

بررسی تجربی خطرپذیری آتش سوزی و همبستگی پارامترهای خطر آتش سوزی برای برخی مصالح ساختمانی پلیمری

سعید بختیاری^{۱*}، لیلا تقی اکبری^۲، مسعود جمالی آشتیانی^۳

۱- عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش آتش و ساختمان

۲- کارشناس ارشد مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش آتش و ساختمان

۳- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش آتش و ساختمان

bakhtiyari@bhrc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۲۰

چکیده- رفتار ده ماده ساختمانی پلیمری در برابر آتش با گرماسنج مخروطی در تابش 50 kW/m^2 آزمایش شد. خطرپذیری این مواد در آتش سوزی شامل حرارت و دود آزاد شده، با روش های گوناگون بررسی و بحث شد. بیش تر مواد بررسی شده، رفتار خطرناکی برای آتش داشتند. از دید حرارتی، نمونه های MDF، موکت و اپوکسی و از دیدگاه دود و سمیت، نمونه های پلی کربنات و اپوکسی بسیار خطرناک نشان دادند. بنابراین برای به کار بردن این مواد در ساختمان باید مقررات مناسب، تدوین و محدودیت های کاربرد آنها مشخص شود. پارامترهای حرارتی ناشی از سوختن مواد، با هدف ارزیابی خطر آنها در گسترش آتش سوزی بررسی شد. نتایج نشان داد که پارامترهای زمان افروزش، شدت رهایش گرما و کل رهایش گرما، مهم ترین ویژگی ها برای تعیین خطر گسترش آتش سوزی است. زمان افروزش بر زمان وقوع گُر گرفتگی در اتاق و سرعت پیشروی سطحی شعله بر نازک کاری ها تأثیر مهمی دارد و نادیده گرفتن آن می تواند به پیش بینی اشتباه خطر گسترش آتش سوزی منجر شود. از دیدگاه سمیت، منحنی منوکسید کربن کنار پارامتر سمیت می تواند برای ارزیابی خطر سمیت به کار رود.

واژگان کلیدی: ایمنی برابر آتش، خطر آتش سوزی، مقررات ساختمانی، پتانسیل دود و سمیت، گرماسنج مخروطی

۱- مقدمه و دامنه پژوهش

آتش باید آزمایش و دسته بندی شود. همچنین لازم است با وضع مقررات ساختمانی مناسب، از کاربرد مصالح خطرناک در ساختمان یا فضاهایی که به ایمنی بیشتری نیاز دارد (مانند فضاهای تجمعی و راه پله ها) جلوگیری شود. در این پژوهش، ۱۰ ماده ی پلیمری انتخاب شده و آزمایش آتش روی آنها انجام شد. خطر آتش گرفتن آزمون ها با روش های گوناگون بررسی و نتایج با یکدیگر مقایسه شد.

ایمنی برابر آتش موضوع مهمی است که در طراحی و اجرای ساختمان ها باید در نظر گرفته شود. آتش سوزی می تواند خرابی های جانی و مالی شدید و حتی ریزش ساختمان را در پی داشته باشد. در سال های نزدیک، مصالح پلیمری زیادی وارد صنعت ساختمان شده که بسیاری از آنها توانایی آتش گیری بالایی دارند؛ رفتار این مواد برابر

سوندستروم [۴] با این روش، بیش از ۲۰ ماده را آزمایش و یک روش دسته بندی پیشنهاد کرد. این آزمون هزینه بالایی دارد و برای کارهای پژوهشی و مقرراتی، اقتصادی نیست. ویکستروم [۴ و ۵] روشی برای پیش بینی نتایج آزمون گوشه اتاق بر اساس نتایج گرماسنج مخروطی پیشنهاد کرد. در EN 13501-1، رفتار مصالح برابر آتش به طبقات A (بی اثر در آتش سوزی) تا F (غیرقابل قبول) دسته بندی شده است، همچنین به دستگاه مقیاس متوسط SBI نیاز است [۶].

ریچاردسون [۷] با کاربرد دو پارامتر بیشینه شدت رهایش گرما (PRHR) و کل رهایش گرما (THR) به دست آمده از ۱۵ دقیقه نخست آزمون گرماسنج مخروطی، تابش 50 kW/m^2 ، دسته بندی زیر را پیشنهاد کرد: دسته ۱: مواد غیرقابل سوختن که THR آن ها 5 MJ/m^2 یا کمتر و PRHR آن ها برابر یا کمتر از 10 kW/m^2 باشد، دسته ۲: THR بیشینه 25 MJ/m^2 و PRHR، برابر یا کمتر از 100 kW/m^2 باشد (مانند تخته گچی با روکش کاغذی)، دسته ۳: THR بیشینه 50 MJ/m^2 و PRHR بیشینه، 150 kW/m^2 باشد، دسته ۴: THR بیشینه، 100 MJ/m^2 و PRHR، 300 kW/m^2 یا کمتر باشد، و دسته ۵: THR بیش از 100 MJ/m^2 و PRHR بیش از 300 kW/m^2 باشد.

مواد دسته های ۴ و ۵، مواد خطرناک و خیلی خطرناک است و برای به کار بردن آن ها در ساختمان باید از یک پوشش محافظ استفاده کرد. برای نمونه، وضعیت پلی استایرن منبسط شده را می توان نام برد [۸].

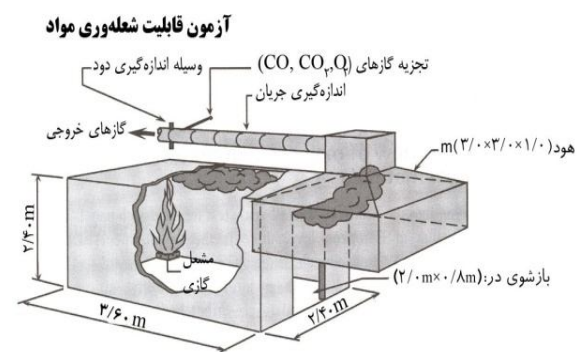
اوستمان و نوسبام [۹ و ۱۰] بررسی های تجربی و ریاضی برای برقراری ارتباط بین نتایج گرماسنج مخروطی و گوشه اتاق انجام دادند و معادله تجربی زیر را پیشنهاد کردند:

$$t_{fo} = 0.0716 \frac{t_{ig}^{0.25} \rho^{1.72}}{THR_{300}^{1.3}} + 57.4 \quad (1)$$

پارامترهای حرارتی و سمیت (شامل دود و منوکسید کربن) ناشی از سوختن مواد بررسی شد. همبستگی بین نتایج آزمون بررسی شد که می تواند برای طبقه بندی خطرپذیری مواد در برابر آتش استفاده شود. بر این اساس یک روش طبقه بندی در مقاله دیگری ارائه خواهد شد.

