



## بررسی تجربی رفتار پلی استیرن انبساط یافته در برابر آتش

### An Experimental Investigation on Fire Behavior of Expanded Polystyrene

سعید بختیاری\*، لیلا تقی اکبری

تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، صندوق پستی ۱۳۱۴۵/۱۶۹۶

دریافت: ۸۵/۴/۱۶، پذیرش: ۸۵/۱۱/۱۷

#### چکیده

رفتار نمونه‌های پلی استیرن انبساط یافته (EPS) در برابر آتش مطابق استاندارد ISO ۵۶۶۰ ارزیابی شد. عمده آزمایش‌ها روی نمونه‌های کندسوز شده و در سطح تابش  $25 \text{ kW/m}^2$  انجام گرفت. همچنین، آثار سطح تابش، چگالی و ضخامت اسفنج روی رفتار نمونه‌های کندسوز شده در برابر آتش نیز بررسی شد. افزون بر این، رابطه بین مقدار کل آزادسازی گرما (THR) و نیز سرعت آزادسازی گرمای (RHR) ناشی از سوختن EPS با افزایش چگالی اسفنج نشان داده شد. نتایج نشان داد که این مقادیر با افزایش چگالی بیشتر می‌شوند، زیرا جرم قابل دسترس برای فرایند سوختن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، گرمای مؤثر سوختن برای تمام چگالی‌های مورد آزمون تقریباً یکسان بود که به علت سوختن کامل نمونه در طول آزمایش است. افزایش ضخامت نمونه روی رفتار اسفنج در برابر آتش اثری دوگانه داشت. از یک طرف، با اضافه شدن ضخامت آزمون زمان آفرزش افزایش می‌یابد که این موضوع به علت عقب نشینی آزمون از منبع گرما و کاهش شار تابشی وارد بر سطح آن است. از طرف دیگر، با اضافه شدن ضخامت جرم قابل دسترس برای سوختن افزایش می‌یابد که به نوبه خود باعث افزایش سرعت آزادسازی گرما می‌شود که این موارد در مقاله بحث می‌گردد. رفتار نمونه‌های معمولی و کندسوز شده از منابع مختلف نیز با هم مقایسه و اطلاعات مربوط به آنها ارائه شده است.

#### واژه‌های کلیدی

پلی استیرن انبساط یافته،  
مواد عایق گرمایی، ساختمان،  
گرماسنج مخروطی، واکنش در برابر آتش

#### مقدمه

کارگاه و هدایت گرمایی کم این ماده را می‌توان برشمرد که در مجموع باعث صرفه اقتصادی می‌شود. ضمن این که کاهش وزن ساختمان به دلیل استفاده از بلوک‌های پلی استیرن می‌تواند به بهبود رفتار ساختمان در برابر زلزله کمک کند. اما اسفنج پلی استیرن دارای نقاط ضعفی

در سال‌های اخیر، اسفنج‌های پلی استیرن (EPS) جاذبه زیادی در کاربردهای ساختمانی پیدا کرده‌اند، که از آن جمله می‌توان کاربرد آنها را در بلوک‌های سقفی و عایق‌های گرمایی نام برد. از دلایل این موضوع وزن بسیار کم، افزایش سرعت اجراء، راحتی حمل و نقل در

#### Key Words

expanded polystyrene,  
thermal insulating materials, building,  
cone calorimeter, reaction to fire

است که دلیل آن تعداد اندک آزمون‌های انجام شده توسط هر دو گروه است.

در این پژوهش، رفتار انواع اسفنج EPS معمولی و کندسوز در برابر آتش با استفاده از گرماسنج مخروطی بررسی شده است. آزمون‌ها مطابق با استاندارد ISO ۵۶۶۰ انجام شده است. برای دقیق بودن بیشتر نتایج، آزمون روی تعداد نسبتاً زیادی از نمونه‌ها انجام گرفته است. افزون بر این، آثار چگالی و ضخامت اسفنج و نیز مقدار سرعت تابش برخوردی روی رفتار نمونه در برابر آتش آزمایش و مورد بحث قرار گرفته است.

## تجربی

نمونه‌های مختلف EPS از هر دو نوع معمولی و کندسوز شده تهیه و رفتار آنها در برابر آتش بررسی شد.

## مواد

نمونه‌های آزمایش از هر دو نوع معمولی و کندسوز شده با هماهنگی با یکی از کارخانه‌های تولید بلوک EPS و با استفاده از مواد اولیه مختلف به شرح زیر تهیه شد:

نمونه‌های معمولی: با استفاده از دانه‌های پلی استیرن تولید شرکت پتروشیمی تبریز (TBZ).

