

بررسی مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی و انتشار دود در فضاهای سر بسته

مصطفی منفرد مسقانی^۱، رضا مهریار^۲

۱ دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، mmonfared@mut.ac.ir

۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۲

چکیده

شبیه‌سازی گسترش آتش و انتشار دود در فضاهای بسته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به‌وسیله آن می‌توان نقائص و مشکلات سیستم کنترل آتش را مشخص نمود و حتی پیشنهاداتی برای تغییر وضعیت معماری فضای مورد نظر ارائه داد. به‌طور کلی مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی آتش و انتشار دود را می‌توان به دو دسته مدل‌های ناحیه‌ای و مدل‌های میدانی تقسیم کرد. مدل‌های ناحیه‌ای یک‌بعدی‌اند و ساده‌ترین نوع آن، مدل‌های کامپیوتری می‌باشد. از طرفی، مدل‌های میدانی برای فضاهای دوبعدی یا سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در واقع همان روش‌های شبیه‌سازی عددی هستند که برای حل به کامپیوترهای قدرتمند نیاز دارند. در این مقاله ویژگی‌های آتش و دود، خطرات ناشی از آن در فضاهای بسته و برخی پارامترهای مهم برای شبیه‌سازی آتش از جمله نرخ تولید دود و نرخ حرارت آزاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. سپس مدل‌های مختلف مورد استفاده برای شبیه‌سازی آتش و انتشار دود ارائه و مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: آتش، فضای سر بسته، شبیه‌سازی، انتشار دود، نرخ حرارت آزاد شده

۱. مقدمه

است در هر لحظه صدمات جبران‌ناپذیری وارد نمایند. در یک آتش‌سوزی واقعی این مشخصه‌ها به‌طور پیوسته تغییر می‌کنند [۱]. تحلیل مربوط به شبیه‌سازی آتش براساس متغیرهایی به‌صورت توابعی از زمان انجام می‌شود. این پدیده به‌صورت قسمتی از تحلیل کامپیوتری و یا براساس نتایج تجربی مشخص می‌گردد. در گذشته از مدل‌های تجربی برای شبیه‌سازی آتش استفاده می‌شد. دقت این مدل‌ها به‌دلیل شباهت آنها با شرایط واقعی زیاد است، اما از طرف دیگر به‌دلیل اندازه مدل و هزینه بالا، استفاده از این نوع مدل‌ها تا حدودی مشکل می‌باشد.

آتش‌سوزی در فضاهای بسته به‌دلیل محدودیت‌های مکانی و زمانی که می‌تواند منجر به صدمات قابل توجه انسانی و مالی شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آتش‌سوزی در محیط‌های سر بسته دارای سه منبع اصلی خطر شامل، حرارت، تولید دود و کاهش اکسیژن است. نسبت مشارکت هر یک از خطرات به مشخصات فیزیکی آتش از قبیل نرخ حرارت آزاد شده، منبع سوخت و میزان اکسیژن موجود بستگی دارد. این مشخصات با برخی پارامترهای دیگر نظیر شکل ساختاری محل وقوع آتش‌سوزی و فاصله از منبع حرارت ترکیب شده و ممکن

مدل‌های تحلیلی کامپیوتری برای پیش‌بینی رفتار آتش از سال ۱۹۷۰ م شروع و همراه با پیشرفت سایر فناوری‌های نرم‌افزاری، با دقت بیشتر برای بیشتر کاربردهای مهندسی در حال پیشرفت می‌باشند. شبیه‌سازی آتش نسبتاً پیچیده است و محدوده وسیعی از علوم کامپیوتر، روش‌های عددی، دینامیک آتش و علم شیمی را شامل می‌شود [۲-۳].

هدف این پژوهش، گردآوری داده‌ها و روش‌های اولیه برای مطالعه گسترش آتش و شبیه‌سازی دود ناشی از آن است. برای این منظور، ابتدا ویژگی‌ها و مراحل گوناگون ایجاد آتش بیان می‌شود، سپس مدل‌های قابل استفاده برای بررسی انتشار دود و حرارت، که شامل مدل‌های میدانی و ناحیه‌ای می‌باشد، ارائه می‌گردد و نرم‌افزارهای مختلف برای شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های موجود بیان می‌شود.

۲. خطرات ناشی از آتش‌سوزی

مشهودترین خطر در ارتباط با آتش، حرارت یا همان گرمای تولیدشده است. یک قربانی در حال فرار از محل آتش‌سوزی در یک فضای بسته، تحت تأثیر انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع قرار می‌گیرد. انتقال حرارت زیاد به پوست، سبب سوختن، درد شدید و در نتیجه عدم توانایی و در نهایت مرگ می‌شود. نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی از هوای داغ به سطح بدن، به دمای هوا، میزان عایق‌بندی لباس و رطوبت هوا بستگی دارد. معمولاً در هر آتش‌سوزی درصدی از حرارت به‌صورت تشعشع منتقل می‌شود. همچنین یکی دیگر از خطرات ایجادشده به‌وسیله آتش، استنشاق هوای داغ با دمایی در حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر از آن است که سبب تخریب شدید سیستم دستگاه تنفسی می‌شود [۱]. هنگام آتش‌سوزی، اکسیژن موجود در هوا با سوخت واکنش داده و به سرعت درصد آن در هوا کاهش می‌یابد. اگرچه در حالت کلی کاهش اکسیژن مسئله اصلی ایجاد خطر در اثر آتش‌سوزی در فضاهای بسته نمی‌باشد، اما خطرات ناشی از قطع شدن اکسیژن برای زمانی بیشتر از ۳ دقیقه بسیار زیاد خواهد بود. میزان کاهش اکسیژن به مشخصات فیزیکی آتش و شرایط محیطی از قبیل نرخ حرارت آزادشده از آتش و میزان منبع هوای قابل دسترسی بستگی دارد [۱].

سومین خطر در هنگام آتش‌سوزی تولید و انتشار دود است. منظور از دود تمام محصولات تجزیه‌شده در اثر حرارت و احتراق

مواد است که در فضای اطراف گسترش می‌یابد. دود شامل ذرات دوده، گازهای سمی و ذرات معلق در هوا می‌باشد. ترکیب شیمیایی دود تولیدشده به‌وسیله آتش به طبیعت سوخت آتش، حجم کل دود تولیدشده، ابعاد فیزیکی و محدودیت‌های آتش بستگی دارد. دوده و ذرات معلق، از یک طرف سبب انتقال مواد سمی قابل جذب به بدن انسان و از طرف دیگر کاهش میدان دید و در نهایت جلوگیری و به تأخیر انداختن فرار از محل وقوع آتش‌سوزی می‌شوند.

گازهای سمی تولیدشده به‌وسیله آتش در فضاهای بسته به دو گروه گازهای خواب‌آور یا مخدر^۱ (مانند مونو اکسید کربن، دی اکسید کربن، سیانید هیدروژن) و گازهای محرک یا سوزش‌آور^۲ (مانند کلرید هیدروژن، فلوئورید هیدروژن، برمید هیدروژن، دی اکسید سولفور، اکسیدهای نیتروژن و آکروئین‌ها) تقسیم می‌شوند. به‌طور تقریبی در هر آتش‌سوزی حداقل ۲۰ نوع گاز سمی تولید می‌شود. اکثر مردم بر این باورند که حرارت عامل اصلی مرگ‌ومیر در آتش‌سوزی‌هاست، حال آنکه این دود و انتشار آن است که تهدیدکننده اصلی جان انسان‌هاست [۱]. استنشاق گازهای خواب‌آور باعث کاهش آگاهی و در نهایت مرگ می‌شود؛ به این ترتیب که این نوع گازها با حمله به سیستم مرکزی اعصاب سبب کاهش آگاهی و توانایی فرار از محل وقوع آتش می‌شوند. گازهای محرک نیز عامل اصلی سوزش در برخی اعضای بدن از قبیل چشم‌ها، بینی، گلو و ریه می‌باشند. آثار این نوع گازها به میزان غلظت آنها وابسته است و اگر غلظت به اندازه کافی بالا باشد سبب مرگ می‌شود.

