

بِسْمِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

بررسی پارامترهای آتش برای ده مصالح ساختمانی و تحلیل خطر حریق با نرم افزارهای شبیه سازی آتش

دکتر سعید بختیاری

(عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)

مهندس مسعود جمالی آشتیانی

(عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)

لیلا تقی اکبری

مهندس زهرا درودیانی

الهام عسکری مقدم

گزارش تحقیقاتی

شماره نشر: گ - ۶۸۰

چاپ اول: ۱۳۹۲

عنوان و نام پدیدآور	بررسی پارامترهای آتش برای ده مصالح ساختمانی و تحلیل خطر حریق با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آتش/سعید بختیاری...[و دیگران].
مشخصات نشر	تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	۲۰۰ص: مصور، جدول، نمودار.
فروست	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. گزارش تحقیقاتی: شماره نشر گ-۶۸۰.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۲-۷۹-۱
وضعیت فهرست‌نویسی	قیبا
یادداشت	[مؤلفان] سعید بختیاری، مسعود جمالی، لیلا تقی‌اکبری، زهرا درودیانی، الهام عسکری مقدم.
یادداشت	کتابنامه
موضوع	مصالح ساختمانی - - خواص حرارتی - - آزمایش
موضوع	آتش سوزی - - پیشگیری
موضوع	آتش سوزی - - پیش‌بینی‌های ایمنی
شناسه افزوده	بختیاری، سعید، ۱۳۴۶-
شناسه افزوده	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
رده‌بندی کنگره	TH۱۰۹۲/ب۴ ۱۳۹۱
رده‌بندی دیویی	۶۲۰/۱۱۲۹۶
شماره کتابشناسی ملی	۳۱۶۹۳۴۶

مصوبه شماره ۹۲/۷۶۳ چاپ کتاب، شورای علمی انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

بررسی پارامترهای آتش برای ده مصالح ساختمانی و تحلیل خطر حریق با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آتش

دکتر سعید بختیاری، مهندس مسعود جمالی آشتیانی، لیلا تقی‌اکبری،

مهندس زهرا درودیانی، الهام عسکری مقدم

شماره نشر: گ - ۶۸۰ چاپ اول: ۱۳۹۲

ناشر: انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تنظیم برای چاپ: نسرین مقدس

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

بها: ۳۵۰۰۰ ریال

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مسئولیت صحت دیدگاه‌های علمی بر عهده نگارندگان محترم می‌باشد.

کلیه حقوق چاپ و انتشار اثر به ناشر تعلق دارد.

نشانی: تهران، بزرگراه شیخ فضل‌لہ نوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی،

خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۳۱۴۵-۱۶۹۶

تلفن: ۶-۸۸۲۵۵۹۴۲-۸۸۲۵۵۹۴۱ دورنگار: ۸۸۲۵۵۹۴۱

پست الکترونیکی: president@bhrc.ac.ir صفحه الکترونیکی: <http://www.bhrc.ac.ir>

ISBN: 978-600-5392-79-1

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۲-۷۹-۱

پیشگفتار

آتش‌سوزی حادثه‌ای ناگوار است که همواره احتمال وقوع آن در ساختمان‌ها وجود دارد. هر سال عده‌ای از شهروندان بر اثر آتش‌سوزی در ساختمان‌ها جان خود را از دست داده یا دچار جراحاتی می‌شوند. همچنین میلیاردها تومان از سرمایه‌های کشور بر اثر حریق از بین می‌رود. این در حالی است که تحلیل‌های دقیق بر روی آمار آتش‌سوزی در ایران موجود نیست. به عنوان مثال تعداد معلولیت‌های دائمی، آمار موقعیت‌های شغلی که به علت آتش‌سوزی از دست رفته و یا تعداد خانواده‌هایی که دچار آسیب‌های شدید اقتصادی شده‌اند، مسائلی هستند که اطلاعی از آنها موجود نیست و از هر دو بعد انسانی و اجتماعی حائز اهمیت هستند. خسارت‌های غیر مستقیم مانند هزینه‌های بازسازی، خرید مجدد تجهیزات، از بین رفتن اسناد و مدارک، توقف چرخه فعالیت‌های اقتصادی و موارد دیگر باعث خسارت‌های مالی بسیار بیشتری از خسارت‌های مستقیم می‌شوند. ابعاد این خسارات با توسعه شهری و صنعتی افزایش می‌یابد، زیرا رشد جمعیت شهری، افزایش ساختمان‌های بلند، توسعه مراکز بزرگ تجمعی، تجاری، صنعتی و انبارها می‌توانند خطر خطر آتش‌سوزی را افزایش دهند. ضمناً با توجه به اینکه اکثر نقاط ایران در یک منطقه خطرناک از نظر وقوع زلزله قرار دارد، خطر وقوع آتش‌سوزی‌های بزرگ پس از زلزله در شهرها زیاد است.

بنابراین محافظت از ساختمان‌ها در برابر آتش از تمام ابعاد انسانی، منافع فردی، اقتصادی و حتی امنیت ملی از ضروری‌ترین نیازها و الزامات در طرح و اجرای ساختمان‌ها است. برای کاهش خسارت‌های ناشی از آتش‌سوزی باید فعالیت‌های مهمی به طور موازی و مکمل صورت گیرد. برای الزامی شدن رعایت ایمنی حریق در ساختمان‌ها باید آیین‌نامه‌ها، مقررات و استانداردهای محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش تدوین شود. تعداد زیادی از مقررات، ضوابط، آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ملی در زمینه آتش توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با همکاری سازمان‌ها، اساتید و کارشناسان دیگر تهیه شده است. استانداردهای مقاومت در برابر آتش، واکنش در برابر آتش، طبقه بندی مواد در برابر آتش، ویژگی‌های مصالح و سیستم‌های ساختمانی در برابر آتش و ... با محوریت مرکز تهیه شده است.

خوشبختانه و با عنایت خداوند متعال، اولین آزمایشگاه مجهز آتش با دستگاه‌ها و تجهیزات به روز، در مرکز راه‌اندازی شده و پشتوانه مهمی برای مقررات و استانداردهای ملی کشور است. از جمله باید راه‌اندازی آزمایشگاه‌های مهمی مانند آزمون SBI و مقاومت در برابر آتش در مقیاس

متوسط را نام برد که همراه با استانداردهای به روز دنیا پشتوانه خوبی برای صنعت ساختمان کشور و ارتقاء ایمنی جانی و مالی در ساختمان‌ها است. از نیازهای مهم ایمنی در برابر آتش، وضع مقررات مناسب برای کاربرد مصالح در فضاهای مختلف (مانند فضاهای سکونتی، تجمعی، راه‌پله‌ها و ...) است. همچنین مدل‌سازی حریق در ساختمان‌ها می‌تواند به طراحی بهتر ایمنی در برابر آتش و امتحان سناریوها و تمهیدات مختلف کمک شایانی نماید. این گزارش تحقیقاتی گام بسیار مهم و خوبی در این جهت است. رفتار چند مصالح ساختمانی رایج در صنعت ساختمان کشور آزمایش و نقش بالقوه آنها در گسترش آتش‌سوزی در ساختمان با نرم‌افزارهای تخصصی بررسی شده است. یک روش جدید برای طبقه‌بندی خطر مواد در برابر آتش با آزمون‌های مقیاس کوچک ارائه شده که می‌تواند در مقررات ملی ساختمان، صنایع، مهندسان مشاور و طراحان برای ارزیابی خواص مواد در برابر آتش مورد استفاده قرار گیرد. نتایج مفیدی در خصوص رفتار مصالح در برابر آتش (از هر دو جنبه تئوری و آزمون تجربی) ارائه شده که امید است مورد توجه و کاربرد مهندسان و طراحان قرار گیرد.

سید محمود فاطمی عقدا

رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه.....
۴	۱-۱ آشنایی با مفاهیم آتش‌سوزی.....
۶	۲-۱ موارد قابل پیش‌بینی مدل‌های آتش.....
۶	۱-۲-۱ شدت افروزش و سوختن سوخت‌های جامد مختلف.....
۷	۲-۲-۱ گسترش آتش‌سوزی و پیشروی شعله.....
۸	۳-۲-۱ دود، فرآورده‌های سمی و خطر تابش.....
۸	۴-۲-۱ اطفاء.....
۸	۵-۲-۱ اثر آتش بر روی سازه‌ها.....
۹	۳-۱ انواع اصلی مدل‌سازی آتش.....
۱۱	فصل دوم: مرور ادبیات علمی - طبقه‌بندی مصالح از نظر خطر حریق.....
۱۱	۱-۲ واکنش در برابر آتش: اصول و روش‌های طبقه‌بندی.....
۱۲	۱-۱-۲ طبقه‌بندی‌های مبتنی بر افروزش.....
۱۴	۲-۱-۲ پیشروی سطحی شعله بر روی مصالح و فرآورده‌های ساختمانی.....
۲۰	۳-۱-۲ سیستم‌های ملی و بین‌المللی طبقه‌بندی واکنش در برابر آتش.....
۲۰	۴-۱-۲ اصول و مفاهیم طبقه‌بندی در برابر آتش با استفاده از پارامترهای آزمون گوشه اتاق و
۲۶	FIGRA.....
۲۲	۲-۲ گسترش حریق در اتاق بر روی نازک‌کاری‌های دیوار و سقف - تجزیه و تحلیل بر اساس
۳۸	انتقال حرارت.....
۳۸	۱-۲-۲ تئوری‌های حرارتی برای پیش‌بینی زمان افروزش و پیشروی شعله.....
۳۸	الف- افروزش.....
۴۳	ب- پیشروی شعله.....
۴۶	۳-۲ برخی مدل‌های پیشرفته آتش‌سوزی اتاق.....
۴۶	۱-۳-۲ مدل Conetools.....
۴۸	۲-۳-۲ مدل BRANZFIRE.....
۵۰	۳-۳-۲ پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی.....

۴-۲ مروری بر برخی طبقه‌بندی‌های مهم مواد از نظر خطر آتش‌سوزی ۵۰

فصل سوم: مرور ادبیات علمی – مدل‌های ناحیه‌ای و میدانی مهندسی آتش ۶۳

۱-۳ مدل‌های ناحیه‌ای آتش‌سوزی در فضای بسته ۶۳

۸-۱-۳ محدودیت‌های مدل‌سازی ناحیه‌ای ۶۷

۲-۳ مدل‌های میدانی (CFD) برای آتش‌سوزی های فضاهای محصور ۶۸

۱-۲-۳ طبقه‌بندی مدل‌های میدانی و دامنه مرور ۶۹

۲-۲-۳ مدل‌های میدانی دو معادله‌ای برای توربولانس ۷۰

۳-۲-۳ مدل‌سازی توربولانس میدان جریان ۷۲

۴-۲-۳ مدل‌سازی احتراق ۷۶

۵-۲-۳ شیمی جزئیات ۸۰

۶-۲-۳ رفتار تابشی ۸۱

۷-۲-۳ تشکیل دوده ۸۳

۳-۳ مدل‌سازی اطفاء ۸۴

۱-۳-۳ بازبینی مختصر داده‌های آزمایشگاهی ۸۴

۲-۳-۳ مدل‌های لاگرانژی - اویلری ۸۵

۳-۳-۳ مدل‌های اویلری ۸۷

۴-۳ مدل‌سازی آتش پیشرفته ۸۸

۱-۴-۳ رویکردهای اصلی برای مدل‌سازی توربولانس ۸۸

۲-۴-۳ تکنیک LES و کاربرد آن در مدل‌سازی آتش ۸۹

۳-۴-۳ توسعه‌های آتی در مدل‌سازی آتش LES ۹۳

۵-۳ بررسی برخی مدل‌های کامپیوتری ناحیه‌ای و منطقه‌ای ۹۴

۱-۵-۳ مدل‌های تک ناحیه‌ای ۹۴

۲-۵-۳ مدل‌های دو ناحیه‌ای ۹۵

۲-۲-۲-۵-۳ FIRM مدل ۹۹

۳-۵-۳ مدل‌های میدانی ۱۰۱

فصل چهارم: کارهای تجربی (مواد و روش‌های آزمون) ۱۰۷

۱-۴ مواد ۱۰۷



۱۰۸.....	۲-۴ روش آزمون.....
۱۰۹.....	۱-۲-۴ تئوری گرماسنجی بر اساس مصرف اکسیژن.....
۱۱۱.....	۲-۲-۴ معادلات اساسی.....
۱۲۱.....	فصل پنجم: نتایج و بحث.....
۱۲۴.....	۱-۵ زمان افروزش و مدت زمان شعله‌وری.....
۱۲۶.....	۲-۵ شدت رهایش گرما.....
۱۲۹.....	۳-۵ مقدار کل رهایش گرما.....
۱۳۱.....	۴-۵ بررسی ارتباط بین پارامترهای آتش.....
۱۳۲.....	۱-۴-۵ ارتباط بین پارامترهای رهایش گرما با زمان افروزش.....
۱۳۶.....	۲-۴-۵ ارتباط کل رهایش گرما با حداکثر شدت رهایش گرما.....
۱۳۹.....	۳-۴-۵ ارتباط بین حداکثر شدت رهایش گرما با میانگین شدت رهایش گرما.....
۱۳۹.....	۴-۴-۵ ارتباط بین رهایش دود و میانگین شدت رهایش گرما.....
۱۴۱.....	۵-۵ اثر تراز تابشی.....
۱۴۳.....	۱-۵-۵ زمان افروزش.....
۱۴۳.....	۲-۵-۵ شدت رهایش گرما.....
۱۴۴.....	۶-۵ ارزیابی و دسته‌بندی خطرپذیری آتش‌سوزی.....
۱۴۶.....	۱-۶-۵ رده‌بندی بر اساس معادله اوستمان و Conetools.....
۱۴۷.....	۲-۶-۵ ارزیابی خط بر اساس روش پترلا.....
۱۴۹.....	۳-۸-۵ مقایسه طبقه‌بندی‌های ریچاردسون، مبحث سوم و conetools.....
۱۵۲.....	۷-۵ کارهای انجام شده بر روی مدل FDS.....
۱۵۷.....	فصل ششم: خلاصه و نتیجه‌گیری.....
۱۶۱.....	مراجع.....
۱۶۷.....	پیوست‌ها: نتایج کامل آزمون‌های آتش بر روی آزمون‌ها.....

چکیده

ایمنی ساختمان‌ها در برابر آتش موضوع مهمی است که در طراحی و اجرای ساختمان‌ها باید در نظر گرفته شود. آتش‌سوزی می‌تواند باعث خسارات جانی و مالی شدید و حتی ریزش کامل ساختمان شود. در سال‌های اخیر مصالح پلیمری زیادی وارد صنعت ساختمان شده که بسیاری از آنها قابلیت اشتعال بالایی دارند و کاربرد آنها در ساختمان می‌تواند خطرناک باشد. بنابراین رفتار این مواد در برابر آتش باید به وسیله آزمایش‌های آتش تعیین و طبقه‌بندی شود. همچنین لازم است تا با وضع مقررات ساختمانی مناسب، از کاربرد مصالح خطرناک در ساختمان و یا در فضاهایی که به ایمنی بیشتری نیاز است (مانند فضاهای تجمعی و راه پله‌ها) جلوگیری شود. همچنین مدل‌سازی حریق در ساختمان‌ها می‌تواند به طراحی بهتر ایمنی در برابر آتش و امتحان سناریوها و تمهیدات مختلف کمک شایانی نماید. امروزه کاربرد این مدل‌ها در دنیا در حال افزایش است و نرم‌افزارهای تخصصی به وسیله مراکز تحقیقاتی توسعه یافته‌اند. در این گزارش، ابتدا مرور نسبتاً کاملی بر روش‌های طبقه‌بندی مصالح از نظر خطر حریق ارائه شده است. مطالب تئوری مربوط به مدل‌های ناحیه‌ای و میدانی آتش بررسی و ارائه شده است. مبانی نظری و معادلات ریاضی حاکم بر این روش‌ها ارائه شده است. مدل‌های ناحیه‌ای و میدانی موجود در مهندسی آتش بررسی و مرور گردید. کاربرد نرم‌افزارهای منتخب و قابلیت‌های آنها بررسی شد.

رفتار ده مصالح ساختمانی رایج و جدید پلیمری در برابر آتش به وسیله گرماسنج مخروطی در تابش 50 kW/m^2 آزمایش شد. پارامترهای حرارتی آتش ناشی از سوختن مواد، با هدف تحلیل خطر آنها در گسترش آتش‌سوزی ارائه و بحث شده است. خطر مواد در آتش‌سوزی به وسیله روش‌های ارائه شده توسط محققین مختلف و نرم‌افزار Conetools بررسی و بحث شد. اکثر مواد بررسی شده، رفتار خطرناکی در برابر آتش داشتند. خصوصاً نمونه‌های اپوکسی، MDF، HDF و پلی‌کربنات بسیار خطرناک نشان دادند. نتایج نشان داد که پارامترهای زمان افروزش، شدت رهائش گرما و کل رهائش گرما مهم‌ترین مشخصات آتش مواد برای تعیین خطر آنها در گسترش آتش‌سوزی هستند. زمان افروزش بر روی زمان وقوع گرگرفتگی در اتاق و سرعت پیشروی سطحی شعله بر روی نازک‌کاری‌ها تأثیر مهمی دارد و نادیده گرفتن آن می‌تواند به پیش‌بینی اشتباه خطر مواد در گسترش آتش‌سوزی منجر شود. یک روش جدید برای طبقه‌بندی خطر مواد در برابر آتش تهیه شد که می‌تواند در مقررات ملی ساختمان برای ارزیابی خواص مواد در برابر آتش مورد استفاده قرار گیرد.

فصل اول

مقدمه و کلیات

یکی از جنبه‌های مهم طراحی ایمنی در برابر آتش برای ساختمان‌ها، شناخت رفتار مصالح و سیستم‌های ساختمانی در برابر آتش و پیش‌بینی رفتار آتش‌سوزی در ساختمان است. از روش‌های مهم به این منظور، آزمایش رفتار مصالح در برابر آتش و نیز استفاده از نرم‌افزارها و مدل‌های کامپیوتری است. استفاده از این نرم‌افزارها خصوصاً در طراحی‌های مهندسی و شیوه‌های عملکردی طراحی ساختمان¹ اهمیت بیشتری می‌یابد. به این منظور مدل‌های کامپیوتری مختلفی نیز توسط مراکز پژوهشی مهم در خارج از کشور تهیه شده است. به وسیله کدهای محاسباتی و نرم‌افزارهای موجود و نیز با استفاده از نتایج آزمون‌های آتش، گسترش حریق در فضاهای مختلف ساختمان و پارامترهای دود و حرارت را می‌توان تحلیل کرد. اما متأسفانه تجربه استفاده از این قبیل مدل‌ها و یا نوشتن آنها در کشور تاکنون چندان موجود نبوده است. طبعاً ورود اطلاعات به این نرم‌افزارها، نیاز به نتایج مورد اعتماد خواص مواد در برابر آتش دارد. خصوصاً نتایج آزمون‌های مقیاس کوچک، برای کاهش هزینه‌ها، بیشتر مورد توجه است.

آتش‌سوزی که در عرف به عنوان گسترش کنترل‌نشده شعله تعریف شده است، به عنوان یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های علم احتراق مطرح است. آتش‌سوزی تقریباً تمام اثرات موجود در جریان‌های واکنش‌دهنده شیمیایی را در بر گرفته و علوم و فنون مختلف شامل دینامیک سیالات، احتراق، تابش و در بسیاری از حالت‌ها، اثرات جریان چند فازی برای تحلیل این پدیده پیچیده فیزیکی و شیمیایی با هم پیوند داده می‌شوند. مسائل احتراق، توربولانس و دینامیک

1. Performance-Based Design

سیالات برای پدیده آتش‌سوزی هنوز به طور کامل حل نشده و چالش‌های مهمی را در پیش رو قرار می‌دهد. قرار دادن تمام این فرایندها در داخل یک مدل محاسباتی یکپارچه، حتی کار بسیار دشوارتری نیز به شمار می‌رود.

شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی و محصولات آن (حرارت و دود) شامل مباحث رشته‌های مختلف می‌شود و طیف وسیعی از پدیده‌های فیزیکی را در بر می‌گیرد که هیدرودینامیک، انتقال حرارت، انتقال جرم، سمیت گازها، واکنش مصالح در برابر دماهای بالا و غیره از این جمله هستند. برای مدل کردن رفتار در برابر آتش معمولاً از دو مدل منطقه‌ای و میدانی استفاده می‌شود. مدل منطقه‌ای بر اساس معادلات تجربی و فیزیکی برای تعیین گام به گام همه مقادیر مورد احتیاج رفتار در برابر آتش و تأثیر آن بر محیط اطراف استفاده می‌شود. این مدل فضاهای آتش را به تعدادی مناطق بزرگ همچون جریان ستونی و لایه گاز داغ دودی زیر سقف تقسیم می‌کند و از روابط تجربی اثبات شده برای انتقال حرارت و دود بین این مناطق استفاده می‌کند. اما در مدل میدانی آتش (مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD) از روش‌های عددی برای محاسبه مقادیر متغیر استفاده می‌شود. در این مدل فضای آتش به تعداد زیادی سلول تقسیم شده، محاسبات جریان و حرارت با استفاده از معادلات اساسی فیزیک حل می‌شوند. به همین خاطر، مدل میدانی از دقت بیشتری برخوردار بوده، ولی در عین حال احتیاج به امکانات بیشتری نیز دارد. هر دو مدل منطقه‌ای و میدانی برای فضاهای مختلف باز و بسته مانند انبارها، تونل‌ها و متروها و ... استفاده می‌شوند.

همگام با توسعه شهرها و صنعت، وقوع آتش‌سوزی در ساختمان‌ها، بیشتر می‌شود. از دلایل این موضوع می‌توان توسعه ساختمان‌های بلند، گسترش استفاده از مصالح جدید پلیمری، گسترش انواع انبارهای مواد اولیه، کالا، مواد شیمیایی، استفاده از مواد قابل اشتعال فراوان در صنایع و غیره را بر شمرد. بنابراین لازم است تا مقررات و استانداردهای ایمنی در برابر آتش توسعه یابند و جوانب ایمنی در برابر آتش در ساختمان‌ها رعایت شود. برای این منظور لازم است تا با استفاده از تحقیقات تجربی، رفتار مواد و مصالح مختلف در برابر آتش شناخته شود. همچنین باید با استفاده از نرم‌افزارهای مدرن امروزی، توسعه آتش‌سوزی در ساختمان‌ها را با سناریوهای مختلف مدل نمود تا بتوان طراحی مناسب ایمنی در برابر آتش در ساختمان‌ها را انجام داد.



در این پژوهش، پارامترهای آتش در چند تراز مختلف تابشی برای ۱۰ گونه از مصالح ساختمانی رایج و جدید با دستگاه گرماسنج مخروطی^۱ ۱۱۱ بررسی می‌شود. این مصالح از جنس نازک‌کاری و مصالح مبلمان ثابت خواهند بود. نتایج آزمایش‌های تجربی به وسیله نرم‌افزار Conetools تحلیل می‌شود تا رده (کلاس) واکنش در برابر آتش مصالح بر حسب نتایج این نرم‌افزار پیش‌بینی شود. همچنین خطر مشارکت مواد در گسترش آتش‌سوزی با روش‌های مختلف ارزیابی می‌شود. نتایج تا جای امکان و با استفاده از ادبیات علمی موضوع، با نتایج واقعی SBI و سایر آزمون‌های متوسط بررسی می‌شود. بر این اساس روش موقت ارائه شده در پیش‌نویس مبحث سوم مقررات ملی ساختمان به طور جدی‌تری بررسی و با روش‌های جدید ارائه شده در مقررات ساختمانی چند کشور اروپایی مقایسه می‌شود.

همزمان امکانات و توانایی‌های تعدادی از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مهندسی آتش بررسی و یکی از آنها برای ورود اطلاعات و انجام شبیه‌سازی‌های کامل‌تر در پروژه‌های آینده انتخاب می‌شود. قابلیت‌های نرم‌افزار بررسی و بحث می‌شود.

این گزارش در شش فصل اصلی ارائه شده است. همچنین نتایج کامل آزمون‌ها (به تفکیک آزمون‌ها) نیز در پیوست آورده شده است. در ادامه این فصل، کلیاتی در خصوص گسترش آتش‌سوزی در ساختمان و مدل‌های حریق بیان می‌شود. در فصل دوم به مرور ادبیات علمی درباره طبقه‌بندی مواد پرداخته شده است. اصول طبقه‌بندی ایمنی در برابر آتش و پیشرفت‌های رخ داده در سال‌های اخیر در این خصوص ارائه شده است. اصول و مفاهیم مدل‌سازی‌های ناحیه‌ای و میدانی مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل سوم، مدل‌های ناحیه‌ای و میدانی مهندسی آتش بحث شده است. مدل‌های میدانی بر مبنای معادلات ناویر استوکس رینولدز متوسط‌گیری شده (RANS)^۲ مطرح شده‌اند. این مدل‌ها یک استاندارد رایج را برای شبیه‌سازی CFD آتش تشکیل می‌دهند. تصحیحات مختلف مدل‌های توربولانس، احتراق، تابش و شیمی در کاربرد با مدل‌سازی آتش توصیف شده است. در همین فصل به بررسی نرم افزارها بر مبنای مدل‌سازی ناحیه‌ای و میدانی پرداخته شده و عملکرد آنها در مدل‌سازی آتش فضای بسته بررسی شده است.

در فصل چهارم روش‌های تجربی و مدل‌های استفاده شده در این پژوهش، ارائه شده‌اند.

1. Cone Calorimeter
2. Reynolds-Averaged Navier-Stokes

نتایج تجربی آزمون بر روی ده گونه از مصالح جدید و سنتی مورد استفاده در ساختمان‌ها در دو تراز تابش‌دهی مختلف در فصل پنجم ارائه و بحث شده است. رفتار مصالح آزمون شده در برابر آتش بر اساس نتایج به دست آمده، تحلیل و خطر خطر آنها در آتش‌سوزی مورد بحث قرار گرفته است. به این منظور از روش‌های ریچاردسون و نرم‌افزار Conetools استفاده شده است. همچنین تحلیل نتایج با روش استفاده شده در پیش‌نویس مبحث سوم مقررات ملی ایران مقایسه و بحث شده است. نتیجه‌گیری و پیشنهادها در فصل ششم ارائه شده است.

۱-۱ آشنایی با مفاهیم آتش‌سوزی

آتش‌سوزی یک پدیده بسیار پیچیده با خطرات مختلفی برای انسان‌ها، کالا و دارای‌ها و محیط زیست است. آتش فضای بسته نمونه‌وار (بدون هرگونه تلاش برای کنترل آن) مراحل عمده زیر را در برمی‌گیرد:

افروزش: فرایند افروزش می‌تواند در حضور شعله بیرونی (شعله، جرقه و...) یا به صورت خودبه‌خودی (به علت تجمع گرما در سوخت) باشد. به محض این‌که افروزش رخ داد، قسمتی از سوخت جامد در فضای بسته پیرولیز می‌شود و مواد فرار گازی آزاد می‌کند که همچنان که با اکسیژن موجود در هوا مخلوط شده و می‌سوزند.

گسترش: پس از افروزش، آتش‌سوزی با شدتی که وابسته به نوع سوخت، دسترسی به اکسیژن، هندسه فضای بسته و دیگر عوامل است، گسترش پیدا می‌کند. انتقال حرارت به سطوح قابل سوختن مجاور و نزدیک می‌تواند دمای سطوح را به دمای افروزش آنها برساند. فاز گازی را می‌توان به عنوان انتقال‌دهنده اولیه انرژی بین اشتعال و سوخت تازه در نظر گرفت. در طول این مرحله، گازهای داغ تولید شده به وسیله آتش، به علت شناوری هوای اطراف بالا رفته و جریان ستونی آتش^۱ شکل می‌گیرد. برخورد جریان ستونی آتش با سقف فضای بسته، باعث شکل گرفتن یک لایه دود داغ در لایه فوقانی اتاق می‌شود.

اگر سوخت و اکسیژن کافی در دسترس باشد، آتش‌سوزی به رشد ادامه خواهد داد و سبب افزایش دما در فضای بسته می‌شود. آتش‌های با اکسیژن کافی برای سوختن تحت عنوان «کنترل شده با سوخت» شناخته می‌شوند، زیرا عامل اکسیژن، رشد آنها را محدود نساخته،



بلکه مقدار مواد سوختنی موجود است که رشد آتش‌سوزی را کنترل می‌نماید.

گرگرفتگی سراسری^۱: گرگرفتگی سراسری اصطلاح دقیقی نیست و چندین تعریف متفاوت می‌تواند در ادبیات علمی یافت شود. گرگرفتگی سراسری، انتقال سریع از دوره گسترش به دوره آتش‌سوزی کاملاً توسعه یافته^۲ است. در این مرحله، کل سطح مصالح قابل‌سوختن در آتش‌سوزی درگیر می‌شوند. گرگرفتگی سراسری نمایانگر یک ناپایداری حرارتی است که عمدتاً به علت تابش قوی از لایه دود و گازهای داغ در زیر سقف به مصالح قابل‌سوختن داخل فضای بسته ایجاد می‌شود.

اغلب آنها معیارهایی بر پایه دما دارند که تابش از گازهای داغ در فضای بسته همه اجزای قابل‌سوختن را خواهند افروخت. دماهای گاز از ۳۰۰ درجه سلسیوس تا ۶۵۰ درجه سلسیوس همراه با شروع گرگرفتگی سراسری است، اگرچه دماهای ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس به طور گسترده‌تری استفاده می‌شود.

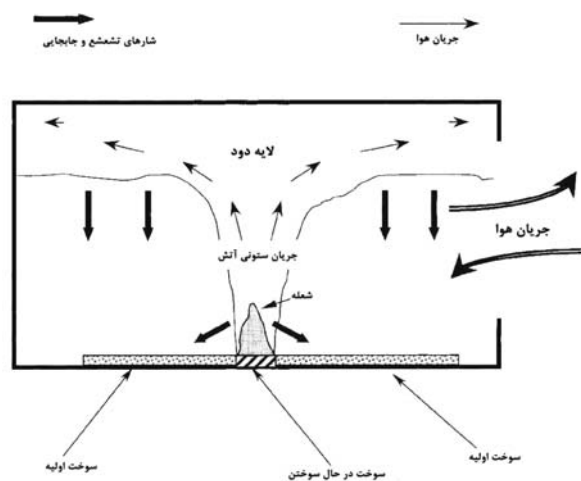
آتش‌سوزی کاملاً توسعه یافته: در این مرحله، شدت رهائش گرما به حد اکثر می‌رسد و اغلب، توسعه آتش به وسیله قابلیت دسترسی به اکسیژن محدود می‌شود. در طول این مرحله، معمولاً سوخت بیشتری نسبت به آنچه که می‌تواند با اکسیژن قابل دسترس در فضای بسته بسوزد، پیرولیز می‌شود. بنابراین آتش‌سوزی به صورت «کنترل شده با تهویه» است، به این معنا که محدودیت اکسیژن قابل دسترس، رشد آتش‌سوزی را کنترل می‌نماید.

اگر بازشوهایی در فضای بسته وجود داشته باشند، سوخت گازی سوخته نشده فضای بسته را ترک خواهد کرد و ممکن است بیرون از فضای بسته بسوزد. در طول این مرحله، محیط داخل فضای بسته اثر مهمی روی شدت پیرولیز اشیاء در حال سوختن دارد. متوسط دماها در فضاهای بسته بسیار زیاد و در حدود ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس است.

زوال: در طول این مرحله شدت رهائش انرژی همچنان که سوخت مصرف می‌شود کاهش می‌یابد. طرحی از توسعه آتش‌سوزی طی مرحله رشد آن در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است. آتش ممکن است از حالت کنترل شده با تهویه به حالت کنترل شده با سوخت طی این دوره تغییر کند.

1. Flashover

2. Fully Developed Fire



شکل ۱-۱ نمای شماتیک گسترش آتش در فضای بسته

۱-۲-۲ موارد قابل پیش‌بینی مدل‌های آتش

از نقطه نظر عملی، یک مدل آتش باید قادر به پیش‌گویی جنبه‌های اصلی این پدیده به صورت زیر باشد:

۱-۲-۱-۱ شدت افروزش و سوختن سوخت‌های جامد مختلف

سوخت‌های جامد اکثر مصالح قابل سوختن ساختمان‌های مسکونی را شامل می‌شود. این قسمت از مدل‌سازی اصولاً با شبیه‌سازی فرایند انتقال حرارت و پیرولیز مواد جامد مختلف (متخلخل یا غیر متخلخل، زغال‌شو، غیر زغال‌شو) درگیر است. در اغلب وضعیت‌های رایج، در طول آتش‌سوزی فضاهای بسته، احتراق همراه با شعله‌وری است، به این معنا که محصولات پیرولیز سوخت به صورت فاز گازی آزاد شده و پس از مخلوط شدن با هوا، مشتعل می‌شود. بنابراین، نقش اصلی مدل، پیش‌بینی شدت پیرولیز به عنوان تابعی از شار حرارتی برخوردی به مصالح مورد نظر است.

در بعضی وضعیت‌ها، مدل‌سازی احتراق نهان‌سوز (بدون شعله) نیز نیاز است. این نوع احتراق اغلب در فضاهای بسته هواپند شده مشاهده می‌شود که در آنها کمبود اکسیژن وجود دارد، اگرچه این نوع احتراق می‌تواند تحت غلظت‌های عادی اکسیژن نیز رخ دهد. به علت شدت کم آتش، حالت نهان‌سوز می‌تواند برای یک دوره زمانی طولانی دوام داشته باشد و یک خطر جدی را به وجود آورد، زیرا که در صورت ورود ناگهانی هوای تازه می‌تواند باعث پس‌زنی



شعله^۱ شود. این از اتفاقات خطرناک برای آتش‌نشانان به شمار می‌رود که در صورت باز کردن در اتاق‌هایی که در آنها نهن سوزی وجود دارد، پس‌زنی شعله رخ می‌دهد.

به طور کلی، انجام مدل‌سازی احتراق سوخت‌های جامد بسیار ساده‌تر از انجام آن برای احتراق گاز است. مشکل اصلی آن، تعیین شار حرارتی خالص برخوردی است که قسمتی از حل^۲ فاز گازی است و مربوط به مشکل احتراق مواد جامد نیست. به محض این که این شار شناخته شود وظیفه، مدل‌سازی تا حد زیادی به شبیه‌سازی انتقال حرارت در جامد و توسعه مدل‌های مناسب پیرولیز تبدیل می‌شود. در بسیاری از حالات، نتایج خوبی ممکن است از مدل‌های انتگرالی که در مقایسه با مدل‌های معادلات دیفرانسیلی جزئی (PDE) بسیار ساده‌تر هستند، به دست آید.

همچنین توجه به این امر مهم است که مدل‌های پیرولیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مقیاس کوچک، برای مثال داده‌های به دست آمده از گرماسنج مخروطی، قادر به توسعه هستند.

۱-۲-۲ گسترش آتش‌سوزی و پیشروی شعله

این موضوع به عنوان مرکز و مهم‌ترین بخش در تحقیقات آتش شناخته می‌شود. گسترش سریع و غیر قابل پیش‌بینی، باعث شدت افزایش انباشت فرآورده‌های آتش‌سوزی (دود و گازهای سمی) می‌شود و مسیرهای فرار را غیر قابل عبور می‌سازد و مانع اطفاء آتش خواهد شد.

متأسفانه این فرایند سخت‌ترین مرحله برای پیش‌بینی است. پیشروی شعله بر روی سطوح قابل سوختن، نتیجه انتقال حرارت تابشی و جابجایی است که سطح سوخت را تا دمای آفرورش آن گرم می‌کند. در مرحله توسعه یافته با جریان‌های توربولانس با عدد رینولدز بالا، پیش‌بینی شارهای تابشی و جابجایی دشوار است و هنوز اهدافی هستند که حل موفقیت آمیز آنها حاصل نشده است.

مشخصات جریان شناوری وابسته به شدت احتراق توربولانس است که به طور آشکاری برای شبیه‌سازی مشکل است. پیش‌بینی بازخورد تابشی به وسیله عدم قطعیت‌هایی در خواص تابشی شعله به علت حضور گونه‌های مختلف و تشکیل دوده دشوارتر نیز می‌شود.

1. Backdraft

2. solution

۱-۲-۳ دود، فرآورده‌های سمی و خطر تابش

صرف‌نظر از اینکه آیا گسترش آتش‌سوزی درمحل است یا خیر، احتمال دارد دود و گازهای سمی به خارج از منطقه در حال اشتعال انتقال یابد و خطر جانی ایجاد نماید. تولید چنین موادی در شعله مجدداً اهمیت مسئله پیش‌بینی صحیح احتراق در محیط جریان توربولانس محیط را نشان می‌دهد، زیرا مدل‌سازی انتقال آنها نیازمند قابلیت مدل کردن مکانیک سیالات آتش است. در نزدیکی شعله، تابش حرارت نیز خطری است که باید پیش‌بینی شود.

۱-۲-۴ اطفاء

توسعه استراتژی‌های اطفای حریق، یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحقیقات ایمنی آتش است و مدل‌سازی ریاضی می‌تواند کمک زیادی در طراحی هوشمند وسایل اطفای حریق، از قبیل شبکه بارنده خودکار^۱ و نازل‌های مه‌پاش^۲ کند.

مدل‌سازی اطفای حریق، چه در فاز گاز و چه در روی سطح مواد درحال سوختن، مشکل است زیرا در هر دو حالت نیاز به پیش‌بینی خوب توربولانس و واکنش‌های شیمیایی تحت شرایط اطفاء نیاز دارد. رفتار شعله نزدیک به حد خاموشی نیز، نیاز به مدل کردن دارد، مسئله‌ای که هنوز به وسیله مدل‌های احتراق قابل اعتماد ارائه نشده است.

در بسیاری موارد، یک فاز سوم (برای مثال، قطرات آب) نیز درگیر می‌شود که، سختی‌های اضافی مدل‌سازی توربولانس در جریان چند فاز را تحمیل می‌نماید که از نظر محاسباتی نیاز به کوپل کردن محاسبات پرهزینه بین تمام فازهای درگیر دارد.

۱-۲-۵ اثر آتش بر روی سازه‌ها

تحت شرایط آتش‌سوزی شدید، سازه‌های ساختمانی اعم از سازه‌های چوبی، فولادی یا بتنی ممکن است دچار شکست شوند. ارزیابی توانایی سازه برای تحمل آتش از هر دو نقطه نظر ایمنی جانی و حفظ سرمایه‌ها و دارایی‌ها مهم است. این ملاحظات باعث می‌شود تا بخش قابل توجهی از تحقیقات موجود به پیش‌بینی شارهای حرارتی ناشی از آتش‌سوزی‌ها به سازه‌های جامد و به مطالعه رفتار مصالح مختلف تحت شرایط آتش‌سوزی اختصاص یابد.

1. Sprinklers
2. Water Mist Nozzles



۳-۱ انواع اصلی مدل سازی آتش

مدل سازی ریاضی آتش ها از مدل های تحلیلی و نیمه تجربی شروع شد. سیر تکاملی آنها منجر به توسعه مدل های ناحیه ای شد که اولین مدل های آتش سوزی کامپیوتری را تشکیل دادند. این مدل ها مناطق مورد نظر را به ناحیه های مختلف مجزایی تقسیم کرده که هر یک می توانند به وسیله یک مجموعه ساده از پارامترها و قوانین نیمه تجربی توصیف شود. این پارامترها، کمیت های فیزیکی متوسط گیری شده (دما، غلظت و ...) در سراسر هر ناحیه را بیان می کنند. شرایط بقا در مرزهای بین ناحیه های مختلف همراه با قوانین بقای کلی، منتهی به سیستم معادلاتی می شود که پارامترهای مورد نظر را تعیین می کند. مدل های ناحیه ای برای مدت زیادی تحت توسعه بودند و اساس محاسبات مهندسی تجربی آتش را تشکیل می دهند.

زمینه تئوری مدل های ناحیه ای، بقای جرم و انرژی در فضاهای بسته آتش است. اساساً این مدل ها شدت رهایش گرمای مواد، جریان ستونی آتش، جریان جرمی، حرکت دود و دماهای گاز را در نظر می گیرند. آنها بر اساس بعضی از فرضیات، با در نظر گرفتن فیزیک آتش و حرکت دود، پیشنهاد شده به وسیله مشاهدات تجربی آتش سوزی های واقعی در فضاهای بسته، تکیه دارند و این بدان معناست که توسعه مدل ناحیه ای نمی تواند از مطالعات تجربی پشتیبانی کننده جدا شود.

جایگزین مدل سازی ناحیه ای، مدل سازی میدانی یا دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که رویکرد علمی دقیق تری را ارائه می نماید. این رویکرد بر قوانین اساسی بقا برای کمیت های فیزیکی مانند، جرم، اندازه حرکت، انرژی و غلظت های گونه ها مبتنی است. این معادلات با بالاترین دقت لحظه ای و فضایی قابل دسترس برای تعیین توزیع متغیرهای مورد نظر حل می شوند. به طور نظری، این رویکرد، تاریخچه کامل گسترش آتش سوزی، شامل مشخصات موضعی در هر نقطه معین را فراهم می کند. به کارگیری این نوع از مدل سازی تنها به وسیله روش های عددی ممکن است. هزینه های محاسباتی مرتبط با مدل های میدانی بسیار بالاتر از مدل های منطقه ای است.

این مدل ها نشان داده اند که در حل مسائل مختلف ایمنی در برابر آتش موفق هستند و نقش آنها در تحقیقات آتش به طور پیوسته در حال افزایش است، زیرا به طور مرتب، مدل های جدید دارای منطق قوی تری شده و مطالعات اعتبارسنجی آنها را قابل اعتمادتر می سازد. رویکرد CFD برای توسعه آتی مدل های آتش که می توانند مبنایی برای توسعه مقررات ایمنی در برابر آتش پایه عملکردی فراهم کنند، بنیادی و بسیار مهم است. مدل سازی CFD آتش به یک

حوزه مهم و تثبیت شده در تحقیقات آتش تبدیل شده است و بنابراین مرور پیشرفت‌ها و دستاوردها و کسب تجارب ارزنده در این حوزه تخصصی ارزشمند است.

فصل دوم

مرور ادبیات علمی - طبقه‌بندی مصالح از نظر خطر حریق

۱-۲ واکنش در برابر آتش: اصول و روش‌های طبقه‌بندی

در فصل اول انتظارات عملکردی حریق و نحوه تعیین سطح الزامات ایمنی حریق برای مصالح و فرآورده‌های ساختمانی ارائه شد. همان‌گونه که در فصل اول مشاهده شد پس از آفرودش در یک فضای بسته، آتش‌سوزی از سه مرحله رشد، حریق گسترش یافته و فروکشی عبور می‌کند. در این بین نقش مصالح و اجزای ساختمانی در مراحل آفرودش، رشد حریق و حریق گسترش یافته بسیار مهم است. به این دلیل طراحان و مهندسان باید از میزان خطر هریک از مصالح و فرآورده‌های ساختمانی مورد نظر در برابر آتش آگاه باشند. به همین دلیل آزمایش‌ها و استانداردهای متعددی در کشورهای مختلف به این موضوع اختصاص یافته و طبقه‌بندی‌هایی نیز با توجه به نتایج این آزمایش ارائه شده است. برخی از این طبقه‌بندی‌ها عیناً در مقررات ساختمانی کشورها استفاده شده‌اند و گاهی نیز مقررات ساختمانی به طور مستقل و با توجه به نتایج آزمایش‌های استاندارد، طبقه‌بندی‌هایی را ارائه و مورد استفاده قرار داده‌اند. برخی طبقه‌بندی‌ها نیز توسط پژوهشگران ارائه شده که در عین ارزشمند بودن به طور مستقیم یا کامل به مقررات یا استانداردها راه نیافته‌اند.

با توجه به نحوه پیشرفت حریق در ساختمان در مراحل مختلف، طبیعی است که طبقه‌بندی‌های مختلفی مبتنی بر مشخصات مختلف به وجود آمده باشد. این موضوع در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۱-۲ طبقه‌بندی‌های مبتنی بر آفرزش

قابلیت آفرزش عبارت از سادگی مشتعل شدن یک ماده تحت برخورد با شعله و حرارت است. در برخی از سیستم‌ها از آزمون قابلیت آفرزش به عنوان جزئی از روش طبقه‌بندی واکنش در برابر آتش استفاده می‌شود. از جمله روش «تعیین قابلیت آفرزش فرآورده‌های ساختمانی در برخورد مستقیم با منبع تک شعله» مطابق با استاندارد ISO 11925-2 و استاندارد ایران شماره ۷۲۷۱-۴ را می‌توان نام برد. این روش آزمون برای تعیین قابلیت آفرزش فرآورده‌های ساختمانی از طریق برخورد یک شعله کوچک به نمونه‌ای در جهت عمودی به کار می‌رود و جزو آزمایش‌های استاندارد برای طبقه‌بندی مواد و مصالح از نظر خطر حریق طبق استاندارد واحد اروپایی است. از یک مشعل به عنوان منبع آفرزش استفاده می‌شود که می‌تواند به طور عمودی یا مایل با زاویه ۴۵ درجه نسبت به نمونه قرار داده شود. سوخت مشعل پروپان با خلوص حداقل ۹۵ درصد و با فشار مشخص است.



شکل ۱-۲ تصویری از آزمون قابلیت آفرزش در برخورد مستقیم با یک منبع تک شعله (آزمایشگاه آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)

آزمونه باید دارای طول ۲۵۰ و عرض ۹۰ میلی‌متر باشد. مشعل در وضعیت عمودی روشن و تثبیت می‌شود. سپس با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور قائم به نقطه از پیش تعیین‌شده‌ای جلو

برده می‌شود تا با آزمون در تماس قرار گیرد. شعله برای مدت ۱۵ یا ۳۰ ثانیه برحسب نیاز در تماس با آزمون باقی می‌ماند. آزمون‌ها برحسب نیاز ممکن است به صورت رویارویی سطحی یا رویارویی کناری یا هر دو انجام گیرند.

در پایان آزمون موارد زیر برای هر آزمون ثبت می‌شود: الف) وقوع اشتعال، ب) رسیدن نوک شعله ۱۵۰ میلی‌متر بالای نقطه به کارگیری شعله و زمان وقوع آن، پ) رخداد اشتعال کاغذ صافی موجود در زیر آزمون بر اثر ریزش مواد مذاب و ت) مشاهده رفتار فیزیکی آزمون. اگر آزمون قابلیت سوختن را نیز به نوعی بررسی افروزش‌پذیری مصالحی فرض نماییم که به سختی مشتعل می‌شوند، طبقه‌بندی مواد و مصالح به دو دسته قابل سوختن و غیرقابل سوختن را نیز می‌توان جزو این نوع طبقه‌بندی قرار داد. روش آزمون قابلیت سوختن در استانداردهای کشورهای مختلف ارائه شده است که از آن جمله می‌توان استاندارد ISO 1182 و استاندارد ایران شماره ۲-۷۲۷۱ را نام برد.

در این آزمایش‌ها شرایط سختی برای ارزیابی قابلیت سوختن مواد در نظر گرفته شده است، به این ترتیب که نمونه مورد نظر به ابعاد $50 \times 38 \times 38 \text{ mm}$ در کوره کوچکی در دمای متوسط 750°C قرار می‌گیرد. آزمون بسته به شرایط بین ۳۰ تا ۶۰ دقیقه انجام می‌شود. استانداردهای مختلف، تفاوت‌هایی از نظر تحلیل نتایج دارند، اما طبق توصیه استاندارد بین‌المللی ارزیابی به شکل زیر صورت می‌گیرد: یک ماده در صورتی غیر قابل سوختن (یا نسوختنی) ارزیابی می‌شود که نتایج زیر از این آزمون حاصل گردد:

الف - میانگین افزایش دمای کوره برای ۵ آزمون از ۵۰ درجه سلسیوس بیشتر نشود؛

ب - میانگین زمان مشاهده شعله پایدار روی ۵ آزمون از ۱۰ ثانیه بیشتر نشود؛

پ - میانگین افت جرم برای ۵ آزمون، پس از سرد شدن آزمون‌ها، از ۵۰ درصد بیشتر نشود.



شکل ۲-۲ تصویر از آزمون قابلیت سوختن مواد
(آزمایشگاه آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)



بدین ترتیب بسیاری از مواد از قبیل چوب و محصولات آن، پلاستیک‌ها، آسفالت و ... قابل سوختن شناخته می‌شوند. اما مواد نسوختنی که دارای مقادیر کمی مواد سوختنی باشند نیز ممکن است قابل سوختن ارزیابی شوند که از آن جمله عایق‌های از نوع پشم معدنی دارای چسباننده‌های قابل اشتعال یا حتی برخی محصولات معدنی را می‌توان نام برد. در بسیاری از مقررات ساختمانی از این آزمایش ساده کیفی به عنوان ملاکی برای تعیین ساختار سوختنی یا نسوختنی مصالح استفاده شده است که از آن جمله آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش [۱]، مقررات IBC، NFPA و مقررات ساختمانی کانادا را می‌توان نام برد.

۲-۱-۲ پیشروی سطحی شعله بر روی مصالح و فرآورده‌های ساختمانی

سرعت و میزان پیشروی شعله از مشخصات مهم در ارزیابی خطرپذیری مصالح ساختمانی از نظر ایمنی حریق است. این خاصیت جزو خواص واکنشی مصالح در برابر آتش محسوب می‌شود. قابلیت اشتعال و پیشروی آتش بر روی سطوح ساختمان از خواص مهم مصالح ساختمانی است که در مقررات ساختمانی کشورهای مختلف مورد توجه قرار دارد. به ویژه وقتی مصالح قابل سوختن در پوشش دیوار، سقف و کف استفاده شوند، از این نظر پیشروی سطحی شعله باید مورد توجه و ارزیابی قرار گیرند. به منظور شناخت این خاصیت آزمایش‌های متنوعی بر روی مصالح انجام می‌شود. برای درک نقش آزمایش‌های مقیاس کوچک در ارزیابی این خطرپذیری، ابتدا باید اثرات مهم حریق شناخته شوند.

همان‌گونه که در فصل اول دیده شد، سقف ساختمان نقش بسیار مهمی در گسترش خطر حریق دارد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که در پوشش سقف‌ها باید حتی‌الامکان از کاربرد مصالح قابل سوختن پرهیز نمود (اگرچه در این مورد یک توافق عمومی وجود ندارد). تقریباً برای تمام سناریوهای حریق، پیشروی شعله بر روی سقف از نوع "همسو با جریان هوا"^۱ است و این بدان معناست که جریان هوا و پیشروی شعله هر دو در یک جهت هستند.

برای سناریوهای معمولی حریق، پیشروی شعله بر روی دیوارها در مجاورت منبع حریق به سمت بالا و از نوع همسو با جریان هوا است. در قسمت‌هایی که پیشروی شعله به سمت پایین است، به آن "پیشروی معکوس شعله"^۲ اطلاق می‌شود. باید توجه نمود که قسمتی از دیوار که به طور مستقیم در معرض لایه گازهای داغ تشکیل شده در زیر سقف است، ممکن است مشتعل شود که چنین فرآیندی اساساً با پیشروی سطحی شعله متفاوت است. پیشروی سطحی شعله بر روی کف‌پوش‌ها در اغلب اوقات قابل صرف نظر کردن است، زیرا این نوع پیشروی در یک آتش‌سوزی معمولاً به صورت محدود و در مراحل پایانی ظاهر می‌شود. با این وجود



پیشروی شعله بر روی کفپوش‌های داخل راهروها مهم است. این نوع پیشروی شعله اغلب بر اثر برخورد شعله‌های حریق از طریق اتاق به راهروهای مجاور و شعله‌ور کردن کفپوش‌ها در محل برخورد پیش می‌آید. پس از این مرحله پیشروی شعله می‌تواند با هر دو ساز و کار "همسو با جریان هوا" و "پیشروی معکوس" ادامه یابد. به طور معمول پیشروی شعله همزمان می‌تواند در هر دو جهت بر روی کفپوش‌های راهرو رخ دهد.

برای ارزیابی دو فرآیند پیشروی شعله همسو با جریان هوا و در جهت معکوس اصولاً به دو روش آزمایش متفاوت نیاز است و شدت پیشروی شعله در این دو فرآیند یکسان نیست. شدت پیشروی در جهت همسو با جریان هوا خیلی بیشتر است، زیرا مقادیر قابل توجهی از مواد قابل احتراق در جهت جریان هوا حرکت کرده و جبهه شعله را گسترش می‌دهند، در حالی که در پیشروی معکوس، گرم شدن ماده به منطقه کوچکی که مشتعل است محدود می‌شود. در حوزه آزمایش‌های مقیاس کوچک در استانداردهای بین‌المللی، روش ISO 5658 برای این کار تدوین شده است.

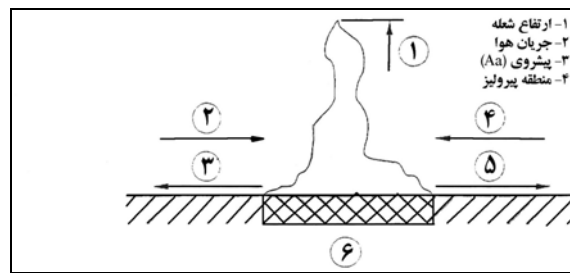
۱-۲-۱-۲ انواع پیشروی شعله

انواع مختلف پیشروی شعله به طور خلاصه در جدول ۱-۲ ارائه و برای هر نوع پیشروی، ساز و کار اصلی انتقال حرارت توضیح داده شده است. دو معیار از یکدیگر تمیز داده شده است: وضعیت (جهت) سطح مورد نظر و جهت جریان گاز نسبت به پیشروی شعله. در اینجا بحث فقط بر روی سطوح صاف و در شرایط ثقلی معمولی محدود است و مواردی نظیر پیشروی بر روی سطوح منحنی و یا تحت شرایط ثقلی خاص در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین تحلیل‌ها بر روی سطوح با ضخامت کافی و یا سطوح نازک که بر روی یک پشت بند قرار گرفته‌اند ارائه شده است. حالاتی که پدیده سوختن همزمان بر روی هر دو طرف فرآورده رخ می‌دهد، نیز در اینجا ارائه نشده است.

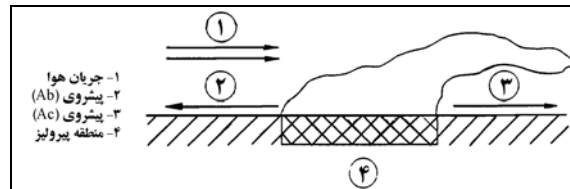
جدول ۱-۲ انواع گونه‌های پیشروی شعله (بر اساس استاندارد ISO 5658)

محل و جهت پیشروی شعله	نوع پیشروی شعله	علامت اختصاری
کفپوش‌ها - افقی	پیشروی معکوس	Aa
کفپوش‌ها - افقی	پیشروی معکوس	Ab
کفپوش‌ها - افقی	پیشروی همسو	Ac
دیوارپوش‌ها - عمودی	پیشروی همسو	Ba
دیوارپوش‌ها - عمودی	پیشروی معکوس	Bb
دیوارپوش‌ها - عمودی	پیشروی معکوس	Bc
سقف - افقی	پیشروی همسو	Ca

دو نوع پیشروی سطحی شعله (روی سطح افقی و همسو با جریان باد) در شکل‌های ۲-۳ و ۴-۲ ارائه شده است. بحث کامل روی انواع پیشروی سطحی شعله در مرجع [۲] آمده است.



شکل ۲-۳ پیشروی شعله روی سطح افقی



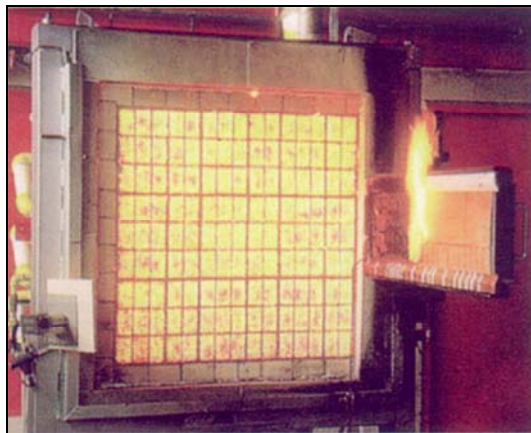
شکل ۲-۴ پیشروی شعله روی سطح افقی همراه با جریان باد

آزمایش‌های متعددی برای ارزیابی پیشروی شعله بر روی مواد و مصالح در کشورهای مختلف و برای کاربردهای متفاوت استفاده شده است. این آزمایش‌ها از نظر ابعاد نمونه، جهت نمونه مورد آزمایش، منبع گرمایش و همین‌طور معیارهای ارزیابی متفاوت هستند. در استاندارد BS476-Part7، برای اندازه‌گیری پیشروی سطحی شعله بر روی فرآورده‌های ساختمانی از دستگاهی که تصویر آن در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. در این روش آزمایش، نمونه‌ای با ابعاد $0.89m \times 2.7m$ به طور قائم در معرض حرارت ناشی از یک پانل تابشی قرار می‌گیرد. پانل تابشی فوق در این آزمایش با نمونه مورد نظر یک زاویه حدوداً 90° درجه می‌سازد. این حالت را می‌توان به یک دیواری که مجاور فرآورده مورد نظر قرار داشته و تحت اشتعال باشد، تشبیه کرد.

پانل تابشی از یک مخلوط هوا / گاز تغذیه شده و مقدار حرارت ناشی از آن به نحوی تنظیم می‌شود که در فواصل مختلف از نمونه، میزان حرارت تابشی معینی به نمونه برخورد نماید. به عنوان مثال در فاصله ۷۵ میلی‌متری از لبه داخلی نمونه، این حرارت برابر با 32.5 KW/m^2 و در فاصله ۸۲۵ میلی‌متر برابر با 5 KW/m^2 است. همچنین یک سر نمونه در ابتدای آزمایش به مدت یک دقیقه در معرض یک شعله پیلوت نیز قرار داده می‌شود. در طول آزمایش هرگونه



پدیده‌های شعله‌زنی، شعله‌وری، نرم شدن، خرد شدن، ریزش و غیره بررسی شده و همچنین سرعت پیشروی جبهه شعله در نقاط مشخص ثبت می‌شود. استاندارد بریتانیا بر اساس نتایج مشاهده شده، یک طبقه‌بندی از نظر پیشروی سطحی حریق را ارائه می‌نماید که در مقررات ساختمانی بریتانیا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (در حال جایگزین شدن به وسیله استاندارد واحد اروپایی).



شکل ۲-۵- تصویری از دستگاه اندازه‌گیری پیشروی شعله مطابق با استاندارد BS476-Part7

پس از شروع آزمایش موارد زیر ثبت می‌شود:

الف - زمانی که جبهه شعله خطوط عمودی مرجع را قطع می‌نماید،

ب - حداکثر حد پیشرفت شعله در طول $1/5$ دقیقه اول شروع آزمایش،

پ - حداکثر حد پیشرفت شعله در طول کل آزمایش (حداکثر ۱۰ دقیقه)،

ت - زمان حداکثر پیشرفت سطحی شعله.

از نتایج ثبت شده جهت طبقه‌بندی فرآورده مورد نظر مطابق جدول ۲-۲ استفاده می‌شود. حداقل ۵ نمونه از ۶ نمونه آزمایش که نتایج آزمایش معتبر برای آنها به دست آمده است، بایستی دارای پیشرفت شعله‌ای باشند که از حد تعیین شده برای $1/5$ دقیقه ابتدای آزمایش، و حد نهایی معین شده برای هر گروه بیشتر نباشد. یک نمونه باقی‌مانده ممکن است دارای پیشرفت بیشتری از این حد باشد اما میزان رواداری قابل قبول برای آن نیز نباید بیشتر از مقدار داده شده در جدول تجاوز نماید.