۲- مرور ادبیات علمی

روش های گوناگونی برای دسته بندی خطر آتش گیری مواد پیشنهاد شده است [۱]. یک روش مهم برای تعیین خطر مواد در آتش سوزی، ارزیابی مشارکت آن و ماده در رسیدن به نقطه گر گرفتن^۱ است؛ یعنی لحظه ای که آتش ناگهان کل اتاق را فرا گرفته، شعله های آتش از بازشوها به بیرون گسترش می یابد. ایجاد ارتباط بین ویژگی های آتش مواد و زمان رسیدن به گر گرفتن، شاخص مناسبی برای ارزیابی خطر آتش سوزی مواد است. سوندستروم [۲] دسته بندی خطر آتش گرفتن مواد را آزمون گوشه اتاق^۲ (شکل ۱) بررسی کرد. نمونه به عنوان نازک کاری اتاق اجرا می شود و مقدار گرمای آزاد شده با اندازه گیری اکسیژن مصرف شده [۳] به دست می آید. منبع افروزش، یک مشعل گازی در گوشه اتاق است.



شکل (۱) نمایی از آزمون گوشه اتاق طبق ISO ۹۷۰۵

3- Total heat release
4- Östman and Nussbaum

1- Flashover
2- Room corner

۳- مواد مورد استفاده و روش انجام کار

۳-۱- مواد

۱۰ ماده‌ی ساختمانی (جدول ۲) تهیه شد. برای تعدادی از مصالح، نمونه‌هایی از هر دو منبع داخلی و خارجی تهیه شد. در جدول ۲، از کدهای زیر برای نمونه‌ها استفاده شده است:

MDF-1: تخته MDF تولید داخل، MDF-2: تخته MDF وارداتی، HDF: تخته HDF وارداتی، PVC-1: ورق دو جداره دیوارپوش پی‌وی‌سی تولید داخل، PVC-2: ورق دو جداره دیوارپوش پی‌وی‌سی وارداتی، PVC-F: کف‌پوش پی‌وی‌سی وارداتی، Textile covering: موکت بافته‌شده پلی‌پروپیلن تولید داخل، PC: ورق پلی‌کربنات، Epoxy: کف‌پوش صنعتی ریختنی با چسباننده اپوکسی و پرکننده معدنی، Fabric stone: سنگ مصنوعی تولید داخل با چسباننده پلی‌استر، دارای مواد کندسوز کننده و پرکننده‌های معدنی.

جدول (۲) ویژگی‌های نمونه‌های آزمون

ردیف	کد نمونه	میانگین چگالی (Kg/m ³)	میانگین ضخامت (mm)
۱	MDF-1	۷۸۴/۳۴	۸/۱۷
۲	MDF-2	۷۷۷/۰۲	۹/۱۶
۳	HDF	۹۱۷/۷۳	۸/۳
۴	PVC-1	۱۷۷۶/۶	۰/۸
۵	PVC-2	۱۴۳۴/۹	۰/۸
۶	PVC-F	۱۸۴۳/۶۵	۲/۰۱
۷	Textile covering	۱۸۲/۶	۵/۱۲
۸	PC	۲۰۳/۹۸	۶/۱۰
۹	Epoxy	۱۵۹۱/۳۴	۹/۵۶
۱۰	Fabric stone	۲۳۷۰/۷	۱۲/۵۶

۳-۲- روش آزمون

آزمون با گرماسنج مخروطی در تابش ۵۰ kW/m² هماهنگ با ISO ۵۶۶۰-۱ انجام شد. دستگاه آزمون بر اساس تئوری

t_{f0} (ثانیه)، زمان گر گرفتن در آزمون گوشه اتاق، t_{ig} (ثانیه) زمان افروزش در گرماسنج مخروطی با تابش ۵۰ kW/m²، THR_{300} (J/m²)، کل رهایش گرما در مدت ۳۰۰ ثانیه پس از افروزش با تابش ۵۰ kW/m² و ρ (kg/m³)، چگالی متوسط است.

حاصل تقسیم PRHR/TTI، که از آزمون گرماسنج مخروطی به دست آمده، به عنوان شاخص میل به گر گرفتن^۱ یا پارامتر x مطرح شده است [۱۱-۱۳]. هر چه پارامتر x بزرگ‌تر باشد، امکان گر گرفتن ناشی از سوختن ماده بیشتر است. پترلا [۱۲] برای در نظر گرفتن جرم ماده، THR را نیز کنار x در نظر گرفت و یک مقیاس دوگانه برای درجه‌بندی مواد پیشنهاد کرد (جدول ۱).

جدول (۱) دسته‌بندی مواد بر اساس x و THR [۱۲]

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

بختیاری [۱۴-۱۶] خطر آتش‌سوزی پلی‌استایرن و پلی‌یورتان را بر اساس روش پترلا بررسی کرده است. در این مقاله، رفتار برخی مصالح پلیمری، که در صنعت ساختمان ایران کاربرد دارد، بررسی شده است. آزمون آتش روی این مواد با گرماسنج مخروطی انجام شد. پارامترهایی که می‌توانند برای ارزیابی خطر آتش‌گیری مواد به کار روند، استخراج و ارزیابی شد. وابستگی بین پارامترها بررسی شد. خطر آتش‌گیری حرارت شامل پارامترهای حرارتی، دود و سمیت منوکسید کربن با روش‌های گوناگون بررسی شد.

1- Propensity to flashover

آن‌ها عبارت است: بالا بودن چگالی، زغال شدن سطح ماده و درصد زیاد محتوای قابل سوختن ماده. بنابراین، طولانی شدن زمان سوختن به معنای خطرناک بودن ماده نیست و برای ارزیابی خطر مشارکت یک ماده در آتش سوزی، باید پارامترهای مهم دیگری را نیز در نظر گرفت که در ادامه بیشتر به آن پرداخته خواهد شد.