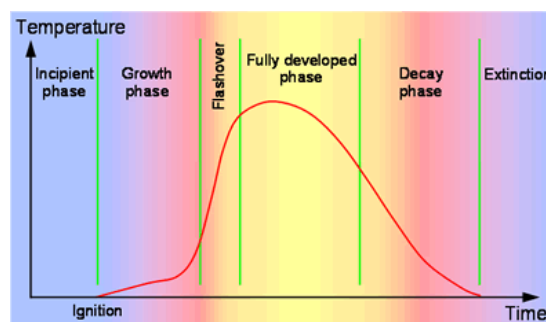
۳. مراحل توسعه آتش

آتش در اثر یک واکنش شیمیایی میان مقداری سوخت قابل احتراق و اکسیژن شکل می‌گیرد. اگرچه آتش بیانگر یک واکنش شیمیایی است، اما باید به این نکته توجه داشت که روش سوختن به حالت فیزیکی و موقعیت سوخت بستگی دارد، که این همان خاصیت شیمیایی سوخت می‌باشد [۴]. شکل‌گیری آتش از ابتدای شروع تا خاموشی کامل شامل چندین مرحله می‌باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۱. مرحله نخستین^۳: این مرحله به‌وسیله نوع منابع آتش مشخص می‌شود و معمولاً به‌صورت سوختن بدون شعله^۴ و یا تشعشع می‌باشد.

۲. مرحله رشد^۵: در ابتدای مرحله رشد، آتش به‌طور طبیعی کوچک و در یک محل متمرکز است. در این مرحله توده‌ای از دود و محصولات احتراق در لایه‌ای زیر سقف قرار داشته که به‌تدریج باعث شکل‌گیری لایه‌ای داغ‌تر نسبت به لایه زیرین می‌شوند. در صورت وجود منابع کافی سوخت و اکسیژن، آتش رشد کرده و بزرگتر خواهد شد و گازهای داغ و محصولات احتراق بیشتری را برای لایه دود آزاد خواهد کرد، که سبب افزایش ضخامت و غلظت این لایه می‌شود. در این مرحله دمای میانگین فضایی که آتش در آن رخ داده نسبتاً پایین و آتش در مبدأ متمرکز می‌باشد.

۳. مرحله اشتعال ناگهانی^۶: در این مرحله آتش به سمت حالت اشتعال ناگهانی توسعه می‌یابد. به این مفهوم که انتقال حرارت به روش تشعشع از طریق شعله و لایه داغ دود، منجر به اشتعال فوری مواد قابل اشتعال نسوخته می‌شود و نرخ افزایش دما و میزان حرارت آزاد شده به شدت زیاد می‌شود.



شکل ۱. مراحل توسعه آتش: محور افقی زمان و محور عمودی نرخ حرارت آزاد شده یا دما [۱]

۴. مرحله کاملاً توسعه‌یافته^۷: بعد از مرحله اشتعال ناگهانی، آتش وارد مرحله کاملاً توسعه‌یافته می‌شود. در این مرحله نرخ حرارت آزاد شده به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید و نرخ سوختن یکنواخت خواهد بود. به‌طور معمول، این مرحله بحرانی‌ترین مرحله است و خسارت‌های ساختمانی و انتشار آتش و دود در این مرحله رخ می‌دهد. همچنین در طی این مرحله تمام مواد قابل اشتعال درگیر در فرایند آتش‌سوزی خواهند بود.

۵. مرحله افت یا کاهش^۸: در این مرحله نرخ سوختن با مصرف مواد قابل اشتعال کاهش می‌یابد و با کاهش شدت آتش روبرو خواهیم بود و دمای میانگین به میزان ۸۰ درصد نسبت به دمای حالت ماکزیمم کاهش خواهد یافت.

۶. مرحله خاموشی^۹: سرانجام وقتی تمام مواد اشتعال‌پذیر مصرف شد و هیچ انرژی برای آزاد شدن وجود نداشت، آتش وارد مرحله خاموشی می‌شود.

۳. پارامترهای مهم در آتش‌سوزی

در این بخش برخی پارامترهای اساسی مرتبط با آتش تشریح شده است.

۳-۱. نرخ حرارت آزاد شده^{۱۰}

نرخ حرارت آزاد شده بیانگر قدرت آتش است و معمولاً برحسب مگاوات بیان می‌شود. این پارامتر متغیری بسیار مهم در مشخص کردن رفتار آتش است. اما در مورد آتش‌سوزی در فضاهای سرپسته، آتش به‌ندرت بر اثر یک سوخت کاملاً خالص از نظر شیمیایی و یک راندمان کامل از نظر سوختن وجود دارند. بنابراین برای به‌دست آوردن نرخ حرارت آزاد شده در فضاهای بسته، باید از مجموعه‌ای از روابط تجربی استفاده کرد. در این روابط تجربی نرخ رشد آتش به‌صورت رشد خطی، درجه دوم یا نمایی با زمان در نظر گرفته می‌شود [۵].

۳-۲. نرخ جریان دود^{۱۱}

یکی از پارامترهای اصولی شبیه‌سازی آتش، نرخ جریان دود تولید شده به‌وسیله آتش است. نرخ جریان دود تولید شده معمولاً به‌صورت جریان حجمی گازهایی که در یک فاصله مشخص از آتش قرار دارند محاسبه می‌شود. نرخ جریان دود به پارامترهای زیر وابسته است [۱]:

۱. نوع سوخت

۲. نرخ حرارت آزاد شده

۳. شرایط محیطی

۴. فاصله از منبع آتش

معمولاً برای بررسی میزان دود تولید شده در اثر سوختن مواد مختلف، از نسبت میان جرم دود تولید شده به جرم سوخت

سوزانده شده - که به بازده دود^{۱۲} معروف است - استفاده می‌شود. بازده دود معمولاً در بازه میان کسرهای یک درصد تا بیست درصدی قرار می‌گیرد. حد پایین این بازه مربوط به موادی چون چوب، اتان، پروپان و متان و حد بالای آن مربوط به سوخت‌هایی با ساختار شیمیایی آروماتیک یا معطر مانند آلکان‌ها و آلکین‌ها می‌باشد. جدول ۱ نشان‌دهنده بازده دود برای مواد مختلف می‌باشد [۶].

جدول ۱. بازده دود برای مواد مختلف

گازها و مایعات	
بازده دود	ماده
0.008	Ethyl alcohol
0.013	Ethane
0.024	propane
0.037	Heptane
0.095	propylene
0.096	Acetylene
0.177	Styrene
0.178	Toluene
جامدات (پلیمرها)	
بازده دود	ماده
0.003	Teflon (PTFE)
0.015	Wood
0.022	Polymethylmethacrylate
0.059	Polypropylene
0.06	Polyethylene
0.075	Nylon
0.089-0.091	Polyester
0.112	Polycarbonate
0.104-0.130	Rigid polyurethane foam
0.131-0.227	Flexible polyurethane foam
0.164	Polystyrene
0.172	Polyvinylchloride

مناطق مختلف تقسیم و شرایط را در هر ناحیه یکنواخت فرض می‌کنند. مدل‌های ناحیه‌ای بر پایه اصل بقای جرم و انرژی در محفظه آتش می‌باشند. در این بخش مدل‌های تک‌ناحیه‌ای و دونواحیه‌ای بررسی شده‌اند.

۴-۱-۱. مدل‌های تک‌ناحیه‌ای

مدل تک‌ناحیه‌ای ساده‌ترین نوع مدل ناحیه‌ای است و برای آتش‌های کاملاً توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل، دما و تمامی مشخصات فیزیکی و حرارتی مانند دانسیته، انرژی داخلی و فشار به صورت یکنواخت فرض شده و دارای مقدار واحد در هر لحظه می‌باشند. مدل‌های تک‌ناحیه‌ای در دهه ۱۹۷۰ م روبه توسعه نهادند و به تدریج به صورت مدل‌های چندناحیه‌ای برای شبیه‌سازی آتش‌های متمرکز شده و در مرحله رشد مورد استفاده قرار گرفتند. اصول مدل‌های تک‌ناحیه‌ای حل معادلات بقای جرم و انرژی در فضای مورد مطالعه است. شکل ۲ نشان‌دهنده نمایی شماتیک از محفظه‌ای است که به وسیله یک مدل تک‌ناحیه‌ای شبیه‌سازی شده است. بالانس جرم و انرژی برای مدل تک‌ناحیه‌ای به شرح زیر است:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{m}_{fi} \quad (1)$$

$$\frac{dE_g}{dt} = \dot{Q} - \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_{rad} \quad (2)$$

از نمونه شبیه‌سازی‌های انجام شده به وسیله این نوع مدل می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط سائر و اسمیت [۷] و کارلسون [۸] اشاره کرد.