جدول ۲-۲ طبقه‌بندی فرآورده‌های ساختمانی مطابق استاندارد BS 476:Part7

پیشرفت نهایی شعله		پیشرفت شعله در ۱/۵ دقیقه اول آزمایش		طبقه‌بندی
حداکثر پیشرفت شعله قابل قبول برای حداکثر یک نمونه آزمایشی (mm)	حداکثر پیشرفت شعله برای ۵ نمونه (mm)	حد اکثر پیشرفت شعله قابل قبول برای حداکثر یک نمونه آزمایشی (mm)	حداکثر پیشرفت شعله برای ۵ نمونه (mm)	
۱۶۵+۲۵	۱۶۵	۱۶۵+۲۵	۱۶۵	گروه ۱
۴۵۵+۲۵	۴۵۵	۲۱۵+۲۵	۲۱۵	گروه ۲
۷۱۰+۲۵	۷۱۰	۲۶۵+۲۵	۲۶۵	گروه ۳
بیش از حدود طبقه ۳				گروه ۴

روش دیگر طبقه‌بندی پیشروی سطحی شعله، آزمایش تونل^۱ یا کوره اشتاینر است که در استاندارد ASTM E84 ارائه شده و دستگاه مورد استفاده در آن در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۶ تصویری از کوره اشتاینر

در این روش، اندازه‌گیری نسبی پیشرفت سطحی شعله و نیز چگالی دود در مقایسه با نوع به

1. Tunnel Test



خاصی از چوب بلوط قرمز و تخته سیمانی مسلح با الیاف معدنی تحت شرایط ویژه در معرض آتش، آزمایش می‌شود. نمونه با ابعاد (m) $7/32 \times 0/508$ در معرض جریان هوا و حرارت کنترل شده قرار می‌گیرد. نحوه تنظیم شرایط جریان هوا و حرارت به گونه‌ای است که شعله آتش در مدت ۵/۵ دقیقه در کل طول چوب بلوط قرمز استاندارد پیشرفت نماید.

کوره آزمایش از یک محفظه افقی با عرض داخلی حدود ۴۵۰ و ارتفاع حدود ۳۰۵ میلی‌متر تشکیل شده است. یک طرف از دستگاه دارای دریچه‌های شیشه‌ای برای مشاهده نمونه است. قسمت بالای محفظه دارای یک ساختار متحرک غیرقابل سوختن است که با مواد مرکب معدنی عایق می‌شود و محفظه آزمایش و نمونه‌ها را می‌پوشاند. یک سر محفظه که به نام سر آتش خوانده می‌شود با دو مشعل گازی که شعله‌ها را رو به بالا در مقابل سطح نمونه آزمایش هدایت می‌کند، مجهز است. دریچه ورود هوا نیز در همین محل در فاصله حدود ۳۰۵ mm قبل از مشعل‌ها قرار دارد. به منظور ایجاد جریان متلاطم هوا و احتراق مناسب، تعداد شش آجر نسوز در امتداد دیوارهای جانبی محفظه به عنوان بافل قرار داده شده‌اند. همچنین برای اندازه‌گیری چگالی دود، دستگاه به سیستم نورسنجی یا فتومتر می‌مجهز است. آزمایش با نمونه‌های چوب بلوط قرمز و تخته سیمانی به ترتیب به عنوان شاخص‌های صد و صفر در نظر گرفته شده، منحنی‌های مربوط رسم می‌شوند. جزئیات بیشتر در [۲] آمده است.

برای انجام آزمایش نمونه با شرایط استاندارد در محل آزمایش قرار می‌گیرد. نمونه به مدت $S(15 \pm 12)$ پیش از به کار افتادن مشعل در جریان هوای کوره نگاه داشته شده و سپس مشعل روشن می‌شود. مسافت و زمان عبور جبهه آتش به مدت ۱۰ دقیقه در اتاق تاریک مشاهده و ثبت می‌شود. در صورتی که شعله پیش از ده دقیقه به انتهای نمونه برسد، می‌توان آزمایش را زودتر قطعی کرد. اندازه‌های مسافت پیشروی شعله، دما و تغییرات انتهای سل فتوالکتریک به طور جداگانه در منحنی‌هایی بر حسب زمان رسم می‌شوند. شاخص پیشروی شعله به شکل زیر تعیین می‌شود:

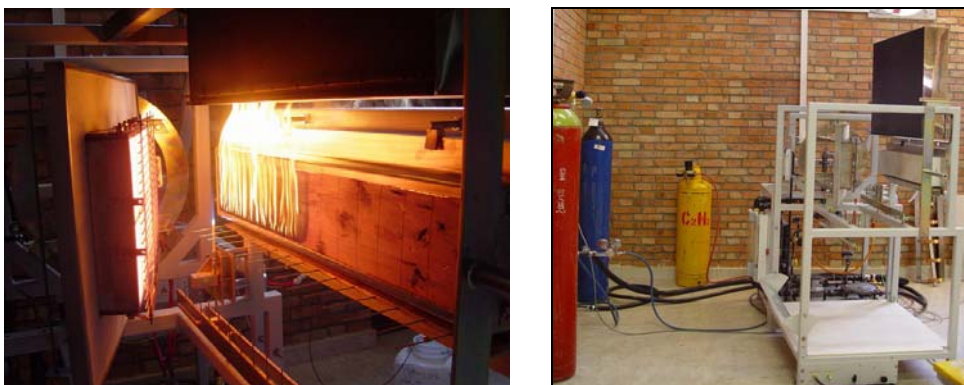
اگر سطح کل زیر منحنی فاصله - زمان (A_T) کوچک‌تر یا مساوی $97/5 \text{ ft.min}$ باشد:

$$FSI = 0.515 A_T$$

$$FSI = \frac{4900}{195 - A_T}$$

اگر سطح A_T بیش از $97/5 \text{ ft.min}$ باشد:

همچنین برای به دست آوردن شاخص چگالی دود، سطح زیر منحنی جذب نور - زمان محاسبه و برحسب درصد از سطح زیر منحنی مربوط به چوب بلوط قرمز بیان می‌شود. از دیگر روش‌ها می‌توان استانداردهای ISO 5658 بر مبنای روش LIFT برای تعیین پیشروی عرضی شعله را نام برد. مقایسه کاملی بین روش‌های پیشروی شعله در مرجع [۲] آمده است.



شکل ۲-۷ دو تصویر از دستگاه ISO 5658 (آزمایشگاه آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)

۲-۱-۳ سیستم‌های ملی و بین‌المللی طبقه‌بندی واکنش در برابر آتش

در جدول ۲-۳ انواع طبقه‌بندی‌هایی که در کشورهای مختلف بر این اساس استفاده می‌شود، ارائه شده است. طبقه‌بندی مورد استفاده در مقررات بریتانیا عمدتاً مبتنی بر آزمایش پیشروی سطحی شعله بر روی فرآورده‌های ساختمانی است که در بخش قبل به طور مفصل در مورد آن بحث شد. در عین حال گروه 0، مذکور در این طبقه‌بندی در استاندارد آزمایش پیشروی سطحی شعله وجود نداشته، در مقررات ساختمانی بریتانیا این گروه را بر اساس ترکیبی از نتایج دو آزمایش پیشروی سطحی شعله و آزمایش گسترش حریق [3] تعریف شده است. طبقه‌بندی مورد استفاده در مقررات ایالات متحده آمریکا کاملاً مبتنی بر آزمایش اشتاینر است که توضیح داده شد. آزمایش تعیین قابلیت سوختن مصالح نیز استاندارد دیگری است که تقریباً در اکثر مقررات ساختمانی اروپایی، آمریکا و کانادا به آن استناد شده است. از طرف دیگر با توجه به روند یکسان‌سازی مقررات تجاری و تبادل کالا در اتحادیه اروپا، کمیسیون اروپایی به طور فعال موضوع تدوین مقررات و استانداردهای مورد قبول یکسان در سطح این اتحادیه را پیگیری می‌نماید، که از جمله طبقه‌بندی جامع مشخصات مصالح و اجزای ساختمانی در برابر آتش است. این موضوع در قسمت بعد به طور مفصل در ادامه بحث شده و ضمناً به عنوان استاندارد ملی ایران نیز پذیرفته شده است [۴].



جدول ۲-۳ طبقه‌بندی واکنش مصالح در برابر آتش در کشورهای مختلف

کشور/منطقه	طبقه‌بندی
آلمان	گروه‌های A1 و A2 گروه‌های B1: به سختی قابل آفرزش، B2: با قابلیت آفرزش متوسط B3: به سادگی قابل آفرزش
امریکا	گروه A گروه B گروه C گروه D پیشرفت شعله بین ۰-۲۵ پیشرفت شعله بین ۲۵-۷۵ پیشرفت شعله بین ۷۵-۲۰۰ پیشرفت شعله بالاتر از ۲۰۰
اتحادیه اروپا (و ایران)	گروه A1 و A2: گروه B: گروه C: گروه D: گروه E: گروه F: عدم تأثیر در آتش‌سوزی تأثیر بسیار محدود در آتش‌سوزی تأثیر محدود در آتش‌سوزی تأثیر قابل قبول در آتش‌سوزی واکنش قابل قبول در برابر آتش‌سوزی بدترین عملکرد
انگلستان	گروه 0 (بر اساس مقررات ساختمانی) گروه‌های ۱ تا ۴ بر اساس BS 476 (۱- مصالح با پیشرفت سطحی شعله خیلی کم، ۲- با پیشرفت سطحی شعله کم، ۳- با پیشرفت سطحی شعله متوسط و ۴- با پیشرفت سطحی شعله زیاد)
فرانسه	گروه M0: گروه M1: گروه M2: گروه M3: گروه M4: گروه M5: غیرقابل سوختن غیرقابل اشتعال به سختی قابل اشتعال با قابلیت اشتعال متوسط به سادگی قابل اشتعال با قابلیت اشتعال بسیار بالا

در این خصوص شورای اتحادیه اروپا با همکاری پارلمان اروپایی در سال ۱۹۸۸ اقدام به تصویب سند همگرایی قوانین و مقررات کشورهای عضو در ارتباط با محصولات ساختمانی نمود [5]. در این سند الزامات اساسی فرآورده‌های ساختمانی به شرح زیر آورده شده، به نحوی که در



شرایط عادی نگهداری، یک عمر مفید اقتصادی برای ساختمان تضمین گردد: ۱- پایداری و مقاومت‌های مکانیکی، ۲- ایمنی در هنگام وقوع حریق، ۳- بهداشت، سلامتی و محیط زیست، ۴- ایمنی بهره‌برداری، ۵- حفاظت در برابر نوفه (صداها یا ناخواسته) و ۶- حفظ انرژی و حرارت. یکی از مسائل بسیار مهم که در شورای اتحادیه اروپا پیگیری شد، تدوین استانداردهای ایمنی حریق در مورد محصولات ساختمانی است. این شورا در مورد مشخصات محصولات ساختمانی در برابر آتش طی سال‌های اخیر مصوباتی را تهیه و به کشورهای عضو ابلاغ نموده است. برآورد شده است که برای حداقل ۸۰٪ از محصولات ساختمانی طبق مقررات جدید اتحادیه اروپا الزامات ایمنی حریق خواسته شده است [6].

در خصوص عملکرد واکنش در برابر آتش در سپتامبر ۱۹۹۴ یک طبقه‌بندی از طرف شورا ارائه شد، اما به علت عدم تکمیل آزمایش‌های استاندارد اروپایی، برخی از طبقه‌ها کامل نشده بود. در فوریه ۲۰۰۰ بسیاری از این نواقص برطرف شده و شورا طبقه‌بندی تکمیل شده‌تری را به کشورهای عضو ابلاغ نمود. طبق این سند هرگاه کاربرد نهایی یک محصول ساختمانی به نحوی باشد که احتمالاً بتواند در تولید و گسترش آتش و دود در داخل اتاق یا فضای محل وقوع حریق مشارکت داشته باشد، لازم است بر اساس خواص «واکنش در برابر آتش» و بر اساس جداول ۲-۴ و ۲-۵ طبقه‌بندی شود. آزمایش و طبقه‌بندی محصول مورد نظر باید بر اساس کاربرد نهایی آن صورت گیرد. در این جدول‌ها علائم اختصاری زیر به کار رفته است:

ΔT : افزایش دما

Δm : افت جرمی

tf: دوام اشتعال

PCS: پتانسیل گرمای ناخالص

FIGRA: شدت رشد آتش

THR600s: کل حرارت آزاد شده

LFS: پیشروی عرضی شعله

SMOGRA: شدت گسترش دود

TSP600s: کل تولید دود

FS: پیشروی شعله



جدول ۲-۳ طبقه‌بندی عملکرد محصولات ساختمانی (غیر از کفپوش‌ها) از نظر واکنش در برابر آتش*

طبقه	روش(های) آزمون	معیارهای طبقه‌بندی	طبقه‌بندی اضافه
A1	قابلیت نسوختن مواد ^(۱) و	$\Delta T \leq 300^{\circ}\text{C}$ و $\Delta m \leq 50\%$ $t_f = 0$ (یعنی بدون شعله‌وری پایدار)	-
	تعیین مقدار گرمای ناخالص ناشی از سوختن مواد	$\text{PCS} \leq 2/0 \text{ Mk/kg}^{(1)}$ و $\text{PCS} \leq 2/0 \text{ MJ/kg}^{(2)(3a)}$ و $\text{PCS} \leq 1/4 \text{ MJ/m}^2^{(3)}$ و $\text{PCS} \leq 2/0 \text{ MJ/kg}^{(4)}$	-
A2	قابلیت نسوختن مواد ^(۱) یا	$\Delta T \leq 500^{\circ}\text{C}$ و $\Delta m \leq 50\%$ $t_f \leq 20 \text{ s}$	
	تعیین مقدار گرمای ناخالص ناشی از سوختن و مواد و	$\text{PCS} \leq 3/0 \text{ Mk/kg}^{(1)}$ و $\text{PCS} \leq 4/0 \text{ MJ/kg}^{(2)}$ و $\text{PCS} \leq 4/0 \text{ MJ/m}^2^{(3)}$ و $\text{PCS} \leq 3/0 \text{ MJ/kg}^{(4)}$	
B	آزمون SBI	$\text{FIGRA} \leq 120 \text{ W/s}$ و لبه آزمون $\text{LFS} <$ $\text{THR}_{60 \text{ s}} \leq 7/5 \text{ MJ}$	تولید دود ^(۵) و ذره‌ها/قطره‌های شعله‌ور ^(۶)
	آزمون SBI	$\text{FIGRA} \leq 120 \text{ W/s}$ و لبه آزمون $\text{LFS} <$ $\text{THR}_{60 \text{ s}} \leq 7/5 \text{ MJ}$	تولید دود ^(۵) و ذره‌ها/قطره‌های شعله‌ور ^(۶)
C	قابلیت افروزش ^(۸) : زمان در معرض قرار گرفتن = ۳۰ ثانیه	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در ۶۰ ثانیه	
	آزمون SBI و	$\text{FIGRA} \leq 120 \text{ W/s}$ و لبه آزمون $\text{LFS} <$ $\text{THR}_{60 \text{ s}} \leq 15 \text{ MJ}$	تولید دود ^(۵) و ذره‌ها/قطره‌های شعله‌ور ^(۶)
D	قابلیت افروزش ^(۸) : زمان در معرض قرار گرفتن = ۳۰ ثانیه	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در ۶۰ ثانیه	
	آزمون SBI و	$\text{FIGRA} \leq 75 \text{ W/s}$	تولید دود ^(۵) و ذره‌ها/قطره‌های شعله‌ور ^(۶)
E	قابلیت افروزش ^(۸) : زمان در معرض قرار گرفتن = ۱۵ ثانیه	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در ۲۰ ثانیه	
	قابلیت افروزش ^(۸) : زمان در معرض قرار گرفتن = ۱۵ ثانیه	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در ۲۰ ثانیه	قطرات شعله‌ور ^(۷)
F	عملکردی تعیین نشده است		

۱. برای فرآورده‌های همگن و اجزای اصلی فرآورده‌های غیرهمگن،

۲. برای هر جزء غیراصلی خارجی فرآورده‌های غیرهمگن

- ۱-۲. به عنوان جایگزین، هر جزء غیراصلی خارجی که دارای یک $PCS \leq 2/0 \text{ MJ/m}^2$ باشد، مشروط بر اینکه فرآورده بر اساس آزمون SBI معیارهای زیر را برآورده کند:
 $FIGRA_{20} \leq W/s$ و
 لبه آزمون $LFS \leq 15 \text{ MJ}$ و $THE_{6..s}$
 S1 و d0
۳. برای هر جزء غیراصلی داخلی فرآورده‌های غیرهمگن
۴. برای کل فرآورده
۵. در مرحله آخر توسعه روش آزمون، اصلاحاتی بر روی سیستم اندازه‌گیری دود انجام شده است که به بررسی بیشتری نیاز دارد. این مورد می‌تواند منجر به اصلاح مقادیر کرانی و یا سنج‌های تولید دود شود.
 $TSP_{6..} \geq 200 \text{ m}^2$ و $S2 = SMOGRA \leq 180 \text{ S}^2/\text{m}^2$
 $TSP_{6..} \geq 50 \text{ m}^2$ و $S1 = SMOGRA \leq 30 \text{ S}^2/\text{m}^2$
 S3 = فرآورده‌ای که شرایط S1 و S2 را برآورده نسازد.
۶. $d0$ = بدون ذره‌ها/قطره‌های شعله‌ور در آزمون SBI در محدوده ۶۰۰ ثانیه
- $d1$ = بدون مشاهده ذره‌ها / قطره‌های شعله‌ور برای بیش از ۱۰ ثانیه در آزمون SBI در محدوده ۶۰۰ ثانیه
- $d2$ = شرایط $d0$ و $d1$ را برآورده نسازد. افروزش کاغذ در آزمون قابلیت افروزش نیز به طبقه‌بندی $d2$ منجر می‌شود.
۷. قبول = بدون افروزش کاغذ (بدون طبقه‌بندی)، مردود = افروزش کاغذ (طبقه‌بندی $d2$)
۸. تحت شرایط هجوم سطحی شعله و در صورت تناسب برای کاربرد نهایی فرآورده، هجوم شعله به لبه.



جدول ۲-۴ طبقه‌های عملکرد واکنش در برابر آتش برای کفپوش‌ها

طبقه بندی اضافه	معیارهای طبقه‌بندی	روش‌های آزمون	طبقه
-	$\Delta T \leq 300^\circ\text{C}$ و $\Delta m \leq 50\%$ و $t_f = 0$ (بدون شعله‌وری پایدار)	قابلیت نسوختن مواد ^(۱) و	A1 _{fl}
	$PCS \leq 2/0 \text{ Mk/kg}^{(۱)}$ و $PCS \leq 2/0 \text{ MJ/kg}^{(۲)}$ و $PCS \leq 1/4 \text{ MJ/m}^2^{(۳)}$ و $PCS \leq 2/0 \text{ MJ/kg}^{(۴)}$	تعیین مقدار گرمای ناخالص ناشی از سوختن مواد	
	$\Delta T \leq 50^\circ\text{C}$ و $\Delta m \leq 50\%$ و $t_f \leq 20 \text{ s}$	قابلیت نسوختن مواد ^(۱) یا	A2 _{fl}
	$PCS \leq 3/0 \text{ Mk/kg}^{(۱)}$ و $PCS \leq 4/0 \text{ MJ/kg}^{(۲)}$ و $PCS \leq 4/0 \text{ MJ/m}^2^{(۳)}$ و $PCS \leq 3/0 \text{ MJ/kg}^{(۴)}$	تعیین مقدار گرمای ناخالص ناشی از سوختن مواد و	
تولید دود ^(۷)	$\leq 8/0 \text{ Kw/m}^2$ شار بحرانی ^(۶)	تعیین رفتار اشتعالی کفپوش‌ها با استفاده از یک منبع گرمای تابشی ^(۵)	B _{fl}
تولید دود ^(۷)	$\leq 8/0 \text{ Kw/m}^2$ شار بحرانی ^(۶)	تعیین رفتار اشتعالی کفپوش‌ها با استفاده از یک منبع گرمای تابشی ^(۵) و	
-	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در ۲۰ ثانیه	قابلیت افروزش ^(۸) : زمان در معرض قرار گرفتن = ۱۵ ثانیه	D _{fl}
تولید دود ^(۷)	$\leq 3/0 \text{ Kw/m}^2$ شار بحرانی ^(۶)	تعیین رفتار اشتعالی کفپوش‌ها با استفاده از یک منبع گرمای تابشی ^(۵) و	
-	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در ۲۰ ثانیه	قابلیت افروزش ^(۸) : زمان در معرض قرار گرفتن = ۱۵ ثانیه	E _{fl}
		قابلیت افروزش ^(۸) : زمان در معرض قرار گرفتن = ۱۵ ثانیه	
		عملکردی تعیین نشده است.	F _{fl}

- ۱- برای فرآورده‌های همگن و اجزاء اصلی فرآورده‌های غیرهمگن،
- ۲- برای هر جزء غیراصولی خارجی فرآورده‌های غیرهمگن
- ۳- برای هر جزء غیراصولی داخلی فرآورده‌های غیرهمگن
- ۴- برای کل فرآورده
- ۵- دوره آزمون = ۳۰ دقیقه
- ۶- شار بحرانی برابر است با شار تابشی در جایی که شعله خاموش می‌شود یا شار تابشی پس از ۳۰ دقیقه، هر کدام کمتر باشد (یعنی شار متناظر با بیشترین پیشروی شعله)
- ۷- $S2=S1$ و $S1=SMOKE \leq 750 \text{ min}$ نباشد
- ۸- تحت شرایط هجوم سطحی شعله و در صورت تناسب برای کاربرد نهایی فرآورده، هجوم شعله به لبه.



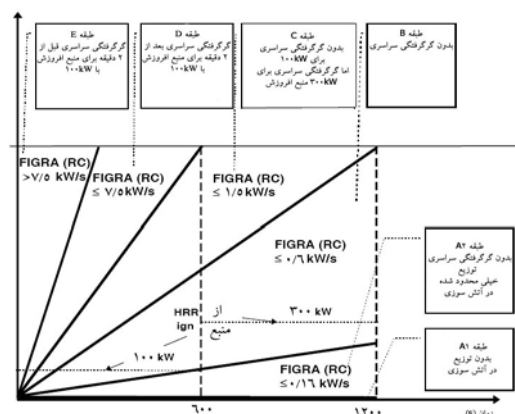
۲-۱-۴ اصول و مفاهیم طبقه‌بندی در برابر آتش با استفاده از پارامترهای آزمون گوشه اتاق و FIGRA

خواص آتش مواد از نظر اشتعال و گسترش آتش‌سوزی در ساختمان تعیین‌کننده هستند. بنابراین یکی از موارد مهم در علوم و مهندسی آتش، نحوه اندازه‌گیری خواص آتش مواد و مصالح^۱ است. همچنین ارتباط بین این خواص با رفتار واقعی آتش‌سوزی از اهمیت برخوردار است. رسیدن آتش‌سوزی به لحظه گرگرفتگی سراسری یکی از پارامترهای مهم است که به وسیله آن می‌توان شدت آتش‌سوزی را تعیین یا مورد تحلیل قرار داد. بنابراین پیش‌بینی زمان وقوع گرگرفتگی به وسیله خواص آتش مواد، می‌تواند پارامتر مهمی برای تحلیل‌های مهندسی آتش باشد. زمان وقوع افروزش یک پارامتر مهم از این نظر است که می‌تواند به وسیله مدل‌های ریاضی یا آزمایش‌های تجربی تعیین شود. همچنین سرعت پیشروی شعله و شدت رهایش گرما از این نظر بسیار مهم هستند. هر چه زمان وقوع افروزش کمتر و شدت رهایش گرما بیشتر باشد، ماده می‌تواند در برابر آتش خطرناک‌تر باشد. بنابراین نسبت شدت رهایش گرما به زمان افروزش می‌تواند یک پارامتر مهم باشد. حداکثر مقدار حاصل تقسیم رهایش گرما بر زمان افروزش تحت عنوان پارامتر شدت گسترش حریق (FIGRA)^۲ شناخته می‌شود که از آن می‌توان برای تشخیص تمایل مواد و مصالح به گسترش آتش‌سوزی در سناریوهای مختلف حریق استفاده نمود.

پارامتر FIGRA برای بار اول در ۱۹۹۸ به عنوان روشی برای طبقه‌بندی مصالح ساختمانی از نظر خطر حریق و برای استفاده در چارچوب «بخشنامه اروپایی ساختمان» استفاده شد [7] و [8]. این پارامتر برای پیش‌بینی رفتار حریق بسیاری از مصالح ساختمانی بسیار مهم است و به علاوه جزئی از بخشنامه‌های اروپایی است که برای محصولات ساختمانی خواسته شده است. به همین علت در اکثر آزمون‌های لازم برای پیش‌بینی رفتار حریق مصالح، به غیر از طبقه غیر قابل سوختن A1 و مصالح با طبقه عملکرد ضعیف E، به آزمون SBI نیاز است. روش طبقه‌بندی که به وسیله کمیسیون اروپا تأیید و ابلاغ شده، در جدول ۲-۳ ارائه شده است. اطلاعات حاصل از SBI با Room corner مقایسه شده است [7]. برای این منظور در آزمایشگاه‌های اروپایی مجموعاً ۶۲ آزمون صورت گرفت. مقایسه و ارتباط دادن مستقیم نتایج

1. Fire Properties (or fire technical properties) of Materials
2. Fire Growth Rate

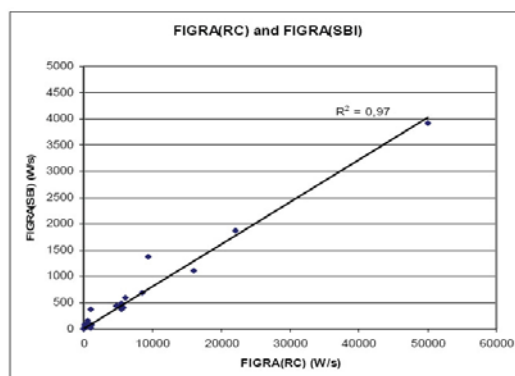
ممکن نبود، اما برای ارتباط دادن نتایج آزمون SBI با لحظه گرگرفتن در آزمون اتاق- گوشه، از نسبت حداکثر HRR به زمان وقوع آن استفاده شد. چنانچه آتش با تهویه کنترل شود (و نه با سوخت)، مقدار HRR در لحظه گرگرفتن برای تمام مصالح تقریباً یکسان است. این مقدار بر حسب این که منبع افروزش 100 kW یا 300 kW باشد، به ترتیب 700 kW یا 900 kW به دست آمد. در ادبیات علمی از این پارامتر به عنوان $FIGRA_{RC}$ نام برده می‌شود که در استاندارد اروپایی اتاق- گوشه (EN 14390) ارائه شده است. تقریباً بدون استثنا ارتباط بین لحظه گرگرفتن و $FIGRA_{RC}$ به دست آمده است [7 و 9] که در شکل ۲-۸ دیده می‌شود.



شکل ۲-۸ رابطه بین $FIGRA_{RC}$ و وقوع گرگرفتن سراسری. طبقه‌ها بر اساس استاندارد اروپایی است [11]

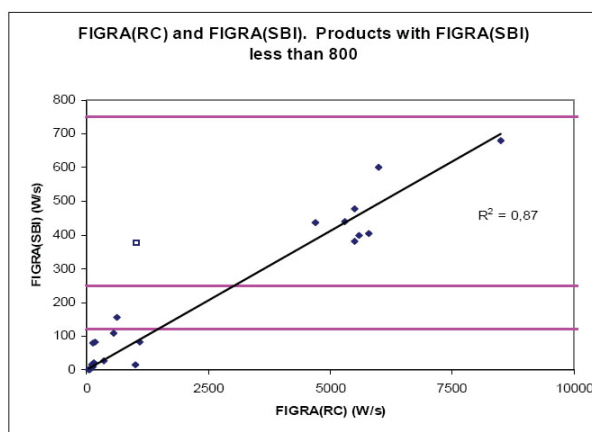
شکل ۲-۸ نشان می‌دهد که معنای طبقه‌های اروپایی حریق برای مصالح نازک‌کاری بر اساس تمایل آنها به رسیدن به لحظه گرگرفتن چگونه است. برای محصولات مختلف، مقایسه مستقیم بین $FIGRA_{RC}$ و $FIGRA$ صورت گرفت. برای $FIGRA_{RC}$ از مرجع [7] و برای SBI از اطلاعات مرجع [10] و اطلاعات بین آزمایشگاهی^۱ سال ۲۰۰۵ استفاده شد [7]. همبستگی بین $FIGRA_{RC}$ و $FIGRA$ در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. نمونه‌های کابل، لوله آب، پانل ساندویچی پلی‌استایرن و پانل پلی‌کربنات کندسوز شده. دو نمونه اول خطی هستند و نحوه طبقه‌بندی آنها متفاوت است. رفتار پانل ساندویچی در برابر آتش، به مشخصات مکانیکی ورق فلزی روی آن بستگی دارد که به خوبی نمی‌تواند در آزمون SBI مدل شود.

پلی کربنات نیز، به علت کاربرد آن به عنوان ورق نورگذر سقفی و رفتار توأم با ذوب شدن آن در آتش، نصب آن در SBI واقعی نبود. ضریب همبستگی به دست آمده خوب بود [7 و 11].



شکل ۹-۲ همبستگی بین FIGRA و FIGRA_{RC} برای ۲۶ محصول ساختمانی

در شکل ۱۰-۲، همبستگی برای محصولات با محدوده پایین FIGRA نشان داده شده است. خطوط افقی، مرز بین طبقه‌های B (۱۲۵)، C (۲۵۰) و D (۷۵۰) را نشان می‌دهد.



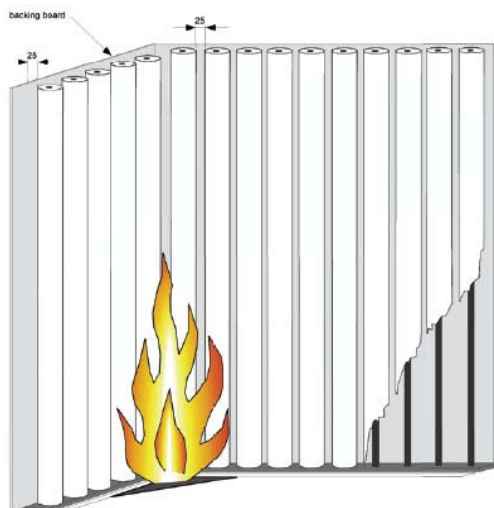
شکل ۱۰-۲ همبستگی بین FIGRA و FIGRA_{RC} برای محصولات با FIGRA کمتر از ۸۰۰ W/s

نقطه‌ای که خیلی دور از خط است (با FIGRA حدود ۳۷۰ و FIGRA_{RC} حدود ۱۰۰۰) مربوط به دیوارپوش PVC است. نشان داده شد که معمولاً مقادیر FIGRA_{RC} برای محصولات PVC در آزمون‌های مقیاس کوچک، زیادی بالا تخمین زده می‌شود [7]. در محدوده وسط، اطلاعات

کمی دیده می‌شود، زیرا پس از ۱۰ دقیقه و با انتقال مشعل از ۱۰۰ kW به ۳۰۰ kW، عمدتاً محصولات در عرض ۳-۴ دقیقه باعث گرگرفتگی می‌شوند، یا اصلاً گرگرفتگی رخ نمی‌دهد.

۲-۱-۴-۱ پارامتر شدت گسترش حریق و محصولات عایق لوله

سیستم طبقه‌بندی واکنش در برابر آتش با استفاده از FIGRA برای محصولات عایق لوله در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ توسعه یافت. با توجه به شکل استوانه‌ای عایق لوله‌ای، روش نصب آن به طور دقیق تعریف شد (شکل ۲-۱۱). سناریوی مرجع، دوباره همان آزمون اتاق-گوشه در نظر گرفته شد [11 و 12]. سیستم طبقه‌بندی برای عایق لوله‌ای در جدول ۲-۶ ارائه شده است.



شکل ۲-۱۱ نحوه شماتیک نصب عایق لوله‌ای در آزمون SBI [11]

جدول ۲-۵ طبقات واکنش در برابر آتش برای عایق‌های لوله‌ای

طبقه بندی اضافی	ضوابط طبقه بندی	روش های آزمون	طبقه
-	$T \leq 300^{\circ}\text{C}$ و	EN ISO 1182 (1) و	A1 _L
	$m \leq 5.0\%$		
	$t_f = 0$ (یعنی بدون شعله‌وری پایدار)		
	$^{(1)}\text{PCS} \leq 2.0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ و	EN ISO 1716	
	$^{(2)}\text{PCS} \leq 2.0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ و		
	$^{(3)}\text{PCS} \leq 1.4 \text{ MJ.m}^{-2}$ و		
$^{(4)}\text{PCS} \leq 2.0 \text{ MJ.kg}^{-1}$			
تولید دود ^(۵) و قطرات / ذرات شعله‌ور ^(۶)	$T \leq 50^{\circ}\text{C}$ و	EN ISO 1182	A2 _L
	$t_f \leq 20 \text{ s}$ و $m \leq 5.0\%$	یا	
	$^{(1)}\text{PCS} \leq 3.0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ و	EN ISO 1716 و	
	$^{(2)}\text{PCS} \leq 4.0 \text{ MJ.m}^{-2}$ و		
	$^{(3)}\text{PCS} \leq 4.0 \text{ MJ.m}^{-2}$ و		
	$^{(4)}\text{PCS} \leq 3.0 \text{ MJ.kg}^{-1}$		
$\text{FIGRA} \leq 270 \text{ W.s}^{-1}$ LFS کوچکتر از لبه آزمون و $\text{THR}_{60 \text{ s}} \leq 7.5 \text{ M.J}$	EN ۱۳۸۲۳ (SBI)		
تولید دود ^(۵) و قطرات / ذرات شعله‌ور ^(۶)	$\text{FIGRA} \leq 270 \text{ W.s}^{-1}$ LFS کوچکتر از لبه آزمون و $\text{THR}_{60 \text{ s}} \leq 7.5 \text{ M.J}$	EN ۱۳۸۲۳ (SBI); و	B _L
	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در حدود ۶۰s	EN ISO ۱۱۹۲۵-۲ ^(۸) ; زمان در معرض = ۳۰ ثانیه	
تولید دود ^(۵) و قطرات / ذرات شعله‌ور ^(۶)	$\text{FIGRA} \leq 460 \text{ W.s}^{-1}$ LFS کوچکتر از لبه آزمون و $\text{THR}_{60 \text{ s}} \leq 15 \text{ M.J}$	EN ۱۳۸۲۳ (SBI); و	C _L
	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در حدود ۶۰s	EN ISO ۱۱۹۲۵-۲ ^(۸) ; زمان در معرض = ۳۰ ثانیه	
تولید دود ^(۵) و قطرات / ذرات شعله‌ور ^(۶)	$\text{FIGRA} \leq 2100 \text{ W.s}^{-1}$	EN ۱۳۸۲۳ (SBI); و	D _L
	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در حدود ۶۰s	EN ISO ۱۱۹۲۵-۲ ^(۸) ; زمان در معرض = ۳۰ ثانیه	
قطرات / ذرات شعله‌ور ^(۷)	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ در حدود ۶۰s	EN ISO ۱۱۹۲۵-۲ ^(۸) ; زمان در معرض = ۳۰ ثانیه	E _L
	بدون عملکرد تعیین شده		F _L

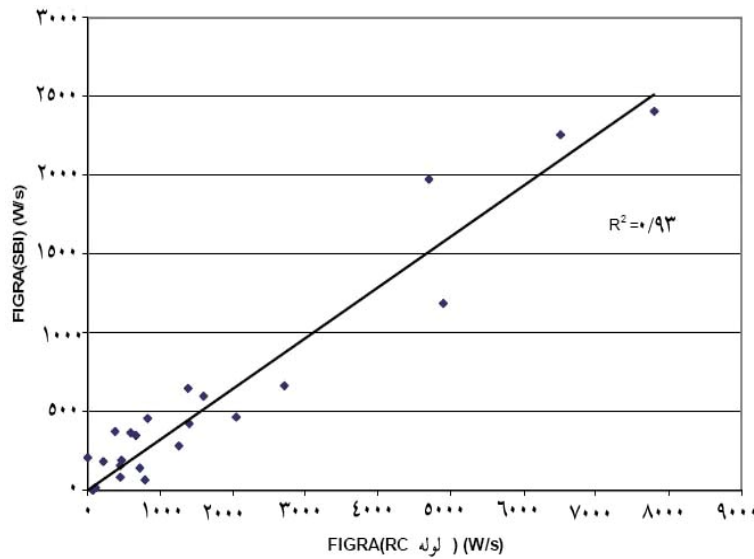
۱- برای فرآورده‌های همگن و اجزای اساسی فرآورده‌های غیرهمگن.

۲- برای هر جزء غیراساسی خارجی فرآورده‌های غیرهمگن.



- ۳- برای هر جزء غیراساسی داخلی فرآورده‌های غیرهمگن.
- ۴- برای فرآورده به صورت کامل.
- ۵- $S_1 = SMOGRA \leq 1.05 m^2.s^{-2}$ و $TSP_{6..s} \leq 25.0 m^2$ ؛ $S_2 = SMOGRA \leq 58.0 m^2.s^{-2}$ و $TSP_{6..s} \leq 160.0 m$ ؛ S_3 نه S_1 است و نه S_2 .
- ۶- d_0 = بدون قطرات / ذرات شعله‌ور طبق (SBI) EN ۱۳۸۲۳ در حدود ۶۰۰ ثانیه
- d_1 = بدون قطرات / ذرات شعله‌ور با دوام بیشتر از ۱۰ ثانیه طبق (SBI) EN ۱۳۸۲۳ در حدود ۶۰۰ ثانیه
- d_2 = به غیر از d_0 و d_1 : افروزش کاغذ در EN ISO ۱۱۹۲۵-۲ در یک طبقه‌بندی d_2 حاصل می‌شود.
- ۷- قبول شدن = بدون افروزش کاغذ (بدون طبقه‌بندی)، مردود شدن = افروزش کاغذ (طبقه بندی d_2)
- ۸- در شرایط هجوم سطحی شعله و در صورت مناسب بودن کاربرد نهایی فرآورده، هجوم شعله در لبه

مجدداً نتایج $FIGRA_{RC}$ و $FIGRA$ همبسته‌سازی شد (شکل ۲-۱۲). بر روی ۲۴ محصول عایق لوله‌ای در هر دو آزمون SBI و اتاق-گوشه آزمایش شد.

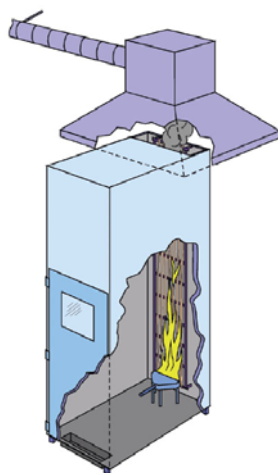


شکل ۲-۱۲ همبستگی بین $FIGRA_{RC}$ و $FIGRA$ برای ۲۴ محصول عایق لوله‌ای [11]

چنانچه گرگرفتن سراسری رخ دهد، شدت رهائش گرما $900 kW$ یا $700 kW$ در نظر گرفته می‌شود. البته وقوع گرگرفتگی برای عایق‌های لوله‌ای به ندرت رخ می‌دهد، زیرا سطح آزمونه نسبت به نازک‌کاری خیلی کمتر است.

۲-۴-۱-۲ پارامتر شدت گسترش حریق برای کابل‌ها

در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴، طبقه‌بندی برای کابل‌ها بر اساس FIGRA با همکاری بین تدوین‌کنندگان مقررات و توسعه‌دهندگان روش آزمون اروپایی، روش طبقه‌بندی برای کابل‌ها تدوین شد. مبنای طبقه‌بندی مانند محصولات ساختمانی و لوله‌ها بود، اما تفاوت مهم، وارد کردن پارامتر «اسیدی بودن گازهای حریق» بود که به درخواست صنایع کابل‌های برق و برای تشخیص عاری بودن ماده از هالیدها به سیستم طبقه‌بندی وارد شد. این موضوع بحث‌های زیادی در سطح بین‌الملل، از جمله با نظرخواهی در بین اعضای سازمان تجارت جهانی ۱ ایجاد کرد و نهایتاً در نظر گرفتن آن در سیستم طبقه‌بندی تصویب شد. اما برای کابل‌ها به جای SBI از آزمون EN-50399-2-1 و EN-50399-2-2 استفاده می‌شود. تصویری از دستگاه در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است. ارتفاع دستگاه ۴ متر است. کابل‌ها روی یک نردبان نصب شده، به عنوان منبع افروزش از یک مشعل استفاده می‌شود. روش طبقه‌بندی در جدول ۲-۷ و مشخصات آزمون در جدول ۲-۸ آمده است. دلیل تفاوت بین شرایط B1CA با باقی طبقات، سخت‌تر بودن شرایط آزمون است. طبقه ACA برای کابل‌های غیر قابل اشتعال، مثل محصولات سرامیکی، است. شرایط مختلف آزمون در گزارش پروژه اروپایی [13] آمده است. توضیحات طبقات در [7] ارائه شده است. نتایج متعدد آزمون در [14 و 15] ارائه شده است.



شکل ۲-۱۳ دستگاه مقیاس بزرگ آزمون آتش بر روی کابل‌ها بر اساس EN 50399-2



جدول ۶-۲ طبقات واکنش در برابر آتش برای کابل‌های برق

طبقه بندی اضافی	ضوابط طبقه‌بندی	روش‌های آزمون	طبقه
	$PCS \leq 2,0 \text{ MJ/kg}$ (۱)	EN ISO ۱۷۱۶	A _{ca}
تولید دود (۶۲) و قطرات/ ذرات شعله‌ور (۳) و اسیدیته (۴)	$FS \leq 1/75 \text{ m}$ و $THR_{1200s} \leq 10 \text{ MJ}$ و $HRR \leq 20 \text{ kW}$ پیک و $FIGRA \leq 150 \text{ Ws}^{-1}$ $H \leq 425 \text{ mm}$	(۵) FIPEC _r . Scen ۲ و EN ۶۰۳۳۲-۱-۲	B1 _{ca}
تولید دود (۷۲) و قطرات/ ذرات شعله‌ور (۳) و اسیدیته (۴)	$FS \leq 1/5 \text{ m}$ و $THR_{1200s} \leq 15 \text{ MJ}$ و $HRR \leq 30 \text{ kW}$ پیک و $FIGRA \leq 150 \text{ Ws}^{-1}$	(۵) FIPEC _r . Scen ۱ و	B2 _{ca}
	$H \leq 425 \text{ mm}$	EN ۶۰۳۳۲-۱-۲	
تولید دود (۷۲) و قطرات/ ذرات شعله‌ور (۳) و اسیدیته (۴)	$FS \leq 2/0 \text{ M}$ و $THR_{1200s} \leq 30 \text{ MJ}$ و $HRR \leq 60 \text{ kW}$ پیک و $FIGRA \leq 300 \text{ Ws}^{-1}$	(۵) FIPEC _r . Scen ۱ و	C _{ca}
	$H \leq 425 \text{ mm}$	EN ۶۰۳۳۲-۱-۲	
تولید دود (۷۲) و قطرات/ ذرات شعله‌ور (۳) و اسیدیته (۴)	$THR_{1200s} \leq 70 \text{ MJ}$ و $HRR \leq 400 \text{ kW}$ پیک و $FIGRA \leq 1300 \text{ Ws}^{-1}$	(۵) FIPEC _r . Scen ۱ و	D _{ca}
	$H \leq 425 \text{ mm}$	EN ۶۰۳۳۲-۱-۲	
	$H \leq 425 \text{ mm}$	EN ۶۰۳۳۲-۱-۲	E _{ca}
بدون عملکرد تعیین شده			F _{ca}

۱- برای تمام فرآورده‌ها به جز مصالح فلزی و برای هر جزء خارجی (مانند غلاف) فرآورده

۲- $s_1 = TSP_{1200s} \leq 5.0 \text{ m}^2$ و $s_1 \leq 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ پیک SPR

$s_1 = s_{1a}$ و انتقال مطابق با $EN 61034-2 \geq 80\%$

$s_1 = s_{1b}$ و انتقال مطابق با $EN 61034-2 \geq 60\% < 80\%$

$s_2 = TSP_{1200s} \leq 4.0 \text{ m}^2$ و $s_2 \leq 1/5 \text{ m}^3/\text{s}$ پیک SPR

$s_3 = s_1$ نه s_2

۳- برای سناریوهای ۱ و ۲: FIPEC_r ۲۰۲

d_0 = بدون قطرات/ ذرات شعله‌ور در حدود ۱۲۰۰ ثانیه

d_1 = بدون قطرات/ ذرات شعله‌ور با داوم بیشتر از ۱۰ ثانیه در حدود ۱۲۰۰ ثانیه

d_2 = هیچکدام d_0 و d_1 .



۴-۳-۲-۵۰۲۶۷-EN

a1 = هدایت کوچکتز از $2/5 \mu S/mm$ و $pH > 4/3$

a2 = هدایت کوچکتز از $10/0 \mu S/mm$ و $pH > 4/3$

a3 = هیچکدام a1 و a2. بدون اعلام = بدون عملکرد تعیین شده

۵- جریان هوا داخل محفظه باید $800 \pm 800 l/min$ تنظیم شود.

سناریوی FIPEC_۲-۱-۲-۵۰۳۹۹-EN = prEN ۱ با نصب و تثبیت به شرح زیر

سناریوی FIPEC_۲-۲-۲-۵۰۳۹۹-EN = prEN ۲ با نصب و تثبیت به شرح زیر

۶- طبقه دود اعلام شده برای کابل‌های B_{1ca} باید از آزمون ۲ FIPEC_۲.Scen گرفته شود.

۷- طبقه دود اعلام شده برای کابل‌های طبقه D_{ca}.C_{ca}.B_{۲ca} باید از آزمون ۱ FIPEC_۲.Scen گرفته شود.

۸- اندازه‌گیری خواص پرخطر گازها در رویدادهای آتش‌سوزی توسعه یافته است، به طوری که با واکنش موثر افراد برای فرار همسازی داشته باشد و نه برای توصیف سمیت این گازها.

جدول ۲-۷ شرایط آزمون برای طبقه‌بندی کابل‌ها [11]

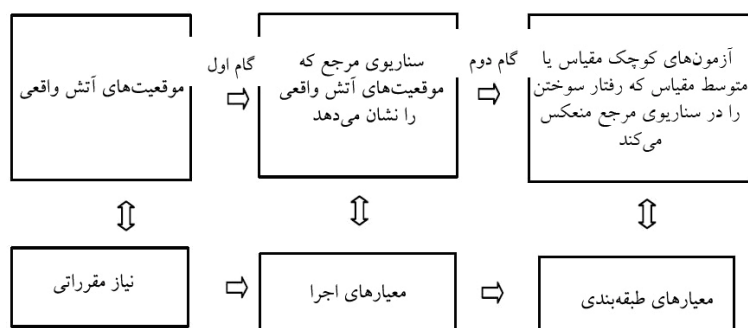
<ul style="list-style-type: none"> • ۲-۲-۵۰۳۹۹-EN pr EN با نصب مطابق با FIPEC سناریوی ۲ • منبع آفروزش ۳۰kW • زمان آزمون ۲۰ دقیقه 	طبقه B _{1ca}
<ul style="list-style-type: none"> • ۱-۲-۵۰۳۹۹-EN pr EN با نصب مطابق با FIPEC سناریوی ۱ • منبع آفروزش ۲۰kW • زمان آزمون ۲۰ دقیقه 	طبقه B _{2ca} طبقه D _{ca}

۲-۴-۱-۳ پارامتر FIGRA و ارزیابی خطر تحت ابلاغیه اروپایی ساختمان
 چگونگی استفاده از پارامتر FIGRA برای محصولات مختلف و سناریوی مرجع آنها در جدول
 ۲-۹ ارائه شده است.

جدول ۲-۸ تنوع پارامتر FIGRA و سناریوهای مرجع [11]

نوع فرآورده	روش آزمون	سناریوی مرجع	ضریب همبستگی	توضیحات
سطح نازک کاری‌های به کار رفته در ساختمان‌ها	واحد مشتعل منفرد EN-۱۳۸۲۳	آزمون گوشه اتاق /EN۱۴۳۹۰ ISO۹۷۰۵	$R^2=0/97$ $R^2=0/87$ در طبقه‌بندی ناحیه‌ای)	مرتبط با گرگرفتگی سراسری در آزمون گوشه اتاق
عایق کاری لوله	واحد مشتعل منفرد EN-۱۳۸۲۳	آزمون گوشه اتاق پذیرفته شده برای عایق کاری لوله، ISO/DIS۲۰۶۳۲	$R^2=0/93$	مشابه با نصب عایق کاری لوله تیپ
کابل‌ها	آزمون نردبان کابلی قائم، ۵۰۳۹۹-۲-۱ pr EN	نصب افقی سه نردبان کابلی روی قسمت فوقانی یکدیگر در حال سوختن از یک انتها	$R^2=0/81$	شبیه نصب کابل‌های تیپ
کابل‌ها	آزمون نردبان کابلی قائم، ۵۰۳۹۹-۲-۲ pr EN	نصب کابل قائم در گوشه	$R^2=0/84$	شبیه نصب کابل‌های تیپ
مصالح پلاستیکی	واحد مشتعل منفرد EN-۱۳۸۲۳	آزمون کوچک مقیاس برای ذرات بدون سناریوی مرجع ISO۲۱۳۶۷	$R^2=0/94$	ISO۲۱۳۶۷ یک آزمون تضمین کیفیت با مقیاس کوچک

فرایند برقراری ارتباط بین آتش‌سوزی واقعی، آزمون مقیاس کوچک و عملکرد محصول در برابر آتش در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴ برقراری ارتباط بین آتش‌سوزی واقعی، عملکرد محصولات و آزمون مقیاس کوچک [11]

نقطه آغازین، یک آتش‌سوزی واقعی است که مقررات برای آن نیاز است. تقریباً تمام مقررات ساختمانی در دنیا در این نکته مشترک هستند که داشتن الزامات مربوط به نازک‌کاری داخلی باید در مقررات در نظر گرفته شود. سناریوی مرجع برای نازک‌کاری‌ها، آزمون اتاق-گوشه است که تقریباً نماینده یک اتاق معمولی است. شدت رهایش گرمای مشعل در مقدار 300 kW ، تقریباً یک سوم شدت رهایش گرمای لازم برای گرگرفتن سراسری در یک چنین اتاقی است. نشان داده شده است که چنین شدت آفرוזشی در یک اتاق بزرگتر، باعث آتش‌سوزی با گسترش کندتر و زمان طولانی‌تری برای رسیدن به گرگرفتن می‌شود [16]. بنابراین اتاق-گوشه یک آزمون مناسب مشابه با یک اتاق معمولی و با یک آتش‌سوزی نسبتاً شدید است. پارامتر FIGRA و آزمون SBI می‌توانند به خوبی وقوع گرگرفتن در آزمون اتاق-گوشه را پیش‌بینی کنند، بنابراین شرایط لازم برای برقراری ارتباط بین اجزای نشان داده شده در شکل ۲-۱۴ برقرار شده است. اصول مشابه برای عایق‌های لوله‌ای و کابل‌ها به کار رفته است، اگرچه گرگرفتن در اینجا دیگر معیار عملکردی نیست. تمام سیستم‌های فوق شامل ۶ طبقه و یک طبقه «بدون عملکرد تعیین شده»^۱ هستند. کلاس‌های مشابه، به طور عمده دارای خواص شبیه به هم از نظر گسترش حریق هستند، اگرچه محصولات با یکدیگر کاملاً متفاوت باشند. طبقات A_1 ، A_{1L} و A_{1CA} نماینده بهترین رفتار در برابر آتش هستند و شامل محصولات غیر قابل سوختن مانند پشم‌های معدنی با چسباننده کم، سرامیک‌ها و فلزات

1. No Performance Determined

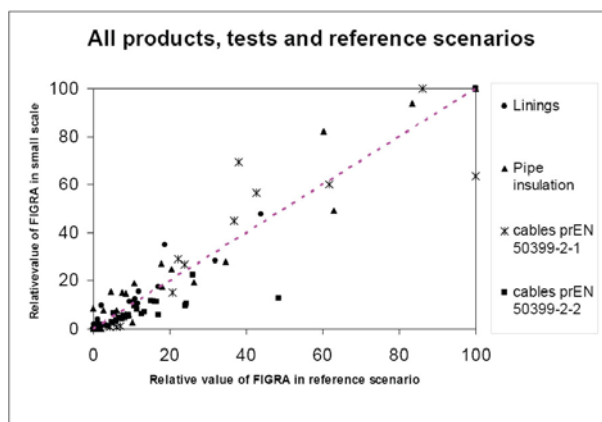


می‌شوند. طبقات B، B_L و B_{1CA} نمایانگر محصولات هستند که هیچ گسترش حریقی از خود نشان نمی‌دهند، حتی اگر در معرض عوامل آفرزش بزرگ مانند یک مشعل ۳۰۰kW قرار گیرند. به عنوان مثال می‌توان از تخته‌های گچی یا کابل‌های پلاستیکی فلورینه‌شده نام برد. طبقات D، D_L و D_{CA} بیانگر رفتار مشابه چوب عمل‌آوری نشده، به غیر از تخته‌های عایق چگالی کم، هستند. طبقات میانی بیانگر رفتارهای حد وسط هستند، به عنوان مثال مصالح با طبقه C در معرض مشعل ۱۰۰kW باعث گرگرفتن نمی‌شوند، اما تحت معرض مشعل ۳۰۰kW این اتفاق می‌افتد.

در مرحله بعدی، همبستگی بین نتایج آزمون و سناریوی مرجع باید مطلوب باشد، اما برای تمام موارد هم اینطور نیست و استثناهایی وجود دارد. به عنوان مثال، پانل‌های ساندویچی فلزی با عایق میانی قابل اشتعال، دارای مسائل خاص خود هستند و باید در مقیاس بزرگ (حتی بزرگتر از مقیاس سناریوی مرجع) آزمون شوند. خواص مکانیکی این پانل‌ها در رفتار آنها در برابر آتش بسیار تعیین کننده است. آزمون SBI و آزمون‌های مقیاس کوچک برای این مصالح مناسب نیست.

سوندستروم [7] برای مقایسه نتایج آزمون مقیاس کوچک و سناریوی مرجع، همه نتایج را بین صفر تا ۱۰۰ نرمال و با هم مقایسه کرده است. نتایج وی در شکل ۲-۱۵ دیده می‌شود. ضریب همبستگی (R^2) برای تمام محصولات ۰/۸۹ به دست آمد. داده‌ها شامل محصولات مختلف مانند چوب، گچ، پی‌وی‌سی، پلی‌یورتان، پلی‌ایزو سیانورات، ملامین، پلی‌استایرن منبسط شده، پلی‌استایرن منبسط اکستروود شده، پلی‌اتیلن، لاستیک وینیلی، پشم‌های معدنی، سیلیکات کلسیم، رنگ و غیره بوده است. سناریوهای مرجع و آزمون‌های مقیاس کوچک همان‌هایی هستند که در بالا برای محصولات مختلف بحث شد. تعداد آزمون‌ها برای سناریوی مرجع حدود ۱۰۰ و برای مقیاس کوچک (با در نظر گرفتن تکرارها) ۱۰۰۰ بوده است که از ۱۷ آزمایشگاه اروپایی به دست آمده‌اند.

به طور کلی، پارامتر FIGRA به طور گسترده‌ای به عنوان یک ابزار طبقه‌بندی خطر گسترش حریق محصولات و سناریوهای مختلف آتش‌سوزی به کار رفته است. این پارامتر اکنون به طور وسیع برای چند سال در بازار محصولات ساختمانی استفاده شده و به طور قابل ملاحظه‌ای با مشکلات بسیار اندکی در کاربرد مواجهه بوده است [7].



شکل ۲-۱۵ داده‌های نرمال شده برای تمام مواد و همبستگی بین نتایج مقیاس کوچک باسناریوی مرجع [7]

۲-۲ گسترش حریق در اتاق بر روی نازک‌کاری‌های دیوار و سقف - تجزیه و تحلیل بر اساس انتقال حرارت

پیشروی شعله را روی دیوارها و سقف یک سناریوی اتاق در نظر بگیرید که ممکن است به گرگرفتگی سراسری در آن منجر شود. در این تحلیل، تمام سناریوهای اتاق در نظر گرفته شده دارای نازک‌کاری‌هایی بر روی دیوارها و سقف هستند که همان شکل‌بندی آزمون استاندارد اتاق-گوشه می‌باشد. می‌خواهیم شدت رهائش گرما را به عنوان تابعی از زمان برای یک آزمایش، مخصوصاً دوره زمانی نزدیک به گرگرفتگی سراسری پیش‌بینی کنیم. داده‌های خواص مصالح مورد نیاز در این کار اصولاً از گرماسنج مخروطی ISO 5660 به دست می‌آید.

۲-۲-۱ تئوری‌های حرارتی برای پیش‌بینی زمان افروزش و پیشروی شعله الف- افروزش

در استاندارد ISO 13943 (واژه‌نامه ایمنی آتش) کلمه افروزش «شروع سوختن»^۱ تعریف شده است. پدیده سوختن شامل انتقال حرارت، فرآیندهای فیزیکی و واکنش‌های شیمیایی در یک فعل و انفعال پیچیده می‌باشد. بنابراین تلاش برای مدل‌سازی افروزش نیاز به ساده‌سازی آن

1. Initiation of Combustion



دارد. هندبوک افروزش [17] به صورت خیلی جامع به عنوان یک منبع اطلاعاتی عالی در مورد جنبه‌های مختلف احتراق توسط بابر اسکاس^۱ تهیه شده است.

موازنه انرژی برای یک حجم کنترل می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

[شدت جریان خالص انرژی] = [شدت انرژی ذخیره شده] + [شدت انرژی استفاده شده برای تجزیه حرارتی] + [شدت انرژی استفاده شده برای ذوب] + [شدت انرژی استفاده شده برای تبخیر آب] ++.....+.....

با این وجود، اغلب همه ترم‌های انرژی به جز ترم ذخیره‌سازی در مدل‌های افروزش نادیده گرفته می‌شوند. یک دلیل این است که اطلاعات مصالح در دسترس نیست. چنین اطلاعاتی شاید برای اندازه‌گیری بسیار مشکل یا حتی غیرممکن باشد.

برخی از مدل‌های افروزش فقط بقای انرژی را در نظر می‌گیرند و فرض می‌کنند که جامد تا رسیدن به نقطه افروزش خنثی است. در این متن، این‌ها "مدل‌های حرارتی"^۲ نامیده می‌شوند. تجزیه حرارتی، ذوب شدن، بخار شدن آب و هرگونه تولید یا مصرف انرژی در داخل جامد نادیده گرفته می‌شود. در عوض فرض می‌شود که توسعه دما به وسیله معادله انتقال گرمای فوری کنترل می‌شود. برای انتقال حرارت یک بعدی، با فرض خواص حرارتی ثابت داریم:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1-2)$$

در زیر مدل حرارتی برای تحلیل فرآیندهای افروزش استفاده شده است.