نمونه‌های کندسوز شده: با استفاده از مواد اولیه شرکت‌های BASF آلمان و LG و Kumho هر دو از کره جنوبی.

## دستگاه و روش آزمون

آزمون‌ها به وسیله دستگاه گرماسنج مخروطی مطابق استاندارد ایران شماره ۷۲۷۱-۱ و استاندارد بین‌المللی ISO ۵۶۶۰ انجام شد. با استفاده از این دستگاه می‌توان مقدار کل آزادسازی گرما (total heat release, THR) و سرعت آزادسازی گرمای ناشی از سوختن مواد را اندازه گرفت. هرچه ماده بر اثر سوختن مقدار گرمای بیشتری آزاد کند، مشارکت بیشتری در گسترش آتش سوزی دارد و در نتیجه خطرناک تر خواهد بود. به علاوه، با این دستگاه می‌توان خواص دیگری شامل افت جرمی فرآورده بر اثر سوختن، چگالی دود ناشی از سوختن و مقدار گازهای CO/CO<sub>2</sub> را اندازه گیری کرد.

این آزمایش در مقیاس کوچک انجام شده و از لحاظ نظری بر اساس اصل اکسیژن مصرف شده طراحی شده است. طبق اصل اکسیژن

است که از همه مهم‌تر رفتار خطرناک آن در برابر آتش است. اسفنج پلی استیرن از نظر مشخصات مختلف در برابر آتش (نظیر اشتعال پذیری، سرعت پیش روی سطحی شعله، سرعت آزادسازی گرما و دود) جزو خطرناک‌ترین مواد در بین پلاستیک‌هاست. به این علت، رفتار اسفنج پلی استیرن در برابر آتش به وسیله افزودنی‌های کندسوز کننده نظیر هگزابر موسیکلودوکان (HBCD) اصلاح می‌شود. اما با این وجود، هر دو نوع معمولی و کندسوز شده پلی استیرن مطابق با آزمایش استاندارد [۱] قابل سوختن بوده و محدودیت‌هایی برای استفاده از آنها در ساختمان وجود دارد.

آزمایش‌های مختلف آتش روی اسفنج پلی استیرن انجام شده است که از جمله کارهای انجام شده توسط ترسون (Thureson) [۲]، ویکستروم (Wickstrom) [۳]، اسکودامور (Scudamore) [۴] و کولیر (Collier) [۵] رامی‌توان نام برد. سرعت آزادسازی گرمای (rate of heat release, RHR) حاصل از سوختن اسفنج پلی استیرن معمولی به طور نسبی زیاد بوده و سرعت پیش روی شعله برای هر دو نوع معمولی و کندسوز شده آن نیز در شرایط آتش سوزی زیاد است. افزون بر این، سوختن پلی استیرن معمولاً همراه با رها شدن مقادیر زیادی دوده و کربن مونوکسید است.

با توجه به رفتار ویژه اسفنج پلی استیرن در دماهای بالا، برای ارزیابی و تحلیل دقیق رفتار آن در برابر آتش، بررسی اثر پارامترهای مختلف مؤثر روی رفتار آن در دماهای بالا لازم است. از جمله این پارامترها می‌توان چگالی، ضخامت نمونه و میزان تابش برخوردی به ماده را نام برد. در حالی که در مقالات و مدارک فنی مربوط به رفتار EPS این عوامل به طور دقیق بررسی نشده است [۹-۲]. به علاوه، رفتار خاص EPS در دمای بالا باعث می‌شود که تحلیل رفتار آن در برابر آتش با انجام چند آزمایش محدود امکان پذیر و دقیق نباشد و لازم است تا از نظر آماری آزمایش‌های بیشتری (به ویژه برای آزمایش‌های در مقیاس کوچک) روی نمونه انجام گیرد. این ضعف در اطلاعات ارائه شده در مراجع ۴ تا ۸ دیده می‌شود.

اسکودامور [۴] نتایج چند آزمون محدود انجام شده در یک آزمایشگاه صنعتی روی اسفنج‌های EPS را گزارش کرده است. در مراجع ۵ تا ۷، که شامل یک استاندارد بریتانیا [۷] نیز می‌شود، به این نتایج استناد شده است. در حالی که این نتایج مبتنی بر تعداد اندکی آزمایش بوده و پارامترهای یاد شده نیز در آنها بررسی نشده است. این ضعف، در مقایسه نتایج این کار با نتایج کولیر [۵] بهتر روشن می‌شود.