۴-۱-۲. مدل‌های دونواحیه‌ای

مدل‌های دونواحیه‌ای برای آتش‌های متمرکز شده یا آتش‌هایی که در مرحله رشد قرار دارند معتبر است. در این مدل، فضای مورد نظر به دو ناحیه مختلف شامل لایه بالایی یا داغ‌تر و لایه پایینی یا سردتر تقسیم می‌شود. ویژگی‌های اصلی این نوع مدل‌ها به این شرح است که لایه بالایی نشان‌دهنده توده دود در زیر سقف است، دما در هر لایه یکنواخت بوده و یک سطح مشترک افقی میان لایه‌های بالایی و پایینی وجود دارد. شکل ۳ نشان‌دهنده نمایی شماتیک از چگونگی شبیه‌سازی آتش در فضای بسته توسط یک مدل دونواحیه‌ای است. مشابه با مدل‌های تک‌ناحیه‌ای، اساس کار مدل‌های دونواحیه‌ای حل

۴. مدل‌های شبیه‌سازی آتش و انتشار دود

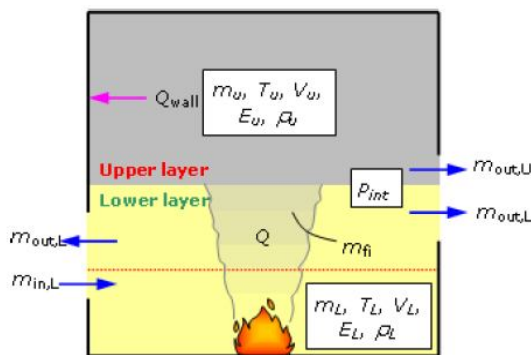
شبیه‌سازی‌های کامپیوتری آتش و توزیع دود در فضاهای بسته به صورت کلی به دو دسته مدل‌های ناحیه‌ای^{۱۳} و مدل‌های میدانی^{۱۴} تقسیم می‌شوند که در ادامه به اجمال بررسی شده‌اند [۲].

۴-۱. مدل‌های ناحیه‌ای

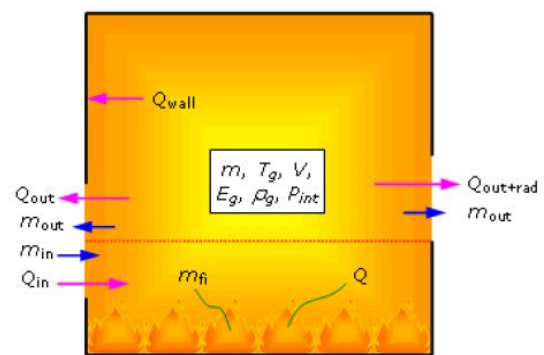
مدل‌های ناحیه‌ای ساده‌ترین نوع مدل‌های کامپیوتری‌اند. در این نوع مدل، محفظه‌ای را که آتش‌سوزی در آن رخ می‌دهد، به

مطالعات تاناکا (۱۹۸۳) و جونز و ریکوک (۲۰۰۶) اشاره کرد [۱۰-۱۱]. همچنین در پژوهش جامع و فراگیر اولنیک و کارپنتر (۲۰۰۳) با استفاده از یک مدل ناحیه‌ای، چندین ناحیه متفاوت برای پیش‌بینی دود و آتش فرض شده است [۱۲]. جدول ۲ نشان‌دهنده برخی از برنامه‌های کامپیوتری مورد استفاده برای مدل‌های ناحیه‌ای است. در برنامه‌های کامپیوتری عنوان شده در این جدول، داده‌های ورودی معمولاً شامل نرخ حرارت آزاد شده، هندسه و مشخصات فیزیکی محل وقوع آتش و نرخ دود تولید شده بوده و از خروجی‌های معمول می‌توان به ضخامت و ارتفاع لایه داغ دود، غلظت اجزای دود در لایه داغ و توزیع دما در هر لحظه اشاره کرد [۱۳].

معادلات بقای جرم و انرژی در محفظه است، با این تفاوت که پیچیدگی بیشتری دارد؛ زیرا باید بقای جرم و انرژی را برای هر ناحیه به صورت مستقل در نظر گرفت و در ضمن تبادل جرم و انرژی میان مناطق مختلف را نیز در محاسبات لحاظ کرد. از نمونه شبیه‌سازی‌های انجام شده به وسیله این مدل می‌توان به کارهای کونکی و پولکا اشاره کرد [۹]. به همین ترتیب برای مدل سه‌ناحیه‌ای می‌توان پلوم آتش^{۱۵}، لایه پایینی یا سردتر و لایه بالایی یا داغ‌تر را به صورت سه ناحیه مجزا در نظر گرفت. با پیشرفت این نوع مدل‌ها به تدریج مدل‌های تک‌ناحیه‌ای و دوناچه‌ای تبدیل به مدل‌های چندناحیه‌ای شدند. از نمونه کارهای انجام شده برای مدل‌های چندناحیه‌ای می‌توان به



شکل ۳. نمایی شماتیک برای مدل دوناچه‌ای



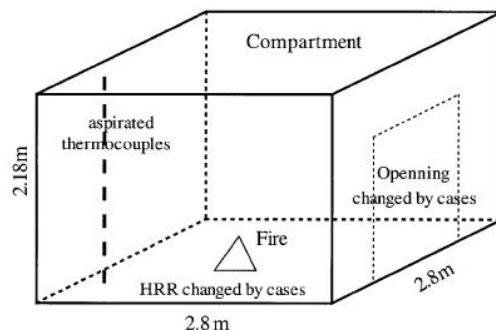
شکل ۲. نمایی شماتیک برای مدل تک‌ناحیه‌ای

جدول ۲. برنامه‌های کامپیوتری موجود برای شبیه‌سازی آتش در فضاهای سر بسته با استفاده از مدل‌های چندناحیه‌ای

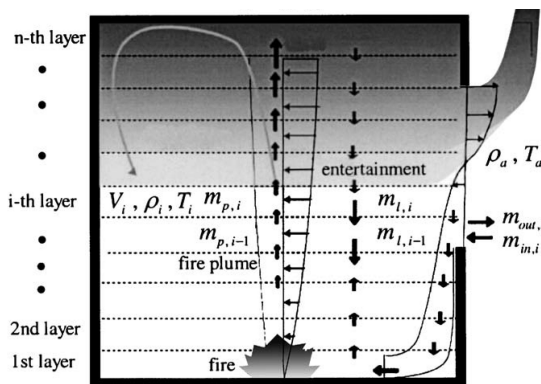
برنامه‌نویس	زبان	برنامه کامپیوتری
Cooper & Stroup [14]	FORTRAN	ASET
Walton [14]	Basic	ASET-B
Siuetal [15]		COMPBRN
Babrauskas [16]	FORTRAN	COMPF2
Curtat & Bodart [17]		CSTBZ1
Jones [18]	FORTRAN	CFAST
Wade [19]	VISUAL BASIC	BRANZFIRE
Davis [20]	FORTRAN	JET
Mitler & Rockett [21]	FORTRAN	FIRST
Nelson [22]	BASIC	FPETOOL
Cooper [23]	FORTRAN	LAVENT
Sattefield & Barentt[24]	FORTRAN	WPI/FIRE

شده و انتقال حرارت تشعشی و جابه‌جایی میان لایه‌ها و لایه با مرزها نیز در نظر گرفته شده است. همچنین از روش رانگ - کوتا برای حل معادلات در گام‌های زمانی استفاده و فرض شده است که پلوم آتش با لایه بالایی مخلوط نمی‌شود. شکل ۶ نشان‌دهنده توزیع دمای به‌دست آمده از مدلسازی انجام‌شده در دو حالت با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی و بدون انتقال حرارت تشعشی با نتایج تجربی است و نتایج بیانگر دقت بالاتر مدلسازی انجام‌شده همراه با انتقال حرارت تشعشی می‌باشد.

