ۱۱-۳، سرعت‌سنج بکاررفته در خلال آزمایش‌ها نشان داده شده است. این ابزار توانایی تشخیص سرعت جریان هوا به همراه دبی هوا را داراست.



شکل ۱۱-۳: سرعت‌سنج جریان هوا.

• رایانه

به منظور ذخیره سازی داده های برداشت شده از ترموکوپل ها توسط ثبات داده نگار، به رایانه نیاز است؛ به عبارت دیگر رایانه داده های دریافتی از ثبات داده نگار را ذخیره سازی می کند. این ذخیره سازی نیازمند نرم افزار مناسب خود است تا بتواند در زمانی مناسب داده های برداشت شده و دریافتی از ترموکوپل ها را به شکل مناسبی ذخیره سازی نماید. ثبات داده نگار بکاررفته در این آزمایش ها دارای نرم افزار پیوستی نیز می باشد که توسط آن این فرایند طی شده است. در شکل ۳-۱۲، نمایی از نرم افزار در حال برداشت داده ها نشان داده شده است. این نرم افزار، مخصوص دستگاه ثبات داده نگار بوده و توسط سازنده آن در اختیار کاربر قرار داده شده است. در این نرم افزار می توان زمان های ثبت داده های ترموکوپل ها را تنظیم کرد و نتایج آن را تحت یک فایل اکسل در اختیار داشت.



شکل ۳-۱۲: نرم افزار ثبت داده های دریافتی از ثبات داده نگار.

با تکمیل کردن لوازم و تجهیزات مورد نیاز، مدل کوچک مقیاس تونل ساخته شد و حوضچه حریق با ابعاد 10×10 سانتی متر در خط مرکز تونل و در وسط بخش طولی قرار گرفت. اولین آزمایش تجربی با این شرایط انجام شد و در ابتدا فن به صورت خاموش در دهانه تونل قرار گرفته است.

در این آزمایش، هدف، ارزیابی و کنترل لوازم و تجهیزات در طی یک آزمایش واقعی است. پس از این آزمایش و ثبت حرکت دود در دو طرف منبع حریق، در آزمایش های بعدی سرعت جریان به صورت تصاعدی

افزایش می‌یابد تا میزان عقب‌زدگی دود در هر آزمایش مشخص شود و بتوان سرعت بحرانی را برای تونل کوچک مقیاس و حریق 10×10 سانتی‌متری به دست آورد. به دست آوردن سرعت بحرانی در آزمایش‌های تجربی در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۳-۱- محاسبه میزان عقب‌زدگی در تونل کوچک مقیاس ملای

برای محاسبه میزان عقب‌زدگی دود در آزمایش‌های تجربی روش‌های متفاوتی قابل اجرا است. از جمله این رویکردها می‌توان به روش‌های استفاده‌شده توسط سایر محققین اشاره کرد که عبارتند از:

- دوربین‌های مختص پدیده‌های ماکروسکوپی

یکی از این روش‌ها، استفاده از دوربین‌های مختص پدیده‌های ماکروسکوپی است که می‌توانند تصاویری با کیفیت HD را در فواصل زمانی نزدیک به هم تهیه کنند. برای استفاده از این دوربین‌ها نیاز به جداره محیط شفاف است تا بتوان پدیده تحت مطالعه را در برابر دوربین قرار داد و از نتایج آن عکس‌برداری کرد؛ اما در تونل کوچک مقیاس امکان این امر فراهم نیست زیرا دیواره تونل از بتن ساخته شده است. در شکل ۳-۱۳، نمونه‌ای از عکس‌برداری حریق تونل توسط دوربین‌های مخصوص نشان داده شده است.

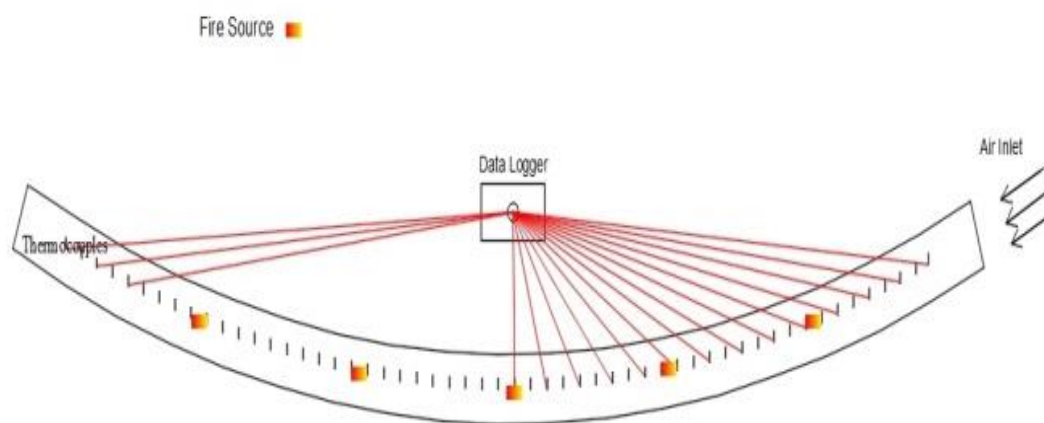


شکل ۳-۱۳: نمونه‌ای از عکس‌برداری حریق تونل توسط دوربین‌های مخصوص در تمام بخش‌ها.

- استفاده از ترموکوپل‌های تعبیه‌شده در سقف تونل

روش دیگر برای اندازه‌گیری میزان عقب‌زدگی دود، استفاده از ترموکوپل‌های تعبیه‌شده در سقف تونل است؛ زیرا گازهای داغ به همراه دود، دارای دمای بالایی هستند و با استفاده از ترموکوپل می‌توان میزان عقب‌زدگی

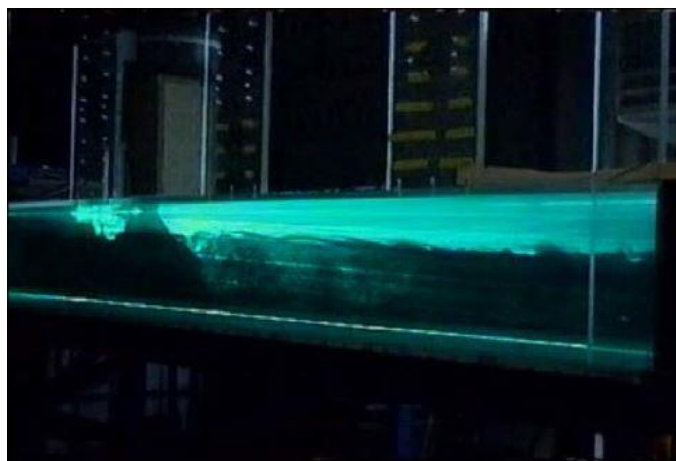
را ثبت کرد. در این روش از ترموکوپل‌های نوع K در سقف تونل در بخش بالادست و پایین‌دست حریق استفاده می‌شود. در صورت حرکت دود در هر یک از طرفین، ترموکوپل‌ها، دمای دود در حال تماس را ثبت می‌کنند و بر اساس مختصات هر یک از ترموکوپل‌های درگیر می‌توان میزان پیشروی دود را به دست آورد. نکته مهم در این روش، نصب ترموکوپل‌ها در فواصل مناسب از یکدیگر است تا دقت مناسبی از میزان پیشروی دود در هر یک از طرفین حریق به دست آید. البته باید دقت کرد که یکی از محدودیت‌های این روش، هزینه‌های مرتبط با خرید تعداد بالای ترموکوپل‌های مورد نیاز می‌باشد. در شکل ۳-۱۴، نمونه‌ای از نصب ترموکوپل‌ها در سقف تونل نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴: پلان تونل و ترموکوپل‌های نصب‌شده در سقف تونل.

• استفاده از دود رنگی

استفاده از دود رنگی نیز می‌تواند به عنوان راه حل دیگری به حساب آید که با استفاده از آن می‌توان میزان پیشروی دود در بالادست و پایین‌دست را به راحتی ثبت کرد و همچون ترموکوپل از آن به عنوان ثبت‌کننده پیشروی دود استفاده کرد. استفاده از دود رنگی یا به عبارت دیگر دود با رنگ متفاوت از زمینه، نیازمند داشتن وضوح تصویر در سرتاسر تونل است که در تونل کوچک مقیاس این تحقیق قابل کاربرد نیست. در شکل ۳-۱۵، نحوه کاربرد این روش نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۵: دود رنگی در حریق تونلی (Vauquelin and Telle, 2005).

۳-۳-۲- محاسبه سرعت بحرانی در تونل کوچک مقیاس ملاوی

برای ثبت میزان عقب‌زدگی دود در این رساله از روش دوم یا استفاده از ترموکوپل‌ها استفاده شده است. ادامه روش کار این‌گونه است که در صورتی که ترموکوپل‌های نصب‌شده در بالادست آتش، دمای بالاتر از محیط اولیه را ثبت نکنند به مفهوم عدم عقب‌زدگی دود خواهد بود. در جدول ۳-۲، نتایج آزمایش فیزیکی نشان داده شده است. برای تشخیص سرعت بحرانی در آزمایش‌های فیزیکی از ترموکوپل‌های نصب‌شده و میزان عقب‌زدگی مرتبط با آن‌ها کمک گرفته می‌شود. با استفاده از دیمر سرعت جریان تهویه افزایش می‌یابد. در اولین آزمایشی که ترموکوپل‌های بالادست حریق، دمایی معادل با شرایط محیطی را ثبت نمایند به منزله وجود سرعت بحرانی در تونل است. همان‌گونه که از نتایج جدول ۳-۲ مشخص است، سرعت بحرانی در آزمایش فیزیکی برابر با ۰/۹۰ متر بر ثانیه خواهد بود.

جدول ۳-۲: آزمایش‌های تجربی در تونل ساخته‌شده و طول عقب‌زدگی مرتبط.

شماره آزمایش	آهنگ رهائش 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

در هر یک از سناریوهای انجام‌شده، روش کار همچون توضیحات ارائه‌شده می‌باشد و سرعت بحرانی به همین صورت به دست آمده است. در ادامه، شبیه‌سازی عددی و نتایج به دست آمده از سناریوهای مختلف آن تشریح شده است.

۳-۴- شبیه‌سازی عددی

به‌منظور بررسی و ارزیابی حالت‌های مختلف و پارامترهای متفاوتی که در سرعت بحرانی مؤثر هستند، کاربرد روش مبتنی بر شبیه‌سازی عددی بسیار راهگشا خواهد بود؛ زیرا به‌دلیل هزینه‌های بالا و صرف زمان زیاد در اجرای آزمایش‌های تجربی بزرگ‌مقیاس، شبیه‌سازی عددی جریان سیال می‌تواند این هدف را محقق کند. از جمله روش‌های شبیه‌سازی عددی، برنامه‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD است. مزایای متفاوتی در CFD نسبت به روش‌های تجربی وجود دارد که به‌صورت خلاصه عبارتند از:

- کاهش اساسی و چشم‌گیر در زمان و هزینه‌های مورد نیاز.
- افزایش کارآمدی و توانایی مطالعه سرعت بحرانی در شرایط دشوار و حالت‌هایی که آزمایش تجربی آن‌ها دشوار است.
- افزایش توانایی مطالعه سناریوهای بیشتر و بدون محدودیت پیاده‌سازی پارامترهای مختلف.
- نامحدود بودن سطح جزئیات در این روش.

در این رساله با استفاده از شبیه‌سازی CFD پارامترهای مختلف و مؤثر بر سرعت بحرانی ارزیابی و تحلیل شده‌اند که بر اساس آن مدل نهایی تخمین سرعت بحرانی تعیین شده است؛ از این‌رو در ادامه کلیاتی در رابطه با بخش‌های مختلف برنامه‌های CFD ارائه شده و پس از آن درباره مدل عددی ساخته‌شده در این رساله و نتایج آن توضیح داده می‌شود.

۳-۴-۱- ساختار برنامه‌های CFD

ساختار برنامه‌های دینامیک سیالات محاسباتی CFD روش‌های عددی است، به گونه‌ای که مسائل جریان سیال با استفاده از این روش قابل حل است. اساس CFD در تمامی برنامه‌های مبتنی بر آن در سه جزء اصلی است شامل:

الف- پیش پردازنده

ب- حل کننده

ج- پس پردازنده

ورودی برنامه در مرحله پیش پردازنده است که باید در این مرحله هندسه ناحیه، شبکه یا مش بندی، پدیده های فیزیکی و شیمیایی، خواص سیال و شرایط مرزی تعیین شود. سپس این ورودی ها به شکل مناسبی برای استفاده توسط حل کننده تبدیل می شوند. حل مسئله جریان (سرعت، فشار، دما و غیره) در گره های داخلی هر سلول (هندسه محیط به بخش های کوچک تری تقسیم می شود) صورت می گیرد. در مرحله حل کننده از روش های عددی برای حل معادله های گسسته شده و تقریب زدن جواب، استفاده می شود. پس پردازنده در واقع نمایش میدان هندسی جریان و شبکه، ترسیم های بردارها، مسیر حرکت ذرات و به عبارت دیگر خروجی نتایج به صورت رنگی است.

نرم افزارهای جریان سیال محیط را به سلول های ریز تقسیم و معادله های دیفرانسیلی را برای هر یک از سلول ها حل می کنند. این معادلات دیفرانسیلی شامل موارد زیر است:

- جرم سیال همواره در هر المان ثابت می باشد که این قانون تعبیری از معادله پیوستگی است.
- نرخ تغییر اندازه حرکت یک ذره سیال برابر با برآیند نیروهای وارد شده بر ذره است که این موضوع بیانگر قانون دوم نیوتون می باشد.
- نرخ تغییر انرژی در سیال برابر با نرخ حرارت اضافه شده و نرخ کار انجام شده بر روی سیال است که تعبیری از قانون اول ترمودینامیک است.

از آن جایی که جریان سیال در موقع آتش سوزی تونلی حالت آرام ندارد، از این رو آن را به صورت جریان آشفته در نظر می گیرند که در نرم افزارهای جریان سیال مدل های مختلفی برای چنین شرایطی وجود دارد. از جمله مدل های آشفته می توان به مدل های ناویر- استوکس، Large Eddy Simulation و $\epsilon - k$ اشاره کرد. انتخاب نوع مدل آشفته بر اساس آزمایش های تجربی و میزان تطبیق مدل انتخاب شده با شرایط مطالعه است (شجاعی فرد و هشترودی، ۱۳۷۹).

کلیه مسائل CFD با شرایط مرزی تعریف می‌شوند و توزیع تمام متغیرهای جریان، نیازمند تعریف آن‌ها در مرزهای ورودی است.

مدلهایی که واکنش‌های واسطه‌ای زیاد را بررسی می‌کنند به سخت‌افزارهای زیادی برای محاسبات نیاز دارند، بنابراین مدل‌های ساده‌تری که واکنش‌های ساده‌تر را در نظر می‌گیرند در CFD استفاده می‌شود. مدلهایی که به منظور مدل کردن احتراق به کار می‌روند شامل موارد زیر هستند (شجاعی فرد و هشترودی، ۱۳۷۹).

- سیستم واکنش شیمیایی ساده
- مدل شکست ادی در احتراق
- مدل شعله آرام

نرم‌افزارهای تحلیل جریان سیال عبارتند از CFX، Ansys Fluent، PHoenics و Star CCMT که هیچ‌یک برای مدل‌سازی آتش در تونل مناسب نیستند. نرم‌افزارهای ویژه CFD که برای مدل‌سازی آتش توسعه داده شده‌اند عبارتند از:

- JASMINE
- SMART FIRE
- SOFIE
- FIRE FOAM
- FIRE DYNAMIC SIMULATOR (FDS)

در بین این نرم‌افزارهای تجاری، FDS از سوی انجمن جهانی آتش به عنوان نرم‌افزار استاندارد در نظر گرفته شده است (Ingason *et al.*, 2015).

۳-۴-۲- شبیه‌سازی عددی حریق

برای مدل‌سازی CFD آتش‌سوزی‌های تونلی می‌توان از مدل‌های مختلف یک‌بعدی تا سه‌بعدی، بسته به شرایط مسئله مورد نظر استفاده کرد (Weng *et al.*, 2016). این تکنیک می‌تواند درک عمیق‌تری از تأثیر پارامترهای مختلف را برای محققین به ارمغان آورد.

ابزارهای مختلفی برای این منظور در دسترس است که در این میان از نرم افزار FDS به دلیل توانایی بالاتر و دقت مناسب به صورت گسترده تری برای مسائل آتش در تونل استفاده می شود (Ingason *et al.*, 2015). از اصلی ترین دلایل انتخاب نرم افزار FDS می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- این کد تجاری صرفاً برای مسائل ایمنی حریق توسعه داده شده است.
 - کد تجاری FDS یک نرم افزار متن باز است که توانایی تغییرات و شرایط مختلف و سناریوهای ویژه حریق در آن به راحتی انجام می شود.
 - این کد به صورت پیوسته تحت توسعه و اعتبارسنجی با شرایط ویژه حریق قرار دارد.
- نرم افزار FDS یک کد تجاری است که توسط انستیتو ملی استاندارد و فناوری (NIST) و مرکز تحقیقات و فناوری فنلاند (VTT) توسعه داده شده است. این کد از سال ۲۰۰۰ منتشر شده و تاکنون نیز در حال توسعه است (McGrattan *et al.*, 2016).
- همه جریان ها با توجه به عدد رینولدز به حالت های آرام، آشفته و یا گذرا تقسیم می شوند. کدهای FDS معادله های ناویر-استوکس را با شیوه ی LES و استفاده از روش تفاضل محدود حل می کنند. رویکرد LES به دلیل توانایی شبیه سازی مسائل جریان گذرا انتخاب شده است. البته FDS توانایی شبیه سازی DNS را نیز داراست اما به صورت پیش فرض مدل LES اجرا می شود.
- در شکل ۳-۱۶، تصویری از محیط FDS نشان داده شده است.

```

Fire Dynamics Simulator

Current Date      : January 21, 2021  14:24:30
Version          : FDS 6.5.3
Revision         : FDS6.5.3-598-geb56ed1
Revision Date    : Thu Jan 19 16:12:59 2017 -0500
Compilation Date : Fri 01/20/2017 09:11 PM

MPI Enabled; Number of MPI Processes:      1
OpenMP Enabled; Number of OpenMP Threads:  2

MPI version: 3.0
MPI library version: Intel(R) MPI Library 5.1.3 for Windows* OS

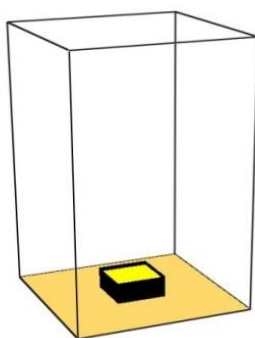
Consult FDS Users Guide Chapter, Running FDS, for further instructions.
Hit Enter to Escape...

```

شکل ۳-۱۶: تصویری از محیط متن‌باز FDS.

الف- تنظیمات اولیه شبیه‌سازی

به‌منظور انجام شبیه‌سازی، حریق حوضچه‌ای در نظر گرفته شده است. مشخصه‌های گرافیکی این حوضچه‌ها مانند شکل ۳-۱۷ است. ابعاد این حوضچه‌ها 8×8 ، 10×10 ، 15×15 ، 18×18 ، 24×24 و 28×28 سانتی‌متر با عمق ۵ سانتی‌متر است که دارای HRR متفاوت هستند. در این تحقیق از معادله‌های جریان مغشوش LES استفاده شده است.



شکل ۳-۱۷: تصویری از مدل حوضچه در نرم‌افزار FDS.

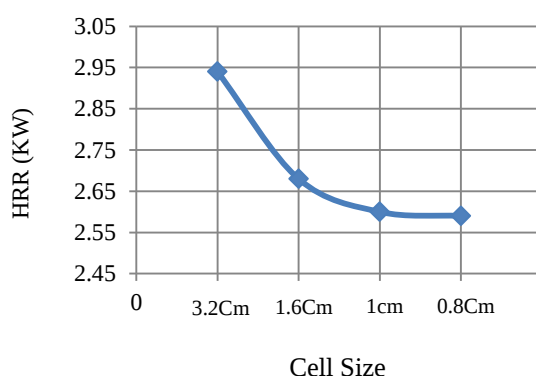
ب- مش‌بندی

انتخاب دقیق اندازه مش‌های شبکه‌بندی یکی از پارامترهای مهم در بررسی‌های عددی به حساب می‌آید؛ زیرا دقت نتایج به دست آمده مستقیماً به اندازه مش‌ها 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 ۱-۳ که در راهنمای نرم‌افزار FDS ارائه شده است برای تعیین اندازه سلول‌ها استفاده کرد (FDS User Guide, 2017).

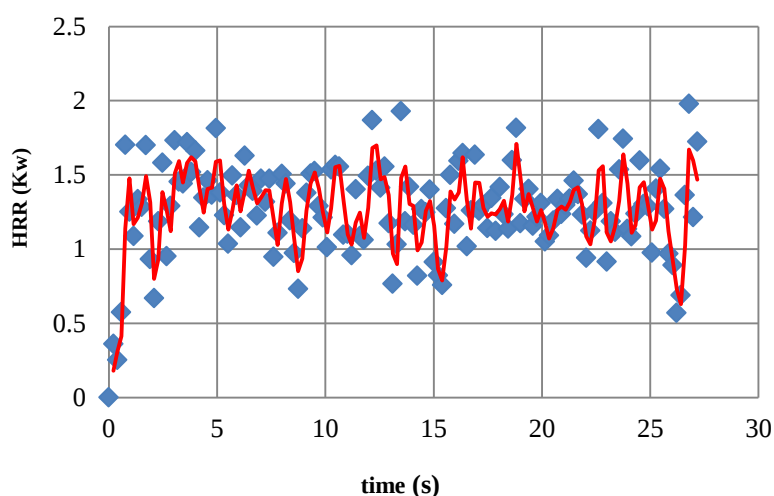
$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (1-3)$$

در این معادله، D^* مشخصه آتش (متر)، Q آهنگ رهایش گرما (KW)، C ظرفیت گرمایی ویژه و ρ_a و T چگالی و دمای هوا است. برای محاسبه اندازه مش‌ها کافی است 0.1 مقدار مشخصه آتش را به‌عنوان 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 (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 ۱-۳ (که برابر با ۸ میلی‌متر است) و مقادیر بزرگ‌تر از آن به‌عنوان ابعاد مش‌بندی انتخاب و مقدار آهنگ رهایش گرمای میانگین برای هر یک در شکل ۱۸-۳ ترسیم شده است. همان‌گونه که از شکل ۱۸-۳ برمی‌آید مقدار HRR از ابعاد ۱ سانتی‌متر به بعد ثابت مانده است. در نتیجه به‌منظور کاهش حجم محاسبات، ابعاد ۱ سانتی‌متر به‌عنوان ابعاد نهایی مش‌بندی انتخاب شده است.

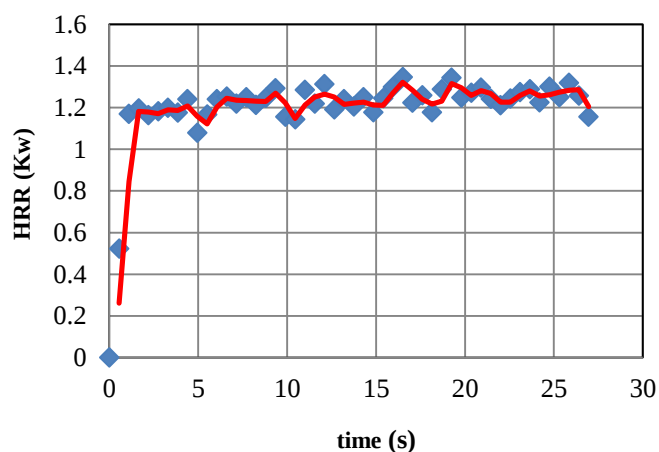


شکل ۱۸-۳: تحلیل حساسیت مش‌بندی.

از سوی دیگر برای ارزیابی سائز مش‌بندی انتخاب‌شده، میزان HRR برای دو سائز مش مختلف ترسیم شده که نتایج به دست آمده برای تحلیل حساسیت در شکل‌های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این نمودارها برمی‌آید در ابعاد بزرگ‌تر از ۱ سانتی‌متر مقادیر آهنگ رهائش گرما بسیار پراکنده و تقریباً در محدوده‌ی ۰/۷ تا ۱/۸ کیلووات متغیر بوده که با مقدار میانگین اختلاف چشم‌گیری دارد؛ اما در سائز ۱ سانتی‌متر نتایج به دست آمده در طیف مناسبی قرار گرفته است؛ بنابراین اندازه سلول‌های شبیه‌سازی تأثیر به سزایی در تخمین مقدار HRR دارد و نتایج شبیه‌سازی شدیداً به مش‌بندی وابسته است.



شکل ۳-۱۹: مقادیر HRR برای حوضچه با ابعاد ۸×۸ سانتی‌متر و سلول‌های ۱/۶ سانتی‌متر.