کولیر نیز تحلیل خود را از رفتار نمونه‌های معمولی و کندسوز شده پلی استیرن فقط با انجام یک آزمون روی هر یک از این محصولات انجام داده است. این نتایج با نتایج ارائه شده در مراجع ۴ تا ۷ بسیار متفاوت

وقوع آفرزش در نمونه به تأخیر افتاده و رفتار نمونه در برابر آتش تحت تأثیر قرار می گیرد. هر چه که ضخامت نمونه بیشتر باشد، عقب نشینی آن بیشتر بوده و در نهایت گرمای کمتری دریافت می کند. از طرف دیگر، افزایش ضخامت به معنای افزایش جرم نمونه است که می تواند روی اشتعال پذیری بیشتر آن اثر بگذارد.

### اثر نوع اسفنج

رفتار اسفنج پلی استیرن از نوع معمولی (محصول پتروشیمی تبریز) و اسفنج پلی استیرن از نوع کندسوز شده، محصول شرکت های BASF آلمان و شرکت های کره ای LG و Kumho بررسی شد. نتایج در جدول ۲ ارائه شده و در زیر مورد بحث قرار می گیرد.

### زمان آفرزش (TTI)

زمان آفرزش نمونه ها از الگوی خاصی تبعیت نکرده و نتایج نسبتاً پراکنده ای به دست آمد (شکل ۱)، به طوری که زمان آفرزش برای یکی از نمونه های معمولی ساخت تبریز بیشتر از برخی نمونه های کندسوز شده بود.

علت این موضوع می تواند پیچیدگی رفتار EPS در برابر آتش به علت ذوب شدن و عقب نشینی بسیار سریع آن از منبع گرما باشد. همچنین، از آن جا که درصد افزودنی کندسوز کننده در حد اندک و کمتر از ۰/۵ درصد وزنی است، بنابراین نبود مؤثر آن در یک لحظه کوتاه در مجاورت منبع آفرزش می تواند آغازگر واکنش های احتراق شده و باعث اشتعال نمونه شود.

با توجه به این که نمونه در کل مدت آزمون در معرض منبع گرماست، بنابراین پس از وقوع اشتعال، اثر سردکردن ناگهانی ماده افزودنی کندسوز کننده کاهش یافته و نمی تواند به خاموش شدن نمونه منجر شود. بنابراین، در چنین شرایطی ممکن است زمان آفرزش یک نمونه کندسوز شده مانند یک نمونه معمولی باشد. به هر حال، بین تمام نمونه ها سریعترین آفرزش مربوط به یکی از نمونه های معمولی تبریز (TBZ) بود. میانگین زمان آفرزش برای نمونه های معمولی تبریز ۷۵ s و برای نمونه های کندسوز شده ۸۸ s به دست آمد.

اسکودامور [۴] زمان آفرزش برای نمونه های معمولی و کندسوز شده زیر سطح تابش  $30 \text{ kW/m}^2$  را به ترتیب ۷۳ و ۷۷ s گزارش کرده است. در حالی که کولیر [۵] این زمان را در همین تابش برای نمونه های معمولی ۷۸ s و برای نمونه های کندسوز شده ۱۲۰ s ذکر کرده است. نتایج این دو حاصل از تعداد آزمایش های کمتری نسبت به این کار تحقیقی بوده است.

مصرف شده مقدار آزدسازی گرمای ناشی از سوختن یک ماده، مستقل از نوع آن بوده و متناسب با مقدار اکسیژن مصرف شده است. بدین ترتیب، به ازای  $11 \text{ kg/m}^3$  اکسیژن مصرف شده، تقریباً  $310 \text{ kJ} \times 13/1$  گرما آزاد می شود. این اصل اولین بار در سال ۱۹۱۷ توسط تورنتون مطرح و در طراحی آزمایش گرماسنج مخروطی از آن استفاده شده است [۱۰].