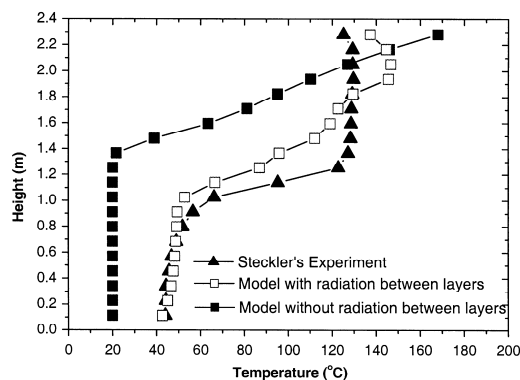
در ادامه به‌منظور درک بهتر مفاهیم، نتایج مربوط به برخی از پژوهش‌های مهم در این زمینه ارائه شده است. در سال ۲۰۰۵ م یک مدل چندناحیه‌ای برای پیش‌بینی رفتار آتش در یک فضای بسته مورد استفاده قرار گرفت [۲۵]. در این پژوهش، فضای مورد نظر به لایه‌های افقی تقسیم شده و دما، غلظت اجزاء و دیگر خواص فیزیکی در آن یکنواخت در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، شرایط مرزی دیواره نیز مطابق با نواحی تقسیم‌بندی شده، به بخش‌های مختلف تبدیل



شکل ۴. نمایی شماتیک از فضای مورد استفاده برای مدلسازی [۲۵]



شکل ۵. نمایی شماتیک از مدل چندناحیه‌ای مورد استفاده برای مدلسازی [۲۵]



شکل ۶. توزیع دمای به‌دست آمده از مدلسازی و داده‌های تجربی برحسب ارتفاع [۲۵]

چن در سال ۲۰۰۸ م توزیع دما و دود را برای آتش‌سوزی در یک تونل با استفاده از یک مدل چندناحیه‌ای مورد مطالعه قرار داد [۲۶]. در شکل ۷، توزیع دمای حاصل از مدلسازی انجام شده و داده‌های تجربی در ارتفاع ۲/۶۳ متر، برای آتش با قدرت ۱/۵ مگاوات برای فواصل مختلف از آتش نشان داده شده است. از مهمترین پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مدل‌های ناحیه‌ای، می‌توان به پژوهش انجام‌شده در سال ۲۰۱۳ م اشاره کرد [۲۷]. در این پژوهش با استفاده از یک مدل دوناحیه‌ای، تأثیر باد بر تخلیه دود برای آتش در یک محفظه مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل دوناحیه‌ای مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۸ نمایش داده شده است. در این شکل اندیس‌های i و e ، a ، p ، s به ترتیب بیانگر لایه دود، پلوم آتش، خروجی و ورودی می‌باشند. به‌منظور بررسی اثر باد، از ضریب فشار باد بر سطوح که با C_w نشان داده می‌شود، استفاده شده است. در واقع این ضریب یک پارامتر بدون بعد بوده که تابعی از سرعت باد، شکل سطح و جهت سطح نسبت به جریان هوا می‌باشد. به‌طور معمول این مقدار برای سطوح در جهت باد، مثبت و برای سطوح جانبی و در خلاف جهت باد، منفی می‌باشند. شکل ۹ بیانگر ارتفاع لایه هوا h_a برحسب سرعت جریان u می‌باشد. در این شکل اختلاف میان ضریب فشار باد بر روی سطوح ورودی هوا C_{wi} و خروجی دود C_{wv} با ΔC_w نشان داده شده است. با افزایش سرعت باد در راستای مطلوب، برآیند ضریب فشار باد مثبت خواهد بود و در نتیجه اختلاف فشار درون و بیرون دریچه، افزایش یافته و ارتفاع لایه هوا نیز افزایش یافته است. اما در صورتی که برآیند ضریب فشار هوا منفی شود، نتیجه معکوس حاصل می‌شود. در یکی دیگر از پژوهش‌های انجام‌شده، اتاق پمپاژ یک نیروگاه هسته‌ای با استفاده از مدل CFAST توسط لی و همکاران (۲۰۱۰) مطالعه شده است [۲۸]. این پژوهش به‌منظور ارزیابی میزان آثار آتش بر تجهیزات موجود در اتاق پمپاژ نظیر اتصالات، پمپ‌ها، کابل‌ها و شیرآلات موجود می‌باشد. شکل ۶ نشان دهنده توزیع دما در لایه دود در اتاق پمپاژ در صورت وقوع آتش با رشد سریع ۰/۱۸۷۸ کیلووات بر مجذور ثانیه می‌باشد.

۴-۲. مدل‌های میدانی

مدل‌های میدانی برای فضاهای دو یا سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع مدل‌ها، فضا به هزاران سلول یا المان

تقسیم می‌شود و در حالت کلی نیازمند یک کامپیوتر قدرتمند برای حل می‌باشند. در واقع این روش همان روش‌های شبیه‌سازی عددی است. مدل‌های میدانی از ترکیب دو مؤلفه، کد برنامه‌نویسی عددی و مدل آتش شکل گرفته‌اند. کد برنامه‌نویسی هسته مرکزی یا قلب مدل میدانی است و تهیه‌کننده سازوکار انتقال برای انرژی، ممتوم و جرم می‌باشد. اما مدل آتش شامل مشخصات همراه با جزئیات کاملی از آتش است. در واقع مدل آتش معرفی‌کننده شرایط مرزی و احتراق مسئله است. اساس کار مدل‌های میدانی، حل معادلات بقا بوده و به‌جای چند ناحیه محدود، این معادلات برای همه المان‌های موجود در محفظه سربسته نوشته شده و مجموعه معادلات به روش‌های عددی حل می‌شوند. معادلات حاکم بر میدان جریان به شرح زیر می‌باشند [۲۹].

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (۳)$$

معادله بقای ممتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho B_i \quad (۴)$$

معادله بقای انرژی:

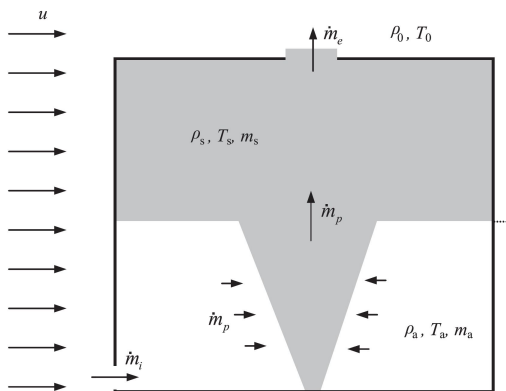
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \dot{q}_j^R \right) \quad (۵)$$

معادله بقای اجزاء:

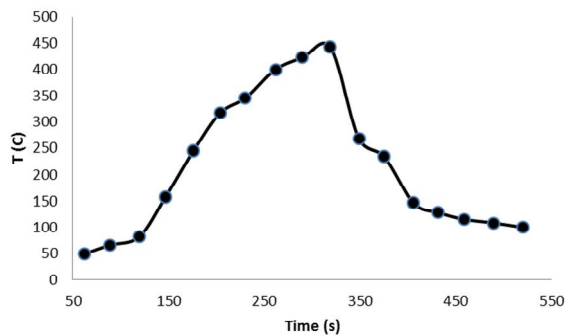
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_\alpha) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} \right) + S_\alpha \quad (۶)$$

کدهای برنامه‌نویسی عددی برای دو حالت خاص و عمومی طراحی شده‌اند. جدول ۳ بیانگر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه‌سازی عددی آتش می‌باشد. نرم‌افزارهای عمومی برای شبیه‌سازی جریان سیال در شرایط مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند و یکی از کاربردهای آنها شبیه‌سازی آتش و انتشار دود در محیط‌های سربسته می‌باشد. فلونت^{۱۶} یکی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای عمومی در این زمینه می‌باشد. در این نرم‌افزار، آتش با استفاده از مفهوم کسر مخلوط و انتشار دود با استفاده از روابط نیمه تجربی شبیه‌سازی می‌شوند. فونیکس^{۱۷} یکی دیگر از نرم‌افزارهای عمومی مورد استفاده برای شبیه‌سازی آتش می‌باشد. از ورودی‌های مورد نیاز این نرم‌افزار می‌توان به مشخصات سوخت، شرایط آب و هوا، شرایط هندسی و مرزی و

است. برای شبیه‌سازی آتش در ساختمان‌ها جهت تعیین حرکت دود مورد استفاده قرار می‌گیرد و از آن می‌توان برای بهینه‌سازی در تعیین موقعیت ردیاب‌ها، آب‌پاش‌ها و سیستم اطفای حریق استفاده کرد. از دیگر مزایای این نرم‌افزار می‌توان به تعیین قابلیت میدان دید و پیش‌بینی دقیق برای آتش‌سوزی‌ها در اثر سوخت‌های مایع به خصوص انواع روغن و بنزین اشاره کرد.



