بررسی سناریوی آتش‌سوزی در تونلها مقایسه‌ای بین مدل‌های منطقه‌ای و می

علیرضا نفریه

کلمات کلیدی: آتش، تونل، مدل‌های منطقه‌ای

خلاصه

برخی آتش‌سوزی‌های ۲۵ سال گذشته در تونل‌های جاده‌ای و ریلی سبب وقوع تلفات جانی و مالی بسیاری در دنیا شده است به‌نحوی‌که موجب توجه هرچه بیشتر جامعه مهندسی به موضوع ارزیابی ایمنی سازه تونل‌ها، در زمان آتش‌سوزی و پس آن شده است. به این خاطر یک توصیف واقع‌بینانه از انتشار آتش و تصویر قابل‌اطمینان از میدان حرارتی ایجادشده در اثر آن به‌منظور ارزیابی تأثیر بار حرارتی به دیواره تونل و پارتیشن‌های آن ضروری است.

در این مقاله به شبیه‌سازی رفتار حریق در تونل با استفاده از کد متن‌باز FDS پرداخته‌شده است.

با فرض یک تونل جاده‌ای با سطح مقطع هندسی معمولی، سه نوع ورودی حرارتی محتمل یعنی احتراق یک خودروی سواری، یک اتوبوس و یک وسیله نقلیه سنگین (تریلی) می‌تواند به‌عنوان بیان‌کننده بسیاری از سطوح آتش‌سوزی محتمل در نظر گرفته شود.

در ابتدا سناریوی آتش‌سوزی با استفاده از یک کد ساده اما مفید بر اساس یک مدل دو منطقه‌ای برای مدل‌سازی آتش‌سوزی هر اتاقک فرضی در تونل طراحی شد. در ادامه، کد پیچیده‌تری بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان ناشی از آتش‌سوزی (Simu- Dynamics Fire lator -FDS) در تونل استفاده گردید. سپس مقایسه‌ای بین نتایج عددی به‌دست‌آمده از این دو روش با نتایج تجربی تونل‌های مشابه‌صورت پذیرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با تقسیم صحیح تونل به تعداد مناسبی اتاقک فرضی نتایج بسیار نزدیکی بین دو نوع محاسبه عددی به دست آمد. همچنین اعداد به‌دست‌آمده از نتایج محاسباتی و

ی جاده‌ای:
دانی

تجربی نیز تقریباً یکسان بودند.

مقدمه

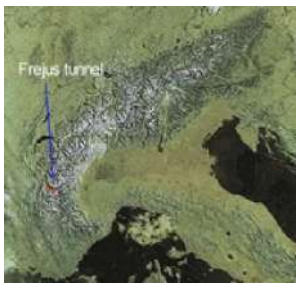
ازجمله سوانح فاجعه‌بار در تونل‌های جاده‌ای و ریلی می‌توان به آتش‌سوزی در سال‌های اخیر اشاره نمود که دلیل آن‌که دسترسی به این مکان‌ها در زمان امدادرسانی و پیچیدگی بابت بحث اطفاء حریق در این فضاها در صورت رخداد حادثه بسیار دشوار است. به دلیل استفاده میلیون‌ها نفر انسان و صدها هزار وسیله نقلیه سنگین از این تونل‌ها که موجب پویایی اقتصادی می‌گردد ایمنی تونل‌ها در برابر آتش‌سوزی بسیار موردتوجه قرارگرفته است. مدل‌سازی آتش‌سوزی در تونل‌ها کار دشواری است –علاوه بر مشکلات ذاتی مدل‌سازی آتش (از احتراق تا آتش، گسترش دود و اندرکنش سیال و جامد)- عوامل دیگر مانند تهویه اجباری، عدم قطعیت از میزان ترافیک وسایل نقلیه و نحوه منحصربه‌فرد محصور بودن تونل نقش اساسی در مدل‌سازی ایفا می‌کند.

مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی شرایط آتش‌سوزی در تونل‌ها ایجادشده‌اند، از مدل‌سازی عددی ساده گرفته تا مدل‌سازی عددی و محاسباتی پیچیده مدل‌های منطقه‌ای و میدانی و نهایتاً بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی (FDS) می‌توان نام برد. با در نظر گرفتن یک تونل جاده‌ای معمولی (تونل فرجوس، شکل ۲)، میدان حرارتی مدل گردید و بر اساس سه سناریوی آتش‌سوزی مطابق با سه سطح شدت آتش‌سوزی خودرو سواری، اتوبوس و تریلی مورد ارزیابی قرار گرفت.