در گرماسنج مخروطی، ISO 5660، سطح فوقانی یک آزمون افقی در معرض حرارت ثابت قرار می‌گیرد. با افزایش دمای سطح آزمون، حرارت از طریق تابش و همرفت به محیط می‌رود. سپس در یک دمای سطحی معین، آزمون افروخته می‌شود. جریان گرمای خالص در سطح می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\dot{q}_s'' = \alpha_s \dot{q}_e'' + \alpha_s \sigma T_\infty^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 + h_c (T_\infty - T_s) \quad (2-2)$$

که در آن \dot{q}_s'' شار حرارتی در سطح نمونه، α_s ضریب جذب سطح نمونه، \dot{q}_e'' شار حرارتی تابشی خارجی بر روی نمونه در گرماسنج مخروطی، ϵ_s ضریب انتشار سطح، h_c ضریب انتقال

1. Babrauskas
2. Thermal Models



حرارت جابجایی، σ ثابت استفان-بولتسمان و T_s و T_∞ به ترتیب دمای مطلق محیط و سطح هستند.

این معادله نشان می‌دهد که شار حرارتی در سطح آزمون برابر است با شار حرارتی جذب شده در سطح آزمون، منهای حرارت تلف شده به محیط به علت تابش و همرفت. با موازنه حرارتی در سطح، شرایط مرزی یک بعدی به دست می‌آید:

$$\dot{q}_s'' = -k \left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0}$$

دمای اولیه جامد برابر با دمای محیط فرض می‌شود، $T_i = T_\infty$ ، بنابراین با در نظر گرفتن $\alpha_s = \varepsilon_s$ (اصل همانندی کیرشوف) و با مرتب‌سازی مجدد، شرایط مرزی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$-k \left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} = \varepsilon_s \dot{q}_e'' - \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_i^4) - h_c (T_s - T_i) \quad (۳-۲)$$

حل معادله فوریه برای زمان افروزش با شرایط مرزی معادله (۳-۲) باید به وسیله حل عددی به دست آید. راه‌های مختلف برای ساده‌سازی این کار پیشنهاد شده است. در روش لوسون^۱ و سیمس^۲ [18] از معادله زیر استفاده شده است:

$$\dot{q}_s'' = \dot{q}_e'' - h_{\text{eff}} (T_s - T_i) \quad (۴-۲)$$

که h_{eff} به عنوان ضریب انتقال حرارت مؤثر شامل اتلاف گرمای تابشی و همرفتی در سطح در نظر گرفته می‌شود. فرض شده است جامد تمام شار حرارتی تابشی برخوردی را جذب کند، یعنی $\varepsilon = 1$. افروزش هنگامی رخ می‌دهد که T_s به T_{ign} برسد. کمیت $h_{\text{eff}} (T_{\text{ign}} - T_i)$ شار بحرانی در هنگام افروزش^۳ نامیده می‌شود، \dot{q}_{cr}'' و در دمای افروزش می‌توانیم بنویسیم:

$$\dot{q}_s'' = \dot{q}_e'' - \dot{q}_{\text{cr}}'' \quad (۵-۲)$$

-
1. Lawson
 2. Simms
 3. Critical Flux For Ignition



اگر شار حرارتی در سطح و همچنین خواص مصالح ثابت فرض شوند و بدنه در معرض گرما را بتوان نیمه نامحدود فرض نمود، معادله فوریه می‌تواند به وسیله تبدیلات لاپلاس حل شده و افزایش دمای سطح به صورت زیر محاسبه شود:

$$T_s - T_i = \frac{2\dot{q}_s''}{\sqrt{\pi k \rho c}} \sqrt{t} \quad (۶-۲)$$

بنابراین زمان رسیدن به دمای افروزش (به طور خلاصه زمان افروزش) برای جامد نیمه نامحدود عبارت است از:

$$t_{ign} = \frac{\pi k \rho c (T_{ign} - T_i)^2}{4\dot{q}_s''} \quad (۷-۲)$$

و با جایگذاری در معادله ۵-۲ داریم:

$$t_{ign} = \frac{\pi k \rho c (T_{ign} - T_i)^2}{4(\dot{q}_e'' - \dot{q}_{cr}'')} \quad (۸-۲)$$

کمیت $k\rho c$ اینرسی حرارتی نامیده می‌شود. این کمیت یک پارامتر مهم مصالح در مهندسی ایمنی آتش است که شدت گرم شدن و افروزش سطح مصالح را تعیین می‌کند. این فرض که $\dot{q}_s'' = \dot{q}_e'' - \dot{q}_{cr}''$ ، کمترین مقدار \dot{q}_s'' را در طول فرآیند افروزش به دست می‌دهد. بنابراین زمان افروزش مطابق معادله ۸-۲، دست بالا محاسبه می‌شود. توارسن^۱ [19] پارامتر پاسخ حرارتی (TRP)^۲ را به شکل زیر معرفی کرده است:

$$TRP = (T_{ign} - T_i) \sqrt{k\rho c} \sqrt{\frac{\pi}{4}} \quad (۹-۲)$$

با جاگذاری TRP در معادله ۸-۲، زمان افروزش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$t_{ign} = \left(\frac{TRP}{\dot{q}_e'' - \dot{q}_{cr}''} \right)^2 \quad (۱۰-۲)$$

1. Tewarson
2. Thermal Response Parameter

یا

$$\dot{q}_e'' - \dot{q}_{cr}'' = \text{TRP} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_{\text{ign}}}} \quad (11-2)$$

مقدار TRP از نمودار $\frac{1}{\sqrt{t_{\text{ign}}}}$ بر حسب شار حرارتی بیرونی، \dot{q}_e'' و تعیین شیب پیدا می‌شود.

جانسنز^۱ [20 و 21] مفروضات را مطابق معادله ۲-۴ استفاده کرده، تجزیه و تحلیل آماری را برای یک حل تقریبی به کار برده است. او عبارت زیر را پیشنهاد می‌کند:

$$\dot{q}_e'' - \dot{q}_{cr}'' = 0.73 \dot{q}_{cr}'' \left(\frac{k\rho c}{h_{\text{eff}}^2} \right)^{0.55} \frac{1}{t_{\text{ign}}^{0.55}} \quad (12-2)$$

برای جامدهای نازک حرارتی^۲ یک موازنه حرارتی ساده، راه‌حلی برای مورد شار حرارتی ثابت در سطح ارائه می‌کند:

$$t_{\text{ign}} = \frac{\text{cpd}(T_{\text{ign}} - T_i)}{\dot{q}_s''} \quad (13-2)$$

با این وجود این عبارت نیز مانند فرآورده‌های ضخیم حرارتی دارای نقص تقریبی بودن است. در واقعیت شار حرارتی در سطح آزمون ثابت نیست.

جانسنز [20] با استفاده از روش‌های عددی، همبستگی را برای حالت نازک حرارتی وقتی که سطح پشتی نمونه عایق شده باشد (مانند حالت غالب در آزمون گرماسنج مخروطی)، پیشنهاد داده است:

$$\dot{q}_e'' - \dot{q}_{cr}'' = 1.9 \dot{q}_{cr}'' \left(\frac{\text{cpd}}{h_{\text{eff}}} \right) \frac{1}{t_{\text{ign}}} \quad (14-2)$$

1. Janssens
2. Thermally thin materials



برای معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۴ ارائه شده در بالا یک نمودار از $1/t_{ign}^n$ بر حسب \dot{q}_e'' ، خط مستقیمی ($n=1$) در مورد مصالح نازک حرارتی و 0.55 و 0.5 برای مصالح ضخیم حرارتی) به دست می‌دهد. خط مستقیم محور x را در \dot{q}_{cr}'' قطع کرده و شیب به دست آمده گروهی از پارامترها، ارائه شده در معادلات مختلف بالا می‌باشد. جانسنز [22] معادله زیر را به کار می‌برد:

$$\varepsilon \dot{q}_{cr}'' = h_c (T_{ign} - T_i) + \varepsilon \sigma (T_{ig}^4 - T_i^4) = h_{eff} (T_{ig} - T_i) \quad (2-15)$$

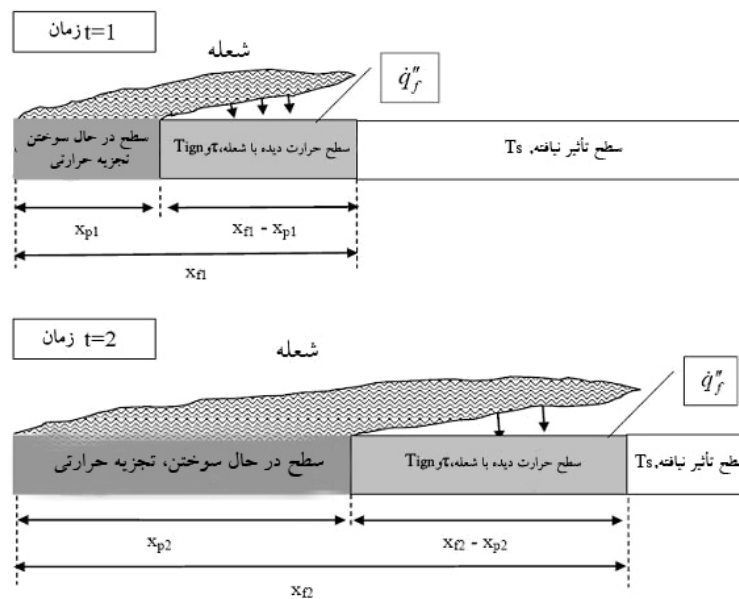
که از ترکیب معادله ۳، ۴ و ۵ در دمای افروزش به دست می‌آید. جانسنز همچنین ضریب انتقال حرارت همرفتی، h_c ، در شارهای حرارتی مختلف در گرماسنج مخروطی را اندازه‌گیری نموده است [22]. وقتی که h_c و \dot{q}_{cr}'' معلوم باشند، این امکان وجود دارد که اینرسی حرارتی مؤثر محاسبه شود و این دمای افروزش در معادله ۱۲ و ۱۵ به کار رود. همبستگی‌های جانسنز که در بالا مطرح شد در داده‌های گرماسنج مخروطی از پروژه‌های مختلف اروپایی امتحان شد که در [7] ارائه شده است.

ب- پیشروی شعله

داده‌های آزمون گوشه اتاق [23] نشانگر یک سناریوی تیپ برای آتش‌سوزی در آن است. بعد از گذشت یک دوره زمانی، آن سطح از دیوار در معرض مستقیم شعله شروع به سوختن می‌کند. سقف قرار گرفته در بالای مشعل افروخته شده و سپس پیشروی سریع شعله در امتداد سقف و قسمت‌های فوقانی دیوارها رخ می‌دهد. افروزش سقف یک عامل بحرانی برای افزایش شدید HRR در اتاق است و مهم‌ترین عامل برای رخداد گرگرفتگی سراسری محسوب می‌شود. پیشروی شعله را می‌توان به عنوان یک مجموعه از افروزش‌های پیاپی در نظر گرفت. شدت پیشروی شعله می‌تواند به صورت $V = l/\tau$ بیان شود، که l طول مشخصه^۱ نسبت به منطقه حرارت دیده در مسیر پیشروی شعله و τ زمان افروزش نظیر آن، یعنی زمان رسیدن جبهه شعله است. در آزمون گوشه اتاق، پیشروی سطحی مهم شعله که به پیشروی سریع آتش کمک می‌کند، از نوع «همسو با جریان هوا» است. پیشروی سریع شعله در سقف و به بالای دیوارها می‌تواند منجر به گرگرفتگی سراسری شود. در این حالت جریان گاز و پیشروی شعله در جهت

1. Characteristics Length

یکسانی می‌باشد که همان جهت باد است. فقط در روی دیوار به طرف کف است که پیشروی شعله به سمت پایین در خلاف جهت جریان کم می‌شود. اگرچه، برای حالتی که نازک‌کاری‌های قابل سوختن دیوار و سقف را پوشانده است، این پیشروی شعله در مرحله بعدی اتفاق می‌افتد و اهمیت کمتری دارد. بنابراین می‌توان آن را در اینجا نادیده گرفت. یک مدل که برای پیشروی شعله چندین بار توسط سایتو^۱، کوینتیر^۲ و ویلیامز [24] به کار رفته است، در شکل ۱۶-۲ دیده می‌شود.



شکل ۱۶-۲ اصول مدل پیشروی شعله همسو با جریان باد با نادیده گرفتن خاموشی شعله

شعله روی مصالحی را که هنوز مشتعل نشده‌اند فرا گرفته، آن را تا دمای افروزش، T_{ign} ، گرم می‌کند. فرض می‌شود که شار حرارتی، q_f'' ، در سطح ثابت باشد. در خارج از ناحیه شعله، از شار حرارتی ناشی از شعله چشم‌پوشی شده، با فرض صفر بودن این شار حرارتی سطحی، دما برابر دمای سطح در نظر گرفته می‌شود. بنابراین طول مشخصه، طول حرارت دیده به وسیله شعله است، یعنی، $l = x_{f1} - x_{p1}$ در زمان $t = 1$. به طور کلی، شدت پیشروی شعله می‌تواند به طور تقریبی به صورت زیر به دست آید:

2. Saito
3. Quintiere



$$V = \frac{X_f - X_p}{\tau} \quad (۱۶-۲)$$

طول شعله اغلب مرتبط با شدت رهایش گرما مطابق با فرمول زیر است:

$$x_f = K(\dot{Q}')^n \quad (۱۷-۲)$$

که \dot{Q}' ، HRR در واحد عرض شعله ایجاد شده در اتاق است. فاکتور K یک فاکتور همبستگی است که وابسته به سناریو می‌باشد. این فاکتور یک مقدار برای یک سناریوی گوشه اتاق، یک مقدار دیگر برای یک دیوار باز و غیره دارد. توان n بین $0/5$ و 1 تغییر می‌کند. سوندستروم [23] از مقدار $n=1$ برای مدل‌های مطالعه شده خود استفاده کرده است، یعنی طول شعله به طور خطی بستگی به HRR دارد. K ثابت سطح شعله^۱ نامیده می‌شود (با واحد m^2/kW برای $n=1$) وقتی که در عبارت‌ها برای شدت گسترش سطح به کار می‌رود.

HRR در امتداد طولی ناحیه تجزیه حرارتی می‌تواند به صورت زیر به دست آید:

$$\dot{Q}' = \int_0^{x_p} \dot{Q}''(x) dx \quad (۱۸-۲)$$

که \dot{Q}'' می‌تواند از داده آزمون گرماسنج مخروطی مشتق شود. ترکیب این اطلاعات منجر به توصیف‌هایی برای شدت پیشروی شعله و HRR می‌شود. زمان افروزش τ می‌تواند از گرمای جامد ضخیم حرارتی گرفته شود، مطابق معادله ۷-۲:

$$\tau = \frac{\pi k \rho c (T_{ign} - T_s)^2}{4(\dot{q}_f'')^2} \quad (۱۹-۲)$$

که \dot{q}_f'' شار حرارتی در سطح است و در طول مشخصه ثابت و در خارج از آن صفر فرض شده است.

تمام مفروضات و ساده‌سازی‌های انجام شده در معادله ۷-۲ در معادله ۱۹-۲ نیز اعمال می‌شود. فرض اضافی شار حرارتی ثابت جذب شده به وسیله سوخت یک ساده‌سازی است. شار حرارتی سطح با موقعیت به علت همرفت تغییر خواهد کرد و مشخصه‌های شعله شار حرارتی



تابشی متفاوتی را به علت وجود دوده ناشی از شعله به دست خواهد داد. مدل‌های محاسباتی دینامیک سیالات، CFD، می‌توانند تقریب‌های شعله را بهتر انجام دهند. در یک مدل CFD، واکنش‌های شیمیایی فرآیند احتراق و کسر دوده ناشی از شعله در نظر گرفته می‌شوند و محاسبات برای تعداد زیادی حجم‌های کنترل روی حجم شعله انجام می‌شود. در طول آزمون گوشه اتاق، شدت پیشروی شعله برحسب زمان و مکان تغییر می‌کند. معادله ۲-۱۹ یک مقدار زمان افروزش، τ ، ثابت یا کوتاه‌تر را ارائه می‌کند که بستگی به اهمیت پیش گرمایش دارد. برای فرآورده‌ای که یک مقدار ثابت یا فزاینده HRR در واحد سطح دارد، با بزرگتر شدن مساحت تجزیه شیمیایی حرارتی (پیرولیز)، انتظار شعله‌های بلندتری می‌رود و HRR در اتاق بیشتر می‌شود. برای فرآورده‌های چوبی، با یک HRR زیاد و پایدار در واحد سطح در طی چند دقیقه اول سوختن، پیش‌بینی می‌شود که پیشروی شعله با زمان رشد نمایی داشته باشد. به سادگی از معادله (۲-۱۸) دیده می‌شود که اگر \dot{Q}'' ثابت باشد، $\dot{Q}' = \dot{Q}''_{xp}$ و $x_f = k\dot{Q}''_{xp}$ که با جایگذاری در معادله ۲-۱۶ و حل آن داریم:

$$x_p = a e^{\frac{K\dot{Q}''-1}{\tau} t} \quad (2-20)$$

که $x_{p0} = a$ در زمان $t = 0$ است. اگر x_p متناسب با HRR فرض شود، بنابراین HRR رشد نمایی خواهد داشت.

سوندستروم [11] بر روی پیش‌بینی سرعت پیشروی شعله بر روی فرآورده‌ها در آزمون گوشه اتاق، با استفاده از داده‌های گرماسنج مخروطی بحث کرده است.

۲-۳ برخی مدل‌های پیشرفته آتش‌سوزی اتاق^۱

۲-۳-۱ مدل Conetools

ویکستروم^۲ و گورانسون^۳ [25 و 26] در اواخر دهه ۸۰ میلادی یک تکنیک را توسعه دادند که شامل انتگرال دوهمل برای پیش‌بینی آزمون گوشه اتاق بر اساس داده‌های گرماسنج مخروطی است. این نظریه بعداً در نرم‌افزار Conetools کدبندی شد و سپس برای پیش‌بینی‌های دیگر

1. Room Fire Growth Models
2. Wickström
3. Göransson



مانند سناریوهای آزمون SBI و پیش‌بینی داده‌های دود بیشتر توسعه پیدا نمود [27]. در اینجا فقط اصولی که مربوط به پیش‌بینی داده‌های آزمون گوشه اتاق است، ارائه می‌شود، اما برای مدل SBI نیز اصول مشابهی به کار می‌رود [11]. اندازه سطح پیرولیز در آزمون گوشه اتاق برحسب زمان به صورت زیر داده می‌شود:

$$A(t) = A_0 [1 + a(t - t_x)^2 / t_{ign}] \quad (21-2)$$

که در آن a ضریب همبستگی^۱ (برابر با 0.25 s^{-1} و 0.1 s^{-1} به ترتیب برای مشعل 100 kW و 300 kW) از مشاهدات پیشروی سطح پیرولیز در چندین آزمایش به دست آمده است. زمان t_x به گونه‌ای انتخاب شده است که شدت گسترش سطح در حال سوختن با شرایط بحرانی برای پیشروی شعله (که در ادامه ارائه می‌شود) تطابق داشته باشد. پارامتر A_0 سطحی است که در ابتدا در پشت مشعل می‌سوزد. زمان افروزش، t_{ign} ، از گرماسنج مخروطی در شار حرارتی 25 kW/m^2 به دست می‌آید.

نرم‌افزار Conetools تاریخچه منحنی کامل HRR را که در گرماسنج مخروطی اندازه‌گیری شده است، به کار می‌برد و فرض می‌کند که المان‌های سطح محدود دیوارها افروخته شده‌اند و یکی بعد از دیگری این منحنی HRR را در امتداد پیشروی سطح در حال تجزیه حرارتی (پیرولیز) تعقیب می‌نماید. کل HRR با استفاده از فرمول جمع محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}(t) = \sum_{i=1}^N \Delta A_i \dot{Q}_{cone}^{N-i} \quad (22-2)$$

که $t = N\Delta t$ و Δt افزایش زمانی است.

شرایط بحرانی برای شروع پیشروی شعله، یک دمای بحرانی ساختگی^۲ در سطح گرفته می‌شود. این دمای سطح از یک دمای ساختگی گاز که متناسب با $\dot{Q}^{2/5}$ فرض شده است، محاسبه می‌شود. برای برآورد توسعه دمای سطح، شده فرض می‌شود که پوشش‌های نازک‌کاری آزمایش شده همگن و نیمه محدود هستند و اینرسی حرارتی فرآورده، متناسب با عکس زمان افروزش، اندازه‌گیری شده در گرماسنج مخروطی، است. بنابراین تابع پاسخ برای تغییر دمای

1. Correlaiton Coefficient
2. Fictitious



سطح بر اثر یک تغییر پلکانی در دمای سطح، استخراج شده، دمای سطح با روش برهم‌نهی به دست می‌آید. سپس دمای بحرانی سطح به عنوان معیاری برای پیشروی شعله برای هر دو خروجی 100 kW و 300 kW گرمای مشعل افروزش استفاده می‌شود. نرم‌افزار Conetools به طور وسیع در کارهای اجرایی مخصوصاً برای توسعه فرآورده‌ها برای پیش‌بینی نتایج SBI به کار می‌رود.

۲-۳-۲ مدل BRANZFIRE

مدل BRANZFIRE یک مدل کامپیوتری پیشرفته برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در ساختمان‌های دارای نازک‌کاری‌های قابل سوختن است و خطرات ناشی از محتویات داخل ساختمان را نیز شامل می‌شود. این مدل دارای چند اتاق است و مخصوصاً برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در آزمون گوشه اتاق مناسب است. مدل فوق شامل موازنه کامل جرم و انرژی، تولید گونه‌ها، دوده و دود است. این مدل جزو مدل‌های دو لایه‌ای ناحیه‌ای است. این مدل از توصیف تحلیلی پدیده‌های مختلف که نیاز به مدل شدن دارند (مانند جریان ستونی آتش، ارتفاع شعله، افروزش و پیشروی شعله) بهره می‌برد. منابع این تحلیل‌ها کارهای انتشار یافته، مانند نشریات NIST است. مدل پیشروی آتش به طور وسیع براساس کار کویینتیر می‌باشد. مدل BRANZFIRE یک مدل عمومی است و سناریوهای مختلف اتاق را می‌توان با آن مدل‌سازی کرد. داده‌های ورودی برای پیش‌بینی گسترش آتش در نازک‌کاری‌ها از گرماسنج مخروطی به دست می‌آید.

مدل‌سازی افروزش و پیشروی شعله در BRANZFIRE بر اساس فیزیک مدل‌هایی است که قبلاً صحبت شد. مقدار حداکثر شار حرارتی مشعل افروزش در دیوار برای آزمون گوشه اتاق و منبع 100 kW معادل 60 kW/m^2 گرفته می‌شود [مراجعه شود به 11 و 28]. مقدار حداکثر شار حرارتی در سقف در بالای مشعل 120 kW/m^2 داده شده است. این به معنای افروزش خیلی سریع مصالح آزمایش شده در پشت شعله مشعل افروزش برای اکثر فرآورده‌ها است. معادله حاکم برای شدت پیشروی شعله به طرف بالا از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dy_p}{dt} = \frac{y_f - y_p}{t_{ign}} \quad (2-23)$$

که $y_f - y_p$ اختلاف بین طول شعله در جهت بالا و جبهه پیرولیز است. مدل BRANZFIRE خاموش شدن شعله را نیز در نظر می‌گیرد.



برای مصالح ضخیم حرارتی زمان افروزش به شرح زیر است:

$$t_{\text{ign}} = \frac{\pi}{4} k \rho c \left(\frac{T_{\text{ign}} - T_s}{\dot{q}_{\text{ff}}''} \right)^2 \quad (2-24)$$

که \dot{q}_{ff}'' «شار حرارتی جلوی شعله»^۱ است و فرض می‌شود که مقدار آن 30 kW/m^2 مطابق معادله ۲-۱۹ باشد. این مدل همچنین توصیف‌هایی برای پیشروی عرضی شعله و پیشروی به طرف پایین دارد.

سطح داخلی اتاق به وسیله تابش و همرفت حرارت داده می‌شود. مدل BRANZFIRE با استفاده از یک مدل ارائه شده توسط فرنی^۲ [29] تابش را مدل‌سازی کرده است. سقف، بالا و پایین دیوار و کف، هر یک به طور مستقل بین یکدیگر تابش می‌کند. حرارت تابشی از شعله‌ها نیز در نظر گرفته می‌شوند. تابش به وسیله ذرات دوده و جذب به وسیله دی‌اکسیدکربن و بخار آب برای دو لایه در پایین و بالا مدل‌سازی شده است. بالای دیوار شامل قسمت‌هایی از دیوارها در بالای مرز مشترک لایه دود^۳ و پایین دیوار شامل زیر مرز مشترک لایه دود می‌شود. لایه‌های گازی و هر کدام از اجزای دیوار، سقف و سطوح کف فرض می‌شوند که در یک دمای یکنواخت باشند. تابش ناشی از شعله‌های آتش فرض می‌شود که در تمام جهات یکنواخت بوده و از یک منبع نقطه‌ای تکی سرچشمه بگیرد. حرارت تابشی با حرارت همرفتی ترکیب شده که یک شرایط مرزی در سطوح برای محاسبه هدایت حرارتی تشکیل می‌دهند. ضریب انتقال حرارت همرفتی با فرض همرفت طبیعی به دست می‌آید.

انتقال حرارت همرفتی از $\dot{q}_c'' = h(T_g - T_s)$ به دست می‌آید. اینرسی حرارتی و دمای افروزش از داده گرماسنج مخروطی از روش جانسنز که قبلاً بحث شد، به دست می‌آید. اینرسی حرارتی برای محاسبه انتقال حرارت به داخل جامد مورد نیاز است. بنابراین نتیجه دمای محاسبه شده سطح، برای محاسبه زمان افروزش و سپس پیشروی شعله در معادله (۲-۲۴) گذاشته می‌شود.

مقدار HRR ناشی از سوختن نازک‌کاری‌ها در اتاق براساس HRR اندازه‌گیری شده در گرماسنج مخروطی است. این مدل گزینه‌های مختلفی دارد ولی ترجیح این است که از

1. Heat Flux Ahead Of The Flame
2. Firney
3. Smoke Layer Interface



داده‌های گرماسنج مخروطی در شارهای حرارتی مختلف استفاده شود. مقدار کل HRR پیش‌بینی شده از آزمون گوشه اتاق به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_b + \sum_{i=1}^N \dot{Q}^{N-i} \Delta A_i \quad (2-25)$$

که $t = N\Delta t$ و Δt افزایش زمان است. \dot{Q}_b مقدار HRR از منبع افروزش است و فرمول مجموع، HRR از فرآورده را به دست می‌دهد. این مجموع شبیه Conetools است (معادله ۲-۲۲). داده‌ها از گرماسنج مخروطی در یک شار حرارتی هماهنگ با شار حرارتی وارد شده به دیوار گرفته می‌شود. اگر شار حرارتی به دیوار، بیرون از مقادیری بود که با گرماسنج مخروطی اندازه‌گیری شده است، برای محاسبه HRR مورد نیاز در واحد سطح از روش درونیابی استفاده می‌شود.

پیش‌بینی‌های BRANZFINE برای تعدادی از سناریوها تأیید شده است. فرآورده‌های آزمون شده در برنامه EUREFIC برای پیش‌بینی نتیجه آزمون گوشه اتاق استفاده شد که در [30] گزارش شده‌اند.

۲-۳-۳ پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی

با استفاده از مدل‌های مختلف و نتایج گرماسنج مخروطی، نتایج آزمایشگاهی متعددی، مانند آزمون‌های گوشه اتاق، آزمون‌های اتاق کوچک، اتاق بزرگ و SBI پیش‌بینی شده که در [11] بحث شده است.

۲-۴ مروری بر برخی طبقه‌بندی‌های مهم مواد از نظر خطر آتش‌سوزی

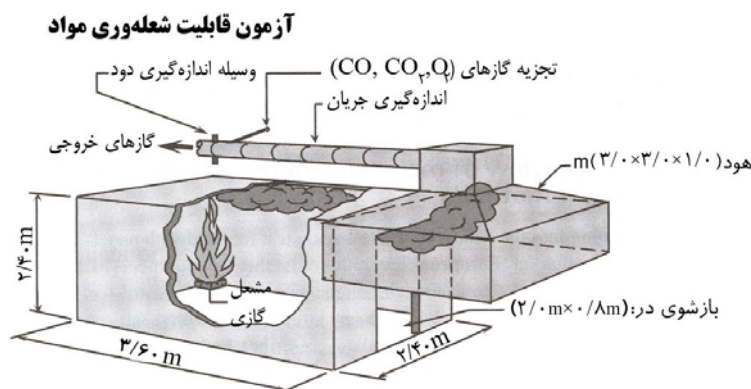
روش‌های مختلفی برای دسته‌بندی رفتار واکنش در برابر آتش مواد ارائه شده است. آزمون‌های ASTM E84 و BS 476-7 طبقه‌بندی مواد را بر حسب پیشروی سطحی شعله انجام می‌دهند، اما طبقه‌بندی به کار رفته در آنها عمدتاً تجربی یا قراردادی است. شرح کاملی از این روش‌ها در مرجع [۲] آمده است.

از روش‌های بسیار مهم برای تعیین خطر مواد از نظر گسترش آتش‌سوزی، مشارکت آنها در رسیدن به نقطه گرگرفتن سراسری است. نقطه گرگرفتن سراسری، لحظه‌ای بحرانی در آتش‌سوزی است که در آن هیچ موجود زنده‌ای در فضای وقوع آتش‌سوزی وجود نخواهد داشت. همچنین شعله‌های آتش از بازسوها به بیرون گسترش خواهد یافت. بنابراین ایجاد ارتباط بین



رفتار ماده در برابر آتش و لحظه گرگرفتگی سراسری، می‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی مواد باشد. یادآور می‌شود که طبقه‌بندی واحد اروپایی نیز بر اساس ایجاد ارتباط بین نتایج آزمون SBI با لحظه گرگرفتن در آزمون گوشه اتاق بنا شده است، که در فصل ادبیات علمی در مورد آن بحث شد.

سوندستروم و گورانسون [31] تلاش کردند تا بر اساس نتایج آزمون گوشه اتاق، یک طبقه‌بندی واقع‌گرایانه و علمی از رفتار مواد در برابر آتش ارائه نمایند. این آزمون شامل یک اتاق با یک درگاه با ابعاد معمولی و یک هود متصل به آن برای جمع‌آوری محصولات آتش‌سوزی می‌باشد (شکل ۲-۱۷).



شکل ۲-۱۷ نمایی از دستگاه آزمون گوشه اتاق ISO ۹۷۰۵

منبع آفرزش، یک مشعل گازی در گوشه اتاق است که در ۱۰ دقیقه ابتدایی آزمون، ۱۰۰ kW و سپس ۳۰۰ kW انرژی آزاد می‌کند. چنانچه اتاق در عرض ۲۰ دقیقه به مرحله گرگرفتن نرسد، آزمون متوقف می‌شود. گرگرفتن هنگامی رخ می‌دهد که شدت رهائش گرما به ۱۰۰۰ kW برسد (مجموع مشعل و نمونه) که تقریباً همزمان با مشاهده خروج شعله‌های آتش از درگاه اتاق می‌باشد. نمونه در کل نازک‌کاری دیوار و سقف نصب می‌شود. مقدار حرارت آزاد شده با روش پارکر [32] برای اندازه‌گیری اکسیژن مصرف شده به دست می‌آید. مقدار دود با اندازه‌گیری جذب یک نور عبور داده شده از سیستم کانال خروج به دست می‌آید. برای این منظور راسباش [33] کمیتی به نام تیرگی^۱، D_L ، ارائه داده است که مقدار آن به صورت زیر به

1. Obscura

دست می‌آید:

$$D_L = (10/L) \log(I_0/I)$$

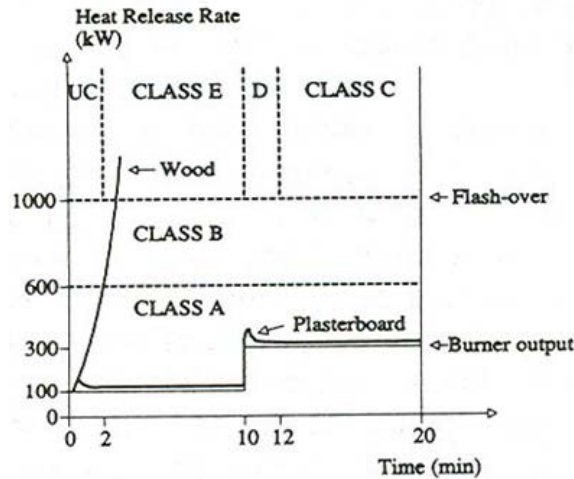
که در آن L طول پیمایش نور از میان دود و I_0 و I شدت نور به ترتیب در غیاب و حضور دود است. بر این اساس شدت تولید دود به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{V}(S) = D_L \dot{V}_T (\text{obm}^3 \text{s}^{-1})$$

که در آن \dot{V}_T شدت جریان حجمی گاز در کانال خروجی، با دمای واقعی آن است. سوندستروم و گورانسون [31] با این روش بیش از ۲۰ ماده را آزمون و یک روش طبقه‌بندی به صورت ارائه شده در جدول ۲-۹ و شکل ۲-۱۸ پیشنهاد کردند.

جدول ۲-۹ معیارهای طبقه‌بندی پیشنهادی مواد پوشش آزمون شده در آزمون گوشه اتاق [31]

شدت تولید دود		شدت رهائش گرما			کمترین زمان (دقیقه)	طبقه
میانگین (obm ³ /s)	بیشینه (obm ³ /s)	میانگین (بدون مشعل) (kW)	بیشینه (شامل مشعل) (kW)	بیشینه (بدون مشعل) (kW)		
۳	۱۰	۵۰	۶۰۰	۳۰۰	۲۰	A
۵	۷۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۷۰۰	۲۰	B
۵	۷۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۷۰۰	۱۲	C
۵	۷۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۱۰	D
-	۷۰	-	۱۰۰۰	۹۰۰	۲	E



شکل ۲-۱۸ حدود طبقه پیشنهاد شده برای آزمون گوشه اتاق [34]

در این طبقه‌بندی، طبقه A متناظر با محصولات با سوختن محدود است و موادی مانند پشم‌های معدنی و تخته گچی را در بر می‌گیرد. طبقه B موادی هستند که در طول کل ۲۰ دقیقه آزمون، به حالت گرگرفتگی نزدیک می‌شوند، اما گرگرفتگی رخ نمی‌دهد. به عنوان مثال کاغذ دیواری روی تخته گچی را می‌توان نام برد. طبقه C متناظر با موادی است که تنها پس از دو دقیقه پس از افزایش خروجی مشعل به ۳۰۰ kW به حالت گرگرفتگی می‌رسند که می‌توان مثال پلی‌استایرن با پوشش محافظ گچ را نام برد. مواد طبقه D سریعاً پس از رسیدن مشعل به خروجی ۳۰۰ kW به حالت گرگرفتگی می‌رسند، مانند کاغذ دیواری‌های ضخیم. طبقه E متناظر با موادی است که پس از بیش از دو دقیقه در معرض مشعل با خروجی ۱۰۰ kW به حالت گرگرفتگی می‌رسند که می‌توان محصولات چوبی یک تکه را نام برد [31].

در جدول ۲-۱۰ مقایسه بین روش سوندستروم با روش‌های ملی کشورهای اروپایی نشان داده شده است.



جدول ۲-۱۰ مقایسه نتایج آزمون‌های طبقه‌بندی سوندستروم-گورانسون با زمان‌های گرگرفتگی سراسری مقیاس کامل و طبقه‌بندی روش‌های ملی اروپایی*

فرآورده	طبقه‌بندی پیشنهادی	طبقه‌بندی پیشنهادی				زمان گرگرفتگی سراسری در مقیاس کامل (min)	طبقه‌بندی پیشنهادی	فرآورده
		انگلستان	آلمان	فرانسه	هلند			
فوم پلی‌یورتان سخت	UC	۴	B۳	M۴	۴	۰/۲۵	UC	
موکت دیوارپوش بر روی پشم معدنی	UC	۴	B۲	M۳	۴		UC	
تخته الیافی عایق	UC	۴	B۲	M۴	۴	۱	UC	
پلی استایرن منبسط	UC	-----	B۱	-	I	۴	UC	
تخته الیافی با دانسیته متوسط (MDF)	E	-	B۲	M۴	III	۴	E	
پانل چوبی	E		B۲	M۴	III	۲-۲/۵	E	
کاغذ دیواری ۲۰۰ گرم بر مترمربع بر روی تخته نئوپان	E		B۲	M۴	III	۳	E	
تخته نئوپان (خرده چوب)	E		B۲	M۴	III	۳	E	
تخته نئوپان باروکش ملامین	E		B۲	M۳	II	۸	E	
کاغذ دیواری PVC ۲۴۰ گرم در مترمربع اجرا شده بر روی تخته گچی	D		B۱	M۳	III	گرگرفتگی پس از افزایش خروجی مشعل	D	
دیوارپوش بافت ۳۷۰ گرم در مترمربع روی تخته گچی	D		B۲	M۳	III	۴	D	
(کاغذ دیواری ۲۰۰ گرم بر مترمربع روی تخته گچی)	B		B۲	M۲	III	۲	B	
تخته گچی	A		A۲	M۱	I	۲	A	



* توضیحات طبقه‌ها: انگلستان: ۴-۰، آلمان: A1، A2، B1 تا B3، فرانسه: M1 تا M4، هلند: ۴-۱، سوئد: UC، I، III طبقه‌بندی نشده (الزامات هیچ طبقه‌ای را برآورده نمی‌کند).
** با آنکه تا حدودی احتراق وجود داشت، اما گرگرفتنی رخ نداد. شدت رهائش گرما داده شده است.

تحقیقات سوندستروم - گورانسون نشان داد که آزمون گوشه اتاق قابلیت بسیار خوبی برای طبقه‌بندی واقع‌گرایانه رفتار مواد در برابر آتش دارد. اما این آزمون هزینه بالایی داشته و تکرار آن برای کارهای آزمایشگاهی و مقرراتی، چندان اقتصادی نیست. ویکستروم و گورانسون [25] تلاش کردند تا با استفاده از دستگاه گرماسنج مخروطی، گرمای آزاد شده در آزمون گوشه اتاق را پیش‌بینی نمایند. آنها به این منظور ۹ نمونه نازک‌کاری قابل اشتعال را با این دو روش آزمون کردند. آنها فرض کردند که کل گرمای رها شده از سوختن نمونه در آزمون گوشه اتاق، برابر با مجموع سوختن مساحت‌های کوچک است که به ترتیب با پیشروی شعله بر روی آنها شروع به سوختن می‌کند. بنابراین در هر لحظه، کل رهائش گرما برابر با مجموع گرمای کل این مساحت‌های جزئی است. همچنین فرض شد که تاریخچه شدت رهائش گرما بر حسب واحد سطح در هر نقطه برای مقیاس بزرگ معادل مقیاس کوچک است [34]. در شکل افزایشی، مجموع شدت رهائش گرما (\dot{Q}) در N امین افزایش زمانی می‌تواند به شکل زیر به دست آید:

$$\dot{Q}^N = \sum_{i=1}^N \Delta A^i q_{bs}^{N-i} \quad (26-2)$$

که در آن ΔA^i ، گسترش مساحت در حال سوختن افزایشی i و q_{bs}^{N-i} شدت رهائش گرما به ازای واحد سطح پس از $N-1$ افزایش زمانی، به دست آمده از گرماسنج مخروطی است. برای افزایش‌های زمانی بینهایت کوچک، معادله بالا را می‌توان با انتگرال دوهامل نمایش داد:

$$\dot{Q}(t) = \int_0^t \dot{A}(\tau) q_{bs}''(t - \tau) d\tau \quad (27-2)$$

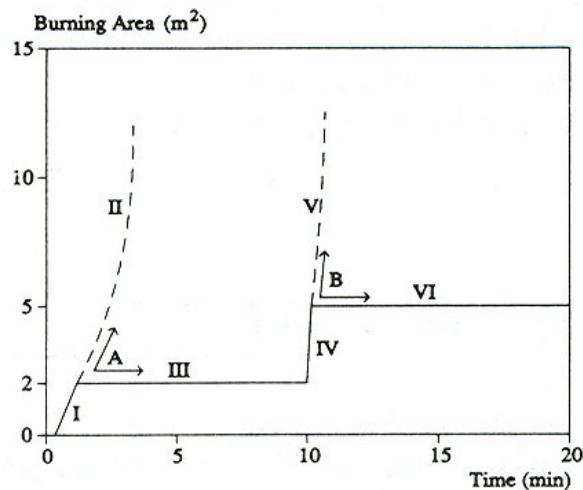
1. Incremental Burning Area Growth

که در آن \dot{A} مشتق زمانی مساحت در حال سوختن، t زمان و τ یک پارامتر فرضی است. مساحت در حال سوختن به وسیله دوربین فیلمبرداری ثبت شد. نظریه‌های ساده شده پیشروی سطحی شعله، [مانند 34 و 35] نشان داده است که شدت پیشروی متناسب با عکس زمان افروزش است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مساحت در حال سوختن باید تابعی از زمان نرمال شده با زمان افروزش باشد. ویکستروم و گورانسون [25] نتایج خوبی با این فرض گرفتند، اما نشان دادند که تناسب با $(1/t_{ig})^{0.6}$ ، نتایج بهتری به دست می‌دهد. منحنی مساحت در حال سوختن به صورت تابعی از $\xi = t/t_{ig}^{0.6}$ نشان داده شد که با نتایج تجربی همخوانی مناسبی داشت:

$$A(\xi) = e^{\xi/2} - 2 \quad (28-2)$$

با دانستن زمان افروزش، این مقدار را می‌توان در معادله $26-2$ یا $27-2$ (ترجیحاً $26-2$) قرار داد.

همان گونه که از شکل $19-2$ مشاهده می‌شود، پیشروی آتش می‌تواند در ۳ مسیر رخ دهد. در این شکل رژیم‌های گسترش شعله با نمادهای رومی علامت گذاری شده است.



شکل $19-2$ الگوی رشد ناحیه سوختن در آزمون گوشه اتاق [34]



در نقاط A و B در شکل رشد ناحیه سوختن می‌تواند با روش II یا V پیش برود اگر آفرزش بیشتر شود و III یا VI اگر این دما بیشتر نشود. یک محصول در مسیرهای II یا V پیشروی می‌کند، اگر دمای سطح از یک مقدار بحرانی تجاوز کند. ویکستروم و گورانسون [34] در مدل خود فرض کردند که پیشروی شعله در صورتی رخ می‌دهد که دمای سطح (θ_s) در یک نقطه فرضی درست در جلوی جبهه شعله، پس از گذشت یک زمان معین می‌رسد. دمای θ_s به دمای گاز احتراق که از روی آن عبور می‌کند (θ_g) و پاسخ حرارتی سطح محصول بستگی دارد. دمای گاز نیز به نوبه خود به مجموع حرارت آزاد شده از مشعل و از محصول در نزدیکی مشعل بستگی دارد (Q_{total}). مقدار Q_{total} از معادلات بالا به دست می‌آید. سپس θ_g از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_{gas} = \gamma Q_{total}^{2/5} \quad (2-29)$$

که در آن γ یک ضریب تناسب تجربی است و برای شدت مشعل ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلووات، به ترتیب برابر با $50 \text{ K/W}^{2/5}$ و $35 \text{ K/W}^{2/5}$ است [34]. پاسخ حرارتی را می‌توان بر حسب اینرسی حرارتی، $k\rho c$ ، بیان کرد و فرض شد که پاسخ حرارتی سطح با زمان آفرزش به دست آمده در گرماسنج مخروطی تعیین می‌شود. برای این منظور تابع پاسخ، η ، تعریف و فرض می‌شود که ماده نیمه بی‌نهایت (ضخیم حرارتی) بوده و $k\rho c$ متناسب با زمان آفرزش گرماسنج مخروطی است. ویکستروم و گورانسون [34] اینرسی حرارتی را با مقدار پاسخ آفرزش (IRV)^۱ جایگزین نمودند که فرض می‌شود متناسب با زمان آفرزش است و برای چوب برابر است با $IRV = 1250 t_{ign}$ ، که در آن t_{ign} زمان آفرزش گرماسنج مخروطی تحت 25 kW/m^2 است. سپس برای اجسام نیمه بی‌نهایت که در معرض یک دمای ثابت گاز قرار گرفته‌اند، با استفاده از ادبیات علمی [36 و 37]:

$$\eta = \frac{\theta_s}{\theta_g} = \left[1 - \exp\left(\frac{t}{\tau} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau}}\right)\right) \right] \quad (2-30)$$

که در آن $\tau = IRV / h^2$. مقدار ضریب انتقال حرارت، h ، برای محاسبات عددی $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$.

1. Ignition Response Value



فرض شد که برای نقاط اطراف ستون مشعل، عدد قابل قبولی در نظر گرفته شده است [34]. با داشتن مقدار دمای گاز بر حسب زمان، برای به دست آوردن مقدار دمای گاز می‌توان از یک برهم‌نهمش شبیه به شدت هدایت حرارت استفاده کرد:

$$\theta_s(t) = \sum_{i=1}^N \Delta\theta_g^i \eta^{N-i} \quad (31-2)$$

که در آن θ_g^i ، دمای گاز در آیین افزایش زمانی و η^{N-i} تابع پاسخ در زمان $N-I$ است. ویکستروم و گورانسون [34] مدل خود را به طور تجربی برای ۱۳ نمونه آزمایش کردند که انطباق خوبی به دست آمد.

استاندارد واحد اروپایی مصالح را بر اساس رفتار واکنش در برابر آتش به طبقات A تا F طبقه‌بندی می‌نماید که در آن طبقه A نشانگر مصالح بدون اثر در آتش‌سوزی و F نشانگر مصالح با واکنش غیر قابل قبول در برابر آتش و یا مصالح اظهار نشده (فاقد نتیجه آزمایش) است. قلب طبقه‌بندی در این روش، آزمون SBI است که خود برای شبیه‌سازی زمان گرگرفتن در آزمون گوشه اتاق به کار رفته است [11].

ریچاردسون [38] بر اساس نتایج گرماسنج مخروطی، با استفاده از دو پارامتر حداکثر شدت رهایش گرما و کل رهایش گرما در ۱۵ دقیقه ابتدای آزمون، تحت تابش 50 kW/m^2 طبقه‌بندی زیر را ارائه نموده است:

طبقه ۱- موادی که کل گرمای آزاد شده آنها به مقدار 5 MJ/m^2 یا کمتر است و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها نیز 10 kW/m^2 باشد. طبق نظر ریچاردسون، این طبقه با مصالح غیر قابل سوختن مطابقت دارد.

طبقه ۲- موادی که تحت شرایط فوق، کل گرمای آزاد شده آنها حداکثر برابر با 25 MJ/m^2 و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها نیز 10 kW/m^2 باشد. از مصالح این طبقه می‌توان تخته گچی با روکش کاغذی را نام برد.

طبقه ۳- کل گرمای آزاد شده 50 MJ/m^2 یا کمتر و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها 150 kW/m^2 است.

طبقه ۴- کل گرمای آزاد شده حداکثر 100 MJ/m^2 و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها 300 kW/m^2 باشد.

طبقه ۵- کل گرمای آزاد شده بیش از 100 MJ/m^2 و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها بیش از 300 kW/m^2 است.



مواد طبقات ۴ و ۵ جزو مواد خطرناک و خیلی خطرناک هستند و معمولاً طبق مقررات ساختمانی برای استفاده از چنین موادی باید از یک لایه پوشش محافظت‌کننده مانند یک لایه تخته گچی با ضخامت حداقل ۱۲/۵mm استفاده نمود.

در روش ریچاردسون به زمان افروزش توجه نشده است، در حالی که زمان افروزش اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی مشارکت ماده در گسترش آتش‌سوزی دارد. اگر افروزش یک ماده، زمان زیادی به طول انجامد، پیشروی سطحی شعله و گسترش آتش بر روی آن می‌تواند کم باشد، حتی اگر حداکثر شدت رهایش گرمای ناشی از آن بالا باشد. بنابراین روش ریچاردسون از این نظر ناقص است، زیرا زمان افروزش در آن در نظر گرفته نشده است. همچنین طبقات ۲ و ۳ در طبقه‌بندی ریچاردسون، عملاً بر حسب تجربه پژوهشگران این پروژه، تفاوت چندانی که کاربرد مقرراتی پیدا کند، ندارد.

در پیش‌نویس مبحث سوم مقررات ملی ساختمان ایران، یک روش موقت دسته‌بندی مواد از نظر خطر حریق ارائه شده است که در آن از روش ریچاردسون به عنوان مبنا استفاده شده، زمان افروزش نیز برای طبقه ۲ به عنوان یک پارامتر وارد شده است. همچنین طبقات ۲ و ۳ ریچاردسون در یک طبقه ادغام شده‌اند. طبقه‌بندی ارائه شده در مبحث سوم به شرح زیر است: طبقه ۱- موادی که تحت آزمون قابلیت نسوختن مطابق استاندارد ۲-۷۲۷۱ ملی ایران «غیر قابل سوختن» تشخیص داده می‌شوند.

طبقه ۲- موادی که در آزمون مطابق با روش استاندارد ۱-۷۲۷۱ ایران، تحت تابش ۵۰ کیلووات بر مترمربع در مدت ۱۵ دقیقه، گرمای کل رها شده از آنها حداکثر ۵۰ مگاژول بر مترمربع و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها کمتر از ۱۵۰ کیلووات بر مترمربع باشد و یا موادی که در آزمون مطابق با روش استاندارد ۱-۷۲۷۱ ایران تحت تابش ۵۰ کیلووات بر مترمربع در مدت ۱۵ دقیقه، زمان افروزش آنها بیش از ۳۰۰ ثانیه، گرمای کل رها شده از آنها حداکثر ۸۰ مگاژول بر مترمربع و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها کمتر از ۲۲۰ کیلووات بر مترمربع باشد.

طبقه ۳- موادی که در آزمون مطابق با روش استاندارد ۱-۷۲۷۱ ایران تحت تابش ۵۰ کیلووات بر مترمربع در مدت ۱۵ دقیقه، گرمای کل رها شده از آنها حداکثر ۱۰۰ مگاژول بر مترمربع و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها برابر یا بیش از ۲۵۰ کیلووات بر مترمربع باشد.

اوستمان و نوسبام^۱ [39 و 40] مطالعات گسترده تجربی و ریاضی برای برقراری ارتباط بین نتایج گرماسنج مخروطی و نقطه گرگرفتن در آزمون گوشه اتاق انجام داده‌اند. در پژوهش نخست [40] ۱۱ مصالح ساختمانی آزمون و همبستگی پارامترهای مختلف به دست آمده در مقیاس کوچک با زمان گرگرفتن در مقیاس بزرگ امتحان شد. همبسته‌سازی به وسیله زمان افروزش و کل رهائش گرما به تنهایی موفق نبود. ترکیب شدت رهائش گرما و زمان افروزش نتایج بهتری به همراه داشت. وارد کردن چگالی در معادله باعث بهتر شدن همبستگی شد و معادله زیر به دست آمد:

$$T = a \times \frac{t \cdot \sqrt{\rho}}{A} + b \quad (32-2)$$

که در آن T زمان رسیدن به نقطه گرگرفتن در مقیاس بزرگ بر حسب ثانیه، t زمان افروزش در مقیاس کوچک در تابش 25 kW/m^2 ، A شدت رهائش گرما در زیر پیک kW/m^2 ، ρ چگالی بر حسب kg/m^3 و $a = 2.76 \times 10^6 \text{ J}(\text{kg.m})^{-0.5}$ و $b = -46.0\text{s}$ اعداد ثابت هستند. در نظر گرفتن اینرسی حرارتی، بهبودی در معادلات ایجاد نکرد. در پژوهش دوم همبستگی بین پارامترهای مختلف به دست آمده از آزمون گرماسنج مخروطی، در ۳۰۰ ثانیه پس از افروزش، و زمان گرگرفتن در آزمون گوشه اتاق بررسی شد. بررسی برای ۱۱ مصالح قبلی و ۲۸ مصالح که اطلاعات آنها از پروژه‌های اروپایی و منطقه اسکاندیناوی جمع شده بود، صورت گرفت. بهترین معادله با ضریب همبستگی حدود ۰/۹۷ به شرح زیر به دست آمد:

$$t_{fo} = a \frac{t_{ig}^{0.25} \rho^{1.72}}{\text{THR}_{300}^{1.3}} + b \quad (33-2)$$

که در آن t_{fo} (ثانیه) زمان گرگرفتن در آزمون گوشه اتاق، t_{ig} (ثانیه) زمان افروزش در گرماسنج مخروطی تحت تابش 50 kW/m^2 ، THR_{300} (J/m^2) کل رهائش گرما در مدت ۳۰۰ ثانیه پس از افروزش تحت تابش 50 kW/m^2 ، ρ (kg/m^3) چگالی متوسط، a و b اعداد ثابت به شرح زیر هستند:

$$a = 0.0716(\text{J/m}^2)^{1.3} (\text{kg/m}^3)^{-1.72} \text{s}^{0.75}$$



$$b = 57.4s$$

معادله می‌تواند به شکل زیر ساده شود:

$$t_{fo} = 0.07 \frac{t_{ig}^{0.25} \rho^{1.72}}{THR_{300}^{1.3}} + 60 \quad (2-34)$$

برخی از پژوهشگران از حاصل تقسیم پیک شدت رهایش گرما به زمان افروزش (PRHR/TTI)، حاصل از آزمون گرماسنج مخروطی، به عنوان شاخصی برای میل به گرگرفتگی^۱ استفاده کرده‌اند که تحت عنوان پارامتر x معرفی شده است [به عنوان مثال 41-43]. هر چه مقدار پارامتر x بزرگتر باشد، زمینه وقوع گرگرفتگی ناشی از سوختن ماده بیشتر است. پترلا [42] با بررسی نتایج آزمون‌های مختلف، مطرح می‌کند که برخی از مواد به علت چگالی کم آنها یا حرارت اندکی که آزاد می‌کنند، نمی‌توانند باعث وقوع گرگرفتگی شوند، حتی اگر پارامتر x آنها بالا باشد. بنابراین لازم است تا علاوه بر پارامتر x ، کل رهایش گرما نیز در نظر گرفته شود. وی مقیاسی برای درجه‌بندی مواد برای میل به گرگرفتگی سراسری به صورت ارائه شده در جدول ۲-۱۱ ارائه کرد.

جدول ۲-۱۱ مرزبندی مواد بر اساس x و THR

ارزیابی خطر	THR	میل به گرگرفتگی سراسری	x
خیلی کم	۰/۱-۱/۰	کم	۰/۱-۱/۰
کم	۱/۰-۱۰	متوسط	۱/۰-۱۰
متوسط	۱۰-۱۰۰	زیاد	۱۰-۱۰۰
زیاد	۱۰۰ به بالا		

فصل سوم

مرور ادبیات علمی - مدل‌های ناحیه‌ای و میدانی مهندسی آتش

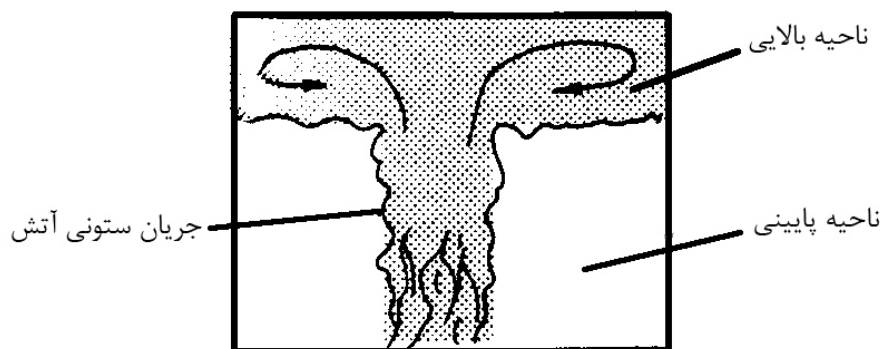
۳-۱ مدل‌های ناحیه‌ای آتش‌سوزی در فضای بسته

رفتار آتش‌سوزی در یک فضای محصور شامل برهم کنش مجموعه پیچیده‌ای از فرآیندها است. برخلاف کاربردهای احتراق کنترل‌شده، فرایندهای آتش به میزان زیادی به هم مرتبط می‌باشند. بررسی آزمایش‌های تجربی آتش در فضاهای محصور اجازه می‌دهد که این فرآیندها و مشخصه‌های آتش به طور واضح‌تری تعریف شوند. این امر منتهی به مطالعات فرآیندهای مجزا در مورد آتش می‌شود و ارائه مفهومی از آتش‌سوزی‌های فضای محصور برحسب عناصر و فرایندهای مجزای آن‌ها را می‌دهد. برای مثال، احتراق جسم در حال سوختن به صورت یک جریان ستونی آتش در نظر گرفته می‌شود. این جریان ستونی به سمت بالا می‌رود و در زیر سقف یک جریان جت آتش‌سوزی را تشکیل می‌دهد. ضمن این که در حین بالا رفتن، هوا و دیگر گازها را به داخل می‌کشد. لایه‌ای از فرآورده‌های طبقه‌ای شده داغ احتراق، بخش بالایی فضای محصور را پر می‌کند و هوا، عمدتاً بخش پایینی را تشکیل می‌دهد.

این تصویر از گسترش آتش‌سوزی، با توسعه معادلات فیزیکی حاکم بر فرایندهای فیزیکی و هر ناحیه از دامنه فضای محصور، امروزه تکیه بر فرمولاسیون ریاضی دارد. این رویکرد به وسیله پژوهشگران آتش در اصطلاح "مدل‌سازی ناحیه‌ای" نام دارد و به عنوان مبنای کدهای کامپیوتری برای پیش‌بینی جنبه‌های گوناگون رفتار در برابر آتش در فضاهای محصور استفاده شده است [44-46]. اما کاربرد گسترده و رو به رشد این کدهای کامپیوتری، خطر نادیده گرفته شدن مبنای فیزیکی فرآیندها را به همراه دارد، زیرا کاربرهای معمولی عمدتاً فقط به خروجی و نتایج مدل‌ها علاقمند هستند. به علاوه، ممکن است کاربران درک درستی از استخراج معادلات حاکم، فرضیات، محدودیت‌ها و مبنای فیزیکی آن‌ها نداشته باشند.

انتخاب حجم کنترل برای بسط قوانین بقا در آتش سوزی‌ها، بر پایه رفتار مشاهده شده در آتش‌سوزی‌های طبیعی در فضاهای محصور به شکل زیر صورت می‌گیرد:

آتش یک جریان ستونی شناور به وجود می‌آورد که باعث تشکیل دو ناحیه بالایی و پایینی به صورت لایه لایه می‌شود که به خوبی مخلوط شده است، به طوری که می‌توان دیوار و فاز گاز را در دو ناحیه بالا و پایین، دارای دمای یکنواخت فرض نمود (شکل ۱-۳).

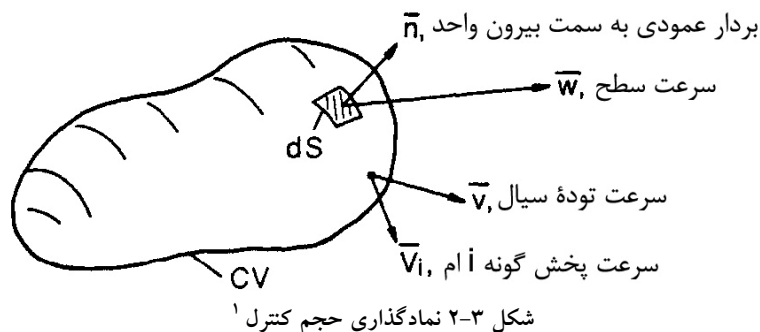


شکل ۱-۳ رفتار آتش فضای بسته

برای فضاهای بزرگ به دلیل از دست رفتن حرارت، تغییرات دمایی می‌تواند بزرگ باشد. ناحیه جریان ستونی آتش از این دو ناحیه بالایی و پایینی مجزا بوده و می‌تواند به عنوان یک حجم کنترل مجزا در نظر گرفته شود. رفتار توصیف شده در صورتی معتبر است که اندازه حرکت جت سقفی در مقایسه با شناوری جت پایین باشد. چنانچه عکس این موضوع صدق نماید، اندازه حرکت بر سیستم غالب بوده و می‌تواند منجر به ناحیه‌ای خوب مخلوط شده در کل فضای بسته شود.