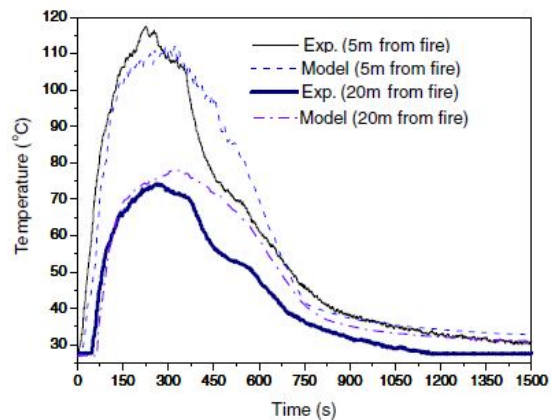
شکل ۸. مدل دونایه‌ای همراه با آثار باد [۲۷]



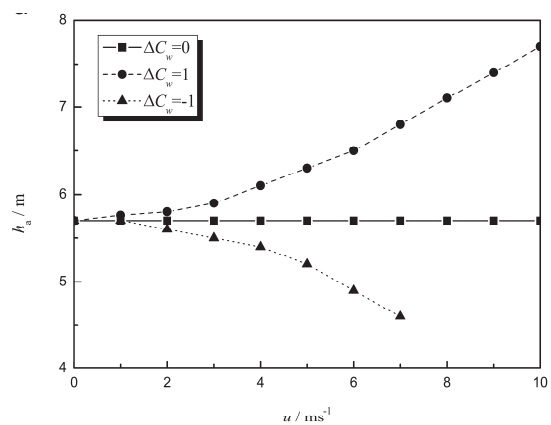
شکل ۱۰. توزیع دما در لایه دود برحسب زمان [۲۸]

نکات حائز اهمیت این نرم‌افزار می‌توان به استفاده از مفهوم کسر مخلوط در شبیه‌سازی و همچنین به‌کارگیری مدل آشفستگی گردابه‌ای بزرگ LES در مدل‌سازی جریان آشفته است. همچنین سوفی^{۲۰} یا شبیه‌ساز آتش در محیط‌های سرپشته از دیگر نرم‌افزارهای عددی خاص بوده و از یک روش حجم محدود برای حل معادلات بقا استفاده می‌کند و معمولاً برای سیستم مختصات منحنی الخط عمومی بسیار پرکاربرد می‌باشد. نرم‌افزار کاملون فاریکس^{۲۱} علاوه بر شبیه‌سازی آتش، با یک کد المان

از خروجی‌های آن نیز به وسعت، اندازه و شدت آتش، زمان برای بحرانی‌ترین شرایط از شروع احتراق و توزیع دود اشاره کرد. سی.اف. ایکس^{۱۸} نرم‌افزاری عمومی و مناسب برای هندسه‌های هندسه‌های پیچیده در مقیاس کامل است و معمولاً برای ایجاد شبکه غیرمنظم برای هندسه‌های پیچیده پرکاربرد می‌باشد. اساس کار این نرم‌افزار حل معادلات بقا به روش حجم محدود



شکل ۷. توزیع دما در فواصل مختلف از آتش در ارتفاع ۲/۶۳ متر [۶]



شکل ۹. ارتفاع لایه هوا برحسب سرعت و ضریب فشار باد [۲۷]

دسته دوم نرم‌افزارهایی هستند که به‌صورت خاص برای شبیه‌سازی آتش و انتشار دود طراحی شده‌اند. در اینجا به‌طور نمونه نکات مهم برخی از آنها ذکر شده است:

اف.دی.اس^{۱۹} یا شبیه‌ساز دینامیکی آتش یک مدل دینامیک سیالات عددی آتش است. این نرم‌افزار برای آتش‌های کوچک بسیار مناسب بوده و دارای پیش‌بینی‌های بسیار دقیقی است. اما برای آتش‌های بزرگ و شرایطی که آتش به سمت حالت اشتعال ناگهانی میل می‌کند، زیاد مناسب نمی‌باشد. از

موجود در این پژوهش در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. نتایج بیانگر دقت بالاتر نرم‌افزار FDS می‌باشد.

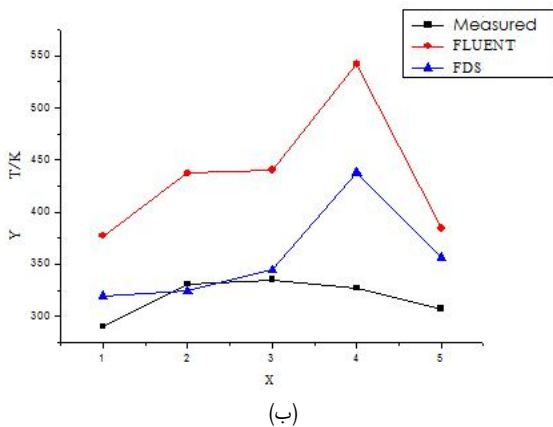
جدول ۳. مدل‌های میدانی برای شبیه‌سازی عددی آتش

مدل‌های میدانی عمومی
FLUENT
PHONICS
CFX
STAR-CD
مدل‌های میدانی خاص
FDS
FIRE
JASMINE
KAMELEON FireEx
KOBRA-3D
MEFE
RMFIRE
SMARTFIRE
SOFIE
SOLVENT
SPLASH
UNSAFEE
FIREFOAM

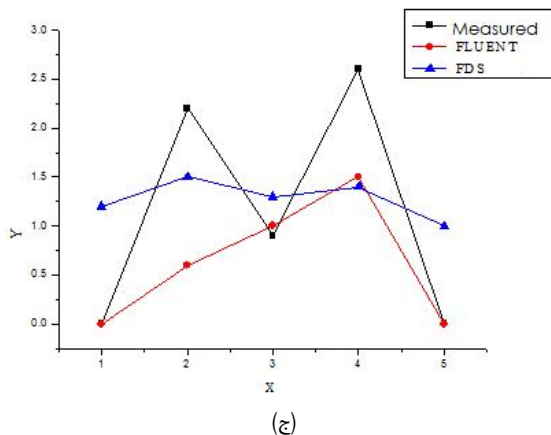
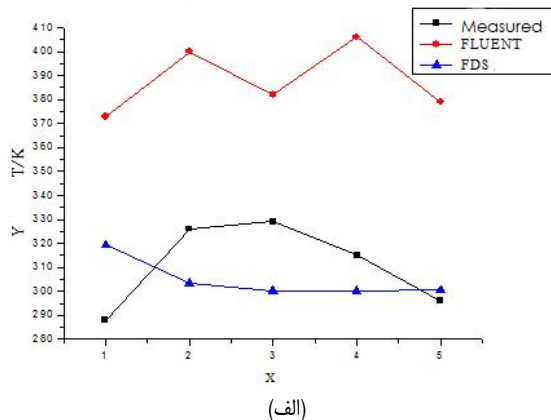
یکی از پژوهش‌های اخیر در این زمینه، شبیه‌سازی عددی آتش در یک تونل با تهویه طولی توسط لی و همکاران (۲۰۱۶) به وسیله نرم‌افزار FDS می‌باشد [۳۵]. در این پژوهش آتش با قدرت ۲۰ مگاوات در نظر گرفته شده و تعداد شبکه محاسباتی ۸۲۹۴۴۰ می‌باشد. تونل مورد نظر دارای طول ۶۰۰ متر بوده، مسیر عبور و مرور دارای عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۳/۵ متر و ۵/۵ متر، داکت خروجی دود دارای عرض و ارتفاع به ترتیب ۳ و ۲/۵ متر و تونل اضطراری دارای عرض و ارتفاع به ترتیب ۲ و ۲/۵ متر می‌باشند (شکل ۱۲). شبیه‌سازی برای سه حالت مورد مطالعه قرار داده شده است. حالت اول: وسیله در خط میانی تونل با منبع آتش در چهار طرف آن، حالت دوم: وسیله در خط میانی تونل با منبع آتش روی سطح بالایی و حالت سوم: وسیله روی