شکل ۳-۲۰: مقادیر HRR برای حوضچه با ابعاد ۸×۸ سانتی‌متر و سلول‌های ۱ سانتی‌متر.

ج- شرایط مرزی

در این تحقیق حوضچه‌های بکاررفته از جنس فلز است و در فضای باز و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. وجوه ورودی و خروجی تونل تحت‌عنوان OPEN در نرم‌افزار تنظیم شده است. منبع آتش در نرم‌افزار با عنوان POOL FIRE تنظیم و ماده سوختنی آن متانول صنعتی است. زمان شبیه‌سازی ۵۰۰ ثانیه می‌باشد. فن محوری به‌عنوان تأمین‌کننده کلی جریان هوا در ورودی نصب شده و جریان هوا به‌صورت دهشی به داخل تونل توسط این فن دمیده می‌شود که از سرعت صفر تا میزان دلخواه تغییر می‌کند. جنس دیواره تونل نیز همچون مدل واقعی بتنی تعریف شده است.

د- مدل‌سازی حریق

مدل‌سازی احتراق در FDS به دو صورت ممکن است. در روش اول می‌توان منبع سوخت را به‌عنوان یک منبع با HRR ویژه یا با نرخ سوخت مشخص تعریف کرد. در این روش نتایج حریق با توجه به ویژگی‌های سوخت اولیه و با استفاده از منابعی که ویژگی‌های اصلی سوخت را ارائه کرده‌اند، شبیه‌سازی می‌شود. در این روش با توجه به ماهیت اصلی نوع سوخت، گرمای حاصل از آن و محصولات حریق به‌ویژه دود ناشی از آن شبیه‌سازی می‌شود. این رویکرد بدین مفهوم است که تنها مرحله‌ی ایجاد حریق کنار گذاشته می‌شود و بخش بعدی آن یعنی انتشار مواد و نتایج حاصل از حریق شبیه‌سازی می‌شود. در واقع سوخت ترکیبی از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن است که با اکسیژن واکنش می‌دهد و در هر ماده سوختنی با توجه به فرمول شیمیایی آن و منابع آزمایشگاهی می‌توان مقدار مواد حاصل از حریق را تخمین و شبیه‌سازی کرد که البته در FDS این روند به‌صورت پیش‌فرض انجام می‌شود.

در روش دوم با استفاده از مدل‌های پیچیده حریق می‌توان روند سوختن را شبیه‌سازی کرد که در این روش با استفاده از مدل‌هایی که پیش از این اشاره شده است، کلیه مراحل واکنش شیمیایی از شعله‌ور شدن تا زوال آتش شبیه‌سازی می‌شود. روش دوم نیازمند سیستم‌های کامپیوتری بسیار قدرتمند است تا بتوان نتایج مطلوبی را به دست آورد.

کاربرد روش اول در عین سادگی، نتایج مناسبی را نیز ارائه می‌کند. طبق تحقیق‌های سایر پژوهشگران همچون مطالعه ونگ و همکاران، وگا و همکاران، وانگ و همکاران و سایر محققین نتایج قابل قبولی از این روش دریافت شده است (Weng et al., 2016; Vega et al., 2008; Wang et al., 2017).

طبق پیشنهاد پیارک^۱ بر اساس پژوهش‌های مختلفی که برای تأثیر تابش در روش مدل‌سازی حریق با رویکرد اول انجام شده است می‌توان در FDS میزان آهنگ رهائش گرما را کاهش داد تا اختلاف انرژی آزادشده توسط تابش در میزان HRR لحاظ شود و بر اساس این پژوهش‌ها درصد انرژی از دست‌رفته از حریق به واسطه تابش در محدوده ۲۰ تا ۵۰ درصد کل انرژی گرمایی آزادشده توسط حریق است و می‌توان به‌صورت متوسط آن را ۳۵ درصد در FDS اعمال کرد.

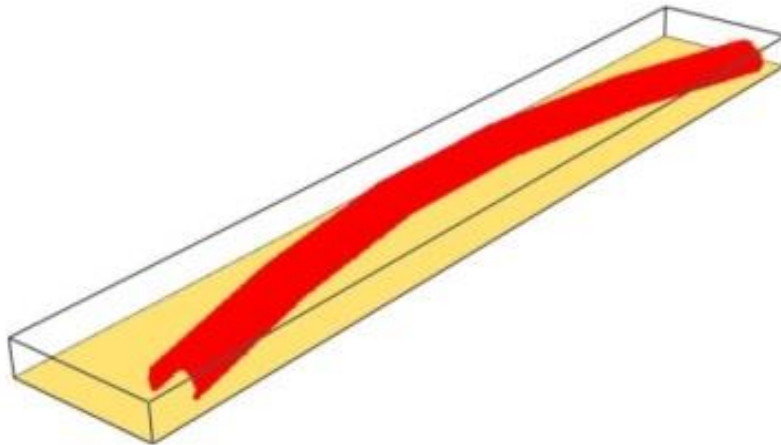
۳-۵- شبیه‌سازی عددی حریق تونل

از آن‌جایی که شبیه‌سازی عددی توانایی مطالعه پارامتری و با وسعت بالا را برای پژوهشگر فراهم می‌آورد در ادامه ابتدا تونل کوچک‌مقیاس ساخته‌شده در آزمایشگاه، شبیه‌سازی عددی شده است و به‌صورت پیش‌فرض در آن یک حریق حوضچه‌ای 10×10 سانتی‌متر در خط مرکزی و وسط تونل در نظر گرفته شده است. هدف این امر آن است که نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در تونل ساخته‌شده کوچک‌مقیاس، مقایسه شوند و به این واسطه صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌های آتی عددی انجام پذیرد.

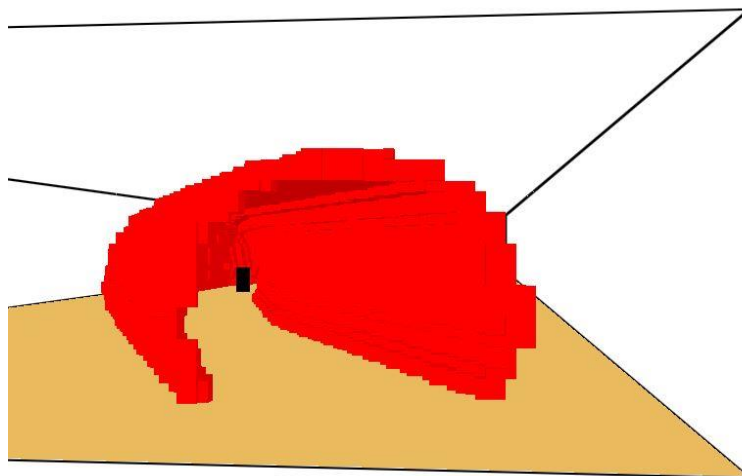
بر این اساس در این تونل میزان سرعت جریان هوا در آن از صفر تا حد مشخصی تغییر می‌کند تا بتوان میزان عقب‌زدگی دود را مشخص و در انتها سرعت بحرانی مرتبط با این تونل و حریق رخ داده در آن را تعیین کرد.

در شکل ۳-۲۱، مدل ساخته‌شده از این تونل در محیط FDS نشان داده شده است. بدنه این تونل از جنس بتن بوده و دو دهانه ورودی و خروجی نیز با هوای آزاد در ارتباط هستند. در شکل ۳-۲۲ نیز از نمای درونی تونل و حوضچه حریق تصویر گرفته شده است.

¹ PIARC

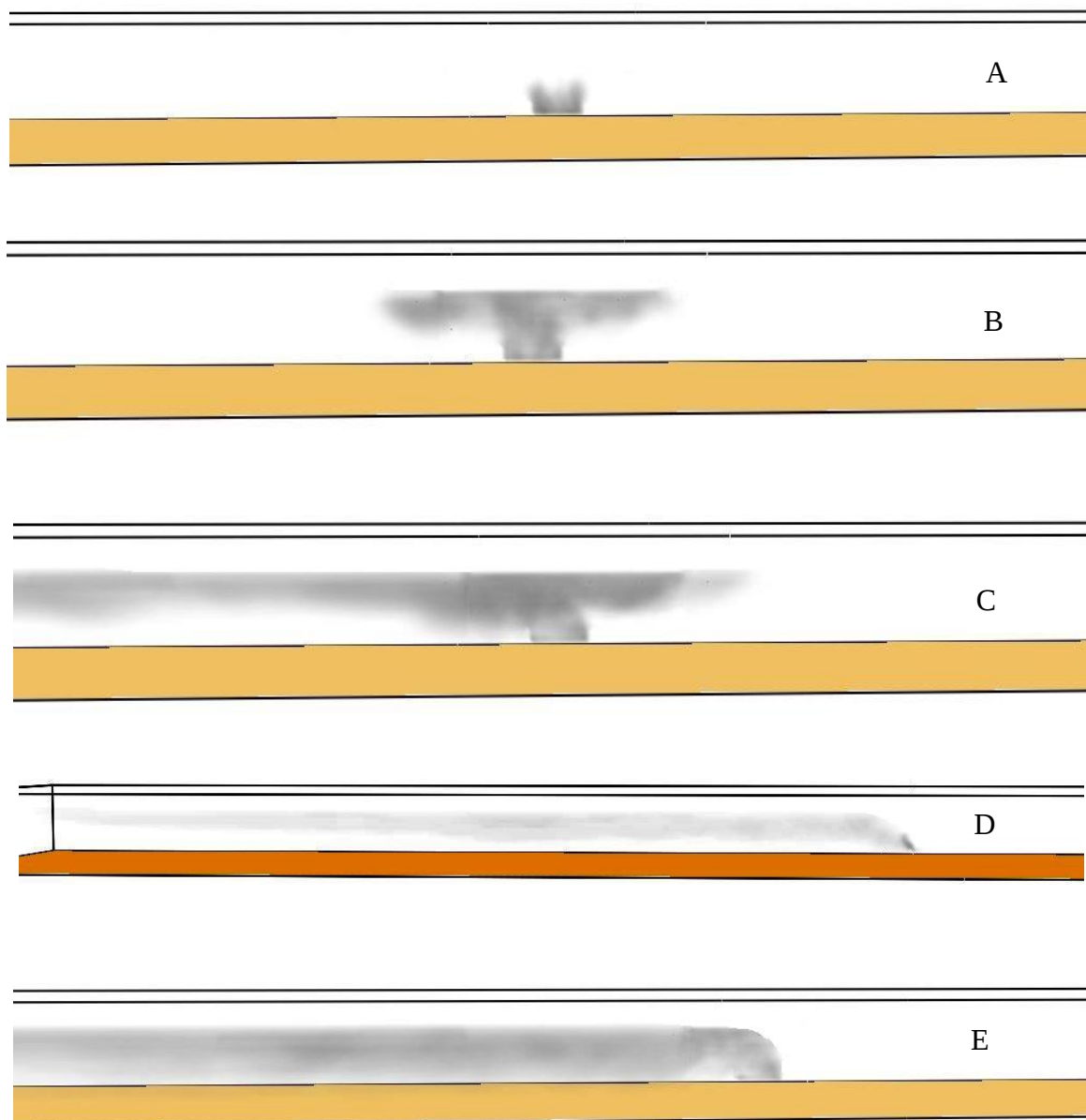


شکل ۳-۲۱: مدل ساخته شده از تونل کوچک مقیاس آزمایشگاهی در FDS.



شکل ۳-۲۲: مقطع تونل و حوضچه حریق.

با ساخت هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی می توان در FDS اولین شبیه سازی را انجام داد. همان گونه که پیش از این ذکر شد تمامی شبیه سازی های عددی و تجربی این رساله در ابعاد کوچک مقیاس است. در شکل ۳-۲۳ می توان وضعیت دود حاصل از حریق حوضچه ای را در جریان محوری صفر تا ۰/۹۹ متر بر ثانیه مشاهده کرد. در این تصاویر برای مشاهده بهتر دود ناشی از حریق، دیواره تونل به حالت مخفی درآمده است تا بتوان درون تونل را به راحتی مشاهده کرد.



شکل ۳-۲۳: تصاویر توسعه دود ناشی از حریق در سرعت‌های جریان متفاوت.

در تصاویر موجود در شکل ۳-۲۳، سرعت جریان فن از صفر افزایش یافته است. در تصویر A سرعت جریان هوا در لحظات ابتدایی شروع حریق، صفر است.

در تصویر B نیز سرعت جریان هوا هنوز صفر است. همان‌گونه که مشخص است دود در دو طرف حوضچه در حال گسترش است و در صورتی که جریان هوا همچنان صفر باقی بماند این دود در دو طرف به دهانه‌ها خواهد رسید.

در تصویر C سرعت جریان هوا به 0.50 متر بر ثانیه رسیده است و این جریان سبب شده است که تا حد زیادی از عقب‌زدگی دود ممانعت به عمل آورد اما با این وجود عقب‌زدگی مشهودی وجود دارد.

در تصویر D سرعت جریان هوا به 0.92 متر بر ثانیه رسیده است که به طرز مناسبی عقب‌زدگی دود را کنترل کرده و در عین حال لایه‌بندی دود در پایین‌دست حریق از بین نرفته و با حفظ آن، شرایط ایمن در بالادست و پایین‌دست به وجود آمده است؛ چرا که افراد حاضر در پایین‌دست حریق نیز می‌توانند با وجود یک حریم قابل استنشاق، از محیط تونل سریعاً خارج شوند.

اما در تصویر E سرعت جریان هوا به 0.99 متر بر ثانیه رسیده است همان‌گونه که از تصویر برمی‌آید لایه‌بندی دود در پایین‌دست حریق در حال از بین رفتن است و به زودی دود در تمامی نقاط تونل پخش می‌شود که شرایط ناایمنی را برای افراد حاضر در آن قسمت به وجود می‌آورد.

از تصاویر موجود در شکل ۳-۲۳، این نتیجه دریافت می‌شود که اولین سرعتی از جریان هوا که عقب‌زدگی دود را کنترل می‌کند به‌عنوان سرعت ایمن و کاربردی در کنترل دود ناشی از حریق و در اصطلاح سرعت بحرانی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین سرعت جریان کم‌تر از سرعت بحرانی و یا بیشتر از آن، خطر مرگ‌ومیر و مصدومیت ناشی از استنشاق دود را بسیار افزایش می‌دهد.

۳-۵-۱- مقایسه نتایج عددی و فیزیکی تخمین سرعت بحرانی در تونل کوچک مقیاس

برای تخمین سرعت بحرانی توسط شبیه‌سازی عددی ابتدا همچون مدل فیزیکی یک حوضچه‌ی 10×10 سانتی‌متر در خط مرکز تونل و در وسط آن قرار داده شده است. هدف این است که نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از بخش شبیه‌سازی فیزیکی مقایسه شوند. این مقایسه می‌تواند دقت و توانایی تخمین FDS و کد تهیه‌شده را در مدل مورد مطالعه، نشان دهد.

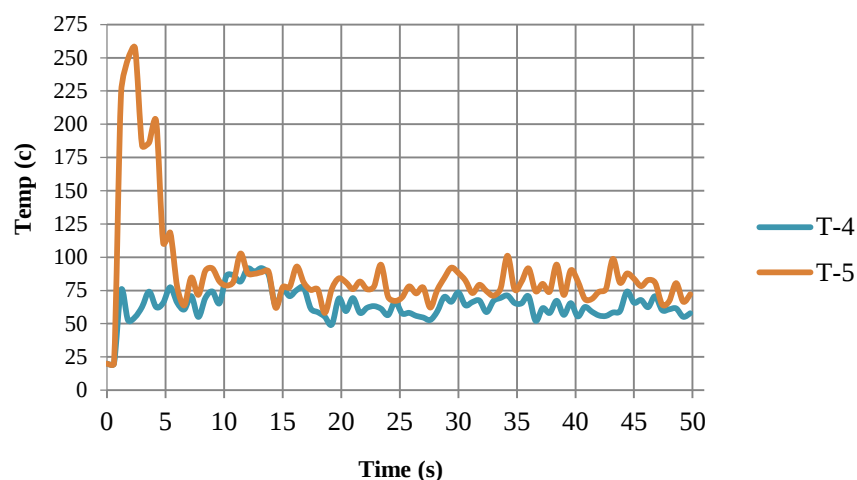
در مدل عددی ساخته‌شده یک حریق حوضچه‌ای با ابعاد مساوی 10 سانتی‌متری در مرکز محوری تونل در نظر گرفته شده است، سپس به کمک فن محوری سرعت جریان هوا در هر شبیه‌سازی افزایش یافته است تا زمانی که مقدار عقب‌زدگی دود مرتبط با دمای برداشت‌شده توسط ترموکوپل‌هایی که در سقف تونل همچون مدل فیزیکی نصب شده‌اند، به صفر برسد. البته این روند همچون روش بکار برده‌شده در

شبیه‌سازی فیزیکی است که در بخش قبل تشریح شد با این تفاوت که تعداد ترموکوپل‌های نصب‌شده بدون محدودیت است و می‌توان فواصل بین آن‌ها را تا حد دلخواه کوچک‌تر کرد و دقت مسائل را افزایش داد. برای این منظور ترموکوپل‌ها در بالادست و پایین‌دست آتش نصب شده‌اند و در صورتی که ترموکوپل‌های نصب‌شده در بالادست آتش، دمای بالاتر از محیط اولیه را ثبت نکنند به مفهوم عدم عقب‌زدگی دود خواهد بود. همان‌گونه که از نتایج جدول ۲-۳ که نتایج آزمایش فیزیکی است و پیشتر نشان داده شد، مشخص است که سرعت بحرانی برابر با ۰/۹۰ متر بر ثانیه خواهد بود.

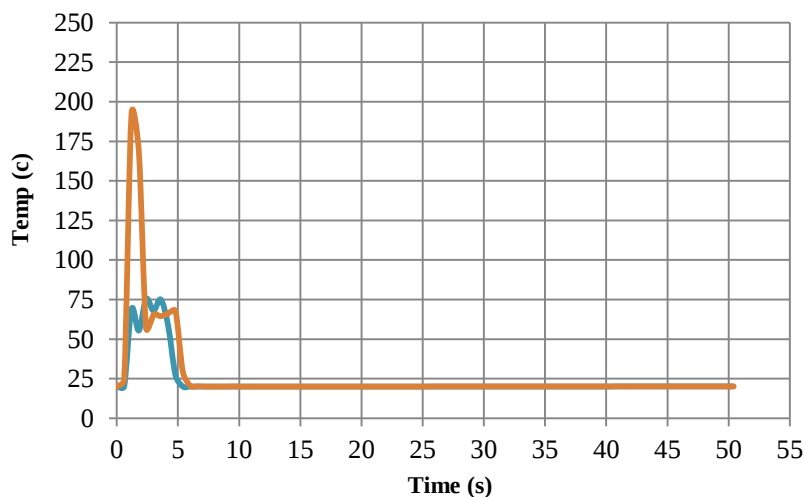
برخی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی FDS نیز در شکل‌های ۲۴-۳ و ۲۵-۳ نشان داده شده است که نتیجه ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌های نصب‌شده در بالادست حریق را به ترتیب در سرعت کم‌تر از سرعت بحرانی و در سرعتی برابر با سرعت بحرانی نشان می‌دهند.

ترموکوپل ۴ (T-4) در ده سانتی‌متر قبل از آتش (مستقر در بالادست) در سقف تونل و ترموکوپل ۵ (T-5) در پنج سانتی‌متر قبل از آتش (مستقر در بالادست) قرار دارد. اگر در هر آزمایش ترموکوپل ۴ و ۵ دمایی بالاتر از محیط را ثبت کنند به معنای وجود عقب‌زدگی دود خواهد بود. در شکل ۲۴-۳، 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 کرده و بیانگر وجود عقب‌زدگی دود است.

در شکل ۲۵-۳ 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 نشان‌دهنده عدم عقب‌زدگی دود است. بر اساس نتایج، سرعت ۰/۹۲ به‌عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید نرم‌افزار با دقت مناسبی سرعت بحرانی را تخمین زده است.

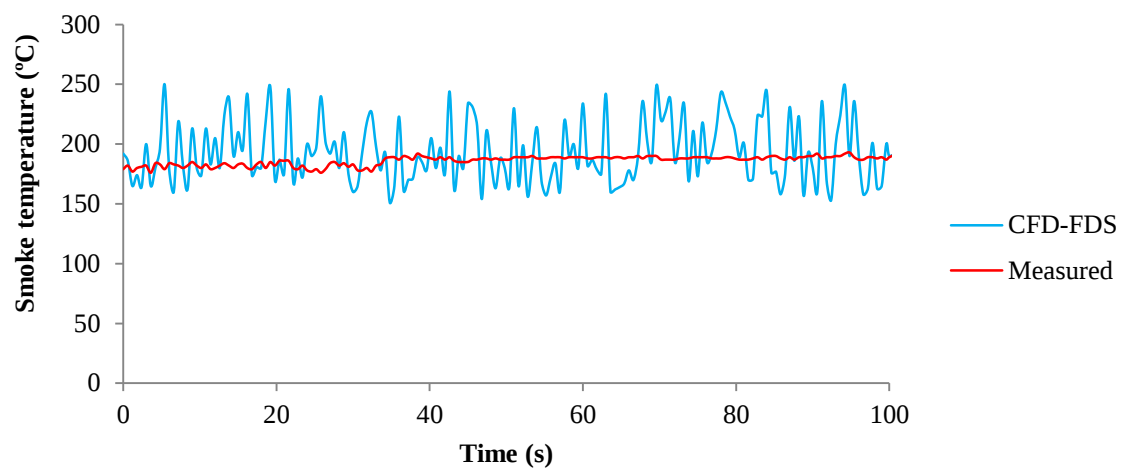


شکل ۳-۲۴: نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌ها در شبیه‌سازی عددی برای سرعت جریان ۰/۷۲ متر بر ثانیه.

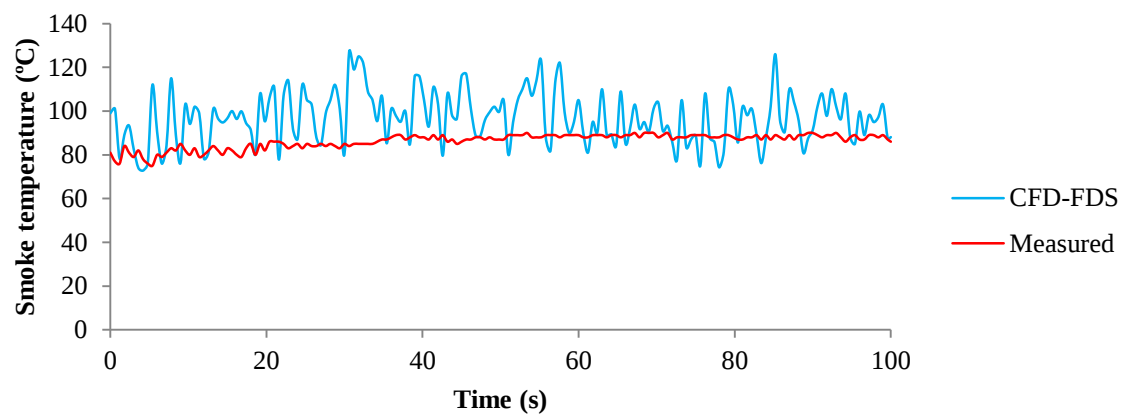


شکل ۳-۲۵: نتایج ثبت دمایی برخی از ترموکوپل‌ها در شبیه‌سازی عددی برای سرعت جریان ۰/۹۲ متر بر ثانیه.

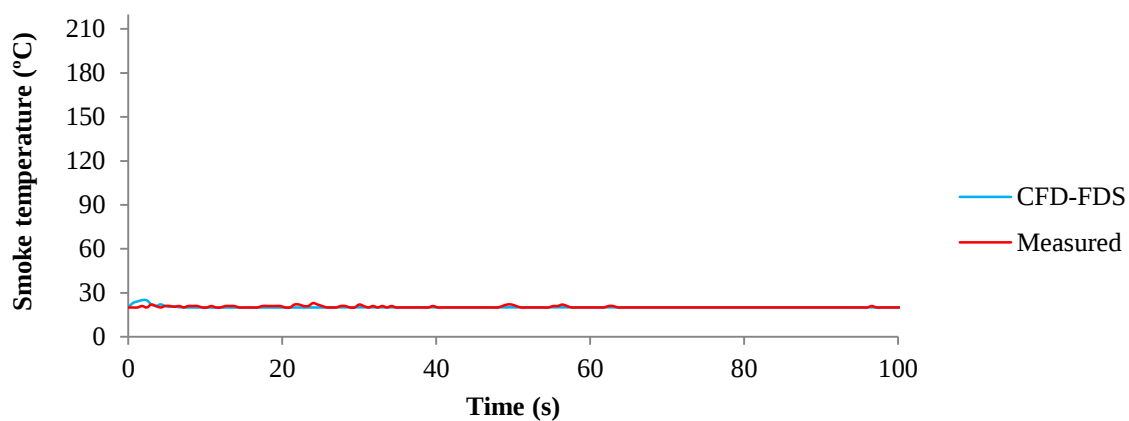
در شکل‌های ۳-۲۶ تا ۳-۲۸، دمای تخمینی دود در سقف تونل با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نزدیکی محل حوضچه حریق با مقادیر به دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. این نمودارها برای حالت‌های خاموش‌بودن فن، در ۵۰ درصد سرعت بحرانی و سرعت هوا در تونل معادل با سرعت بحرانی، ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که مشخص است، زمانی که سرعت هوا ۰/۹۲ متر بر ثانیه است عقب‌زدگی دود برابر با صفر می‌باشد، که این مقدار با نتایج آزمایش‌های تجربی هم‌خوانی مناسبی دارد.