برای مورد لایه لایه‌ای، همان طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده، سه حجم کنترل فاز گازی قابل تشخیص است: لایه داغ بالایی، لایه سرد پایینی و جریان ستونی آتش (ناحیه در حال احتراق).

از آن جا که یک حجم کنترل، نمایانگر ناحیه‌ای خاص می‌باشد، بنابراین معادلات بقا باید مستقیماً برای نواحی مناسب یا ناحیه‌های فضایی مهم در آتش‌سوزی‌های فضای بسته به کار روند.



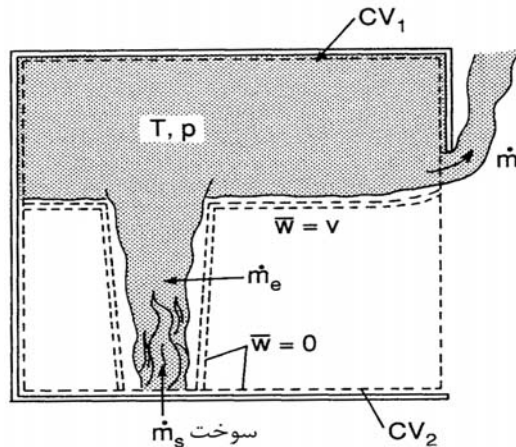
در توسعه معادلات آتش فضای بسته، فرض می‌شود (گاهی به طور مفهومی) که جریان ستونی آتش حجم ناچیزی در مقایسه با حجم فضای بسته دارد و می‌تواند به عنوان بخشی از حجم کنترل لایه فوقانی در نظر گرفته شود. این مورد یک تقریب است و باید توجه شود که حد واکنش (شعله) تغییر می‌کند و ممکن است در برخی شرایط آتش‌سوزی بزرگ به لایه فوقانی گسترش یابد.

به عنوان یک راه دیگر، می‌توان دو حجم کنترل انتخاب کرد، یکی برای لایه فوقانی و دیگری برای شعله. این روش وقتی مفید است که برخی از خواص متوسط یکنواخت برای جریان ستونی آتش لازم باشد، مثلاً دما، گونه‌ها و غیره. در این صورت در نظر گرفتن جریان ستونی شعله به صورت شبه پایدار و صرف نظر کردن از $\frac{d}{dt} \iiint \rho dV$ می‌تواند مفید باشد، که حجم کوچکی را برای جریان ستونی شعله پیشنهاد می‌کند، در حالی که لایه بالایی کاملاً ناپایدار در نظر گرفته می‌شود.

در اینجا انتخاب اول که شامل در نظر گرفتن یک حجم کنترل برای شعله و لایه فوقانی است، به عنوان یک شروع پذیرفته می‌شود. این موضوع در شکل ۳-۳ نشان داده شده است که در آن حجم کنترلی CV_1 معادل است با: جریان ستونی آتش + لایه فوقانی و سطح به گونه‌ای که در شکل ۳-۳ نشان داده شده، انتخاب شده است، به طوری که $w=0$ در مرزهای جامد، به جز در وجه پایین لایه که $w=v$ ، یعنی سطح این لایه به صورت سیال متشکل از ناحیه لایه‌لایه متناظر با آن حرکت می‌کند. هر سیالی که وارد CV_1 شود، به دلیل اختلاف فشار در بازشوها،

۱. در این فصل بردارها در شکل‌ها به وسیله یک خط بالای حروف و در متن به وسیله حروف پر رنگ نشان داده می‌شوند.

اثرات اختلاط برشی یا شناوری که وجه مشترک لایه‌بندی شده و پایدار بین لایه‌های داغ و سرد را خراب می‌کند، آن‌جا را ترک می‌کند.



شکل ۳-۳ حجم‌های کنترلی انتخاب شده در مدل‌سازی ناحیه‌ای [47]

ناحیه سرد CV₂، باقی‌مانده حجم گاز فضای بسته است. برخی فرضیات دیگر به صورت زیر است:

- ۱- هیچ نفوذ یا هدایتی در سطوح مرزی آزاد حجم کنترل رخ نمی‌دهد.
- ۲- تبادل جرم در مرزهای آزاد به دلیل انتقال توده سیال به علت اختلاط برشی یا فشاری است.
- ۳- نفوذ در مرزهای جامد می‌تواند رخ دهد، ولی معمولاً صرف نظر می‌شود.
- ۴- جریان ستونی فوراً به سقف می‌رسد.
- ۵- جرم یا ظرفیت گرمایی محتویات اتاق در مقایسه با اجزای سازه‌ای دیوار، سقف و کف فضای بسته نادیده گرفته می‌شود.
- ۶- مقطع عرضی افقی فضای بسته برابر با مساحت ثابت A است.
- ۷- فشار در فضای بسته در معادله انرژی یکنواخت در نظر گرفته می‌شود، ولی تغییرات هیدروستاتیک برای اختلاف فشارهای در مرزهای آزاد فضای بسته در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی فشار فضای بسته، p، بسیار بزرگ‌تر از تغییرات به دلیل هیدروستاتیک است $p \gg \rho gh$. برای مثال در شرایط زیر:



$$p = 1 \text{ atm} = 14.7 \text{ psi} \approx 10^2 \text{ kPa} (\text{N/m}^2) = 10^5 \text{ Pa} (\text{N/m}^2)$$

برای ارتفاع $H = 1 \text{ m}$ ، تفاوت فشار به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\rho g H \approx 1.2 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 1 \text{ m} \approx 10 \text{ kg/m.s} = 10 \text{ N/m}^2$$

۸- جریان جرمی به داخل جریان ستونی آتش به دلیل وارد شدن (یا مکش) توربولانس، v_e ، است.

۹- در تحلیل‌هایی که در ادامه خواهد آمد، فرض می‌شود که CV_2 پایینی دارای خواص معادل با سیال پیرامون بیرون از فضای بسته است. این یک فرضیه ضروری نیست و می‌توان خواص متغیر برای لایه پایینی در نظر گرفت.

۳-۱-۸ محدودیت‌های مدل‌سازی ناحیه‌ای

مدل‌سازی ناحیه‌ای برای مدت‌های طولانی است که در طراحی ایمنی آتش با موفقیت شایانی استفاده شده‌اند. در عین حال، با وجود سطح مهارت حاصل شده تا کنون، هنوز این رویکرد دارای اشکالات عمده‌ای است که مهمترین این موارد به شرح زیر می‌باشد:

- مدل‌های ناحیه‌ای به علت نوع تعریف آنها، اطلاعات محدودی درباره محیط آتش‌سوزی تأمین می‌کنند. از آنجایی که متغیرهای مورد نظر در تمام ناحیه‌ها با مقیاس فضایی بزرگی متوسط‌گیری می‌شوند. قدرت تفکیک ضعیف است و اثرات موضعی مهم نمی‌توانند ردیابی شوند. از سوی دیگر، مدل‌های میدانی قادر به رسیدن به قدرت تفکیک فضایی بالا هستند و توانایی‌هایشان برای تهیه چنین قدرت تفکیکی دائماً افزایش می‌یابد.
- اشکال اصلی مدل‌های ناحیه‌ای، لزوم شناخت اولیه از ساختار جریان است. این معلومات باید یا از آزمون‌های تجربی و یا از ملاحظات تئوریک پایه استخراج شوند. این بدان معناست که اعتبار فرضیات شامل در مدل‌سازی ناحیه‌ای باید در هر مورد خاص تأیید شود. به عبارت دیگر این بدان معناست که توسعه مدل ناحیه‌ای هرگز نمی‌تواند از مطالعات تجربی پشتیبانی‌کننده جدا شود. در رویکرد مدل‌سازی میدانی، این معضل به وسیله دسته‌بندی اصول اساسی فیزیکی مکانیکی و ترمودینامیکی برطرف می‌شود، که به طور عمومی برای هر سیستم مورد نظر درست است. بنابراین مدل‌های میدانی (به صورت تئوریک) قابل کاربرد برای هر وضعیتی با تغییر در ساختار جریان هستند و محیط آتش‌سوزی موجود به صورت خودکار محاسبه می‌شود.
- ممکن است مشکلاتی وجود داشته باشد که با استفاده از رویکرد ناحیه‌ای با دقت مورد نیاز قابل حل نباشد. برای مثال، در آتش‌سوزی با رشد سریع، امکان اینکه زمان کافی



برای بازسازی جریان به صورتی که ناحیه‌های مختلف توسعه داده شده و از یکدیگر تمایز داده شوند، وجود ندارد. ممکن است اختلاف بین ناحیه‌های مختلف غیر قابل تشخیص شود که امکان پذیری رویکرد ناحیه‌ای را مشکوک می‌سازد. همچنین رویکرد ناحیه‌ای درحالاتی که هندسه خیلی پیچیده است مورد تردید است مثلاً، اگر فضایی به وسیله انواع اجسام قابل سوختن مسدود شده باشد.

● ساختار جریان ممکن است در نتیجه تغییرات کوچکی در پارامترها تغییر کند. این امر ممکن است فرضیات مدل ناحیه‌ای را بی‌اعتبار کند و منتهی به نتایج نادرستی شود، مگر این که از قبل پیش بینی شده باشد. با استفاده از مدل‌های میدانی، ساختار جریان برای هر مجموعه از پارامترها به دست آورده می‌شود، بنابر این، وجود انشعاب‌ها مشکلی ایجاد نمی‌کند.

در حال حاضر مدل‌های میدانی نیز هنوز باید شامل بعضی فرضیات باشند که این به علت شکاف‌هایی در درک فعلی توربولانس، سینتیک، تابش و سایر فرآیندهای فیزیکی مهم می‌شود. با این وجود، در حال حاضر نیز توانایی مدل کردن این پدیده‌ها در حدی است که بتوان گفت بسیار بیشتر از هر مدل ناحیه‌ای متناظر، بیشتر قابل اعتماد و مفید است. این به خصوص برای هندسه‌های پیچیده صادق است که برای آنها فقط می‌توان از مدل‌های میدانی استفاده کرد.

۲-۳ مدل‌های میدانی (CFD) برای آتش‌سوزی‌های فضاهای محصور

در این بخش اغلب جزئیات قابل بررسی مدل‌های میدانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل‌های میدانی بر مبنای معادلات ناویر استوکس رینولدز متوسط گیری شده (RANS)^۱ مطرح شده‌اند. بحث‌های توربولانس، احتراق، تابش و شیمی حریق در کاربرد مدل‌سازی آتش به طور خلاصه ارائه می‌شود. بحث‌های مربوط به مدل‌سازی اطفاء ارائه می‌شود. در ادامه مدل‌های نوع LES بحث می‌شود. این مدل‌ها در مقایسه با دیدگاه RANS، اجازه می‌دهند تا میدان توربولانس مستقیم‌تر پردازش شود. انتظار می‌رود که این مدل‌ها دقت بالاتری را در مدل‌های میدانی آتی آتش ایجاد کنند.

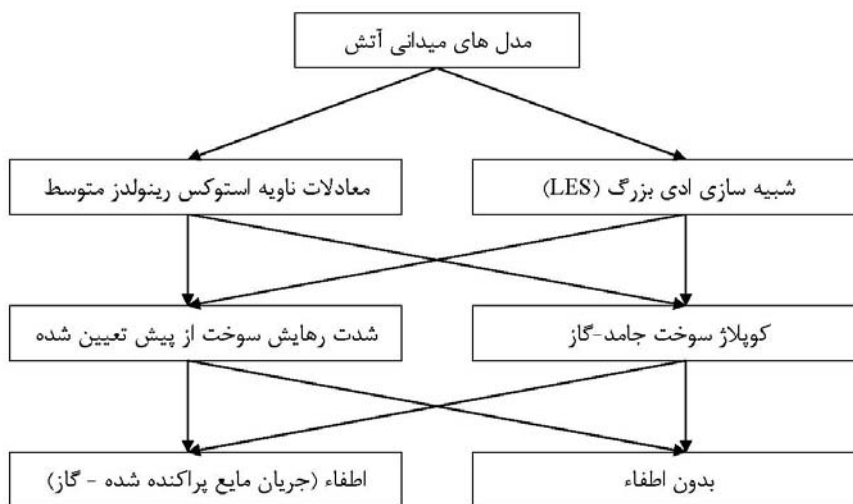
1. Reynolds-Averaged Navier-Stokes



۳-۲-۱ طبقه‌بندی مدل‌های میدانی و دامنه مرور

مدل‌های میدانی به طور طبیعی بر اساس روش‌هایی طبقه‌بندی می‌شوند که به وسیله آن، پدیده‌های توربولانس را مورد بحث قرار می‌دهند. دو گروه عمده تحت عنوان مدل‌های ناویر استوکس با رینولدز متوسط‌گیری شده (RANS) و شبیه‌سازی ادی بزرگ (LES) شناخته می‌شوند.

کوپل کردن بین فاز گاز و سوخت قابل سوختن جامد (یا مایع) مرحله دوم طبقه‌بندی است. برای بسیاری از موقعیت‌های مهم، شدت سوختن سوخت ممکن است شناخته شده باشد و به عنوان یک پارامتر ورودی با آن رفتار شود. ولی اگر آتش‌سوزی با یک شدت ناشناخته‌ای گسترش یابد، باید به وسیله بخشی از راه‌حل مسئله یافت شود. در چنین موقعیت‌هایی، شبیه‌سازی‌های کوپل شده فاز گازی با فاز سوخت لازم می‌باشد.



شکل ۳-۴ طبقه‌بندی مدل‌های آتش میدانی

یک طبقه‌بندی معمول مدل‌های میدانی در شکل ۳-۱۰ ارائه شده است. این طبقه‌بندی برای شناسایی گروه‌های اصلی مدل‌های میدانی بدون توجه به تفاوت‌گذاری‌های بی‌شماری که اهمیت کمتری دارند، طراحی شده و نمایانگر جهات عمده توسعه‌های آتی و حال حاضر در حوزه مدل‌سازی میدانی آتش می‌باشد [48].



۳-۲-۲ مدل‌های میدانی دو معادله‌ای برای توربولانس

در این قسمت، یک مدل میدانی آتش به خوبی اثبات شده، بر مبنای معادلات ناویر استوکس رینولدز متوسط‌گیری شده، به صورت مجموعه دو معادله‌ای برای جریان توربولانس در نظر گرفته می‌شود که به عنوان مدل رایج RANS شناخته می‌شود. در ابتدا معادلات بقای پایه برای جریان واکنشی چند جزئی همراه با فرضیات اصلی داده شده، و متعاقب آن در بخش‌های بعدی زیرمدل‌های مختلف ارائه می‌شود.

تعدادی از کاربردهای این مدل‌ها در تحقیقات آتش مطرح شده است. کاربردهای آن به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود. گروه اول فقط با شبیه‌سازی جریان گاز سر و کار دارد، به طوریکه فاز جامد منقطع از محاسبات و به وسیله یک منبع سوخت با مشخصه‌های فضایی و موقعیت شناخته شده نشان داده می‌شود. گروه دوم از مطالعات، شامل مدل‌سازی هر دو فاز جامد و گاز است و به ما اجازه می‌دهد که در مورد موضوعات مهم با توجه به مدل‌سازی گسترش آتش بحث کنیم.

۳-۲-۲-۱ معادلات بقای پایه

در مدل‌های میدانی از نوع RANS معادلات ناویر استوکس مبنای منظور دست‌یابی به مقادیر متوسط زمانی جریان، میانگین‌گیری می‌شوند. در جریان‌هایی با تغییرات زیاد در چگالی مثل جریان‌های همراه با سوختن، توصیف مناسب‌تر به وسیله معادلات میانگین‌گیری شده فاور^۱ (یا جرم وزن داده شده) [49 و 50] به دست آورده می‌شود. در این بخش، معادلات فاور میانگین‌گیری شده نیز ارائه شده‌اند، با وجود این، برای سهولت، آنها نیز تحت عنوان معادلات RANS معرفی می‌شوند. مقبول‌ترین و رایج‌ترین مدل‌ها بر اساس فرضیه لزجت ادی و مجموعه دو معادله‌ای است که به عنوان مجموعه $k-\epsilon$ شناخته می‌شود و شامل دو معادله دیفرانسیل جزئی اضافی برای انرژی سینتیک توربولانس k و شدت اضمحلال انرژی ϵ است. معادلات بقای میانگین‌گیری شده فاور، که جریان واکنشی مادون صوت را با مدل $k-\epsilon$ برای توربولانس توصیف می‌کند، ممکن است به شکل کلی زیر ارائه شود:

1. Favre



$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{U}\phi) = \nabla(\Gamma_\phi \nabla_\phi) + S_\phi + S_{p\phi} \quad (3-35)$$

ضرایب تبادل $\Gamma\Phi$ و ترم‌های چشمه $S\Phi$ و $SP\Phi$ در جدول ۳-۱ فهرست شده‌اند. این معادلات به طور گسترده‌ای برای جریان‌های توربولانس واکنش‌گر شیمیایی با عدد ماخ پایین، پذیرفته شده‌اند و بحث‌های مربوط در مراجع دیگر آمده است [49]. معادله (۳-۳۵) برای جریان تراکم‌پذیر ضعیف نوشته می‌شود، بدین معنی که چگالی سیال در اثر تغییر دما یا ترکیب مخلوط تغییر می‌کند، ولی در اثر فشار تغییر نمی‌کند. بنابر این فرض شده است که فشار از نظر ترمودینامیکی ثابت است و بر روی حرکت سیال فقط از طریق مشتقات فضایی ارائه شده در معادلات اندازه حرکت جدول ۳-۱ اثر می‌گذارد. این فرض، امواج آکوستیک را از جریان حذف می‌کند. فرضیات ساده شده مختلفی در بعضی از مطالعات بکار گرفته شده است. این فرضیات برای مثال شامل کاربرد معادلات لایه‌ای جریان، یا توزیعات تجویز شده برای برخی از متغیرها (مثل جزء سرعت شعاعی جت سقفی) است. چنین معادلاتی ارزش بسیار محدودی برای مدل‌سازی میدانی دارند، زیرا شرایط جریان آرام فقط وقتی که منبع آتش‌سوزی بسیار کوچک باشد، غالب خواهد شد.

جدول ۳-۱ عبارات شار و منبع برای معادلات بقا

$S_{p\phi}$	S_ϕ	Γ_ϕ	ϕ
$-\frac{d}{dt}(m_p)$	0	0	1
$-\frac{d}{dt}(m_p u_p)$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right)$	μ_e	u
$-\frac{d}{dt}(m_p v_p)$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y} \right)$	μ_e	v
$-\frac{d}{dt}(m_p w_p)$	$-\frac{\partial p}{\partial z} - g(\rho - \rho_{ref}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right)$	μ_e	w



0	$P + G - \rho\varepsilon$	μ_e/σ_k	k
0	$\frac{\varepsilon}{k}(c_1[P + c_3 \max(G,0)] - c_2\rho\varepsilon)$	μ_e/σ_ε	ε
0	0	μ_e/σ_ξ	ξ
0	$c_{g1}\mu_e \left[\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial z} \right)^2 \right] - c_{g2} \frac{\rho\varepsilon}{k} (\xi'')^2$	μ_e/σ_ξ	$(\xi'')^2$
0	$-C_R \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(Y_F, \frac{Y_0}{r}\right)$	μ_e/σ_Y	Y_F
$-\frac{\partial}{\partial t}(m_p)$	0	μ_e/σ_Y	Y_V
$-\frac{\partial}{\partial t}(m_p h_p)$	$-Q_R$		h
$P = \mu_e \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\}$			
$G = g \left(\frac{\mu_e}{\sigma_h} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial z}$			
$\sigma_k = 0.9, \sigma_\varepsilon = 1.22, \sigma_\xi = 0.7, \sigma_Y = 0.7, \sigma_h = 0.7$			
$\mu_e = \mu_{lam} + \mu_t, \mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$			
$c_\mu = 0.09, c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, c_3 = 1.0, C_R = 4.0, c_{g1} = 2.8, c_{g2} = 2.0$			

۳-۲-۳ مدل سازی توربولانس میدان جریان

هسته مرکزی مدل RANS ذکر شده در بالا، شامل معادلات توصیف کننده میدان جریان (چهار معادله اول جدول ۳-۱) همراه با دو معادله که مجموعه معادلات (closure) برای مدل توربولانس را مهیا می کند (معادلات برای انرژی جنبشی k و شدت اضمحلال انرژی ε)



می‌باشد. مجموعه $k-\varepsilon$ و کاربردهای آن موضوع بحث‌های زیادی در طول دهه‌های گذشته بودند.

فرض اصولی پایه، استفاده از مدل ویسکوزیته ادی است.

$$-\rho \overline{U'_i U'_j} = -\frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k + \mu_t \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial X_i} \right) \quad (3-36)$$

$$-\rho \overline{U'_j \phi'} = -\frac{\mu_t}{3\sigma_\phi} \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial X_j} \quad (3-37)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{U'_i U'_j} = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (3-38)$$

که k انرژی جنبشی توربولانس و σ_ϕ عدد پراختل - اشمیت توربولانس برای متغیر ϕ است. این مقادیر عموماً نزدیک به واحد است [50] (جدول ۳-۱). معادلات دیفرانسیل جزئی^۱ (PDE) برای k و ε برای بستن مسئله استخراج می‌شوند. معادله برای انرژی جنبشی توربولانس به سادگی با استفاده از مدل ویسکوزیته ادی فوق‌الذکر مشتق می‌شود. فرضیات مدل‌سازی برای شدت اضمحلال بسیار پیچیده‌تر هستند، به طوری که فرزیگر و پریک^۲ [51] پیشنهاد دادند که کل معادله به عنوان یک مدل در نظر گرفته شود.

یک فرض مهم این است که جریان توربولانس در تعادل است، به‌گونه‌ای که شدت‌های تولید و تخریب توربولانس تقریباً موازنه هستند. این فرض اجازه می‌دهد شدت اضمحلال و مقیاس طول توربولانس به هم مرتبط شوند.

از آنجا که جریان‌های همراه با آتش اساساً به صورت شناوری هستند، اصلاحاتی که در آن تولید اضافی توربولانس به دلیل شناوری در نظر گرفته شود، مورد نیاز می‌باشد. این مسأله معمولاً با وارد کردن ترم اضافی G (جدول ۳-۱) مطابق ردی و حسین^۳ انجام می‌شود.

1. Partial Differential Equation (PDE)
2. Ferziger and Perić
3. Rodi and Hossain



مجموعه ثابت‌ها که برای مدل $k-\epsilon$ ، در جدول ۳-۱ فهرست شده، معمول‌ترین و بهترین ثابت‌ها هستند. با این وجود، این پارامترها معمولاً برای کاربردهای خاص جریان تنظیم می‌شوند.

نام و بیل^۱ مدلی را برپایه رابطه‌های اثبات شده جریان ستونی هسکستاد^۲ [53] ارائه کردند. آنها دریافتند که لازم است تا ثابت C_{μ} (جدول ۳-۱) دو برابر شود، زیرا مدل استاندارد، پهنای کمتری برای سرعت و دمای جریان ستونی، نسبت به آنچه که واقعاً اندازه‌گیری می‌شود، پیش‌بینی می‌کند. عدد پرانتل مؤثر شدیداً روی توزیع دما اثر می‌گذارد و آن نیز ممکن است نیاز به اصلاح داشته باشد. این دو پارامتر اغلب مستقیماً روی توزیع دما و سرعت جریان اثرگذار هستند.

برای کاربرد مدل $k-\epsilon$ در مسائل آتش، مدل‌سازی دقیق تولید اضافی توربولانس به دلیل شناوری و اثرات لایه‌ای شدن^۳ از اهمیت بالایی برخوردار است. اهمیت این اثرات به وسیله مطالعات مختلف نشان داده شده است. برای مثال، نووویلو^۴ [48] در مطالعات روی جت‌های سقف نشان دادند که، بدون اثرات شناوری در هریک از معادلات K یا ϵ ، لایه طبقه‌ای شده تقریباً ناپدید می‌شود و به وسیله یک لایه حرارتی یکنواخت‌تر جایگزین می‌شود. پروفیل‌های دمایی نیز به طور قابل توجهی با ترم‌های شناوری، بهتر پیش‌بینی می‌شوند. مشاهدات مشابهی به وسیله فلچر^۴ و همکاران [54] گزارش شده است.

یک ویرایش خاص از مدل $k-\epsilon$ شناوری اصلاح شده به وسیله وودبرن و بریتر^۵ توسعه یافته که عدد پرانتل را (که در مدل استاندارد ثابت فرض می‌شود) تابعی از لایه‌ای شدن مطرح کردند. این تغییر به وسیله این واقعیت دیکته می‌شود که در جریان‌های شدیداً لایه‌بندی شده عدد پرانتل می‌تواند با ضریبی بزرگتر از ۲ تغییر کند. شدت توربولانس در جهت عمود به دیوار نیز به وسیله این مدل اصلاح شده کاهش می‌یابد، که در مدل استاندارد منعکس نمی‌شود.

-
1. Nam and Bill
 2. Heskestad
 3. Stratification
 4. Flethcher
 5. Woodburn And Britter



پارامتر C_{II} تابعی از جریان در نظر گرفته شده است، چنانچه داده‌های آزمایشگاهی پیشنهاد می‌کنند که این ثابت باید به طور قابل توجهی با لایه‌بندی و مجاورت دیوار تغییر کند. باید توجه شود که این مدل خاص برای جریان لایه‌ای تقریباً افقی توسعه داده شده است.

اصلاحات وودبرن و بریتر منجر به مدلی می‌شود که در آن معادلات k و ε بدون تغییر باقی می‌ماند ولی معادلات تکمیلی و ثابت‌هایی پدیدار می‌شوند. مقادیر ثابت‌ها در مدل $k-\varepsilon$ استاندارد حفظ می‌شوند. چنین مدلی می‌تواند روی کل محدوده جریان، به جز برای مناطق نزدیک به شعله که جریان تقریباً افقی نیست، به کار برده شود.

هنوز روند معمول این است که اثرات شناوری بدون وارد کردن معادلات اضافی مدل شود، همانطور که در جدول ۱-۳ آمده است. با این وجود معلوم شده که این فرمولاسیون برای آتش‌های دیوار ناکافی است. در جریان لایه مرزی القا شده توسط جریان شناوری، عبارات شناوری استاندارد (جدول ۱-۳) که فرضیه نفوذ گرادیانی را به کار می‌برد، اثرات شناوری پایین‌تر از واقعیت پیش‌بینی می‌شوند. زیرا اثرات شناوری گرادیان نفوذ طولی داخل شعله و بنابراین در جریان هسته ناچیز است. مدل $k-\varepsilon$ اصلاح شده به وسیله اینس و لاندرا^۱ از یک فرضیه نفوذ گرادیانی عمومی استفاده می‌کند که منجر به یک شار عمودی می‌شود که از یک گرادیان افقی در حضور برش استخراج شده است. این مدل پیش‌بینی‌های بسیار واقع بینانه‌تری از ترازهای توربولانس مربوط به آتش‌سوزی‌های دیوار می‌دهد.

به طور کلی، یک مجموعه کامل درجه دو ممکن است برای مدل‌سازی مطلوب‌تر جریان‌های ستونی آتش‌سوزی مغشوش ضروری باشد.

موضوع دیگر در مدل‌سازی توربولانس، رفتار جریان در نزدیکی دیواره‌ها است. معمولاً، توابع دیوار در ارتباط با مدل $k-\varepsilon$ برای اجتناب از مسائل قدرت تفکیک^۲ لایه‌های مرزی استفاده می‌شوند. این رویکرد در اغلب مطالعات شبیه‌سازی آتش استفاده شده است.

کومار و کاکس^۳ [55] و وودبرن و بریتر [56] توابع اصلاح شده دیوار را برای محاسبه اثر زبری سطح استفاده کردند. نتایج آنها حساسیت قابل توجه به این پارامترها را نشان داد که نیاز به پژوهش بیشتر برای در نظر گرفتن دقیق‌تر زبری مصالح ساختمانی در واقعیت را نشان می‌دهد. یک رویکرد دیگر به کاربردن یک مدل با عدد رینولدز کم نزدیک به دیوارهاست که

-
1. Ince And Launder
 2. Resolution
 3. Kumar and Cox



دستیابی به پیش‌بینی‌های بهتری از سرعت با آنها توسط چو^۱ [57] نشان داده شد. به نظر می‌رسد که این مشاهدات با این حقیقت سازگار هستند که توابع دیوار وضعیت فیزیکی را در بعضی وضعیت‌های خاص (برای مثال؛ جت‌های تماسی) به خوبی ارائه نمی‌کنند. مدل‌های عدد رینولدز کم از نظر محاسباتی بسیار پرهزینه‌تر از توابع دیوار هستند اما مطالعات انجام شده در [57] پیشنهاد می‌دهد که کاربرد آنها ممکن است ارزش این هزینه بیشتر را داشته باشد. با وجود این، تا کنون هیچ تلاش سیستماتیکی برای تصدیق کاربرد آن‌ها در مدل‌سازی آتش انجام نشده است [48].

کاربرد مدل‌هایی غیر از $k-\epsilon$ محدود شده است. مدل‌های جبری را که ویسکوزیته مؤثر را با استفاده از توابع جبری مقادیر متوسط جریان محاسبه می‌کنند (بدون استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی)، باید منسوخ شده فرض نمود. بر اساس نووژیوف [48] نسخه R-N-G مدل $k-\epsilon$ نیز در مدل‌سازی آتش به کار نرفته است. البته هیچ دلیلی برای باور این که این مدل به طور موفق بهتر از نسخه استاندارد عمل می‌نماید، نیز وجود ندارد.

مدل‌های تنش رینولدز مزایای خود را دارند ولی کاملاً پیچیده‌اند و به ایجاد مشکلات در پایداری در محاسبات، شناخته شده هستند. معادلاتی که نیاز به حل شدن در مدل‌های تنش رینولدز دارند حتی سخت‌تر از آنها هستند که در مدل $k-\epsilon$ به کار می‌روند و برای حل آنها دقت و توجه بیشتری باید کرد. آنها هنوز به صورت موفقیت‌آمیز در کاربردهای آتش‌سوزی به دلیل هزینه‌های محاسباتی سنگین استفاده نشده‌اند. دستیابی به همگرایی با این مدل‌ها معمولاً مشکل است. برای مثال، وودبرن مشکلات همگرایی را در مطالعه توسعه شعله در گودال‌ها گزارش کرده است.

۳-۲-۴ مدل‌سازی احتراق

گستره مدل‌های استفاده شده برای احتراق اساساً در دو دسته قرار دارد:

- مدل‌های براساس رویکرد اسکالر پایسته^۱
- مدل‌های احتراق شعله کوچک^۲

1. Chow
2. Flamelet



مدل‌های نوع اول اکثریت وسیعی از مدل‌های به کار رفته را تشکیل می‌دهد و با جزئیات بیشتر در مقایسه با دسته دوم در نظر گرفته خواهند شد.

۳-۲-۴-۱ رویکرد اسکالر پایسته شیمی سریع

در اغلب موقعیت‌ها حین توسعه آتش‌سوزی فضای بسته، با شعله‌های نفوذی یا غیر پیش مخلوط سروکار داریم (از استثناها می‌توان پس‌زدن شعله و دیگر اشتعال‌ها و انفجارات در فضاهای محدود را نام برد که شامل احتراق واکنشگرهای پیش‌مخلوط به طور جزئی یا کاملاً پیش مخلوط می‌شوند). نوعاً، سوخت جامد متحمل یک تغییر فاز در نتیجه پیرولیز می‌شود و فرآورده‌های فرار فرآیندهای پیرولیز داخل فاز گاز آزاد می‌شود. این گازها در حین این که با هوای اطراف مخلوط می‌شوند، به صورت یک سیستم غیر پیش مخلوط می‌سوزند.

مرورهای وسیعی در مورد احتراق غیر پیش مخلوط توربولانس به وسیله بیلگر^۱ [49] ارائه شده‌است. توسعه یافته‌ترین و رایج‌ترین رویکرد بکار رفته در مبحث این نوع احتراق بر اساس در نظر گرفتن اسکالره‌ای پایسته است. اسکالر پایسته (یعنی کمیتی که تحت واکنش شیمیایی بدون تغییر است)، اجازه می‌دهد ساده‌سازی قابل توجهی در محاسبات شدت احتراق توربولانس به دست آید.

رویکرد اسکالر پایسته در ترکیب با فرض شیمی سریع^۲ بیشتر موفقیت‌آمیز بوده است. این فرض در بسیاری از موارد مهم از نظر عملی قابل توجیه است، چون بسیاری از واکنش‌ها سرعت‌های بالایی دارند و می‌توانند به محض این که واکنشگرها مخلوط می‌شوند، کامل در نظر گرفته شوند. فرض شیمی سریع بیان می‌کند که زمان واکنش به گونه قابل چشم‌پوشی در مقایسه با زمان مخلوط شدن سیال کوتاه است. نتیجه مهم این است که غلظت‌های لحظه‌ای گونه‌ها توابعی از اسکالر پایسته، فقط در آن لحظه هستند. بنابراین مسئله برهم‌کنش توربولانس-شیمی به نحو چشمگیری در این حالت ساده می‌شود. آمارهای همه‌متغیرهای شیمیایی را می‌توان از معلومات آماری یک اسکالر (پایسته) به دست آورد.

در ساده‌ترین حالت که واکنش برگشت‌ناپذیر تک مرحله و شیمی سریع است، هیچ اکسیدکننده‌ای در ناحیه‌هایی که مخلوط غنی‌تر از استوکیومتری است و هیچ سوختی در

1. Bilger

2. Fast Chemistry



ناحیه‌های ضعیف مخلوط وجود نخواهد داشت. اگر واکنش برگشت پذیر باشد، هم سوخت و هم اکسیدکننده نزدیک به مقادیر استوکیومتری جزء مخلوط وجود خواهند داشت. تحت فرض شیمی سریع، سرعت‌های واکنش رفت و برگشت در مقایسه با فرآیندهای مخلوط کردن سیال سریع است. پس، یک ترکیب شیمیایی لحظه‌ای از مخلوط معادل ترکیب شیمیایی آن در حالت تعادل خواهد بود و مجموعه مسئله می‌تواند با استفاده از ثابت تعادل برای واکنش به دست آید. ارزیابی چندین اصلاح از مدل‌های شیمی سریع در مرجع [58] ارائه شده است.

۳-۲-۴-۲ مدل شکست ادی^۱

یک بسط از رویکرد اسکالر پایسته با در نظر گرفتن متغیر دوم به دست می‌آید که غلظت، تحت تأثیر سینتیک‌های شیمیایی واقع می‌شود. چنین مدل‌هایی در دامنه‌ای به نام رویکرد دو متغیره فرموله می‌شوند. تحت این فرمولاسیون، همه متغیرهای مورد نظر تابعی از این دو متغیر انتخاب شده هستند، نه یک متغیر (اسکالر پایسته). برخلاف اسکالر پایسته، معادله برای متغیر همراه آن باید یک جمله تولید شیمیایی داشته باشد و مدل برای این جمله لازم می‌شود. یک مثال عمومی و نسبتاً موفق این رویکرد مدل شکست ادی (EBU) است، که از کارهای اسپالدینگ^۲ منشأ گرفته و متعاقباً به وسیله مگنسن^۳ توسعه یافته است.

اگر سرعت واکنش شیمیایی به وسیله سرعت مخلوط کردن مولکولی واکنشگرها کنترل شود، که به نوبه خود به سرعت اضمحلال ادی‌های توربولانس مربوط می‌شود، در این صورت سرعت میانگین مصرف سوخت، R_f ، را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R_f \approx \rho \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \bar{Y}_F^2 \quad (3-39)$$

چنین بیانی نیاز به محاسبه غلظت لحظه‌ای سوخت دارد.

در حالی که مدل شکست ادی کاربرد گسترده‌ای دارد، هنوز پرسش‌های اساسی درباره صحت این رویکرد وجود دارد. بیلگر مبنای تئوریک صحیحتری را برای مدل EBU پیشنهاد کرد، که وابستگی ثابت شکست ادی را به PDF جزء مخلوط آشکار می‌کند. این ثابت ممکن

1. Eddy Break-up Model
2. Spalding
3. Magnussen



است به طور صریح به صورت تابعی از میانگین جزء مخلوط و انحراف استاندارد محاسبه شود. مطالعه اخیر نشان می‌دهد که ثابت EBU بستگی قوی به شکل PDFهای جزء مخلوط که معمولاً استفاده شده ندارد و مقدار میانگین آن در عرض شعله نزدیک به همان مقداری است که معمولاً به وسیله مدل مخلوط برخوردی به کار رفته است.

۳-۲-۴-۳ مدل‌های با سرعت محدود واکنش

قطعاً فرضیه شیمی سریع همیشه معتبر نیست. تولید بسیاری از گونه‌های مهم در شعله‌های توربولانس از نظر شیمیایی کنترل می‌شود. بنابراین، اثرات سینتک‌های سرعت محدود باید مدل شوند. برجسته‌ترین روش برای وارد کردن شیمی سرعت محدود بر پایه ملاحظات شعله کوچک آرام^۱ است. در رویکرد شعله کوچک آرام، شعله نفوذی به عنوان یک مجموعه آماری از شعله‌های لایه‌ای نازک که شعله کوچک نام دارند، در نظر گرفته می‌شود. یک توصیف تفصیلی این اصل توسط برای^۲ برای سیستم پیش‌مخلوط و به وسیله پترز^۳ برای سیستم‌های غیر پیش‌مخلوط ارائه شده است. نظر اصلی این مدل‌ها این است که ساختار شعله توربولانس موضعی در فضای جزء مخلوط شبیه به ساختار شعله جریان متقابل^۴ است. شعله جریان متقابل آرام به عنوان یک مدل برای شعله‌های کوچک استفاده می‌شود که به دلیل بسیاری از جنبه‌های مشترکی است که با لایه‌های مخلوط غیرپایدار دارد. شعله‌های کوچک آرام یک بعدی و به طور کلی وابسته به زمان هستند. فرض می‌شود که رهائش گرما به طور موضعی داخل این ساختارهای نازک رخ دهد، که منجر به اصلاحات میدان جریان می‌شود. شعله‌های کوچک همچنین در معرض کرنش توربولانس هستند که ساختار شعله را اصلاح می‌کند و ممکن است در سرعت‌های کرنش بالا منجر به خاموش شدن شود. معمولاً فرض می‌شود که زمان پاسخ شعله‌های کوچک به تغییرات در محیط مخلوط موضعی، بسیار کوچک‌تر از مقیاس زمانی مخلوط است. این فرض منتهی به مدلی به نام مدل شعله‌های کوچک آرام ایستا (SLFM)^۵ می‌شود که به وسیله مجموعه معادلات زیر توصیف می‌شود:

1. Laminar Flamelet
2. Bray
3. Peters
4. Counterflow Flame Structure
5. Stationary Laminar Flamelet Model



$$\rho\chi \frac{d^2 Y_i}{d\xi^2} + 2\omega_i^* = 0 \quad (3-40)$$

انتظار می‌رود که این معادلات در اعداد Damköhler (عدد بی بعدی است که بیانگر ارتباط زمانبندی واکنش شیمیایی به پدیده‌های دیگر در یک سیستم شیمیایی است) بالا برقرار باشند. اگرچه روش شعله کوچک یک روش هوشمندانه برای وارد کردن احتراق توربولانس در مدل‌های آتش است، اعتبار آن باید دقیقاً کنترل شود. به بیان دقیقتر، رویکرد شعله کوچک در صورتی که ناحیه واکنش نازک‌تر از مقیاس طولی کولموگرو^۱ باشد، معتبر است. این معیار در بسیاری از شعله‌ها نقض می‌شود و اعتبار آن در آتش‌سوزی‌ها به طور قطعی زیر سؤال است. به نظر می‌رسد که روش‌های شعله کوچک از نظر کاربردی، به میدان نزدیک شعله‌های جت محدود می‌شوند. تحقیقات برای اعتباردهی بیشتر برای روشن کردن این موضوع ضروری است.

۳-۲-۵ شیمی جزئیات

تلاش‌ها برای مدل کردن شیمی جزئیات در آتش‌سوزی‌ها به دلیل مشکلاتی در فرموله کردن مدل‌های احتراق توربولانس و معلومات ناکافی در مورد سینتیک‌های شیمیایی، هنوز بسیار محدود هستند. عموماً تولید بسیاری از گونه‌های مهم (مثل NO) ممکن است به طور سینتیکی کنترل شود [49]، بنابراین فرضیه شیمی سریع برای آنها معتبر نیست. در احتراق هیدروکربنی؛ فرض تعادل کامل شیمیایی نیز نتایج قابل‌قبولی ارائه نمی‌کند چون سطح CO به میزان زیادی در مخلوط‌های غنی بیش از حد پیش‌بینی می‌شود. رابطه‌های تجربی بین سطوح تولید CO و CO_۲ ساده‌ترین روش را برای مهار کردن این مسأله ارائه می‌دهند، به شرط این که واکنش کلی تری با احتراق ناقص به جای احتراق کامل هیدروکربنی نشان داده شده در معادله ۳-۵۳ فرض شود. این شبیه‌سازی‌ها تطابق کلی با اندازه‌گیری‌ها نشان داد.

یک رویکرد پیچیده‌تر، استفاده از مدل‌های شعله کوچک است، که ثابت کرده است در احتراق هیدروکربنی موفق بوده و با تعدادی از مطالعات سازگاری دارد [48]. اساس این مدل‌ها این است که رابطه‌هایی بین غلظت‌های لحظه‌ای گونه‌ها و جزء مخلوط با استفاده از اندازه‌گیری‌ها یا محاسبات عددی شعله‌های آرام خوب کنترل شده تعیین می‌شوند. لیوایس و

1. Kolmogorov



همکاران^۱ پروفیل‌های گویایی برای پیش‌بینی‌های H_2O ، CO و CO_2 با استفاده از تکنیک‌های شعله کوچک گزارش کرده‌اند، ولی مقایسه وسیعی با داده‌های تجربی وجود نداشته است. با وجود این به نظر می‌رسد روش‌های شعله‌های کوچک اشکالات قابل‌توجهی داشته باشند. چنانچه پیشتر ذکر شد، رژیم‌های احتراق شعله کوچک در آتش‌سوزی‌های واقعی رخ نمی‌دهند. بیلگر نشان داد که یک پیش‌بینی خوب غلظت CO به وسیله روش‌های شعله کوچک ممکن است به تعادل شبه پایدار مخلوط‌های غنی ناشی از واکنش‌های با پایان زنجیری بین رادیکال‌ها و سوخت نسبت داده شود. بنابراین حتی اگر رژیم شعله کوچک رخ ندهد، ممکن است پیش‌بینی‌ها معتبر باشند.

۳-۲-۶ رفتار تابشی

تبادل تابشی نقش بسیار مهمی در آتش‌سوزی‌ها بازی می‌کند. در بسیاری از موقعیت‌ها این تبادل یک مد غالب انتقال گرما در مجاورت منبع آتش است. از مدت‌ها قبل تشخیص داده شده است که مد غالب انتقال حرارت در آتش‌سوزی‌های با مقیاس بسیار بزرگ، تابش و در آتش‌سوزی‌های با مقیاس بسیار کوچک، جابجایی است. اندازه‌گیری‌های جامع انتقال حرارت نشان می‌دهد که انتقال حرارت تابشی از شعله‌ها به سطوح سوخت به طور نمونه‌وار می‌تواند بیش از انتقال حرارت جابجایی برای طول‌های مشخصه شعله از حدود $0.2m$ باشد. بنابراین، تابش به طور قابل توجه در چنین پدیده‌هایی مثل آفرورزش و گسترش شعله سهم دارد. همچنین واکنش مستقیمی را در برابر انسان‌ها نشان می‌دهد. بنابراین هر مدل ریاضی واقع‌بینانه‌ای از آتش باید به صورت معتبری، اثرات تابشی را به درستی در نظر بگیرد. دو روش محاسباتی اصلی که برای حل معادله انتقال تابشی به کار برده می‌شوند روش‌های شار و انتقال گسسته هستند.

۳-۲-۶-۱ حل معادله انتقال تابشی - روش شار

در صورتی که برخی فرضیات ساده‌سازی برای تغییر زاویه‌ای شدت تابش انجام شود، ساده‌سازی‌های اساسی در محاسبات تابشی به دست می‌آید. چنین فرضیاتی اجازه می‌دهند که معادله انتقال تابش دیفرانسیلی - انتگرالی دقیق به یک سیستم تقریب معادلات دیفرانسیلی

1. Lewis



جزئی کاهش داده شوند. این رویکرد، که به عنوان روش شار شناخته شده است، در مدل‌سازی CFD رایج است، چون نیاز به همان تکنیک‌های عددی دارد که برای حل معادلات هیدرودینامیک استفاده می‌شوند. در ابتدا مدل "دو شار" توسعه یافته بود که به وسیله پاتانکار و اسپالدینگ^۱ برای در نظر گرفتن ۶ شار در مختصات کارتزین ۳ بعدی بسط یافت. در روش ۶ شار، معادلات برای مقادیر $I+J$ ، $K+L$ و $M+N$ حل می‌شوند که به ترتیب I ، K و M شارهای تابشی به سمت جلو و J ، L و N شارهای تابشی به سمت عقب، به ترتیب در جهات X ، Z هستند.

این روش، اگرچه به میزان گسترده‌ای به کار گرفته می‌شود، محدودیت‌های جدی دارد که عمده آنها ناتوانی برای تغییر انتقال تابش در زوایای اریب به شبکه کارتزین است. یک راه بهبود این روش، به وسیله مارکو و لوکوارد^۲ پیشنهاد شده، که اجازه می‌دهد وابستگی زاویه‌ای شار تابشی به وسیله بسط ناقص تیلور محاسبه و در نظر گرفته شود.

۳-۶-۲ حل معادله انتقال تابشی - روش انتقال گسسته

با روش انتقال گسسته لوکوارد بر بسیاری از مشکلات بالا غلبه می‌شود. این تکنیک اساساً اشعه‌های تابش را از راه دامنه محاسباتی ردیابی می‌کنند و یک معادله تقریبی برای شدت تابش در طول هر اشعه حل می‌شود. یک شبکه محاسباتی تابشی وارد می‌شود (که ممکن است متفاوت از شبکه هیدرودینامیکی باشد) جایی که اشعه‌ها از وجوه حجم‌های کنترل، که متعلق به مرزهای ناحیه محاسباتی است، ساطع می‌شود. تعداد و جهات اشعه‌ها از هر نقطه قیاسی برای فراهم کردن تراز مطلوبی از دقت انتخاب می‌شوند.

روش انتقال گسسته توافق خوبی بین دقت و هزینه محاسباتی فراهم می‌کند. این روش به طور موفقیت‌آمیز برای مسائل مدل‌سازی آتش به کار رفت [59 و 60]. با وجود این، پیش‌بینی‌هایی یافت شد که به جزء حجمی دوده حساس هستند، که بیشتر مسأله محاسبه دقیق خواص تابشی واسطه را برجسته می‌کند.

-
1. Patankar And Spalding
 2. Marco And Lockwood



۳-۲-۶-۳ خواص تابشی واسطه^۱

جذب تابش در مخلوطی از گازها، به ویژه در حضور فرآورده‌های احتراق مثل CO_2 و بخار پیچیده است. دوده، CO_2 و H_2O عامل بیش از ۹۵ درصد جذب و نشر تابش هستند. معمولاً اغلب تابش آتش‌سوزی‌ها ناشی از دوده است که درست در طرف غنی از سوخت منطقه واکنش در شعله‌های دیفیوژن تشکیل می‌شود. برای بسیاری از کاربردهای مهندسی، نتایج معتبر با استفاده از روش‌های ساده شده به دست می‌آیند. معمولاً، در آتش‌سوزی‌ها، هر دوی گاز و ذرات دوده در جذب شرکت دارند، بنابراین ضریب جذب خالص را می‌توان به دو قسمت تقسیم نمود:

$$\alpha = \alpha_g + \alpha_s \quad (۴۱-۳)$$

برآوردهای مستقیمی از خطای ایجاد شده به وسیله چنین فرضیه‌ای در مدل‌سازی آتش‌سوزی‌ها وجود ندارد، ولی واضح است که این خطا از یک موقعیت به موقعیت دیگر تغییر می‌کند. ضریب جذب برای شعله پلی استایرن (PS) تقریباً به طور کامل به دلیل جزء دوده آن است. از طرف دیگر، شعله‌های پلی پروپیلن (PP) و پلی متیل متاکریلات (PMMA) به طور قابل توجه شامل دوده کمتری هستند و بنابراین کمتر خاکستری هستند. معمولاً، رقت گازهای شعله با هوای محیط، عدم خاکستری بودن آنها را افزایش می‌دهد.

۳-۲-۷ تشکیل دوده

مدل‌سازی تولید دوده از اهمیت قابل توجهی در شبیه‌سازی‌های آتش برخوردار است چون مستقیماً روی تبادل تابش همراه با فرایندهای جذب و پراکندگی اثر می‌گذارد. ذرات دوده تولید شده در یک شعله باعث نشر تابش قابل توجهی به سوخت سوخته نشده در یک فضای بسته می‌شوند که ممکن است منجر به افروزش شود. بنابراین، در بسیاری از موقعیت‌ها، تشکیل دوده شدت گسترش آتش‌سوزی را کنترل خواهد کرد. مکانیسم‌های تشکیل دوده بسیار پیچیده‌اند و هنوز موارد زیادی برای درک آنها وجود دارد.

معمولاً، تشکیل دوده همراه با ظهور پیش ماده رخ می‌دهد که به وسیله حلقه‌ای شدن (یعنی تولید حلقه‌های آروماتیک در سوخت‌هایی که خود آروماتیک نیستند) توسعه می‌یابد. سپس ساختارهای حلقه‌ای با افزایش متوالی گروه‌های آلکیل به آروماتیک‌های چند هسته‌ای

1. Medium

رشد می‌کند. بیشتر از یک اندازه معین، این ساختارهای آروماتیک بزرگ وقتی از یک حد مشخصی بزرگتر شوند، به صورت هسته‌های فاز چگالیده عمل می‌کنند. پس از آن، رشد ذرات دود به وسیله واکنش سطح و فرآیندهای لخته شدن و کلوخه شدن ادامه می‌یابد. در ساده‌ترین رویکرد، یک ضریب ثابت تبدیل دوده برای یک سوخت خاص، فرض می‌شود و جزء حجمی دوده با مقدار موضعی جزء مخلوط مرتبط می‌شود. این رویکرد، نمایانگر بسط روابط حالت گونه‌های گازی در شعله‌های آرام و آشفته به غلظت ذرات ریز دوده می‌باشد. این رفتار در بسیاری از مدل‌ها استفاده شده است. مدل‌های مختلف هنوز در مرحله توسعه و اعتباردهی هستند. آنها هنوز به طور گسترده در شبیه‌سازی‌های عملی آتش به کار نرفته‌اند، ولی احتمالاً انتظار می‌رود که جایگزین رفتار ساده شده تبدیل دوده در آینده‌ای نزدیک شود.

۳-۳ مدل‌سازی اطفاء

این بخش به مدل‌سازی CFD اطفاء حریق اختصاص داده شده است. فرونشانی آتش به وسیله شبکه‌های بارنده آب که گسترده‌ترین سیستم کنترل آتش برای ساختمان‌ها هستند، تنها نوعی از اطفاء است که تلاش‌های زیادی برای مدل کردن آن به صورت ریاضی انجام شده است. چنین مدل‌سازی اساساً نیاز دارد تا یک وسیله افشانه‌ای گاز - آب به عنوان یک سیسم دو فازی در نظر گرفته شود. به طور کلی، دو روش قابل کاربرد است: فاز مایع ممکن است با رویکردهای اویلرین یا لاگرانژین در نظر گرفته شود. با چارچوب اویلرین به کار رفته برای فاز گاز به طور متناظر، مدل‌های دو فازی به مدل‌های لاگرانژی - اویلری و اویلری - اویلری تقسیم بندی می‌شوند.

۳-۳-۱ بازبینی مختصر داده‌های آزمایشگاهی

شبکه‌های بارنده مدت زیادی است که به عنوان سیستم‌های محافظت در برابر آتش استفاده می‌شوند و این تکنولوژی نشان داده است که قابلیت این را دارد تا کاهش قابل توجهی در تعداد مرگ و میرها در آتش‌سوزی‌های فضای بسته ایجاد کند. یک نقطه شروع اساسی برای کاربرد موفق مدل‌های CFD؛ شناخت از مشخصات



افشانه‌های شبکه بارنده در خروج از نازل است. از نقطه نظر متوقف‌سازی حریق، یک اندازه‌گیری مهم کارایی افشانه، قابلیت آن برای نفوذ در منطقه آتش‌سوزی است. این قابلیت به وسیله چگالی تخلیه شده واقعی^۱ (ADD) مشخص شده است، که چگالی جریان آبی است که به طور واقعی به داخل ستون آتش نفوذ می‌کند و به سمت منبع آتش می‌رود. این کمیت می‌تواند به طور مستقیم با پیش‌بینی‌های CFD مقایسه شود و اندازه‌گیری‌های وسیع ADD برای اهداف اعتباردهی به وسیله بیل و نام^۲ انجام شده‌اند.

۳-۳-۲ مدل‌های لاگرانژی - اویلری

مدل‌های لاگرانژی - اویلری برای جریان دو فاز همواره یک موضوع تحقیقاتی مهمی بوده است. معادله حرکت قطره کروی ساده در یک میدان جریان توربولانس، مبنای مدل‌سازی لاگرانژی برای افشانک را تشکیل می‌دهد. در یک حالت کلی این معادله ممکن است به شکل زیر باشد:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} &= \frac{\pi}{8} d_p^2 \rho C_D |\vec{U} - \vec{U}_p| (\vec{U} - \vec{U}_p) \\ &+ \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{d\vec{U}}{dt} + \frac{\pi}{12} d_p^2 \rho C_I \frac{d}{dt} (\vec{U} - \vec{U}_p) \\ &+ \frac{3}{2} d_p^2 (\pi \rho \mu)^{1/2} C_B \int_0^t \frac{(d/d\xi)(\vec{U} - \vec{U}_p)}{(t - \xi)^{1/2}} d\xi + \vec{F}_e \end{aligned} \quad (۴۲-۳)$$

ترم‌های سمت راست به ترتیب عبارتند از:

- دراگ
- نیرو ناشی از گرادیان فشار استاتیکی
- نیرو روی کره ناشی از اینرسی سیال مجاور که به دلیل حرکت آن در حال جابجا شدن است (ترم جرم - واقعی).
- نیروی باست^۳ برای محاسبه اثرات انحراف از جریان از الگو جریان پایدار اطراف کره، و

1. Actual Delivered Density

2. Bill And Nam

3. Basset



• نیروی خارجی، مانند، ثقل

خیلی از جزئیات نسبتاً مهم ترم‌های مختلف به وسیله فث^۱ تهیه شده. در اینجا اثر نیروهای بالا برنده حذف می‌شود (این نیروها وقتی ظاهر می‌شوند که گرادیان‌های قابل توجه سرعت عمود بر برخط سیر ذره وجود دارد).

پدیده دیگری که می‌تواند روی حرکت قطره اثر بگذارد، اثر مگنس^۲ است که وقتی ظاهر می‌شود که ذره در حال چرخش است.

ترم گرادیان فشار ممکن است ناچیز باشد. زیرا عموماً مقدار آن در فرایند افشانه کوچک می‌باشد.

شوئن^۳ و همکاران [61 و 62] اثر جرم واقعی، نیروهای باست و نیروهای مگنس ناچیز را برای شبیه‌سازی افشانه‌های رقیق با $p_p/p_g > 200$ در نظر گرفتند. بنابراین، معادله ساده شده حرکت قطره می‌تواند با دقت قابل قبولی برای افشانه‌های رقیق شبکه بارنده تحت فشار نرمال به صورت زیر به کار برده شود.

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = \left(\frac{3\rho C_D}{4d_p \rho_p} \right) (\vec{U} - \vec{U}_p) |\vec{U} - \vec{U}_p| + \vec{g} \quad (3-43)$$

۳-۲-۱- پیش‌بینی‌های متوقف‌سازی آتش با مدل‌های لاگرانژی- اویلری

برهم‌کنش شبکه بارنده با آتش یک پدیده پیچیده است. مکانیزم‌های متوقف‌سازی شامل خنک کردن سوختن سوخت جامد، به علاوه خنک کردن و رقیق‌سازی محدوده شعله و جریان ستونی آتش است. این برهم‌کنش‌ها باید با دقت پیش‌بینی شوند.

کارهای اولیه آلپرت^۴ [63 و 64] بر مبنای مشخصات اصلی برهم‌کنش جریان ستونی آتش افشانه در یک فرم مختصر بود. شار آبی که به داخل جریان ستونی نفوذ می‌کند و همچنین اثر خنک‌کنندگی افشانه محاسبه شد. معلوم شد که نتایج با نسبت جزء عمودی اولیه افشانه پرتاب

-
1. Faeth
 2. Magnus
 3. Shuen
 4. Alpert



شده به حداکثر حد پرتاب جریان ستونی آتش ارتباط خوبی داشت. مشابه پارامترهای انتگرالی افشانه (مانند دراگ به نسبت شناوری جریان ستونی و میزان کل افت حرارت) به وسیله چو و فانگ^۱ استفاده شده است.

چنانچه پیش‌تر بحث شد، یکی از پارامترهای اصلی که نیاز به پیش‌بینی دقیق در یک وضعیت خاص دارد، چگالی تخلیه شده واقعی (ADD) است.

مطالعه مفصلی در مورد اعتباردهی مدل‌های شبکه بارنده برحسب پیش‌بینی ADD تهیه شده است [65-68]. دانسیته‌های توزیع شده واقعی برای دو شبکه بارنده متوقف کننده اولیه با پاسخ سریع (ESFR) در چهار شدت جریان مختلف آب و شدت‌های مختلف سوختن آتش پیش‌بینی شدند. تطابق قابل قبولی بین پیش‌بینی‌ها و اندازه‌گیری‌ها وجود داشت. همانطور که انتظار می‌رفت، پیش‌بینی‌ها در مناطق بزرگتر خیلی دقیق‌تر از پیش‌بینی‌های در مناطق کوچکتر بود. این آزمون‌های محاسباتی به صورت شفاف نشان می‌دهند که ADD می‌تواند با دقت کافی در وضعیت‌های آتش‌سوزی واقعی پیش‌بینی شود.