محدود که برای دیواره‌ها نوشته شده، قابلیت بررسی آثار آتش‌سوزی بر دیواره‌ها را به‌طور همزمان دارا می‌باشد. یکی دیگر از نرم‌افزارهای عددی اسمارت فایر^{۲۲} می‌باشد که با زبان ++C نوشته شده است. مهم‌ترین مزیت این نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان‌های بویانسی با تهویه اجباری یا طبیعی همراه با انتقال حرارت تشعشعی روی سیستم شبکه‌بندی سه‌بعدی غیرمنظم می‌باشد. نرم‌افزار فایر^{۲۳} قابلیت در نظر گرفتن پاشش قطرات آب همراه با آثار متقابل فاز جامد (سوخت) و مایع (قطرات آب) و همچنین پیش‌بینی نرخ احتراق و حتی خاموش شدن آتش را دارد. نرم‌افزار جاسمین^{۲۴} بر اساس نرم‌افزار فونیکس توسعه یافته است. کبرا^{۲۵} قابلیت شبیه‌سازی انتشار دود و انتقال حرارت در فضاهای پیچیده را دارد. سولونت^{۲۶} به‌طور خاص برای شبیه‌سازی آتش در تونل‌ها طراحی شده و نرم‌افزار اسپلس^{۲۷} توانایی در نظر گرفتن نحوه خاموش نمودن آتش‌سوزی با قطرات آب را دارد [۳۰]. یکی دیگر از برنامه‌های پیشرفته، که امروزه به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی آتش مورد استفاده قرار می‌گیرد، برنامه فایر فوم^{۲۸} بوده که یک نرم‌افزار عددی بر پایه اوپن فوم^{۲۹} می‌باشد. این برنامه از دقت مرتبه دوم بوده و بر اساس زبان ++C نوشته شده است. همچنین از دیگر مشخصات آن می‌توان به استفاده از روش حجم محدود با به‌کارگیری روش‌های PISO و SIMPLE برای حل معادلات کوپل می‌باشد. همچنین مدل آشفستگی به‌کار رفته نیز شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ LES می‌باشد. این نرم‌افزار قابلیت تولید شبکه‌ای سازمان‌یافته و غیرسازمان‌یافته را دارد و می‌تواند به‌صورت پردازش موازی مورد استفاده قرار گیرد [۳۱-۳۳]. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۱ م انجام شد، مقایسه‌ای میان شبیه‌سازی عددی آتش‌سوزی در یک تونل زیرزمینی توسط نرم‌افزارهای FDS و فلوئنت انجام گرفت [۳۴]. در شبیه‌سازی انجام‌شده، مدل آشفستگی مورد استفاده در نرم‌افزار فلوئنت، مدل دو معادله‌ای k-ε بوده و از الگوریتم سیمپل جهت حل معادلات میدان جریان استفاده شده است. در صورتی که مدل آشفستگی مورد استفاده در نرم‌افزار FDS، مدل شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ بوده است. آتش با قدرت ۵ مگاوات برای احتراق غیرپیش‌آمیخته مدلسازی شده و پارامترهایی نظیر توزیع دما و ضخامت لایه دود با یکدیگر و در نهایت با داده‌های تجربی مقایسه شده است. برخی از نتایج

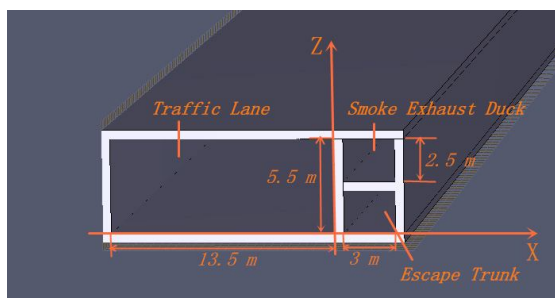
به عنوان دمای بحرانی، فاصله میان منبع آتش با نقطه بحرانی مورد نظر و همچنین زمان مورد نظر برای رسیدن به این مقدار بحرانی در جدول های ۴ و ۵ بیان شده است.



خط کناری تونل با منبع آتش روی سطح بالایی. شکل ۱۳ نشان دهنده توزیع دما برای حالات مختلف در نظر گرفته شده می باشد. همچنین با در نظر گرفتن دمای ۶۰ درجه سانتی گراد



شکل ۱۱. مقایسه میان نتایج عددی و داده های آزمایشگاهی پس از گذشت ۱۲۰ ثانیه از شروع آتش سوزی [۳۴]
الف) توزیع دما در ارتفاع میانی تونل، ب) توزیع دما در سقف تونل، ج) ضخامت لایه دود



شکل ۱۲. نمایی از تونل مورد نظر در شبیه سازی عددی [۳۵]

با قدرت ۷/۵ مگاوات، طول لایه برگشتی دود و همچنین توزیع دما درون تونل مورد مطالعه قرار داده شده است. نتایج مربوط به این شبیه سازی در شکل های ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده اند.

از دیگر نمونه فعالیت های انجام شده در شبیه سازی توسط نرم افزار FDS، می توان به تحقیق صورت پذیرفته توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۶) اشاره نمود [۳۶]. در این پژوهش برای آتش

شکل ۱۷ نمایش داده شده است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ بیانگر توزیع دما و سرعت در دامنه محاسباتی به دست آمده از این پژوهش می‌باشد.

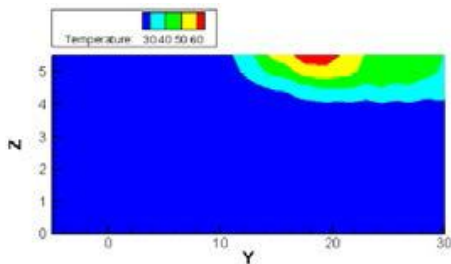
تحقیق دیگری (۲۰۱۶) با به‌کارگیری نرم‌افزار فایر فوم، آتش ناشی از سوختن متان در یک فضای بسته به صورت عددی مدلسازی شده است [۳۷]. فضای مورد نظر و شبکه تولیدی در

جدول ۴. فاصله نقطه بحرانی از منبع آتش بر حسب متر [۳۵]

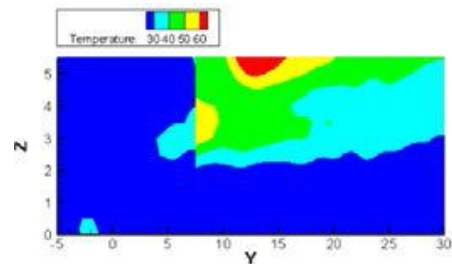
حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	سرعت تهویه طولی (متر بر ثانیه)
-۲	-۲	صفر	صفر
۳	۵	۳	۱
۳	۵	۳	۲
۸	۱۰	۵	۳
۱۳	۱۳	۸	۴
۱۳	۱۸	۱۳	۵
۱۸	۱۸	۱۳	۶

جدول ۵. زمان رسیدن به نقطه بحرانی بر حسب ثانیه [۳۵]

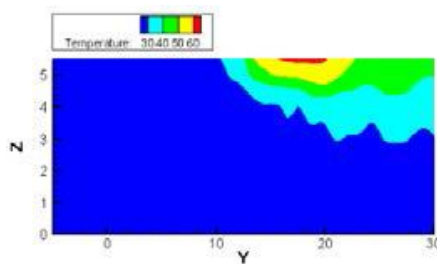
حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	سرعت تهویه طولی (متر بر ثانیه)
۱۳۶	۱۳۵	۱۳۸	صفر
۱۴۰	۱۵۸	۲۰۰	۱
۱۶۸	۱۶۰	۲۲۱	۲
۱۶۸	۱۶۷	۱۸۹	۳
۱۸۷	۱۷۵	۲۱۲	۴
۲۱۹	۲۰۲	۲۴۰	۵
۲۴۹	۲۳۲	۲۸۲	۶