شکل ۳-۲۶: فن خاموش.



شکل ۳-۲۷: سرعت هوا ۵۰٪ سرعت بحرانی.



شکل ۳-۲۸: سرعت هوا برابر با سرعت بحرانی.

۳-۵-۲- ارزیابی FDS در تخمین HRR

از آن جایی که در این رساله از رویکرد فرض منبع سوخت با HRR ویژه به جای مدل سازی کلی حریق استفاده شده است، از این رو ارزیابی و اعتبارسنجی FDS در تخمین HRR سوخت بسیار حائز اهمیت است. به همین دلیل در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با FDS و کد تهیه شده، با مقادیر تجربی به دست آمده توسط سایر محققین مقایسه شده است تا بتوان از نتایج بعدی اطمینان حاصل کرد.

بنابراین ادامه روند، نیازمند داشتن داده های حاصل از آزمایش های فیزیکی است. بدین منظور از سری آزمایش های تجربی ونگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ استفاده شده است. در ادامه، روش اندازه گیری آهنگ رهایش گرما توسط این محققین مطرح و سپس جدول آزمایش های ونگ ارائه خواهد شد که از نتایج آن به عنوان داده های تجربی استفاده خواهد شد.

ونگ و همکارانش برای حریق حوضچه ای از متانول ۹۵٪ صنعتی به عنوان ماده سوختنی استفاده کرده اند (Weng et al., 2016). آن ها چندین آزمایش را به انجام رسانده اند و روش کاری آن ها بدین صورت است که بر مبنای معادله ۲-۳ آهنگ رهایش گرما را به دست آورده اند (Users Guide for the CFI Software, 2008).

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c \quad (2-3)$$

در این معادله، $\dot{Q}$ 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 بر اساس مترمربع و ΔH_c گرمای مؤثر از احتراق بر اساس کیلوژول بر گرم است.

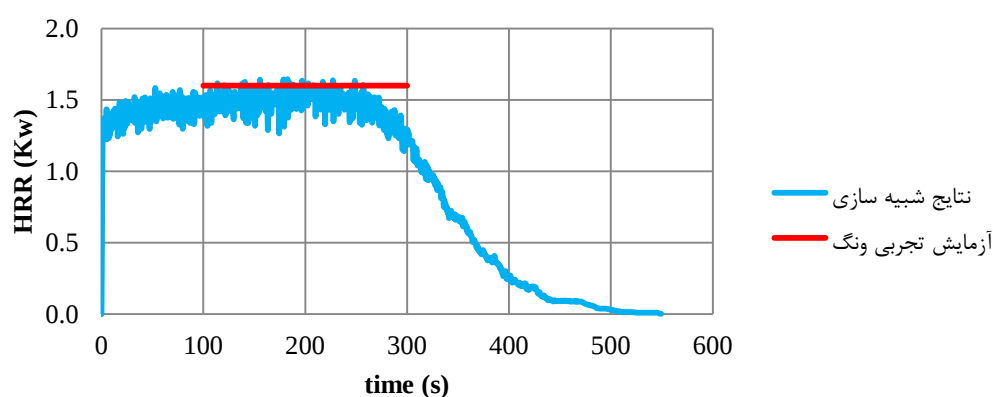
ونگ و همکاران برای محاسبه آهنگ مصرف جرم ترازویی را طراحی کرده اند؛ این ترازو به نحوی است که به صورت خودکار وزن سوخت را ثبت و تغییرات جرمی را با دقت ۰/۱ گرم، بر اساس زمان برداشت می کند و این تغییرات به عنوان $\dot{m}''$ در نظر گرفته خواهد شد. سپس گرمای مؤثر احتراق نیز بر اساس جداول استاندارد است تهیه شده است قابل برداشت می باشد. تنها پارامتر باقیمانده، سطح مؤثر سوخت است که این پارامتر نیز از مساحت حوضچه به دست می آید که در نتیجه مقدار آهنگ رهایش گرما

برای سوخت مورد نظر با توجه به معادله ۳-۳ به دست آمده است. ویژگی‌های هر یک از این حوضچه‌ها در جدول ۳-۳ برای آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است.

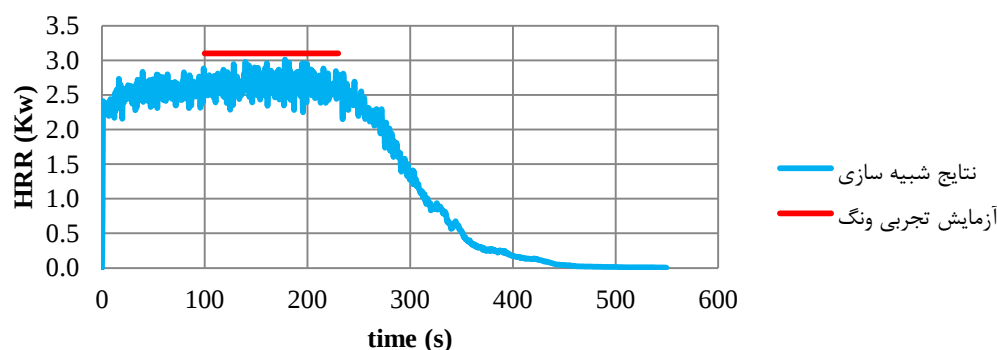
جدول ۳-۳: ویژگی‌های حریق‌های حوضچه‌ای (Weng et al., 2016).

اندازه حوضچه (cm)	حداکثر آهنگ رهایش گرما (kw)	آهنگ رهایش گرما (MW) در تونل واقعی
۸×۸	۱/۵۹	۰/۵
۱۰×۱۰	۳/۱	۱/۰۱
۱۵×۱۵	۸/۹	۲/۸۴

پس از اعمال شرایط مرزی و انجام شبیه‌سازی، شکل‌های ۲۹-۳ و ۳۰-۳ به‌عنوان نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار FDS برای دو حوضچه ۸×۸ و ۱۰×۱۰ سانتی‌متری به دست آمده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، مقدار آهنگ رهایش گرما از صفر شروع شده و پس از مرحله گرگرفتگی به توسعه آتش و زوال ختم شده است.



شکل ۲۹-۳: مقایسه نتایج شبیه‌سازی FDS و آزمایش تجربی برای حوضچه ۸×۸.

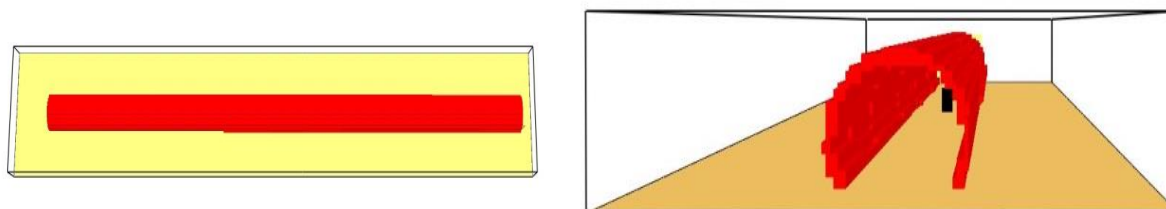


شکل ۳۰-۳: مقایسه نتایج شبیه‌سازی FDS و آزمایش تجربی برای حوضچه ۱۰×۱۰.

نمودار آبی رنگ حاصل از شبیه سازی FDS و قرمز رنگ نتایج حاصل از آزمایش های تجربی است. برای مقایسه نتایج شبیه سازی و مقادیر آزمایش های 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 آزمایش های ونگ و همکارانش در واقع حداکثر آهنگ رهائش گرما مربوط به حریق توسعه یافته است، از این رو بخش میانی نمودارهای شبیه سازی با مقادیر تجربی مقایسه می شود. همان گونه که از شکل های ۳-۲۹ و ۳-۳۰ مشخص است، نتایج حاصل از شبیه سازی FDS و آزمایش های تجربی ونگ و همکاران تطابق بسیار نزدیکی دارند و این نرم افزار با دقت بسیار خوبی مقدار HRR را تخمین زده است.

۳-۵-۳- مقایسه سرعت بحرانی تونل منحنی و مستقیم

برای مقایسه سرعت بحرانی در تونل منحنی با تونل مستقیم در محیط نرم افزار FDS یک تونل مستقیم با سطح مقطع مدل فیزیکی ساخته شده که طول آن ۱۵ متر و در مرکز آن حریق حوضچه ای با ابعاد 10×10 سانتی متر قرار داده شده است و در شکل ۳-۳۱ 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 می باشد. علت این تغییر در سرعت بحرانی را باید حاکی از تغییرات به وجود آمده در خط نیم رخ سرعت دانست؛ زیرا در انحنایها، پروفایل سرعت جریان از حالت تقارن خارج و سبب تغییر در مقدار سرعت بحرانی می شود. در نتیجه سرعت بحرانی مورد نیاز در تونل با هندسه منحنی از تونل مستقیم بیشتر است. در جدول ۳-۴ مقایسه سرعت بحرانی در حالت منحنی و مستقیم نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۱: دید از بالا (سمت چپ) و سطح مقطع (سمت راست) تونل مستقیم در FDS.

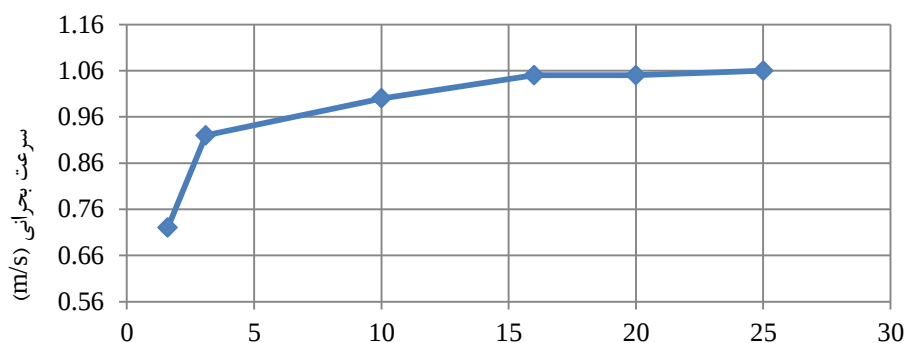
جدول ۳-۴: نتایج سرعت بحرانی در تونل مستقیم و منحنی بر مبنای FDS.

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

۳-۵-۴- ارزیابی سرعت بحرانی بر اساس تغییر در HRR برای تونل منحنی

بسیاری از محققین اهمیت پارامتر HRR را در طراحی ایمنی و در حوزه سرعت بحرانی بالا می‌دانند. از این پارامتر به عنوان عنصر کلیدی یاد می‌شود که می‌تواند به عنوان مقوله اصلی در اکثر مدل‌های تخمین سرعت بحرانی باشد. در تمامی پژوهش‌های سرعت بحرانی، توجه ویژه‌ای به این پارامتر می‌شود؛ بنابراین درک درست از میزان وابستگی سرعت بحرانی در تونل منحنی به این پارامتر اهمیت دوچندان دارد. در شکل ۳-۳۲ تغییرات سرعت بحرانی نسبت به HRR نشان داده شده است. همان گونه که از این نمودار برمی‌آید با افزایش اندازه دهانه حوضچه حریق که منجر به افزایش آهنگ رهایش گرما می‌شود، میزان سرعت بحرانی در تونل منحنی ساخته شده نیز افزایش می‌یابد تا این که پس از یک مقدار مشخص (حدود ۱۵ کیلووات) به حد تقریباً ثابتی خواهد رسید. وجود این روند در وابستگی سرعت بحرانی می‌تواند مدل نهایی تخمین سرعت بحرانی را تحت تأثیر قرار دهد.

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. از این رو می‌توان دریافت که در یک محدوده مشخص، مقدار سرعت بحرانی از میزان HRR بسیار تأثیرپذیر است و این محدوده چالش اصلی در طراحی و پیاده‌سازی سرعت جریان در حین حریق خواهد بود.



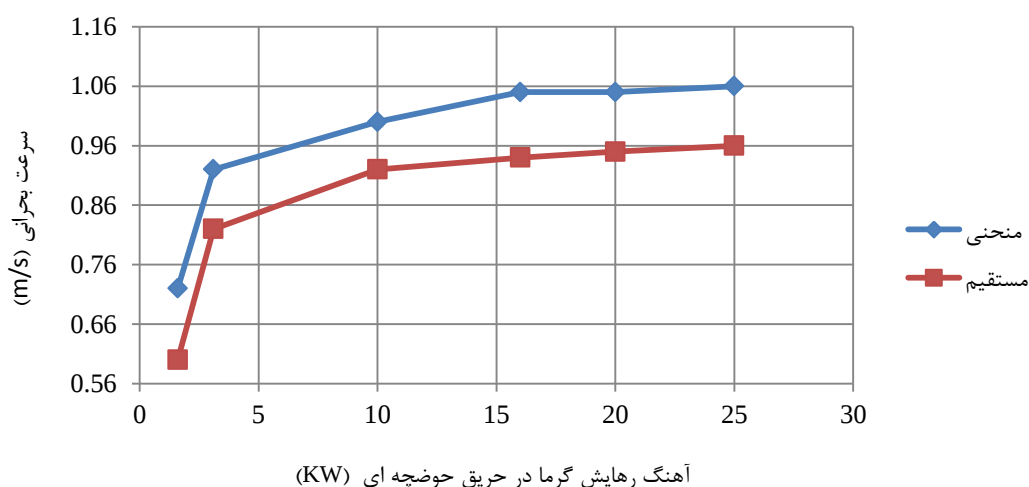
آهنگ رهائش گرما در حریق حوضچه ای (KW)

شکل ۳-۳۲: تغییرات سرعت بحرانی بر مبنای HRR.

۳-۵-۵- مقایسه تغییرات سرعت بحرانی بر مبنای HRR در تونل منحنی و تونل مستقیم

در شکل ۳-۳۳ مقایسه تغییرات HRR و سرعت بحرانی برای دو تونل منحنی و مستقیم نشان داده شده است. برای هر دو تونل روند صعودی وجود دارد 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.

با وجود انحنای تونل، روند تأثیرپذیری سرعت بحرانی ناشی از افزایش HRR در هر دو تونل مشابه است و در طراحی سرعت بحرانی می‌توان محدوده اثرگذار در این چرخه را معیار اصلی قرار داد. پس از این محدوده، با افزایش HRR در تونل، سرعت بحرانی تغییرات ویژه‌ای نخواهد داشت؛ از این‌رو سرعت بحرانی مورد نیاز نیز مستقل از سرعت جریان تهویه طولی، حاصل می‌شود.



آهنگ رهائش گرما در حریق حوضچه ای (KW)

شکل ۳-۳۳: مقایسه تغییرات HRR و سرعت بحرانی برای تونل مستقیم و منحنی.

۳-۵-۶- تأثیر جابجایی طولی بر سرعت بحرانی در تونل منحنی

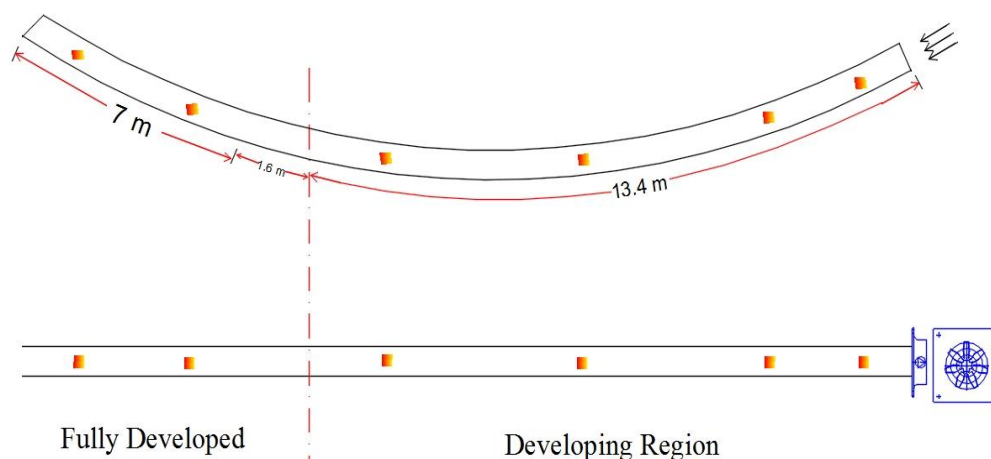
در بررسی‌های پیشین، جریان هوا عمدتاً کاملاً توسعه‌یافته در نظر گرفته شده و سرعت جریان به‌صورت یکنواخت فرض شده است؛ اما باید به این نکته مهم دقت کرد که این فرض تنها زمانی درست است که زمان کافی در اختیار جریان هوا قرار داده شود تا قبل از رسیدن به دود و محل حریق به حالت کاملاً توسعه‌یافته رسیده باشد. به‌عنوان مثال، کمبی و همکارانش در تحقیقی گزارش کرده‌اند که حداقل فاصله مورد نیاز بین حریق تا فن باید ۲۰۰ متر باشد تا جریان هوا قبل از رسیدن به آن به حالت کاملاً توسعه‌یافته تبدیل شده باشد (Camby et al., 2012). همان‌گونه که پیش از این نیز تکرار شد، لزوم تعیین دقیق سرعت بحرانی بسیار حائز اهمیت است و کم‌بودن آن از مقدار واقعی، سبب عقب‌زدگی دود در بالادست و زیاده‌بودن آن از مقدار واقعی، سبب ریزش دود در بخش پایین‌دست خواهد شد؛ بنابراین به‌منظور ارزیابی سرعت بحرانی در نواحی در حال توسعه و توسعه‌یافته، طول مورد نیاز در تونل کوچک‌مقیاس محاسبه و حریق در امتداد این طول در هر دو ناحیه در حال توسعه و توسعه‌یافته جابجا شده که سرعت بحرانی مرتبط با آن‌ها نیز محاسبه شده است.

طول ورودی مورد نیاز جهت تخمین فاصله توسعه‌یافتگی در جریان آشفته با استفاده از عدد رینولدز و بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید (نبهانی، ۱۳۹۱):

$$\frac{L_e}{D} = 4.4Re^{1/6} \quad (3-3)$$

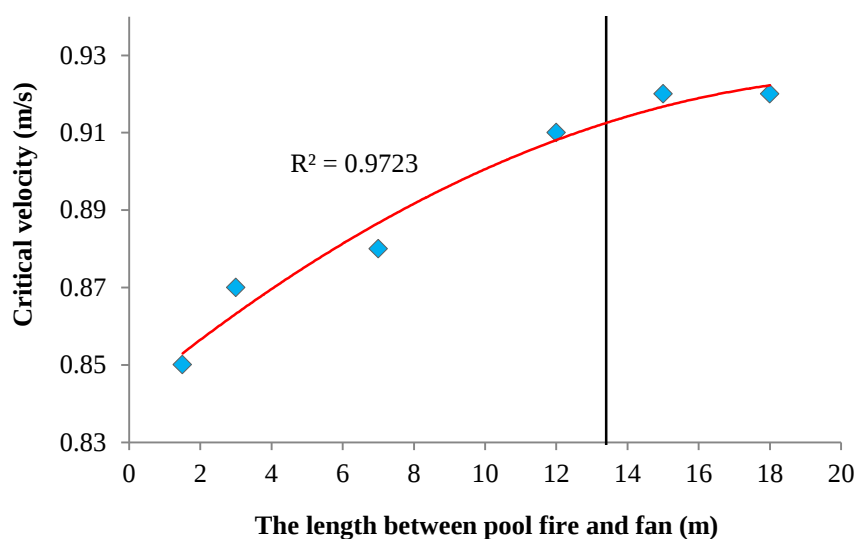
در این رابطه، L طول ورودی، D قطر دهانه به متر، Re عدد رینولدز است.

از سوی دیگر برای داشتن هر دو رژیم جریان هوا در امتداد تونل، طول ۷ متری در شبیه‌سازی FDS به انتهای تونل اصلی اضافه شده است. با این تفاسیر و بر اساس قطر تونل، میانگین سرعت جریان و عدد رینولدز متناسب با آن طول ورودی مورد نیاز، جهت داشتن جریان توسعه‌یافته، حدود ۱۳/۴ متر است. این طراحی در شکل ۳-۳۴ نشان داده شده است.



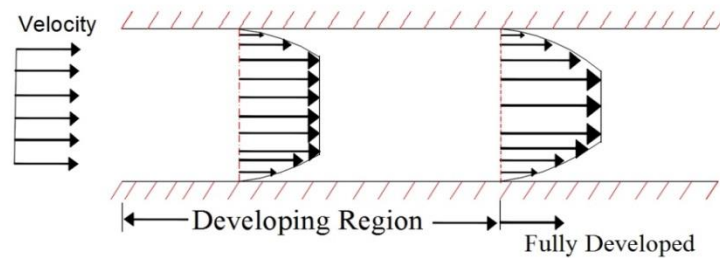
شکل ۳-۳۴: طرح تونل ساخته شده در FDS برای شبیه سازی دو رژیم جریان.

نتایج شبیه سازی برای جابجایی منبع حریق در راستای محور طولی تونل در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده، سرعت بحرانی در ناحیه توسعه یافته ثابت است.



شکل ۳-۳۵: تغییرات سرعت بحرانی با جابجایی طولی.

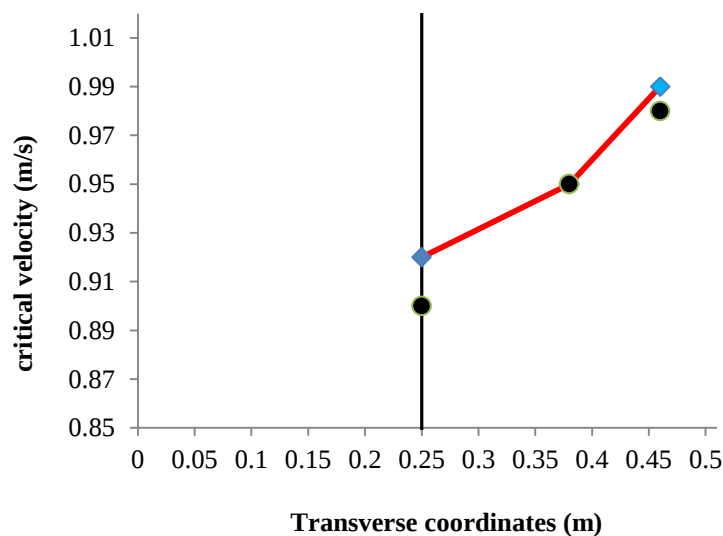
از طرفی، در ناحیه در حال توسعه، سرعت بحرانی با کاهش طول بین حوضچه حریق و محل فن کاهش می یابد. این نتیجه ناشی از تغییرات نیمرخ سرعت در ناحیه در حال توسعه می باشد که با تغییرات نیمرخ سرعت هوا، سرعت بحرانی نیز در حال تغییر است. تغییرات مذکور در شکل ۳-۳۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۶: تغییرات نیم‌رخ سرعت در جریان آشفته.

۳-۵-۷- تأثیر جابجایی عرضی بر سرعت بحرانی در تونل منحنی

در این بخش، اثر فاصله حوضچه حریق از دیواره بر سرعت بحرانی تحلیل شده است. در شکل ۳-۳۷ تغییرات سرعت بحرانی در FDS و مدل کوچک‌مقیاس تحت جابجایی عرضی حریق مقایسه شده است. این مقایسه بدین صورت انجام شده که حوضچه در مرکز تونل و در بخش انحنای آن قرار گرفته است و در خط عرضی جابجا می‌شود. با جابجایی حریق به سمت دیواره، سرعت بحرانی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته است.



شکل ۳-۳۷: تغییرات سرعت بحرانی با جابجایی عرضی حوضچه حریق.

اهمیت این بخش از تحقیق بسیار بالا است، زیرا تمامی مدل‌هایی که به منظور تخمین سرعت بحرانی توسعه داده شده‌اند در ارزیابی و تخمین حریق‌هایی که در خارج از خط مرکزی محور تونل واقع شده باشند یا در صورت وجود انحناء، توان تخمین صحیح را ندارند.