جدول (۳) نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی ۱۰ نمونه مصالح ساختمانی در تراز تابشی 50 kW/m^2

پارامتر	MDF-1	MDF-2	HDF	PVC-1	PVC-2
ρ	۷۸۵/۸	۷۶۷/۶	۹۱۱/۰	۱۷۷/۷	۱۴۳/۵
t	۸/۱	۹/۲	۸/۳	۰/۸	۰/۸
TTI	۶	۱۴	۳۶	۱۲	۹
FO	۷۸۸	۹۸۶	۷۵۳	۱۷۵	۱۷۷
m_i	۶۱/۳	۶۷/۴	۷۲/۷	۳۱/۶	۲۶/۹
ML	۴۷/۳	۵۲/۲	۵۵/۶	۱۵/۳	۱۳/۷
Av. RHR	۱۵۰/۷	۱۵۰/۱	۱۵۴/۶	۶۰/۸	۱۰۳/۸
PRHR	۲۷۴/۰	۲۹۱/۰	۵۸۹/۸	۱۵۴/۳	۱۴۶/۱
THR	۶۹/۸۰	۷۸/۸۰	۸۱/۸۳	۱۲/۱۸	۱۷/۹۳
PSPR	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۴	۰/۱۰۳	۰/۱۰۴
Peak CO	۹۱/۱	۹۴/۴	۱۷۵/۲	۱۲۲/۷	۲۴۱/۴
Av.CO	۴۱/۸	۴۴/۷	۴۹/۰	۸۲/۸	۱۵۲/۰
پارامتر x	۴۵/۷	۲۰/۸	۱۶/۴	۱۲/۹	۱۶/۲
ρ	۱۸۷/۷	۱۸۵/۷	۲۰۳/۶	۱۵۴/۷	۲۳۷/۲
T	۲/۰	۵/۲	۶/۱	۹/۱	۱۲/۶
TTI	۲۷	۱۴	۵۰	۳۰	۲۳۴
FO	۱۶۵	۳۷۳	۶۲۳	۱۰۲۱	۷۹۲
m_i	۳۵/۹	۹/۶	۱۲/۵	۱۴۱/۲	۲۹۲/۶
ML	۱۰/۱	۶/۶	۷/۸	۶۶/۲	۲۴/۷
Av. RHR	۱۱۴/۷	۲۱۰/۹	۱۷۸/۳	۲۸۳/۴	۱۴۱/۴
PRHR	۲۲۳/۹	۴۷۶/۸	۶۲۷/۱	۴۰۸/۵	۲۱۳/۱
THR	۱۶/۳۳	۲۶/۲۰	۱۸/۴۰	۱۹۶/۱	۵۷/۰۳
PSPR	۰/۰۹۱	۰/۰۶۲	۰/۱۹۰	۰/۱۰۴	۰/۰۷۶
Peak CO	۳۲۶/۰	۱۹۵/۱	۷۶۷/۲	۲۸۸/۰	۲۰۰/۳
Av.CO	۱۴۶/۴	۷۶/۶	۱۵۵/۹	۲۰۰/۵	۷۵/۶
پارامتر x	۸/۳	۳۴/۱	۱۲/۵	۱۳/۶	۰/۹

"اکسیژن مصرف شده" طراحی شده است. شدت رهائش گرما با اندازه گیری اکسیژن مصرف شده (۱۳/۱) مگاژول بر کیلوگرم اکسیژن) و THR از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$THR = \int_0^{t_f} q(t).dt \quad (2)$$

همچنین TTI، چشمی، دیده و ثبت می‌شود. تیرگی پدید آمده از دود، با روش‌های نوری و گازهای دی‌اکسید و منوکسید کربن با ارزیابی‌های گاز اندازه‌گیری می‌شود.

۴- نتایج و بحث

نتایج آزمون گرماسنجی و پارامتر میل به گرگرفتگی سراسری (x)، در جدول ۳ آمده است. نتایج آزمون، میانگین سه بار آزمون است. برای کاهش خطای ناشی از شعله‌های کوچک، معیار "شدت افت وزنی (MLR)"^(۱) برای پایان آزمون‌ها در نظر گرفته شد.

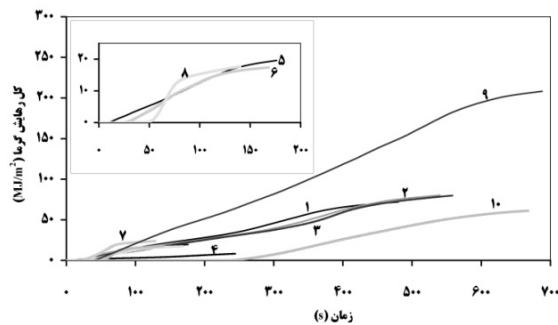
۴-۱- پارامترهای حرارتی آتش

۴-۱-۱- زمان افروزش و زمان شعله‌وری

بیشتر آزمون‌ها به سرعت آتش گرفتند. هرچه TTI کوتاه‌تر باشد، نمونه آسان‌تر آتش می‌گیرد و پیش‌روی سطحی شعله روی آن می‌تواند سریع‌تر باشد. میان آزمون‌ها، تنها سنگ مصنوعی بود که افروزش آن بیش از یک دقیقه طول کشید. زمان آتش‌گیری نیز بررسی شد؛ بیشترین زمان مربوط به کف‌پوش اپوکسی و تخته 2-MDF بود که به ترتیب ۱۰۲۱ و ۹۸۶ ثانیه طول کشید. مدت آتش‌گیری سنگ مصنوعی نیز طولانی بود (۷۹۲ s)، در حالی که همین آزمون دیرتر از بقیه آزمون‌ها آتش گرفته بود.