### نتایج و بحث

نتایج آزمایش روی ۱۸ نمونه پلی استیرن کندسوز شده با ماده اولیه یکسان در جدول ۱ ارائه شده است. تمام این ۱۸ نمونه در سطح تابش یکسان  $35 \text{ kW/m}^2$  آزمایش شده و دارای ضخامت حدود  $40 \text{ mm}$  بودند. چگالی نمونه های شماره ۱ تا ۶ تقریباً برابر با هم و حدود  $10 \text{ kg/m}^3$  تا  $11 \text{ kg/m}^3$  بود. نمونه های شماره ۷ تا ۱۸ دارای چگالی های متفاوت بودند، اما سایر شرایط برای آنها مشابه با نمونه های ۱ تا ۶ بود تا به این ترتیب آثار چگالی بر خواص ماده در برابر آتش بررسی شود.

برای این که نتایج از دقت خوبی برخوردار باشند، آزمایش روی تعداد زیادی از نمونه ها با شرایط یکسان انجام شد. نتایج نشان داد که این کار کاملاً صحیح بوده و اصولاً به علت پیچیدگی رفتار EPS در برابر آتش، مقداری پراکندگی در نتایج مشاهده می شود و نمی توان نتایج تنها چند آزمایش محدود را به طور دقیق به عنوان رفتار EPS در برابر آتش تعمیم داد.

همچنین، نوع اسفنج از نظر دارا بودن افزودنی های کندسوز کننده بر رفتار آن در برابر آتش اثر قابل توجهی دارد. از آنجا که فرایند تولید و نوع مواد افزودنی در واحدهای مختلف پتروشیمی متفاوت است، بررسی رفتار حریق محصولات واحدهای پتروشیمی مختلف به طور جداگانه مفید است. برای این کار آزمایش روی نمونه های معمولی و کندسوز شده از منابع مختلف تجاری انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

نکته دیگری که می تواند روی رفتار EPS در برابر آتش اثر بگذارد، ضخامت نمونه است. این موضوع به علت رفتار خاص EPS در برابر گرماسنج اسفنج EPS در دمای حدود  $90-100^\circ\text{C}$  نرم شده و به تدریج جمع می شود. بنابراین، در شرایط آزمون آتش که دما در آن بیش از  $600^\circ\text{C}$  است، این اتفاق به سرعت و در همان ابتدای آزمایش رخ می دهد.

این موضوع باعث می شود که نمونه از منبع گرما دور شده و سطح تابش کمتری از شرایط درجه بندی شده را دریافت کند. از این رو،

جدول ۱- پارامترهای آتش برای ۱۸ نمونه EPS با چگالی و ضخامت یکسان در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

شماره آزمون	خواص	
	۱	۲
	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	۱۰۴۴
	t (mm)	۴۱۴۸
	TTI (s)	۱۶۸
	FO (s)	۳۴۸
	Av. RHR (kW/m <sup>2</sup> )	۴۲۱۳
	PRHR (kW/m <sup>2</sup> )	۱۷۶۶۶
	T PRHR (s)	۱۷۵
	Av. EHC (MJ/kg)	۱۹۰۵
	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	۹۲
	TSR (-)	۱۷۹۷
	PSR (1/s)	۴۱
	T PSR (s)	۱۷۵
	Av. SEA (m <sup>2</sup> /kg)	۲۵۹۵
	Av. COY	۰/۰۳۵۵
۱	۱۰/۴	۴۹/۵۰
۲	۱۰/۸۴	۴۰/۱۰
۳	۱۰/۸	۷۶
۴	۱۰/۸	۲۵۸
۵	۱۱/۵	۲۰۲
۶	۱۱/۵	۳۶۰
۷	۱۳/۰	۴۴۶۱
۸	۱۳/۲	۱۵۵۷
۹	۱۳/۲	۱۴۷/۵
۱۰	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴
۱۱	۱۵/۴۴	۱۸۰/۳۱
۱۲	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴
۱۳	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴
۱۴	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴
۱۵	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴
۱۶	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴
۱۷	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴
۱۸	۱۵/۴۴	۱۷۳/۶۴

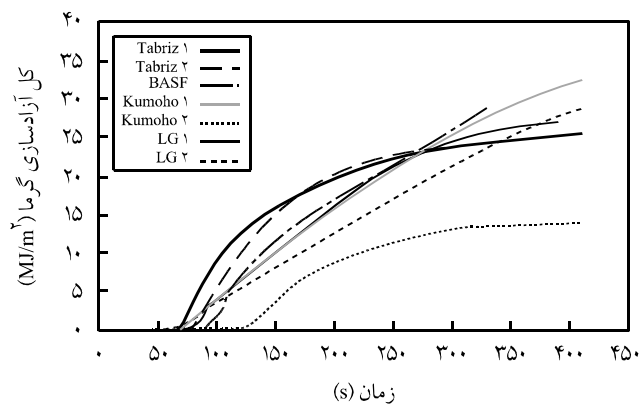
جدول ۲- نتایج آزمون آتش روی نمونه های معمولی و کندسوز شده EPS از کارخانه های مختلف در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