با بررسی هر یک از این مدل‌ها مشخص می‌شود که خطای تخمین بسیار بالاست که کارآمدی این مدل‌ها را تحت تأثیر خواهد گذاشت. به عنوان نمونه در جدول ۳-۵ نتایج سرعت بحرانی برای جابجایی عرضی حریق در تونل کوچک مقیاس نشان داده شده است. در این جدول نتایج حاصل از سرعت بحرانی به دست آمده از مدل‌های تخمین وو و باکر و مدل ونگ و همکارانش برای تونل کوچک مقیاس، همراه با نتایج تجربی، نشان‌دهنده میزان تفاوت آن‌هاست. این تفاوت بسیار چشم‌گیر بوده و عدم توانایی هر یک از این مدل‌ها را در تخمین صحیح نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵: مقایسه نتایج سرعت بحرانی در تونل کوچک مقیاس بر اساس مدل‌های مختلف.

Model or location	Critical Velocity (m/s)	
	CFD	Measured (m/s)
The center tunnel	0.92	0.90
Next to wall	0.99	0.98
Between the center and wall	0.95	0.95
Wu & Baker	0.38	
Weng et al.	0.44	

۳-۶- جمع‌بندی

در این فصل، در رابطه با شبیه‌سازی حریق از دو جنبه تجربی و عددی صحبت شد. در بخش اول شبیه‌سازی تجربی با رویکرد کوچک مقیاس توضیح داده شد و بیان شد که علت انتخاب شبیه‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس، کاهش هزینه‌ها و دقت قابل قبول در بین محققین است. سپس یک تونل انتخاب و مدل کوچک مقیاس آن بر مبنای روش مقیاس‌گذاری فرود ساخته شد و آزمایش حریق تونلی در آن به انجام رسید. در بخش بعد، شبیه‌سازی عددی این تونل نیز مهیا شد و بر اساس عدم محدودیت‌ها و توانایی کنترل و تغییر پارامترهای گوناگون، مطالعه دقیق‌تری از تحلیل جریان ناشی از حریق و سرعت بحرانی در سناریوهای مختلف مطرح گردید. به منظور صحت‌سنجی، برخی از داده‌های حاصل از پژوهش‌های عددی با نتایج تجربی حاصل از تونل کوچک مقیاس مقایسه شد و این قیاس بیانگر تطبیق مناسب نتایج بود. در فصل بعدی بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های این بخش، مدل نهایی تخمین سرعت بحرانی ارائه می‌شود.

فصل چهارم

ارائه‌ی مدل تخمین سرعت بحرانی

همان‌طور که پیش از این بیان شد، از سرعت بحرانی به‌عنوان یک اهرم ایمنی در حریق تونلی یاد می‌شود و تعیین دقیق این پارامتر بسیار حائز اهمیت است. در فصل دوم، کلیاتی در رابطه با حریق و اثر متقابل آن با سیستم تهویه ارائه شد. سپس در فصل سوم خلاصه‌ای از مجموعه پژوهش‌های انجام‌شده در این راستا بیان و مشخص شد که سرعت بحرانی در اکثر پژوهش‌های گذشته در تونل‌های مستقیم و با تکنیک آنالیز ابعادی به دست آمده است و البته مدل‌های تخمینی که برای این منظور ارائه شده است در شرایط واقعی تونل‌ها، تا حدی دور از واقعیت می‌باشد؛ زیرا به‌طور کلی، پارامترهای الزامی در یک مدل تخمین، گردآوری نشده‌اند. از سوی دیگر، این رویکرد که مدل تخمین شامل متغیرهای الزامی باشد و هم‌زمان، سادگی مدل تخمین با داشتن حداقل متغیر حفظ شود، در هیچ یک از مدل‌ها دیده نمی‌شود؛ بنابراین هدف اصلی این رساله در ارائه مدل تخمین بر مبنای پارامترهای ضروری و نزدیک‌شدن به واقعیت تا حد امکان است. در این راستا در فصل چهارم شبیه‌سازی‌های فیزیکی و عددی انجام شد. با استفاده از شبیه‌سازی فیزیکی، نتایج عددی صحت‌سنجی و بر اساس شبیه‌سازی عددی که تغییر پارامترها بدون محدودیت است، سناریوسازی شد. سناریوسازی شبیه‌سازی‌های عددی با رویکرد شناخت پارامترهای مؤثر و کلیدی و شناسایی نحوه تأثیر هر یک از پارامترها پایه‌ریزی شده است. هدف این فصل ارائه مدل تخمین سرعت بحرانی بر اساس پارامترهای مطالعه‌شده و مجموعه داده‌های به دست‌آمده از آن‌هاست؛ از این‌رو در ادامه، ابتدا پارامترهای مؤثر بر سرعت بحرانی بر اساس پژوهش‌های گذشته و شرایط بررسی‌شده در تونل‌های واقعی دسته‌بندی و انتخاب می‌شود و سپس در بخش بعد با استفاده از نتایج شبیه‌سازی فصل چهارم تأثیر هر یک مشخص خواهد شد. در مرحله بعد، مدل تخمین بر اساس رگرسیون و روش هوشمند شبکه عصبی ارائه می‌شود. در انتها نیز نتایج مدل تخمین نهایی برای دو حریق تونلی، با نتایج واقعی آن مقایسه خواهد شد.

۴-۲- عوامل مؤثر بر سرعت بحرانی

تخمین سرعت بحرانی، فرایندی پیچیده و مستلزم ارزیابی جوانب زیادی از تونل و حریق تونلی است؛ به عبارت دیگر، هر یک از حوادث حریق در تونل یک سناریوی پیچیده و ویژه است. در هر حریق تونلی عوامل

زیادی دخالت دارند و هر کدام از این عوامل می‌توانند سرعت بحرانی مورد نیاز برای آن سناریو را به شدت تحت تأثیر قرار دهند.

همان‌گونه که در فصل سوم بیان شد محققین متعددی جوانب مختلفی را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده‌اند. این تحلیل‌ها در دو بخش تقسیم‌بندی شد. این دو بخش شامل مدل‌های تخمین فرود و مدل‌های بی‌بعد بود که در هر یک از این مدل‌ها برای تخمین سرعت بحرانی تعدادی از پارامترها دخالت داده شده‌اند. نکته مهمی که در مدل‌های تخمین پیشین وجود دارد این است که تمامی این مدل‌ها برای رفع نیاز به تخمین سرعت بحرانی در یک کشور ارائه نشده‌اند و تنها بر اساس شناسایی و وجود یک پارامتر جدید، مدل تخمین جدیدی ارائه شده است. این مبحث اشاره به این موضوع دارد که مدل تخمین سرعت بحرانی را باید با توجه به سه مورد زیر تعیین و ارائه کرد که در پژوهش‌های گذشته دیده نمی‌شود:

- انتخاب پارامترهای کاربردی و مهم در ارائه مدل نهایی.
- حفظ سادگی و در عین حال چابک‌بودن مدل نهایی.
- دخالت‌دادن بیشترین تعداد پارامتر کلیدی در مدل نهایی تخمین به‌منظور نزدیک‌شدن هر چه بیشتر به واقعیت.

با این تفاسیر، این نکته مشخص می‌شود که بسیاری از محققین پارامتر جدیدی را در تخمین سرعت بحرانی شناسایی و معرفی کرده‌اند اما از پارامتر معرفی‌شده در یک مدل تخمین مناسب، استفاده نشده است و تمامی پژوهش‌ها به صورت پراکنده می‌باشد. به‌عنوان مثال، جابه‌جایی طولی حریق در امتداد تونل و نحوه تأثیر آن در سرعت بحرانی در هیچ یک از پژوهش‌ها بررسی نشده است یا تونل دارای پیچ‌وخم در اکثر پژوهش‌های پیشین بررسی نشده است در حالی که اکثر تونل‌ها در واقعیت دارای انحنا در مسیر می‌باشند و این انحنا می‌تواند به شدت سرعت بحرانی را دستخوش تغییر کند و در بررسی‌هایی که انحنا مورد ارزیابی قرار گرفته است تنها با تأثیردادن آن به‌طور جداگانه، به ارائه نتایج بسنده شده است و تأثیر هم‌زمان این عامل با سایر عوامل مهم و مؤثر ملاک قرار نگرفته است. به‌طور کلی، پارامترهای شناسایی‌شده و بکاررفته در

بحث سرعت بحرانی که در پژوهش‌های گذشته و بر اساس تحقیق پیش‌رو بررسی شده‌اند به شرح زیر قابل دسته‌بندی می‌باشند:

الف- پارامترهای مرتبط با عوامل هندسی

- طول تونل
- سطح مقطع تونل (همچنین طول و عرض به صورت جداگانه)
- جابه‌جایی عرضی
- شیب تونل
- انحنای تونل

ب- پارامترهای مرتبط با حریق

- نرخ گرمای رها شده HRR
- نوع سوخت (مایع یا جامد)
- طول شعله
- تابش
- آتش‌سوزی چندگانه در تونل

ج- پارامترهای مرتبط با جریان هوا

- فن‌های اضافی در نقاط تخلیه تعبیه‌شده در سقف تونل
- نوع سیستم تهویه
- انسداد جریان هوا
- تأثیر تهویه طبیعی

بنابراین با بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش‌های پیشین و با در نظر گرفتن پارامترهای جدید، تعداد ۱۴ پارامتر به‌عنوان ورودی‌های مدل، قابل معرفی هستند. از این تعداد، پارامترهای انحنای تونل و تأثیر طول تونل به‌عنوان پارامترهای جدید شناسایی شده‌اند.

به‌منظور ارائه مدل تخمین ضروری است که برای حفظ چابک‌بودن مدل، تعدادی از این پارامترها حذف شود و با سایر پارامترها، مدل تخمین ارائه شود؛ از این‌رو برای حذف پارامترهای غیرضروری ابتدا به این اصل توجه شده است که تونل‌های کشور بیشترین سازگاری را با کدام‌یک از پارامترها دارا هستند. به‌عنوان مثال در بخش (الف) پارامتر شیب از جمله پارامترهای غیرضروری است؛ زیرا اکثر تونل‌های کشور دارای شیب حداقلی برای خروج آب‌های جاری از محیط تونل‌ها می‌باشند و در این تونل‌ها از شیب‌های زیاد که منجر به تغییرات سیالاتی محسوس جریان هوا می‌شود در طراحی و اجرا استفاده نشده است. در نتیجه در بخش (الف) از مجموع ۵ پارامتر تعداد ۴ پارامتر به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شده‌اند. باید توجه داشت که اکثر مدل‌های پیشین نیز به عوامل هندسی در تخمین سرعت بحرانی توجه ویژه‌ای داشته‌اند (البته مدل‌های تخمین مطرح‌شده به‌صورت گردآوری پارامترها نبوده و حالت پراکنده دارند) که نشان‌دهنده اهمیت این سری از پارامترها می‌باشد.

در بخش (ب) نیز نوع سوخت حذف شده است زیرا با در نظر گرفتن این‌که سوخت مایع نسبت به جامد (به‌عنوان مثال چوب) مخاطره‌های بالاتری را دارد می‌توان درک کرد که احتمال گسترش حریق و زمان مورد نیاز برای گرگرفتگی در نوع سوخت مایع به مراتب بیشتر از سوخت جامد است؛ از این‌رو با در نظر گرفتن نوع سوخت مایع می‌توان نتایج قابل قبولی را از مدل تخمین به دست آورد. نرخ گرمای رها شده HRR و تابش ناشی از حریق نیز با یکدیگر ارتباط کاملاً مستقیم و خطی دارند، از این‌رو افزایش HRR و تأثیر آن بر مدل تخمین همچون تأثیر تابش خواهد بود و از سوی دیگر اهمیت HRR همرفتی در سرعت بحرانی از تابش بسیار مهم‌تر است. بنابراین به‌منظور چابک‌کردن معادله نهایی تابش نیز حذف شده است؛ بنابراین در بخش (ب) پارامتر HRR به‌عنوان نماینده سایر پارامترها به‌عنوان ورودی انتخاب شده است.

اصل دیگری که در حذف پارامترها از آن استفاده شده است توجه به این امر است که برخی از پارامترها نیز از حوزه اهداف این رساله خارج می‌باشند. مثلاً در بخش (ج) پارامتر نوع سیستم تهویه و تأثیر آن در تخمین سرعت بحرانی و نقاط تخلیه موجود در سقف حذف شده است؛ زیرا هدف مدل تخمینی این پژوهش بر مبنای سیستم تهویه طولی است.

با توجه به توضیح‌های ذکر شده، پارامترهای زیر به عنوان پارامترهای نهایی مدل تخمین سرعت بحرانی در این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند:

- طول تونل (L)
- سطح مقطع تونل (c-s)
- جابجایی عرضی (f-l)
- انحنای تونل (t-o-t)
- HRR (s)

با مشخص شدن تعداد و نوع پارامترهای ورودی، در ادامه به بررسی اجمالی تأثیر هر یک از این پارامترها بر تخمین سرعت بحرانی پرداخته می‌شود. این نتایج بر مبنای پژوهش‌های شبیه‌سازی‌های عددی موجود در فصل چهارم جمع‌آوری و تکرار شده است.

۳-۴- تأثیر پارامترهای منتخب بر سرعت بحرانی

بر مبنای پژوهش‌های شبیه‌سازی عددی که در آن تغییر پارامتری و نوع سناریوی شبیه‌سازی نامحدود است می‌توان به جمع‌بندی مناسبی در این حوزه دست یافت. در ادامه به ترتیب، تأثیر هر یک از پارامترها به صورت اجمالی جمع‌بندی می‌شوند.

۳-۴-۱- تأثیر طول تونل

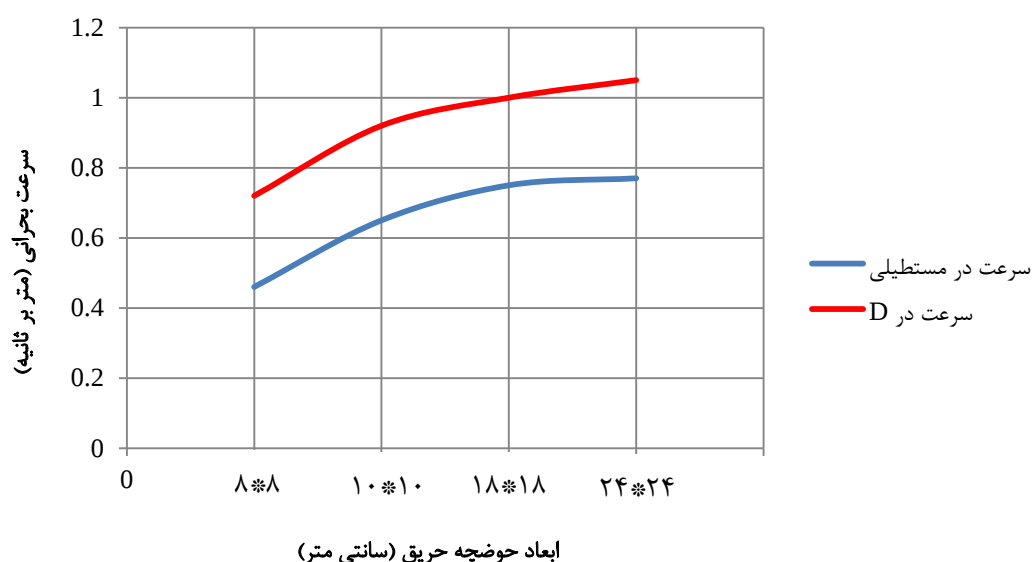
این پارامتر به عنوان یک متغیر در تخمین دقیق‌تر سرعت بحرانی عمل می‌کند؛ زیرا تمامی محققین فرض جریان کاملاً توسعه‌یافته را در تحقیق‌های خود لحاظ کرده‌اند؛ اما با کمی درنگ در وقایع حریق تونلی مشخص می‌شود که حوادث حریق در هر نقطه امکان رخداد را دارا هستند؛ به عبارت دیگر پارامتر طول تونل

می‌تواند خود را بدین گونه نشان دهد که حریق می‌تواند در دو بخش رخ دهد، بدین مفهوم که طول تونل به دو بخش تقسیم می‌شود و حریق در هر بخش از آن نیازمند سرعت بحرانی مشخصی است. این موضوع در فصل سوم و بخش ۳-۵-۸ بررسی شده است.

این دو بخش، نواحی با جریان در حال توسعه و جریان کاملاً توسعه یافته است. طبق نتایج آن، نزدیک شدن منبع حریق به فن سبب کاهش سرعت بحرانی مورد نیاز خواهد شد.

۴-۳-۲- تأثیر سطح مقطع تونل

سطح مقطع تونل تأثیر قابل توجهی بر سرعت بحرانی دارد. در این رساله با توجه به تونل‌های کشور دو سطح مقطع D شکل و مستطیلی به عنوان مبنا در نظر گرفته شده‌اند. طبق نتایج شبیه‌سازی، با ثابت نگه داشتن سایر عوامل، سرعت بحرانی مورد نیاز در سطح مقطع D بیشتر از سطح مقطع مستطیلی است. در شکل ۴-۱ مقایسه برخی از نتایج به دست آمده برای دو سطح مقطع مذکور نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است سرعت بحرانی مورد نیاز برای سطح مقطع D شکل بیشتر از سطح مقطع مستطیلی است.

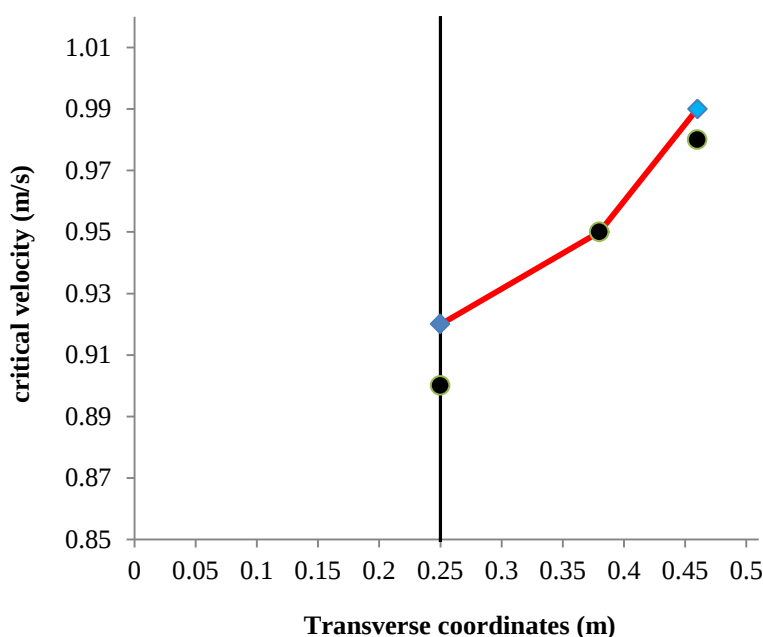


شکل ۴-۱: مقایسه سرعت بحرانی در سطح مقطع D شکل و مستطیلی با تغییر ابعاد حوضچه.

۴-۳-۳- تأثیر جابجایی عرضی

این پارامتر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است؛ زیرا همان گونه که در فصل چهارم اشاره شد، تمامی مدل‌ها و تحقیق‌هایی که به منظور تخمین سرعت بحرانی توسعه داده شده‌اند در ارزیابی و تخمین حریق‌هایی که در خارج از خط مرکزی محور تونل واقع شده باشند، توان تخمین صحیح را ندارند.

با ارزیابی این مدل‌ها، خطای چشم‌گیری در تخمین آن‌ها مشخص می‌شود که سبب کاهش کارآمدی این مدل‌ها خواهد شد. نتایج سرعت بحرانی برای جابجایی عرضی حریق در تونل کوچک مقیاس در شکل ۴-۲ مجدداً نشان داده شده است که نشان‌دهنده اهمیت محل عرضی حریق در حین رخداد آتش‌سوزی است و با تغییر محل سرعت بحرانی به صورت چشم‌گیر تغییر می‌کند.



شکل ۴-۲: تغییرات سرعت بحرانی با جابجایی عرضی حوضه حریق.

۴-۳-۴- تأثیر انحنای تونل

انحنا و پیچ‌وخم در تمامی تونل‌های واقعی دیده می‌شود و به دلیل شرایط محیطی و مهندسی معمولاً تونل‌ها دارای انحنای مختلف با شعاع‌های انحنای متفاوت هستند؛ بنابراین این پارامتر، یکی از شاخص‌های کلیدی در تعیین سرعت بحرانی خواهد بود و به دلیل تغییر جریان سیال، نتایج حاصل از تونل‌های منحنی با تونل مستقیم متفاوت خواهد بود. همان‌طور که در فصل چهارم بررسی شد در صورت داشتن شرایط برابر،

سرعت بحرانی برای تونل‌های منحنی بیشتر از تونل مستقیم خواهد بود. با توجه به آیین‌نامه هندسی راه، انحنای تونل کوچک‌مقیاس در فصل سوم به گونه‌ای است که تقریباً بیشترین تأثیر ممکن را از منظر انحنای هندسی خواهد داشت.

۴-۳-۵- تأثیر نرخ گرمای رها شده HRR

اهمیت پارامتر نرخ گرمای رها شده HRR در طراحی ایمنی و در مبحث سرعت بحرانی، طبق فعالیت محققین آشکار است و اکثر محققین این پارامتر را عنصر کلیدی می‌نامند که می‌تواند به‌عنوان پارامتر اصلی در اکثر مدل‌های تخمین سرعت بحرانی باشد. طبق شبیه‌سازی‌های عددی و فیزیکی فصل چهارم مشخص شد که در تونل‌های مستقیم یا منحنی، افزایش نرخ گرمای رها شده HRR سبب افزایش مقدار سرعت بحرانی خواهد شد که این امر تنها در گستره مشخصی پابرجاست و در خارج از این محدوده، سرعت بحرانی مستقل از HRR خواهد بود.

۴-۴- تخمین سرعت بحرانی

برآورد یا تخمین به روشی گفته می‌شود که برای پیش‌بینی ویژگی‌های یک گروه با استفاده از تقریب استفاده می‌شود. تخمین معمولاً زمانی استفاده می‌شود که ورودی‌ها یا نمونه‌های به دست‌آمده کامل نباشند یا عدم قطعیت در تعداد آن‌ها باشد یا ثبات وضعیت وجود نداشته باشد (نعمت‌الهی، ۱۳۹۵).

در این پژوهش، تعدادی از سناریوهای بروز حریق در تونل، بر مبنای پارامترهای مختلف و شرایط متفاوت شبیه‌سازی شده است که قاعده‌تاً تمامی حالت‌ها را پوشش نخواهد داد؛ از این‌رو برای کنترل شرایط ناایمن و مسائل ایمنی نیاز به مدل تخمینی است که بتواند سرعت بحرانی را برای سناریوهای ممکن و بر اساس پارامترهای تحت مطالعه برآورد کند؛ بنابراین در ادامه با بکارگیری روش‌های تحلیل آماری (رگرسیون) و روش شبکه عصبی، چند مدل تخمین سرعت بحرانی ارائه شده است.

۴-۴-۱- تخمین سرعت بحرانی با استفاده از رگرسیون

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در اغلب ارزیابی‌ها نیاز به پیش‌بینی یک متغیر وابسته از روی متغیرهای مستقل وجود دارد. چنین مسائلی را با استفاده از مسائل برگشت یا رگرسیون پاسخ می‌دهند (نعمت‌الهی،

(۱۳۹۵). از آن جایی که تعداد متغیرهای مستقل در این تحقیق بیش از یک پارامتر است از رگرسیون چندگانه استفاده خواهد شد، رگرسیون با چند متغیر مستقل به عنوان رگرسیون چندگانه شناخته می شود. رگرسیون چندگانه بر اساس نحوه عملکرد به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می شود. در رگرسیون چندگانه خطی، هر متغیر مستقل یک ضریب دارد و ارتباط بین آن ها و متغیر وابسته به صورت زیر خواهد بود:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (۱-۴)$$

در رگرسیون غیرخطی مدل های مختلف و گسترده ای وجود دارد و به منظور تحلیل های مختلف بر روی داده های کیفی و کمی به شکل های متفاوتی به کار می روند. از جمله این مدل ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- رگرسیون گاوس
- رگرسیون لاسو
- رگرسیون لگاریتمی
- رگرسیون پواسون
- رگرسیون شبه پواسون و غیره

در ادامه ابتدا مدل رگرسیون چندگانه خطی و سپس چندگانه غیرخطی بررسی شده است. البته استفاده از مدل رگرسیون پیش شرط هایی را دارد که پس از ارائه مدل رگرسیون چندگانه خطی به تفصیل ارائه می شود.

برای ادامه کار، چهار متغیر سطح مقطع تونل، جابه جایی عرضی، انحنای تونل و نرخ گرمای رها شده HRR به عنوان پارامترهای ورودی مدل های تخمین در نظر گرفته شده اند. متغیر طول تونل از روند محاسبات و مدل تخمین اولیه حذف شده است و در بخش بعدی روند تأثیرگذاری آن بر مدل نهایی ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که علت عدم تأثیر متغیر طول تونل در رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی به دو دلیل

است. اول آن که تأثیر این متغیر به گونه‌ای است که دو حالت مجزا را ایجاد می‌کند و در حالتی که شرایط کاملاً توسعه‌یافته حاکم باشد از چرخه محاسبات حذف خواهد شد.