طولانی شدن زمان آتش‌گیری دلایل گوناگونی دارد که مهم‌ترین

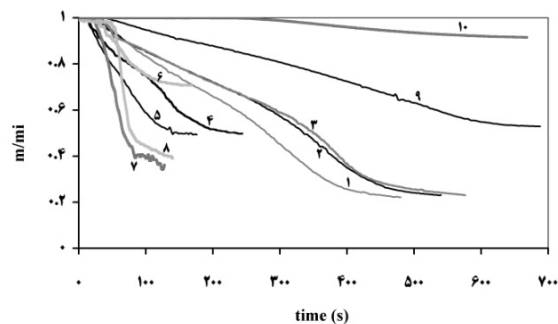
1- Mass loss rate



شکل (۲) منحنی کل رهائش گرما برای آزمون‌ها (شماره نمونه‌ها با جدول ۲ هماهنگ است)

در شکل ۳، جرم پسماند نسبی بر حسب زمان نشان داده شده است. نمونه‌های موکت و پلی‌کربنات، اگرچه PRHR زیادی دارند، اما به‌خاطر جرم پایین، سوختن آن‌ها به سرعت به پایان رسیده، THR آن‌ها چندان بالا نیست. سرانجام حدود ۱۰ درصد از جرم نمونه سنگ مصنوعی نیز سوخته است (باقی نمونه از نوع معدنی بوده است)، با این وجود به‌خاطر ماهیت پلیمر چسباننده، PRHR نسبتاً بالایی داشته است.

این نتایج، اهمیت در نظر داشتن جرم ماده (چگالی سطحی) را در ارزیابی خطر آتش‌سوزی، نشان می‌دهد.



شکل (۳) منحنی جرم پسماند نسبی بر حسب زمان (شماره نمونه‌ها با جدول ۲ هماهنگ است)

۴-۲-دود

دو تهدید اصلی دود در آتش‌سوزی، ایجاد اختلالات تنفسی و کاهش دید است. میانگین سطح تیرگی ویژه (Av.SEA) و

۴-۱-۲- شدت رهائش گرما (RHR)

مقادیر میانگین و بیشینه آن برای آزمون‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. به‌طور کلی در آغاز آزمون و پیش از افروزش، RHR مقدار کمی دارد، زیرا دمای سطح نمونه هنوز برای پیرولیز و سوختن گازهای ناشی از آن به اندازه‌ی کافی بالا نرفته است. پس از افروزش، معمولاً مقدار RHR به سرعت افزایش یافته، به اوج خود می‌رسد که مقدار آن به محتوای آتش‌گیرنده ماده بستگی دارد. سپس با تشکیل لایه زغال روی سطح سوخته، مزاحمت‌هایی برای فرایند سوختن ایجاد می‌شود و RHR کاهش می‌یابد [۱۷]. با کاهش محتوای آتش‌گیرنده‌ی ماده، RHR کاهش یافته، به سمت خاموش شدن می‌رود. گاهی ممکن است با غلبه فشار گاز ناشی از پیرولیز بر سطح زغال‌شده و فرار حجم چشم‌گیری به فضای بالای سطح نمونه، یک یا حتی چند اوج دیگر نیز دیده شود.

بالاترین PRHR مربوط به نمونه پلی‌کربنات با $627/1 \text{ kW/m}^2$ بود که مقدار بسیار زیادی است. پس از آن، HDF با $589/8$ ، موکت با $476/8$ و اپوکسی با 408 کیلووات بر مترمربع PRHR بالایی داشتند. به عبارت دیگر این نمونه‌ها می‌توانند بار حرارتی چشم‌گیری به فضای آتش‌سوزی وارد کرده و مشارکت بالایی در گسترش آتش‌سوزی داشته باشند.

۴-۱-۳- مقدار کل رهائش گرما (THR)

مقدار THR نمونه‌ها بر اثر سوختن، در جدول ۳ و منحنی‌های آن‌ها بر اساس زمان در شکل ۲ آمده است. هرچه THR آزادشده از ماده بیشتر باشد، مشارکت بیشتری در گسترش آتش‌سوزی خواهد داشت؛ مدت زمان آزاد شدن گرما و شدت آن نیز باید در نظر گرفته شود. میان آزمون‌ها، THR کف‌پوش صنعتی اپوکسی بسیار بالاتر بود.

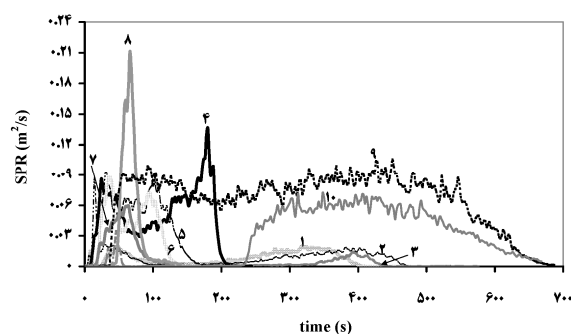
منحنی‌های میانگین شدت رهائش گرما، PRHR و THR بر حسب TTI، رسم و بررسی شد. نتایج نشان داد که چنین وابستگی بین پارامترهای رهائش گرما و TTI وجود ندارد. TTI بیش‌تر آزمون‌ها در بازه‌ی ۶ تا ۵۰ ثانیه و نزدیک به هم بودند، در حالی که اختلاف بین پارامترهای حرارتی آن‌ها گاهی چشم‌گیر است. یک دلیل این موضوع، باید اثر چگالی نمونه و زغال شدن روی سطح آزمون باشد. برای بررسی، اثر چگالی نیز در نظر گرفته و فرض شد که THR با چگالی نسبت مستقیم و با TTI نسبت عکس دارد:

$$THR \approx \rho / TTI \quad (۳)$$

نمودار THR بر حسب نسبت چگالی به زمان افروزش، رسم و بررسی شد. در نظر گرفتن چگالی ماده باعث شد که نتایج از یکدیگر بازتر شده، تا حدودی ارتباط میان پارامترها دیده شود، اما باز هم برای تعدادی از نمونه‌ها این موضوع درست نبود؛ تشخیص داده شد که کم بودن جرم برخی نمونه‌ها؛ یکی از دلایل است. برای از بین بردن این اثر، به جای چگالی از چگالی سطحی استفاده شد. نمودار به دست آمده، همبستگی خوبی را نشان داد (شکل ۵). نقاط مربوط به نمونه‌های PVC تقریباً روی هم هم‌مانند شدند، در حالی که در بررسی‌های پیشین با هم فاصله داشتند. تنها انحراف چشم‌گیر، در نمونه‌های MDF بود که علت آن، زمان افروزش بسیار کوتاه آن‌ها و هم‌زمان، وجود یک رواداری ۷ ثانیه‌ای در نتایج بود که خود را در نسبت ρ/TTI به گونه‌ای چشم‌گیر نشان داده است. سایر پراکندگی‌ها می‌تواند به خاطر پراکندگی ذاتی زمان افروزش باشد.