میدان حرارتی (میانگین توزیع دمای هر اتاقک) داده‌های ورودی برای انواع محاسبات جهت ایمنی افراد (به‌عنوان‌مثال شار حرارتی ایجادشده و انتشار دود) همچنین ایمنی سازه‌ای (دیواره تونل و پارتیشن‌های سقف) به‌کاربرده می‌شود.

میدان حرارتی حاصل از سوختن یک وسیله نقلیه (خودرو سواری، اتوبوس یا تریلی) در ابتدا با استفاده از یک مدل دو منطقه‌ای (مدل تلفیقی انتشار آتش و دود -CFAST) به دست آمد و سپس با نتایج آزمایش‌های واقعی مقایسه گردید که کاملاً رضایت‌بخش بود (آزمایشات در دهه نود قرن گذشته با قرار دادن تعدادی واقعی وسایل نقلیه در معرض آتش انجام‌شده است). در ادامه یک مدل میدانی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی-CFD- در مدل‌سازی گسترش آتش استفاده شد.

PYROSIM .

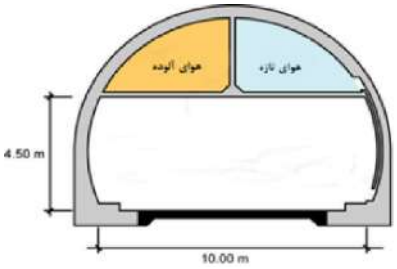


شکل۱- موقعیت تونل فرجوس در مسیر آلپ غربی، بین فرانسه و ایتالیا (ششمین تونل طویل جاده‌ای در دنیا) [۲].

معمولا مدل‌سازی بر اساس کد CFAST، جهت

تحلیل فضای ساختمان استفاده گردیده است. در این مدل‌سازی هر اتاق به دولایه تقسیم می‌شود. سپس توزیع طولی دما برای سه سطح شدت آتش‌سوزی ارائه می‌گردد.

شکل ۲- سطح مقطع تونل فرجوس.



آتش‌سوزی در تونل‌های جاده‌ای و مطالعه موردی تونل فرجوس در ۲۴ مارس ۱۹۹۹، آتش‌سوزی بزرگی در تونل مونت بلانک تقریباً در میانه مسیر ورودی غربی (در فرانسه) و ورودی شرقی (در ایتالیا) پس از احتراق خودبه‌خود یک تریلی با بار مارگارین و آرد رخ داد.

آتش‌سوزی اولیه گسترش یافت و به شدیدترین آتش‌سوزی تونل در تاریخ تونل‌های عبوری از آلپ با ۳۹ کشته و خسارات گسترده و بسیار جدی به تجهیزات، دیواره و دال فوقانی تونل بدل شد. آتش‌سوزی‌های معروف در تونل مونت بلانک، تائورن (کارتنن، اتریش در می ۱۹۹۹ با ۱۲ کشته) و در تونل سنت گوتارد (بین کانتون تیچینو و کانتون اوری، سوئیس در اکتبر ۲۰۰۱ با ۱۱ کشته)، قانون‌گذاران را بر آن داشت تا سطح ایمنی در تونل‌ها را با اعمال محدودیت سرعت (۷۰ کیلومتر در ساعت) و فاصله بین وسایل نقلیه (۱۵۰ متر) افزایش دهند.

سطح ایمنی تونل فرجوس به طول ۱۳ کیلومتر (بین فرانسه و ایتالیا، در قسمت غربی کوه‌های آلپ، با عبور ۸۰ درصد ترافیک بین‌المللی و با ۲۰ میلیون وسیله نقلیه در طول ۲۵ سال از زمان آغاز به کار آن شکل ۱) با استفاده از جدیدترین حس‌گرهای تشخیص دود و شعله، دوربین‌های فیلم‌برداری برای نظارت بر سرعت ترافیک، حس‌گرهای دمای متصل به اتاق کنترل، پاشنده آب در هر ۱۳۰ متر که با مخازن بزرگ آب تغذیه می‌شوند افزایش یافت. همچنین ایمنی با ایجاد یازده اتاق ایمنی در طول تونل ایجادشده بود که هرکدام از آن‌ها دارای تلفن و بلندگو بودند با تغذیه هوای تازه از مجاری تهویه جداگانه و با درب ضد آتش به طرز قابل‌ملاحظه ای بهبودیافته بود. علیرغم این اقدامات، در تاریخ ۴ ژوئن ۲۰۰۵ دو تریلی در تونل فرجوس آتش گرفتند که باعث مرگ رانندگان اسلواکی آن شد. به دلیل خسارات احتمالی مرتبط با حرارت، دسترسی به تونل به مدت چند هفته مسدود شد تا اینکه نسبت به اصلاح خسارات به وجود آمده اقدام شد.