دوم آن که در صورتی که نیاز به دخالت این متغیر باشد (شرایط در حال توسعه حاکم است)، در چنین وضعیتی تعداد مدل‌های نیازمند شبیه‌سازی کامپیوتری بسیار زیاد خواهد بود که از زمان و هزینه این رساله خارج است. بنابراین تعدادی از حالت‌های تأثیرگذار آن شبیه‌سازی شده و براساس نتایج آن‌ها، تأثیر این متغیر اعمال شده است.

الف- مدل رگرسیون چندگانه خطی

برای ساخت مدل رگرسیونی از نرم‌افزار تجزیه و تحلیل آماری Xlstat استفاده شده است. در این نرم‌افزار با سطح معناداری ۰/۰۵ و با ضریب تعیین ۰/۸۴ معادله ۲-۴ به دست آمده است.

$$\text{Velocity} = 0.46 + 0.14 \times t-o-t + 0.28 \times c-s + 1.84E-02 \times f-l + 0.011 \times s \quad (2-4)$$

علاوه بر این از مجموعه داده‌های ۸۴ تایی، تعداد ۷۲ داده به‌عنوان ورودی اولیه و داده‌های آموزشی استفاده شده است و تعداد ۱۲ داده نیز به‌صورت تصادفی از مجموعه اولیه به‌عنوان داده‌های آزمون انتخاب شده‌اند. در جدول ۱-۴ تعدادی از مجموعه داده‌های ۸۴ تایی نشان داده شده است. یکی از شروط مهم در استفاده از رگرسیون، تحلیل و تفسیر نمودار باقی‌مانده‌ها بر اساس پارامتر وابسته است که به‌منظور پذیرش نتایج رگرسیون بایستی خطا، متغیری تصادفی با توزیع نرمال باشد. نرمال بودن آن در بخش بعدی بررسی شده است؛ اما در نمودارهای شکل‌های ۳-۴ و ۴-۴ می‌توان وضعیت تصادفی بودن باقی‌مانده‌ها را بررسی کرد و در صورت تصادفی بودن توزیع آن، از برقرار بودن یکی از پیش‌شرط‌های استفاده از رگرسیون اطمینان حاصل کرد.

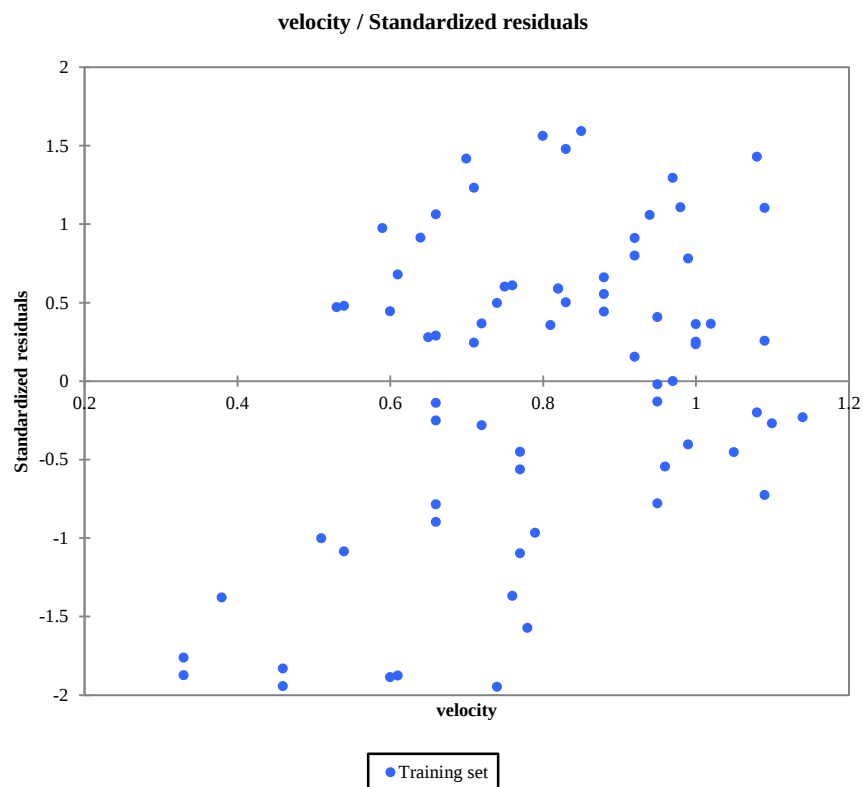
جدول ۴-۱: بخشی از داده‌های ۸۴ تایی.

نوع تونل	سطح مقطع	محل حریق	HRR (KW)	سرعت بحرانی (m/s)
مستقیم	D	مرکز	۱/۶	۰/۶۰
مستقیم	D	مرکز	۳/۱	۰/۸۲
مستقیم	R	دیواره	۱۰	۰/۷۰
منحنی	D	مرکز	۳/۱	۰/۹۲
منحنی	R	مرکز	۲۰	۰/۷۷
منحنی	D	دیواره	۳/۱	۰/۹۹

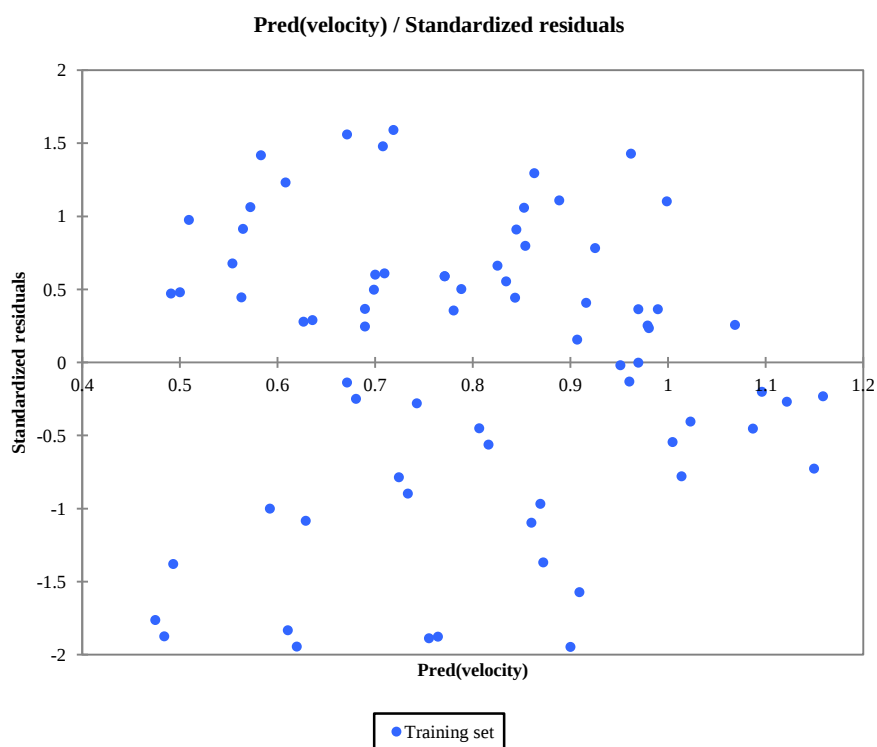
در نمودار شکل ۴-۳، باقی‌مانده‌ها بر اساس سرعت برای داده‌های آموزشی نشان داده شده است و در نمودار شکل ۴-۴ همین نمودار برای داده‌های پیش‌بینی شده بر اساس رگرسیون چندگانه خطی مبتنی بر معادله ۴-۲ نشان داده شده است.

همان‌گونه که از نمودار برمی‌آید هیچ‌گونه روندی در توزیع داده‌ها دیده نمی‌شود و فرض اولیه مورد نیاز در مورد این داده‌ها صدق می‌نماید.

درباره‌ی داده‌های نمودار شکل ۴-۴ نیز به خوبی قابل مشاهده است که هیچ‌گونه روندی برای باقی‌مانده‌های مربوط به داده‌های پیش‌بینی نیز قابل برداشت نیست.



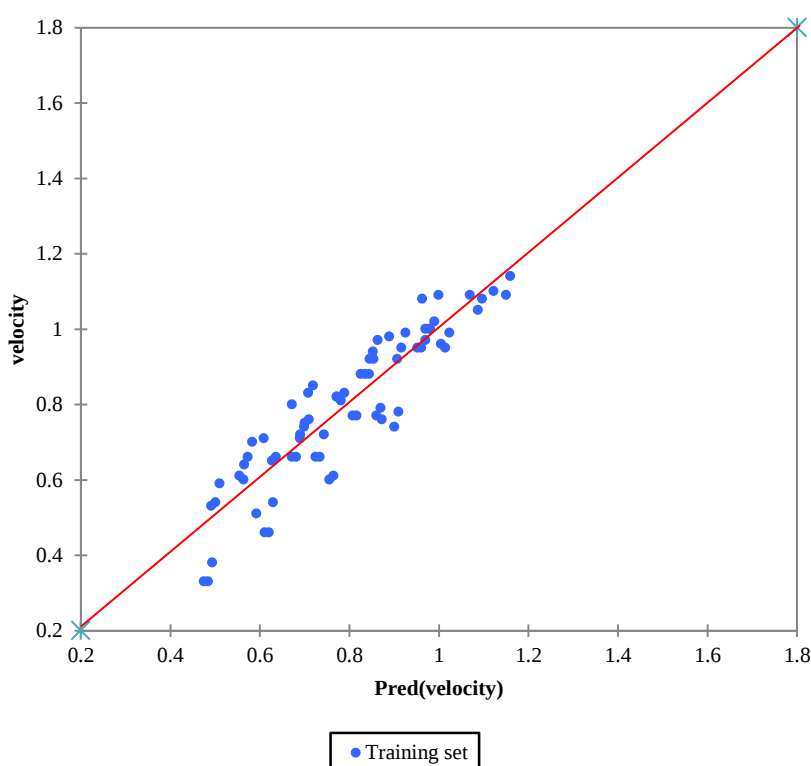
شکل ۴-۳: نمودار سرعت بحرانی نسبت به باقی‌مانده‌ها برای داده‌های آموزشی.



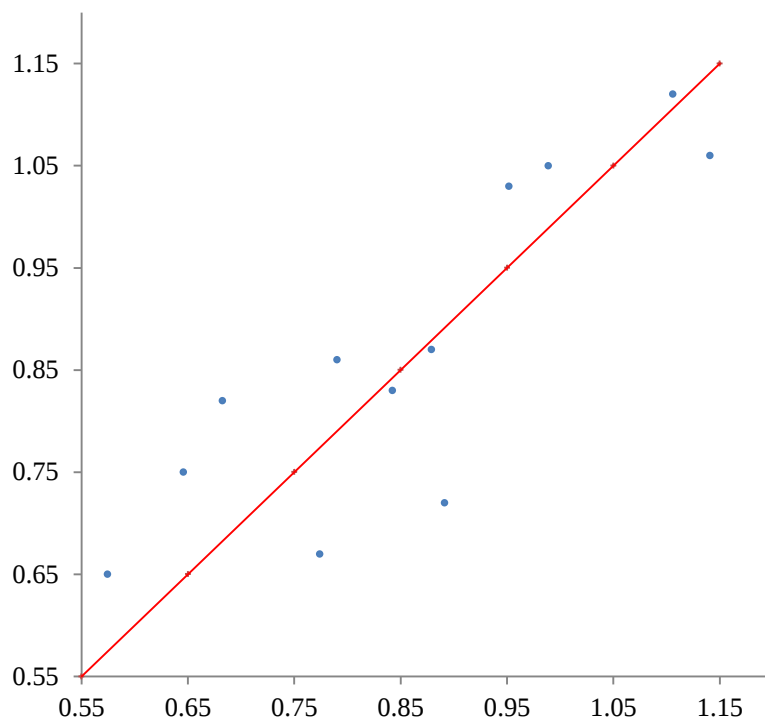
شکل ۴-۴: نمودار سرعت بحرانی نسبت به باقی‌مانده‌های پیش‌بینی شده از معادله برای داده‌های آموزشی.

نمودارهای دیگری که در تحلیل رگرسیون از اهمیت برخوردار هستند، نمودار بررسی تطبیق نتایج مدل برای داده‌های آزمون است که هر چه این دو به نیمساز ربع اول نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی مدل است. در شکل ۴-۵ نمودار تطبیق داده‌های حاصل از مدل و نتایج واقعی برای داده‌های آموزشی نشان داده شده است.

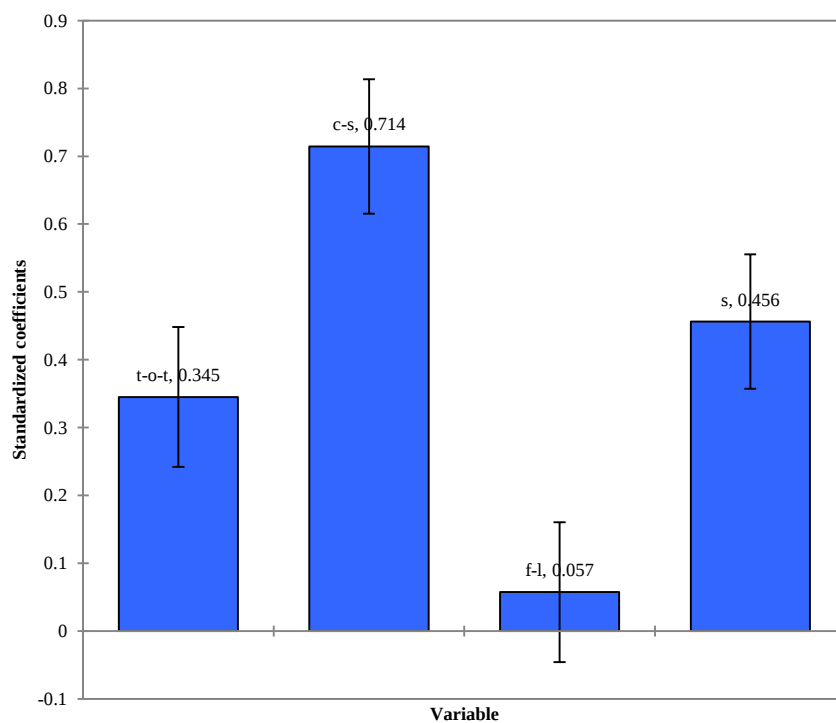
همان‌گونه که از این نمودار مشخص است داده‌ها در نزدیکی این نیمساز واقع شده‌اند و می‌توان از کارایی مدل خطی رضایت نسبی داشت. در شکل ۴-۶ نیز همین فرایند برای داده‌های آزمون انجام شده است. در نمودار شکل ۴-۷ اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل نسبت به متغیر وابسته در مدل رگرسیون چندگانه خطی نشان داده شده است. در این نمودار مشخص است که سطح مقطع تونل از نظر مستطیلی یا D شکل بودن از بیشترین اهمیت برخوردار است و تغییر در آن بیشترین تأثیر را خواهد داشت. سپس HRR یا سایز حریق بیشترین تأثیر را بر مدل می‌گذارد. کم‌ترین تأثیر نیز از متغیر محل عرضی حریق بر مدل اعمال می‌شود.



شکل ۴-۵: تطبیق داده‌های حاصل از پیش‌بینی و نتایج واقعی برای داده‌های آموزشی.



شکل ۴-۶: تطبیق داده‌های حاصل از پیش‌بینی و نتایج واقعی برای داده‌های آزمون.



شکل ۴-۷: اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل در مدل رگرسیون چندگانه خطی.

در کاربرد مدل‌های رگرسیون پیش‌شرط‌هایی وجود دارد که در صورت برقراربودن این پیش‌فرض‌ها، مدل رگرسیون به دست‌آمده قابل استفاده است. عدم برقراری هر یک از این فرضیات ممکن است باعث ناکارایی مدل و گمراه‌کننده بودن نتایج حاصل از آن شود. مهم‌ترین این فرضیات عبارتند از: (هرندی و همکاران، ۱۳۸۴)

- استقلال متغیرهای ورودی مدل برقرار باشد.
 - متغیرهای مستقل و باقی‌مانده‌ها همبسته نباشند و بین باقی‌مانده‌ها همبستگی وجود نداشته باشد.
 - باقی‌مانده‌ها دارای امید ریاضی صفر و توزیع نرمال باشند.
- به‌منظور بررسی استقلال متغیرهای ورودی مدل از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. البته در اکثر موارد هر یک از این تکنیک‌ها، تأییدکننده روش‌های دیگر است و می‌توان به‌منظور ارزیابی استقلال پارامترها از یکدیگر، یک روش استفاده شود. یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها، استفاده از معیار میزان تحمل^۱ و عامل تورم واریانس^۲ است. در صورتی که میزان تحمل کمتر از ۰/۱ و عامل تورم واریانس بیشتر از ۱۰ باشد، وجود همبستگی بین متغیرهای مستقل حتمی است اما در غیر این صورت شرط استقلال بین متغیرها پذیرفته می‌شود (هرندی و همکاران، ۱۳۸۴). در این مدل بر اساس داده‌های اولیه نتایج جدول ۴-۲ به دست آمده است. همان‌گونه که مشخص است شرط استقلال بین پارامترها برقرار می‌باشد.

جدول ۴-۲: نتایج بررسی همبستگی متغیرها.

متغیر	HRR	جابه‌جایی عرضی	سطح مقطع تونل	میزان انحنای تونل
میزان تحمل	0.439	0.903	0.243	0.552
عامل تورم واریانس	2.276	1.107	4.113	1.813

برای بررسی شرط دوم از آزمون دوربین-واتسون استفاده می‌شود (هرندی و همکاران، ۱۳۸۴). مقدار این آزمون از ۰ تا ۴ است. بدین منظور باید نتیجه حاصل از آزمون را با نتایج به دست‌آمده از جدول دوربین-واتسون و تعداد متغیرها و تعداد دیده‌ها مقایسه کرد که حاصل این قیاس پاسخی برای بررسی

¹ Tolerance

² Variance Inflation Factor (VIF)

استقلال باقی‌مانده‌ها خواهد بود. طبق این آزمون، دو فرضیه اولیه برای آن در نظر گرفته شده است که شامل دو مورد زیر است:

- فرض H_0 : عدم وجود همبستگی باقیمانده‌ها

- فرض H_1 : وجود همبستگی باقیمانده‌ها

برای تعیین نتیجه باید با توجه به تعداد دیده‌ها و تعداد ضرایب مدل رگرسیونی به استثنای عرض از مبدأ مقادیر D_u (کران بالا) و D_l (کران پایین) را با استفاده از جدول دوربین-واتسون به دست آورد و سپس بر اساس شکل ۴-۸ تصمیم‌گیری شود (هرندی و همکاران، ۱۳۸۴).

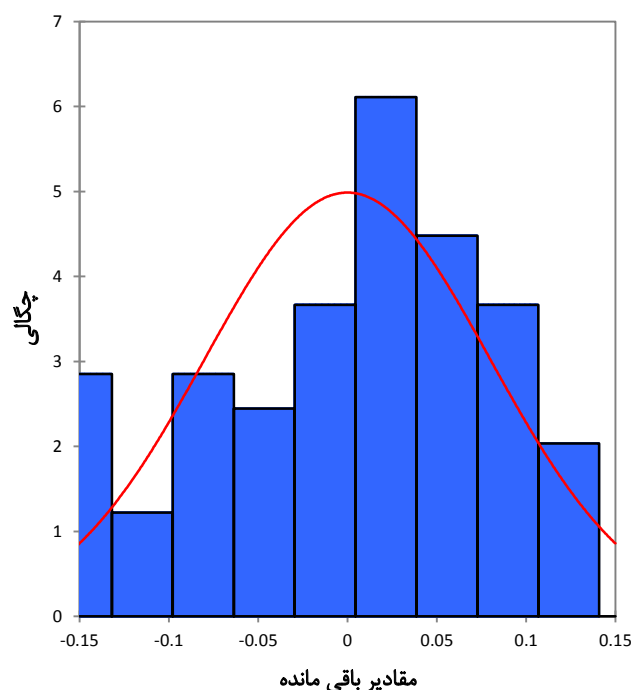
همبستگی منفی (رد H_0)	بدون نتیجه	بدون همبستگی پذیرش H_0	بدون نتیجه	همبستگی مثبت (رد H_0)
4	$4-D_l$	D_u	D_l	صفر

شکل ۴-۸: نمودار تصمیم‌گیری وابستگی یا عدم وابستگی باقی‌مانده‌ها (هرندی و همکاران، ۱۳۸۴).

در مورد این پژوهش با توجه به تعداد چهار متغیر ورودی و تعداد دیده‌های بکاررفته در طراحی مدل، مقدار کران بالا $1/74$ و کران پایین $1/51$ و نتیجه حاصل از آزمون دوربین-واتسون نیز برابر با ۲ در سطح معناداری $0/05$ بدست آمد. در نتیجه، پاسخ آزمون در بخش $D_u < 2 < 4-D_u$ قرار خواهد گرفت؛ بنابراین فرض H_0 پذیرفته خواهد شد و این پیش‌فرض برقرار می‌باشد.

در رابطه با داده‌های موجود، امید ریاضی باقی‌مانده‌ها برابر با صفر می‌باشد و در شکل ۴-۹ نمودار پله‌ای باقی‌مانده‌ها نشان داده شده است.

البته در سطح معناداری $0/05$ توزیع نرمال بر روی داده‌های به دست‌آمده از مقادیر باقی‌مانده حاصل از رگرسیون خطی تطبیق داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است این مقادیر تقریباً از توزیع نرمال پیروی می‌نمایند و این پیش‌فرض نیز برقرار است.



شکل ۴-۹: نمودار پله‌ای مقادیر باقی مانده.

ب- مدل رگرسیون چندگانه غیرخطی

رگرسیون غیرخطی یک روش آماری است که جهت انطباق توابع غیرخطی بر روی داده‌های جمع‌آوری شده، استفاده می‌شود. هدف از این روش، برازش تصادفی یکی از توابع غیرخطی موجود بر داده‌ها، به منظور رسیدن به حداکثر ضریب تعیین است. همان گونه که پیش از این بیان شد، رگرسیون غیرخطی انواع متفاوتی دارد که می‌توان به مدل‌های درجه دو، درجه سه، درجه چهار، لگاریتمی و غیره اشاره کرد. در جدول ۳-۴ مقایسه تعدادی از مدل‌های برازش شده بر داده‌های موجود نشان داده شده است:

جدول ۳-۴: مقایسه ضریب تعیین مدل‌های مختلف غیرخطی.

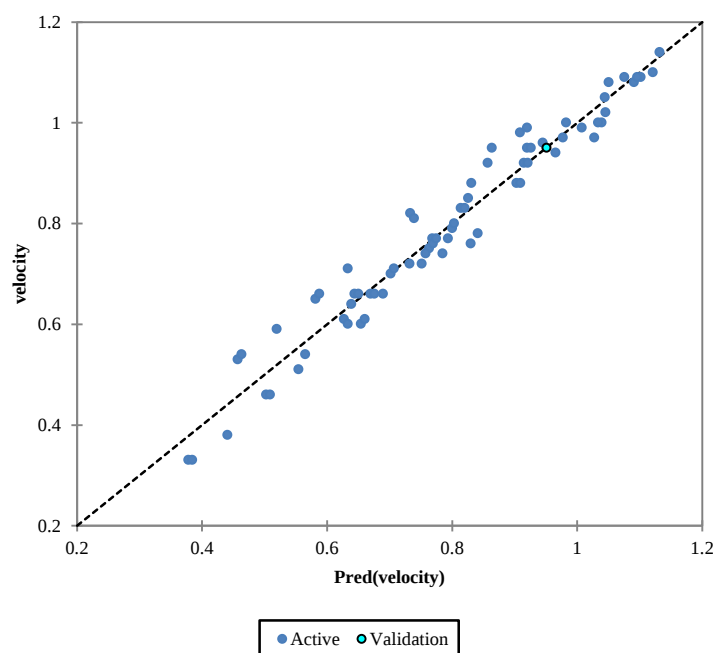
مدل غیرخطی	ضریب تعیین مدل (R^2)
درجه دو	۰/۹۳
درجه سه	۰/۹۵

همان گونه که از جدول ۳-۴ مشخص است، ضریب تعیین هر دو مدل، مقادیر قابل قبول و بالایی است و مدل غیرخطی درجه ۳ به عنوان مدل نهایی رگرسیون غیرخطی انتخاب شده است. در ادامه برخی از نتایج حاصل

از مدل درجه سه نشان داده شده می‌شود. در این مدل نیز ۷۲ داده به‌عنوان ورودی اولیه انتخاب شده است. معادله ۳-۴ به‌عنوان معادله نهایی درجه سوم با استفاده از نرم‌افزار Xlstat به دست آمده است.