شماره نمونه	Tabriz ۱	Tabriz ۲	BASF	Kumho ۱	Kumho ۲	LG ۱	LG ۲
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	۱۶/۹	۱۷	۱۷/۳	۲۰/۲	۱۳/۲	۱۸/۴	۱۷/۵
t (mm)	۴۵/۶	۴۶/۶	۴۷/۳۰	۴۶/۳۰	۴۱/۹۰	۴۸/۳۰	۴۸/۴۰
TTI (s)	۸۲	۶۷	۹۰	۷۰	۱۲۶	۷۰	۸۳
FO (s)	۳۰/۳	۴۱۷	۳۴۶	۴۹۰	۳۰۰	۵۰۰	۴۰/۳
Av. RHR ( $\text{kW/m}^2$ )	۱۱۷۰	۷۳/۰	۱۱۹/۵	۸۲/۷	۷۴/۱	۷۲/۳	۸۶/۷
PRHR ( $\text{kW/m}^2$ )	۲۹۳/۳	۳۲۰/۱	۲۶۴/۱	۲۱۳/۴	۲۰۵/۵	۱۸۵/۰	۲۴۲/۷
T PRHR (s)	۱۰۰	۹۰	۱۱۰	۸۰	۱۳۵	۷۵	۹۰
Av. EHC (MJ/kg)	۲۹/۲	۳۱/۵	۳۹/۶	۳۴/۱	۳۷/۵	۳۴/۴	۳۴/۶
THR ( $\text{MJ/m}^2$ )	۲۳/۸	۲۵/۵	۲۸/۹	۳۴/۰	۱۳/۲	۳۰/۱	۲۷/۱
PSR (1/s)	۱۱/۶۹	۱۰/۹۶	۹/۵۹	۷/۳۲	۵/۷۴	۶/۱۱	۹/۴۸
T PSR (s)	۱۱۵	۹۰	۱۰۵	۷۵	۱۴۰	۷۵	۹۰
Av. SEA ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	۸۳۴/۳	۶۹۰/۵	۶۰۹/۷	۶۸۱/۱	۵۴۹/۷	۵۷۸/۳	۷۳۵/۳
Av. COY	۰/۰۷۳	۰/۰۷۷	۰/۰۷۹	۰/۰۶۷	۰/۰۶۷	۰/۰۵۸	۰/۰۷۲

چگالی های ۱۳ و ۲۰ بودند، در حالی که سایر نمونه ها دارای چگالی حدود ۱۷ بوده اند.

#### سرعت آزادسازی گرما (RHR)

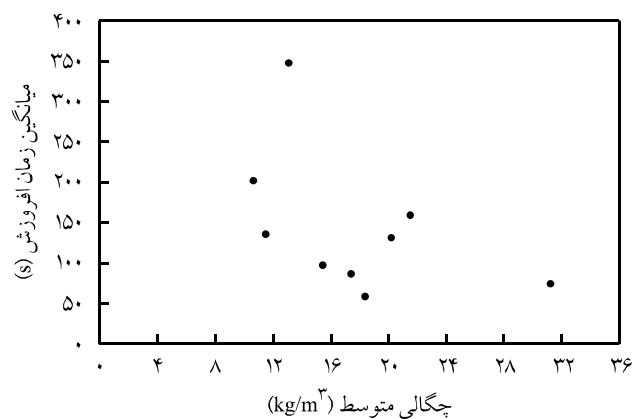
منحنی های سرعت آزادسازی گرما برای نمونه های کارخانه های مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج آزمایش نشان می دهد که سرعت آزادسازی گرما مهم ترین شاخص گرمایی است که به وسیله آن می توان تفاوت بین دو نوع معمولی و کندسوز شده EPS را تشخیص داد.