لازم است گفته شود که نمونه‌های PVC-1 و PVC-2، شکل شبکه‌ای دو جداره دارد، بنابراین در جدول ۲، ضخامت و چگالی آن‌ها، برای ورق داده شده، اما چگالی سطحی بر اساس وزن واحد سطح نمونه، محاسبه و ارائه است.

شدت تولید دود (SPR) از پارامترهای مهم دود در آزمون‌های آتش است. مقادیر بیشینه شدت تولید دود (PSPR) در جدول ۳ و منحنی آن نسبت به زمان، در شکل ۴، آمده است. برپایه‌ی داده‌ها، نمونه‌های پلی‌کربنات و PVC، هنگام سوختن بیشترین تولید دود را داشتند.



شکل (۴) منحنی شدت تولید دود (SPR) بر زمان (شماره نمونه‌ها با جدول ۲ هماهنگ است)

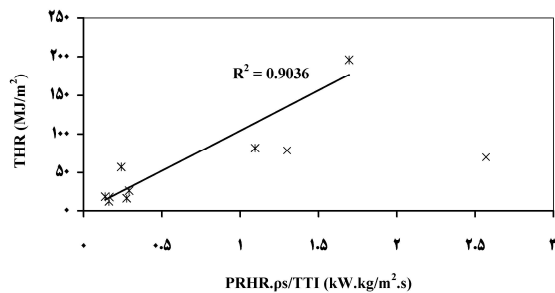
۴-۳- بررسی ارتباط بین پارامترهای حرارتی آتش

در این بخش، ارتباط بین پارامترهای حرارتی ناشی از سوختن نمونه‌ها، شامل زمان افروزش، شدت رهائش گرما و کل رهائش گرما بررسی می‌شود. پرسش این است که آیا بین این پارامترها می‌توان ارتباط ویژه‌ای برقرار کرد؟ اگر چنین ارتباطی وجود داشته باشد، تفسیر پارامترهای گوناگون آتش مواد به گونه‌ی بهتری ممکن خواهد بود و برای تعیین خطر آتش نیز می‌توان پارامترهای مستقل استفاده شده را شناسایی و محدود کرد.

۴-۳-۱- ارتباط بین رهائش گرما با TTI

دیری یا زودی زمان افروزش می‌تواند نشانه‌ای از سختی یا آسانی آتش‌گیری ماده در شرایط آزمون باشد. بنابراین می‌توان حدس زد که پارامترهای رهائش گرما باید به گونه‌ای عکس با TTI مرتبط باشد و هرچه TTI بالاتر باشد، ماده ایمن‌تر خواهد بود. برای امتحان این موضوع،

بهرتر ابعاد این عبارت، به جای شدت رهائش گرمای واحد سطح، از مقدار بیشینه شدت رهائش گرما استفاده شد. همان گونه که دیده می شود، ارتباط خوبی بین THR و ρ_s/TTI PRHR وجود دارد؛ یعنی THR با ماهیت سوختنی ماده (PRHR) و چگالی سطحی آن ارتباط مستقیم و با TTI نسبت عکس دارد.

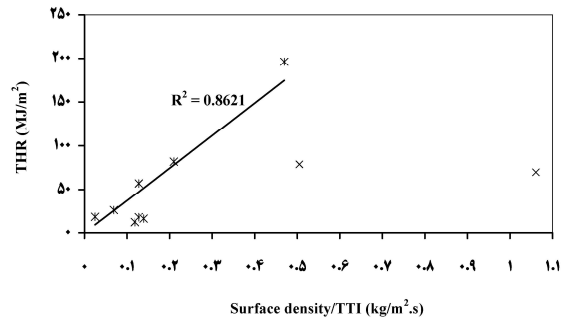


شکل (۶) رابطه THR با بیشینه شدت رهائش گرما، چگالی سطحی و زمان افروزش

۴-۴- پارامترهای خطر سمیت آتش سوزی

۴-۴-۱- مونوکسید کربن (CO)

مونوکسید کربن مهم ترین ماده تولیدشده در اثر سوختن ناقص و علت بیشتر تلفات آتش سوزی است. مطالعات نشان داده است که مقدار ۵۰۰۰ ppm مونوکسید کربن می تواند باعث بیهوشی و مرگ انسان پس از چند دقیقه شود [۱۸]. منحنی تولید CO بر حسب زمان برای یکی از نمونه های هر نمونه در شکل ۷ آمده است. مقادیر در این شکل، از اندازه گیری در سامانه باز به دست آمده که هوا با سرعت مشخصی در آن جریان دارد. بنابراین در یک آتش سوزی واقعی، این مقادیر می تواند در اتاق یا فضای وقوع آتش سوزی انباشته شده و افزایش یابد، بنابراین انتگرال زیر منحنی های CO در کنار آن باید در نظر گرفته شود. نتایج نشان داد که نمونه های پلی کربنات و اپوکسی، خطرناک ترین محصولات از نظر تولید گاز CO است.



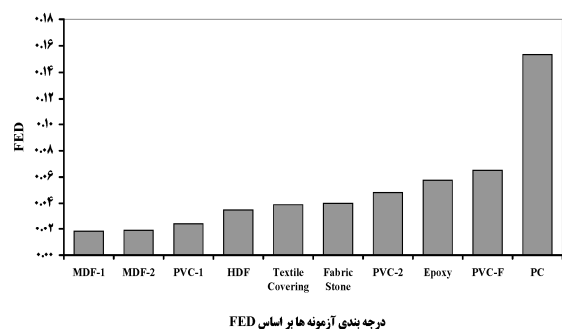
شکل (۵) امتحان ارتباط میان THR و نسبت چگالی سطحی به زمان افروزش

وجود این رابطه نشان می دهد که با کم شدن چگالی سطحی و افزایش زمان افروزش، کل رهائش گرمایی که به فضای آتش سوزی تحمیل می شود، کاهش می یابد. زمان افروزش را می توان با مواد کندسوزکننده یا پوشش های محافظت کننده مناسب، افزایش داد و چگالی سطحی نیز با استفاده از ضخامت کمتری از نمونه به سمت می آید (اگرچه در نبود مواد کندسوز کننده، کم شدن ضخامت می تواند باعث سریع تر شدن افروزش شود).