۳-۳-۳ مدل‌های اوپلری - اوپلری

یک تکنیک جایگزین برای جریان دو فاز فرمولاسیون اوپلری - اوپلری در جایی است، که هر دو فاز به طور پیوسته در هم نفوذ کرده‌اند. آنها همراه ترم‌های بین فاز که فرایندهای انتقال جرم؛ اندازه حرکت و گرما را شرح می‌دهند، کوپل شده‌اند. این رویکرد خیلی کمتر از فرمولاسیون اوپلری - لاگرانژی در مطالعات آتش استفاده شده است. جزئیات عمومی فرمولاسیون اوپلری - اوپلری را می‌توان در مراجع [66] یافت. کاربردهای خاص این رویکرد برای مدل‌سازی برهم‌کنش شبکه بارنده / آتش در تعدادی از مطالعات ارائه شده است. به طور کلی یک مجموعه معادلات برای مجهولات زیر باید حل شوند:

- مولفه‌های سرعت فاز ویژه و فاز گازی
- فشار
- آنتالپی‌های فازهای گازی و ویژه
- غلظت بخار آب داخل فاز گاز



- جزءهای حجمی مایع و گاز
- جزء حجمی «پنهان»، یعنی، جزء حجمی که به وسیله قطرات در غیاب تبخیر اشغال شده است.
- پارامترهای مدل توربولانس (برای مثال، انرژی جنبشی توربولانس و شدت اضمحلال آن برای مدل $k-\epsilon$)

۳-۴ مدل سازی آتش پیشرفته

در این بخش، کاربرد تکنیک شبیه‌سازی ادی - بزرگ (LES) برای مدل‌سازی آتش بیان شده است. مدلهایی از این نوع هنوز مفهوم نسبتاً جدیدی در کاربردهای مهندسی دینامیک سیالات ارائه می‌کنند. این موضوع قطعاً برای مدل‌سازی آتش درست است. با اینکه تلاش‌های مختلفی برای معرفی کردن این مدل‌ها در داخل مدل‌سازی آتش، در طول ۲۰ سال گذشته انجام شده است، هنوز نیاز به تحقیقات اساسی و اعتباردهی این رویکرد وجود دارد. با وجود این، مطالعات اخیر نتایج بسیار دلگرم‌کننده‌ای را نشان داده‌اند و احتمالاً این تکنیک کانون توسعه مدل‌های آتش در دهه آینده است.

در ابتدا انگیزه‌ها و اصول کلی روش شناسی LES بحث شده است. سپس تغییرات واقعی مدل‌های در حال استفاده LES بحث شده و کاربرد این رویکرد در مدل‌سازی آتش با چند مثال نشان داده شده است.

۳-۴-۱ رویکردهای اصلی برای مدل‌سازی توربولانس

از بحث‌های قبل در مورد معایب کلی مدل‌سازی قراردادی RANS روشن شد که روش‌های دقیق‌تری برای شبیه‌سازی جریان توربولانس مناسب هستند.

چهار رویکرد اصلی برای مسائل موجود در حال حاضر در مدل‌سازی عددی توربولانس وجود دارد. که عبارتند از: (۱) مدل‌های RANS، (۲) مدل‌های تنش رینولدز، (۳) مدل‌های LES و (۴) مدل‌های شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS).

مدل‌سازی RANS در بخش ۳-۲ آدرس‌دهی شده است. مدل‌های رینولدز-تنش جایگزین رابطه بین تنش رینولدز و تانسورهای کرنش - شدت شده و به وسیله مدل $k-\epsilon$ با معادلات دینامیکی برای تانسور تنش رینولدز به کار برده می‌شود. این معادلات از معادلات ناویر استوکس استنتاج شده و کاملاً پیچیده هستند. در حالت کلی این مدل‌ها باید ارائه درست‌تری از جریان توربولانس نسبت به مدل‌های دو معادله‌ای فراهم کنند. به هر صورت، موفقیت‌های



این مدل‌ها تاکنون محدود شده است و به هیچ روش قابل ملاحظه‌ای در مدل‌سازی آتش مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.

DNS یک رویکرد واقعی برای مدل‌سازی توربولانس است که حل مستقیم معادلات ناویر استوکس را بدون متوسط‌گیری یا تقریب‌هایی غیر از گسسته‌سازی عددی لازم فرض می‌کند. این روش به جز برای جریان‌های خیلی ساده و اعداد رینولدز کم [51] دارای محاسبات گرانی برای کاربرد در مسائل واقعی است. در حال حاضر، این روش ممکن است برای شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان‌های همگنی برای اعداد رینولدز توربولانس حداکثر تا ۲۰۰ به کار برده شود.

LES, سطح دقتی در پیش‌بینی‌های میدان جریان که به مدل‌های DNS نزدیک است، فراهم می‌کند. این مدل حرکات مقیاس بزرگ جریان را حل می‌کند، حال آن‌که مدل‌سازی برای مقیاس‌های کوچک مورد نیاز است. مدل‌هایی از این نوع در سالهای اخیر پیشرفت کرده‌اند. با وجود نیاز بیشتر برای توسعه، مدل‌های LES از جذابیت ویژه‌ای در مدل‌سازی آتش برخوردارند. در بخش‌های بعدی خلاصه‌ای از تکنیک LES و مروری از کاربرد آن برای مدل‌سازی آتش تهیه شده است. ساده‌سازی‌ها و تغییرات خاص و مدل‌ها بحث شده است. سرانجام، نکات مختصری در مورد آینده توسعه مدل‌های LES داده شده است.

۳-۴-۲ تکنیک LES و کاربرد آن در مدل‌سازی آتش

یک جریان توربولانس شامل محدوده وسیعی از مقیاس‌های زمان و طول است، آنها قادر به حل اغلب حالات مهم خاص نیستند. روش LES از این حقیقت استفاده می‌کند که ادی‌های مقیاس بزرگ عموماً دارای انرژی بیشتری از ادی‌های کوچک هستند و انتقال بسیار مؤثرتری از خواص پایسته تولید می‌کنند. بنابراین حل حرکت مقیاس بزرگ به صورت دقیق‌تر از حرکت مقیاس کوچک عملی است.

در LES حرکت مقیاس بزرگ کاملاً حل می‌شود و مدل‌سازی تقریبی، تنها برای حرکت مقیاس کوچک مورد نیاز است. ادی‌های کوچک شامل تنها جزء کوچکی از کل انرژی جنبشی توربولانس هستند، پس، جریان‌های محاسبه شده عموماً حساسیت کمتری به تقریب‌های موجود در مدل‌سازی توربولانس مقیاس کوچک دارند. به‌علاوه، ادی‌های کوچک تمایل به فراگیرتر شدن در مشخصه دارند به‌گونه‌ای که، انتظار می‌رود مدل‌سازی آنها قابل اطمینان‌تر باشد.



اساساً LES مدلی سه بعدی است و جریان ناپایدار را محاسبه می‌کند. معمولاً مشخصات جریان که متوسط‌گیری زمانی شده‌اند در یک مرحله پس از پردازش برای اهداف تحلیلی استخراج می‌شوند. بهای محاسبات مورد بحث در LES خیلی بیشتر از بهای آن برای مدل‌سازی قراردادی RANS است.

رویکرد LES از کارهای پیشگامانه لیلی و دردرف^۱ شروع شد. پس از آن موفقیت‌های قابل توجهی برای قابل استفاده کردن این تکنیک برای انواع جریان‌های مهندسی و ژئوفیزیکی انجام شده است. این امر برای تعریف کمیت‌هایی که باید به دقت محاسبه شوند ضروری است. بنابراین ابتدا باید معادلات حاکمه رفتار مقیاس بزرگ متغیرهای جریان استخراج شود. این کار به وسیله فیلتر کردن مقیاس‌های کوچک از جریان، انجام می‌شود. فیلتر همگن به وسیله انتگرال پیچیده زیر تعریف شده است:

$$\bar{\phi}(x, t) \equiv \int_{\Lambda} G(|\bar{X} - \bar{X}'|; \Delta) \phi(\bar{X}', t) d\bar{X}' \quad (3-44)$$

جایی که هسته فیلتره، G ، تابع موضعی است شکل‌های مختلفی از فیلتر ممکن است بکار برده شود، از قبیل، گوسین، جعبه فیلتر (که یک متوسط موضعی تولید می‌کند) یا یک میانبر، که تمام ضرایب فوریه متعلق به اعداد موج بالای میانبر را حذف می‌کند. در هر حالت بعضی از مقیاس‌های طولی Δ با هر فیلتر همراه می‌شود به گونه‌ای که ادی‌هایی با اندازه بالای Δ حل می‌شوند و ادی‌های با اندازه زیر Δ نیاز دارند که مدل‌سازی شوند. الزام آشکار این است که باید اندازه سلول شبکه، h ، شرط $h < \Delta$ را برآورده کند.

حرکت ادی‌های بزرگ از اهمیت ویژه‌ای در مدل‌سازی آتش برخوردار است. جریان در ناحیه جریان ستونی، ظاهراً همراه با ساختارهای مقیاس بزرگ است و این ساختارها ممکن است انتظار رود که بیشترین سهم را در انتقال گرما، تابش، گونه‌های شیمیایی و دوده داشته باشند. برای یک محدوده بزرگ، تولید و انتقال دوده، رشد آتش‌سوزی را کنترل می‌کند، بنابراین باید انتظار داشت که LES پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از گسترش آتش فراهم کند. روش LES یک تکنیک نسبتاً جدید است و کاربرد آن به مطالعات آتش‌سوزی محدود شده است. به هر صورت، LES نتایج امید بخشی را تولید کرده است.

1. Lilly And Deardorff



مطالعات انجام شده تاکنون فرضیات بیشتر ساده‌شده‌ای را به منظور پیش‌بینی جریان‌های تولید شده به وسیله آتش در مقیاس بزرگ به کار برده‌اند. تا این اواخر، اغلب شبیه‌سازی‌ها دو بعدی بودند. چون توربولانس اساساً پدیده‌ای سه بعدی است، این امر به میزان زیادی درستی آنها را کاهش داد ولی معمول‌ترین جنبه‌های جریان را دو باره تولید کرد. کار برگمن و برندیژ^۱ به نظر می‌رسد که تنها مطالعه‌ای باشد که در آن مدل اسماکورینسکی استفاده شد. شبیه‌سازی‌های دو بعدی توسعه آتش در یک تونل با استفاده از سینتیک آرنیوس، برای احتراق توصیف مخلوط هگزان/ هوا، انجام شد. سناریوهای مختلف آغاز آتش در نظر گرفته شدند و معلوم شد که این مدل برای بررسی کیفی مراحل اولیه توسعه آتش مناسب است.

نتایج گزارش شده اخیر که از مدل سه بعدی گاز انبساط‌پذیر حرارتی به دست آمده جالب‌ترین نتایج است. محدودیت‌های تقریب بوزینسکی و سیال لزج، حذف شده و مدل تغییرات زیاد هر دو پارامتر چگالی و دما را اجازه می‌دهد. معادلات حاکم به این شکل نوشته شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla p \vec{U} &= 0 \\ p \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\vec{U}|^2 - \vec{U} \times \vec{\omega} \right) + \nabla p - p \vec{g} &= \nabla \tau \\ p C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla T \right) - \frac{dp_0}{dt} &= \dot{q} + \nabla (k \nabla T) \\ M_0(t) &= \rho R T \end{aligned} \quad (۴۵-۳)$$

که در اینجا \dot{q} نقش منبع حرارتی حجمی تجویزی را بازی می‌کند. رهایش گرما به وسیله تعداد زیادی از «عناصر حرارتی» لاگرانژی، رها شده به داخل جریان شبیه‌سازی شده است. از اینرو، رهایش گرما به صورت قیاسی نسبت به مقدار پیش‌بینی شده تجویز شده است. حرکت مقیاس زیرشبکه به وسیله یک ویسکوزیته ادی ثابت ایده‌آل شده است.

1. Bergmann And Brandies



مقایسه‌های پیشنهاد می‌دهند که مزیت واقعی حاصل از کاربرد مدل‌های LES به خیلی از مسائل خاص دم دستی وابسته هستند.

با وجود تطابق ظاهراً خیلی خوب با آزمایشها، بعضی احتیاطها باید درباره رویکرد بالا انجام شود. در مرحله اول، معادلات استفاده شده در حالت ظاهری LES فیلتر نمی‌شوند. بنابراین، عملگرهای گسسته، همراه با تقریب مشتق‌های معین به عنوان فیلترها استفاده می‌شوند.

کاربرد مستقیم چنین عملگرهایی در مورد ترم‌های معادلات ناویر استوکس عموماً یک متغیر متوسط‌گیری شده متفاوت وابسته به مشتق و عملگر مجزا برای هر ترم معرفی می‌کند. این رویکرد مستقیم، محدود به جریان‌های کاملاً حل شده‌ای است که متوسط‌ها سبب هیچ‌گونه از دست رفتن اطلاعات نمی‌شوند و کل چنین متوسط‌هایی مقدار یکسانی می‌دهند.

علاوه بر این، عدم وابستگی شبکه، (که یک خاصیت ذاتی حل عددی است) نمی‌تواند حاصل شود، مگر اینکه جریان به طور کامل حل شود. در مقابل، در حالت ظاهری درست LES با عرض فیلتری که به اندازه کافی بزرگتر از کوچکترین مقیاس حل شده به وسیله شبکه است، راه حل مستقل از پارامترهای عددی است و تنها به فیلتر و مدل SGS وابسته است. همچنین باید توجه شود که طبیعت فیلتر LES تاثیر نیرومندی روی برهم‌کنش‌های بین مقیاس‌های زیر شبکه و حل شده دارد [67].

نظریه بعدی مربوط به استفاده از مدل‌سازی SGS است. قدرت تفکیک مقیاس‌های طول، که دو مرتبه کمتر از طول اندازه متوسط سلول فضای بسته است، تقریباً از مرتبه حداکثر ۲۵ سانتی‌متری در بعضی مسائل عملی می‌باشد.

بدیهی است این اندازه سلول هنوز برای حل کردن مقیاس‌های مهم برای جریان سیال و روش احتراق خیلی درشت است. موارد آخر نیز به وسیله فرآیندهایی که در مقیاس‌های ریز رخ می‌دهد، (مثل اضمحلال اسکالر در مورد شعله‌های دیفیوژن) تعیین می‌شود. تاکید می‌شود، قطع مقیاس‌های زیر شبکه، باید در مقیاس‌هایی از مرتبه حدود 10η زیر گستره اینرسی انجام شود. در بعضی کاربردهای اخیر LES اظهار می‌دارند که شاید نتایج قابل‌قبولی با استفاده از قطع منطقه حداکثر تا حدود 100η به دست آید. این مطلب هنوز برای اغلب کاربردهای آتش قابل دست‌یابی نمی‌باشد. بنابراین به یک مدل‌سازی در مقیاس زیر شبکه پیچیده نیاز است و احتمالاً ویسکوزیته ثابت ادی، بیانگر رفتار زیر شبکه به اندازه کافی نیست. ممکن است انتظار داشت که این موقعیت در آتش‌سوزی‌ها مشابه با دیگر کاربردهای مهندسی LES باشد، مانند جریان‌های واکنش در کوره‌ها و موتورهای احتراق داخلی. تعدادی از مدل‌های SGS به طور موفقیت‌آمیزی برای این شرایط بکار برده می‌شوند (به خصوص مدل‌های اسم‌گرانسکی



دینامیکی) همچنین ممکن است انتظار داشت این مدل‌ها در کاربردهای مدل‌سازی آتش معتبر باشند.

ملاحظات بالا پیشنهاد می‌دهد که کاربرد تکنیک LES در مدل‌سازی آتش باید به سمت روش‌های رسمی LES با لحاظ مدل‌های SGS مقتضی استنتاج شود.

۳-۴-۳ توسعه‌های آتی در مدل‌سازی آتش LES

همان‌طور که مدل‌های میدانی قراردادی در عملکرد ایمنی در برابر آتش راه پیدا می‌کنند، ممکن است انتظار رود تمرکز پژوهش در مدل‌سازی تئوریک آتش که به تدریج از مدل‌های RANS به LES تغییر کند. شبیه‌سازی‌های LES به طور رو به افزایشی به عنوان قابلیت‌های محاسباتی که به سرعت به بهبود ادامه می‌دهند، قابل تهیه هستند. همچنین نیازی به القای ساده‌سازی‌ها در معادلات حاکم بر LES غیر از تقریب به طور ضعیف تراکم‌پذیر نیست.

البته این مدل‌ها هنوز نیاز به کار قابل توجهی دارند تا یک ابزار پیش‌بینی پذیرفته شده به طور وسیع شوند. در مرحله نخست نیازی برای تأیید اثرات انواع گوناگون مدل‌های SGS وجود دارد. مدل SGS اسماگورینسکی اخیراً وارد کد LES شده است. کاربرد مدل‌های دینامیک اسماگورینسکی ممکن است گام منطقی بعدی باشد.

مدل‌سازی احتراق توربولانس برای محاسبات RANS و LES، حیاتی است. کوشش‌های عمده برای شرکت دادن مدل‌های احتراق در LES در مراجع گزارش شده‌اند. این کوشش یا با رویکرد شیمی سریع یا با مدل‌سازی Flamelet لایه‌ای همراه است. به هر صورت، کاستی‌های رویکرد Flamelet هنوز در این جا وجود دارند.

همچنین LES به نظر می‌رسد که برای کاربردهای ایمنی در برابر آتش دو فازی مثل مطالعات خاموش‌کنندگی بسیار معتبر باشد. به هر صورت، برای این کاربردها یک مدل‌سازی مقتضی اثرات زیر شبکه روی حرکت ذره و تبخیر مورد نیاز می‌باشد.

با وجود این ممکن است انتظار نرود که LES برای هر گونه مسأله مدل‌سازی آتش لازم شود. بسیاری از مسائل مهم از نظر عملی را می‌توان هنوز با درستی لازم به وسیله روش‌های ارزانتر حل کرد. یک مثال خوب ممکن است پیش‌بینی‌های گسترش شعله به سمت بالا به وسیله مدل‌های RANS باشد چنانچه پیشتر بحث شد. از طرف دیگر، در موقعیت‌های پیچیده‌تر، رویکرد LES ضروری خواهد بود. اینها کاربردهایی شامل جریان‌های توربولانس غیرایزوتروپیک به میزان بالا (برای مثال آتش‌های گوشه، گسترش آتش حول لبه‌های تیز،



جریان‌های ستونی آتش و انتقال دود در فضاهای به سختی مسدود شده و غیره) را در بر می‌گیرد.

۳-۵ بررسی برخی مدل‌های کامپیوتری ناحیه‌ای و منطقه‌ای

۳-۵-۱ مدل‌های تک ناحیه‌ای

این مدل‌ها به طور وسیعی در تحلیل آتش‌سوزی‌های پس از گرگرفتگی سراسری و همچنین مطالعه اثر حرکت دود در فضاهای بسته دور از محل حریق استفاده می‌شود. مفهوم مدل‌سازی تک ناحیه‌ای مبتنی بر کارهای کاواگو^۱ است، که یک رویکرد ناحیه‌ای را برای تحلیل آتش‌سوزی پس از گرگرفتگی سراسری توسعه داد. این رویکرد مبنای توسعه مجموعه‌ای از مدل‌های آتش تک ناحیه‌ای پس از گرگرفتگی سراسری بوده است.

در طول دو دهه گذشته، تعدادی از محققان مدل‌هایی را برای آتش پس از گرگرفتگی سراسری توسعه دادند تا قادر به پیش‌بینی حرکت و غلظت دود در ساختمان و اثری باشند که دما روی سازه ساختمان می‌گذارد.

در این قسمت دو مدل NRC و OZone مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۵-۱-۱ مدل NRC

این مدل در انجمن تحقیقات کانادا تهیه شده و جزئی از مدل ارزیابی خطر- خسارت FIRECAM است که برای ارزیابی خطر جانی و خسارت مالی در ساختمان‌های اداری و آپارتمانی است و قادر بوده تا مشخصات گسترش آتش‌سوزی برای سه نوع آتش‌سوزی را پیش‌بینی کند.

الف) آتش‌سوزی‌های با گرگرفتگی سراسری

ب) آتش‌سوزی‌های بدون گرگرفتگی سراسری

ج) آتش‌سوزی‌های نهان سوز

نتایج این مدل با مدل‌های FIRST و FAST که توسط NIST تهیه شده‌اند مقایسه

گردیده و در مراجع [68] ارائه شده است.



۲-۱-۵-۳ مدل OZone

مدل OZone در بخش سازه و مصالح مکانیکی دانشگاه لی‌یژ^۱ تهیه شده است. این مدل نیز یک مدل تک ناحیه‌ای است و برای پیش‌بینی دمای یک فضای بسته و ارزیابی مقاومت در برابر آتش اجزای ساختمانی استفاده می‌شود.

۲-۵-۳ مدل‌های دو ناحیه‌ای

مدل‌های دو ناحیه‌ای برای محاسبه توزیع دود، گازهای آتش‌سوزی و گرما در سراسر ساختمان در طول یک آتش‌سوزی استفاده می‌شود.

در مدل‌های دو ناحیه‌ای، هر فضای بسته به دو لایه تقسیم شده است. اساس این مدل‌ها بر روی اصل بقای جرم و انرژی و همچنین قانون گاز ایده‌آل بوده و مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل عادی (ODE) از آنها مشتق شده است.

قوانین بقای که در هر ناحیه استفاده می‌شود، به طور خلاصه در جدول ۲-۳ آورده شده است. جزئیات فیزیکی گاز داخل یک ناحیه، مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، اگر چه انتقال جرم و انرژی بین مناطق باید به وسیله مدل‌سازی فرآیندهای وابسته به آتش (مانند احتراق، شیمی، جریان سیال و انتقال حرارت) باید محاسبه شود.

معادلات جدول ۲-۳ به شکل تابع زمانی کمیت‌هایی مانند فشار، ارتفاع و دماهای لایه (انباشت جرم و آنتالپی) در هر دو لایه را پیش‌بینی می‌کند. مدل‌های دو ناحیه‌ای برای مدل و تحلیل کردن آتش‌سوزی‌های پیش از گرگرفتگی سراسری استفاده می‌شوند و به گفته کوینتیر^۲ این مدل‌سازی دو ناحیه‌ای آتش برای اولین بار در اواسط دهه ۱۹۷۰ به وسیله فوکس^۳ ایجاد شد. فهرستی از مدل‌های ناحیه‌ای آتش در فضای بسته در مرجع [69] آورده شده است.

1. Liege University

2. Quintiere

3. Fowkes



جدول ۳-۲ معادلات دیفرانسیل بقا برای مدل‌سازی ناحیه‌ای

متغیرها	معادلات دیفرانسیل برای i امین لایه
جرم	$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i$
فشار	$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_U + \dot{h}_L)$
حجم	$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{\gamma p} \left((\gamma - 1) \dot{h}_i - V_i \frac{dP}{dt} \right)$
چگالی	$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{C_p T_i V_i} \left(-(\dot{h}_i - C_p \dot{m}_i T_i) + \frac{V_i}{\gamma - 1} \frac{dP}{dt} \right)$
دما	$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_i V_i} \left((\dot{h}_i - C_p \dot{m}_i T_i) + V_i \frac{dP}{dt} \right)$
انرژی داخلی	$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left(\dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dt} \right)$

در این بخش، به مرور انواع مدل‌های دو ناحیه‌ای می‌پردازیم که برای حرکت دود و گسترش آتش سوزی استفاده می‌شوند. انتخاب این مدل‌ها بر اساس قابلیت دسترسی به مراجعی است که اعتبار مدل‌ها را در برابر داده‌های آزمایشگاهی تأیید کرده‌اند. در این قسمت مدل‌ها به دو گروه تقسیم بندی می‌شوند.

- ۱- مدل‌هایی که برای یک فضای بسته استفاده می‌شوند.
- ۲- مدل‌هایی که برای چند فضای بسته استفاده می‌شوند.

۳-۵-۲-۱ مدل‌های تک فضایی^۱

FIRST ۱-۱-۲-۵-۳

FIRST مخفف تکنیک شبیه سازی آتش^۲ می‌باشد و در انستیتو ملی استانداردها و تکنولوژی (NIST)^۳ تهیه شده است. این مدل یک نسخه تقویت شده و اصلاح شده مدل Harvard

1. Single Compartment
2. Fire Simulation Technique
3. National Institute Of Standards And Technology



Mark 5 است. FIRST یک راه حل قطعی وابسته به زمان فرآیندهای ساده شده انتقال جرم و انرژی است، که گسترش آتش‌سوزی در یک فضای بسته را توصیف می‌کند. این مدل محیط آتش داخل یک فضای بسته را شبیه‌سازی می‌کند.

این مدل قادر به پیش‌بینی دمای لایه‌های فوقانی و زیرین، شدت اختلاط بین آنها، شدت جریان آنتالپی و جرم در هر دریچه و از جریان ستونی به سمت لایه فوقانی، دمای دیوارها و نقاط هدف، زمان افروزش نقاط هدف (در صورت وقوع)، غلظت گونه‌های مختلف و شارهای مختلف انرژی جابجایی و تابشی بین حجم‌های گاز و سطوح مربوط به فضاهای بسته است. این مدل مقدار غلظت CO را بسیار کمتر از آنچه از آزمون‌های ابعاد کامل به دست می‌آید، پیش‌بینی می‌کند.

بعضی از ایرادهای مدل FIRST عبارت است از:

- ۱- شدت تولید CO ضعیف محاسبه می‌شود
- ۲- مدل فرض می‌کند که آتش‌سوزی قادر به استفاده از اکسیژن موجود در لایه فوقانی ناست.
- ۳- مدل در بعضی اوقات، هنگامی که ابعاد فضا از ۱ متر کوچکتر و یا از ۲۵۰ متر بزرگتر باشد، با مشکلات عددی مواجه خواهد شد.
- ۴- مدل فرض می‌کند که ضخامت و مصالح، سقف، کف و دیوارها یکسان هستند.

۳-۵-۲-۱-۲ ASET

مدل ASET، مخفف زمان قابل‌دسترس برای خروج ایمن^۱ است. این مدل ضخامت لایه دود، دما و غلظت گونه‌های ناشی از آتش‌سوزی در فضای بسته را شبیه‌سازی می‌کند. ASET قابلیت مدل‌سازی دو گونه از محصولات مختلف احتراق و شبیه‌سازی غلظت‌های مربوط به آنها در لایه‌های فوقانی را دارد.

اولی محصول احتراقی است که غلظت لایه فوقانی آن مبنای یک معیار کشف حریق است و دومی محصول احتراقی است که غلظت آن مبنای معیار خطر جانی است. در هر گام زمانی شبیه‌سازی، شرایط مستولی بر فضا با معیارهای کشف حریق و خطر به کار برده شده چک می‌شوند.

1. Available Safe Egress Time



خروجی‌های ASET عبارتند از: ضخامت لایه دود، دمای لایه، غلظت گونه‌های لایه داغ به عنوان تابعی از زمان و همچنین زمان در دسترس برای فرار. یک مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی یک آزمون آتش چند اتاقه و پیش‌بینی‌های مدل تک اتاقه به ما نشان می‌دهد که مدل پتانسیل این را دارد که در عمل برای شبیه‌سازی محیط‌های آتش دارای چند اتاق استفاده شود. بعضی ایرادهای مهم مدل ASET عبارتند از:

- ۱- ممکن است مدل برای فضای بسته با نسبت طول به عرض بزرگتر از ۱۰ به ۱ بکار برده می‌شود، یا وقتی که نسبت ارتفاع به حداقل بعد افقی متجاوز یک است، قابل اعتماد نباشد.
- ۲- به محض اینکه دمای لایه فوقانی از سطح تقریبی دمای ۳۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز کند، مدل قابل اعتماد نخواهد بود.

۳-۲-۵-۲ مدل‌های قابل استفاده برای چندین فضا

CFAST/FAST/CCFM.VENTS ۱- ۲-۲-۵-۳

CFAST یک مدل گسترش آتش‌سوزی برای فضاهای چند اتاقه است و تکمیل‌کننده مدل‌های FAST و CCFM می‌باشد. CFAST برای محاسبه توزیع خروجی دود، گازهای آتش و گرما در سراسر تسهیلات ساخته شده در طول یک آتش‌سوزی استفاده می‌شود. CFAST قادر است ۳۰ فضای بسته دارای سیستم فن و کانال برای هر فضا، ۳۱ آتش جداگانه، تا حد گسترش شعله، چندین نوع آتش جریان‌های ستونی، چندین نوع آشکارساز و شبکه بارنده و ده‌گونه مطرح بسیار مهم در سمیت آتش‌های دارای دز خطرناک و موثر را مدل کند.

موقعیت هندسی شامل رابطه ارتفاع به مساحت متغیر، افروزش چندین شی (مبلمان و ...)، دارای پایگاه داده‌های ترموفیزیکی و پیرولیز، دیوارهای چند لایه، افروزش از راه موانع و دریچه‌ها، باد، اثر دودکش، نشست ساختمانی و جریان از طریق سوراخ‌های اتصالات کف / سقف می‌شود.

پیش‌بینی‌های CFAST با چندین آزمون آتش در فضاهای مختلف (از فضاهای کوچک گرفته تا آشیانه‌های بزرگ هواپیما) مقایسه شده است. پیکاک^۱، پیش‌بینی‌های CFAST را با چهار

1. Peacock



آزمون آتش برای یک فضای بسته واحد، چند فضای بسته بر روی یک ساختمان ۷ طبقه انجام داد.

داده‌ها به دست آمده از آزمایش و پیش‌بینی‌های مدل با یکدیگر مقایسه شده و این مقایسه نشان می‌دهد که محدوده اختلاف از اعداد کوچک تا ضرایب ۲ و ۳ است.

۳-۵-۲-۲-۲ مدل FIRM

مدل FIRM اثر آتش کاربر معین را برای یک فضا که دارای یک دریچه در دیوار باشد، پیش‌بینی می‌کند. متغیرهای اصلی محاسبه شده، به عنوان تابعی از زمان عبارتند از: دمای فوقانی، ارتفاع وجه مشترک لایه و جریان از داخل منفذ. این متغیرها مربوط به خطر آتش هستند که به وسیله مدت زمانی که طول می‌کشد تا شرایط فضای بسته غیر قابل دفاع باشد یا به وسیله زمانی که طول می‌کشد تا به گرگرفتگی برسد تعیین می‌شود.

خروجی‌های FIRM عبارتند از: ارتفاع وجه مشترک لایه، دمای لایه فوقانی، شدت رهایش گرما و جریان منفذ. پیش‌بینی‌های FIRM با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است و نتایج این مقایسه در مراجع [70] آورده شده است. یکی از محدودیت‌های FIRM ناشی از این حقیقت است که در این مدل فرض شده است که لایه زیرین در دمای محیط قرار داشته، در حالیکه در واقعیت در دمای بالاتری است، به همین دلیل پیش‌بینی دمای لایه گرم محافظه کارانه است.

۳-۵-۲-۲-۳ مدل حرکت دود - NRC

مدل حرکت دود (SMM)^۱ بخشی از سیستم FIERA (سیستم ارزیابی آتش و تخمین خطر) است که هم اکنون در حال توسعه در NRC (انجمن تحقیقات ملی کانادا) می‌باشد.

مدل حرکت دود برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی و تولید دود و حرکت دود در یک ساختمان با چند فضای بسته استفاده می‌شود تا خطر آتش در ساختمان را ارزیابی کند. پیش‌بینی مدل حرکت دود برای یک و دو اتاق آتش با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است که می‌توان نتایج این مقایسه را در مرجع [71] یافت.



این نتایج نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده مطلوب بوده، مخصوصاً برای دمای لایه فوقانی گاز، ارتفاع سطح مسترک و شدت جریان دریچه. برای تعداد زیادی از فضاهای بسته، مقادیر ضریب نفوذ که به صورت تجربی تعیین شده است، ممکن است بعضی اثرات روی جریان ستونی آتش یا روی جریان گازهای داغ از اتاق منبع آتش به اتاق‌های مجاور را القا نماید. اگر گازهای داغ وارد یک اتاق بزرگ از یک انتها شوند، مدل حرکت دود و زمان گذر، تا پر شدن ناحیه را در نظر نمی‌گیرد. اما در حالت‌های واقعی، یک زمان تأخیری به علت عبور گازها به سوی اتاق بزرگ وجود خواهد داشت.

BRANZFIRE ۴-۲-۲-۵-۳

مدل BRANZFIRE، محیط آتش در یک فضای بسته را ناشی از آتش گوشه اتاق، شامل پوشش‌های سقف و دیوار قابل سوختن پیش‌بینی می‌کند. BRANZFIRE یک مدل ناحیه‌ای است که شامل گزینه‌های گسترش شعله روی دیوارها و سقف‌ها است و برای محاسبه توزیع وابسته به زمان دود، گازهای آتش و گرمای سراسری یک مجموعه از فضاهای بسته به هم پیوسته در طول یک آتش‌سوزی استفاده می‌شود. مدل ارزیابی گونه‌هایی مانند CO را در بر می‌گیرد که برای ایمنی اجزای جداکننده در معرض محیط آتش مهم هستند. پیش‌بینی‌های BRANZFIRE با آزمون آتش مقیاس بزرگ گوشه اتاق مقایسه شده و نتایج توافق قابل قبولی را نشان داد.

ARGO ۵-۲-۲-۵-۳

ARGO یک مدل دو ناحیه‌ای است که می‌تواند برای شبیه‌سازی توسعه آتش و انتقال دود در یک فضای بسته و برای ارزیابی خطر آتش استفاده شود. ARGO قادر است تا پنج فضای بسته را مدل کند. خروجی‌های ARGO عبارتند از: شدت رهایش گرما آتش، چگالی دود در اتاق‌ها و در لایه‌های دود، ضخامت و دمای لایه دود، تابش حرارتی از لایه‌های دود، اتلاف حرارت از طریق سطوح، پروفیل دمای سقف، افزایش دمای متوسط و فشار کف.



کوپر و همکارانش^۱ با انجام یک مجموعه آزمون بر روی دو اتاق به بررسی اعتبار مدل ARGO پرداختند. همچنین ملند^۲ و لونی‌ویک^۳ یک مجموعه آزمون برای سه اتاق که دارای انواع آشکارساز آتش بودند، انجام دادند. تمام این مقایسه‌ها نشان دهند تطابق خوب بین اندازه‌گیری‌ها و موارد شبیه‌سازی شده (مانند دماها، غلظت‌های اکسیژن و زمان ردیابی حرارت و دود) است.

۳-۵-۳ مدل‌های میدانی

FDS ۱-۳-۵-۳

شبیه‌ساز دینامیکی آتش (FDS) یک مدل آتش است که از تکنیک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) استفاده می‌کند [72]. شبیه‌ساز FDS به صورت عددی شکلی از معادلات ناویر استوکس را که برای جریان سرعت پایین و مشتق حرارتی مناسب است، با تاکید بر روی انتقال گرما و دود از آتش حل می‌کند. مدل FDS، چگالی، سرعت، دما، فشار و غلظت گونه‌های گازی را در هر سلول بر مبنای قوانین بقای جرم، ممنتوم و انرژی برای مدل‌سازی مبلمان، دیواره، کف‌ها و سقف‌ها در شبیه‌ساز گسترش آتش استفاده می‌کند. مشاهده دود یک برنامه تصویرسازی است که برای نمایش نتایج شبیه‌سازهای مدل FDS ایجاد شده است.

FDS به عنوان داده‌های ورودی نیازمند موارد زیر است: هندسه فضاهای ساختمان که قادر است مدل شود، اندازه سلول محاسباتی، محل منبع آفرزش، خواص حرارتی دیوارها و اثاثیه، مبلمان و اندازه محل آنها، محل و زمان‌بندی بازشوهای تهویه به بیرون که به طور بحرانی روی رشد و گسترش آتش اثر دارد.

خروجی‌های FDS عبارتند از: چگالی، دما، سرعت u ، v و w ، فشار، رهایش گرما بر واحد حجم، جزء مخلوط، واگرایی، جرم آب بر واحد حجم، بخار آب، جزء حجمی اکسیژن، جزء حجمی سوخت، جزء حجم نیتروژن، جزء حجم دی‌اکسیدکربن، جزء حجمی مونواکسیدکربن، جزء حجمی دوده، غلظت ویژه دود، ضریب خاموشی، فاصله قابلیت دید، شار جرمی آب، شار

1. Cooper
2. Meland
3. Lonivik

تابشی خالص، شار جابجایی، شار حرارتی خالص، دمای دیوار، دمای داخلی دیوار، شدت افت جرم بر واحد سطح، ضریب فشار و جرم آب بر واحد سطح.

FDS موضوع مطالعات زیادی بوده است که نشان‌دهنده نقاط ضعف و قوت آن در ایجاد

راه‌حل‌های مناسب برای سناریوهای آتش است و از جمله می‌توان موارد زیر را نام برد:

- CFD simulations of atmospheric gas dispersion using the Fire Dynamics Simulator (FDS)
- Comparison of FDS predictions by different combustion models with measured data for enclosure fires
- Experimental investigation and numerical simulation of a furnished office fire
- The application of a genetic algorithm to estimate material properties For fire modeling from bench-scale fire test data
- Large eddy simulation of fire-induced buoyancy driven plume dispersion in an urban street canyon under perpendicular wind flow
- Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene
- Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data
- Validation of FDS for the prediction of medium-scale pool fires
- Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: Fire Dynamics Simulator (FDS) comparisons with measured data
- Experimental and numerical study on water mist suppression system on room fire
- Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires
- Large eddy simulation of fire-induced buoyancy driven plume dispersion in an urban street canyon under perpendicular wind flow
- Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel
- Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3MW fires in a 20 m cubic atrium



در این پروژه تعداد زیادی از این مقالات مطالعه گردید که در زیر به دو مورد از آن اشاره میشود:

۱- استفاده از FDS برای شبیه سازی ارتفاع دود در یک آتریوم ساده

در این مطالعه اثرات ممکن انواع آرایش سرعت‌ها و تنظیم‌های منبع هوا را در یک سیستم مدیریت دود آتریوم بررسی کردند. تغییرات شامل سرعت‌هایی است که از ۰/۵ تا ۳ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. نتایج نشان داد که آرایش سرعت‌های هوا باید به گونه‌ای توزیع شود که هیچ اثر سرعتی به آتش نرسد. همچنین آرایش هوا باید به طور متقارن برای آتش تامین شود تا بیشترین امکان توزیع نشدن جریان ستونی را داشته باشد. پخش جریان ستونی دود و آتش باعث افزایش قابل توجهی در شدت تولید دود می‌شود.

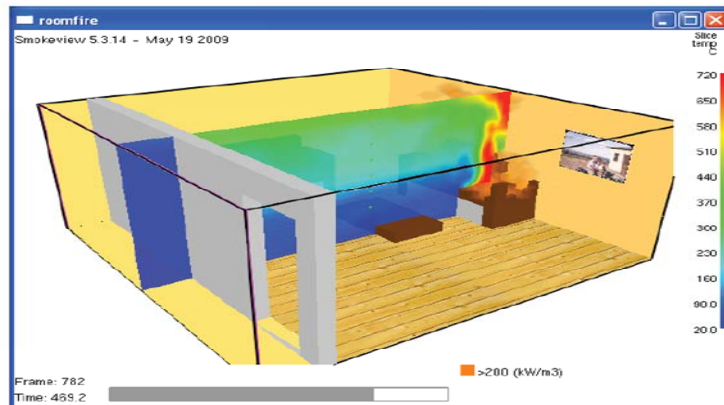
۲- مطالعات عددی در زمینه حرکت دود و آتریوم و کنترل با تهویه به وسیله آزمون‌های

میدانی

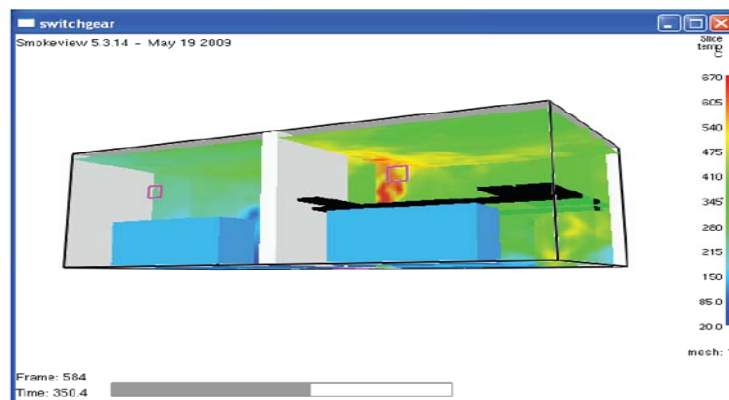
در این پروژه FDS برای مطالعه آتش‌های اتاق‌های میدانی به کار برده شد. ارتفاع وجه مشترک و دماهای هوای داخل اتاق میدانی شبیه‌سازی شده است. داده‌های آزمایشگاهی در مورد آزمون‌های دود داغ آتریوم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایجی که به وسیله FDS پیش‌بینی شد می‌تواند به وسیله مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد اعتباردهی قرار بگیرد.

به طور کلی مقایسه پیشگویی‌های مدل FDS با داده‌های آزمون آتش FM/SNL نشان می‌دهد که دقت شبکه‌ها نقش مهمی در درستی پیش‌بینی FDS بازی می‌کند و یک شبکه بهینه برای هر سناریوی مشخص وجود دارد. آرایش تعداد سلول‌های شبکه در هر منطقه جریان ستونی، بهبود خاص در پیشگویی‌های دما ایجاد نمی‌کند، اما منجر به یک شبیه‌سازی دقیق‌تری از ساختارهای جریان ستونی مغشوش می‌شود.

مقایسه‌های پیش‌بینی‌های مدل FDS با آزمایش‌های اجرا شده در یک آشیانه هواپیما با سقف ۱۵ متری نشان می‌دهد که مدل دماهای بالاتری از دمای آزمون‌ها را نتیجه می‌دهد. مشاهده شده است که وقتی شبکه فضایی در مجاورت آتش، حدود یک دهم قطر مشخصه آتش باشد، مدل توافق خوبی با روابط تجربی جریان ستونی ایجاد می‌کند.

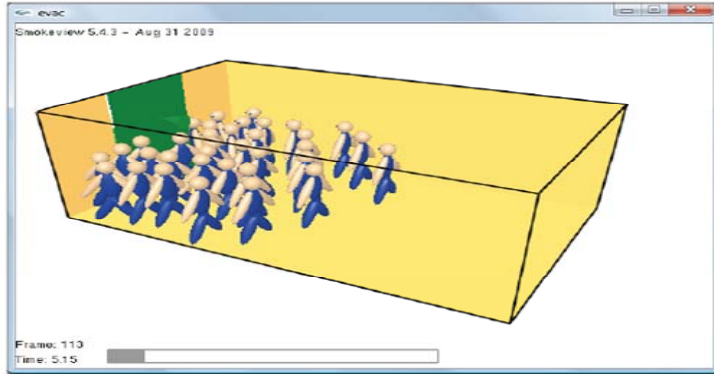


شکل ۳-۵ نمایش گرافیکی مثال اتاق آتش در نرم افزار Smoke View

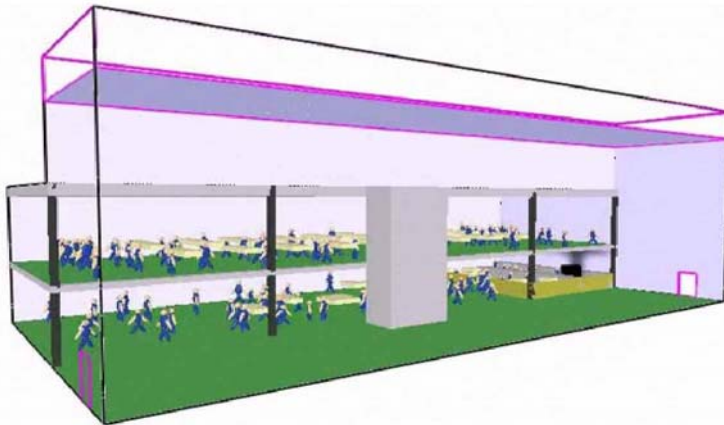


شکل ۳-۶ نمایش گرافیکی مثال سوئیچ گیر در نرم افزار Smoke View

FDS همچنین قادر است تا نحوه و زمان تخلیه را نیز مدل کند. در این نرم افزار می توان بعد از اعلام شدن حریق توسط سیستم های اعلام حریق و شروع اطفاء، نحوه و زمان اطفاء را مشاهده کرد.



شکل ۳-۷ نمایش گرافیکی مثال تخلیه در نرم افزار Smoke View



شکل ۳-۸ نمایش گرافیکی مثال تخلیه در نرم افزار Smoke View

CFX ۲-۳-۵-۳

CFX یک مدل تجاری است که به وسیله تکنولوژی AEA توسعه داده شده است [73]. این مدل می‌تواند برای ارزیابی دینامیک‌های آتش، خروجی‌های ساختار آتش و خاموش‌کننده‌های آتش استفاده شود. CFX معادلات ناویر استوکس را در سه بعد برای تعیین میدان‌های حرارت و جریان در هر فضای بسته حل می‌کند. مدل CFX چندین گزینه برای جریان‌های توربولانس ناشی بالارونده از آتش دارد (مدل‌های توربولانس: ϵ -K، RNG، مدل‌های رینولدز مرتبه پایین، تنش جبری، تنش تفاضلی).

مدل CFX قابلیت‌های موازی دارد که اجازه می‌دهد تا شبیه‌سازی‌های بزرگتر به صورت اقتصادی اجرا شوند. پردازنده گرافیکی CFX به کاربر اجازه می‌دهد تا هندسه هر ساختمان را



با ایجاد اتوماتیک شبکه‌هایی داخل ساختمان مدل کند. این مدل یک روش آسان و سریع ساختمان در هندسه سازه، خواص حرارتی آن و شرایط تهویه و گرمایش ایجاد می‌کند. CFX پیش‌بینی‌هایی در محدوده فضای بسته دماهای گاز، چگالی‌ها، فشارها، سرعت‌های گاز و ترکیبات شیمیایی فراهم می‌کند. CFX با داده‌های آتش فضای بسته که توسط استکلر و همکارانش انجام شد، مقایسه گردید، اما قبل از این که بتوان درستی مدل را ارزیابی کرد، مقایسه‌های بسیار بیشتری لازم است.

Jasmine ۳-۳-۵-۳

وظیفه Jasmine تحلیل جابجایی دود در فضای بسته است. این مدل به عنوان یک کد ویژه آتش به وسیله ایستگاه تحقیقات آتش انگلستان^۱ در اوایل دهه ۱۹۸۰ توسعه یافته است. این مدل از کد ۲ بعدی حالت پایا CFD به نام Mosie استخراج شده، که در ۱۹۷۰ میلادی برای کاربردهای صنعتی با اهداف عمومی توسعه داده شد. فرآیندهای جابجایی و نفوذ به وسیله معادلات ناویر استوکس، شبیه‌سازی شده‌اند. Jasmine می‌تواند در پیش‌بینی اثرات آتش برای ارزیابی یک طرح و یا بر هم‌کنش‌های با تهویه و دیگر وسایل محافظت در برابر آتش استفاده شود.

ورودی‌های آن عبارتند از: هندسه فضای بسته، محل و تعداد هواکش‌ها، پنجره، در، یک یا چند منبع گرما و آتش، محل انسدادها، شدت‌های جریان تهویه و خروجی، مرزهای خارجی و محل وسایل محافظت در برابر آتش عامل مانند، سیستم‌های کشف گرما و شبکه‌های بارنده. خروجی‌های Jasmine عبارتند از، دماهای گاز، دانسیته‌ها، فشارها، سرعت‌های گاز و ترکیبات شیمیایی، دماهای دیوار، انتقال حرارت جابجایی و تابشی به مرزهای جامد و شدت‌های جریان حرارت و جرم از طریق بازشوهای تهویه (طبیعی یا اجباری).

کاکس و همکاران [74] یک مجموعه آزمایش در یک سلول بسته آتش که مساحت $6m \times 4m$ و ارتفاع $4/5$ اندازه‌گیری می‌کند. انجام دادند و داده‌های جمع‌آوری شده را با پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی Jasmine مقایسه کردند. این مقایسه‌ها نشان داد که تطابق خوبی در پیش‌بینی دماها وجود دارد جز در مناطق نزدیک به آتش و جریان ستونی آتش.

فصل چهارم

کارهای تجربی (مواد و روش‌های آزمون)

۱-۴ مواد

به منظور بررسی رفتار ۱۰ نوع از مصالح ساختمانی در برابر آتش در مقیاس کوچک و کاربرد نتایج آزمون در مدل‌های آتش برای شبیه‌سازی، مصالح به شرح جدول ۱-۴ تهیه و آزمایش شد. با توجه به تنوع و کاربرد وسیع برخی از مصالح موجود در بازار و تفاوت احتمالی بین کیفیت محصولات داخلی و خارجی، برای تعدادی از مصالح، نمونه‌هایی از هر دو منبع داخلی و خارجی تهیه شد.

جدول ۱-۴: مشخصات نمونه‌های آزمون

ردیف	کد نمونه	شرح نمونه	میانگین چگالی (Kg/m ³)	میانگین چگالی سطحی (Kg/m ²)	میانگین ضخامت نمونه (mm)
۱	MDF-1	MDF داخلی	۷۸۴/۳۴	۶/۴	۸/۱۷
۲	MDF-2	MDF وارداتی	۷۷۷/۰۲	۷/۱۲	۹/۱۶
۳	HDF	HDF وارداتی	۹۱۷/۷۳	۷/۶۲	۸/۳
۴	PVC-1	دیوارپوش PVC - داخلی	۳۸۲/۲۲	۳/۲۴	۸/۴۲
۵	PVC-2	دیوارپوش PVC - وارداتی	۳۵۷/۳۶	۲/۷۷	۷/۷۲
۶	PVC-F	کفپوش PVC - وارداتی	۱۸۴۳/۶۵	۳/۷	۲/۰۱
۷	Text. Covering	موکت تولید داخلی	۱۸۲/۶	۰/۹۳	۵/۱۲
۸	PC	PC	۲۰۳/۹۸	۱/۲۵	۶/۱۰
۹	Epoxy	کف صنعتی اپوکسی	۱۵۹۱/۳۴	۱۵/۲۴	۹/۵۶
۱۰	Fabric stone	سنگ مصنوعی وارداتی	۲۳۷۰/۷	۲۹/۷۸	۱۲/۵۶



۲-۴ روش آزمون

ارزیابی رفتار آزمون‌ها به وسیله دستگاه گرماسنج مخروطی مطابق استانداردهای ملی ۱-۷۲۷۱ و بین‌المللی ISO۵۶۶۰ صورت گرفت. یکی از مهم‌ترین آزمون‌های واکنش در برابر آتش، اندازه‌گیری شدت رهایش گرمای ناشی از سوختن یا اشتعال مصالح است. هر چه مصالحی بر اثر سوختن مقدار حرارت بیشتری آزاد (رها) نماید، مشارکت بیشتری در گسترش حریق داشته، در نتیجه خطرناک‌تر خواهد بود. دستگاه گرماسنج مخروطی از دستگاه‌های مهم برای اندازه‌گیری این خاصیت است. به علاوه این دستگاه قادر به اندازه‌گیری خواص دیگری شامل افت جرمی فرآورده بر اثر سوختن، دانسیته دود ناشی از سوختن، و مقدار گازهای CO/CO₂ است.

برای این منظور، نمونه مورد نظر در ابعاد ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متر در یک قاب نگه‌دارنده در زیر یک پانل تابشی مخروطی قرار می‌گیرد. شدت تابش‌دهی پانل مخروطی به وسیله جریان الکتریسیته می‌تواند از صفر تا ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع تنظیم شود. شدت تابش‌دهی به وسیله یک شارسنج حرارتی، تقریباً در محل قرارگیری وسط سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود. همزمان دمای مخروط به وسیله سه ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

با شروع آزمون نمونه مورد نظر، که قبلاً در قاب نگه‌دارنده و در محل خود قرار داده شده است، در معرض تابش مخروط قرار می‌گیرد. از یک جرقه‌زن الکتریکی، به عنوان منبع آفرزش، در بالای سر نمونه شروع به جرقه زدن می‌کند و پس از آفرزش نمونه، به طور دستی خاموش می‌شود. گازهای حاصل از احتراق به وسیله یک فن به داخل هود و کانال آزمون کشیده شده، به وسیله لوله‌های نمونه‌برداری و پمپ به آنالیزورهای اکسیژن، CO و CO₂ هدایت می‌شود.

این آزمایش در مقیاس کوچک انجام شده و از نظر تئوری بر اساس اصل «اکسیژن مصرف شده» طراحی شده است. مطابق این اصل، مقدار رهایش گرمای ناشی از سوختن یک ماده، مستقل از نوع ماده بوده و متناسب با مقدار اکسیژن مصرف شده است، به این ترتیب که به ازای یک کیلوگرم اکسیژن مصرف شده، تقریباً (۱۳/۱ × ۱۰^۳) کیلوژول گرما آزاد می‌شود. آزمون‌ها در حالی که در معرض تابش خارجی معینی تا حداکثر صد کیلووات بر مترمربع قرار می‌گیرند، در شرایط باز به محیط می‌سوزند و اندازه‌گیری‌ها بر اساس شدت جریان گاز خروجی و غلظت اکسیژن در آن تعیین می‌شود. در این روش آزمون‌هایی به ابعاد (۱۰۰ × ۱۰۰) میلی‌متر با ضخامت حداکثر ۵۰ میلی‌متر که نماینده فرآورده نهایی هستند، در دمای (۲ ± ۲۳) درجه سلسیوس و رطوبت نسبی (۵ ± ۵) درصد پیش از آزمون تثبیت شرایط می‌شوند. تمام سطوح آزمون، غیر از سطح در معرض حرارت، با یک ورق آلومینیوم پوشانده شده و در یک قاب نگه‌دارنده قرار داده می‌شود.

آزمونه روی یک نیروسنج قرار داده شده و تحت تراز تابشی معین و یک جرقه الکتریکی قرار می‌گیرد. تحت این شرایط زمان افروزش آزمونه ثبت می‌شود. گازها از طریق هود جمع‌آوری شده و غلظت گازهای اکسیژن، مونوکسید و دی‌اکسیدکربن به طور مرتب اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از اندازه‌گیری غلظت این گازها و تثبیت مقدار جریان گاز خروجی از هود، مقدار و شدت رهایش گرما و گرمای مؤثر سوختن توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود.

۴-۲-۱ تئوری گرماسنجی بر اساس مصرف اکسیژن

شدت رهایش گرما (یا شدت آزاد شدن حرارت) حاصل از آتش‌سوزی را می‌توان به عنوان مهمترین پارامتر تعیین‌کننده شدت آتش‌سوزی در نظر گرفت. این پارامتر می‌تواند شاخصی از ابعاد شعله‌های آتش باشد. شدت گرمایی معیاری از شدت یا اندازه آتش است.

زمانی که یک ماده جامد می‌سوزد، گازهای ناشی از پیرولیز با اکسیژن ترکیب شده و انرژی (به شکل گرما) آزاد می‌شود. قسمتی از این انرژی با برگشت به سطح سوخت باعث گرمایش بیشتر آن و آزاد شدن بیشتر گازهای پیرولیز می‌شود، که این نیز به نوبه خود با اکسیژن ترکیب شده و به همین ترتیب وقایع ادامه می‌یابد.

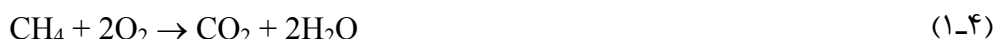
گرمای آزاد شده بسته به نوع محصول و شرایط احتراق متغیر است. زمانی که مقادیر کم از یک ماده جامد در محفظه یک بمب کالریمتر می‌سوزد می‌توان از سوختن کامل مطمئن بود. در چنین شرایطی، به عنوان مثال، حدود ۴۰ کیلوژول بر گرم از سوختن پلی‌یورتان مخصوص میلمان آزاد می‌شود. اما در یک آتش‌سوزی واقعی، سوختن به شکل ناقص صورت گرفته و گرمای آزاد شده حتی می‌تواند نصف مقدار تئوری باشد. این مقدار را گرمای مؤثر سوختن می‌نامند.

بنابراین صرفاً با اندازه‌گیری شدت افت جرم نمی‌توان شدت گرمای یک شعله واقعی را محاسبه کرد، زیرا مقدار گرمای مؤثر سوختن در آن مشخص نیست. از طرف دیگر نمی‌توان شدت گرمایی را با وسایل حرارتی، ترموکوپل و از این قبیل اندازه‌گیری کرد و همیشه مقداری از حرارت قابل اندازه‌گیری نبوده و از دست می‌رود.

راهکاری که امروزه استفاده می‌شود اندازه‌گیری اکسیژن مصرف شده توسط حریق است. در سال ۱۹۱۷ تورنتون^۱ نشان داد که برای تعداد زیادی از مایعات و گازهای آلی، تقریباً یک مقدار

1. Thornton

ثابت گرما به ازای واحد جرم اکسیژن مصرف شده آزاد می‌شود [75]. در سال ۱۹۸۰ هاجت^۱ دریافت که این موضوع برای جامدات آلی نیز صحت داشته و مقدار میانگین ۱۳/۱ مگاژول بر کیلوگرم اکسیژن را برای آن به دست آورد [76]. بدین ترتیب شدت رهایش گرما^۲ از این طریق تقریباً برای هر نوع آتش‌سوزی به دست می‌آید.
به عنوان مثال سوختن متان را به شکل زیر در نظر بگیرید:



گرمای خالص سوختن، ΔH_c ، برای سوختن متان 50 kJ/gr است. محصولات در 25°C هستند و آب به صورت بخار است. با توجه به جرم مولکولی متان و ترکیبات واکنش:

$$E = (50 \times 16) / 64 = 12.5 \text{ kJ/gr} \quad (2-4)$$

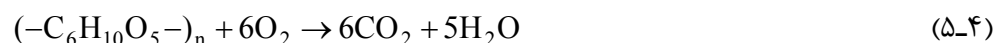
که در آن E گرمای آزاد شده به ازای یک گرم اکسیژن مصرف شده توسط واکنش سوختن متان است. این پارامتر را می‌توان به طور کل به شکل زیر نوشت:

$$E = \Delta H_c / r_0 \quad (3-4)$$

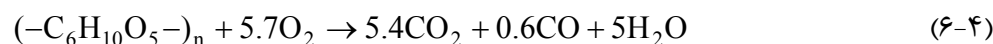
در آن: r_0 نسبت جرم اکسیژن به جرم سوخت است:

$$r_0 = m_{\text{O}_2} / m_{\text{fuel}} \quad (4-4)$$

حال سوختن سلولز را در نظر بگیرید:



برای این واکنش $E = 13/59 \text{ (kJ/gr)}$ است. حال اگر این واکنش به صورت ناقص به شکل زیر رخ دهد:



در این صورت مقدار E برابر با $13/37 \text{ kJ/gr}$ به دست می‌آید.

1. Huggett
2. Heat Release Rate



نتیجه این که برای اکثر واکنش‌ها و اکثر مواد، گرمای سوختن واکنش به ازای یک گرم اکسیژن مصرف شده به طور متوسط در حدود $13/1 \text{ kJ/gI}$ است. این واقعیت، اساس گرماسنجی به وسیله اندازه‌گیری مصرف اکسیژن را تشکیل می‌دهد و اندازه‌گیری شدت رهائش گرما در آتش‌سوزی را امکان‌پذیر می‌سازد.