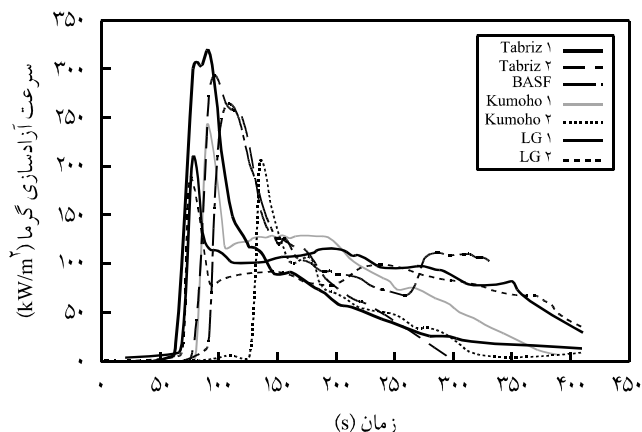
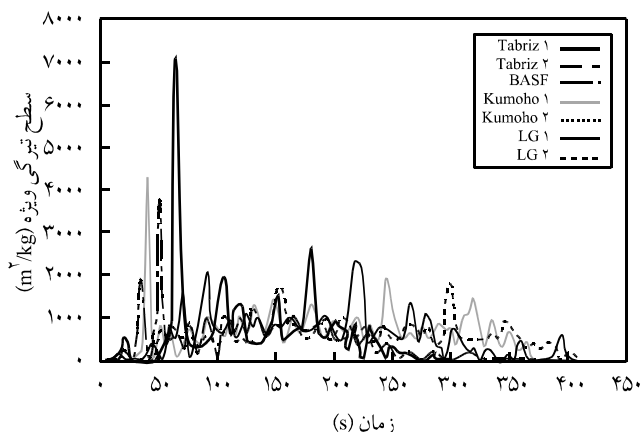
شکل ۲- کل آزادسازی گرما برای نمونه های معمولی و کندسوز شده EPS از کارخانه های مختلف.

#### کل آزادسازی گرما (THR) و گرمای سوختن مؤثر (Av. EHC)

همان گونه که از نتایج ارائه شده در جدول ۲ و منحنی های شکل ۲ دیده می شود، تفاوت خاصی از نظر کل آزادسازی گرما و گرمای سوختن مؤثر بین دو نوع معمولی و کندسوز شده مشاهده نمی شود، زیرا هر دو نمونه در نهایت قابل سوختن بوده و در مجاورت منبع اشتعال خارجی تا انتها می سوزند. کمترین و بیشترین گرمای تولید شده مربوط به محصولات Kumho است (شکل ۲ را ببینید) که در این جا به علت تفاوت چگالی بوده است. دو محصول آزمایش شده از Kumho دارای



شکل ۱- زمان افروزش برای نمونه های EPS کندسوز شده.



شکل ۴- منحنی تولید دود بر اثر سوختن انواع EPS در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

شکل ۳- منحنی های شدت آزادسازی گرما برای چند نمونه معمولی و کندسوز شده EPS در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

مختلف نشان داده شده است. به طور کلی، سطح تیرگی ویژه (SEA) نشانگر مساحت سطح کل ذرات دود به ازای یک کیلوگرم از ماده سوخته با فرض کروی بودن ذرات دود است.

همان طور که از جدول ۳ و شکل ۴ دیده می شود، بیشترین مقدار دود حاصل از سوختن (هم حداکثر و هم میانگین) در کل مربوط به نمونه های معمولی تولید پتروشیمی تبریز است. نمونه های کندسوز شده تقریباً رفتار مشابهی نشان می دهند و در مقایسه با نوع معمولی رفتار بهتری از این نظر دارند، به ویژه بیشینه آزادسازی دود در آنها به طور قابل توجهی کمتر از نوع معمولی است.

باید توجه کرد که حتی نوع کندسوز شده نیز در مقایسه با بسیاری از انواع دیگر مصالح دود زیادی تولید می کند. به عنوان مثال همان گونه که در جدول ۳ مشاهده می شود، مقدار دود تولید شده از سوختن EPS کندسوز شده در مقیاس وزنی بیش از ۶۹ برابر نمونه MDF است. اما با توجه به چگالی بسیار کمتر EPS در مقایسه با تخته MDF، این نسبت در مقیاس حجمی حدود ۷۵ برابر است.