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۳. توزیع دما برای حالات مختلف شبیه‌سازی برای تهویه طولی با سرعت ۶ متر بر ثانیه [۳۵]

۵. نتیجه گیری

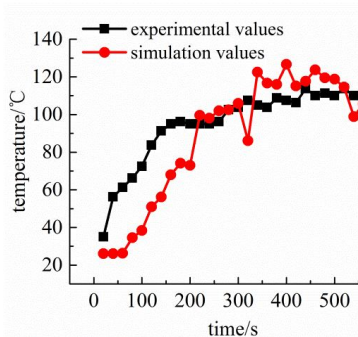
در این پژوهش پس از تشریح مراحل رشد یک آتش، مشخصات مورد نیاز جهت شبیه سازی آتش نظیر نرخ حرارت و دود آزاد شده مورد بررسی قرار گرفته و انواع مدل های موجود برای شبیه سازی آتش مطالعه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

آتش سوزی در محیط های سر بسته به دلیل ایجاد حرارت، تولید دود و کاهش اکسیژن خطر ساز می باشد. همچنین دود و انتشار آن در این نوع فضاها عامل اصلی ایجاد خطر در اثر یک آتش سوزی است. پدیده آتش و انتشار دود با استفاده از مدل های کامپیوتری و یا براساس نتایج تجربی مشخص می شوند. مدل های کامپیوتری مورد استفاده برای شبیه سازی آتش و انتشار دود به دو دسته کلی مدل های ناحیه ای و مدل های میدانی دسته بندی می شوند. مدل های میدانی براساس روش های حل عددی بوده و اطلاعاتی با جزئیات کامل درباره انتشار دود، توزیع سرعت، دما و غلظت دود در هر قسمت از دامنه را ارائه می دهند. مدل های میدانی را می توان برای شبیه سازی آتش در فضاهایی با هندسه پیچیده مورد استفاده قرار می گیرند. این مدل ها نیازمند سی. پی. یو. زمانی بلندمدت و حافظه بالای کامپیوتری می باشند. مهم ترین مزیت مدل میدانی نسبت به مدل ناحیه ای دستیابی به اطلاعات با جزئیات کامل می باشد.

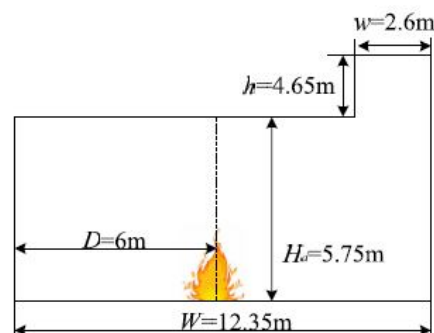
مدل های ناحیه ای نیازمند سی. پی. یو. زمانی کوتاه تری بوده و تحت شرایط خاص می توان شبیه سازی منطقی برای آتش به دست آورد. اگرچه در برخی حالات مانند هندسه های پیچیده و نزدیک به منبع آتش و یا سیستم تهویه قوی در فضای مورد نظر، این روش دارای خطاهای زیادی می باشد. در واقع محدودیت های مدل ناحیه ای به لحاظ کاربردی در دقت شبیه سازی آتش به دلیل پارامترهایی مانند هندسه محل آتش سوزی، اندازه آتش، موقعیت منبع آتش و مشخصات احتراق می باشد.

مدل های ناحیه ای سریع تر و ارزان تر از مدل های میدانی هستند و بنابراین می توان پدیده های بیشتری را در یک مدل ناحیه ای مشخص، بدون ایجاد پیچیدگی زیاد، در نظر گرفت. همچنین می توان در زمان محدود تعداد حالات متعددی را اجرا و نتایج شبیه سازی را با هم مقایسه کرد.

مدل های میدانی دارای دقت بالاتری می باشند اما از طرف دیگر نیازمند وسایل قدرتمند محاسباتی هستند. ایده روش پیوندی مدل ناحیه ای - میدانی^{۳۰} برای استفاده از مزیت هر دو مدل پیشنهاد شده است. بنابراین مدل پیوندی امکان به دست آوردن یک شبیه سازی عددی منطقی از آتش سوزی در یک فضای بسته با استفاده از کامپیوترهای قابل دسترس را به ما می دهد.



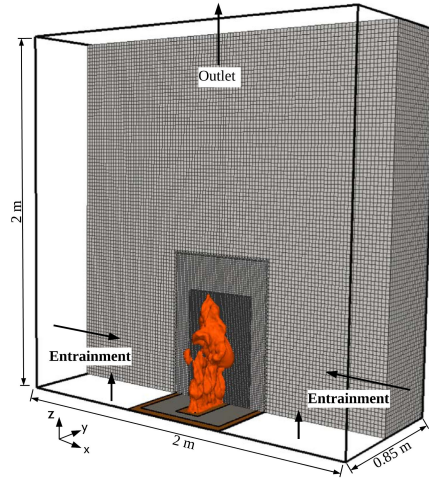
شکل ۱۵. توزیع دما برای فاصله افقی و عمودی ۳ و ۵/۵ متر از منبع آتش [۳۶]



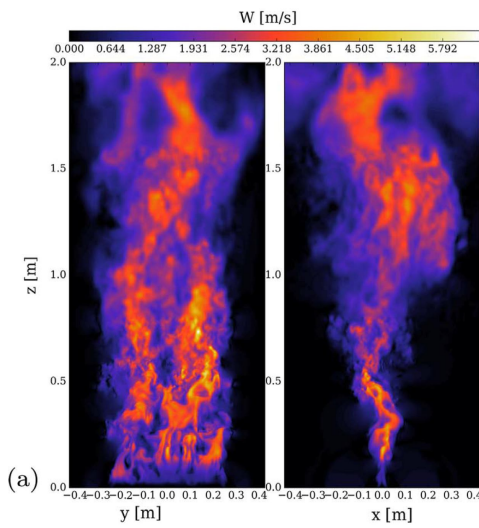
شکل ۱۴. سطح مقطع تونل [۳۶]



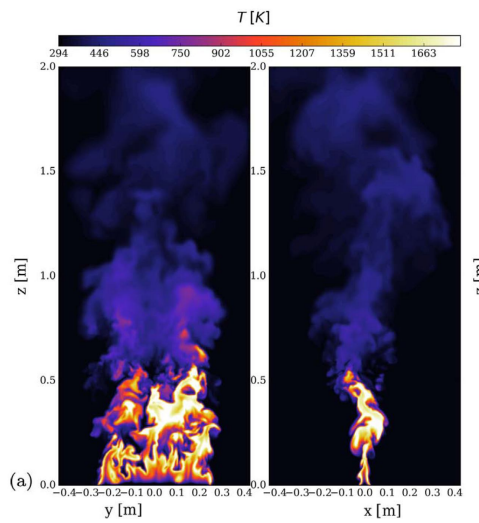
شکل ۱۶. توزیع دود و لایه برگشتی [۳۶]



شکل ۱۷. دامنه محاسباتی و شبکه تولیدی [۳۷]



شکل ۱۹. توزیع سرعت در صفحات مختلف دامنه محاسباتی [۳۷]



شکل ۱۸. توزیع دما در صفحات مختلف دامنه محاسباتی [۳۷]

Q_{in}	افزایش انرژی جرم گاز ورودی از طریق دریچه‌ها، W
Q_{out}	اتلاف انرژی جرم گاز خروجی از طریق دریچه‌ها، W
Q_{rad}	اتلاف انرژی توسط تشعشع از طریق دریچه‌ها، W
Q_{wall}	اتلاف انرژی توسط سطوح دیوار محفظه، W
u	سرعت سیال، m/s
τ	تانسور تنش، Pa
B	نیروهای حجمی، N/m^3
h	آنتالپی، kJ/kg
λ	هدایت حرارتی، W/mK
C_p	ظرفیت حرارتی مخصوص در فشار ثابت، KJ/kgK
q_j^R	شار حرارتی ناشی از تشعشع، W
Y_α	کسر مولی جز، α
S_α	ترم منبع