۲-۲-۴ معادلات اساسی

۱-۲-۲-۴ شدت رهائش گرما

فرض کنید \dot{m}_a شدت جریان جرمی هوای ورودی به سیستم و \dot{m}_e شدت جریان جرمی گازهای احتراق خروجی از سیستم باشد. شدت گرمزایی حریق را می‌توان از حاصل ضرب مقدار اکسیژن مصرفی (گرم) در مقدار گرمای آزاد شده به ازای یک گرم اکسیژن طبق معادله زیر به دست آورد:

$$\dot{q} = E \times (\dot{m}_{O_2} - \dot{m}_{O_2}^0) \quad (7-4)$$

درعین حال آن‌چه که از تجزیه‌کننده اکسیژن قرائت می‌شود، درصد یا کسر مولی اکسیژن در گاز است:

$$x_{O_2}^{Ao} = \frac{\dot{n}_{O_2}^0}{\dot{n}_{O_2}^0 + \dot{n}_{N_2}^0} = \frac{\frac{\dot{m}_{O_2}^0}{M_{O_2}}}{\frac{\dot{m}_{O_2}^0}{M_{O_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2}^0}{M_{N_2}}} \quad (8-4)$$

و

$$x_{O_2}^A = \frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{O_2} + \dot{n}_{N_2}} = \frac{\frac{\dot{m}_{O_2}}{M_{O_2}}}{\frac{\dot{m}_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{N_2}}} \quad (9-4)$$

که در آن:

\dot{n} = شدت مولی جریان

M = وزن مولکولی

$x_{O_2}^{Ao}$ = کسر مولی اکسیژن در جریان ورودی، قرائت شده از تجزیه‌کننده اکسیژن



$x_{O_2}^A$ = کسر مولی اکسیژن در جریان خروجی، قرائت شده از تجزیه کننده اکسیژن چنانچه گاز CO_2 و بخار آب توسط جاذب‌های دستگاه جذب شده و از مقدار CO صرف نظر شود، گاز ورودی به تجزیه کننده فقط شامل O_2 و N_2 خواهد بود. لذا با به دست آوردن $m_{O_2}^0$ و $m_{O_2}^{A0}$ برحسب $x_{O_2}^A$ و $x_{O_2}^{A0}$ از معادلات (۸-۵) و (۹-۵) خواهیم داشت:

$$m_{O_2}^0 - m_{O_2}^A = \frac{x_{O_2}^{A0} - x_{O_2}^A}{(1 - x_{O_2}^{A0})(1 - x_{O_2}^A)} \cdot m_{N_2} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \quad (10-4)$$

اما هوای ورودی حاوی بخار آب است که جدا شده است و به همین دلیل اکسیژن قرائت شده از تجزیه کننده گاز دقیقاً برابر با درصد اکسیژن هوای ورودی نیست و اصلاح زیر باید روی آن صورت گیرد:

$$x_{O_2}^0 = x_{O_2}^{A0} (1 - x_{H_2O}^0) \quad (11-4)$$

که در آن:

$$x_{O_2}^0 = \text{کسر مولی اکسیژن در هوای ورودی}$$

$$x_{H_2O}^0 = \text{کسر مولی بخار آب در هوای ورودی}$$

بنابراین $x_{H_2O}^0$ باید معلوم باشد. این مقدار را می توان از اندازه گیری های دما و رطوبت نسبی محاسبه کرد. راه دیگر این است که $x_{O_2}^0$ را با کنارگذر کردن^۱ جاذب آب اندازه گرفت. باید توجه نمود که تغییر درصد بخار آب می تواند تأثیر قابل توجهی بر روی درصد اکسیژن بگذارد. برای مثال در یک ترکیب خشک از هوا با ادغام درصد گازهای آرگون و دی اکسید کربن در نیتروژن داریم:

$$N_2 = 79/05 \%$$

$$O_2 = 20/95 \%$$

اما در یک روز مرطوب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس و ۶۰٪ رطوبت نسبی خواهیم داشت:

$$N_2 = 77/58 \%$$

1. Bypassing

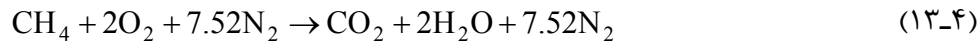
$$O_2 = 20.56 \%$$

$$H_2O = 1.86 \%$$

با توجه به معادله (۱۱-۴) و ترکیب معادلات (۷-۴) تا (۹-۴)، معادله شدت رهایش گرما بر حسب درصد اکسیژن قرائت شده توسط تجزیه‌کننده اکسیژن، با در نظر گرفتن درصد واقعی رطوبت هوا، به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q} = E \left(\frac{x_{O_2}^{A0} - x_{O_2}^A}{1 - x_{O_2}^A} \right) \frac{M_{O_2}}{M_a} \dot{m}_a (1 - x_{H_2O}^0) \quad (12-4)$$

اما در این معادله هنوز یک پارامتر غیرقابل اندازه‌گیری وجود دارد. جریان ورودی هوا با توجه به شرایط آزمایش قابل اندازه‌گیری نیست و \dot{m}_a با شدت جریان خروجی متفاوت است. برای ارتباط این دو جریان با یکدیگر پارامترهای ضریب انبساط^۲ و ضریب مصرف اکسیژن^۳ به شرح زیر معرفی می‌شود. معادله سوختن گاز متان را در نظر بگیرید:



در سمت چپ این معادله ۹/۵۲ و در سمت راست آن ۱۰/۵۲ مول گاز وجود دارد. بنابراین حجم گاز ورودی پس از واکنش کامل به میزان ۱/۱۰۵ برابر منبسط شده است. این نسبت ضریب انبساط یا α نامیده می‌شود. در آزمایش واقعی فقط قسمتی از هوای ورودی وارد واکنش شده و اکسیژن آن به طور کامل مصرف می‌شود. بنابراین:

$$\dot{m}_e = (1 - \phi) \dot{m}_a + \alpha \phi \dot{m}_a \quad (14-4)$$

که در آن ϕ ضریب مصرف اکسیژن بوده و به شکل زیر تعریف می‌شود:

-
1. Expansion Factor
 2. Oxygen Depletion Factor

$$\phi = \frac{\dot{m}_{O_2}^0 - \dot{m}_{O_2}^A}{\dot{m}_{O_2}^0} = \frac{x_{O_2}^{A0} - x_{O_2}^A}{(1 - x_{O_2}^A)x_{O_2}^{A0}} \quad (15-4)$$

با جایگزینی \dot{m}_e به جای \dot{m}_a در معادله (۱۲-۴) خواهیم داشت:

$$\dot{q} = E \frac{M_{O_2}}{M_a} \left(\frac{\phi}{1 + \phi(\alpha - 1)} \dot{m}_e (1 - x_{H_2O}^0) x_{O_2}^{A0} \right) \quad (16-4)$$

ضمناً همانطور که قبلاً دیدیم:

$$E = \frac{\Delta H_c}{r_0}$$

می‌دانیم که:

$$\frac{M_{O_2}}{M_a} = 1.1$$

از طرف دیگر \dot{m}_e نیز به وسیله دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان در لوله هود تعیین می‌شود:

$$\dot{m}_e = c \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \quad (17-4)$$

با فرض $1 - x_{H_2O}^0 \sim 1$ و $\alpha = 1.105$ ، معادله شدت رهایش گرما به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q} = \frac{\Delta H_c}{r_0} c \times 1/1C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \left(\frac{x_{O_2}^{A0} - x_{O_2}^A}{1.105 - 1.5x_{O_2}^A} \right) \quad (18-4)$$

و این دقیقاً همان معادله‌ای است که در استاندارد گرماسنج مخروطی داده شده است. اگر مقدار CO_2 به جای این که جذب و جداسازی شود، اندازه‌گیری گردد و از مقدار CO صرف نظر کنیم، ضریب مصرف اکسیژن به شکل زیر تغییر کرده و در معادله مربوط جایگزین می‌شود:

$$\varphi = \frac{x_{O_2}^{A_0}(1 - x_{CO_2}^A) - x_{O_2}^A(1 - x_{CO_2}^{A_0})}{x_{O_2}^{A_0}(1 - x_{O_2}^A - x_{CO_2}^{A_0})} \quad (19-4)$$

۲-۲-۲-۴ گرمای مؤثر سوختن

در یک آتش‌سوزی آن چه که باعث آزاد شدن گرما می‌شود، وقوع واکنش سوختن بین مواد سوختی و اکسیژن است. واکنش‌های معمولی سوختن در فشار تقریباً ثابت رخ می‌دهند، بنابراین در محاسبات آن بهتر است که از مقادیر آنتالپی استفاده شود. در یک واکنش سوختن گرمای واکنش به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta h_r^0 = \sum_i^p n_i \Delta h_f^0 - \sum_j^r n_j \Delta h_f^0 \quad (20-4)$$

که در آن r نشانه واکنشگرها و p نشانه محصولات بوده و هر دوی واکنشگرها و محصولات در شرایط استاندارد در دمای ۲۹۸ کلوین هستند. در این صورت گرمای ناخالص سوختن برابر با گرمای واکنش است، که در آن شرایط زیر صادق باشد:

- ۱- مقدار واکنشگرها برابر با یک مول باشد،
- ۲- سوخت و اکسیژن در فشار یک اتمسفر و دمای ۲۹۸ کلوین مخلوط شوند،
- ۳- محصولات نیز در فشار یک اتمسفر و دمای ۲۹۸ کلوین باشند،
- ۴- محصولات اصلی آب مایع، CO_2 در حالت گاز و نیتروژن در حالت گاز باشد. هیچ‌گونه هیدروکربن نسوخته نیز باقی نمانده باشد.

یکی از حالت‌های مورد علاقه در واکنش‌های سوختن، زمانی است که آب حاصل از واکنش به صورت بخار باقی مانده و به آب مایع تبدیل نشود. در این صورت از واژه گرمای خالص سوختن استفاده می‌شود که در حقیقت برابر با تفاضل گرمای ناخالص سوختن و گرمای نهان بخار آب در ۲۹۸ کلوین است. با در نظر گرفتن رابطه بین مقدار هیدروژن در سوخت و مقدار آب تولید شده در واکنش، می‌توان ارتباط بین گرمای خالص و ناخالص سوختن را به شکل زیر تعریف نمود:

$$\Delta h_c^l = \Delta h_c^u - 0.2196[\%H] \quad (21-4)$$

که در آن Δh_c^u گرمای ناخالص (یا بالایی) سوختن، Δh_c^l گرمای خالص (یا پایینی) سوختن و H درصد جرمی هیدروژن در سوخت است. گرمای ناخالص سوختن را می‌توان



مطابق با استاندارد شماره ۷۲۷۱-۵ ایران با استفاده از بمب کالریمتر به دست آورده و گرمای خالص را نیز با روش مشروح در مرجع فوق محاسبه نمود.

اما در شرایط واقعی، واکنش سوختن به شکل ایده‌آل بالا رخ نمی‌دهد و به خصوص گرمایی که واقعاً در شرایط آتش‌سوزی از سوختن مواد آزاد می‌شود، بسیار متفاوت با تئوری‌های ذکر شده در بالا است. بنابراین برای شرایط آتش‌سوزی از مفهوم «گرمای مؤثر سوختن» استفاده می‌شود. برای گرمای مؤثر سوختن، گرمای ناشی از سوختن به وسیله اصل اکسیژن مصرف شده تعیین و بر افت جرمی اندازه‌گیری شده، تقسیم می‌شود (۲۲-۵).

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum q_i(t)\Delta t}{m_i - m_f} \quad (22-4)$$

که در این رابطه q گرمای آزاد شده و Δm (مخرج کسر) میزان افت جرمی را نشان می‌دهد.

۳-۲-۲-۴ بازده دی‌اکسید و منوکسید کربن

مشابه موارد بالا می‌توان معادلات لازم برای محاسبه بازده گازهای دی‌اکسید و منوکسید کربن را به دست آورد. بازده هر جزء X را می‌توان به شکل زیر تعریف نمود:

$$X \text{ بازده} = \frac{\text{kg } X \text{ produced}}{\text{kg specimen mass lost}} \quad (23-4)$$

بازده دی‌اکسید کربن به صورت $\frac{m_{CO_2} - m_{CO_2}^0}{m}$ معادله ۲۳-۵ تعریف می‌شود، که در آن:

$$m_{CO_2} - m_{CO_2}^0 = \frac{\frac{A_{CO_2}}{CO_2} (1 - x_{O_2}^{A0}) - x_{CO_2}^{A0} (1 - x_{O_2}^A - x_{CO}^A)}{1 - x_{O_2}^A - x_{CO_2}^A - x_{CO}^A} \times \frac{M_{CO_2}}{M_a} \frac{m_e}{1 + \phi(\alpha - 1)} (1 - x_{H_2O}^0) \quad (24-4)$$



$$\dot{m}_{CO} = \frac{x_{CO}^A (1 - x_{O_2}^{A0} - x_{CO_2}^{A0}) M_{CO}}{1 - x_{O_2}^A - x_{CO_2}^A - x_{CO}^A} \frac{M_{CO}}{M_a} \frac{\dot{m}_e}{1 + \varphi(\alpha - 1)} (1 - x_{H_2O}^0) \quad (۲۵-۴)$$

۴-۲-۲-۴ دود

دود یکی از محصولات اصلی اکثر آتش‌سوزی‌ها بوده، خطر مهمی برای جان افراد محسوب می‌شود. ایجاد اختلالات تنفسی و کاهش دید افراد دو تهدید اصلی دود در آتش‌سوزی‌ها است. عوامل متعددی بر روی تولید دود در یک آتش‌سوزی اثر دارند که از آن جمله موارد زیر را می‌توان نام برد:

الف. نوع سوختن: دود در اصل حاصل سوختن ناقص است. نحوه سوختن ماده به صورت شعله‌ور یا نهان‌سوز بر روی تشکیل دود اثر مهم دارد. در حریق نهان‌سوز، مواد فرار در دماهای بالا متصاعد شده و بر اثر مخلوط شدن با هوا سرد و به شکل قطرات کروی چگالیده می‌شوند. این دود معمولاً به صورت روشن دیده می‌شود. اما دود ناشی از سوختن شعله‌ور (توأم با شعله) باعث تولید دود سیاه پر کربن می‌شود که ذرات آن بی‌شکل هستند. ذرات کروی دود ناشی از احتراق نهان‌سوز حدود یک میکرون است ولی ذرات دود ناشی از سوختن حالت شعله‌ور بزرگتر است. البته مقدار دود ناشی از این دو نوع آتش‌سوزی بستگی به نوع ماده نیز دارد.

ب. تهویه: مقدار دود علاوه بر نوع ماده، به تهویه نیز بستگی دارد. برای محصولات سلولزی مقدار دود با کاهش دسترسی به هوا، افزایش نشان می‌دهد. اما این موضوع برای تمام مواد لزوماً مشابه نیست و رفتارهای متفاوتی ممکن است مشاهده شود.

ج. سطح سوخت و شدت سوختن: این دو مشخصه حتماً باید در بررسی تولید دود از یک ماده سوختنی مورد ملاحظه قرار گیرند. ماده‌ای که به طور نسبی دود کمی آزاد می‌کند، ممکن است در یک آتش‌سوزی واقعی به علت سرعت بالای پیشروی شعله دود زیادی آزاد نماید.

د. دما و زمان: ذرات دود با گذشت زمان به یکدیگر چسبیده و باعث می‌شود تا توزیع اندازه ذرات دود با مرور زمان تغییر کند. خواص دود همچنین با دما نیز تغییر می‌کند. بنابراین خواص دودی که از یک سوخت متصاعد می‌شود، با گذشت زمان و سرد شدن، به عنوان مثال با حرکت در ساختمان بزرگ، می‌تواند با خواص اولیه آن کاملاً متفاوت باشد.

و. نوع سوخت: بدیهی است که نوع ماده سوختنی در خواص دود آن بسیار مؤثر است. به عنوان مثال تعداد اندکی از سوخت‌های خالص مانند فرمالدئید و الکل متیلیک دود تولید

نمی‌کنند، هیدروکربن‌های اشباع نشده دود بیشتری از هیدروکربن‌های اشباع شده تولید می‌کنند، یا ترکیبات آروماتیک مانند پلی‌استایرن دود بسیار زیادی تولید می‌کنند. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری مقدار دود، سنجش دانسیته نور یا ضریب تیرگی نور است. هر دوی این دو پارامتر در اصل نسبت بین شدت یک شعاع نور ساطع شده و شدت شعاع نور عبور کرده از یک مسافت مشخص را بیان می‌کنند. برای بیان این موضوع بیشتر از قانون «بیر-لمبرت» در شکل لگاریتمی پایه نپیرین آن استفاده می‌شود:

$$I/I_0 = e^{-kL} \quad (26-4)$$

که در آن:

$$I = \text{شدت نور عبور کرده}$$

$$I_0 = \text{شدت نور ساطع شده}$$

$$K = \text{ضریب تیرگی نور (m}^{-1}\text{)}$$

$$L = \text{طول مسیری که نور از بین دود عبور کرده است (m)}$$

قانون «بیر-لمبرت» فقط برای نور تک‌رنگ صحت دارد اما از آن به طور وسیعی برای نورهای چند رنگ نیز استفاده شده است. طبق این معادله می‌توان ضریب تیرگی نور را به شکل زیر به دست آورد:

$$k = (1/L) \ln (I_0/I) \quad (27-4)$$

ضریب تیرگی نور را می‌توان به شکل زیر نیز بیان کرد:

$$k = \sigma_s C \quad (28-4)$$

که در آن:

$$\sigma_s = \text{سطح تیرگی ویژه به ازای واحد جرم دوده (m}^2\text{/kg)},$$

$$C = \text{غلظت ذرات دود.}$$

در بسیاری از کاربردهای عملی، جرم دوده اندازه‌گیری نمی‌شود. در این صورت از سطح تیرگی ویژه بر اساس افت جرمی سوخت استفاده می‌شود:

$$\sigma_f = \epsilon \sigma_s \quad (29-4)$$

که در آن:

σ_f = سطح تیرگی ویژه بر اساس افت جرم سوخت (m^2/kg),
 ε = بازده دود یا جزئی از افت جرمی سوخت که به دود تبدیل می‌شود.
 ε را می‌توان به وسیله اندازه‌گیری گراویمتری مقدار ذرات دود تولید شده و تقسیم کردن آن بر مقدار سوختی که پیرولیز شده است، به دست آورد. اندازه‌گیری σ_f و کار کردن با آن به سایر اندازه‌گیری‌های دود ارجحیت دارد، زیرا مقدار آن مستقل از اندازه مسیری که دود طی می‌کند، شدت جریان دود، مساحت سطح در معرض آتش و جرم سوخته‌شده است. در سیستم‌های باز (مانند گرماسنج مخروطی) سطح تیرگی ویژه σ_f را می‌توان به شکل زیر به دست آورد:

$$\sigma_f = kV_f / \dot{m} \quad (30-4)$$

که در آن:

$$V_f = \text{شدت جریان حجمی (m}^3/\text{s)}$$

$$\dot{m} = \text{شدت افت جرم سوخت (kg/s)}$$

برای به دست آوردن شدت تولید دود (SPR) نیز می‌توان از معادله زیر استفاده نمود:

$$SPR = kV_f \quad (31-4)$$

که در آن SPR شدت تولید دود بر حسب (m^2/s) است. این مقدار را می‌توان بر حسب مساحت سطح در معرض آزمون، نرمالیزه نمود که در این صورت واحد آن به ($1/s$) تبدیل و تحت عنوان شدت رهائش دود (RSR)^۱ بیان می‌شود.
 برای اندازه‌گیری کل تولید دود در بازه زمان آزمون باید از این مقدار انتگرال‌گیری کرد:

$$\Sigma = \int SPR \, t \, dt \quad (32-4)$$

که در آن Σ کل رهائش دود بر حسب (m^2) و t زمان بر حسب ثانیه است.

فصل پنجم

نتایج و بحث

رفتار مصالح و به ویژه مصالح نازک کاری اثر قابل توجهی در شدت گسترش آتش سوزی در ساختمان دارد. بنابراین لازم است تا رفتار این مصالح در برابر آتش تعیین شده، مشارکت آنها در خطر گسترش آتش سوزی بررسی شود. به این منظور ۱۰ نوع از مصالح منتخب، که مشخصات آنها در فصل قبل آمد، به وسیله گرماسنج مخروطی آزمون شد. در این فصل نتایج آزمون‌ها و بحث بر روی آنها ارائه شده است. خطر گسترش آتش سوزی ناشی از این مصالح، با چند روش مختلف بررسی و نتایج به دست آمده از آنها با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین روش موقت دسته‌بندی مواد از نظر واکنش در برابر آتش، ارائه شده در مبحث سوم مقررات ملی ساختمان، با نتایج روش‌های دیگر مقایسه و بحث شده است.

آزمون‌ها در دو تراز تابشی 35 kW/m^2 و 50 kW/m^2 صورت گرفت. خطر آتش سوزی مصالح در تراز 50 kW/m^2 بررسی شد. بابر اسکاوس^۱ [77] در مورد ترازهای تابشی برای آزمون گرماسنج مخروطی بحث کرده است. شارهای کمتر از 35 kW/m^2 در آتش سوزی‌ها کم دیده شده و شارهای کمتر از 25 kW/m^2 تقریباً وجود ندارد. در تحقیقات اروپایی روی مصالح مختلف [78] از تابش‌های ۲۵، ۳۵، ۵۰ و ۷۵ کیلووات بر مترمربع طبق برنامه مشخصی، برای ارزیابی نمونه‌ها استفاده شده است.

1. Babrauskas

نتایج آزمون‌ها در آمده است. پارامترهای ارائه شده در این جدول‌ها، میانگین حاصل از نتیجه سه بار آزمون است. رواداری‌های داده شده در جداول، برابر با انحراف معیار نتایج می‌باشد. در این جدول‌ها از علائم اختصاری به شرح زیر استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این پارامترها، منظور از شدت، مقدار تغییرات پارامتر مورد نظر در واحد زمان است.

چگالی آزمونه ρ : (kg/m³)

ضخامت آزمونه t: (mm)

زمان افروزش TTI: (s)

زمان خاموشی شعله FO: (s)

متوسط جرم اولیه آزمونه m_i : (g)

متوسط افت جرمی ML: (g)

میانگین سرعت افت جرم ویژه Av. Spec MLR: (g/m².s)

میانگین شدت رهائش گرما در ۱۸۰ ثانیه پس از افروزش \dot{q}''_{180} : (kW/m²)

میانگین شدت رهائش گرما در ۳۰۰ ثانیه پس از افروزش \dot{q}''_{300} : (kW/m²)

حداکثر شدت رهائش گرما PRHR: (kW/m²)

زمان رسیدن به حداکثر شدت رهائش گرما T PRHR: (s)

میانگین گرمای مؤثر سوختن Av. EHC: (MJ/kg)

میانگین شدت رهائش گرما Av. RHR: (kW/m²)

کل رهائش گرما THR: (MJ/m²)

کل تولید دود TSR: (m²/m²)

میانگین سطح تیرگی ویژه Av. SEA: (m²/kg)

میانگین بازده تولید دی‌اکسیدکربن Av.CO₂Y: (kg/kg)

میانگین بازده تولید منواکسیدکربن Av.COY: (kg/kg)

در تعدادی از آزمون‌ها، یک شعله کوچک برای زمان نسبتاً زیادی قابل مشاهده بود که زمان آزمون را طولانی‌تر ساخته، کل رهائش گرما را بیشتر می‌نماید. در حالی که عملاً شعله فوق بسیار کوچک است و مشارکتی در گسترش آتش‌سوزی نمی‌تواند داشته باشد. بنابراین برای



جلوگیری از ایجاد خطا در آزمون‌ها و تعیین یک مبنای مناسب‌تر برای انتهای آزمون، معیار «شدت افت وزنی (MLR)»^۱ برای تمام آزمون‌ها در نظر گرفته شد. بر این اساس، کاهش میانگین MLR در یک دوره زمانی یک دقیقه‌ای به کمتر از 150 g/m^2 مبنای انتهای آزمون در نظر گرفته شد.

جدول ۱-۵ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی ده آزمون در تراز تابشی 50 kW/m^2

مشخصه	MDF-1	MDF-2	HDF	PVC-1 (*)	PVC-2 (*)
ρ	۷۸۵/۸	۷۶۸/۶	۹۱۱/۰۳	۱۷۷۶/۶	۱۴۳۴/۹
t	۸/۱	۹/۲	۸/۳	۸/۵	۷/۷
TTI	$6 \pm 2/3$	$14 \pm 7/2$	$36 \pm 0/6$	$12 \pm 2/2$	$9 \pm 0/3$
FO	۷۸۸	۹۸۶	۷۵۳	۱۷۵	۱۷۷
m_i	۶۱/۲۷	۶۸/۳۸	۷۲/۶۸	۳۱/۶۰	۲۶/۹۲
ML	۴۷/۳۳	۵۲/۱۷	۵۵/۶۰	۱۵/۳۲	۱۳/۶۷
Av. Spec MLR	۱۱/۵۸	۱۱/۲۸	۱۱/۸۳	۸/۵۲	۸/۷۱
Av. RHR	۱۵۰/۶۶	۱۵۰/۱۳	۱۵۴/۶۰	۶۰/۸۵	۱۰۳/۷۸
\dot{q}''_{180}	۱۴۴/۲	۱۳۶/۰	۱۶۲/۶	۶۰/۶	۱۰۰/۴
\dot{q}''_{300}	۱۵۲/۰	۱۳۳/۴	۱۵۲/۶	۵۰/۳	۷۲/۷
PRHR	$274 \pm 50/2$	$291 \pm 31/3$	$589/8 \pm 111$	$154/3 \pm 28/4$	$146/1 \pm 8/8$
T PRHR	۲۲۷	۳۹۵	۴۹	۷۱	۳۹
Av. EHC	۱۳/۰۱	۱۳/۳۰	۱۳/۰۶	۷/۲۲	۱۱/۵۳
THR	۶۹/۸۰	۷۸/۸۰	۸۱/۸۳	۱۲/۱۸	۱۷/۹۳
TSR	۳۵۶/۷۷	۳۸۳/۷۷	۱۵۰/۹۳	۹۳۸/۳۸	۹۳۰/۴۷

*. لازم به ذکر است نمونه‌های PVC-1 و PVC-2 دارای شکل شبکه ای دو جداره با ضخامت حدود ۸ میلی متر بودند و چگالی داده شده برای آنها در جدول ۱-۵ مربوط به خود ماده سازنده (یعنی چگالی ورق با ضخامت حدود ۰/۸ میلی متر) است. اما در ادامه در جاهایی که به چگالی سطحی نیاز است، بر اساس وزن واحد سطح نمونه محاسبه و ارائه شده است.

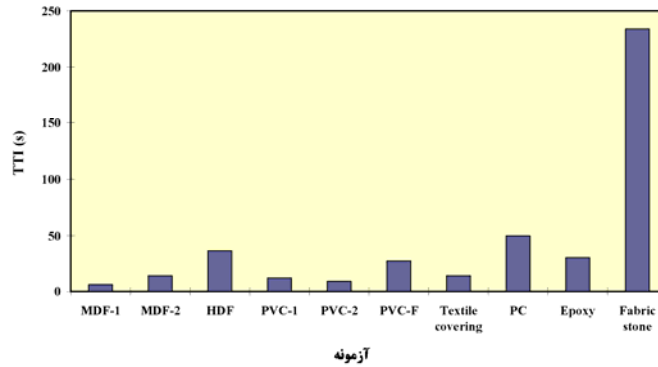
1. Mass Loss Rate

ادامه جدول ۱-۵

Fabric stone	Epoxy	PC	Textile covering	PVC-Flooring	مشخصه
۲۳۷۲/۰	۱۵۴۷/۸۹	۲۰۳/۶	۱۸۵/۷	۱۸۷۷/۵	ρ
۱۲/۶	۹/۱	۶/۱	۵/۲	۲/۰	t
۲۳۴ ± ۴/۳	۳۰ ± ۶/۴	۵۰ ± ۲/۵	۱۴ ± ۱/۵	۲۷ ± ۱/۵	TTI
۷۹۲ ± ۳۴/۵۳	۱۰۲۱ ± ۱۴۴/۶۴	۶۲۳ ± ۱۶۸/۶۸	۳۷۳ ± ۳۰/۱	۱۶۵ ± ۱۲۱/۲	FO
۲۹۲/۵۶	۱۴۱/۱۶	۱۲/۵۲	۹/۶۳	۳۵/۹۴	m_i
۲۴/۶۷	۶۶/۲۰	۷/۸۳	۶/۵۷	۱۰/۲۰	ML
۶/۸۶	۱۰/۸۰	۸/۵۱	۵/۹۵	۷/۷۴	Av.Spec MLR
۱۴۱/۳۶	۲۸۳/۳۹	۱۷۸/۲۹	۲۱۰/۹۱	۱۱۴/۶۷	Av. RHR
۱۵۴/۶	۳۰۳/۲۷	۱۲۲/۳	۱۵۷/۱	۹۴/۷	\dot{q}''_{180}
۱۶۲/۱	۳۰۷/۸۳	۹۰/۵	۱۰۵/۶	۶۶/۵	\dot{q}''_{300}
۲۱۳/۱ ± ۱۱/۵	۴۰۸/۵ ± ۴۳/۹	۶۲۷/۱ ± ۸/۶	۴۷۶/۸ ± ۴۹/۰	۲۲۳/۹ ± ۱۷/۰	PRHR
۳۹۳ ± ۴۶/۱۴	۳۴۱ ± ۲۴/۱۹	۶۴ ± ۲	۶۵ ± ۵/۰۳	۶۵ ± ۱/۱۵	T PRHR
۲۰/۶۳	۲۶/۱۸	۲۰/۹۶	۳۵/۵۶	۱۴/۸۰	Av.EHC
۵۷/۰۳	۱۹۶/۱۰	۱۸/۴۰	۲۶/۲۰	۱۶/۳۳	THR
۱۸۷۳/۵۳	۴۹۵۲/۹۷	۵۴۱/۱۷	۳۵۳/۲۷	۵۹۰/۵۷	TSR

۱-۵ زمان افروزش و مدت زمان شعله‌وری

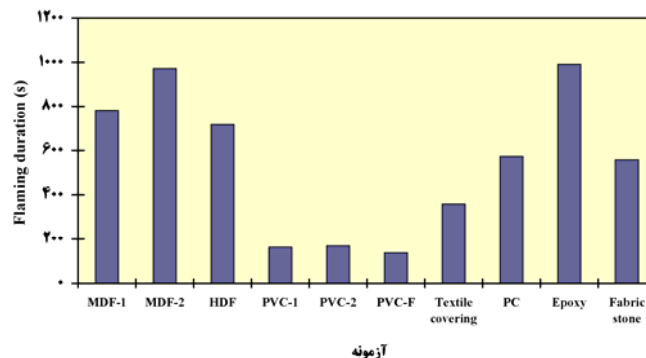
زمان افروزش آزمون‌ها در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. همه آزمون‌ها تحت تابش 50 kW/m^2 مشتعل شدند. سریع‌ترین زمان افروزش مربوط به آزمون 1-MDF بود که تنها در عرض ۶ ثانیه مشتعل شد. آزمون‌های 2-MDF وارداتی، PVC و موکت نیز افروزش سریعی (بین ۹ تا ۱۴ ثانیه) داشتند. طولانی‌ترین زمان افروزش در بین نمونه‌های آزمون شده، مربوط به آزمون سنگ مصنوعی بود (۲۳۴ ثانیه).



شکل ۱-۵ مقایسه زمان افروزش نمونه‌ها

زمان افروزش نشان‌دهنده سادگی شعله‌وری یک نمونه است. به بیان دیگر هر چه زمان افروزش نمونه کوتاه‌تر باشد، آسان‌تر مشتعل شده، پیشروی سطحی شعله بر روی آن می‌تواند سریع‌تر باشد. اکثر نمونه‌های آزمون شده، در شرایط آزمون به سرعت مشتعل شدند. بسیاری از مصالح نسبتاً جدید و دارای پایه پلیمری، در صورت قرارگیری در شرایط آتش‌سوزی به راحتی و در زمان کوتاهی می‌توانند مشتعل شوند. در این بین، نمونه سنگ مصنوعی تنها نمونه‌ای بود که افروزش آن بیش از یک دقیقه به طول انجامید. نتایج زمان افروزش به دست آمده برای اکثر نمونه‌ها تکرارپذیری خوبی نشان داد.

مدت زمان اشتعال پارامتر دیگری است که برای بررسی رفتار ماده در برابر آتش می‌توان از آن استفاده کرد. این پارامتر نشان‌دهنده فاصله زمانی بین افروزش و خاموشی شعله است. مدت زمان اشتعال به عوامل مختلف بستگی دارد که از آن جمله، نوع ماده و چگالی آن را می‌توان نام برد. در شکل ۲-۵ مدت زمان شعله‌وری آزمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲-۵ طول مدت زمان شعله‌وری آزمونه‌ها تحت تابش 50 kW/m^2

بیشترین زمان شعله‌وری مربوط به کف‌پوش اپوکسی با زمان شعله‌وری ۱۰۲۱ ثانیه و بعد از آن، تخته 2-MDF بود که اشتعال آن ۹۸۶ ثانیه به طول انجامید. همچنین مدت اشتعال سنگ مصنوعی نیز طولانی بود (۷۹۲ ثانیه)، در حالی که همین نمونه دیرتر از بقیه نمونه‌ها مشتعل شده بود.

طولانی شدن زمان اشتعال دلایل مختلفی دارد که برخی از مهم‌ترین آنها در زیر می‌آید:

- ۱- در صورتی که چگالی فرآورده زیاد باشد، جرم بیشتری برای سوختن در دسترس خواهد بود، بنابراین ماده به مدت طولانی‌تری می‌تواند بسوزد.
 - ۲- در طی فرایند سوختن، لایه سطحی برخی از محصولات (مانند چوب یا محصولات پایه سلولزی) به صورت زغال در می‌آید و با ادامه فرآیند سوختن، ضخامت لایه زغال بیشتر شده، دسترسی شعله و اکسیژن به سطح سوخت را دشوار می‌سازد؛ بنابراین شدت سوختن کاهش و در پی آن زمان سوختن می‌تواند افزایش یابد. در این موارد، معمولاً سوختن در اکثر زمان همراه با شعله کوچک و شدت رهایش گرمای اندک است.
 - ۳- چنانچه محصولی دارای درصد بالاتری از مواد قابل پیرولیز و قابل اشتعال باشد، مدت زمان بیشتری می‌تواند به سوختن ادامه دهد.
- با توجه به بحث‌های بالا، طولانی شدن زمان سوختن لزوماً به معنای خطرناک بودن محصول نیست و برای تحلیل خطر آتش‌سوزی یک محصول، باید پارامترهای دیگر را نیز در نظر گرفت که در ادامه بیشتر به آن پرداخته خواهد شد.

۵-۲ شدت رهایش گرما

در طول بیش از یکصد سال گذشته آزمون‌های مختلفی برای اندازه‌گیری شدت رهایش گرما ابداع و توسعه داده شده است. اولین آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری این پارامتر در محصولات ویژه‌ای مانند چوب و مصالح کشتی‌ها در سال‌های ۱۹۰۲ تا ۱۹۲۰ توسعه داده شدند [79]. بابراسکاس [79] با انجام آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داد که شدت رهایش گرما مهم‌ترین پارامتر برای تحلیل خطر و تلفات ناشی از آتش‌سوزی است.

منحنی‌های شدت رهایش گرما و مقادیر میانگین و حداکثر شدت رهایش گرمای ناشی از سوختن نمونه‌ها در جدول ۱-۵، شکل ۳-۵ و شکل ۴-۵ نشان داده شده است. به طور کلی و نمونه‌وار، در ابتدای آزمون و قبل از افروزش، شدت رهایش گرما از مقدار کمی برخوردار است، زیرا سطح نمونه هنوز به دمای پیرولیز خود نرسیده است. پس از افروزش، معمولاً شدت رهایش گرما به سرعت افزایش یافته، به اوج خود می‌رسد که مقدار آن به محتوای قابل اشتعال ماده

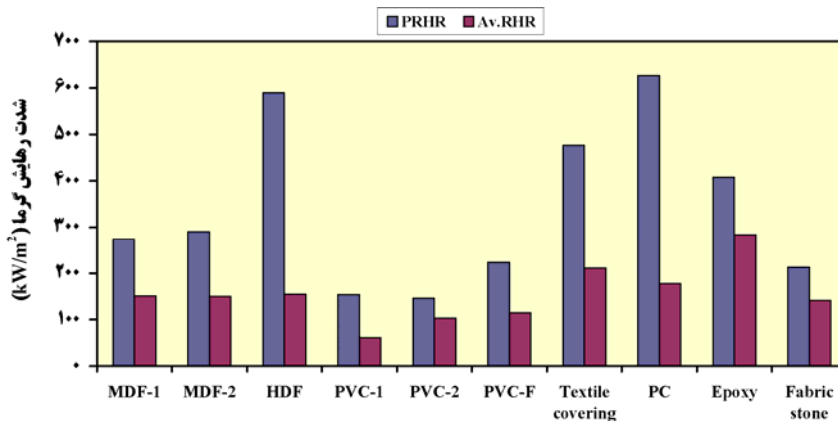


بستگی دارد. سپس با تشکیل یک لایه زغال بر روی سطح سوخته شده، مزاحمت‌هایی برای فرایند سوختن رخ داده، شدت رهایش گرما کاهش می‌یابد [80]. همچنین با کاهش محتوای قابل سوختن ماده، شدت رهایش گرما کاهش یافته، به طرف خاموش شدن می‌رود. گاهی ممکن است با غلبه فشار گاز ناشی از پیرولیز بر سطح زغالی و فرار حجم قابل توجهی به فضای بالای سطح نمونه، یک یا حتی چند پیک دیگر نیز در شدت رهایش گرما مشاهده شود.

بالاترین بیشینه شدت رهایش گرما مربوط به نمونه پلی‌کربنات (PC) با $627/1 \text{ kW/m}^2$ بود که مقدار بسیار زیادی محسوب می‌شود. این نمونه در ثانیه ۶۴ به اوج شدت رهایش گرمای خود رسیده است. پس از پلی‌کربنات، HDF با $589/8 \text{ kW/m}^2$ (در ثانیه ۴۹)، موکت با $476/8 \text{ kW/m}^2$ (در ثانیه ۶۵) و اپوکسی با 408 kW/m^2 (در ثانیه ۳۴۱) نیز شدت رهایش گرمای بالایی از خود نشان دادند. به عبارت دیگر در محدوده زمان‌های مذکور، این نمونه‌ها بیشترین مشارکت در گسترش آتش‌سوزی را از خود نشان داده، بار حرارتی قابل توجهی را به فضای آتش‌سوزی تحمیل خواهند کرد. حداکثر شدت رهایش گرمای HDF به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های MDF بود که دلیل آن در ادامه در قسمت ۴-۵-۲ بحث شده است. لازم به ذکر است که در شکل ۴-۵ برای هر نمونه، فقط منحنی یک نمونه ارائه شده است، بنابراین ممکن است با بحث‌های ارائه شده در خصوص میانگین نتایج، تفاوت‌هایی قابل مشاهده باشد.

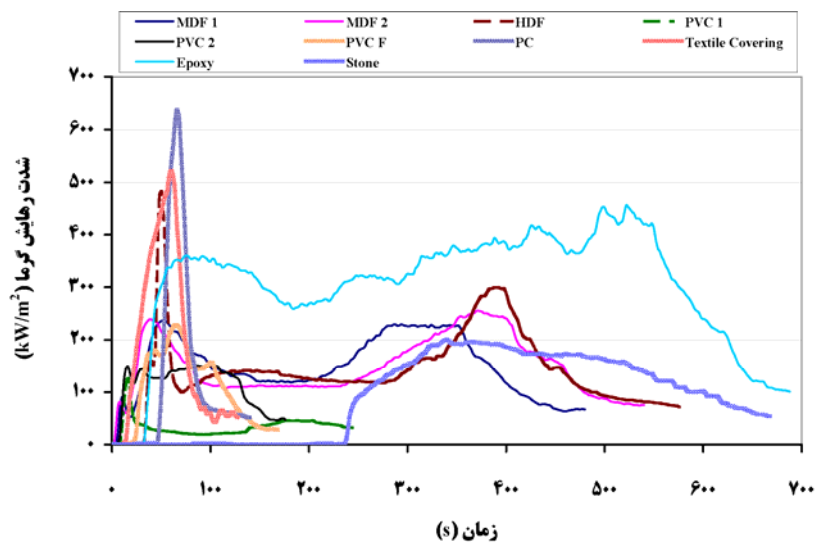
موریس [80] بر روی کامپوزیت‌های پلیمری مختلف با رزین‌های پلی‌استر، وینیل‌استر، فنولیک و اپوکسی آزمون کرد که در بین آنها پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی دارای بیشترین مقادیر پیک رهایش گرما بوده‌اند. هیرشلر [81] رفتار مواد پلیمری مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. وی دریافت که بین ترکیب شیمیایی و ساختار پلیمرها با خواص حریق آنها ارتباط وجود دارد. برای مثال وجود اتم‌های ناهمگن و به ویژه هالوژن‌ها باعث بهبود رفتار حریق مواد می‌شود [81]. این موضوع برای PVC، PTFE و CPVC که دارای مقادیر بالای فلئوئور و کلر در فرمولاسیون خود هستند، به وضوح دیده شد. البته این موضوع را نمی‌توان مطلق تلقی نمود، به عنوان مثال پلی‌کربنات‌ها که در فرمول پایه خود فقط حاوی C، N، O هستند، نیز خواص نسبتاً خوبی در برابر حریق دیده شد. اما در نقطه مقابل پلیمرهایی که دارای اتم‌های ناهمگن (غیر از اکسیژن) نیستند، اکثراً رفتار ضعیفی در برابر حریق نشان می‌دهند که از آن جمله PE، PP و PS را می‌توان نام برد [81]. نکته قابل ذکر در نتایج هیرشلر این است که رفتار خوب یا بد پلیمرهای آزمون شده را در مقایسه با یکدیگر نتیجه‌گیری کرده است (و نه در مقایسه با یک چارچوب خطر گسترش آتش‌سوزی). به عنوان مثال، اگرچه PVC‌های آزمون شده در این پژوهش نیز مانند تجربه هیرشلر در مقایسه با سایر آزمون‌ها رفتار نسبتاً بهتری داشتند، اما

خود آنها نیز رفتار نسبتاً خطرناکی از خود نشان دادند که در ادامه بحث خواهد شد. به علاوه وجود مواد مناسب کندسوزکننده در ماده پلیمری و مقدار آن نیز اهمیت دارد و باید به آن توجه کرد.



آزمونه

شکل ۳-۵ متوسط و حداکثر شدت رهایش گرمای آزمونه‌ها تحت تابش 50 kW/m^2



شکل ۴-۵ منحنی‌های شدت رهایش گرما برای آزمونه‌ها تحت تابش 50 kW/m^2

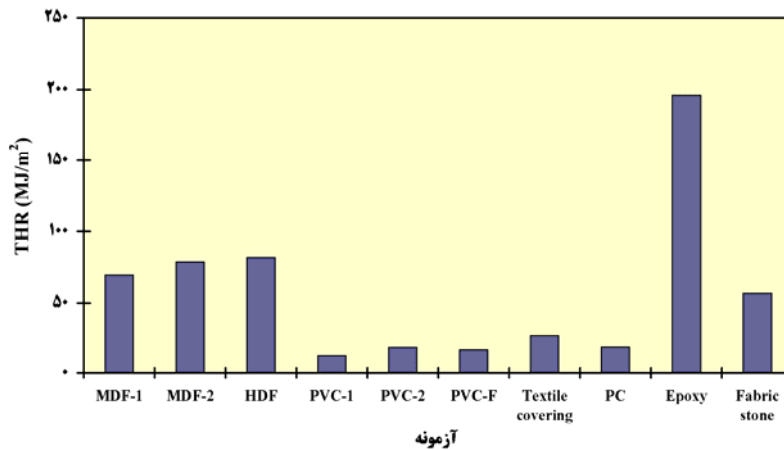


مقادیر \dot{q}''_{180} و \dot{q}''_{300} نیز می‌تواند اطلاعات خوبی برای تفسیر بهتر نتایج به دست دهد. برای نمونه‌های نازک (مانند نمونه‌های PVC، موکت و پلی‌کربنات)، نمونه‌ها عمدتاً به سرعت مشتعل شده‌اند. پلی‌کربنات در این بین استثنا است که افروزش آن حدود ۵۰ ثانیه به طول کشیده، که این نیز به دلیل وجود مواد کندسوزکننده در آن بوده است. این نمونه‌ها سپس تقریباً به سرعت به اوج شدت رهایش گرمای خود رسیده‌اند و به علت نازکی و کم بودن جرم، تقریباً به سرعت نیز خاموش شده‌اند. بنابر این اولاً زمان رسیدن آنها به PRHR کوتاه است و اکثراً در زمانی حدود ۶۰ ثانیه رخ داده است. برای این نمونه‌ها در زمان ۳ تا ۵ دقیقه پس از افروزش، شدت رهایش گرما کاهش قابل توجهی نسبت به PRHR نشان می‌دهد. به عنوان مثال، PRHR پلی‌کربنات حدود 627 kW/m^2 بود که در ثانیه ۶۴ رخ داده است، اما \dot{q}''_{180} و \dot{q}''_{300} برای آن به ترتیب 122 kW/m^2 و 90 kW/m^2 بود. به عبارت دیگر، این مواد به سرعت وارد آتش‌سوزی شده، مشارکت شدیدی در دقایق ابتدایی آتش‌سوزی دارند، اما به سرعت نیز جرم آنها تمام شده، مشارکت آنها در آتش‌سوزی تمام می‌شود. بر عکس برای مواد ضخیم (شامل تخته‌های MDF و HDF، کفپوش اپوکسی و سنگ مصنوعی)، به علت محتوای جرم سوختنی بیشتر، سوختن ماده می‌تواند مدت بیشتری ادامه یابد. بالا بودن مقادیر \dot{q}''_{180} و \dot{q}''_{300} برای این نمونه‌ها می‌تواند نشانگر این باشد که جرم قابل سوختن زیادی وجود داشته و با RHR زیاد به سوختن ادامه می‌دهد. برای این نمونه‌ها ممکن است دو یا چند PRHR مشاهده شود. همچنین ممکن است کاهش شدید وتند منحنی RHR رخ ندهد، بلکه به آرامی کاهش یابد. این رفتار برای اپوکسی به خوبی قابل مشاهده است، به طوری که \dot{q}''_{180} و \dot{q}''_{300} برای آن همچنان عدد بالای 300 kW/m^2 بوده است. طبعاً چنین نمونه‌ای می‌تواند برای مدت طولانی به مشارکت در آتش‌سوزی ادامه دهد، اما چگونگی این مشارکت شدیداً به زمان افروزش آن نیز بستگی دارد که در ادامه دیده خواهد شد.

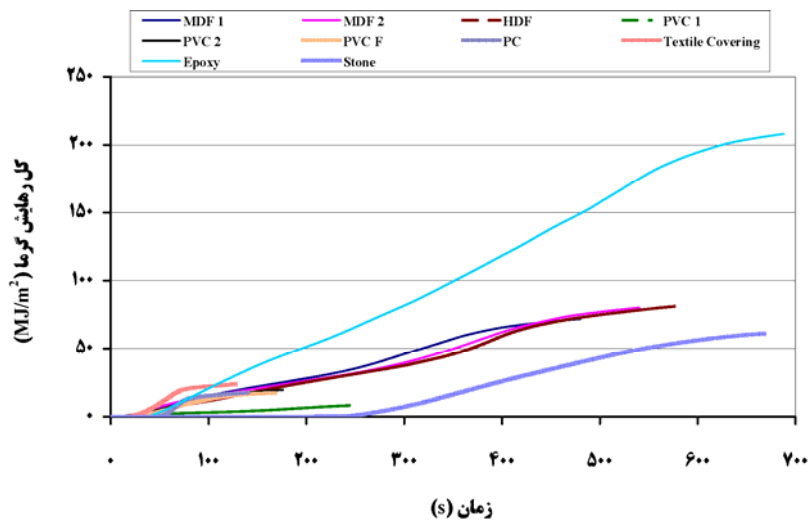
۳-۵ مقدار کل رهایش گرما

مقدار کل حرارت آزاد شده بر اثر سوختن نمونه‌ها در جدول ۱-۵ و شکل ۵-۵ و ۶-۵ ارائه شده است. این مقدار در واقع انتگرال زیر منحنی شدت رهایش گرما تا لحظه انتهای آزمون است. هر چه THR ماده بیشتر باشد، می‌تواند مشارکت بیشتری در گسترش آتش‌سوزی داشته باشد. در

بین نمونه‌های آزمون شده، کل رهایش گرمای کف پوش اپوکسی نسبت به سایر نمونه‌ها بسیار بالاتر بود.



شکل ۵-۵ کل رهایش گرمای برای نمونه‌ها تحت تابش 50 kW/m^2

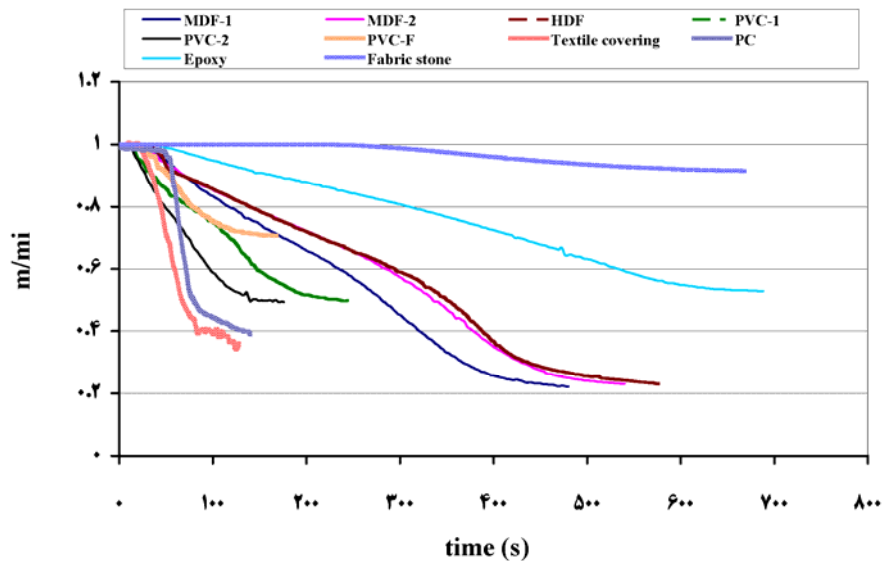


شکل ۵-۶ منحنی کل رهایش گرمای ناشی از سوختن نمونه‌ها تحت تابش 50 kW/m^2

در شکل ۵-۷ جرم پسماند نسبی (نسبت جرم در هر لحظه به جرم اولیه) بر حسب زمان نشان داده شده است. مقایسه این شکل با منحنی‌های THR و RHR جالب توجه است. نمونه‌های



موکت و پلی کربنات، اگرچه دارای حداکثر شدت رهائش گرمای زیادی بودند، اما به علت جرم اندک (یعنی چگالی و ضخامت کم)، جرم آنها سریعاً به پایان رسیده است، بنابراین THR آنها چندان بالا نیست. نمونه کفپوش اپوکسی دارای جرم زیاد بوده، PRHR آن نیز نسبتاً بالا بوده، تا ثانیه حدود ۷۰۰، حدود نیمی از وزن آن از دست رفته است (قسمت قابل سوختن). نمونه سنگ مصنوعی تا نزدیک حدود ثانیه ۳۰۰ مشتعل نشده، نهایتاً حدود ۱۰٪ از جرم آن سوخته است (به عبارت دیگر حدود ۹۰ درصد نمونه از نوع معدنی و غیرقابل سوختن بوده است)، که البته خود به علت ماهیت پلیمر چسباننده، PRHR نسبتاً بالایی داده است. سایر نمونه‌ها دارای رفتار حد واسطی هستند که از منحنی‌های ارائه شده، قابل مشاهده است. باقی ماندن حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد وزن نمونه‌های PVC در پایان آزمون، باید به علت درصد پودرهای معدنی به کار رفته در آنها باشد.



شکل ۵-۷ منحنی جرم نسبی بر حسب زمان تحت تابش 50 kW/m^2

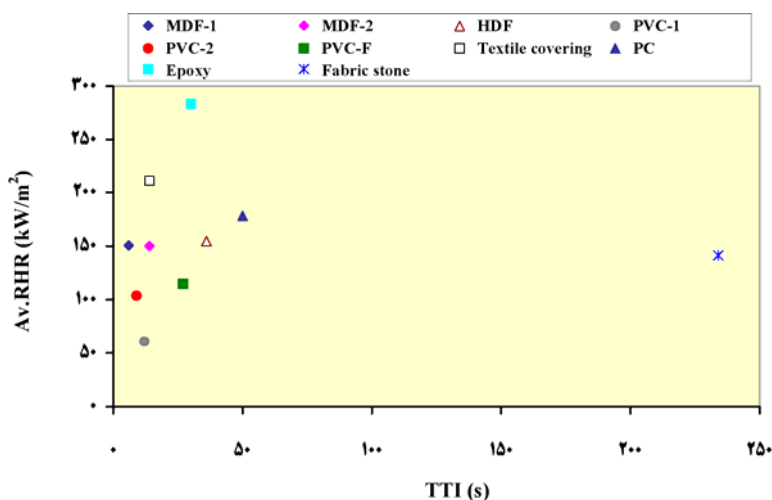
۴-۵ بررسی ارتباط بین پارامترهای آتش

در آزمون‌های صورت گرفته پارامترهای مختلفی اندازه‌گیری شد که از جمله می‌توان زمان افروزش، شدت رهائش گرما، شدت رهائش دود، کل رهائش گرما، کل رهائش دود و آزاد شدن گازهای سمی (مانند CO) را نام برد. هر یک از این پارامترها از دیدگاه مختلفی برای تفسیر رفتار یک ماده در برابر آتش می‌تواند استفاده شود. اما یک پرسش این است که آیا بین خود

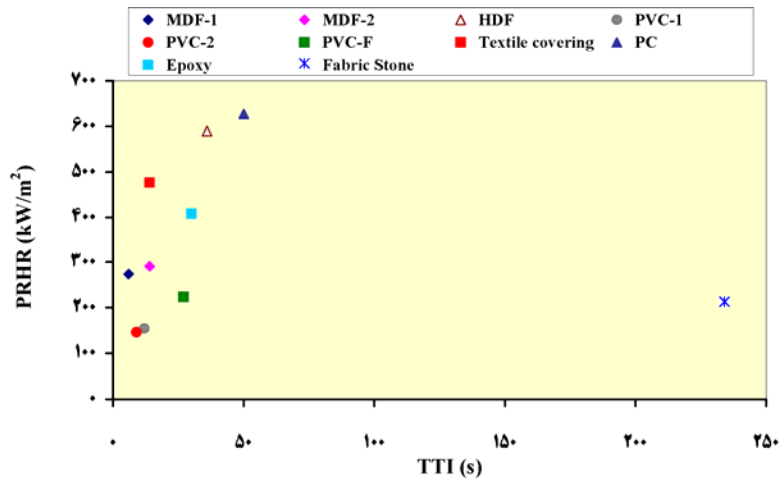
این پارامترها می‌توان ارتباط خاصی برقرار نمود؟ در صورت وجود چنین ارتباطی، تفسیر پارامترهای مختلف آتش مواد به نحو بهتری امکان‌پذیر خواهد بود. همچنین در صورت دست داشتن مقادیر برخی از پارامترها، می‌توان مقادیر پارامترهای دیگر را نیز پیش‌بینی نمود. در این بخش، وجود چنین ارتباطی بررسی می‌شود.

۵-۴-۱ ارتباط بین پارامترهای رهایش گرما با زمان افروزش

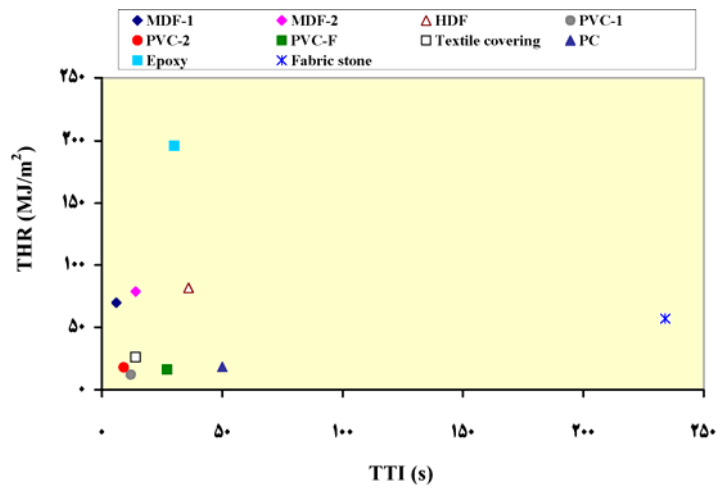
یکی از خواص مهم مواد در برابر آتش، زمان افروزش است. دیری یا زودی زمان افروزش می‌تواند نشانه‌ای از سختی یا آسانی اشتعال ماده در شرایط آزمون باشد. از این روی به تبع آن می‌توان حدس زد که برخی از مشخصات آتش ماده (مانند شدت و کل رهایش گرما و نیز تولید دود) به زمان افروزش وابسته باشد. به عبارت دیگر می‌توان حدس زد که پارامترهای رهایش گرما (کل و شدت رهایش) با زمان افروزش نسبت عکس داشته باشد و هر چه زمان افروزش بالاتر باشد، ماده ایمن‌تر و پارامترهای حرارتی آن کمتر باشد. این موضوع برای نمونه‌های آزمون‌شده بررسی شد که در شکل ۵-۸ تا شکل ۵-۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۸ امتحان وابستگی میانگین شدت رهایش گرما به زمان افروزش برای نمونه‌ها



شکل ۹-۵ امتحان وابستگی حداکثر شدت رهائش گرما به زمان افروزش برای نمونه‌ها



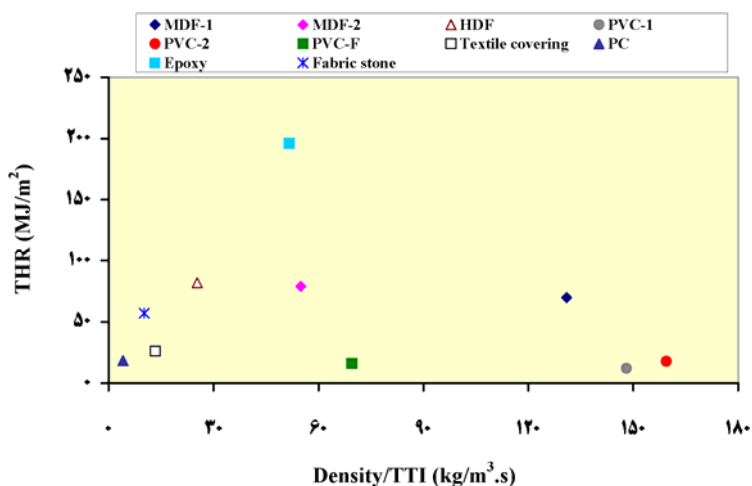
شکل ۱۰-۵ امتحان وابستگی کل رهائش گرما به زمان افروزش برای نمونه‌ها

نتایج نشان داد که چنین وابستگی خاصی بین پارامترهای رهائش گرما و زمان افروزش وجود ندارد. زمان افروزش اکثر آزمونه‌ها در محدوده ۶ تا ۵۰ ثانیه بود و نسبتاً نزدیک به هم بودند، در حالی که اختلاف بین پارامترهای حرارتی آنها گاه قابل توجه است. به عنوان مثال، مشاهده می‌شود با وجود نزدیکی زمان افروزش نمونه‌های HDF، Epoxy و PVC-F، بیشینه شدت رهائش گرما برای آنها به طور قابل توجهی متفاوت است.

در مورد THR نیز همین نتیجه به دست آمد (شکل ۵-۱۰). یک علت مهم برای این موضوع، می‌تواند تأثیر چگالی نمونه و زغال شدن روی سطح آزمون باشد. برای بررسی بیشتر موضوع، اثر چگالی نیز در نظر گرفته شد و فرض گردید که کل رهایش گرما باید با چگالی نسبت مستقیم و با زمان افروزش نسبت عکس داشته باشد:

$$THR \approx \rho / TTI \quad (1-5)$$

نمودار کل رهایش گرما بر حسب نسبت چگالی به زمان افروزش، در شکل ۵-۱۱ رسم شده است.