جدول ۳- سطح تیرگی ویژه برای چند ماده در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

شماره نمونه	SEA ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	SEA ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
میانگین اسفنج پلی استیرن نوع معمولی (تبریز)	۷۶۲/۴	۱۲۶۹۰/۸
میانگین نمونه های کندسوز شده	۶۳۱	۱۰۹۲۸/۹
چوب MDF	۹/۱۲	۷۲۹۶

حداکثر سرعت آزادسازی گرما برای EPS پتروشیمی تبریز در آزمون با سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$  حدود  $300 \text{ kW/m}^2$  است، در حالی که این مقدار برای انواع کندسوز شده حداکثر  $250$  و اغلب کمتر از  $200 \text{ kW/m}^2$  است. علت این موضوع وجود ماده کندسوزکننده HBCD است که با اثر خنک کنندگی و ایجاد اختلال در واکنش های احتراق باعث کندشدن واکنش ها شده و در نتیجه سرعت آزادسازی گرما کمتر می شود. این موضوع در عمل باعث کاهش نسبی مشارکت اسفنج در گسترش آتش سوزی شده و درجه آن در دسته بندی مواد از نظر واکنش در برابر آتش را بهبود می دهد.

لازم به ذکر است که در این سطح تابش در برخی از آزمایش ها، آزمون های EPS کندسوز شده اصلاً مشتعل نشدند. اسکودامور [۴] برای اسفنج معمولی با سطح تابش  $30 \text{ kW/m}^2$ ، سرعت آزادسازی  $299 \text{ kW/m}^2$  و در سطح تابش  $40 \text{ kW/m}^2$ ، سرعت آزادسازی  $394 \text{ kW/m}^2$  را گزارش کرده است. وی برای اسفنج کندسوز شده در سطح تابش  $30 \text{ kW/m}^2$ ، سرعت آزادسازی  $238 \text{ kW/m}^2$  و در تابش  $40 \text{ kW/m}^2$ ، سرعت آزادسازی  $321 \text{ kW/m}^2$  را به دست آورده است. همچنین، کولیر [۵] برای اسفنج معمولی زیر تابش  $30 \text{ kW/m}^2$ ، سرعت آزادسازی  $320 \text{ kW/m}^2$  و برای اسفنج کندسوز شده در همین تابش، سرعت آزادسازی  $193 \text{ kW/m}^2$  را گزارش کرده است. اعداد گزارش شده توسط این دو تقریباً با نتایج به دست آمده در این پژوهش هم خوانی و مشابهت دارد.

### دود (TSR و PSR) و تیرگی ناشی از آن

در شکل ۴ منحنی های سطح تیرگی ویژه بر حسب زمان برای نمونه های

قابل توجهی بیش از بیشینه مربوط به نوع کندسوز شده است. میانگین بازده تولید کربن مونوکسید برای نوع معمولی ۰/۰۷۵ و برای نوع کندسوز شده ۰/۰۶۹ kg/kg است.

### اثر دما یا سطح تابش

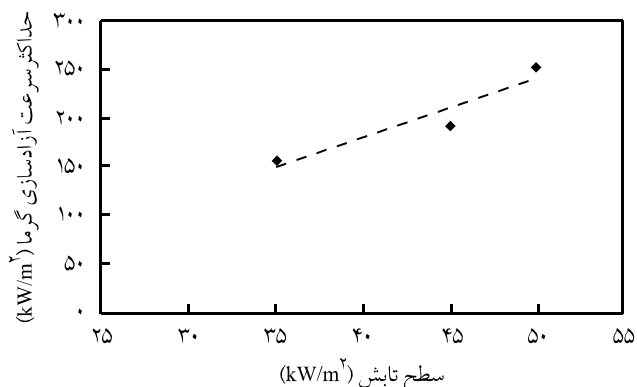
نتایج آزمایش روی نمونه های EPS در سطوح تابش مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. کلیه نمونه ها از نوع کندسوز شده و با ضخامت و چگالی تقریباً مشابه بوده اند. در سطوح تابش ۱۵ و ۲۵ kW/m<sup>2</sup> هیچ افروزشی رخ نداد، ضمن این که در سطح ۳۵ kW/m<sup>2</sup> نیز برخی از آزمونه ها مشتعل نشدند.

مقادیر حداکثر سرعت آزادسازی گرما با بالا رفتن سطح تابش، افزایش نشان می دهد که در شکل ۶ قابل مشاهده است. همچنین، کربن مونوکسید تولید شده نیز افزایش نشان می دهد. علت این موضوع بیشتر بودن گرمای تابشی به طرف ماده سوختنی است که سرعت واکنش های احتراق را بالاتر برده و سرعت آزادسازی گرما را افزایش می دهد. از طرف دیگر، به علت افزایش مقدار پیرولیز و افزایش حجم گازهای قابل سوختن، مقدار اکسیژن قابل دسترس کاهش یافته و در نتیجه احتراق ناقص بیشتر رخ می دهد و کربن مونوکسید بیشتری تولید می شود.