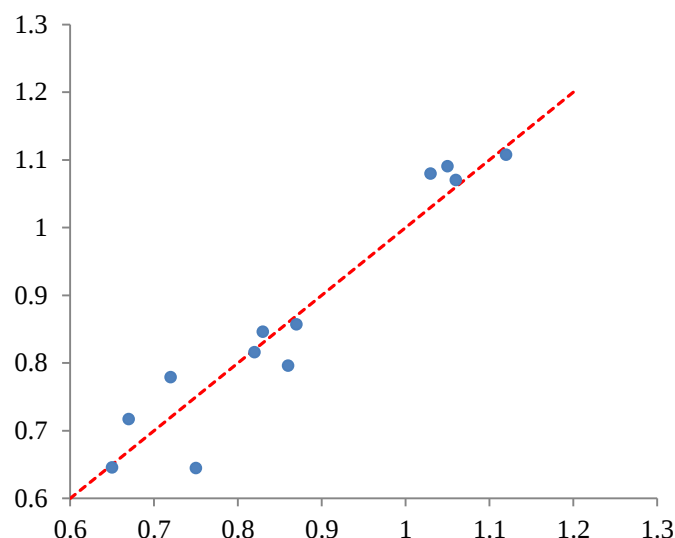
$$\text{Velocity} = 0.28 + 0.12 * t\text{-o-t} + 0.28 * c\text{-s} - 0.02 * f\text{-l} + 7.09\text{E-}02 * s + 5.71\text{E-}02 * f\text{-l}^2 - 4.30\text{E-}03 * s^2 + 0.03 * f\text{-l}^3 + 8.37\text{E-}05 * s^3 \quad (3-4)$$

در شکل ۴-۱۰، نتایج مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در تخمین سرعت بحرانی با استفاده از معادله ۳-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۴-۱۰ مشهود است، نتایج به نیمساز ربع اول نزدیک است و گویای دقت معادله در تخمین سرعت بحرانی است.



شکل ۴-۱۰: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در تخمین سرعت بحرانی.

در شکل ۴-۱۱ نیز نتایج حاصل از تخمین مدل از داده‌های آزمون با مقادیر واقعی برای رگرسیون غیرخطی درجه سه نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که مدل با دقت بسیار مناسبی می‌تواند سرعت بحرانی را در شرایط مختلف تخمین بزند.



شکل ۱۱-۴: مقایسه نتایج به دست آمده از مدل غیرخطی با مقادیر واقعی برای داده‌های آزمون.

۴-۴-۲- تخمین سرعت بحرانی با استفاده از شبکه عصبی

با افزایش روزافزون حافظه‌ها و سرعت رایانه‌ها، پیشرفت کاربردی سیستم‌های دینامیکی هوشمند مدل آزاد که مبتنی بر داده‌های تجربی است به خوبی مشهود است (Dowd and Sarac, 1994). شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از عملکرد مغز انسان و واحدهای پردازشگر آن ایجاد شده‌اند. فرض اصلی در این مدل این است که همچون مغز انسان امکان یادگیری توسط واحدهای عصبی (نورون) وجود دارد.

هر شبکه عصبی شامل سه مرحله زیر است (Dowd and Sarac, 1994):

- آموزش
- آزمون
- اجرا

در مرحله آموزش، شبکه الگوهای موجود در ورودی‌ها را یاد می‌گیرد. هر شبکه عصبی برای یادگیری از قانون خاص و متمایزی استفاده می‌کند. آزمون به معنای قدرت شبکه عصبی در ایجاد پاسخ‌های قابل قبول برای ورودی‌هایی است که عضو مجموعه آموزشی نیستند. در مرحله اجرا نیز، شبکه عصبی برای انجام عملکردی که به آن منظور طراحی شده است، استفاده خواهد شد.

برای آن که نتایج پیش‌بینی و تخمین شبکه‌های عصبی قابل قبول واقع شوند بایستی سه پیش‌شرط زیر برقرار باشد:

- ورودی‌ها مشخص و با مقادیر معلوم باشند، به عبارت دیگر متغیرهایی که مقادیر خروجی را کنترل می‌کنند و روی آن‌ها تأثیر زیادی دارند مشخص شده باشند.
 - خروجی شناخته شده باشد، یا به عبارت دیگر متغیر وابسته کاملاً مشخص و معین باشد.
 - داده‌های کافی برای آموزش شبکه در دسترس باشد؛ به عبارت دیگر، به تعداد مورد نیاز از حالت‌های تحقق‌یافته وجود داشته باشد که در آن‌ها ورودی‌ها و خروجی‌های متناظر معلوم باشد.
- یکی از نقاط ضعف شبکه‌های عصبی این است که نتیجه آموزش یعنی اوزان داخلی، هیچ‌گونه تصویر روشنی از اعتبار جواب‌های مشابه به دست نمی‌دهد. به همین دلیل به شبکه‌های عصبی، مدل‌های جعبه سیاه گفته می‌شود؛ با این وجود پاسخ‌های شبکه در اغلب موارد صحیح است و با شرایط کمی سازگاری دارد (Berry and Linoff, 1997). علت انتخاب شبکه عصبی در بین روش‌ها فرابتکاری، شناخته‌تر بودن این روش و سادگی استفاده از آن می‌باشد.

شبکه مصنوعی روش‌های بسیار متنوعی را داراست؛ اما از انواع مهم شبکه‌های عصبی می‌توان به شبکه هاپفیلد، شبکه کوهونن و شبکه پرسپترون اشاره کرد؛ که متداول‌ترین انواع شبکه‌های عصبی، شبکه‌های پرسپترون چند لایه است. شبکه‌های نام‌برده قادر به حل بسیاری از مسائل پیچیده و مشکل هستند. این شبکه‌ها نیز ساختار کلی شبکه‌های عصبی شامل سه لایه ورودی، میانی و خروجی را دارا هستند و این امکان وجود دارد که به تعداد دلخواه لایه میانی در نظر گرفته شود اما به اثبات رسیده است که شبکه‌هایی با یک لایه میانی نیز قادر به حل کلیه مسائل خواهند بود (شهابی‌فر، ۱۳۸۳). داده‌های خام و اولیه از طریق لایه ورودی به مجموعه وارد می‌شود و سپس از طریق لایه میانی، وزن ارتباط بین ورودی‌ها تعیین خواهد شد.

با استفاده از شبکه عصبی که به‌عنوان یک مدل غیرخطی شناخته می‌شود به سادگی می‌توان مدل نهایی را ارائه کرد؛ زیرا این روش، غیرپارامتری است و نیازی به زمینه آماری قوی ندارد. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی، مدل تخمین سرعت بحرانی ارائه شده است. برای ساخت مدل شبکه عصبی از نرم‌افزار

NeuroSolutions استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به ارائه مدل‌های مختلف از شبکه عصبی است. در این رساله از شبکه عصبی چندلایه پرسپترون با شرایط اولیه مختلف بهره گرفته شده است. به‌منظور آموزش شبکه عصبی از روش رو به جلو با نظارت استفاده شده است.

از طرفی به‌منظور جلوگیری از وقوع بیش‌آموزشی^۱ و کنترل آن، نمودار خطای آموزشی و خطای آزمون ترسیم شده است و بر اساس آن، تعداد تکرار مناسب انتخاب شده است. در جدول ۴-۴ تعدادی از مدل‌های به دست‌آمده از شبکه عصبی که بر مبنای ساختارهای متفاوت به دست آمده‌اند، نشان داده شده است.

یکی از موضوعات تحقیقی مهم در ادبیات شبکه عصبی مصنوعی، طراحی معماری شبکه عصبی است. در ادبیات طراحی معماری شبکه عصبی، عموماً، عواملی از قبیل تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در هر لایه و توابع انتقال مطرح می‌شوند. محققان در طراحی معماری شبکه عصبی، از رویکردهای متفاوتی استفاده می‌کنند. یکی از این رویکردها، سعی و خطاست که در آن برای تعیین معماری شبکه عصبی، ترکیب‌های متعددی مورد آزمایش قرار می‌گیرد و با مقایسه عملکرد هر ترکیب با سایر ترکیب‌ها، معماری شبکه تعیین می‌شود. در این پژوهش با این رویکرد از حالت دو لایه پنهان و یک لایه استفاده شده است که در همه موارد با دو لایه پنهان، مقدار ضریب همبستگی آزمون کم‌تر از حالت تک‌لایه است. تعداد نرون‌ها نیز در لایه‌های پنهان از ۴ تا ۲۰ نرون متغیر و از انواع توابع انتقال سیگموئید و مونتوم استفاده شده است.

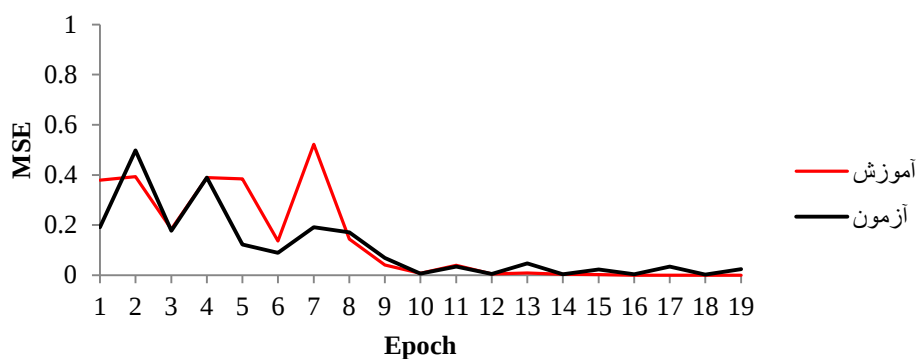
در جدول ۴-۳ در بین مدل‌های ارائه‌شده، مدل شماره ۱۵ با مقدار ضریب همبستگی ۹۷/۱٪ به‌عنوان مدل اصلی و نهایی حاصل از شبکه عصبی انتخاب شده است. با توجه به این که مدل شماره ۱۵ انتخاب شده است و همان‌گونه که پیش از این بیان شد به‌منظور بررسی تعداد تکرار مناسب می‌توان نمودار خطای آزمون و آموزش را با یکدیگر مقایسه کرد و شرط توقف را با توجه به آن اعمال کرد. در شکل ۴-۱۲ این موضوع نمایش داده شده است و همان‌طور که مشخص است از تکرار ۱۲ به بعد خطای آموزش ثابت مانده است و از سوی دیگر تغییر چشم‌گیری نیز در خطای آزمون حاصل نمی‌شود؛ بنابراین این مقدار به‌عنوان تعداد تکرار مناسب برای مدل انتخاب شده است.

¹ Over Training

در جدول ۴-۴، اکثر مدل‌های ارائه شده بر اساس شبکه عصبی دارای ضریب همبستگی بالایی می‌باشند و در بین آن‌ها، مدل شماره ۱۵ با بیشترین مقدار ضریب همبستگی در داده‌های آزمون به عنوان مدل برتر انتخاب شده است.

جدول ۴-۴: مدل‌های مختلف و ویژگی‌های آن‌ها بر مبنای شبکه عصبی.

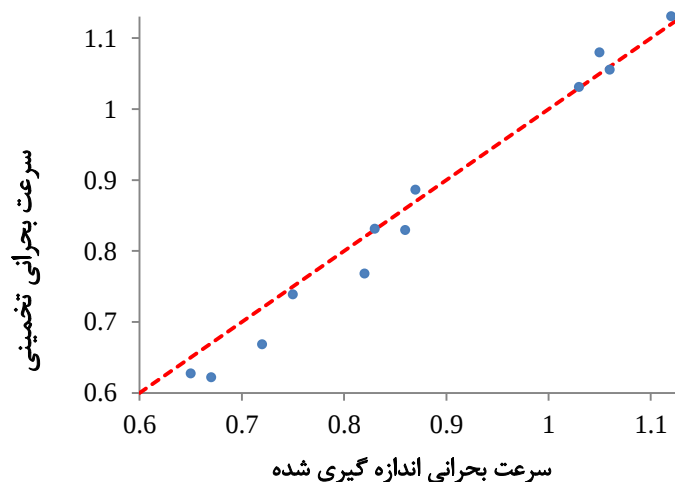
شماره مدل	ساختار مدل	تابع تحریک (قانون یادگیری)	RMSE آزمون	R^2 آزمون (درصد)
۱	۴-۴-۱	سیگموئید (مومنتوم)	۰/۰۶	۸۷/۲
۲	۴-۶-۱	سیگموئید (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۸	۹۶/۴
۳	۴-۴-۱	سیگموئید (پلکانی)	۰/۰۶	۹۲/۳
۴	۴-۸-۸-۱	سیگموئید با دو لایه پنهان (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۹	۸۶/۶
۵	۴-۴-۱	تانژانت آکسون (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۵	۹۴/۲
۶	۴-۶-۴-۱	تانژانت آکسون با دو لایه پنهان (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۱۳	۹۲
۷	۴-۴-۱	تانژانت آکسون (مومنتوم)	۰/۰۷	۹۱
۸	۴-۴-۱	سیگموئید آکسون خطی (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۵	۹۴/۴
۹	۴-۸-۸-۱	سیگموئید آکسون خطی با دو لایه (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۹	۸۶/۱
۱۰	۴-۴-۴-۱	سیگموئید آکسون-تانژانت آکسون (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۴	۹۵/۷
۱۱	۴-۴-۴-۱	سیگموئید آکسون-تانژانت آکسون (مومنتوم)	۰/۰۸	۹۰/۴
۱۲	۴-۴-۴-۱	تانژانت آکسون-سیگموئید آکسون (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۳	۹۶/۱
۱۳	۴-۴-۴-۱	تانژانت آکسون-سیگموئید آکسون (مومنتوم)	۰/۰۲	۹۶/۸
۱۴	۴-۸-۱	تانژانت آکسون (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۶	۹۴/۹
۱۵	۴-۲۰-۱	تانژانت آکسون (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۲	۹۷/۱
۱۶	۴-۲۰-۱	سیگموئید آکسون (مومنتوم)	۰/۰۹	۸۶/۷
۱۷	۴-۱۰-۱	تانژانت آکسون (لونبرگ-مارکوارت)	۰/۰۶	۹۱/۴



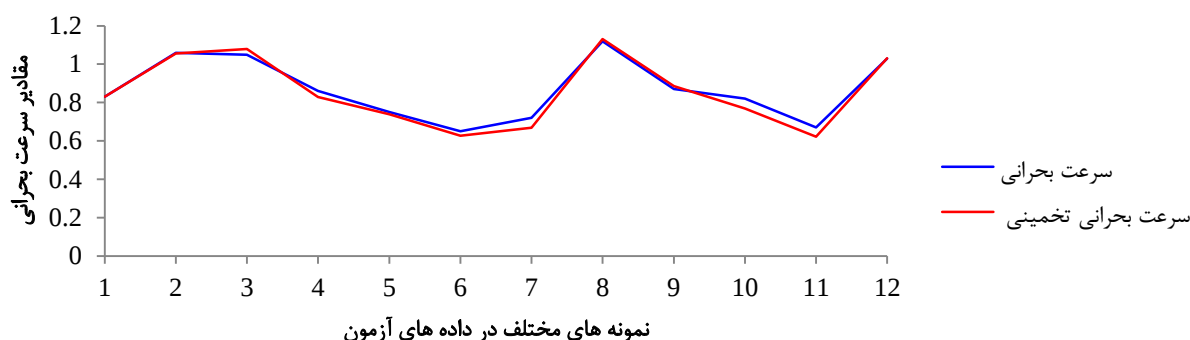
شکل ۴-۱۲: مقایسه مقادیر MSE برای داده‌های آموزش و آزمون.

در شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده برای داده‌های آزمون با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل ۴-۱۳ این داده‌ها در نیمساز ربع اول نمایش داده شده‌اند تا مقدار نزدیکی داده‌های پیش‌بینی‌شده به نیمساز ربع اول نشان داده شود و دقت مدل نهایی مشخص شود و به عبارت دیگر هر چه این داده‌ها به نیمساز ربع اول نزدیک‌تر باشند به مفهوم دقت بالاتر مدل است. با توجه به این شکل می‌توان مدل ارائه‌شده را قابل قبول دانست.

در شکل ۴-۱۴ نیز این داده‌ها برای مقایسه اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده ترسیم شده است و شکل ۴-۱۴ بیانگر توان مدل ارائه‌شده در تخمین قابل قبول برای حالت‌های مختلف در داده‌های آزمون می‌باشد. در نتیجه این مدل می‌تواند به‌عنوان یک تخمین‌گر به حساب آید.



شکل ۴-۱۳: مقایسه مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری‌شده در نیمساز اول برای داده‌های آزمون.



شکل ۴-۱۴: مقایسه اختلاف مقادیر سرعت بحرانی تخمینی و اندازه‌گیری شده در داده‌های آزمون.

۴-۵- انتخاب مدل نهایی سرعت بحرانی

به منظور ارزیابی مدل‌های مختلف ارائه شده و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای تخمین سرعت بحرانی از نتایج نهایی هر یک از مدل‌ها استفاده شده است. در جدول ۴-۴ خلاصه داده‌های مورد نیاز برای مقایسه مدل‌های مختلف ارائه و بر اساس آن می‌توان مدل مناسب‌تر را انتخاب کرد. همان‌طور که از مقایسه جدول ۴-۵ برمی‌آید مدل شبکه عصبی مصنوعی با بیشترین ضریب تعیین و کم‌ترین مقدار RMSE به عنوان مدل مناسب انتخاب می‌شود.

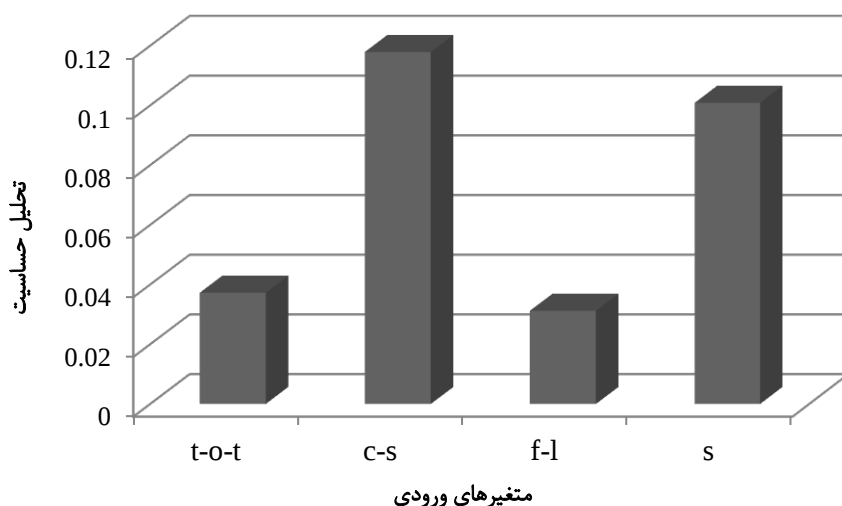
جدول ۴-۵: ارزیابی مدل‌های مختلف به منظور تخمین سرعت بحرانی.

مدل ارائه شده	RMSE	R^2
رگرسیون چندگانه خطی	۰/۰۸۲	۰/۸۴
رگرسیون چندگانه غیرخطی	۰/۰۴۵	۰/۹۵
شبکه عصبی مصنوعی	۰/۰۲	۰/۹۷

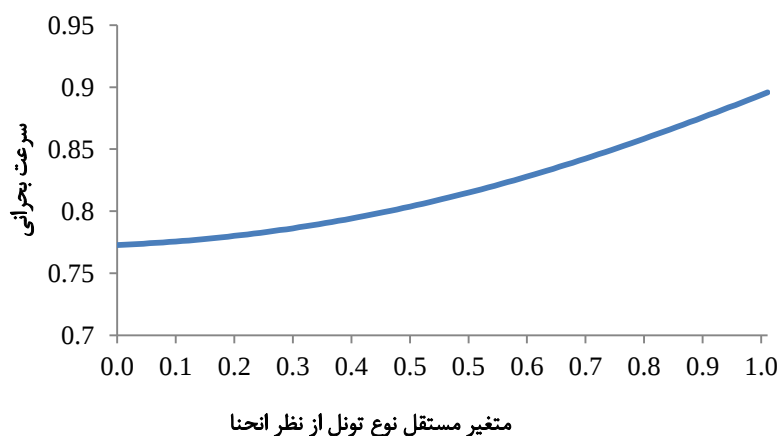
بر اساس مدل شبکه عصبی، تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی انجام شده است. در شکل ۴-۱۵ نتیجه تحلیل حساسیت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است پارامتر سطح مقطع، بیشترین تأثیر را بر تغییر در مقدار تخمین سرعت بحرانی دارد. پس از آن اندازه حریق، تأثیر قابل توجهی را بر سرعت بحرانی خواهد داشت و از سوی دیگر پارامترهای نوع تونل از نظر انحنا و محل عرضی حریق، تقریباً به میزان

مساوی سرعت بحرانی را دستخوش تغییر می‌کنند و میزان تغییرات ایجاد شده از دو پارامتر دیگر کمتر است.

در شکل‌های ۱۶-۴ تا ۱۹-۴ نمودار تحلیل حساسیت تک‌متغیره برای هر یک از ورودی‌های مستقل تخمین سرعت بحرانی نشان داده شده است و می‌توان بر اساس این نمودارها وضعیت تغییرات سرعت بحرانی را با تغییر هر یک از متغیرهای مستقل مشاهده کرد. به‌عنوان مثال در نمودار ۱۶-۴ با تغییر انحنای تونل از حالت مستقیم به منحنی، سرعت بحرانی بر اساس میزان افزایش انحنای، افزایش می‌یابد که میزان افزایش آن نیز قابل توجه و چشم‌گیر است (حدود ۱۶٪).



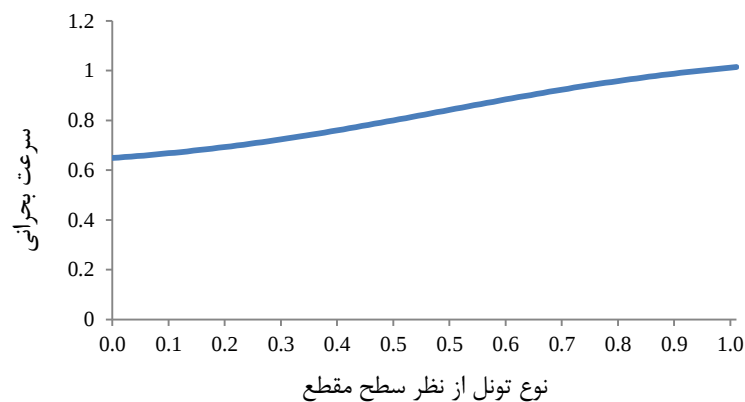
شکل ۱۵-۴: نتیجه تحلیل حساسیت متغیرهای مستقل ورودی بر اساس مدل نهایی انتخاب‌شده.



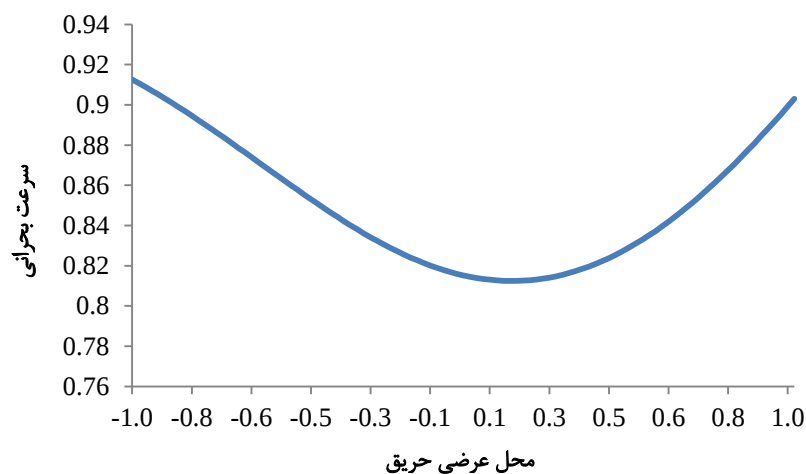
شکل ۱۶-۴: تحلیل حساسیت تک‌متغیره برای انحنای تونل.

بر اساس شکل ۴-۱۷ تغییر تونل از حالت مستطیلی به D شکل، سبب افزایش سرعت بحرانی می‌شود. این تغییر در حدود ۵۰٪ است که نشان‌دهنده اهمیت بسیار بالای شکل سطح مقطع بر تخمین سرعت بحرانی است.

طبق شکل ۴-۱۸ تغییرات عرضی محل حریق از خط مرکزی تونل در هر دو سو، سبب افزایش سرعت بحرانی خواهد شد. علت آن را می‌توان بر اساس پروفایل سرعت تفسیر کرد؛ زیرا هر چه از مرکز تونل به طرفین فاصله گرفته می‌شود بر اساس نیم‌رخ سرعت هوا، نیاز به جریان هوای قوی‌تر وجود دارد تا بتواند دود حاصل از حریق را کنترل کند.