این تونل به دلیل هندسه نسبتاً معمول آن (مقطع مستطیلی برای عبور ترافیک و مسیرهای هوایی برای ورود هوای تازه و خروج گازهای خروجی، شکل ۲) به‌عنوان نمونه موردبررسی در این مطالعه در نظر گرفته شد، سپس تغییراتی جزئی در آن اعمال شد.

مقطع مستطیل تونل، به عرض ۱۰ متر و به ارتفاع ۴,۵ متر بوده و سطوح سقف و دیواره‌های تونل بدون انقطاع فرض می‌شود (شکل ۳). در مدل‌سازی سناریوی آتش‌سوزی با سه سطح شدت، حریق خودرو سواری، اتوبوس و یک تریلی در نظر گرفته شد. محاسبات با فرض طول تونل ۲۲۰ متر (به دلیل برخی محدودیت‌های کدهای عددی و اتاقک‌های فرضی) انجام شد و محل وقوع حریق در وسط تونل در نظر گرفته شد.

در ابتدا، آتش با استفاده از یک مدل منطقه‌ای شناخته‌شده و نسبتاً ساده (CFAST) مدل شد و نتایج حاصله با نتایج یک مدل پیچیده بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی (FDS) مقایسه گردید.

شکل ۳- محل منبع آتش و اتاقک‌های معرفی‌شده در مدل آتش‌سوزی وسایل نقلیه با استفاده از CFAST.

در این محاسبات اتاقک مرکزی اتاقک شماره صفر نامیده می‌شوند.

مدل منطقه‌ای- CFAST

مدل‌های منطقه‌ای ساده‌ترین نوع مدل‌های محاسباتی هستند. در این نوع مدل، محفظه‌ای را که آتش‌سوزی در آن رخ می‌دهد، به اتاقک‌های مختلف تقسیم که هر اتاقک به تعدادی کنترل حجم با شرایط یکنواخت در هر اتاقک (مانند دما، گاز، سرعت دود، چگالی) فرض می‌کنند. مدل‌های منطقه‌ای بر پایهٔ اصل بقای جرم و انرژی در اتاقک آتش می‌باشند.

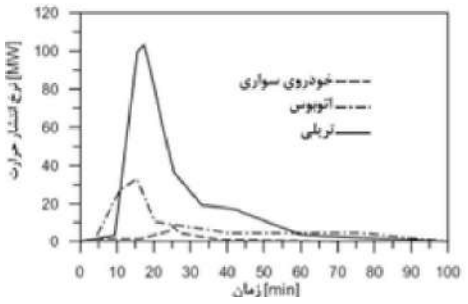
معادلات برای هر کنترل حجم با در نظر گرفتن منابع مختلف حرارتی (آتش، شعله، بازشوها و ...) و همین‌طور فرآیندهای مختلف کنش بین کنترل حجم‌ها (مانند تابش گرما و همرفت) به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌های منطقه‌ای را می‌توان نسخه ساده‌تری از مدل‌های میدانی داشت که هر اتاقک را به‌عنوان یک سیستم دوبعدی یا سه‌بعدی با پارامترهای مرتبط و متنوع در نظر می‌گیرد.

اغلب مدل‌های منطقه‌ای هر اتاقک را به دولایه، (یک‌لایه گرم در بالا و یک‌لایه سرد در پایین) و هر لایه را با توزیع یکنواخت دما، دود و غلظت گاز تقسیم می‌کنند. این یک ساده‌سازی ریاضی قابل‌ملاحظه از یک مسئله فیزیک است که بدون به وجود آمدن اشکال عمده در نقش پارامترهای اصلی مدل که با کاهش قابل‌توجه زمان پردازش همراه می‌باشد.