علائم و اختصارات

E_g	انرژی داخلی گاز، J
m	جرم، kg
P_{int}	فشار داخلی، Pa
T_g	دمای گاز، K
V	حجم محفظه، m^3
ρ_g	دانسیته گاز، kg/m^3
dm/dt	نرخ تغییر جرم گاز درون محفظه، kg/s
m_{fi}	نرخ پیرولیز محصولات تولید شده، kg/s
m_{in}	نرخ جرم گاز ورودی از طریق دریچه‌ها، kg/s
m_{out}	نرخ جرم گاز خروجی از طریق دریچه‌ها، kg/s
dE_g/dt	نرخ تغییر انرژی درونی گاز، J/s
Q	نرخ حرارت آزاد شده از آتش، W

- [1] A. Haack, Technical Report-Part 1-Design Fire Scenarios, *Thematic network on fires in tunnels (FIT), European Commission under the 5th Framework Program* 2004, 2001.
- [2] R. Friedman, An international survey of computer models for fire and smoke, *Journal of fire protection engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 81-92, 1992.
- [3] M. Faghri, B. Sundén, eds. *Transport phenomena in fires*, Vol. 20, WIT press, 2008.
- [4] R. O. Carvel, Fire size in tunnels, 2004.
- [5] H. Ingason, Design fires in tunnels, In *Conference proceedings of Asiaflam*, Vol. 95, pp. 77-86, 2006.
- [6] K. M. Butler, G. W. Mulholland, Generation and transport of smoke components, *Fire Technology*, Vol. 40, No. 2, pp. 149-176, 2004.
- [7] J. M. Sauer, E. E. Smith, Mathematical model of a ventilation controlled compartment fire, *Journal of fire sciences*, Vol. 1, No. 4, pp. 235-254, 1983.
- [8] B. Karlsson, A mathematical model for calculating heat release rate in the room corner test, *Fire safety journal*, Vol. 20, No. 2, pp. 93-113, 1993.
- [9] M. Konecki, M. Polka, Extension of the Fire Zone Model with Some Detailed Mass and Heat Transfer, *Journal of Applied Sciences Research*, pp. 212-220, 2009.
- [10] T. Tanaka, A model of multiroom fire spread." *Fire Science and Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 105-121, 1983.
- [11] W. Jones, R. D. Peacock, G. P. Forney, P. A. Reneke, *Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*, NIST Special Publication 1026, Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1041, User's Guide, 2006.
- [12] Olenick, Stephen M., and Douglas J. Carpenter. "An updated international survey of computer models for fire and smoke." *Journal of fire protection engineering* 13, no. 2 (2003): 87-110.
- [13] W. D. Walton, D. J. Carpenter, C. B. Wood, Zone computer fire models for enclosures, In *SFPE handbook of fire protection engineering*, Springer New York, pp. 1024-1033, 2016.
- [14] W. D. Walton, ASET-B: A room fire program for personal computers, *Fire Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 293-309, 1985.
- [15] V. Ho, N. Siu, G. Apostolakis, COMPBRN III-A fire hazard model for risk analysis, *Fire safety journal*, Vol. 13, No. 2, pp. 137-154, 1988.
- [16] V. Babrauskas, COMPF2-A Program for Calculating Post-Flashover Fire Temperatures Final Report, *NBS TN*, Vol. 991, 1979.
- [17] M. R. Curtat, X. E. Bodart, *1st Symposium International Association for Fire Safety Science*, Hemisphere Publications, Gaithersburg, MD, p. 637, 1986.
- [18] W. Jones, G. P. Forney, R. D. Peacock, P. A. Reneke, A technical reference for CFAST: an engineering tool for estimating fire and smoke transport, *NIST TN*, Vol. 1431, 2000.
- [19] C. A. J. Wade, J. R. Barnett, A Room Corner Fire Growth & Zone Model for Lining Material, *Second International Conference on Fire Research and Engineering (ICFRE2)*, National Institute of Standards and Technology and Society of Fire Protection Engineers, Gaithersburg, MD, pp. 106-117, 1998.
- [20] W. Davis, The Zone Fire Model JET: A Model for the Prediction of Detector Activation and Gas Temperature in the Presence of a Smoke Layer, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1999.
- [21] H. E. Mitler, J. A. Rockett, Users' guide to FIRSAT, a comprehensive single-room fire model, US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1987.
- [22] H. E. Nelson, *FPETOOL: Fire protection engineering tools for hazard estimation*, Center for Fire Research, 1990.

- [23] L. Y. Cooper, Estimating the environment and the response of sprinkler links in compartment fires with draft curtains and fusible link-actuated ceiling vents-Theory, *Fire Safety Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 137-163, 1990.
- [24] D. B. Satterfield, J. R. Barnett, User's Guide to WPI-HARVARD Version 2 (WPI-2)-A Compartment Fire Model, Worcester Polytechnic Institute, *Center for Fire Safety Studies, Worcester, MA*, 1990.
- [25] C. Xiaojun, Y. Lizhong, D. Zhihua, F. Weicheng, A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room, *Fire safety journal*, Vol. 40, No. 3, pp. 267-281, 2005.
- [26] C. Xiaojun, Simulation of temperature and smoke distribution of a tunnel fire based on modifications of multi-layer zone model, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 75-79, 2008.
- [27] L. Yi, Y. Gao, J. L. Niu, S. J. Yang, Study on effect of wind on natural smoke exhaust of enclosure fire with a two-layer zone model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 119, pp. 28-38, 2013.
- [28] Y. H. Lee, J. H. Kim, J. E. Yang, Application of the CFAST zone model to the Fire PSA, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 10, pp. 3571-3576, 2010.
- [29] S. Jain, S. Kumar, S. Kumar, T. P. Sharma, Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 160-170, 2008.
- [30] B. E. Vembe, K. E. Rain, J. K. Holen, N. I. Lilleheie, B. Grimsmo, *Kameleon FireEx 2000 User Manual*, Computational Industry Technology, 2008.
- [31] FM Global, accessed September 30, 2015, *FireFOAM*, <https://github.com/fireFoam-dev>.
- [32] Y. Wang, P. Chatterjee, J. L. Ris, Large eddy simulation of fire plumes, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, No. 2, pp. 2473-2480, 2011.
- [33] Y. Wang, K. Meredith, X. Zhou, P. Chatterjee, Y. Xin, M. Chaos, N. Ren, S. Dorofeev, Numerical simulation of sprinkler suppression of rack storage fires, *Fire Safety Science*, Vol. 11, pp. 1170-1183, 2014.
- [34] W. Binbin, Comparative research on FLUENT and FDS's numerical simulation of smoke spread in subway platform fire, *Procedia Engineering* Vol. 26, pp. 1065-1075, 2011.
- [35] Q. Li, Z. Fang, J. Yuan, Z. Tang, Numerical Simulation on Impacts of Longitudinal Ventilation on Tunnel Fire Detection, *Procedia Engineering*, Vol. 135, pp. 274-279, 2016.
- [36] Y. F. Wang, X. F. Sun, S. Liu, P. N. Yan, T. Qin, B. Zhang, Simulation of back-layering length in tunnel fire with vertical shafts, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, pp. 344-35, 2016.
- [37] S. Vilfayeau, J. P. White, P. B. Sunderland, A. W. Marshall, A. Trouvé, Large eddy simulation of flame extinction in a turbulent line fire exposed to air-nitrogen co-flow, *Fire Safety Journal*, Vol. 86, pp. 16-31v 2016.

پی نوشت

1. Narcotic gases
 2. irritant gases
 3. incipient phase
 4. smoldering
 5. growth phase
 6. flash over
 7. fully developed phase
 8. decay phase
 9. extinction
 10. heat release rate

11. smoke flow rate
 12. smoke yield
 13. zone models
 14. field models
 15. fire plume
 16. FLUENT
 17. PHONICS
 18. CFX
 19. FDS
 20. SOFIE

-
21. KAMELEON FireEx
 22. SMARTFIRE
 23. fire
 24. JASMINE
 25. KOBRA-3D
 26. SOLVENT
 27. SPLASH
 28. FireFoam
 29. OpenFoam
 30. hybrid field-zone model