۴-۳-۲- ارتباط THR با PRHR

می توان حدس زد که اگر PRHR در نمونه ای بالاتر باشد، سرانجام، THR، که برابر با سطح زیر منحنی RHR بر اساس زمان است، نیز بیشتر شود. برای امتحان این موضوع، نمودار THR بر حسب PRHR، رسم و بررسی شد. نتایج نشان داد که برای بیشتر نمونه ها، با افزایش PRHR، مقدار THR نیز بیشتر شده و فرض بالا تا حدودی درست است. دو نمونه موکت و پلی کربنات، PRHR بسیار بالایی داشتند که به خاطر ماهیت ماده است، اما با این وجود، مقادیر THR آن ها اندک بود که به خاطر ضخامت پایین و جرم کم آن ها است. برای اصلاح این آثار و بررسی دوباره ارتباط THR و PRHR، منحنی THR بر اساس نسبت ρ_s/TTI PRHR رسم شد (شکل ۶). برای درک

بر حسب زمان، نتایج دقیق تری به دست می دهد.



شکل (۸) درجه بندی آزمون‌ها بر اساس FED

برپایه‌ی بررسی‌ها مقادیر FED در آتش سوزی واقعی با آنچه در آزمون مقیاس کوچکی مانند گرماسنج مخروطی اندازه‌گیری می‌شود، تفاوت زیادی دارد؛ از دلایل آن، حجم فضای در نظر گرفته شده برای پخش گازهای سمی و تفاوت LC50 در آزمون‌های مقیاس بزرگ و کوچک است [۱۹ و ۲۰].

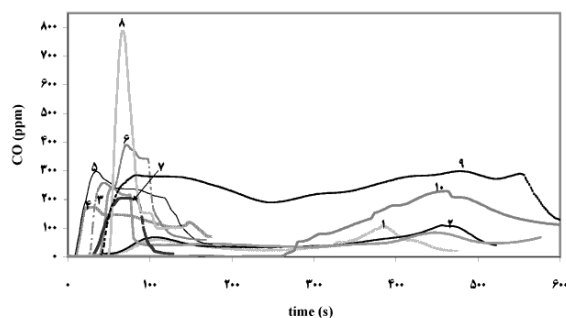
۴-۵- ارزیابی خطر آتش سوزی

در این بخش، خطر گسترش آتش با روش‌های اوستمان (معادله ۱)، پترلا و ریچاردسون بررسی می‌شود. نتایج در جدول ۴ آمده است.

۴-۵-۱- ارزیابی خطر بر اساس معادله اوستمان

با استفاده از معادله ۱، زمان‌های رسیدن به گرگرفتگی سراسری (t_{FO}) محاسبه و بر پایه‌ی آن، در جدول ۴، اعداد ۱ تا ۱۰ برای نشان دادن کم‌خطر (۱) تا پرخطر (۱۰) به کار برده شد. پرخطر یعنی زمان رسیدن به گرگرفتگی سراسری کوتاه است (t_{FO} کم) و کم‌خطر، t_{FO} زیاد را در دسته‌بندی خطر آتش سوزی نشان می‌دهد.

بر اساس معادله اوستمان، نمونه‌های PVC-F، PVC-1 و سنگ مصنوعی، میان نمونه‌های آزمایش شده، خطر نسبی کمتر و نمونه‌های MDF-1، پلی‌کربنات و موکت پرخطر بیشتری داشتند.



شکل (۷) منحنی تولید CO بر حسب زمان (شماره نمونه‌ها با جدول ۲ هماهنگ است).

۴-۴-۲- سمیت دود

در محاسبات سمیت دود، از دو پارامتر پتانسیل سمیت (LC50) و کسر دوز مؤثر (FED) استفاده می‌شود. برای عوامل سمی جداگانه، FED برابر مجموع FED مواد سمی در جو آتش سوزی است:

$$FED = \sum_i FED_i \quad (4)$$

در آزمون مقیاس کوچک، مانند گرماسنج مخروطی، FED را می‌توان از بیشینه غلظت CO و CO₂ و پتانسیل سمیت آن‌ها به دست آورد:

$$FED = \frac{pkCO_2}{LC_{CO_2}} + \frac{pkCO}{LC_{CO}} \quad (5)$$

چون LC_{CO2} خیلی بزرگ است، می‌توان نوشت:

$$FED = pk [CO] / 5000 \quad (6)$$

شکل ۸، درجه بندی آزمون‌ها را بر اساس مقدار FED به دست آمده در ۵۰ kW/m² نشان می‌دهد.

دیده می‌شود که میان نمونه‌های آزمایش شده، پلی‌کربنات (PC) و کف پوش پی‌وی‌سی (PVC-F) بیشترین مقدار FED را دارند، ولی به نظر می‌آید توجه به منحنی CO

تنها ۱/۷۸ برابر می‌شود. برای نمونه، با این که زمان آفرزش پلی‌کربنات، حدود ۵۰ s و در بین نمونه‌ها پس از سنگ مصنوعی، بالاترین زمان است، در معادله اوستمان، به‌خاطر وجود توان ۰/۲۵ به شدت ضعیف می‌شود؛ بنابراین به‌خاطر تأثیرات چگالی، پلی‌کربنات در سامانه اوستمان، از پرخطرترین نمونه‌ها است.