شکل ۵-۱۱ امتحان ارتباط کل رهایش گرما با نسبت چگالی به زمان افروزش

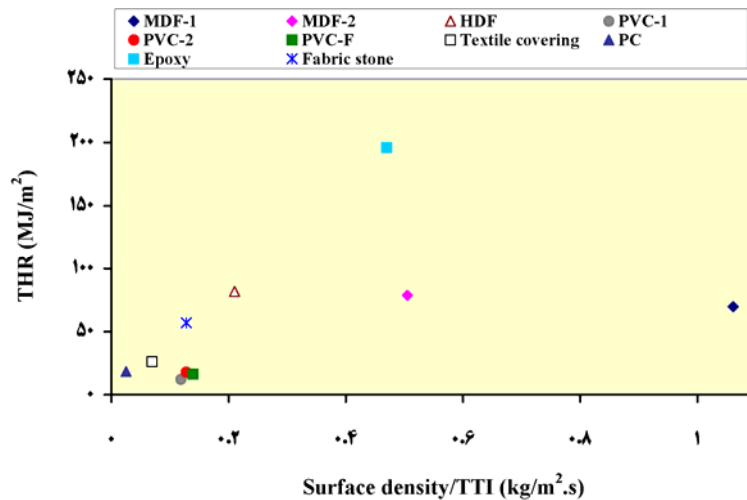
در نظر گرفتن چگالی ماده در نمودار باعث شد که نتایج از یکدیگر بازتر شده، تا حدودی ارتباط بین این پارامترها مشاهده شود، اما باز هم برای تعدادی از نمونه‌ها این موضوع صدق نمی‌کند. همان‌گونه که در شکل ۵-۱۱ دیده می‌شود، برای نمونه‌های پلی‌کربنات، موکت، سنگ مصنوعی، HDF و اپوکسی، این ارتباط نسبتاً قابل مشاهده است و با بالا رفتن نسبت چگالی به زمان افروزش، THR نیز افزایش یافته است، اما در سایر نمونه‌ها یک ارتباط سر راست بین این پارامترها وجود ندارد. به ویژه برای دو نوع نمونه MDF و نمونه‌های PVC انحراف از این موضوع دیده می‌شود.

با دقت در نتایج MDF-1 و MDF-2 ملاحظه می‌شود که رواداری زمان افروزش MDF-2 حدود ۷ ثانیه است و با توجه به زمان افروزش کوتاه این ماده، این مقدار ۷ ثانیه خود را در

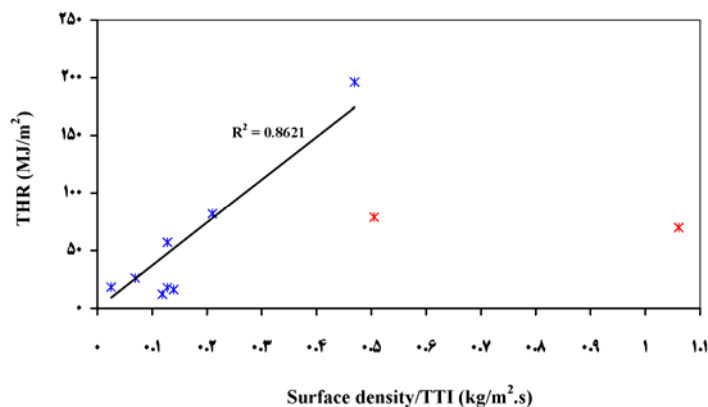


نسبت ρ/TTI به طور قابل توجهی نشان داده است. با در نظر گرفتن این موضوع، اختلاف بین دو نوع MDF در نمودار می‌تواند اندک شود. در این صورت، THR این دو، نسبت به مقدار ρ/TTI در مقایسه با موادی که ارتباط خوبی نشان دادند، اندک است که آن را می‌توان با زغالی شدن سطح نمونه در حین سوختن توجیه کرد.

با دقت در نتایج، می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های PVC دارای جداره با ضخامت اندکی بوده‌اند، بنابراین جرم آنها نیز کم بوده و در THR اثر گذاشته است. این موضوع می‌تواند بر روی رابطه امتحان شده در شکل ۵-۱۱ اثر بگذارد. برای از بین بردن این اثر، به جای چگالی از چگالی سطحی (یا حاصل ضرب چگالی در ضخامت نمونه) استفاده شد. نمودار به دست آمده در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است که همبستگی نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. نقاط مربوط به نمونه‌های PVC تقریباً روی یکدیگر منطبق شدند، در حالی که در منحنی‌های قبلی با هم فاصله داشتند. دو انحراف قابل توجه در این شکل، کماکان نمونه‌های MDF-1 و MDF-2 هستند که در بالا بحث شد و باید به دلیل خطای زمان آفرزش باشد. سایر پراکندگی‌ها می‌تواند به علت پراکندگی ذاتی زمان آفرزش باشد. با حذف این دو نقطه همبستگی قابل قبولی بین میانگین نتایج حاصل به دست آمد که در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲ امتحان ارتباط کل رهایش گرما با نسبت چگالی سطحی به زمان آفرزش

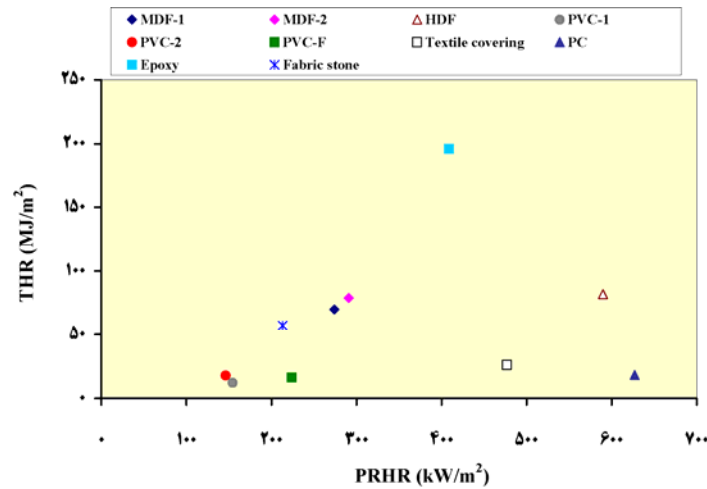


شکل ۵-۱۳ وابستگی خطی کل رهایش گرما با نسبت چگالی سطحی به زمان افروزش با حذف MDF-1 و MDF-2

بنابراین با امتحان روابط مختلف بین پارامترهای حرارتی با زمان افروزش، تنها رابطه نسبتاً قابل قبول، بین THR و ρ_s/TTI به دست آمد. این رابطه نشان می‌دهد که با کم شدن چگالی سطحی و افزایش زمان افروزش، کل رهایش گرمایی که به فضای آتش‌سوزی تحمیل می‌شود، کاهش می‌یابد. زمان افروزش را می‌توان به وسیله مواد کندسوز کننده یا پوشش‌های محافظت‌کننده مناسب، افزایش داد و چگالی سطحی نیز با استفاده از ضخامت کمتری از نمونه حاصل می‌شود (اگرچه در غیاب مواد کندسوز کننده، کم شدن ضخامت می‌تواند به سریع‌تر شدن افروزش بینجامد).

۵-۴-۲ ارتباط کل رهایش گرما با حداکثر شدت رهایش گرما

به عنوان یک ارتباط دیگر بین پارامترهای آتش، می‌توان حدس زد در صورتی که حداکثر شدت رهایش گرما در نمونه‌ای بالاتر باشد، نهایتاً باید کل رهایش گرمای ناشی از آن نیز بیشتر باشد. برای امتحان این موضوع، نمودار کل رهایش گرما بر حسب شدت رهایش گرما رسم شد (شکل ۵-۱۴).



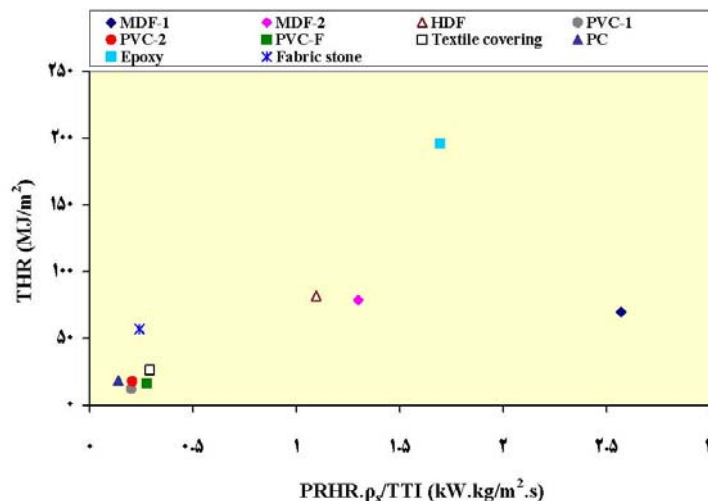
شکل ۵-۱۴ امتحان ارتباط بین کل رهائش گرما با بیشینه شدت رهائش گرما

نتایج نشان می‌دهد که برای اکثر نمونه‌ها، با افزایش PRHR، کل رهائش گرما نیز اضافه شده، فرض بالا تا حدودی می‌تواند درست باشد. اما برخی نمونه‌ها مانند HDF، موکت و پلی‌کربنات انحراف قابل توجهی از این موضوع نشان دادند. دو نمونه موکت و پلی‌کربنات دارای PRHR بسیار بالایی بودند که به ماهیت ماده ارتباط دارد، اما با این وجود مقادیر THR آنها نسبتاً اندک است. این موضوع اساساً به علت ضخامت پایین و جرم کم این دو نمونه است. اما برای HDF موضوع متفاوت است. در منحنی‌های RHR آزمونه‌های HDF دو پیک بارز دیده می‌شود. پیک اول به علت افروزش و سوختن مقدار زیادی از گازهای ناشی از پیرولیز رخ داده است. سپس یک لایه زغال روی سطح آزمونه را فراگرفته، شدت رهائش گرما را به نحو قابل توجهی کاهش داده است، اما دوباره پس از حدود ۲ تا ۳ دقیقه، لایه زغال دچار ترک‌های زیاد شده، محصولات پیرولیز به محیط فرار کرده‌اند و باعث افزایش دوباره PRHR شده است (البته این پیک کمتر از پیک اول است). متعاقباً دوباره زغال بیشتر تشکیل شده، به علاوه حجم گازهای پیرولیز کاهش یافته است. در مجموع این رفتار باعث شده تا THR در این نمونه، چندان متناسب با مقدار بالای PRHR نباشد. با این اوصاف به نظر می‌آید که قاعدتاً برای نمونه‌های MDF نیز باید رفتار مشابهی دیده شود، در حالی که رفتار آنها متفاوت بود. علت اصلی در تفاوت ماهیت این دو نوع تخته الیافی است. تخته HDF دارای مقادیر بیشتر الیاف چوب است که با فشار بیشتری به هم متراکم شده‌اند. بنابراین جرم الیاف چوبی قابل سوختن بیشتر بوده، چگالی نمونه نیز بیشتر است (در اینجا حدود 910 kg/m^3 برای HDF در مقایسه با حدود 770 kg/m^3 برای نمونه‌های MDF). بنابراین اگرچه نمونه‌های MDF الگوی رفتاری

مشابه با HDF از نظر شکل منحنی شدت رهائش گرما و زغال شدن سطح نشان داده‌اند، اما PRHR آنها بسیار کمتر از HDF بوده است. تفاوت جالب دیگر بین این دو، این است که در نمونه‌های MDF پیک PRHR دوم نسبت به پیک اول بالاتر بوده است و این رفتار عیناً در هر ۶ آزمون مشاهده شد.

در مجموع ارتباط روشنی بین کل رهائش گرما و نقطه حداکثر شدت رهائش گرما به دست نیامد. برای اصلاح اثرات بیان شده در فوق و بررسی مجدد چگونگی ارتباط بین THR با شدت رهائش گرما، منحنی THR بر اساس نسبت $(PRHR \times \text{surface density} / TTI)$ رسم شد (شکل ۵-۱۵). برای درک بهتر دیمانسیون عبارت مورد استفاده، در این منحنی به جای شدت رهائش گرمای واحد سطح از مقدار حداکثر شدت رهائش گرما استفاده شد (برای این کار حداکثر شدت رهائش گرما در سطح نمونه یعنی 0.10884 m^2 ضرب شد). همان‌گونه که دیده می‌شود ارتباط خوبی بین کل رهائش گرما با نسبت $PRHR \cdot \rho_s / TTI$ وجود دارد. به عبارت دیگر کل رهائش گرما به ماهیت سوختنی ماده (PRHR) و چگالی سطحی آن ارتباط مستقیم و با زمان افروزش نسبت عکس دارد. این رابطه، ارتباط ارائه شده در شکل ۵-۱۲ و شکل ۵-۱۴ را بهبود می‌دهد. با حذف دو نقطه MDF-1 و MDF-2 (به دلایلی که قبلاً ذکر شد)، رابطه زیر به دست آمد (با $R^2 = 0.903$):

$$THR = 104.3 PRHR \cdot \rho_s / TTI$$



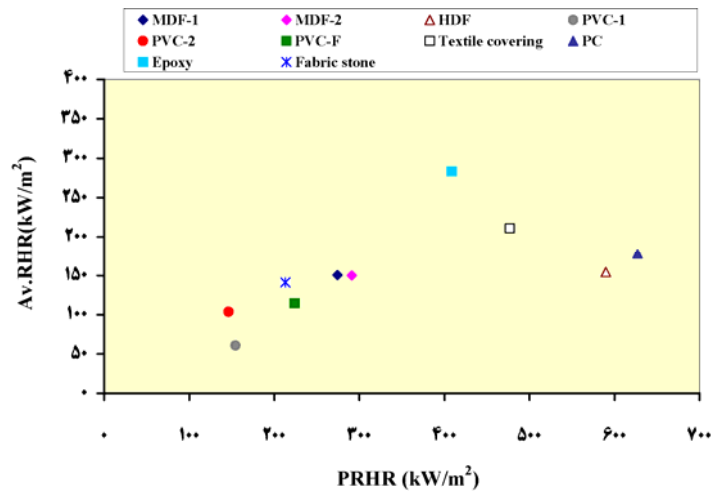
شکل ۵-۱۵ رابطه بین کل رهائش گرما با حداکثر شدت رهائش گرما، چگالی سطحی و زمان افروزش



این رابطه نشان می‌دهد که با کم شدن چگالی سطحی و حداکثر شدت رهایش گرما و افزایش زمان افروزش، کل رهایش گرمایی که به فضای آتش‌سوزی تحمیل می‌شود، کاهش می‌یابد. استفاده از مواد کندسوز کننده یا پوشش‌های محافظت‌کننده مناسب، باعث می‌شود تا زمان افروزش افزایش یافته، حداکثر شدت رهایش گرما کاهش یابد.

۳-۴-۵ ارتباط بین حداکثر شدت رهایش گرما با میانگین شدت رهایش گرما

موریتس [80] ارتباط خطی خوبی بین PRHR و AV RHR برای کامپوزیت‌های پلیمری مشاهده کرد که در تابش‌دهی‌های مختلف از ۲۵ تا ۱۰۰ کیلو وات بر مترمربع آزمون شده بودند. بنابراین این ارتباط نیز بررسی شد (شکل ۵-۱۶). دوباره غیر از دو نمونه HDF و PC ارتباط نسبتاً خوبی مشاهده شد و با بالا رفتن حداکثر شدت رهایش گرما، میانگین شدت رهایش گرما نیز به صورت تقریباً خطی با آن افزایش یافت (که البته به طور منطقی نیز تا حدودی انتظار می‌رفت).

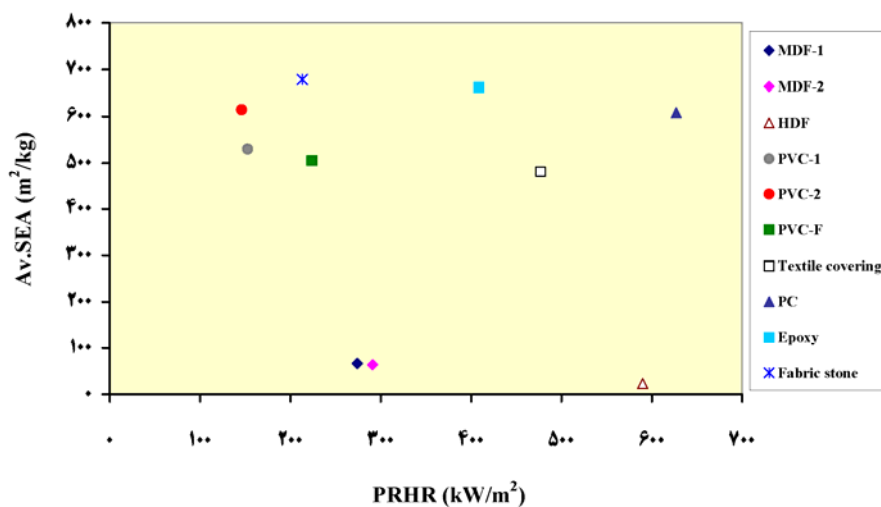


شکل ۵-۱۶ امتحان ارتباط بین میانگین رهایش گرما با بیشینه شدت رهایش گرما

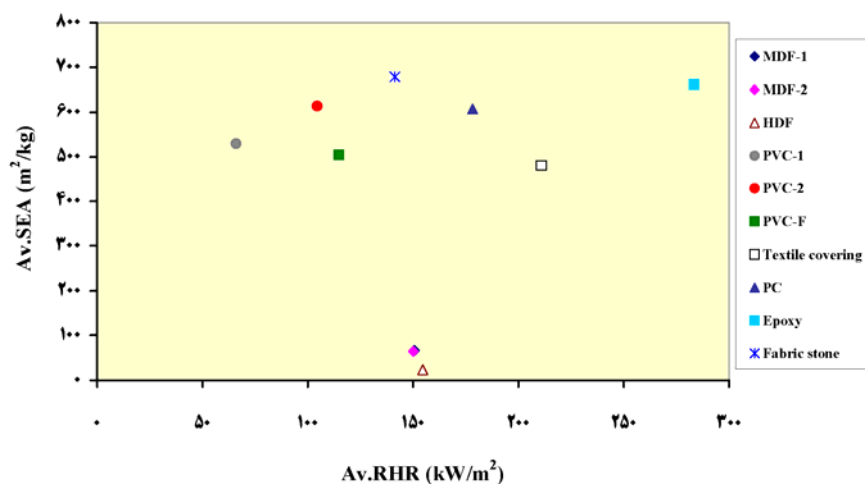
۴-۴-۵ ارتباط بین رهایش دود و میانگین شدت رهایش گرما

ارتباط دیگری که بین پارامترها بررسی شد، ارتباط بین رهایش دود با پارامترهای حرارتی بود. در شکل ۵-۱۷ ارتباط بین میانگین رهایش دود و بیشینه شدت رهایش گرما رسم شده است که رابطه مشخصی را نشان نداد. حدس زده شد که این ارتباط باید برای میانگین شدت رهایش

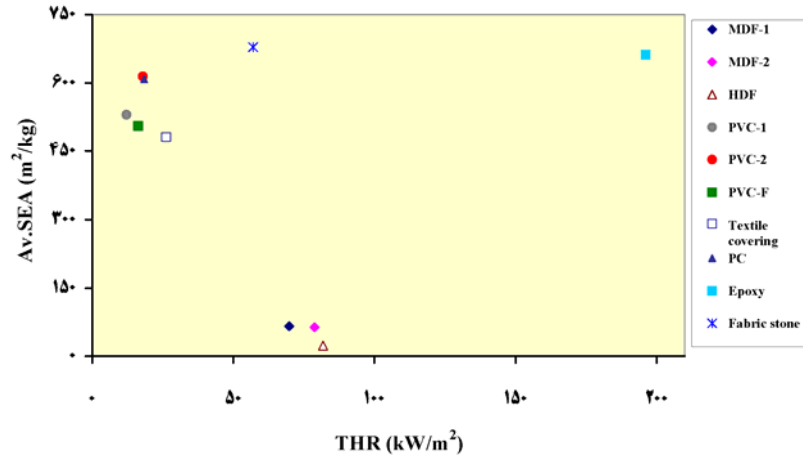
گرما بهتر باشد، اما باز هم رابطه خوبی دیده نشد (شکل ۵-۱۸). به همین ترتیب ارتباطی بین میانگین رهایش دود و کل رهایش گرما نیز دیده نشد (شکل ۵-۱۹). میانگین رهایش دود ناشی از سوختن نمونه‌ها تقریباً در دو محدوده بالا بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ مترمربع بر کیلوگرم و پایین حدود ۲۰ تا ۷۰ مترمربع بر کیلوگرم قرار گرفت و ارتباط خاصی با شدت رهایش گرما یا کل رهایش گرما نشان نداد.



شکل ۵-۱۷ امتحان ارتباط میانگین رهایش دود با بیشینه شدت رهایش گرما



شکل ۵-۱۸ امتحان ارتباط رهایش دود با میانگین شدت رهایش گرما



شکل ۵-۱۹ امتحان ارتباط رهایش دود با کل رهایش گرما

۵-۵ اثر تراز تابشی

به منظور ارزیابی رفتار فرآورده‌های آزمون شده در تراز تابشی کمتر از 50 kW/m^2 ، آزمون روی این مصالح در تراز 35 kW/m^2 نیز انجام شد که نتایج در جدول ۵-۲ آمده است.

جدول ۵-۲ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی ۱۰ نوع آزمون در تراز تابشی 35 kW/m^2

شماره آزمون	MDF-1	MDF-2	HDF	PVC-1	PVC-2
ρ	۷۸۲/۹	۷۸۵/۴	۹۲۴/۴	۳۷۵/۷	۳۵۴/۷
t	۸/۲	۹/۱	۸/۳	۸/۵	۷/۷
TTI	$105 \pm 71/6$	$105 \pm 14/6$	$71 \pm 3/6$	$18 \pm 0/6$	$34 \pm 28/1$
FO	$727 \pm 138/9$	$876 \pm 281/68$	$783 \pm 63/1$	28 ± 1	$100 \pm 118/9$
m_i	۶۲/۴	۶۸/۶	۷۳/۰	۲۹/۹	۲۶/۱
ML	۴۷/۲	۵۰/۹	۵۴/۶	۱۴/۲	۱۲/۴
Av.Spec MLR	۱۰/۱	۸/۸	۹/۸	۶/۴	۶/۴
Av.RHR	۱۳۹/۰	۱۲۰/۵	۱۲۰/۵	۲۰/۷	۴۴/۹
\dot{q}''_{180}	۱۲۹/۸	۱۰۳/۶۳	۱۱۰/۱	۲۰/۰	۴۲/۶
\dot{q}''_{300}	۱۴۰/۰	۹۹/۵	۱۰۷/۱	۲۱/۵	۳۴/۵
PRHR	$247/3 \pm 38/3$	$216/9 \pm 32/3$	$405 \pm 100/2$	$97/16 \pm 16/4$	$112/05 \pm 25/3$



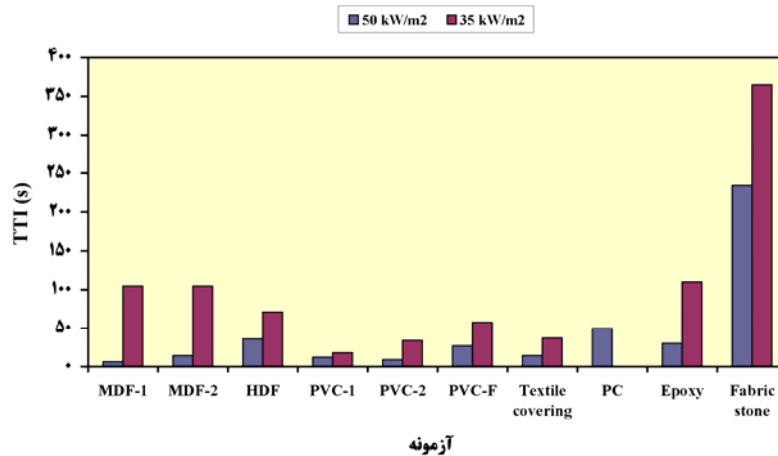
ادامه جدول ۵-۲

Stone 1	Epoxy	PC	Textile covering	PVC-F	شماره آزمون
۴۰	۲۲	۲۱۹	۵۱۲	۴۲۰	T PRHR
۶/۷	۳/۲	۱۲/۴	۱۳/۶	۱۳/۸	Av.EHC
۸/۳	۵/۲	۷۵/۹	۷۶	۶۸/۸	THR
۸۷۷/۶	۸۷۷	۱۰۱/۱	۳۴۱/۹	۳۴۰/۴	TSR
۶۳۴/۵	۵۵۱/۶	۱۵/۱	۴۴/۸	۴۱/۹	Av. SEA
۰/۷۴	۰/۵۶	۱/۱	۱/۲	۱/۲	Av.CO ₂ Y
۰/۰۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	Av.COY
۲۳۶۹/۴	۱۶۳۴/۸	۲۰۴/۳۶	۱۷۹/۵	۱۸۰۹/۸	ρ
۱۲/۵۲	۱۰/۰۳	۶/۱۱	۵/۰۴	۲/۰۲	t
۳۶۵±۱۳/۶	۱۱۰±۳/۵	-	۳۷±۱۳/۸۹	۵۸±۱۷/۹	TTI
۱۱۰۴±۶۰/۴۶	±۱۱۶/۹ ۱۳۱۵	-	۵۰۱±۱۱۶/۵	۱۵۴±۹۳	FO
۲۹۷/۰	۱۵۸/۹۲	۱۲/۶۵	۹/۲۷	۳۵/۱۰	m_i
۲۴/۸	۷۴/۷	۰/۲	۶/۱	۱۰/۳	ML
۶/۰	۹/۵	۰/۲	۴/۷	۶/۶	Av.Spec MLR
۱۲۹/۶	۲۵۷/۷	۳/۱	۱۶۷/۸	۷۵/۴	Av.RHR
۱۴۰/۷	۲۸۳/۳	۴/۴	۱۳۷/۶	۶۷/۳	\dot{q}''_{180}
۱۴۷/۳	۲۷۰/۲	۳/۷	۹۲/۴	۵۸/۰	\dot{q}''_{300}
۱۹۲/۹±۱۳/۱	۳۴۹±۲۵/۱۴	6.5	۲۹۴/۱±۵/۳	۱۴۳/۸±۱۱۵	PRHR
۵۰۹	۴۹۱	52.7	۹۳	۱۵۵	T PRHR
۲۱/۷	۲۷/۱	۱۳/۳	۳۵/۸	۱۰/۴	Av.EHC
۶۱/۶	۲۲۹/۳	۰/۴	۲۳/۷	۱۱/۸	THR
۱۸۳۲/۵	۵۰۴۸/۳	۲۲/۴	۳۳۶/۹	۶۱۴/۵	TSR
۶۵۶/۲	۵۹۷/۸	۳۷۳/۷	۴۹۰/۱	۴۵۹/۸	Av. SEA
۲/۰	۱/۷	۱۲/۷	۲/۴	۱/۱	Av.CO ₂ Y
۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵	Av.COY



۵-۵-۱ زمان افروزش

چنانچه پیشتر گفته شد، زمان افروزش نشان‌دهنده سادگی شعله‌وری یک نمونه است، بنابراین انتظار می‌رود با افزایش شدت تابش، اشتعال آزمون‌ها آسان‌تر باشد. شکل ۵-۲۰ زمان افروزش آزمون‌ها را در تراز تابشی 35 kW/m^2 را در مقایسه با تراز تابشی 50 kW/m^2 نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، زمان افروزش آزمون‌ها در تراز تابشی 35 kW/m^2 به مراتب بیشتر است.



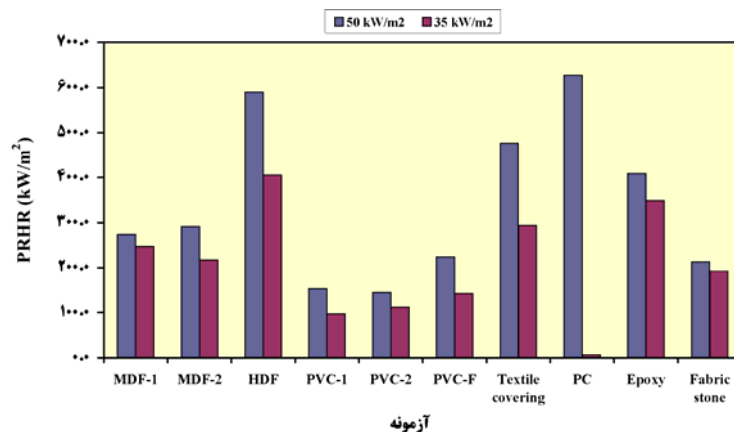
شکل ۵-۲۰ مقایسه زمان افروزش آزمون‌ها در دو تراز 35 kW/m^2 و 50 kW/m^2

بین نمونه‌های مورد آزمون، به ترتیب سنگ مصنوعی، کف‌پوش اپوکسی و نمونه‌های MDF بیشترین زمان افروزش را داشتند که در مقایسه با تراز تابشی 50 kW/m^2 بسیار طولانی‌تر بود. کوتاه‌ترین زمان افروزش به نمونه‌های PVC اختصاص دارد. نمونه پلی‌کربنات در تراز 35 kW/m^2 مشتعل نشد.

۵-۵-۲ شدت رهایش گرما

بالاترین بیشینه شدت رهایش گرما مربوط به نمونه HDF با $405/0\text{ kW/m}^2$ بود. این نمونه در ثانیه ۲۱۹ به اوج شدت رهایش گرمای خود رسید. پس از آن، اپوکسی با $349/0\text{ kW/m}^2$ (در ثانیه ۴۹۱)، شدت رهایش گرمای بالایی از خود نشان داد. در این تراز نیز مشابه با تراز تابشی 50 kW/m^2 ، حداکثر شدت رهایش گرمای HDF به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های

MDF بود. شکل ۵-۲۱ بیشینه شدت رهائش گرما را در دو تراز 35 kW/m^2 و 50 kW/m^2 نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۱ مقایسه بیشینه شدت رهائش گرما از نمونه‌ها در دو تراز 35 kW/m^2 و 50 kW/m^2

همچنین با مقایسه داده‌های جدول‌های ۵-۱ و ۵-۲ مشاهده می‌شود که مقدار میانگین شدت رهائش گرما ($Av.RHR$) به طور منظم برای همه نمونه‌های مورد آزمون با افزایش تراز تابشی افزایش نشان داده است.

۵-۶ ارزیابی و دسته‌بندی خطرپذیری آتش‌سوزی

در این قسمت خطر گسترش حریق برای مواد آزمون شده، با استفاده از نرم‌افزار Conetools، معادله (۲-۳۴) ارائه شده توسط اوستمان و نیز با استفاده از روش موقت ارائه شده در پیش‌نویس مبحث سوم مقررات ملی ساختمان ایران بحث می‌شود. پارامترهای اضافی مورد نیاز برای طبقه‌بندی در جدول ۵-۳ و نتایج طبقه‌بندی در جدول ۵-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۵ نتایج آزمون مورد نیاز برای طبقه‌بندی خطر حریق، برای نمونه‌های آزمون شده در تابش 50 kW/m^2

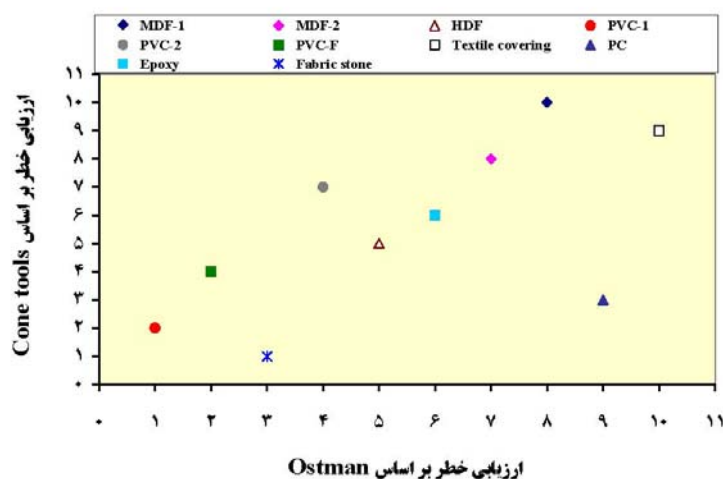
X parameter (PRHR/TTI) ($\text{kW/m}^2.\text{s}$)	THR900s (MJ/m^2)	THR300s (MJ/m^2)	کد نمونه
۴۵/۷	۶۹/۸	۴۵/۷	MDF-1
۲۰/۸	۷۸/۸	۴۰/۲	MDF-2
۱۶/۴	۸۱/۸	۴۶/۱	HDF
۱۲/۹	۱۲/۲	۱۲/۲	PVC-1
۱۶/۲	۱۷/۹	۱۷/۹	PVC-2
۸/۳	۱۶/۳	۱۶/۳	PVC-F
۳۴/۱	۲۶/۲	۲۶/۲	Textile covering
۱۲/۵	۱۸/۴	۱۸/۴	PC
۱۳/۶	۱۹۶/۱	۹۲/۴	Epoxy
۰/۹	۵۷/۰	۴۸/۹	Fabric stone

جدول ۴-۵ نتایج طبقه‌بندی خطر حریق برای نمونه‌های آزمون شده در تابش 50 kW/m^2

طبقه طبق روش			پیش‌بینی زمان گرگرفتن در گوشه اتاق بر اساس		کد نمونه
Conetools	مبحث سوم	ریچاردسون	معادله ۲-۳۴	Conetools(S)	
F یا E	۴	۴	۱۳۳	۶۷	MDF-1
F یا E	۴	۴	۱۶۲	۹۵	MDF-2
D	۴	۵	۲۰۵	۱۷۷	HDF
D یا C	۳	۴	۲۰۱۸	۲۶۹	PVC-1
E یا D	۲	۳	۸۲۷	۱۰۴	PVC-2
D	۳	۴	۱۸۷۰	۱۸۰	PVC-F
F یا E	۴	۵	۷۵	۷۸	Textile covering
D	۴	۵	۱۰۰	۲۴۵	PC
F یا E	۴	۵	۲۰۰	۱۳۳	Epoxy
B یا A2	۳	۴	۱۱۷۳	-	Fabric stone

۵-۶-۱ رده‌بندی بر اساس معادله اوستمان و Conetools

نتایج به دست آمده از معادله اوستمان (معادله ۲-۳۴) و Conetools در شکل ۵-۲۲ ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل، نمونه‌های آزمون شده بر اساس زمان گرگرفتن به دست آمده توسط این روش‌ها، از کم خطرترین (عدد ۱) تا پرخطرترین نمونه (عدد ۱۰) مرتب شده‌اند. یعنی عدد ۱ در هر سیستم مربوط به بلندترین زمان رسیدن به لحظه گرگرفتن و عدد ۱۰ مربوط به کوتاه‌ترین زمان است.



شکل ۵-۲۲ رده‌بندی خطر حریق برای نمونه‌های آزمون شده (از خطر کمتر: ۱ تا پر خطر: ۱۰)

بر اساس معادله اوستمان نمونه‌های PVC-1، PVC-F و سنگ مصنوعی در بین نمونه‌های آزمون شده، دارای خطر نسبی کمتر و نمونه‌های پلی‌کربنات، موکت و MDF-1 پرخطرترین نمونه‌ها بودند. در حالی که طبق روش Conetools نمونه‌های سنگ مصنوعی، PVC-1، پلی‌کربنات و PVC-F نمونه‌های با خطر نسبی کمتر و نمونه‌های MDF و موکت بدترین نمونه‌ها هستند. لازم به ذکر است که در معادله اوستمان (معادله ۲-۳۴) زمان گرگرفتن بر اساس خواص قید شده در معادله پیش‌بینی می‌شود (و به هر حال یک عددی به دست می‌آید)، در حالی که برخی از موارد ممکن است در آزمون تجربی گوشه اتاق اصلاً به زمان گرگرفتن نرسند. اوستمان ذکر می‌کند که زمان گرگرفتن این قبیل مواد در معادله ۲-۳۴ معمولاً بیش از ۲۰ دقیقه به دست می‌آید.



برخی اختلافات ناشی از کاربرد دو معادله برای مرتب کردن خطر نمونه‌ها قابل توجه است. بارزترین آن نمونه PC است که طبق برنامه Conetools سومین نمونه با خطر نسبی کمتر، اما طبق اوستمان آزمون شماره ۹ است (یعنی دومین نمونه پر خطر). علت این موضوع، توان‌های به کار رفته در معادله اوستمان و تأثیر آنها در زمان گرگرفتگی است. در این معادله چگالی به توان $1/7$ می‌رسد، بنابراین هر چه چگالی نمونه‌ای بالاتر باشد (مانند سنگ مصنوعی)، زمان گرگرفتگی آن توسط معادله بیشتر شده، به عبارت دیگر خطرپذیری نمونه کمتر محسوب می‌شود. از طرف دیگر زمان افروزش که در واقعیت پارامتر بسیار مهمی در تعیین خطر آتش‌سوزی است، در معادله اوستمان دارای توان $0/25$ است، بنابراین با افزایش ده برابری زمان افروزش از ۱۰ به ۱۰۰ ثانیه، زمان گرگرفتگی فقط $1/78$ برابر می‌شود. در حالی که در برنامه Conetools اساس محاسبات، محاسبه پیشروی شعله بر روی المان‌های مساحت و به دست آمدن HRR است که طبق معادلات $2-21$ و $2-22$ با عکس زمان افروزش (با توان یک) رابطه دارد. بنابراین در معادلات Conetools به اثر زمان افروزش با درجه بالاتری اهمیت داده می‌شود. از این روی، با توجه به این که عدد زمان افروزش پلی‌کربنات تحت تابش 50 kW/m^2 ، حدود ۵۰ ثانیه به دست آمده است که در بین نمونه‌ها پس از سنگ مصنوعی، بالاترین زمان افروزش بوده است، اثر آن در محاسبات Conetools به خوبی نشان داده می‌شود، اما اثر آن در معادله اوستمان، به علت وجود توان $0/25$ به شدت تضعیف شده، در نتیجه به علت تأثیرات چگالی کم، پلی‌کربنات در سیستم اوستمان، جزو پر خطرترین نمونه‌ها شده است. با توجه به این که معادلات Conetools همراه با تئوری قوی‌تر و اندازه‌گیری‌های متعدد تجربی بوده است، از پایه قوی‌تری برخوردار بوده، در موارد اختلاف علی‌الاصول می‌توان به Conetools اعتماد بیشتری داشت.

۵-۶-۲ ارزیابی خط بر اساس روش پترلا

مقادیر لازم برای طبقه‌بندی ارائه شده توسط پترلا در جدول ۵-۵ ارائه شده است. در بین نمونه‌های آزمون شده، تنها برای نمونه سنگ مصنوعی میل به گرگرفتگی، در محدوده کم به دست آمده است. علت این موضوع، زمان افروزش زیاد سنگ مصنوعی آزمایش شده است، به طوری که علیرغم PRHR نسبتاً بالای آن (حدود 213 kW/m^2)، پارامتر x به کمتر از واحد رسیده است. این موضوع در تطابق خوب با پیش‌بینی Conetools است و اثر بسیار مهم TTI در خطر گسترش آتش‌سوزی را نشان می‌دهد.

برای هر سه نمونه PVC و نمونه پلی کربنات، اگرچه مقدار پارامتر X نسبتاً زیاد است، اما THR آنها چندان بالا نیست، بنابراین این از نظر پارامتر ارزیابی خطر، متوسط به دست آمده و در کل نیز می‌توان آنها را دارای خطر متوسط مایل به پایین ارزیابی کرد. علت اصلی خطر متوسط نمونه‌های PVC ضخامت کم آنها بوده است (کمتر از ۲ میلی‌متر) که باعث شده جرم بسیار اندکی بر واحد سطح وجود داشته و خطر خطر گسترش آتش‌سوزی بر اثر سوختن این نمونه‌ها را به طور نسبی کاهش دهد. در مورد پلی کربنات موضوع متفاوت است. حداکثر شدت رهائش گرمای حاصل از سوختن پلی کربنات بیش از 620 kW/m^2 بود که عدد فوق‌العاده بالایی است. اما زمان افروزش این نمونه حدود ۵۰ ثانیه بوده است که باعث شده پارامتر X برای آن $12/5$ شده و به تبع باعث کم شدن THR هم شده است (حدود $18/4 \text{ MJ/m}^2$). اگر برای نمونه‌ای مثل پلی کربنات آزمایش شده، زمان افروزش کوتاه و در حد ۱۰ تا ۲۰ ثانیه بود، با یک نمونه فوق‌العاده خطرناک روبرو بودیم و THR آن نیز بسیار بیشتر از مقدار به دست آمده می‌شد. در اینجا ارتباط بین THR با زمان افروزش و PRHR یادآور می‌شود (شکل ۵-۱۵). در این سیستم وضعیت خطر نسبی پلی کربنات مشابه با پیش‌بینی Conetools است و صحت بیشتر آن نسبت به پیش‌بینی معادله اوستمان را با دلیل و برهان تجربی نشان می‌دهد.

بدترین نتایج مربوط به نمونه‌های MDF، HDF و اپوکسی است. یک اشکال روش پترلا این است که برای دو پارامتر به صورت کیفی و جداگانه رده‌بندی ارائه شده است و لزوماً از کنار هم گذاشتن آنها نمی‌توان به یک نتیجه کمی دقیق دست یافت. به عنوان مثال، نمونه اپوکسی تنها نمونه‌ای است که در هر دو رده پارامتر X و THR در طبقه خطر زیاد قرار می‌گیرد. اما به سادگی و به این دلیل نمی‌توان نتیجه گرفت که خطر نسبی آن مثلاً بیشتر از MDF-1 است، زیرا اگرچه THR مربوط به MDF-1 خیلی کمتر از اپوکسی است، اما پارامتر X آن به مراتب بیشتر است، که می‌تواند خطر گسترش آتش‌سوزی را در یک محدوده زمانی به مراتب بالاتر ببرد (به ویژه که THR آن نیز به تنهایی چندان اندک نیست).



جدول ۵-۵ ارزیابی خطر بر اساس روش پترلا

کد نمونه	THR (MJ/m ²)	X parameter (PRHR/TTI) (kW/m ² .s)	طبقه میل به گرگرفتگی	طبقه پارامتر ارزیابی خطر
MDF-1	۶۹/۸	۴۵/۷	زیاد	متوسط
MDF-2	۷۸/۸	۲۰/۸	زیاد	متوسط
HDF	۸۱/۸	۱۶/۴	زیاد	متوسط
PVC-1	۱۲/۲	۱۲/۹	زیاد	متوسط
PVC-2	۱۷/۹	۱۶/۲	زیاد	متوسط
PVC-F	۱۶/۳	۸/۳	متوسط	متوسط
Textile covering	۲۶/۲	۳۴/۱	زیاد	متوسط
PC	۱۸/۴	۱۲/۵	زیاد	متوسط
Epoxy	۱۹۶/۱	۱۳/۶	زیاد	زیاد
Fabric stone	۵۷/۰	۰/۹	کم	متوسط

۵-۸-۳ مقایسه طبقه‌بندی‌های ریچاردسون، مبحث سوم و conetools

طبقه‌بندی استفاده شده در پیش‌نویس مبحث سوم، بر اساس طبقه‌بندی ریچاردسون [38] است که در آن اصلاحاتی صورت گرفته، از جمله زمان آفرزش وارد طبقه‌بندی شده است. اهمیت زمان آفرزش و اثر آن در رفتار مواد در برابر آتش در قسمت‌های قبل دیده شد. در جدول ۵-۶ مقایسه طبقات به دست آمده از روش مبحث سوم و Conetools ارائه شده است.

جدول ۵-۶ مقایسه طبقات به دست آمده با روش‌های مبحث سوم و Conetools

Conetools						
F	E	D	C	B	A (A2)	
						۱
		PVC-2				۲
		PVC-F	PVC-1	Fabric stone		۳
Textile, MDF-1,2 covering, Epoxy		HDF PC				۴

هیچ یک از مواد در طبقه ۱ مبحث سوم، که مواد غیر قابل سوختن را در بر می‌گیرد، قرار نگرفته است. از طرف دیگر PVC-2 تنها ماده‌ای است که در طبقه ۲ قرار دارد. در واقع تفاوت بین PRHR نمونه‌های PVC-1 و PVC-2 بسیار اندک است (به ترتیب ۱۵۳ و ۱۴۶ کیلووات بر مترمربع)، اما از آن جایی که این اعداد در نزدیکی دو طرف مرز 150 kW/m^2 قرار دارند، به ترتیب در طبقات ۲ و ۳ قرار گرفته‌اند. در کل محصولات ورق PVC در سیستم مبحث ۳ در مرز طبقات ۲ و ۳ و در سیستم اروپایی در مرز C و D قرار گرفته‌اند که مطابقت نسبتاً خوب دو سیستم برای این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در طبقه‌بندی Conetools نمونه سنگ مصنوعی در طبقه A2 یا B قرار گرفته و به این ترتیب در مجموع نمونه‌ای با خطرپذیری کم در برابر آتش محسوب می‌شود. این در حالی است که این نمونه در گرماسنج مخروطی، یک PRHR معادل 213 kW/m^2 و THR معادل 57 MJ/m^2 از خود نشان داده است. به همین علت طبقه به دست آمده برای این ماده در سیستم مبحث سوم، طبقه ۳ می‌باشد که طبقه نسبتاً خطرناکی است. علت این تناقض، باید تأثیر بیشتر زمان افروزش (و به تبع آن تاریخچه پیشروی سطحی شعله) در نتایج Conetools باشد. در سیستم مبحث سوم، اگرچه زمان افروزش نیز به عنوان یک پارامتر وارد شده و از این نظر اصلاحی بر روش ریچاردسون به حساب می‌آید، اما نتایج نشان داد که حتی تأثیر مهم‌تری را می‌توان برای زمان افروزش در سیستم مبحث سوم در نظر گرفت. برای بررسی بیشتر این موضوع، حساسیت نتایج طبقه‌بندی به زمان افروزش با Conetools بررسی شد.

ابتدا به وسیله امکانات Conetools حساسیت نتایج طبقه‌بندی اروپایی به ۱۰ درصد تغییر در زمان افروزش (در هر دو جهت افزایش و کاهش) بررسی شد. تمام نتایج از نظر طبقه‌بندی یکسان با حالت قبل به دست آمد. به عبارت دیگر، رواداری زمان افروزش در گرماسنج مخروطی، در حد $\pm 10\%$ تغییری در نتیجه طبقه‌بندی ایجاد نکرد. برای نمونه‌های PVC-1، PVC-2، اپوکسی و سنگ مصنوعی، زمان‌های افروزش مختلف در Conetools وارد و بررسی شد. برای نمونه‌های نازک PVC، افزایش زمان افروزش در حد چند ثانیه، نتیجه طبقه‌بندی را کاملاً بهبود داد. به عنوان مثال افزایش زمان افروزش PVC-1 به تنها ۲۰ ثانیه، طبقه آن را به A2/B بهبود داد و برای PVC-2 نیز افزایش آن به ۳۰ و ۶۰ ثانیه، طبقه آن را به ترتیب به طبقات C و A2/B بهبود داد. از طرف دیگر، برای نمونه سنگ مصنوعی که ضخیم حرارتی محسوب می‌شود و زمان افروزش بالایی داشت (متوسط ۲۳۴ ثانیه)، با کاهش زمان افروزش به ۱۲۰ ثانیه، نمونه به طبقه C و با کاهش آن به ۳۰ ثانیه به طبقه D سقوط کرد. برای نمونه



ضخیم حرارتی اپوکسی نیز افزایش TTI به ۶۰، ۲۴۰ و ۳۰۰ ثانیه، طبقه آن را به ترتیب به D، C و A2/B بهبود داد.

این نتایج اثر قابل توجه زمان افروزش را نشان می‌دهد. از طرف دیگر با نگاه به پارامتر X دیده می‌شود که با افزایش زمان افروزش (از نظر عددی) به نزدیکی PRHR، خطر مشارکت ماده در آتش‌سوزی، مطابق طبقه‌بندی پترلا، در طبقه کم‌خطر (از نظر پارامتر X) قرار می‌گیرد. با توجه به این دو موضوع، و با بررسی نتایج بحث شده در قسمت‌های قبل، دسته‌بندی ارائه شده در ریچاردسون و طبقه‌بندی ارائه شده در پیش‌نویس مبحث سوم را می‌توان به صورت زیر اصلاح نمود:

طبقه ۱- موادی که تحت آزمون قابلیت نسوختن مطابق استاندارد ۲-۷۲۷۱ ملی ایران «غیر قابل سوختن» تشخیص داده می‌شوند.

طبقه ۲- موادی که در آزمون مطابق با روش استاندارد ۱-۷۲۷۱ ایران، تحت تابش ۵۰ کیلووات بر مترمربع در مدت ۱۵ دقیقه، گرمای کل رها شده از آنها حداکثر ۵۰ مگاژول بر مترمربع و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها کمتر از ۱۵۰ کیلووات بر مترمربع باشد، و یا گرمای کل رها شده از آنها حداکثر ۸۰ مگاژول بر مترمربع و پارامتر X آنها حداکثر ۱/۰ باشد.

طبقه ۳- موادی که در آزمون مطابق با روش استاندارد ۱-۷۲۷۱ ایران تحت تابش ۵۰ کیلووات بر مترمربع در مدت ۱۵ دقیقه، گرمای کل رها شده از آنها حداکثر ۱۰۰ مگاژول بر مترمربع و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها کمتر از ۲۵۰ کیلووات بر مترمربع باشد.

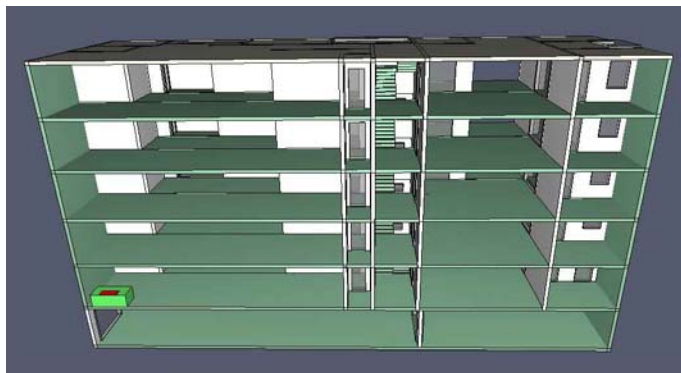
طبقه ۴- موادی که در آزمون مطابق با روش استاندارد ۱-۷۲۷۱ ایران تحت تابش ۵۰ کیلووات بر مترمربع در مدت ۱۵ دقیقه، گرمای کل رها شده از آنها بیش از ۱۰۰ مگاژول بر مترمربع و حداکثر شدت رهایش گرمای آنها برابر یا بیش از ۲۵۰ کیلووات بر مترمربع باشد.

برای امتحان بهتر موضوع، عدد PRHR مربوط به نمونه سنگ مصنوعی، با دستکاری در اعداد اکسیژن مصرف شده، به 260 kW/m^2 و THR آن به حدود 60 MJ/m^2 افزایش داده شد. نتیجه مجدداً با Conetools بررسی شد و دوباره در A2/B قرار گرفت و به لحظه گر گرفتگی نرسید. با دستکاری بیشتر در مقادیر اکسیژن، PRHR به 288 kW/m^2 و THR به حدود 79 MJ/m^2 رسید. در اینجا، اگرچه زمان رسیدن به گر گرفتگی با Conetools حدود ۷۰۰ ثانیه به دست آمد، اما باز هم در طبقه A2/B قرار گرفت. با این روش جدید طبقه‌بندی، سنگ مصنوعی در طبقه ۲ قرار می‌گیرد و مطابقت آن با Conetools به مراتب بهتر می‌شود. برای طبقه ۲، با نگاه به ارقام داده شده، در بدترین وضعیت پارامتر X برابر با ۱/۲ به دست می‌آید. با توجه به نتایج به دست آمده برای پارامتر X و مقایسه آن با نتایج Conetools به نظر می‌آید

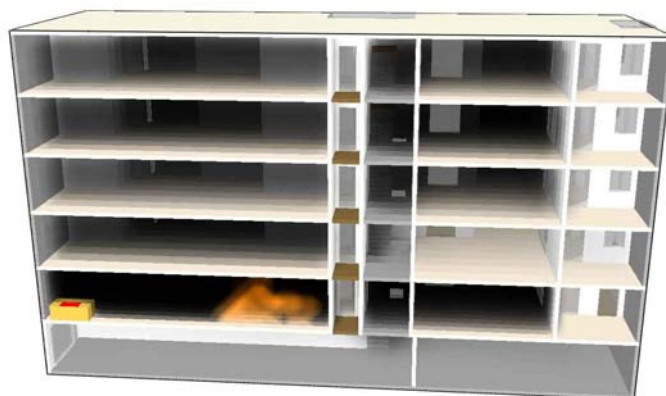
که تا $x=1.2$ نیز بتواند در طبقه کم خطر پترلا قرار گیرد و به جای محدوده ۰/۱-۱/۰، محدوده ۰/۱-۱/۲ برای آن پیشنهاد می‌شود.

۷-۵ کارهای انجام شده بر روی مدل FDS

با توجه به مطالعات انجام شده ابتدا یک ساختمان ۵ طبقه دارای ۱۰ واحد مسکونی ترسیم شد و سناریوهای مختلف آتش‌سوزی مدل گردید و در حالت‌های مختلف پدیده‌های گرگرفتگی سراسری، نهان‌سوزی و انفجار به دلیل رسیدن ناگهانی اکسیژن مشاهده شد، همچنین نحوه پخش دود در حالت‌های مختلف مشاهده گردید.



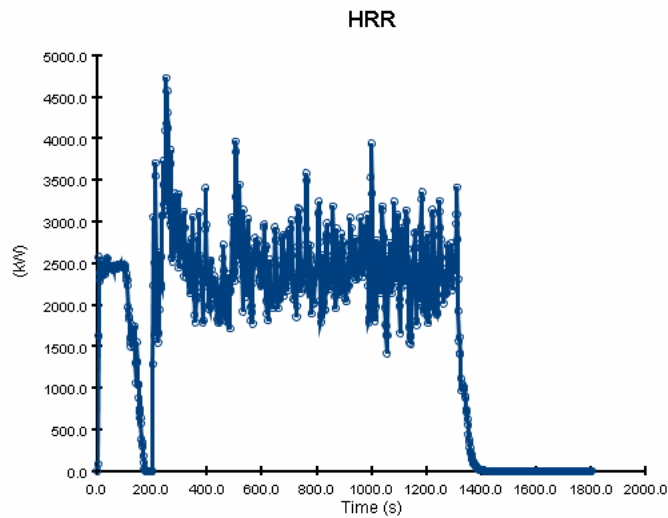
شکل ۵-۲۳ مجتمع مسکونی ترسیم شده در نرم افزار پائروسیم



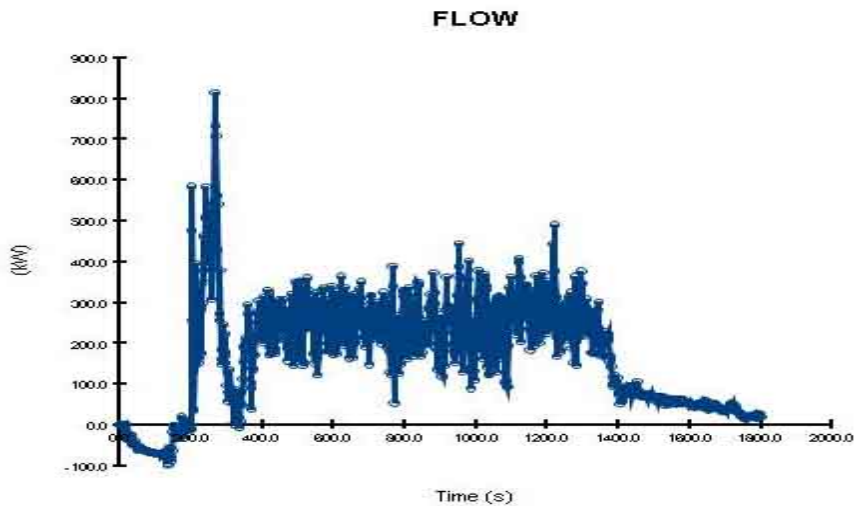
شکل ۵-۲۴ نمایش گرافیکی مجتمع مسکونی در نرم افزار Smoke View



این نرم افزار قادر است وسایل مختلف اندازه گیری، مانند ترموکوپل، اندازه گیر جریان، اندازه گیر شدت رهایش گرما و ... را در هندسه‌ای که کاربر تعیین می‌کند نصب کرده و اطلاعات مربوط را به صورت EXCELL و گرافیکی ترسیم کند.

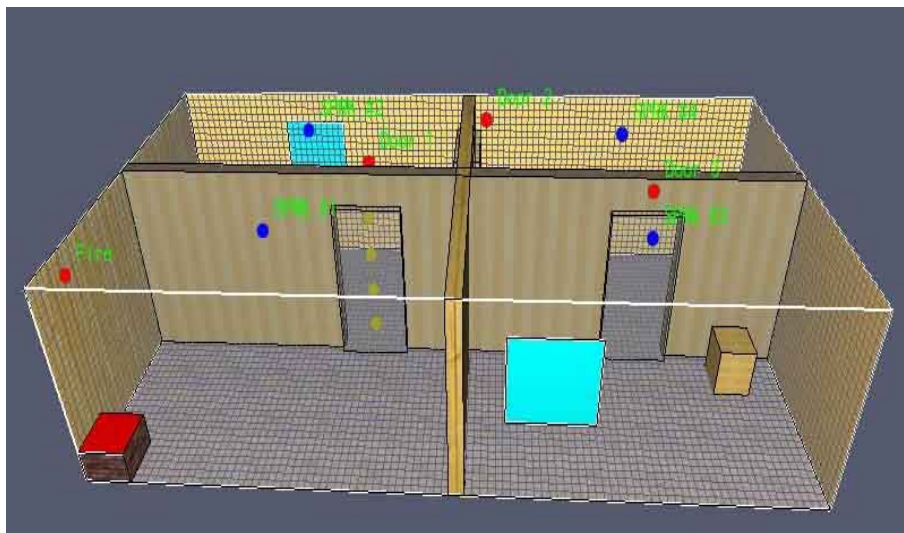


شکل ۲۵-۵ شدت رهایش گرما در محل نصب شده وسیله اندازه گیری

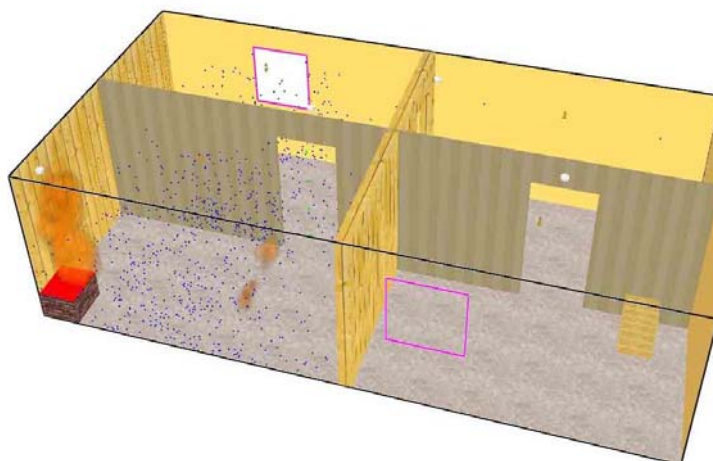


شکل ۲۶-۵ جریان در محل نصب شده وسیله اندازه گیری

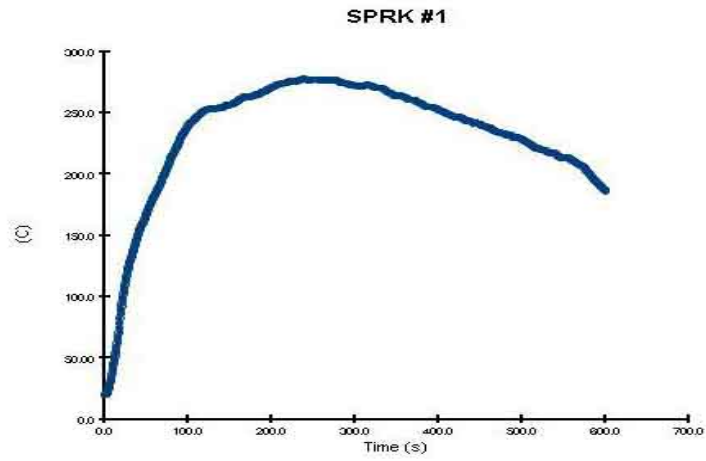
این نرم افزار قادر است تا آشکارسازهای حساس به حرارت و دود و همچنین سیستم شبکه بارنده را نصب و عملکرد آنها را مورد مطالعه قرار دهد، برای این منظور یک ساختمان ترسیم و شبکه بارنده و آشکارساز نصب شد و سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت.