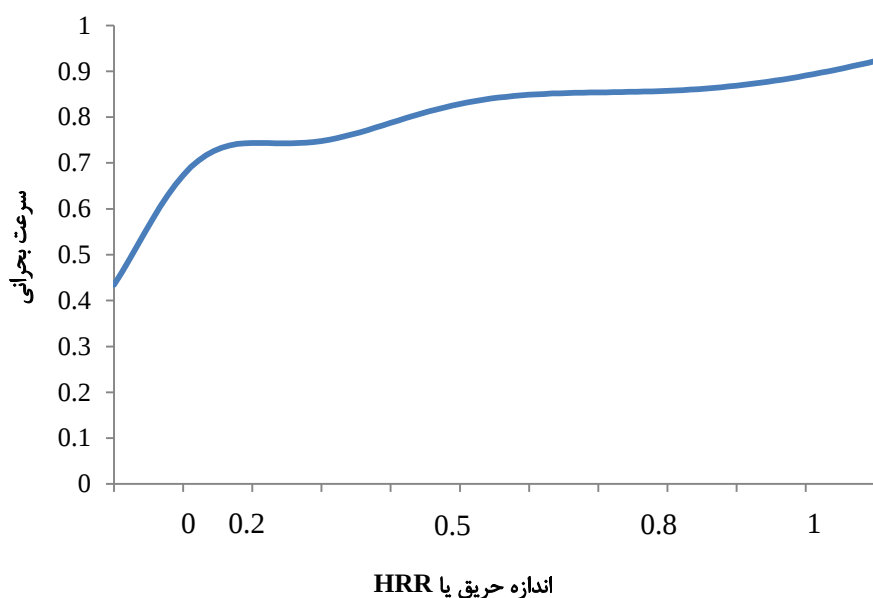


شکل ۴-۱۷: تحلیل حساسیت تک‌متغیره برای سطح مقطع تونل.



شکل ۴-۱۸: تحلیل حساسیت تک‌متغیره برای محل عرضی حریق.

شکل ۴-۱۹ تحلیل حساسیت سرعت بحرانی بر اساس نرخ گرمای رها شده HRR است. همان گونه که انتظار می‌رفت تحلیل حساسیت، نشان‌دهنده عدم وابستگی سرعت بحرانی در مقادیر بزرگ‌تر نرخ گرمای رها شده HRR است و در خارج از یک بازه مشخص، سرعت بحرانی تقریباً مستقل از نرخ گرمای رها شده HRR خواهد بود.



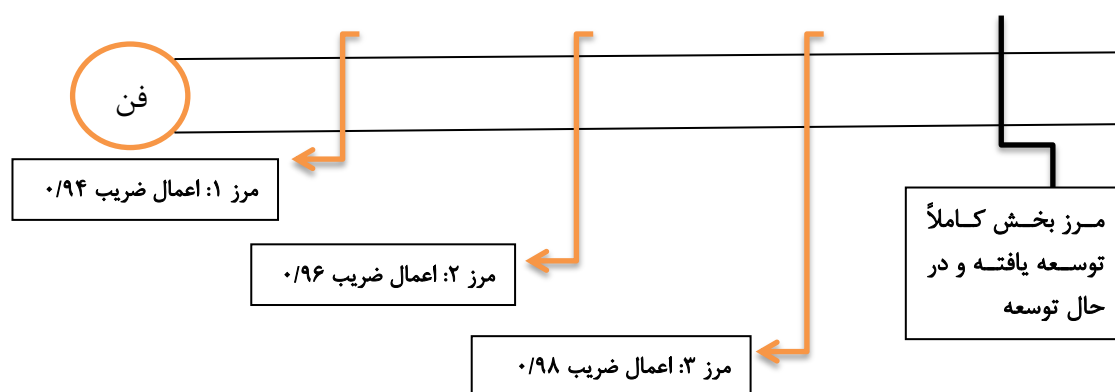
شکل ۴-۱۹: تحلیل حساسیت تک‌متغیره برای نرخ گرمای رها شده HRR.

۴-۶- تأثیر پارامتر طول تونل بر مدل نهایی

متغیر دیگری که برای مدل تخمین سرعت بحرانی انتخاب شده است، طول تونل است. تغییر این پارامتر می‌تواند بر سرعت بحرانی تأثیر داشته باشد طول تونل را می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم کرد و این دو بخش تحت عنوان قسمت در حال توسعه جریان و بخش کاملاً توسعه‌یافته شناخته می‌شوند. در بخش کاملاً توسعه‌یافته وضعیت نیم‌رخ جریان ثابت بوده و طول تونل یا به عبارت دیگر، محل طولی حریق در تونل، نقشی در تخمین و تعیین سرعت بحرانی نخواهد داشت؛ بنابراین در چنین شرایطی این پارامتر از چرخه محاسبات تخمین حذف می‌شود.

اما در صورتی که حریق در بخش در حال توسعه رخ دهد، سرعت بحرانی متأثر از محل طولی حریق در تونل خواهد بود و بایستی به منظور تخمین دقیق تر سرعت بحرانی، این متغیر (طول تونل) را طبق نتایج فصل چهارم در چرخه محاسبات تخمین وارد کرد.

بدین منظور با توجه به ماهیت مسئله و میزان تأثیر این متغیر، با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده، طول بخش در حال توسعه به چهار قسمت مساوی تقسیم شده است و با توجه به فاصله فن تا حریق، ضریبی در عدد سرعت بحرانی تخمینی از شبکه عصبی مصنوعی، اعمال خواهد شد. این ضریب با توجه به فاصله فن تا محل حریق به دست آمده است. روش کار بدین صورت است که بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری در سه حالت مختلف، میزان سرعت بحرانی در بخش در حال توسعه حدود ۹۴ تا ۱۰۰ درصد سرعت بحرانی بخش کاملاً توسعه یافته است. نحوه اختصاص ضریب نهایی برای اعمال کردن بر سرعت بحرانی تخمینی از شبکه عصبی مصنوعی به صورت شکل ۴-۲۰ خواهد بود.



شکل ۴-۲۰: نحوه اعمال ضرایب مختلف سرعت بحرانی در بخش در حال توسعه جریان.

بر اساس شکل ۴-۲۰ در صورتی که حریق در فاصله فن تا مرز ۱ رخ دهد می‌بایست ۹۴٪ سرعت بحرانی حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی را به عنوان سرعت تخمینی نهایی در نظر گرفت. یا اگر در فاصله مرز ۳ تا مرز بخش کاملاً توسعه یافته قرار گیرد، مقدار نهایی با مقدار سرعت بحرانی ناحیه کاملاً توسعه یافته برابر است؛ بنابراین سرعت بحرانی در حال توسعه بین ۹۴٪ تا ۱۰۰٪ سرعت بحرانی تغییر می‌کند.

۷-۴- روند نهایی در تخمین سرعت بحرانی تونل حین حریق

سرعت بحرانی به عنوان یکی از دغدغه‌های ایمنی تونل‌ها نیازمند پژوهش‌های ویژه و دقیقی است. بررسی‌های گسترده‌ای در این زمینه از دیدگاه‌های مختلفی انجام شده است. در این رساله بر اساس متغیرهای اساسی و کاربردی شناسایی شده، مدل تخمینی ارائه شده است. به منظور استفاده از این مدل، روند زیر در پیش گرفته می‌شود تا بتوان برای تونل مورد نظر سرعت بحرانی را تخمین زد:

- تعیین مقادیر متغیرهای ورودی مدل شامل نوع تونل از نظر انحنا، سطح مقطع تونل، محل عرضی حریق از دیواره‌ها و قدرت حریق.
- استفاده از مقیاس و جدول مقیاس‌گذاری فرود برای تبدیل داده‌ها از حالت واقعی به حالت تحت مطالعه در رساله.
- ورود داده‌های اولیه به مدل شبکه عصبی مصنوعی.
- محاسبه طول بخش در حال توسعه جریان و مرز آن با بخش کاملاً توسعه یافته.
- در صورتی که حریق در بخش در حال توسعه باشد بر اساس محل حریق نسبت به فن ضریب نهایی از شکل ۴-۲۰ استخراج می‌شود.
- محاسبه سرعت نهایی تخمینی و استفاده مجدد از جدول مقیاس‌گذاری فرود برای تبدیل داده‌ها به حالت واقعی.

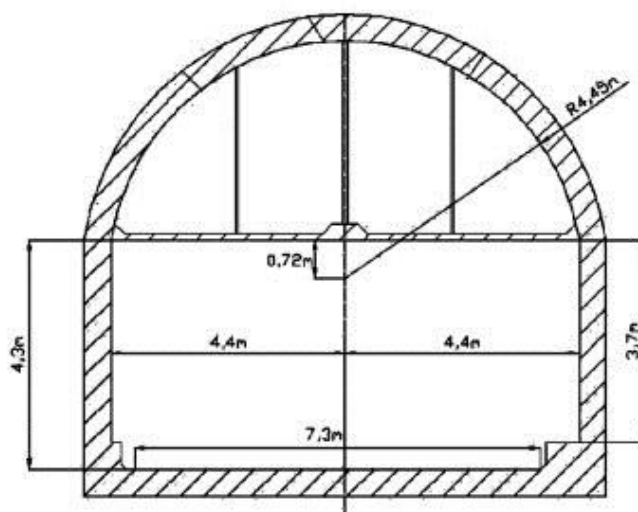
۸-۴- ارزیابی مدل نهایی در تخمین سرعت بحرانی برای حریق واقعی تونل

مرسوم است که هر مدل تخمین، نیازمند بررسی دقیق‌تر است تا بتوان کارایی آن را تحت آزمایش قرار داد. در این بخش، داده‌های حریق واقعی آزمایش شده در دو تونل بزرگ مقیاس با نتایج به دست آمده از جای‌گذاری داده‌های آن‌ها در مدل نهایی معرفی شده، مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج واقعی با نتایج حاصل از مدل سبب خواهد شد که بتوان میزان عملکرد این مدل را در شرایط واقعی محک زد. بدین منظور دو تونل

مموریال^۱ و رونهامر^۲ انتخاب شده‌اند. در سال‌های گذشته داده‌های حاصل از حریق و شرایط جریان هوا در آن‌ها کنترل و برداشت شده است که توسط سازمان‌های مختلف در گزارش‌های جداگانه‌ای ارائه شده‌اند.

۴-۸-۱- حریق تونل مموریال

داده‌های ارائه‌شده از تونل مموریال به واسطه گزارش نهایی آن تحت عنوان گزارش‌های تست‌های تهویه حریق در تونل مموریال به‌عنوان تونل واقعی در نظر گرفته شده است (Brinckerhoff, 1995). بر اساس حریق آزمایش‌شده در این تونل و با در نظر گرفتن هندسه تونل، داده‌های اولیه به دست‌آمده در مدل شبکه عصبی این رساله وارد شده است. بر اساس گزارش مذکور سطح مقطع این تونل در بخشی که هوا جریان دارد، مستطیلی شکل است و نمایی از آن در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۱: سطح مقطع تونل مموریال (Brinckerhoff, 1995).

بخش اصلی تونل که جریان تهویه در آن برقرار است محیطی با ابعاد ۴/۳ متر در ۸/۸ متر بوده که در بخش بالایی نیز تجهیزات تونل نصب شده است. در گزارش مذکور اشاره شده است که حرقی با قدرت ۱۰ مگاوات در بخش مرکزی تونل به وجود آمده که در سرعت طولی کمتر از ۲/۵۴ متر بر ثانیه عقب‌زدگی دود رخ داده است. بنابر این داده‌ها، سرعت بحرانی این تونل با وجود حریق ۱۰ مگاواتی برابر با ۲/۵۴ متر بر ثانیه است. با توجه به روند مدل ارائه‌شده در این رساله به ترتیب زیر می‌توان سرعت نهایی بزرگ‌مقیاس را تخمین زد. لازم به ذکر است که برای حل این مسئله باید دقت داشت که مقیاس‌های بین مدل و واقعیت به درستی

¹ Memorial

² Runehamar

اعمال شود. برای تبدیل مقیاس دو تونل در حالت مستطیلی، از ارتفاع تونل به عنوان واحد مبنا استفاده شده است که علت آن تأثیر مهم ارتفاع تونل نسبت به عرض می باشد و هو و همکارانش به آن اشاره کرده اند. افزایش ارتفاع سبب کاهش سرعت بحرانی خواهد شد و این ارتفاع در سرد شدن گازهای حاصل از حریق و پخش شدگی آن بسیار مؤثر است (Hu et al., 2008).

$$\frac{L_m}{L_f} = \frac{0.54}{4.3} = 0.1256 \quad \text{رابطه طولی بین تونل مموریال و حالت مبنای مستطیلی:}$$

رابطه اندازه حریق بین تونل مموریال و حالت مبنای مستطیلی:

$$\frac{Q_m}{Q_f} = 0.1256^{2.5} = 0.005589$$

$$\frac{Q_m}{10000} = 0.005689 \rightarrow Q_m = 55.89 \text{ KW}$$

بنابراین اندازه حریق در حال مبنای مستطیلی برابر با ۵۵/۸۹ کیلووات است.

با این اوصاف مقدار اندازه حریق در حالت مقیاس شده قابل استفاده در شبکه عصبی، برابر با ۵۵/۸۹ کیلووات خواهد بود که بر اساس آن میزان سرعت در این مقیاس به دست خواهد آمد. مقدار سرعت حاصل از مدل شبکه عصبی برابر با ۰/۸۷ متر بر ثانیه است. حال با تبدیل سرعت به حالت بزرگ مقیاس می توان به سرعت بحرانی نهایی دست یافت.

$$\frac{V_m}{V_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{0.5} \rightarrow \frac{0.87192}{V_f} = 0.3544 \rightarrow V_f = 2.46 \text{ m/s}$$

بنابراین مقدار تخمین سرعت بحرانی برای تونل مموریال بر اساس مدل تخمین برابر با ۲/۴۶ متر بر ثانیه است که مقدار ۰/۰۸ متر بر ثانیه (حدود سه درصد) با مقدار واقعی اختلاف دارد.

۴-۸-۲- حریق تونل رونهامر

در سال ۲۰۰۳ چهار آزمایش حریق بزرگ مقیاس با استفاده از وسایل نقلیه سنگین در تونل رونهامر انجام شده است. تونل رونهامر در ۴۰ کیلومتری شهر مولده واقع در کشور نروژ ساخته شده است. طول این تونل ۱۶۰۰ متر می باشد و دارای ارتفاع تقریبی ۶ متر و عرض ۷ متر است (عرض کلی تونل ۹ متر می باشد که با نصب پوشش محافظ به حدود ۷ متر می رسد) که در شکل ۴-۲۲ نمایی از مقطع و تصویر پلان آن نشان داده

شده است (Lonnermark *et al.*, 2003). هدف اصلی در این آزمایش‌ها بررسی مقدار ماکزیمم HRR در وسایل نقلیه سنگین بوده است.

در بخش داخلی این تونل صفحه‌ای محافظ با سطح مقطع تقریباً مستطیلی قرار داده شده است تا بتواند در مقابل حریق از دیواره تونل محافظت کند. از چهار آزمایش انجام‌شده، آزمایش T_0 با منبع حریق حوضچه‌ای انجام و ارزیابی شده است. از آنجایی که سطح مقطع این تونل شباهت کمتری به D شکل دارد از این‌رو سطح مقطع آن برای انجام محاسبات این پژوهش به صورت مستطیلی فرض شده است. در شکل ۴-۲۲ عبارت‌های بکاررفته به شرح زیر است:

u : سرعت سنج جریان هوا

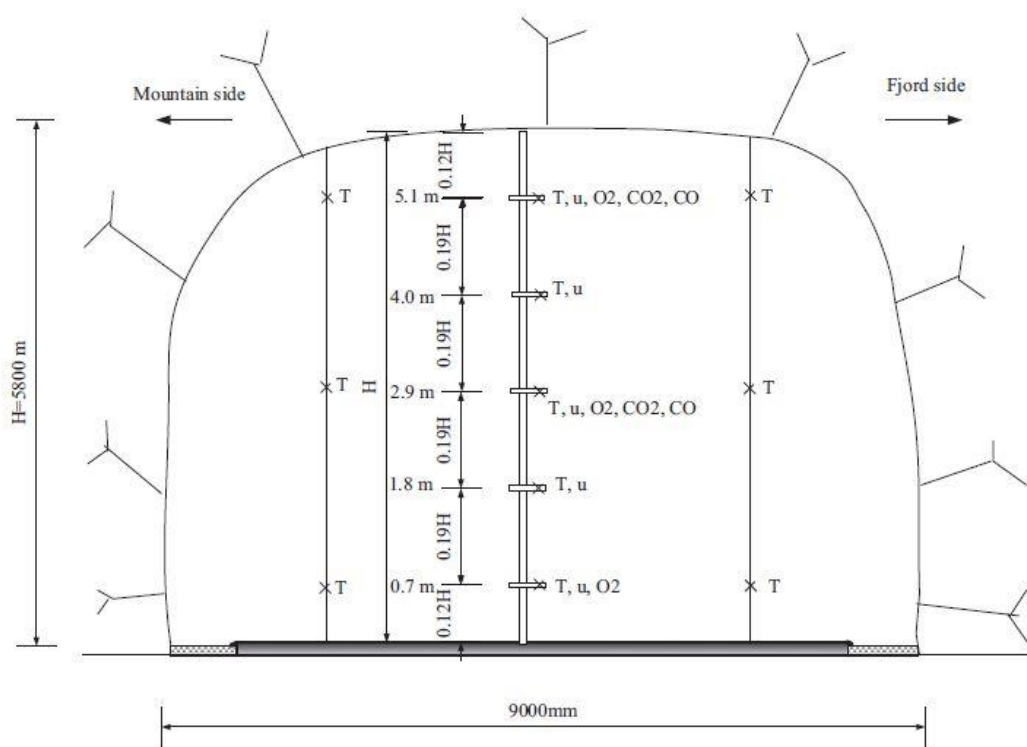
T : ترموکوپل

H : ارتفاع تونل

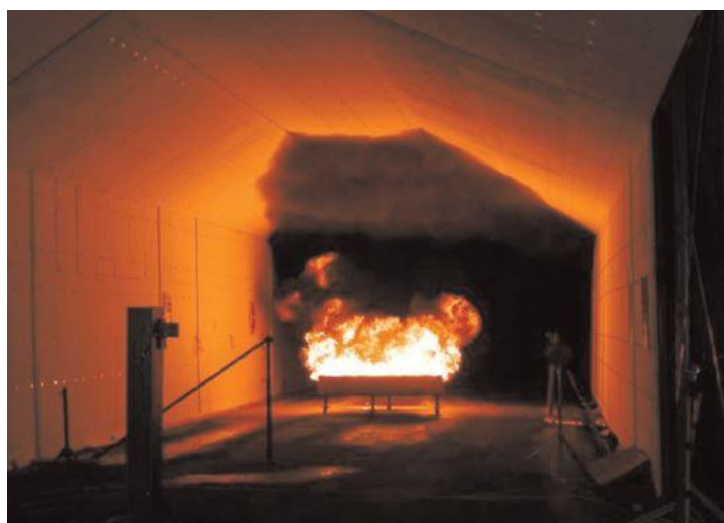
O : اکسیژن

Co : مونواکسید کربن

در شکل ۴-۲۳ نمایی از حریق آزمایش شماره T_0 نشان داده شده است.

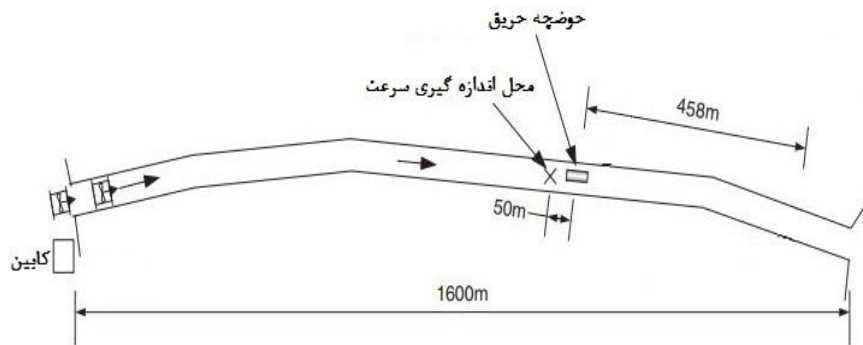


شکل ۴-۲۲: سطح مقطع تونل رونهامر در آزمایش (Lonnermark *et al.*, 2003).



شکل ۴-۲۳: حریق حوضچه‌ای آزمایش T0 در تونل رونهامر (Ingason *et al.*, 2015).

در شکل ۴-۲۴، پلان تونل و میزان انحنای آن نشان داده شده و داده‌های آزمایش شماره T0 نیز در جدول ۴-۶ ارائه شده است و مشخص است که سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه می‌تواند به‌عنوان سرعت بحرانی شناخته شود.



شکل ۴-۲۴: پلان تونل و میزان انحنای آن (Ingason et al., 2015).

جدول ۴-۶: داده‌های آزمایش T0 (Ingason et al., 2015).

شماره آزمایش	مقدار بیشینه HRR (MW)	سرعت جریان (m/s)	میزان عقب‌زدگی (m)
T ₀	۶	۲/۵	۰
T ₀	۶	۲/۰۹	۲۵-۱۵

با توجه به داده‌های ذکرشده، میزان سرعت بحرانی تخمینی از مدل ارائه‌شده به شرح ذیل خواهد بود.

رابطه طولی بین تونل رونهارم و حالت مبنای مستطیلی:

$$\frac{L_m}{L_f} = \frac{0.54}{5.8} = 0.0931$$

رابطه اندازه حریق بین تونل رونهارم و حالت مبنای مستطیلی:

$$\frac{Q_m}{Q_f} = 0.0931^{2.5} = 0.002645$$

$$\frac{Q_m}{6000} = 0.002645 \rightarrow Q_m = 15.87 \text{ KW}$$

بنابراین اندازه حریق در حال مبنای مستطیلی برابر با ۱۵/۸۷ کیلووات است.

مقدار HRR در حالت مقیاس‌شده و قابل استفاده در شبکه عصبی برابر با ۱۵/۸۷ کیلووات است که بر مبنای

آن میزان سرعت در این مقیاس به دست خواهد آمد. مقدار سرعت به دست آمده از مدل شبکه عصبی برابر با

۰/۷۸ متر بر ثانیه است. حال با تبدیل سرعت از حالت کوچک مقیاس به حالت بزرگ مقیاس می‌توان به

سرعت بحرانی دست یافت.

$$\frac{V_m}{V_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{0.5} \rightarrow \frac{0.78075}{V_f} = 0.3051 \rightarrow V_f = 2.55 \text{ m/s}$$

بنابراین مقدار تخمین سرعت بحرانی برای تونل رونهارم بر اساس مدل تخمین برابر با ۲/۵۵ متر بر ثانیه

است که مقدار ۰/۰۵ متر بر ثانیه (دو درصد) با مقدار واقعی اختلاف دارد.

از نتایج به دست آمده از حریق دو تونل مموریال و رونهامر برمی آید که مدل تخمین به خوبی توانایی تخمین سرعت بحرانی را دارا است.

۴-۹- جمع بندی

در این فصل مدل نهایی تخمین سرعت بحرانی برای دو حریق تونلی ارائه شد. در بخش اول پارامترهای مؤثر و انتخابی توضیح داده شد و تعداد و نوع پارامترهای ورودی که به عنوان متغیرهای ورودی تخمین هستند مشخص و بیان شد که علت انتخاب هر یک به چه دلیلی است. سپس با استفاده از رگرسیون چندگانه خطی، غیرخطی و روش شبکه عصبی مصنوعی، مدل های تخمین جداگانه ای ارائه شد و عملکرد این مدل ها نیز با یکدیگر ارزیابی و مدل نهایی بر اساس آن تعیین گردید. پس از اعتبارسنجی هر یک از مدل ها، به منظور بررسی عملکرد مدل نهایی تخمین و بررسی آن در شرایط واقعی، داده های حریق در دو تونل بزرگ مقیاس مموریال و رونهامر به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد و با استفاده از آن ها به تحلیل دقت مدل تخمین سرعت بحرانی پرداخته شد که نتایج آن بیانگر دقت مدل تخمینی در شرایط واقعی است.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

طبق آمارهای منتشرشده، هر ساله افراد زیادی بر اثر حوادث آتش‌سوزی دچار آسیب‌های متعدد می‌شوند که حوادث آتش‌سوزی تونل‌ها نیز جزئی از آنهاست. با توجه به کاربرد روزافزون تونل‌ها در دنیای امروزی و با توجه به محیط بسته و طولی آنها، در صورت رخداد هرگونه حریق در چنین محیط‌هایی خسارت‌های مالی و جانی جبران‌ناپذیری بروز خواهد کرد. بدین منظور افزایش ایمنی و طراحی‌های مرتبط با کنترل حوادث حریق در تونل‌ها دغدغه بسیاری از مهندسان طراح این سازه به شمار می‌رود.

در این میان، کنترل سرعت جریان هوا در حین حریق از جمله مباحث ایمنی در طراحی ایمنی تونل به حساب می‌آید؛ زیرا سرعت بحرانی در شرایط رخداد آتش‌سوزی، در ارتباط مستقیم با جان افراد حاضر در تونل است و عدم تأمین دقیق این جریان و سرعت مناسب آن، سبب بروز خسارت‌های جبران‌ناپذیری می‌شود. حوادث حریق تونل با در نظر گرفتن گستردگی آنها، عواقب جدی و تهدید مهمی برای ایمنی و جان انسان‌ها به حساب می‌آیند.