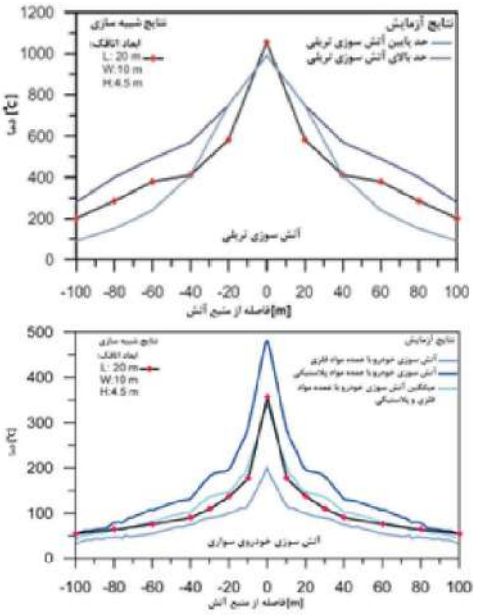
در مورد یک تونل استفاده از یک مدل منطقه‌ای (مانند CFAST) موضوع به‌آسانی که تصور می‌شود نیست به علت آنکه تونل‌ها فاقد اتاقک می‌باشند؛ بنابراین تونل باید به تعدادی اتاقک فرضی که با ابعادی به‌اندازه دهانه تونل

به هم متصل می‌شوند تقسیم گردد. طول هر اتاقک از طریق نتایج آزمایشات تجربی به دست می‌آیند.
در مورد پارامترهای فیزیکی موردنیاز در CFAST، حداکثر میزان انتشار حرارت، نرخ رشد آتش، دمای احتراق، دمای اولیه سوخت، نوع آتش، نوع مواد در معرض سطوح خارجی و شرایط اولیه محیط باید مشخص گردد. در مورد پارامترهای هندسی تعداد اتاقک‌ها، بازشوهای هر اتاقک (ابعاد و ارتفاع آن‌ها)، ارتفاع سقف و سطح مقطع تونل باید مشخص شوند.
CFAST می‌تواند گسترش دود، گازهای حاصل از سوختن و دما را در هرلحظه در هر اتاقک برای تمام اندازه‌های بین ۱ مترمکعب و ۱۰۰۰ مترمکعب محاسبه کند.
مدل‌سازی معادلات مورداستفاده در CFAST به شکل ریاضی، مسئله‌ای با مقدار اولیه منجر به حل معادلات دیفرانسیل معمولی می‌گردد که با فرض حفظ جرم و انرژی (قانون اول ترمودینامیک)، گاز ایده آل و روابط متناسب بین چگالی و انرژی داخلی عمل می‌کند. شرایط مرزی ثابت فرض می‌شوند.
CFAST می‌تواند حداکثر ۳۰ اتاقک را شبیه‌سازی کند، اما گاهی وقتی تونل به بیش از ۱۵ اتاقک تقسیم شود، با مشکلاتی جهت اجرای آن مواجه می‌شود. ازاین‌رو، در این مطالعه تونل به ۱۱ اتاقک تقسیم می‌شود (شکل ۳) که اتاقک شماره صفر حاوی منبع آتش و ۵ اتاقک متقارن در هر دو طرف اتاقک صفر که فاقد منبع گرما می‌باشند، در نظر گرفته می‌شود.
تعدادی شبیه‌سازی با استفاده از CFAST برای مقادیر مختلف طول اتاقک با همان مقطع انجام شد، سپس حداکثر دمای هر اتاقک (دمای لایه بالا «گرما») با نمودارهای ارائه‌شده در مرجع مقایسه گردید، تجزیه‌وتحلیل نتایج نشان داد طول یک اتاقک دو برابر عرض آن (۲۰ متر نسبت به ۱۰ متر) باعث نزدیکی بسیار زیاد نتایج آزمایش تجربی ازنظر دمای هر اتاقک با CFAST می‌گردد.
CFAST اجازه معرفی ابعاد دقیق خودرو در حال سوختن را می‌دهد (نرخ انتشار حرارت- شکل ۴- بر اساس سایز اتاقک صفر).



شکل۴- نرخ انتشار حرارت سه وسیله نقلیه مورد بررسی در این مطالعه: خودرو سواری، اتوبوس و تریلی [۲].