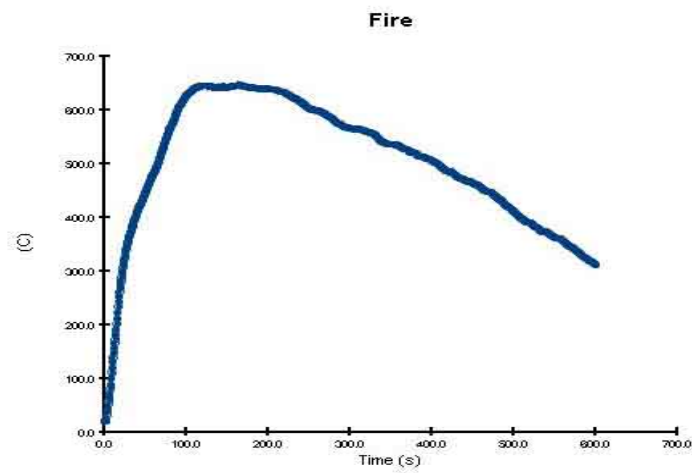
شکل ۲۷-۵ اتاق‌های ترسیم شده در نرم افزار پایروسیم



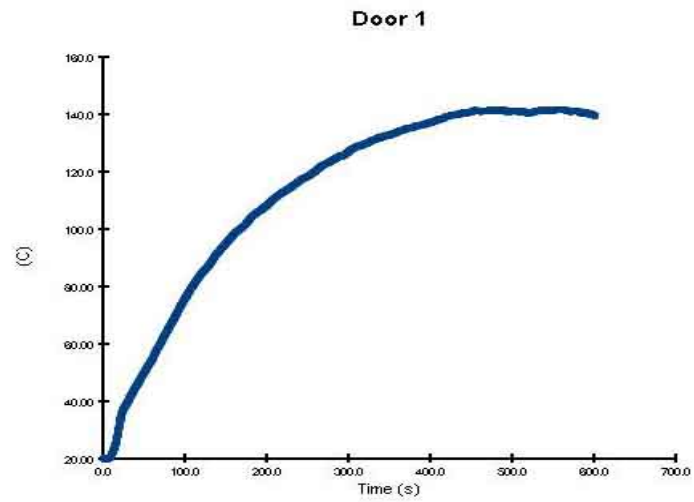
شکل ۲۸-۵ نمایش گرافیکی اتاق‌ها در نرم افزار Smoke View



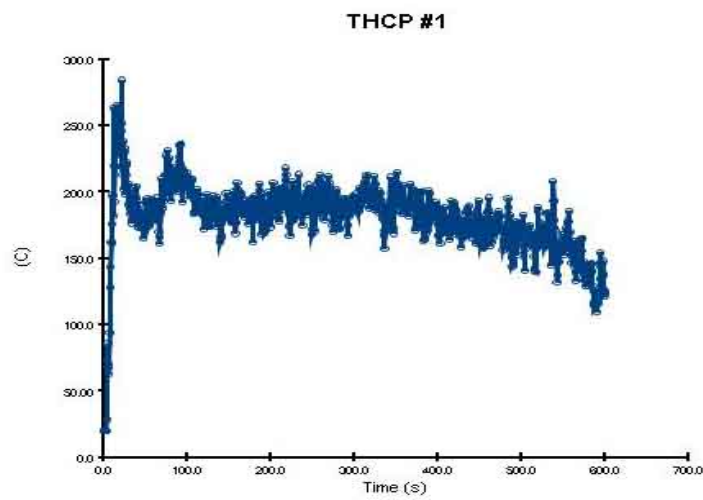
شکل ۲۹-۵ نمودار دما- زمان شبکه بارنده شماره ۱



شکل ۳۰-۵ عملکرد دما- زمان منبع آتش



شکل ۳۱-۵ نمودار دما- زمان در شماره ۱



شکل ۳۲-۵ نمودار دما- زمان ترموکوپل شماره ۱

فصل ششم

خلاصه و نتیجه‌گیری

ایمنی ساختمان‌ها در برابر آتش موضوع مهمی است که در طراحی و اجرای ساختمان‌ها باید در نظر گرفته شود. آتش‌سوزی می‌تواند باعث خسارات جانی و مالی شدید و حتی ریزش کامل ساختمان شود. در سال‌های اخیر مصالح پلیمری زیادی وارد صنعت ساختمان شده که بسیاری از آنها قابلیت اشتعال بالایی دارند و کاربرد آنها در ساختمان می‌تواند خطرناک باشد. بنابراین رفتار این مواد در برابر آتش باید به وسیله آزمایش‌های آتش تعیین و طبقه‌بندی شود. همچنین لازم است تا با وضع مقررات ساختمانی مناسب، از کاربرد مصالح خطرناک در ساختمان و یا در فضاهایی که به ایمنی بیشتری نیاز است (مانند فضاهای تجمعی و راه پله‌ها) جلوگیری شود.

از طرف دیگر، امروزه روش‌های مهندسی آتش، ابزاری مفید و ضروری برای پروژه‌های بزرگ هستند. در این قبیل پروژه‌ها تنها ارجاع به مقررات آتش و مطابقت طرح با آنها می‌تواند هم از جنبه ایمنی و هم از جنبه اقتصادی ناکافی باشد. با استفاده از روش‌های مهندسی آتش می‌توان طراحی بسیار حرفه‌ای‌تری برای ایمنی ساختمان در برابر آتش انجام داد و اثرات پارامترهای مختلف بر روی طرح را سنجید. به عنوان مثال، بررسی استراتژی‌های تخلیه برای خروج بهره‌برداران ساختمان، می‌تواند برای بررسی کافی بودن راه‌های خروج بسیار کمک نماید. همچنین بررسی روش‌های تخلیه دود، عملکرد درهای ضد حریق، درجه مقاومت دیوارها در برابر آتش، ... و بررسی اثرات هر یک از این‌ها بر روی سناریوهای گسترش حریق و ایمنی ساکنین، ابزاری هستند که روش‌های مهندسی حریق و مدل‌سازی در اختیار طراحان پروژه‌های مهم و پیچیده قرار می‌دهد. مدل‌سازی حریق در ساختمان‌ها می‌تواند به طراحی بهتر ایمنی در برابر



آتش و امتحان سناریوها و تمهیدات مختلف کمک شایانی نماید. امروزه کاربرد این مدل‌ها در دنیا در حال افزایش است و نرم‌افزارهای تخصصی به وسیله مراکز تحقیقاتی توسعه یافته‌اند.

در این پروژه ده نوع مصالح رایج مورد استفاده در ساختمان به وسیله دستگاه گرماسنج مخروطی تحت تراز تابشی 50 kW/m^2 مورد آزمون قرار گرفت. پارامترهای حرارتی آتش ناشی از سوختن مواد، با هدف تحلیل خطر آنها در گسترش آتش‌سوزی ارائه و بحث شد. خطر مواد در آتش‌سوزی به وسیله روش‌های ارائه شده توسط محققین مختلف و نرم‌افزار Conetools بررسی گردید. از این تحقیقات نتایج زیر به دست آمد:

۱- بسیاری از فرآورده‌های پلیمری که استفاده از آنها در صنعت ساختمان کشور رو به گسترش است، رفتار خطرناکی در برابر آتش نشان دادند. بنابراین برای استفاده از آنها در ساختمان باید مقررات مناسب تدوین و محدودیت‌های استفاده از آنها مشخص شود. بدترین نتایج در بین نمونه‌های آزمون شده، مربوط به نمونه‌های MDF، موکت، اپوکسی، پلی‌کربنات و HDF بود.

۲- ارتباط بین پارامترهای حرارتی ناشی از سوختن مواد بررسی شد. نتایج نشان داد که رهایش گرمای کل با حداکثر شدت رهایش گرما و چگالی سطحی نسبت مستقیم و با زمان آفرورش نسبت عکس دارد.

۳- چند روش مهم طبقه‌بندی خطر مواد در برابر آتش به طور تجربی بررسی و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که برای یک سیستم طبقه‌بندی، حداقل باید سه پارامتر رهایش گرمای کل، حداکثر شدت رهایش گرما و زمان آفرورش در نظر گرفته شود. بنابراین روش ریچاردسون که در آن به زمان آفرورش توجه نشده است، بعضاً به نتایج اشتباه منجر می‌شود. همچنین اهمیت زمان آفرورش با توان یک باید در نظر گرفته شود و توان $0/25$ در روش اوستمان - نوسبام بعضاً باعث نتایج اشتباه می‌شود.

۴- یک روش جدید برای طبقه‌بندی خطرپذیری مواد و مصالح نازک‌کاری در گسترش آتش‌سوزی ارائه شد. این روش بر اساس پارامترهای قابلیت سوختن، زمان آفرورش، کل رهایش گرما و شدت رهایش گرما ارائه شده است و با مقایسه با روش‌های مختلف، شامل اوستمان، پترلا، ریچاردسون و conetools دقت خوبی را نمایش داد و برای اهداف مقرراتی کاملاً کاربردی است.

تئوری و مبانی نظری روش‌های مختلف مدل‌سازی حریق بررسی شد. معادلات بقا و ریاضیات دو روش اصلی ناحیه‌ای و CFD ارائه شد. چندین مدل مختلف موجود در این روش‌ها بررسی شدند. روش FDS که بر اساس روش CFD است، به عنوان روشی کاربردی و با مبانی نظری قوی انتخاب شد و قابلیت‌های آن بررسی و ارائه گردید. یک ساختمان ۵ طبقه دارای ۱۰

واحد مسکونی ترسیم شد و سناریوهای مختلف آتش‌سوزی مدل گردید و در حالت‌های مختلف پدیده‌های گرگرفتگی سراسری، نهان سوزی و انفجار به دلیل رسیدن ناگهانی اکسیژن مشاهده شد، همچنین نحوه پخش دود در حالت‌های مختلف مشاهده گردید. قابلیت‌هایی مانند نصب ترموکوپل، اندازه‌گیر جریان، اندازه‌گیر شدت رهائش گرما و غیره بررسی شد. همچنین نصب کاشف‌های حرارت و دود و سیستم شبکه بارنده بررسی گردید.

نتایج پروژه برای تحقیقات آتی در زمینه ایمنی در برابر آتش و توسعه کاربرد روش‌های مهندسی آتش در کشور بسیار مفید است. همچنین روش‌های طبقه‌بندی مصالح در برابر آتش و روش جدید ابداعی که در این پروژه ارائه شد، می‌تواند برای مقررات ملی ساختمان کشور و یا برای کلیه مهندسان مشاور یا سایر افراد یا سازمان‌های مسئول که به طبقه‌بندی مواد در برابر آتش در طرح‌های مورد نظر نیاز دارند، کمک شایانی نماید.

کاربرد این روش‌ها در بخش آتش مرکز و ارائه خدمات مشاوره به صنعت ساختمان کشور بر این اساس، با پشتوانه تحقیقاتی خوبی که فراهم شد، صورت گرفته است.

مراجع

۱. آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش (پیشنهادی)، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ض-۴۴۴، ۱۳۸۵.
۲. بختیاری، سعید، قاسم‌زاده، مسعود. «پروژه ملی استانداردسازی و طبقه‌بندی مصالح ساختمانی از نظر خطر حریق». شورای پژوهش‌های علمی کشور، ۱۳۸۰.
3. BS 476, Part 6. "Method of test fire propagation for products". BSI, London, 1989.
۴. استاندارد ایران شماره ۸۲۹۹ - واکنش در برابر آتش برای مصالح و فرآورده‌های ساختمانی - روش طبقه‌بندی، ۱۳۸۴.
5. Approximation of laws, regulations and administrative provisions of the member states relating to construction products, Council of the European Communities, Dec. 1988.
6. The New European System of Fire Classification, Warrington Fire Research, Warrington, UK, 2000.
7. Sundström, B, Van Hees, P, Thureson, P. "Results and analysis from fire tests of building products in ISO 9705, the room/corner test". The SBI Research Programme, SP report, No. 11, ISBN 91-7848-716-1, 1998.
8. Commission Decision of 8 February 2000 implementing Council Directive 89/106/EEC as regards the classification of the reaction to fire, performance of construction products. (2000/147/EC).
9. Sundström, B., "European Classification of Building Products". Proceedings of the 8th International Fire Science & Engineering Conference (Interflam 99), Edinburgh, Scotland, 1999.
10. "SBI (Single Burning Item) Second Round Robin". EGOLF (European Group of Official Laboratories for Fire testing), ENTR/2002/CP11, report to the European Commission 2005-01-31.
11. Sundström B. "The Development of a European Fire Classification System for Building Products Test Methods and Mathematical Modelling". Doctoral Thesis, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2007.
12. Sundström, B, and Axelsson, J. "Development of a common European system for fire testing of pipe insulation based on EN 13823 (SBI) and ISO 9705 (Room/Corner Test)", SP-report 2002:21. ISBN 91-7848-871-0.

13. FIPEC Final Report to the European Commission, SMT Programme SMT4-CT96-2059, ISBN 09532312 5 9, London 2000.
14. Sundström, B, Axelsson, J, and Van Hees, P, "A proposal for fire testing and classification of cables for use in Europe". Report to the European commission and the fire regulators group, SP, 2003-06-19.
15. Sundström, B, Axelsson, J, and Van Hees, P. "A new European system for fire testing and classification of cables". 10th International Interflam Conference, Edinburgh, July 2004, Vol. 1, p5-15, Interscience communications Ltd, ISBN 0 9541216-3-5.
16. Kokkala, M, Göransson, U, Söderbom, J. "EUREFIC-Large scale fire experiments in a room with combustible linings, Some results from the project 3 of the EUREFIC fire research programme". SP-report 1990:41, ISBN 91-7848-247-X, Borås, Sweden.
17. Babrauskas, V, "Ignition handbook". ISBN 0-9728111-3-3, Fire Science Publishers, 2003.
18. Lawson, D.I, Simms, D.L. "The ignition of wood by radiation". British Journal of Applied Physics 3, 1952, pp 288-292.
19. Tewarson, A, "Generation of heat and chemical compounds in fires". SFPE handbook of fire protection Engineering, 3rd ed., pp 3-82--3-89.
20. Janssens, M. "Fundamental thermophysical characteristics of wood and their role in enclosure fire growth", PhD Dissertation, University of Gent, Belgium, 1991.
21. Janssens, M, "Piloted ignition of wood: A Review". Fire and Materials, 15, 1991, pp 151-167.
22. Janssens, M, Dillon, S.E., Allwein, S. "Characterizing the thermal environment of the cone calorimeter for analyzing ignition data of materials". Interflam 2001 proceedings, London 2001, pp 125-135.
23. Sundström, B. "Full Scale Fire Testing of Surface Materials, Measurements of Heat Release and Productions of Smoke and Gas Species". SP-Rapp 1986:45, Swedish National Testing and Research Institute, 1986.
24. Saito, K, Quintiere, J.G, Williams, F.A. "Upward Turbulent Flame Spread". Proc. 1st International Symposium on Fire Safety Science, Hemisphere Publishing Corporation, N.Y. 1984.
25. Wickström, U., Göransson, U., "Prediction of Heat Release Rates of Surface Materials in Large-Scale Fire Tests Based in Cone Calorimeter Results", J. Testing and Evaluation, 15, 1987, pp 364-370.
26. Wickström, U., Göransson, U., "Full-Scale/Bench-Scale Correlations of Wall and Ceiling Linings". Heat Release in Fires,



- edited by V. Babrauskas and S.J. Grayson pp 461-477, Elsevier Science Publishers ISBN 1-85166-794-6, 1992.
27. Van Hees, P., Hertzberg, T., Hansen, A. S., "Development of a Screening Method for the SBI and Room Corner using the Cone Calorimeter, Nordtest project 1479-00, SP-report 2002:11, Borås , Sweden.
 28. Wade, C., BRANZFIRE, Technical Reference Guide, Study Report No. 92 (revised 2004).
 29. Forney, G. "Computing radiative heat transfer occurring in a zone model". *Fire Science & Technology*, 14:31p47, 1994.
 30. Wade, C., BRANZFIRE 2004, Compilation of Verification Data, November 2004.
 31. Sundströmn B, Göransson, U. "Possible fire classification criteria and their implications for surface materials tested in full scale accordance to ISO DP 9705 or NT Fire 025". Swedish national testing institute, SP report 1988:19.
 32. Parker, W.J. "Calculation of heat release rate by Oxygen consumption for various applications". *Journal of fire sciences*, vol. 2 Sept/Oct. 1984.
 33. Rasbash, D.J., Philips, R.P. "Quantification of smoke and gas species". *Fire and Materials*, 2, pp 102, 1978.
 34. Wickström, U, Göransson, U. "Full-scale/bench scale correlations of wall and ceiling linings". *Fire and materials*, Vol. 16, 15-22, 1992.
 35. Babrauskas, V., Parker, W.J. "Ignitability measurements with the cone calorimeter". NBSIR 86-3445, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1986.
 36. Holman, J. "Heat transfer". Mc-Graw-Hill, New York, 1986.
 37. Carslaw, J. "Conduction of heat in solids". Oxford university press, Oxford, 1959.
 38. Richardson L.R. and Brooks M.E., "Combustibility of Building Materials". *Fire and Materials*, Vol. 15, 1991.
 39. Östman, B.A.L., Nussbaum, R.M. "Correlation between small scale rate of heat release and full scale room flashover for surface linings". *Fire safety science*, proceedings of the second international symposium, Tokyo, 1989, pp. 823-832.
 40. Östman, B.A.L., Tsantaridis L.T. "Correlation between cone calorimeter data and time to flashover in the room fire test". *Fire and Materials*, 18, 1994, 205-209.
 41. Hirschler, M.M. "Heat release from plastic materials"; in: Babrauskas V., Grayson, J. "Heat release in fires", E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1996.

42. Petrella, R.V. "The assessment of full scale fire hazards from cone calorimeter data". *Journal of fire sciences*, vol. 12, 1994, 14-43.
43. Babrauskas, V. "Bench scale methods for prediction of full scale fire behavior of furnishings and wall linings". SFPE technical report 84-10, Boston, MA, 1984.
44. Mitler, H.E and Rockett, J.A, "Users' Guide to FIRST, a Comprehensive Single-Room Fire Model," NBSIR 87-3595, Nat. Bur. Stand., Sept. 1987.
45. Tanaka, T., "A Model of Multiroom Fire Spread," NBSIR 83-2718, Nat. Bur. Stand., August 1983.
46. Jones, W.W., " A Multicompartment Model for the Spread of Fire Smoke and Toxic Gases," *Fire Safety Jour.* 9, 55-79.1985.
47. Quientiere, J. G. "Fundamental of enclosure fire zone models". *Journal of fire protection Engineering*, 1(1989), 99-119.
48. Novozhilov, V. "Computational fluid dynamics modeling of compartment fire". *Progress in energy and combustion science*, 27 (2001), 611-666.
49. Bilger RW. Turbulent flows with non-premixed reactants. In: Libby PA, Williams FA, editors. *Turbulent reacting flows, Topics in Applied Physics*. New York: Springer- Berlag, 1980. p.65-114.
50. Libby PA, Williams FA. Fundamental aspects. In: Libby PA, Williams FA, editors, *Turbulent reacting flows, Topics in Applied Physics*. New York: Springer – Berlag, 1980. p.1-43.
51. Ferziger JH. Peirc M. *Computational methods for fluid Dynamics*. Berlin: Springer. 1996
52. Hossain MS, Rodi W.A turbulence model for buoyant flows and its application to vertical buoyant jets and plumes. Uk: pergamon, 1982. P. 121-78
53. Hesketad G. *Fire Saf J* 1984;7:25-32
54. Fletcher DF, Kent JH, Apfe VB, Green AR. *Fire Saf J* 1994; 23:305-25.
55. Kumar S, Cox G. *Fire Safety Science-Proc Second Int Symp.* 1989. P. 851-60.
56. Woodburn PJ, Britter RE. *Fire Saf J* 1996; 26:63-90.
57. Chow, W.K. Leung, W.M. *Combustion Science & Tecnology*, 1990; 71: 77-93.
58. Khalil EE. *Modelling of furnaces and combustors*. Tunbridge Wells, Kent: Abacus Press. 1982
59. Novozhilov V, Harvier DJE, Green AR , Kent JH. *Combustion Science and Thchnology* 1997;123-227-45.



60. Yan Z, Holmstedt G. Fire Safety Science – proc Fifth Int Symp. 1997. p.345-356.
61. Shuen JS, Chen LD, Faeth GM. AICHE J 1983; 29(1): 167-70.
62. Shuen JS, Chen LD, Faeth GM. AIAA J 1983;21(11):1483-4.
63. Alpert RL. Fire Saf. J. 1985;9(157):163.
64. Alpert RL. Calculated interaction of sprays with large- scale cross flows and buoyant opposed flows, Factory Mutual Research Corporation Technical Report J.I. OEOJ4. BU. 1982.
65. Nam S. Fire Saf J 1996;26:1-33
66. Hoffmann NA, Galea ER. Int H Heat Mass Trans 1993;36(6):1435-44.
67. Leslie DC, Quarini GL. J Fluid Mechanics 1979;91:65-91
68. Takeda, H. and Yung, D., “Simplified Fire Growth Models For Risk-Cost Assessment in Apartment Buildings”, J. of Fire Prot. Engr. 4(2). P. 53, 1992.
69. William D. Walton “Computer Fire Models for Enclosures”, The SPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition, Chapter 7, Section, 3, pp. 3/189-193, 2002.
70. An Introduction to Mathematical Fire Modeling, Second Edition,” Technomic Publishing Co., Chapter 5, July 2000.
71. Zhuman Fu, George Hadjisophocleous “ A two-zone fire growth and smoke movement model for multi-compartment buildings”, Fire Safety Journal 34, 257-285, 2000.
72. Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum, Ronald G. Rehm, Anthony Hamins, Glenn P. Forney, Jason E. Floyd, Simo Hostikka, Kuldeep Prasad, “Fire Dynamics Simulator-Technical Reference Guide”, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD., NISTIR 6783, 2002.
73. www.cfx.aeat.com.
74. Cox, G., Kumar, S. and Markatos, N. C., “Some Field model Validation Studies”, Proc. 1st International Symp. Fire Safety Science, pp 159-171, November 1985.
75. Thornton, W. "The relation of Oxygen to heat of combustion of organic compounds". Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. 33, No. 196, 1917.
76. Huggett, C. "Estimation of the rate of heat release by means of Oxygen consumption". Journal of Fire and Flammability, Vol. 12, 1980.
77. Babrauskas, V.; Speciman heat fluxes for bench-scale heat release rate testing; In: Franks, C. A. (Editor), Proceedings of Interflam 93, International fire conference, 1993, London, England, 1993.

78. Thureson, P.; EUREFIC – Cone Calorimeter test results; SP report 1991:24, Sweden, 1991.
79. Babrauskas, V, Peacock. "Heat release rate: the single most important variable in fire hazard". Fire safety journal, 18, 1992, 255-272.
80. Mouritz, A.P., Mathys, Z., Gibson, A.G. "Heat release of polymer composites in fire". Composites, Part A, 37 (2006), 1040-1054.
81. Hirschler, M.M. "Heat release from plastic materials"; in: Babrauskas V., Grayson, J. "Heat release in fires", E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1996.

پیوست

نتایج کامل آزمون‌های آتش بر روی آزمون‌ها

جدول پ-۱ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی MDF وارداتی در تراز تابشی 50 kW/m^2

میانگین	MDF-3	MDF-2	MDF-1	شماره آزمون
۷۶۸/۶	۷۶۴/۸	۷۶۹/۶	۷۷۱/۴	ρ
۹/۲۱	۹/۲۲	۹/۲۲	۹/۱۹	t
۱۴	۱۹	۱۸	۶	TTI
۹۸۶	۷۵۶	۹۸۲	۱۲۲۱	FO
۶۸/۳۸	۶۸/۰۷	۶۸/۷۱	۶۸/۳۶	m_i
۵۲/۱۷	۵۱/۴	۵۲/۵	۵۲/۶	ML
۱۱/۲۸	۱۱/۵۶	۱۱/۱	۱۱/۱۹	Av.Spec MLR
۱۵۰/۱۳	۱۵۲/۸۸	۱۴۷/۶	۱۴۹/۹۱	Av.RHR
۲۹۰/۹۵	۳۱۴/۱۰	۳۰۳/۴۵	۲۵۵/۳۰	PRHR
۳۹۵	۴۱۰	۴۰۲	۳۷۲	T PRHR
۱۳/۳	۱۳/۲۲	۱۳/۲۹	۱۳/۴	Av.EHC
۷۸/۸	۷۷/۰	۷۹/۲	۸۰/۲	THR
۳۸۳/۷۷	۳۷۲/۶	۳۴۶/۳	۴۳۲/۴	TSR
۶۳/۸۹	۶۲/۶۷	۵۶/۸۶	۷۲/۱۳	Av. SEA
۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	Av.CO ₂ Y
۰/۰۱۱	۰/۰۱۲	۰/۰۱	۰/۰۱۲	Av.COY



جدول پ-۲ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی MDF داخلی در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره نمونه	MDF-3	MDF-4	MDF-5	میانگین
ρ	۷۸۵/۹۷	۷۸۸/۵۳	۷۸۲/۸	۷۸۵/۷۷
t	۸/۰۷	۸/۰۷	۸/۱۳	۸/۰۹
TTI	۷	۷	۳	۶
FO	۸۶۹	۸۲۶	۶۶۸	۷۸۸
m_i	۶۱/۰۷	۶۱/۲۰	۶۱/۵۳	۶۱/۲۷
ML	۴۷/۵	۴۷/۳	۴۷/۲	۴۷/۳۳
Av.Spec MLR	۱۱/۴۳	۱۲/۰	۱۱/۳۲	۱۱/۵۸
Av.RHR	۱۵۲/۲	۱۵۷/۲۳	۱۴۲/۵۶	۱۵۰/۶۶
PRHR	۲۳۷/۹۱	۲۵۲/۸۴	۳۳۱/۳۶	۲۷۴/۰۴
T PRHR	۵۴	۲۹۸	۳۳۰	۲۲۷
Av.EHC	۱۳/۳۵	۱۳/۰۹	۱۲/۶	۱۳/۰۱
THR	۷۲/۰	۷۰/۲	۶۷/۲	۶۹/۸
TSR	۳۹۴/۵	۲۷۷/۶	۲۹۸/۲	۳۵۶/۷۷
Av. SEA	۷۲/۷۹	۶۹/۹۷	۵۵/۹۵	۶۶/۲۴
Av.CO ₂ Y	۱/۱۷	۱/۱۴	۱/۱۳	۱/۱۵
Av.COY	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰

جدول پ-۳ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی HDF در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره نمونه	HDF-1	HDF-2	HDF-3	میانگین
ρ	۹۱۶/۶۳	۹۰۲/۴۳	۹۱۴/۰۳	۹۱۱/۰۳
t	۸/۲۹	۸/۳۲	۸/۲۷	۸/۲۹
TTI	۳۶	۳۷	۳۶	۳۶
FO	۷۰۴	۷۳۰	۸۲۶	۷۵۳
m_i	۷۲/۹۵	۷۲/۳۳	۷۲/۷۶	۷۲/۶۸
ML	۵۶/۶	۵۵/۷	۵۴/۵	۵۵/۶
Av.Spec MLR	۱۲/۱۵	۱۱/۴۸	۱۱/۸۶	۱۱/۸۳
Av.RHR	۱۶۱/۶۱	۱۵۰/۰۱	۱۵۲/۱۷	۱۵۴/۶
PRHR	۷۰۴/۶۹	۴۸۳/۲۱	۵۸۱/۴۹	۵۸۹/۸۰
T PRHR	۴۶	۵۰	۵۰	۴۹
Av.EHC	۱۳/۳	۱۳/۰۶	۱۲/۸۳	۱۳/۰۶
THR	۸۴/۸	۸۱/۲	۷۹/۵	۸۱/۸۳
TSR	۱۷۳/۷	۱۵۷/۶	۱۲۱/۵	۱۵۰/۹۳
Av. SEA	۲۷/۰۲	۲۴/۰۵	۱۸/۶۹	۲۳/۲۵
Av.CO ₂ Y	۱/۱۶	۱/۱۸	۱/۱۷	۱/۱۷
Av.COY	۰/۰۰۹	۰/۰۱۴	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲



جدول پ-۴ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی PVC وارداتی در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره آزمون	PVC-1	PVC-2	PVC-3	میانگین
ρ	۱۴۳۴/۹	۱۴۳۴/۹	۱۴۳۴/۹	۱۴۳۴/۹
t	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
TTI	۹	۹	۱۰	۹
FO	۱۸۸	۱۷۵	۱۶۸	۱۷۷
m_i	۲۶/۹۴	۲۶/۹۳	۲۶/۸۸	۲۶/۹۲
ML	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۸	۱۳/۶۷
Av.Spec MLR	۹/۲۶	۸/۶۵	۸/۲۳	۸/۷۱
Av.RHR	۱۱۷/۴۹	۹۲/۰۸	۱۰۱/۷۷	۱۰۳/۷۸
PRHR	۱۵۰/۴۱	۱۵۱/۹۵	۱۳۵/۹۹	۱۴۶/۱۲
T PRHR	۸۸	۱۴	۱۶	۳۹
Av.EHC	۱۲/۶۸	۱۰/۶۲	۱۱/۳	۱۱/۵۳
THR	۱۹/۶	۱۶/۶	۱۷/۶	۱۷/۹۳
TSR	۹۰/۴/۱	۹۷/۶/۷	۹۱/۰/۶	۹۳۰/۴۷
Av. SEA	۵۸۶/۵۸	۶۳۱/۷۷	۵۸۶/۰۵	۶۰۱/۴۷
Av.CO ₂ Y	۱/۰۳	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۷
Av.COY	۰/۰۵۵	۰/۰۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵

جدول پ-۵ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی PVC داخلی در تراز تابشی 0.05 kW/m^2

شماره آزمون	PVC-1	PVC-2	PVC-3	PVC-4	میانگین
ρ	۱۷۷۶/۶	۱۷۷۶/۶	۱۷۷۶/۶	۱۷۷۶/۶	۱۷۷۶/۶
t	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
TTI*	۱۱	۱۳	۱۰	۱۳	۱۲
FO	۲۱	۲۸۷	۱۸۶	۲۰۶	۱۷۵
m_i	۳۶/۱۶	۳۳/۸۱	۲۶/۲۹	۳۰/۱۳	۳۱/۶۰
ML	۱۸/۱	۱۶/۱	۱۱/۶	۱۵/۵	۱۵/۳۳
Av.Spec MLR	۸/۷۶	۸/۲۲	۸/۱۸	۸/۹۱	۸/۵۲
Av.RHR	۳۴/۷۱	۷۳/۳۷	۸۳/۶	۵۱/۷۱	۶۰/۸۵
PRHR	۱۲۵/۸۸	۱۳۵/۲۱	۱۷۰/۵۶	۱۸۵/۷۰	۱۵۴/۳۴
T PRHR	۱۶	۱۶	۱۰/۸	۱۴۴	۷۱
Av.EHC	۳/۹۷	۸/۹۲	۱۰/۱۹	۵/۸	۷/۲۲
THR	۸/۲	۱۶/۴	۱۳/۸	۱۰/۳	۱۲/۱۸
TSR	۱۲۳۹/۴	۸۸۱/۸	۶۰۶/۴	۱۰۲۵/۹	۹۳۸/۳۸
Av. SEA	۶۰/۸/۹۳	۴۸۱/۲۸	۴۴۹/۰۴	۵۸۷/۴۳	۵۳۱/۶۷
Av.CO ₂ Y	۰/۶۱	۰/۸۶	۰/۹۵	۰/۵۷	۰/۷۵
Av.COY	۰/۰۱۵	۰/۰۳۸	۰/۰۴۴	۰/۰۲۳	۰/۰۳

* دو بار افروزش رخ داد.



جدول پ-۶ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی کف پوش PVC در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره نمونه	PVC.F-1	PVC.F-2	PVC.F-3	میانگین
ρ	۱۸۵۱/۷	۱۸۵۶/۲	۱۹۲۴/۵	۱۸۷۷/۵
t	۲/۰۲	۲/۰۱	۱/۹۴	۱/۹۹
TTI	۲۶	۲۹	۲۷	۲۷
FO	۱۵۹	۱۵۷	۱۷۹	۱۶۵
m_i	۳۶/۰۴	۳۵/۸۹	۳۵/۹۰	۳۵/۹۴
ML	۱۰/۶	۱۰/۶	۹/۴	۱۰/۲
Av.Spec MLR	۸/۰۴	۷/۹۹	۷/۲	۷/۷۴
Av.RHR	۱۲۱/۴۸	۱۱۵/۲۵	۱۰۷/۲۷	۱۱۴/۶۷
PRHR	۲۲۸/۰۶	۲۳۸/۳۵	۲۰۵/۲۲	۲۲۳/۸۸
T PRHR	۶۴	۶۶	۶۶	۶۵
Av.EHC	۱۵/۰۳	۱۴/۴۶	۱۴/۹	۱۴/۸
THR	۱۷/۴	۱۶/۲	۱۵/۴	۱۶/۳۳
TSR	۶۰/۱/۶	۶۲۲/۳	۵۴۷/۸	۵۹۰/۵۷
Av. SEA	۴۹۹/۱	۵۲۲/۳۵	۴۹۴/۶۴	۵۰۵/۳۶
Av.CO ₂ Y	۱/۳۸	۱/۳۷	۱/۳۹	۱/۳۸
Av.COY	۰/۰۶۳	۰/۰۶۸	۰/۰۵۸	۰/۰۶۳

جدول پ-۷ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی موکت در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره نمونه	T.C-1	T.C-2	T.C-3	میانگین
ρ	۱۸۷/۸	۱۹۰/۳	۱۷۸/۹	۱۸۵/۷
t	۴/۸۳	۵/۱۰	۵/۵۸	۵/۱۷
TTI	۱۲	۱۴	۱۵	۱۴
FO	۳۸۰	۳۴۰	۳۹۹	۳۷۳
m_i	۹/۲۸	۱۰/۰۶	۹/۵۵	۹/۶۳
ML	۵/۹	۶/۹	۶/۹	۶/۵۷
Av.Spec MLR	۵/۷۶	۶/۵۳	۵/۵۵	۵/۹۵
Av.RHR	۲۰۴/۹۸	۲۲۶/۶۸	۲۰۱/۰۷	۲۱۰/۹۱
PRHR	۵۲۱/۴۶	۴۸۴/۶۲	۴۲۴/۳۵	۴۷۶/۸۱
T PRHR	۶۰	۷۰	۶۴	۶۵
Av.EHC	۳۵/۷۸	۳۴/۳۷	۳۶/۵۳	۳۵/۵۶
THR	۲۳/۸	۲۸/۶	۲۶/۲	۲۶/۲
TSR	۳۰۹/۹	۳۵۸	۳۹۱/۹	۳۵۳/۲۷
Av. SEA	۴۶۵/۵۶	۴۳۰/۶	۵۴۷/۱۵	۴۸۱/۱
Av.CO2Y	۲/۴۳	۲/۲	۲/۴۳	۲/۳۵
Av.COY	۰/۰۴	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	۰/۰۳۷



جدول پ-۸ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی PC در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره آزمون	PC-1	PC-2	PC-3	میانگین
ρ	۲۰۴/۷	۲۰۵/۰	۲۰۱/۱	۲۰۳/۶
t	۶/۱۰	۶/۰۵	۶/۲۰	۶/۱۲
TTI	۵۰	۴۷	۵۲	۵۰
FO	۴۶۷	۶۰۰	۸۰۲	۶۲۳
m_i	۱۲/۳۹	۱۲/۵۹	۱۲/۵۷	۱۲/۵۲
ML	۷/۶	۷/۹	۸	۷/۸۳
Av.Spec MLR	۹	۸/۰۲	۸/۵۲	۸/۵۱
Av.RHR	۱۹۳/۹۲	۱۷۰/۷۵	۱۷۰/۲	۱۷۸/۲۹
PRHR	۶۳۶/۸۹	۶۲۳/۶۲	۶۲۰/۶۸	۶۲۷/۰۶
T PRHR	۶۶	۶۲	۶۴	۶۴
Av.EHC	۲۱/۵۵	۲۱/۳۴	۲۰	۲۰/۹۶
THR	۱۷/۷	۱۸/۶	۱۸/۹	۱۸/۴
TSR	۵۱۷	۵۴۱/۷	۵۶۴/۸	۵۴۱/۱۷
Av. SEA	۶۲۱/۰۴	۶۱۸/۱۸	۵۸۵/۶۴	۶۰۸/۲۹
Av.CO ₂ Y	۱/۸۳	۱/۹۲	۱/۷۳	۱/۸۳
Av.COY	۰/۰۷۷	۰/۰۷۳	۰/۰۶۴	۰/۰۷۱

جدول پ-۹ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی رزین Epoxy در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره آزمون	Epoxy-1	Epoxy-2	Epoxy-3	میانگین
ρ	۱۵۹۱/۸۸	۱۵۵۰/۵۱	۱۵۰۱/۲۸	۱۵۴۷/۸۹
t	۸/۹۳	۹/۳۹	۸/۹۹	۹/۱۰
TTI	۳۴	۳۴	۲۳	۳۰
FO	۱۱۲۰	۸۵۵	۱۰۸۸	۱۰۲۱
m_i	۱۴۲/۷۵	۱۴۶/۰۳	۱۳۴/۶۹	۱۴۱/۱۶
ML	۶۷/۳	۶۸/۱	۶۳/۲	۶۶/۲
Av.Spec MLR	۱۱/۶۲	۱۰/۶۷	۱۰/۱	۱۰/۸
Av.RHR	۳۱۸/۲۴	۲۸۳/۰۷	۲۴۸/۸۷	۲۸۳/۳۹
PRHR	۴۵۶/۰۹	۳۹۹/۸۲	۳۶۹/۶۷	۴۰۸/۵۳
T PRHR	۵۲۲	۴۳۴	۶۶	۳۴۱
Av.EHC	۲۷/۳۹	۲۶/۵۲	۲۴/۶۳	۲۶/۱۸
THR	۲۰۸/۲	۲۰۴/۴	۱۷۵/۷	۱۹۶/۱
TSR	۴۹۷۶/۹	۵۱۲۳/۵	۴۷۵۸/۵	۴۹۵۲/۹۷
Av. SEA	۶۵۴/۸۷	۶۶۴/۷۴	۶۶۶/۸۹	۶۶۲/۱۷
Av.CO ₂ Y	۱/۶۸	۱/۷۷	۱/۸	۱/۷۵
Av.COY	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۵	۰/۰۴۹



جدول پ-۱۰ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی سنگ مصنوعی وارداتی در تراز تابشی 50 kW/m^2

شماره نمونه	F.stone-1	F.stone-2	F.stone-3	میانگین
مغزه ρ	۲۳۸۳/۵	۲۳۵۰/۷	۲۳۸۱/۷	۲۳۷۲/۰
t	۱۲/۶۸	۱۲/۵۸	۱۲/۵۷	۱۲/۶۱
TTI	۲۳۵	۲۳۶	۲۳۲	۲۳۴
FO	۸۱۵	۸۰۸	۷۵۲	۷۹۲
m_i	۳۰۲/۷۱	۲۸۶/۷۹	۲۸۸/۱۹	۲۹۲/۵۶
ML	۲۵/۶	۲۴/۵	۲۳/۹	۲۴/۶۷
Av.Spec MLR	۶/۵۹	۶/۸۷	۷/۱۱	۶/۸۶
Av.RHR	۱۴۱/۱۱	۱۳۹/۳۴	۱۴۳/۶۳	۱۴۱/۳۶
PRHR	۲۰۰/۰۴	۲۲۲/۸۴	۲۱۶/۳۱	۲۱۳/۰۶
T PRHR	۳۴۰	۴۲۶	۴۱۲	۳۹۳
Av.EHC	۲۱/۴۱	۲۰/۲۷	۲۰/۲	۲۰/۶۳
THR	۶۱/۲	۵۵/۸	۵۴/۱	۵۷/۰۳
TSR	۲۱۳۸/۱	۱۷۸۳/۱	۱۶۹۹/۴	۱۸۷۳/۵۳
Av. SEA	۷۴۸/۶۵	۶۵۲/۰۴	۶۳۵/۲۱	۶۷۸/۶۳
Av.CO ₂ Y	۲/۰۸	۱/۹۵	۱/۹۱	۱/۹۸
Av.COY	۰/۰۴۲	۰/۰۵۱	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷

جدول پ-۱۱ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی MDF وارداتی در تراز تابشی 350kW/m^2

شماره آزمون	MDF-1	MDF-2	MDF-3	میانگین
ρ	۷۸۲/۴۷	۷۸۴	۷۸۹/۸۵	۷۸۵/۴۴
t	۹/۲۰	۹/۱۰	۹/۱۰	۹/۱۳
TTI	۱۰۷	۹۰	۱۱۹	۱۰۵
FO	۸۴۳	۸۹۵	۸۹۰	۸۷۶
m_i	۶۹/۱۷	۶۸/۱۳	۶۸/۴۸	۶۸/۵۹
ML	۵۱/۹	۵۱/۲	۴۹/۵	۵۰/۹
Av.Spec MLR	۸/۳۸	۹/۴۲	۸/۷۱	۸/۸
Av.RHR	۱۱۴/۵۴	۱۲۷/۹۶	۱۱۹/۰۲	۱۲۰/۵
PRHR	۱۸۶/۵۴	۲۵۰/۸۰	۲۱۳/۴۹	۲۱۶/۹۴
T PRHR	۵۴۴	۴۸۶	۵۰۶	۵۱۲
Av.EHC	۱۳/۶۸	۱۳/۵۹	۱۳/۶۷	۱۳/۶
THR	۷۷/۳	۷۷/۴	۷۳/۳	۷۶
TSR	۴۳۳/۸	۲۱۷/۳	۳۷۴/۷	۳۴۱/۹
Av. SEA	۵۷/۷۱	۲۷/۴۰	۴۹/۳۷	۴۴/۸
Av.CO ₂ Y	۱/۲۲	۱/۱۸	۱/۲۰	۱/۲
Av.COY	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴



جدول پ-۱۲ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی MDF داخلی در تراز تابشی 30kW/m^2 میانگین

شماره آزمون	MDF-3	MDF-4	MDF-5	میانگین
ρ	۸۲۹/۳۳	۷۶۶/۰۹	۷۵۳/۲۲	۷۸۲/۸۸
t	۸/۲۰	۸/۳۸	۸/۱۵	۸/۲۴
TTI	۴۲	۹۱	۱۸۳	۱۰۵
FO	۸۳۵	۷۷۵	۵۷۰	۷۲۷
m_i	۶۵/۶۰	۶۱/۹۰	۵۹/۷۳	۶۲/۴۱
ML	۵۰/۸	۴۷/۳	۴۳/۵	۴۷/۲
Av.Spec MLR	۹/۶۵	۱۰/۲۲	۱۰/۴۳	۱۰/۱
Av.RHR	۱۲۸/۳۹	۱۳۲/۳۹	۱۵۶/۲۳	۱۳۹
PRHR	۲۲۲/۵۴	۲۲۸/۰۶	۲۹۱/۳۸	۲۴۷/۳۳
T PRHR	۳۷۴	۴۵۴	۴۳۲	۴۲۰
Av.EHC	۱۳/۳۱	۱۲/۹۵	۱۵/۰۱	۱۳/۸
THR	۷۶/۱	۶۸/۲	۶۲/۰	۶۸/۸
TSR	۱۷۱/۳	۲۴۴/۳	۶۰۵/۷	۳۴۰/۴
Av. SEA	۲۷/۲۲	۳۷/۳۹	۶۱/۲۳	۴۱/۹
Av.CO ₂ Y	۱/۲۰	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۲
Av.COY	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۴

جدول پ-۱۳ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی HDF در تراز تابشی 30kW/m^2

شماره نمونه	HDF-1	HDF-2	HDF-3	میانگین
ρ	۹۱۷/۸۵	۹۳۱/۵۲	۹۲۳/۹۲	۹۲۴/۴۳
t	۸/۳۰	۸/۳۰	۸/۳۰	۸/۳
TTI	۶۸	۷۰	۷۵	۷۱
FO	۸۳۲	۷۱۲	۸۰۶	۷۸۳
m_i	۷۲/۵۱	۷۳/۵۹	۷۲/۹۹	۷۳/۰۳
ML	۵۴/۴	۵۴/۸	۵۴/۷	۵۴/۶
Av.Spec MLR	۹/۵۰	۱۰/۲۲	۹/۵۴	۹/۸
Av.RHR	۱۱۷/۰۷	۱۲۵/۶۱	۱۱۸/۹۲	۱۲۰/۵
PRHR	۴۳۶/۲۲	۴۸۵/۹۲	۲۹۲/۹۳	۴۰۵/۰۲
T PRHR	۸۲	۸۲	۴۹۲	۲۱۹
Av.EHC	۱۲/۳۴	۱۲/۳۰	۱۲/۴۷	۱۲/۴
THR	۷۶/۰	۷۵/۵	۷۶/۲	۷۵/۹
TSR	۱۰۰/۹	۱۰۸/۸	۹۳/۶	۱۰۱/۱
Av. SEA	۱۵/۲۸	۱۷/۰۸	۱۳/۰۰	۱۵/۱
Av.CO ₂ Y	۱/۱۱	۱/۱۰	۱/۱۲	۱/۱
Av.COY	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳



جدول پ-۱۴ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی PVC وارداتی در تراز تابشی 30kW/m^2 میانگین

شماره نمونه	PVC-1	PVC-2	PVC-3	میانگین
ρ	۳۵۳/۴۵	۳۵۶/۲۷	۳۵۴/۴۶	۳۵۴/۷۳
t	۷/۸۰	۷/۷۳	۷/۷۰	۷/۷۴
TTI	۶۶	۱۵	۲۰	۳۴
FO	۲۳۷	۳۲	۳۰	۱۰۰
m_i	۲۶/۱۲	۲۶/۱۵	۲۶/۱۳	۲۶/۱۳
ML	۱۳/۲	۱۲/۶	۱۱/۵	۱۲/۴
Av.Spec MLR	۷/۰۷	۶/۱۳	۵/۹۱	۶/۴
Av.RHR	۹۴/۰۴	۲۲/۲۸	۱۸/۴۷	۴۴/۹
PRHR	۱۴۱/۲۴	۹۵/۲۹	۹۹/۶۱	۱۱۲/۰۵
T PRHR	۷۴	۲۲	۲۴	۴۰
Av.EHC	۱۳/۲۸	۳/۶۴	۳/۱۳	۶/۷
THR	۱۵/۴	۵/۱	۴/۳	۸/۳
TSR	۷۱۱/۶	۹۵۷/۹	۹۶۳/۴	۸۷۷/۶
Av. SEA	۴۹۹/۴۳	۶۸۳/۵۷	۷۲۰/۴۱	۶۳۴/۵
Av.CO ₂ Y	۱/۱۱	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/۷۴
Av.COY	۰/۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۳

جدول پ-۱۵ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی PVC داخلی در تراز تابشی 30kW/m^2

شماره آزمون	PVC-1	PVC-2	PVC-3	میانگین
ρ	۳۴۴/۳۰	۴۰۳/۵	۳۷۹/۱۹	۳۷۵/۶۶
t	۸/۲۳	۸/۳۳	۸/۴۲	۸/۳۳
TTI*	۱۸	۱۷	۱۸	۱۸
FO	۲۷	۲۹	۲۸	۲۸
m_i	۲۷/۲۰	۳۲/۲۸	۳۰/۰۷	۲۹/۸۵
ML	۱۲/۷	۱۵/۱	۱۴/۷	۱۴/۲
Av.Spec MLR	۶/۲۷	۶/۵۴	۶/۴۷	۶/۴
Av.RHR	۱۹/۳۳	۱۹/۰۲	۲۳/۶۲	۲۰/۷
PRHR	۸۱/۲۰	۱۱۴/۰۵	۹۶/۲۴	۹۷/۱۶
T PRHR	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲
Av.EHC	۳/۰۹	۲/۹۲	۳/۶۶	۳/۲
THR	۴/۶	۵/۰	۶/۰	۵/۲
TSR	۷۵۷/۷	۹۱۲/۲	۹۶۱/۰	۸۷۷
Av. SEA	۵۲۴/۰۰	۵۴۰/۷۷	۵۹۰/۰۴	۵۵۱/۶
Av.CO ₂ Y	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۵۶
Av.COY	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴



جدول پ-۱۶ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی کفپوش PVC در تراز تابشی $35kW/m^2$

شماره آزمون	PVC.F-1	PVC.F-2	PVC.F-3	میانگین
ρ	۱۸۹۲/۲	۱۷۴۵/۴	۱۷۸۲/۹	۱۸۰۹/۸
t	۲/۰۵	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۲
TTI	۵۴	۴۳	۷۸	۵۸
FO	۱۹۹	۴۷	۲۱۶	۱۵۴
m_i	۳۵/۹۹	۳۴/۹۱	۳۴/۴۱	۳۵/۱۰
ML	۹/۴	۱۰/۷	۱۰/۹	۱۰/۳
Av.Spec MLR	۷/۰۴	۵/۰۴	۷/۷۶	۶/۶
Av.RHR	۱۰۴/۱۲	۵/۶۲	۱۱۶/۵۰	۷۵/۴
PRHR	۱۹۲/۷۵	۱۲/۳۸	۲۲۶/۱۳	۱۴۳/۷۵
T PRHR	۹۰	۲۷۶	۹۸	۱۵۵
Av.EHC	۱۴/۷۸	۱/۱۱	۱۵/۲۷	۱۰/۴
THR	۱۴/۹	۱/۴	۱۹/۰	۱۱/۸
TSR	۵۰۴/۴	۷۸۱/۷	۵۵۷/۳	۶۱۴/۵
Av. SEA	۴۳۳/۹۷	۶۴۷/۳۱	۲۹۸/۲۴	۴۵۹/۸
Av.CO ₂ Y	۱/۳۵	۰/۶۷	۱/۱۴	۱/۱
Av.COY	۰/۰۷۱	۰/۰۱۹	۰/۰۵۵	۰/۰۵

جدول پ-۱۷ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی موکت در تراز تابشی 30kW/m^2

شماره آزمون	T.C-1	T.C-2	T.C-3	میانگین
ρ	۱۷۶/۵۵	۱۸۹/۱۶	۱۷۲/۷۸	۱۷۹/۵
t	۵/۰۸	۴/۸۰	۵/۲۳	۵/۰۴
TTI	۲۸	۳۰	۵۳	۳۷
FO	۶۱۶	۵۰۴	۳۸۳	۵۰۱
m_i	۹/۴۱	۹/۲۵	۹/۱۴	۹/۲۷
ML	۵/۶	۶/۱	۶/۶	۶/۱
Av.Spec MLR	۴/۶۷	۴/۵۹	۴/۸۱	۴/۷
Av.RHR	۱۶۸/۱۱	۱۶۷/۶۹	۱۶۷/۵۸	۱۶۷/۸
PRHR	۳۰۰/۱۸	۲۹۱/۱۵	۲۹۰/۹۳	۲۹۴/۰۹
T PRHR	۹۰	۸۸	۱۰۲	۹۳
Av.EHC	۳۶/۱۱	۳۶/۴۹	۳۴/۸۰	۳۵/۸
THR	۲۳/۰	۲۵/۲	۲۳/۰	۲۳/۷
TSR	۲۹۹/۴	۳۳۷/۶	۳۷۳/۶	۳۳۶/۹
Av. SEA	۴۶۹/۲۲	۴۸۹/۱۲	۵۱۱/۸۹	۴۹۰/۱
Av.CO ₂ Y	۲/۳۰	۲/۴۰	۲/۳۵	۲/۴
Av.COY	۰/۰۳۷	۰/۰۳۶	۰/۰۳۴	۰/۰۴



جدول پ-۱۸ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی PC در تراز تابشی ۳۵kW/m^2

شماره آزمون	PC-1	PC-2	PC-3	میانگین
ρ	۲۰۴/۵۵	۲۰۴/۹۸	۲۰۳/۵۵	۲۰۴/۳۶
t	۶/۱۳	۶/۱۰	۶/۱۰	۶/۱۱
TTI	-	-	-	-
FO	-	-	-	-
m_i	۱۲/۵۸	۱۲/۷۵	۱۲/۶۲	۱۲/۶۵
ML	۰/۶	-	-	۰/۲
Av.Spec MLR	۰/۳۹	-	۰/۱۳	۰/۲
Av.RHR	۵/۴۹	۱/۳۹	۲/۳۱	۳/۱
PRHR	۹/۸۷	۳/۸۳	۵/۸۹	۶/۵
T PRHR	۵۰	۶۸	۴۰	۵۳
Av.EHC	۱۴/۲۴	-	۲۵/۵۱	۱۳/۳
THR	۰/۹	۰/۱	۰/۱	۰/۴
TSR	۶۶/۱	۰/۳	۰/۷	۲۲/۴
Av. SEA	۹۹۵/۵۸	-	۱۲۵/۴۲	۳۷۳/۷
Av.CO ₂ Y	۸/۹۶	-	۲۹/۲۳	۱۲/۷
Av.COY	۰/۰۳۵	-	-	۰/۰۱

جدول پ-۱۹ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی رزین Epoxy در تراز تابشی 30kW/m^2

شماره نمونه	Epoxy-1	Epoxy-2	Epoxy-3	میانگین
ρ	۱۶۱۸/۸	۱۶۱۴/۳	۱۶۷۱/۳	۱۶۳۴/۸
t	۹/۴۰	۱۰/۵۰	۱۰/۲۰	۱۰/۰۳
TTI	۱۱۴	۱۰۷	۱۱۰	۱۱۰
FO	۱۲۵۰	۱۲۴۵	۱۴۵۰	۱۳۱۵
m_i	۱۵۱/۲۰	۱۶۱/۴۳	۱۶۴/۱۲	۱۵۸/۹۲
ML	۷۲/۱	۷۵/۶	۷۶/۳	۷۴/۷
Av.Spec MLR	۹/۱۲	۹/۶۹	۹/۶۶	۹/۵
Av.RHR	۲۴۳/۲۰	۲۴۷/۲۵	۲۸۲/۷۰	۲۵۷/۷
PRHR	۳۴۹/۲۹	۳۲۳/۷۵	۳۷۴/۰۳	۳۴۹/۰۲
T PRHR	۵۷۸	۱۲۰	۷۷۴	۴۹۱
Av.EHC	۲۶/۶۸	۲۵/۵۰	۲۹/۲۵	۲۷/۱
THR	۲۱۷/۰	۲۱۷/۹	۲۵۳/۱	۲۲۹/۳
TSR	۴۶۷۵/۳	۵۳۵۰/۰	۵۱۱۹/۵	۵۰۴۸/۳
Av. SEA	۵۷۵/۰۹	۶۲۶/۰۲	۵۹۲/۴۰	۵۹۷/۸
Av.CO ₂ Y	۱/۸۲	۱/۷۰	۱/۷۲	۱/۷
Av.COY	۰/۰۴۹	۰/۰۴۹	۰/۰۵	۰/۰۵



جدول پ-۲۰ نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی سنگ مصنوعی وارداتی در تراز تابشی $35kW/m^2$

شماره نمونه	F.stone-1	F.stone-2	F.stone-3	میانگین
ρ	۲۳۹۶/۶	۲۳۷۳/۶	۲۳۳۸	۲۳۶۹/۴
t	۱۲/۶۰	۱۲/۶۵	۱۲/۳۰	۱۲/۵۲
TTI	۳۷۶	۳۷۰	۳۵۰	۳۶۵
FO	۱۰۸۶	۱۱۷۱	۱۰۵۴	۱۱۰۴
m_i	۲۹۹/۵۷	۳۰۱/۴۵	۲۸۹/۹۷	۲۹۷/۰
ML	۲۳/۸	۲۴/۶	۲۶/۱	۲۴/۸
Av.Spec MLR	۵/۶۶	۶/۰۱	۶/۲۵	۶/۰
Av.RHR	۱۱۹/۳۴	۱۲۶/۲۵	۱۴۳/۳۳	۱۲۹/۶
PRHR	۱۸۴/۴۷	۱۸۶/۲۱	۲۰۸/۰۰	۱۹۲/۸۹
T PRHR	۵۲۲	۵۱۰	۴۹۴	۵۰۹
Av.EHC	۲۱/۰۶	۲۱/۰۲	۲۲/۹۱	۲۱/۷
THR	۵۷/۴	۵۹/۶	۶۷/۹	۶۱/۶
TSR	۱۷۷۵/۱	۱۸۶۳/۳	۱۸۵۹/۲	۱۸۳۲/۵
Av. SEA	۶۵۴/۷۲	۶۶۸/۴۸	۶۴۵/۲۶	۶۵۶/۲
Av.CO ₂ Y	۲/۱۱	۲/۰۶	۱/۸۰	۲/۰
Av.COY	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۳۸	۰/۰۴

Abstract

Fire safety in buildings is an important issue that must be considered in the building design and construction. Fire may cause severe damage and loss of lives and property and even complete collapse of building.

In recent years, many polymeric materials have been used in construction industry, which most of them are highly flammable and their application can be dangerous in buildings. Thus, the fire behavior of these materials should be assessed and classified by fire tests.

It is also necessary to prepare appropriate building regulations in order to prevent use of hazardous materials in buildings or spaces that require higher safety levels (such as assembly occupancies and staircases). Fire modeling of buildings is nowadays a proper device for design of fire safety and help fire scenarios investigation.

The application of these models in the world today is growing and specialty software is developed by research centers. In this report, first, relatively complete overview is presented on methods of classifying materials in terms of the risk of fire.

Theoretical issues about zone and field fire models have been discussed. Theoretical and mathematical equations governing these methods are presented. The fire models (zone and field models) in fire engineering were reviewed. Use of the selected soft wares and their functionality were evaluated.

The fire behavior of ten Common polymeric materials used to construction was studied with cone calorimeter fire test at 50kW/m^2 . The thermal parameters related to the burning materials considering risk analysis in fire spread were discussed. Fire risk of materials by proposed methods by different researchers and software Conetools was discussed.

Most of the materials studied had the dangerous fire behavior. Particularly epoxy samples, MDF, HDF and polycarbonate showed very dangerous fire behavior. The results showed that reaction to fire parameters such as ignition time; peak and total heat release are the main fire characteristics of materials in the fire risk determination.

The time to ignition has an important effect on time to flashover and rate of surface flame spread on finishes and ignoring it can be resulted in errors in predicting fire risk of materials.

A new method was provided to classify materials in the risk of fire that can be used in national building regulations to evaluate fire characteristics of materials.



**Road, Housing and Urban Development
Research Center**

Investigation on Fire Properties of Ten Building Materials and Simulation of Their Fire Hazard Using Some Fire Models

**Dr. Saeed Bakhtiyari
Masoud Jamali Ashtiani
Leila Taghi-Akbari
Zahra Doroudiani
Elham Askari Moghadam**

**Research Report
BHRC Publication No.: R-680**