۴-۵-۲- ارزیابی خطر بر اساس روش پترلا

برپایه‌ی داده‌های جدول ۴، میان نمونه‌های آزمایش شده، تنها برای نمونه سنگ مصنوعی، میل به گرگرفتگی، در بازه‌ی کم به دست آمد. علت این موضوع، TTI زیاد نمونه سنگ مصنوعی است، به گونه‌ای که با وجود PRHR بالای آن (حدود ۲۱۳ kW/m²)، پارامتر x به کمتر از یک رسیده است. این موضوع اثر مهم TTI را در خطر گسترش آتش‌سوزی نشان می‌دهد. همچنین برای پلی‌کربنات و هر سه نمونه PVC، اگرچه مقدار پارامتر x زیاد است، اما THR آن‌ها چندان بالا نیست، بنابراین پارامتر ارزیابی خطر آن‌ها متوسط است؛ در کل نیز می‌توان آن‌ها را دارای خطر متوسط رو به پایین دانست. علت اصلی خطر متوسط نمونه‌های PVC، جرم کم آن‌ها است. در مورد پلی‌کربنات، موضوع متفاوت است؛ بیشینه شدت رهایش گرمای حاصل از سوختن پلی‌کربنات، حدود ۶۲۰ kW/m² بود که عدد بسیار بالایی است. اما زمان آفرزش آن، حدود ۵۰ s بود که باعث شد پارامتر x برای آن، ۱۲/۵ باشد و در پی آن، THR هم کم شود (حدود ۱۸/۴ MJ/m²). اگر برای نمونه‌ای مانند پلی‌کربنات آزمایش شده، زمان آفرزش، کوتاه و در حد ۱۰ تا ۲۰ ثانیه بود، با یک نمونه خیلی خطرناک روبه‌رو بودیم و THR آن نیز بسیار بیشتر از مقدار به دست آمده می‌شد. در روش پترلا، وضعیت خطر نسبی پلی‌کربنات با در نظر گرفتن اثر TTI، نسبت به معادله اوستمان درست‌تر

جدول (۴) نتایج دسته‌بندی خطر آتش‌سوزی برای نمونه‌های آزمایش

شده در تابش ۵۰ kW/m²

دسته‌بندی بر اساس روش‌های اوستمان، ریچاردسون و پترلا				کد نمونه
پترلا		دسته ریچاردسون	دسته اوستمان*	
پارامتر ارزیابی خطر	دسته میل به گرگرفتگی			
متوسط	زیاد	۴	۸	MDF-1
متوسط	زیاد	۴	۷	MDF-2
متوسط	زیاد	۵	۵	HDF
متوسط	زیاد	۴	۱	PVC-1
متوسط	زیاد	۳	۴	PVC-2
متوسط	متوسط	۴	۲	PVC-F
متوسط	زیاد	۵	۱۰	Textile covering
متوسط	زیاد	۵	۹	PC
زیاد	زیاد	۵	۶	Epoxy
متوسط	کم	۴	۳	Fabric Stone

* اعداد ۱ تا ۱۰ به ترتیب نمایانگر کم‌خطر تا پرخطر است.

در معادله اوستمان، زمان گرگرفتگی بر اساس ویژگی‌های گفته‌شده در معادله پیش‌بینی می‌شود و عددی برای آن به دست می‌آید، در حالی که برخی از مواد ممکن است در آزمون تجربی گوشه اتاق، به زمان گرگرفتگی نرسند. اوستمان می‌گوید زمان گرگرفتگی این گونه از مواد در معادله ۱ معمولاً بیش از ۲۰ دقیقه به دست می‌آید.

توان‌های به کار رفته در معادله اوستمان، بر زمان گرگرفتگی مؤثر است. در این معادله، چگالی به توان ۱/۷ می‌رسد، بنابراین هرچه چگالی نمونه‌ای بالاتر باشد، زمان گرگرفتگی آن (در معادله) بیشتر شده، خطرپذیری نمونه، کمتر است؛ از سوی دیگر، زمان آفرزش که در واقعیت پارامتر بسیار مهمی در تعیین خطر آتش‌سوزی است، در معادله اوستمان توان ۰/۲۵ دارد، بنابراین با افزایش ۱۰ برابری زمان آفرزش از ۱۰ به ۱۰۰ ثانیه، زمان گرگرفتگی

پیش‌بینی شده است.

یک اشکال روش پترلا، این است که دسته‌بندی آن برای دو پارامتر به صورت کیفی و جداگانه آمده و با کنار هم گذاشتن آن‌ها نمی‌توان به یک نتیجه کمی دقیق دست یافت. برای نمونه، اپوکسی تنها آزمون‌های است که برای هر دو پارامتر x و THR در دسته خطر زیاد قرار می‌گیرد؛ اما به سادگی 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 افزایش دهد.

ریچاردسون عدد بالایی است، زیرا مواد با شدت رهایش گرمای بالا، مانند فوم پلی‌استایرن کندسوز را در بر می‌گیرد [۸ و ۱۵] که می‌توانند مشارکت خطرناکی در گسترش آتش‌سوزی داشته باشند و نیاز به محافظت در برابر آتش دارند. در نظر گرفتن زمان افروزش در دسته‌بندی برای دسته‌های میانی ضروری است. برای دسته‌های کم خطر یا پرخطر، نیازی به این موضوع نیست، زیرا پارامترهای PRHR و THR، به اندازه کافی روشنگر وضعیت آن‌ها است و زمان افروزش، اثر خود را در این پارامترها نشان می‌دهد. بر اساس اصلاحات گفته‌شده، سنگ مصنوعی در دسته ۲ خطر آتش‌سوزی قرار می‌گیرد.

۴-۵-۳- ارزیابی خطر بر اساس روش ریچاردسون

هیچ یک از مواد در دسته‌های ۱ و ۲ ریچاردسون قرار نگرفت. تنها نمونه PVC-2 در دسته ۳ قرار گرفت. تفاوت بین PRHR نمونه‌های PVC-1 و PVC-2، بسیار اندک بود (به ترتیب ۱۵۴ و ۱۴۶ کیلووات بر مترمربع)، اما از آن‌جا که این اعداد به 150 kW/m^2 نزدیک است، به ترتیب در دسته‌های ۳ و ۴ قرار گرفته است. نمونه سنگ مصنوعی در گرماسنج مخروطی، PRHR برابر 213 kW/m^2 و THR برابر 57 MJ/m^2 از خود نشان داد. به همین خاطر این ماده در روش ریچاردسون، در دسته ۴ قرار گرفت که خطرناک بودن ماده را بیان می‌کند. در روش ریچاردسون، پارامتر TTI در نظر گرفته نشده است و از این نظر نیاز به اصلاح دارد.