در شکل (۵) همان‌طور که مشهود است در طول انجام آزمایشات نسیم ملایمی از چپ به راست می‌وزید به همین خاطر پروفایل دما کاملاً متقارن نیست. ازاین‌رو در مورد آتش‌سوزی خودرو سواری دو منحنی در شکل (۵-الف)، بیانگر دو سمت بخش اصلی آتش می‌باشند. در مورد آتش‌سوزی تریلی، حداکثر دما با محل بخش اصلی آتش مطابقت نداشت ازاین‌رو محل دمای حداکثر به‌عنوان بخش اصلی آتش در نظر گرفته شد (شکل ۵-ب) برای جزئیات بیشتر به نفریه [۲] مراجعه کنید.



شکل ۵- مقایسه نتایج آزمایشات تجربی با محاسبات عددی ازنظر حداکثر درجه حرارت در امتداد محور تونل: (الف) آتش‌سوزی خودرو سواری و (ب) آتش‌سوزی تریلی.

مدل میدانی- FDS
سه نوع آتش‌سوزی مذکور (سوختن خودرو سواری، اتوبوس و تریلی) با استفاده از مدل میدانی (FDS) مدل گردید.
تقسیم اتاقک‌ها به همان صورت که برای CFAST در

نظر گرفته شد، انجام شد.
اندازه منبع آتش در اتاقک صفر نیز یکسان بود. مقادیر حداکثر دما در مراحل مختلف زمانی در اتاقک صفر در جدول (۱) نشان داده‌شده است. علیرغم پیچیدگی مسئله و تفاوت بین این دو مدل – CFAST و FDS– نتایج بسیار نزدیکی به دست آمد برای جزئیات بیشتر به نفریه [۲] مراجعه کنید.

آتش	تست واقعی	محاسبات عددی	
	حداکثر دما [°C] (EUREKA,1995) (تست بر روی وسیله نقلیه)	حداکثر دما [°C] - Extended CFAST (مدل منطقه ای)	حداکثر دما [°C] - Pyrosim (مدل میدانی)
خودرو سواری	۳۵۰	۳۵۸	۳۵۴
اتوبوس	۸۰۰	۸۶۰	۸۳۸
تریلی	۱۰۰۰	۱۰۸۰	۱۰۶۷

جدول ۱– حداکثر درجه حرارت در اتاقک صفر در محاسبات با CFAST و FDS، برای مدت‌زمان‌های مختلف آتش و وسایل نقلیه مختلف در حال سوختن.

نظرات و نتایج پایانی

با استفاده از یک مدل دو منطقه‌ای مانند CFAST برای یک تونل و با در نظر گرفتن طول اتاقک دو برابر عرض مقطع این امکان به وجود می‌آید که نتایج بسیار نزدیکی با آنچه در مورد یک تونل واقعی با سطح مقطع تقریباً مربعی که در آن وسایل نقلیه مختلف جاده‌ای به‌طور هدفمند در دهه نود آتش زده شدند (پروژه، ۱۹۹۵) به دست آید.
همان‌طور که در شکل (۵– الف) نشان داده‌شده است، میدان حرارتی ناشی از سوختن یک خودرو سواری «میانگین» (عمده با مواد پلاستیکی و عمده با مواد فلزی) با مقادیر به‌دست‌آمده از محاسبات انطباق خوبی دارد.
در مورد آتش‌سوزی تریلی (۵– ب) حداکثر دما و میدان حرارتی بسیار به مقادیر آزمایشات تجربی نزدیک بودند.
داده‌های یکسان ورودی (ازنظر تعداد، اندازه اتاقک‌ها، سرعت انتشار حرارت وسایل نقلیه در حال سوختن و اندازه آتش‌سوزی‌ها) در کد FDS که بر اساس مدل میدانی عمل می‌کند نتایج همان‌گونه که در جدول شمار (۱) ارائه‌شده است به صورتی که اختلاف محاسبات دو کد از ۲٫۳ درصد تا ۷٫۵ درصد بالاتر از مقادیر به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشات تجربی بود.
مقایسه نتایج حاصل از FDS و نتایج به‌دست‌آمده در تونل واقعی با آنچه از طریق CFAST برای شدت‌های مختلف آتش‌سوزی به دست آمد کاملاً مطابقت داشت به‌شرط آنکه ابعاد اتاقک به طرز صحیحی در نظر گرفته شود. با توجه به این نکته، پیشنهاد می‌گردد محاسبات بیشتری باید انجام گیرد تا مشخص گردد آیا نسبت ۲ به ۱ بین طول و عرض اتاقک عمومیت دارد یا به شکل مقطع تونل نیز بستگی دارد.