در حین حریق تونلی معمولاً افرادی که در پایین‌دست آتش قرار دارند می‌توانند از تونل خارج شده و در شرایط ایمن قرار گیرند. اما افراد بالادست تونل به علت وجود آتش و بسته‌شدن مسیر رفت و از سوی دیگر وجود ترافیک در تونل، در شرایط ناایمنی قرار خواهند گرفت. زیرا این افراد، در مقابل دمای بالای حاصل از آتش و دود ناشی از آن خواهند بود که می‌تواند سبب خفگی افراد شود. از این‌رو سیستم تهویه تونل برای چنین وضعیت بحرانی باید توانایی کنترل دود متصاعدشده از آتش را داشته باشد به نحوی که با حفظ لایه‌بندی و هدایت آن به سمت مسیرهای خروجی از بروز حوادث ناگوار جلوگیری به عمل آورد.

سرعت بحرانی توسط محققین متعددی از جنبه‌های متفاوت تحلیل شده است و این افراد مقدار سرعت بحرانی را برای تونل‌های مختلف بر مبنای آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس، شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌های آزمایشگاهی به دست آورده‌اند. مرور این تحقیق‌ها حاکی از آن است که در بیشتر این پژوهش‌ها، برخی از پارامترهای کلیدی به‌منظور ساده‌سازی از مسیر مطالعه حذف شده و در نتایج نهایی اثر آنها دیده نشده است. به‌عنوان نمونه می‌توان انحنای تونل‌ها را از جمله این پارامترها در نظر گرفت. از سوی دیگر نیز بیشتر

مدل‌های ارائه‌شده بر مبنای بی‌بعدسازی متغیرها انجام شده که روند تحلیل حساسیت متغیرهای مورد مطالعه در این روش تا حد زیادی دشوار است؛ بنابراین مطالعه و دخالت‌دادن پارامترهای اساسی و مهم در روند تخمین سرعت بحرانی برای دستیابی به سرعت جریان مناسب بسیار مهم است تا بتوان ایمنی افراد حاضر در تونل را افزایش داد.

با نگاهی به موارد مطرح‌شده، در این رساله تمرکز اصلی بر تعیین متغیرهای حائز اهمیت و کاربردی با در نظر گرفتن ارائه مدلی نزدیک‌تر به واقعیت بوده است تا بتوان با دقت بالاتری بر اساس شرایط هر تونل، سرعت بحرانی مورد نیاز را تخمین زده و گامی در راستای افزایش ایمنی برداشت.

بدین منظور در این رساله در گام اول با کمک شبیه‌سازی‌های عددی در سناریوهای مختلف تأثیر پارامترهای متعددی بر سرعت بحرانی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بین، سناریوهای مختلف با استفاده از پژوهش‌های پیشین و با بررسی تونل‌های مختلف از منظر هندسی و رخداد حریق، پایه‌ریزی شد. با کمک آزمایش‌های فیزیکی، نتایج شبیه‌سازی عددی، ارزیابی و صحت‌سنجی شده است.

طبق پژوهش‌های گذشته و بررسی تونل‌ها حین حریق، پارامترهای متفاوتی شامل طول تونل، سطح مقطع تونل، جابه‌جایی عرضی حریق، شیب، انحنای هندسی، اندازه حریق، نوع سوخت، طول شعله، تابش، آتش‌سوزی‌های چندگانه در تونل، فن‌های اضافی در نقاط تخلیه، نوع سیستم تهویه، انسداد جریان هوا و تأثیر تهویه طبیعی به عنوان ۱۴ عامل مؤثر بر حریق شناسایی شد که از این تعداد، پارامترهای انحنای هندسی تونل و تأثیر طول تونل به‌عنوان پارامترهای جدید شناسایی شده‌اند. ارائه مدل تخمینی که کاربردی باشد مستلزم آن است که چابک‌بودن مدل از ضروریات ارائه آن باشد؛ بنابراین تعدادی از این پارامترها حذف شد که در انتها پارامترهای طول تونل، سطح مقطع، جابه‌جایی عرضی، انحنای هندسی و HRR به‌عنوان متغیرهای اصلی و ورودی به مدل در نظر گرفته شده است.

در سناریوسازی‌های انجام‌شده به‌صورت تک‌متغیره، تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور بررسی شده است که به‌عنوان نمونه طول تونل با توجه به محل حریق و فن تهویه و فاصله بین آن‌ها سبب تغییر در سرعت بحرانی می‌شود. جابجایی عرضی نیز سبب تغییر ۸ درصدی در مقدار سرعت بحرانی خواهد شد. یا انحنای تونل

سبب تغییر ۱۲ درصدی در مقدار واقعی سرعت بحرانی می‌شود. از سوی دیگر اندازه حریق در بازه مشخصی سبب تغییر سرعت بحرانی به صورت صعودی مستقیم خواهد شد که در خارج از آن محدوده سرعت بحرانی از مقدار HRR استقلال دارد.

در گام دوم، از روش‌های تخمین استفاده شده است؛ زیرا با توجه به محدودیت تعداد سناریوهای محتمل شبیه‌سازی شده در این پژوهش، استفاده از این روش‌ها گریزناپذیر است؛ بنابراین با بکارگیری اصول روش‌های مختلف تخمین، شامل رگرسیون چندگانه خطی، رگرسیون چندگانه غیرخطی و روش شبکه عصبی مصنوعی مدل‌های مختلف تخمین ارائه شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، ضریب تعیین به ترتیب برای رگرسیون چندگانه خطی، رگرسیون چندگانه غیرخطی و روش شبکه عصبی مصنوعی برابر با ۰/۸۴، ۰/۹۵ و ۰/۹۷ و مجذور میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با ۰/۰۸۲، ۰/۰۴۵ و ۰/۰۲ است که بیانگر کارایی بهتر مدل شبکه عصبی مصنوعی بوده و به عنوان مدل تخمین گر سرعت بحرانی در شرایط مختلف انتخاب شده است.

تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی نیز بر اساس مدل شبکه عصبی انجام شده است. پارامتر سطح مقطع، بیشترین تأثیر را بر تخمین سرعت بحرانی دارد. پس از آن پارامتر اندازه حریق، تأثیر قابل توجهی را بر سرعت بحرانی خواهد داشت و در انتها پارامترهای نوع تونل از نظر انحنای و محل عرضی حریق، سرعت بحرانی را دستخوش تغییر می‌کنند.

در گام سوم، به منظور ارزیابی کارایی مدل تخمین گر، داده‌های حریق واقعی آزمایش شده در دو تونل بزرگ مقیاس با نتایج به دست آمده در مدل نهایی مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج واقعی با نتایج حاصل از مدل سبب خواهد شد که بتوان میزان عملکرد این مدل را در شرایط واقعی محک زد. نتایج مدل تخمین گر در حریق تونل مموریال با حدود ۰/۰۸ اختلاف کاهشی، مقدار سرعت بحرانی را ۲/۴۶ متر بر ثانیه تخمین زده است و در حریق تونل رونهامر نیز با حدود ۰/۰۵ اختلاف افزایشی، مقدار سرعت بحرانی را ۲/۵۵ متر بر ثانیه تعیین کرده است. می‌توان با نتایج به دست آمده دریافت که مدل تخمین گر تا حد زیادی قابل اعتماد بوده و توان تخمینی مناسبی را از خود نشان داده است.

به صورت خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

۱- پارامترهای طول تونل، سطح مقطع، جابه‌جایی عرضی، انحنای هندسی و HRR به‌عنوان متغیرهای اصلی و ورودی در مدل تخمین، شناسایی شدند تا بتوانند تخمین مناسب‌تری را با وجود سناریوهای مختلف ارائه دهند.

۲- تأثیر تک متغیره هر یک از پارامترهای مذکور بررسی شده است و نتایج شبیه‌سازی‌های عددی آن با نتایج مدل فیزیکی مقایسه شده است که از درجه اعتبار برخوردار هستند.

۳- در مرحله‌ی تخمین، ضریب تعیین به ترتیب برای رگرسیون چندگانه خطی، رگرسیون چندگانه غیرخطی و روش شبکه عصبی مصنوعی برابر با $0/84$ ، $0/95$ و $0/97$ و مجذور میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با $0/082$ ، $0/045$ و $0/02$ است که گویای قدرت تخمین بهتر در مدل شبکه عصبی مصنوعی است. بنابراین به‌عنوان مدل تخمین‌گر سرعت بحرانی در سناریوهای متفاوت انتخاب شده است.

۴- براساس تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی، سطح مقطع بیشترین تأثیر را بر تخمین سرعت بحرانی دارد.

۵- ارزیابی کارایی مدل تخمین‌گر براساس دو تونل مموریال و رونهامر انجام شد که نتایج تخمین با مقادیر واقعی تطابق بسیار نزدیکی دارد و بیانگر دقت تخمین و کارایی مناسب آن در سناریوهای متفاوت است.

۵-۲- پیشنهادها

هدف این پژوهش ارائه یک مدل تخمین‌گر کاربردی و تا حد ممکن دقیق بر مبنای پژوهش‌ها و شبیه‌سازی‌های فیزیکی و عددی است تا نیاز ایمنی تونل‌ها در حین حریق با تهویه طولی پاسخ داده شود. اگرچه سعی شده است که مجموعه عوامل مؤثر تا حد ممکن پاسخ‌گوی نیاز مدل در تخمین باشند اما هنوز ظرفیت زیادی برای توسعه‌های بیشتری در طراحی مدل‌های تخمین‌گر حوزه ایمنی تونل‌ها وجود دارد، از این‌رو در این راستا پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- در این تحقیق از مدل‌های فیزیکی محدودی به دلیل نبود بستر اقتصادی مناسب برای ساخت و تجهیز استفاده شده است؛ از این‌رو پیشنهاد می‌شود که مدل‌های فیزیکی بیشتری بر اساس سناریوهای مختلف و ابزارهای مورد نیاز طراحی و ساخته شود تا بتوان با دقت بالاتری نتایج سرعت بحرانی را تعیین و تخمین زد.
- در طراحی ایمنی تونل‌ها معمولاً از سیستم اطفای حریق خودکار نیز استفاده می‌شود؛ از این‌رو پیشنهاد می‌شود اثر متقابل سیستم اطفای حریق و سرعت بحرانی جریان هوا در شرایط رخداد حریق، بررسی و تحلیل شود تا بتوان به شرایط واقعی نزدیک‌تر شد.
- در تونل‌ها از سیستم‌های کمکی نظیر نقاط تخلیه و سیستم‌های تهویه کمکی استفاده می‌شود که می‌توان در پژوهش‌های آتی تأثیر این مجموعه‌ها را بر سرعت بحرانی و سناریوهای محتمل، ارزیابی و بررسی کرد.
- می‌توان از مواد مختلف به عنوان منبع حریق در تونل استفاده و شرایط را تحلیل کرد؛ به عبارت دیگر عوامل مهمی همچون تابش ناشی از حریق، طول شعله و یا سایر عوامل مرتبط که از نوع حریق نشأت می‌گیرند می‌توانند به عنوان موضوع‌های تکمیلی در نظر گرفته شوند.

منابع و مراجع

رشیدی، پ.، مظفری، ع.، مدنی، ح.، طراحی سیستم تهویه تونل ملت و شبیه‌سازی آتش به کمک نرم‌افزار Fluent، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین - دانشکده مهندسی معدن. ۱۳۹۰.

پیربدایی، م.، امامی، م.، شبیه‌سازی عددی آتش و دود در تونل با در نظر گرفتن اثرات تشعشع و جابه‌جایی آزاد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۹۱.

رئوفی، م.، مظاهری، ک.، بررسی تأثیر تهویه طولی روی آتش‌سوزی‌های بزرگ در تونل‌های بین‌شهری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۹۲.

شجاعی‌فرد، م.، هشترودی، ع.، مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۷۹.

شهابی‌فر، مریم، تخمین ذخیره کانسار با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، کنفرانس مهندسی معدن ایران، ۱۳۸۳.

ماپار، م.، حیدری‌نژاد، ق.، شبیه‌سازی عددی رفتار حریق در تونل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۲.

محمدی، ح.، حسینعلی‌پور، م.، شبیه‌سازی پخش دود در تونل قطارهای زیرزمینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۸۹.

مدنی، ح.، تونل‌سازی، جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.

مسقانی، م.، مهریار، ر.، شبیه‌سازی عددی جریان سیال و انتقال حرارت همراه با انتشار دود ناشی از آتش‌سوزی در تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، ۱۳۸۹.

نبهانی، ح.، مکانیک سیالات، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، جلد ۱، ۱۳۹۱.

نعمت‌الهی، ن.، آمار و احتمالات مهندسی، انتشارات دالفک، ۱۳۹۴.

نیکنام، ب.، مدنی، ح.، سالاری‌راد،. تعیین سرعت بحرانی در خلال آتش‌سوزی تصادف در تونل البرز، نشریه
امیرکبیر، سال چهل و چهار، شماره ۱، ۱۳۹۱.

هرندی، ف.، جمشیدی، ف.، فرهادی‌کیا، ع.، جوادی، م.، روش آماری مناسب برای ساخت مدل عرضه‌ی
نیروی کار با توجه به ویژگی‌های مغیر پاسخ، پژوهشکده‌ی آمار، ۱۳۸۴.

Anthony, D., Putorti, J., (2015) computer fire models, www.interfire.org/res_files/firemod.asp.

Atkinson G. T., Wu Y, (1996), Smoke control in sloping tunnels, Fire Safety Journal, vol. 27, pp. 335-341.

Axelsson, J., Andersson, P., Lönnermark, A., Hees, P., Wetterlund, I., (2001), Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI, SP Swedish National Testing and Research Institute, Nordtest Technical Report 477, Nordtest Project No. 1480-00.

Berry, M. J. A., Linoff. G., (1997), Data mining techniques, John Wiley & Sons.

Bertola, V., Cafaro, E., (2009), Deterministic–stochastic approach to compartment fire modeling, Proc. Royal Society, pp. 1029–1041.

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

Boehm, M., Fournier, L., Truchot, B., (2008), smokes stratification stability: presentation of experiments, 4th International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz.

Brahim, K., Mourad, B., Afif, E., Ali, B., (2013), Control of Smoke Flow in a Tunnel, Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 1, pp. 49-60.

Brinckerhoff, P., (1995), Memorial tunnel fire ventilation test program, test report, Massachusetts highway department.

Camby, M.K., Eric, L., W.M., Alvin, C.K., (2012), Impact of location of jet fan on airflow structure in tunnel fire, Tunnelling and Underground Space Technology, pp. 30-40.

Carvel, R., (2010), Fire Dynamics during the Channel Tunnel Fires, Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security.

Carvel, R., Beard, A., (2012), the influence of tunnel ventilation on fire behavior, Handbook of Tunnel Fire Safety, pp. 3-21.

Chen, L., Hu, L., Zhang, X., Yang, L. (2015). Thermal buoyant smoke back-layering flow length in a longitudinal ventilated tunnel with ceiling extraction at difference distance from heat source, Applied Thermal Engineering, vol. 78, pp. 129-135.

- Colella, F., (2010), Multiscale Modelling of Tunnel Ventilation Flows and Fires, Phd Thesis.
- Croce, P., Xin, Y., (2005), Scale modeling of quasi-steady wood crib fires in enclosures, *Fire Safety Journal*, Vol. 40, pp. 245-266
- 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.
- Dowd, P., Sarac, C., (1994), Aneural Network Approach to Geostatistical Simulation, *Mathematical Geology*, Vol. 26, No.4, pp. 491-503.
- ERRAC Roadmaps, Metro, light rail and tram systems in Europe, (2009).
- FDS User Guide, (2017).
- Fire & rescue incident statistics, England, year ending September 2019.
- Ge, J., todd, B., Wu, G., Sadus, R., (2003), Scaling behavior for the pressure and energy of shearing fluids, *Physical review*, pp. 1-3.
- Guo, X., Zhang, Q., (2014), Analytical solution, experimental data and CFD simulation for longitudinal tunnel fire ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 42, pp. 307–313.
- Guo, Y., Yuan, Z., Yuan, Y., Cao, X., Zhao, P., (2020), Numerical simulation of smoke stratification in tunnel fires under longitudinal velocities, *Underground Space*, Vol. 5, pp. 1-10.
- Haack, A., Current safety issues in traffic tunnels, (2002), Internet access at: <https://www.ita-aites.org/en/component>, (2016-10-06).
- Hartman, H., Mutmansky, J., Ramani, R., Wang, Y., (1997), mine ventilation and air conditioning, john wiley & sons.
- 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.
- Huggett, C., (1980), Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements, Center for Fire Research.
- Hyung KO, G., Kim, S., Ryou, H., (2010), An Experimental Study on the Effect of Slope on the Critical Velocity in Tunnel Fire, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 28, issue 1, <http://jfs.sagepub.com/content/28/1/27>.
- Ingason, H. B., (1997), In-Rack Fire Plumes, *Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium*, pp. 333-344.

- Ingason, H., (2012), *Fire Dynamics in Tunnels*, 2nd Edition ICE Publishing, London, pp 273–304.
- Ingason, H., Li, Y., Lonnermark, I., (2014), *Tunnel Fire Dynamics*.
- Ingason, H., Li, Y., Lonnermark, A., (2015), Runehamar tunnel fire tests, *Fire Safety Journal*, Vol. 71, pp. 134-149.
- Ingason, H., Li, Y., Lonnermark, A., (2011), Model scale tunnel fire tests with point extraction ventilation, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 21, pp. 5-36.
- Karlsson, B., Quintiere, J., (2000), *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press.
- Kelly A., Giblin, P., (1997), the Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, *Ashrae journal*.
- 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.
- Lee, S. R., & Ryou, H. S. (2005). An experimental study of the effect of the aspect ratio on the critical velocity in longitudinal ventilation tunnel fires. *Journal of Fire Sciences*, vol. 23, pp. 119-138.
- Li, Y., Lei, B., Ingason, H., (2010), Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, *Fire Safety Journal*, Vol. 45, Issues 6–8, pp. 361–370.
- Lonnermark, A., (2005), on the characteristics of fires in tunnels, Phd thesis.
- Lonnermark, A., Persson, B., Ingason, H., (2003), Pulsations during large-scale fire tests in the Runehamar tunnel, *Fire Safety Journal*, vol. 42, pp. 377-389.
- Maevski, I., (2016), recommended AASHTO guidelines for emergency ventilation smoke control in roadway tunnels, AASHTO Standing Committee on Highways.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, F., Weinschenk, C. and Overholt, K., (2016), *Fire Dynamics Simulator, User's Guide*, NIST Special Publication.
- Modic, J. (2003). Fire simulation in road tunnels. *Tunnelling and underground space technology*, vol.18, pp. 525-530.
- National Cooperative Highway Research Program, *Design Fires in Road Tunnels*, (2011), NCHRP SYNTHESIS 415.

- Nelson, G., (1998), Carbon Monoxide and Fire Toxicity: A Review and Analysis of Recent Work, *Fire Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 39-58.
- Oka, Y., Atkinson, G., (1995), Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, Vol. 25, pp. 305-322.
- Perricone, J., Wang, M., Quintiere, J., (2007), Scale Modeling of the Transient Thermal Response of Insulated Structural Frames Exposed to Fire, *Fire Technology*, Vol. 44, pp. 113-136.
- PIARC Committee on Road Tunnels, (1999), fire and smoke control in road tunnels.
- Pucher, R., Pucher, K., (2004), Longitudinal and Transverse Ventilation in Road Tunnels, *CREATIVE MATH*, Vol. 13, pp. 51- 57.
- Purser, P., (2002), Toxicity assessment of combustion products, In: *The SFPE handbook of fire protection engineering*. 3 rd edition.
- Quintiere, J., (1989), Scaling Applications in Fire Research, *Fire Safety Journal*, Vol. 15, pp. 3-29.
- Roh, J., Ryou, S., Kim D., Jung, W., Jang, Y., (2007), Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 22, pp. 262–271.
- Shannon, R.E., (1975), *Systems Simulation, the Art and Science*, Prentice-Hall.
- Simonson, M., Tuovinen, H., Emanuelsson, V., (2000), formation of hydrogen cyanide in fires, *SP Swedish experimental investigation*.
- Souza, E., (2002), Mine Ventilation, proceedings of the north american/ninth us mine ventilation symposium.
- Steckler, K., Baum, H., Quintiere, J., (1986), Salt water modeling of fire induced flows in multicompartiment enclosures, *Naval Ship Research and Development Center*.
- Sturm, P., Beyer, M., Rafiei, M., (2015), On the problem of ventilation control in case of a tunnel fire event, *Case Studies in Fire Safety*, in press.
- Thomas, P., (1958), the movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires.
- Tilley, N., Rauwoens, P., & Merci, B. (2011), Verification of the accuracy of CFD simulations in small-scale tunnel and atrium fire configurations, *Fire Safety Journal*, vol. 46, pp. 186-193.
- Tsai, C., Chen, H., & Lee, K., (2010). Critical ventilation velocity for multi-source tunnel fires. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 98, pp. 650-660.

Users Guide for the CFI software, (2008).

Vauquelin, O., & Telle, D., (2005). Definition and experimental evaluation of the smoke “confinement velocity” in tunnel fires, *Fire Safety Journal*, vol. 40, pp. 320-330.

Vauquelin, O., & Wu, Y., (2006). Influence of tunnel width on longitudinal smoke control, *Fire Safety Journal*, vol. 41, pp. 420-426.

Vega, M. G., Díaz, K. M. A., Oro, J. M. F., Tajadura, R. B., & Morros, C. S. (2008). Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: memorial tunnel case. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 539-551.

Voeltzel, A., Dix, A., (2004), a comparative analysis of the mont blanc, tauern and gotthard tunnel fires.

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

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

www.nist.gov/fire/fire/behavior.cfm. 2013.

www.promat-tunnel.com/en/advices/full-scale-fire-test/ radiation %20level %20near. date: 2016-07-01.

Zhai, L., Nong, Z., He, G., Xie, B., Xu, Z., Zhao, J., (2020), Experimental Investigation on the Discharge of Pollutants from Tunnel Fires, *Sustainability Journal*, vol. 2, pp. 1-12.

Zhang, S., Shi, L., Wang, J., Li, X., Han, Y., He, K., Cheng, X., (2019), Critical ventilation velocity of two fire sources with different separating distances in road tunnel, *Journal of Fire Sciences*, pp.1-20.

Zhen Li, Y., Ingason, H., (2015), Fire-induced ceiling jet characteristics in tunnels under different ventilation conditions, *BRANDFORSK Project 306-131*.

Zigar, D., Jovanovic, D., Zdravkovic, M., (2011), Cfd Study Of Fire Protection Systems In Tunnel Fires, *Safety Engineering*, pp.11-16.

Abstract

Due to the increasing application of the tunnels in today's world and their closed and lengthy atmosphere, safety enhancement and fire accident control-related designs are many design engineer's concerns. In the interim, the airflow velocity control during the fire is directly related to the lives of the present people in the tunnel, and the lack of accurate supply of this flow and its proper velocity, also known as the critical velocity, can cause irreparable damages. The main focus of this thesis was to determine the critical and practical variables considering the proposal of a model closer to reality to estimate the critical velocity with a higher accuracy based on the state of each tunnel and to take a step toward improving safety. The first step in this thesis was to identify 14 effective parameters on fire; some of these parameters were deleted. In the end, the tunnel length, cross-section, transverse displacement, geometric curve, and HRR parameters were considered the primary and input variables to the model, respectively, and by using the numerical simulations in different scenarios, the effect of the many parameters on the critical velocity was evaluated. The estimation methods were used to estimate the critical velocity in the second step by creating a physical model and simulating different scenarios. According to the obtained results, the coefficient of determination for the multiple linear regression, non-linear, and the artificial neural network was 0.84, 0.95, and 0.97, respectively, and the root-mean-square deviation was 0.082, 0.045, and 0.02 that indicate better performance of the artificial neural network model and is selected as the critical velocity estimator model. In order to evaluate the estimator model, in the third step, the actual fire data in two large-scale tunnels were compared to the final model's results. The estimator model's results estimated the critical velocity of 2.46 meters per second in the Memorial tunnel fire by approximately 0.08 decreasing difference. The critical velocity was determined to be 2.55 meters per second in the Runehamer tunnel fire by approximately 0.05 increasing difference. By using the obtained results, it can be found that the estimator model is reliable to a great extent and has shown an acceptable estimating ability.

Keywords:

Tunnel fire, Critical velocity, Small-scale modelling, Critical velocity estimation



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mineral Exploitation

Physical and numerical simulations of critical velocities in road tunnel fires under longitudinal ventilation

By: Yahya Shams Gardekaneh

Supervisors:

Prof. Farhang Sereshki

Prof. Reza Kakaie

September, 2021