۴-۵-۴- پیشنهاد اصلاحات روی روش ریچاردسون

با توجه به نتایج بخش‌های پیشین، اصلاحاتی در روش دسته‌بندی ریچاردسون پیشنهاد می‌شود. دسته‌های ۲ و ۳ که جداسازی آن‌ها از نظر مقررات ساختمانی، کاربردی نیست، می‌تواند با هم یکی شوند. مقدار 300 kW/m^2 در دسته ۴

۵- نتیجه‌گیری

۱۰ نوع مصالح رایج استفاده شده در ساختمان، با دستگاه گرماسنج مخروطی تحت تراز تابشی 50 kW/m^2 آزمایش شد. نتایج زیر به دست آمد:

۱- بسیاری از فرآورده‌های پلیمری که استفاده از آن‌ها در صنعت ساختمان کشور رو به افزایش است، از نظر رهایش گرما، دود و سمیت، رفتار خطرناکی در برابر آتش نشان دادند. بنابراین برای استفاده از آن‌ها در ساختمان باید مقررات مناسب تدوین و محدودیت‌های استفاده مشخص شود.

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

۳- چند روش مهم دسته‌بندی خطر مواد برابر آتش، به گونه‌ای تجربی، بررسی و با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد که برای یک سامانه دسته‌بندی، باید دست‌کم پارامتر "کل رهایش گرما"، "بیشینه شدت رهایش گرما" و "زمان افروزش" در نظر گرفته شود. بنابراین روش ریچاردسون

۸- مراجع

[۱] بختیاری، س، قاسم‌زاده، م؛ "استانداردسازی و طبقه‌بندی مصالح ساختمانی از نظر خطر حریق"؛ پروژه ملی، شورای پژوهش‌های علمی کشور؛ ۱۳۷۷-۱۳۸۰.

[2] 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.

[3] Parker, W.J. "Calculation of heat release rate by Oxygen consumption for various applications". Journal of fire sciences, vol. 2 Sept/Oct. 1984.

[4] 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, 364-370, 1987.

[5] Wickström, U, Göransson, U. "Full-scale/bench scale correlations of wall and ceiling linings". Fire and materials, Vol. 16, 15-22, 1992.

[6] Sundströmn 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.

[7] Richardson L.R. and Brooks M.E., "Combustibility of Building Materials". Fire and Materials, Vol. 15, 1991.

[۸] بختیاری، س، خلیلی جهرمی، ک، محمدکاری، ب، هدایتی، م.ج؛ "بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و ایمنی در برابر آتش برای بلوک‌های سقفی از جنس پلی‌استایرن منبسط‌شده در سیستم سقف تیرچه-بلوک"؛ مجله عمران مدرس، دوره ۱۲، شماره ۲، ص ۸۵-۹۹؛ ۱۳۹۱.

[9] 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.

[10] 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.

که در آن به زمان افروزش توجه نشده است، گاهی به نتایج اشتباه می‌رسد. همچنین اهمیت زمان افروزش با توان یک، باید در نظر گرفته شود و توان ۰/۲۵ در روش اوستمان-نوسبام می‌تواند منجر به نتایج اشتباه به دست دهد. بر این اساس می‌توان با اصلاح روش‌های پترلا و ریچاردسون و در نظر گرفتن پارامترهای "قابلیت سوختن"، "زمان افروزش"، "کل رهایش گرما" و "شدت رهایش گرما"، به روشی کاربردی و مقرراتی برای بررسی ویژگی‌های آتش مصالح نازک‌کاری دست یافت.

۶- علائم و اختصارات

ρ (kg/m ³)	چگالی میانگین نمونه
t (mm)	ضخامت میانگین نمونه
TTI (s)	زمان افروزش
FO (s)	زمان خاموشی شعله
q(t) (kW/m ²)	شدت رهایش گرما برای یک سطح آزمونه در زمان t
PRHR (kW/m ²)	بیشینه شدت رهایش گرما
THR (MJ/m ²)	کل رهایش گرما
T PRHR (s)	زمان رسیدن به PRHR
PSPR (m ² /s)	بیشینه شدت تولید دود
Peak CO (ppm)	بیشینه مقدار مونوکسید کربن تولیدشده
ML (g)	افت جرمی میانگین نمونه
t _f (s)	زمان پایان آزمون
X parameter (kW/m ² .s)	شاخص میل به گُرگرفتگی

۷- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی و آزمایشگاهی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شده است. از زحمات و همکاری‌های خانم‌ها مهندس زهرا درودبانی و الهام عسکری قدردانی می‌شود.

- [۱۶] بختیاری، س، تقی‌اکبری، ل؛ "بررسی آزمایشگاهی رفتار پلی‌استایرن منبسط‌شده"، مجله علمی-پژوهشی علوم و تکنولوژی پلیمر، سال بیستم، شماره ۳؛ شهریور ۱۳۸۶.
- [17] Van Hees, P., Herzberg, T., Hansen, A.S. "Development of a Screening Method for the SBI and Room Corner using the Cone Calorimeter". SP REPORT 2002:11, Swedish National Testing and Research Institute, Boras, 2002.
- [18] Sumi, K., Tsuchiya, Y. "Toxic gases and vapors produced at fires". CBD-144, 1971.
- [19] Babrauskas, V., "Fire safety improvements in the combustion toxicity area: is there a role for LC50 tests?". Fire and materials, Vol. 24, No. 2, 113-119, 2000.
- [20] Chow, C.L., "Assessing fire behaviour of common building materials with a cone calorimeter". International Journal on Architectural Science, Vol. 5, NO.4, 91-98, 2004.
- [11] Hirschler, M.M. "Heat release from plastic materials"; in: Babrauskas V., Grayson, J. "Heat release in fires", E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1996.
- [12] Petrella, R.V. "The assessment of full scale fire hazards from cone calorimeter data". Journal of fire sciences, vol. 12, 1994, 14-43.
- [13] 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.
- [14] Bakhtiyari, S., Taghiakbari, L., Barikani, M. "The effective parameters for reaction-to-fire properties of Expanded Polystyrene foams in bench scale". Iranian Polymer Journal, Vol. 19, No. 1, 2010.
- [۱۵] بختیاری، س، تقی‌اکبری، ل، باریکانی، م؛ "رفتار فوم سخت پلی‌یورتان و پانل‌های ساندویچی پلی‌یورتان در برابر آتش و ارزیابی خطر مشارکت آن‌ها در آتش‌سوزی"؛ مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال ۲۲، شماره ۳، ص ۱۸۳-۱۹۵؛ شهریور ۸۸.