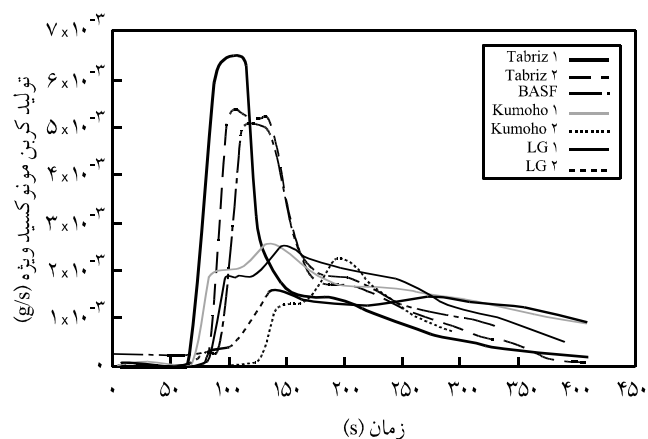
بهترین خط عبور داده شده از نقاط به دست آمده (با فرض عبور خط از نقطه صفر) شیبی معادل ۴/۶۶۲۹ به دست می دهد که همبستگی آن برابر با  $R = ۰/۹۲$  است.

### اثر چگالی اسفنج

چگالی اسفنج از مشخصاتی است که بر رفتار آزمونه در برابر آتش اثرگذار است. با افزایش چگالی انتظار می رود که به علت افزایش جرم



شکل ۶- اثر دما یا سطح تابش روی شدت آزادسازی گرمای ناشی از سوختن EPS.



شکل ۵- منحنی تولید کربن مونوکسید بر اثر سوختن انواع EPS در ۳۵ kW/m<sup>2</sup>.

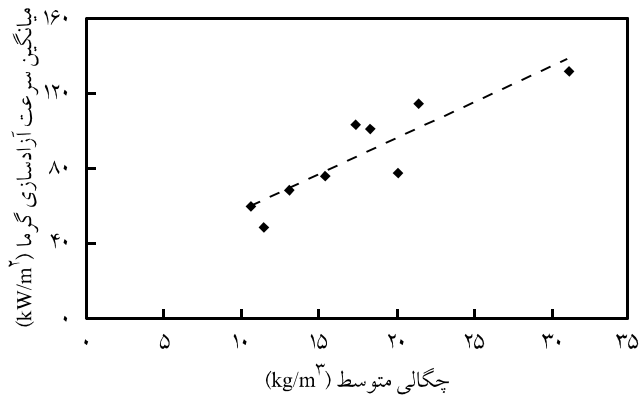
### بازده کربن مونوکسید (COY)

به طور کلی، کربن مونوکسید در آتش سوزی ها خطرناک ترین گاز سمی محسوب می شود. مقدار ۵۰۰۰ ppm از این گاز موجب بیهوشی و مرگ پس از چند دقیقه می شود.

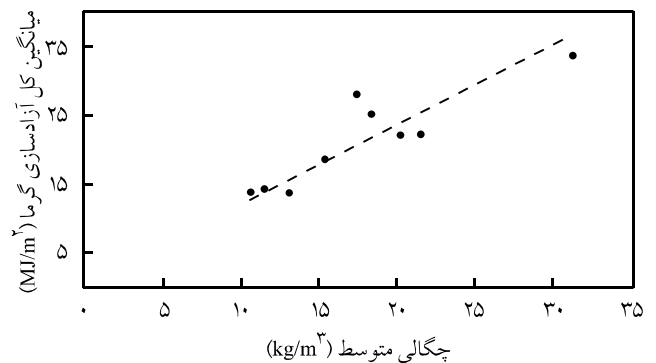
در شکل ۵ منحنی تولید کربن مونوکسید از انواع مختلف EPS مشاهده می شود. بیشینه تولید کربن مونوکسید در نوع معمولی به طور

جدول ۴ - خواص EPS کندسوز شده در برابر آتش در سطوح تابش مختلف.

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵
سطح تابش (kW/m <sup>2</sup> )	۵۱	۲۵	۳۵	۴۵	۵۰
دمای مخروط (°C)	۳۹۴	۶۰۵	۶۸۵	۷۴۹	
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۳۷۶	۱۳/۷۲	۱۳/۱	۱۳/۸	۱۱
t (mm)	۱۴/۶	۴۷/۵	۴۲/۳۵	۴۷/۴	۴۰/۴
TTI (s)	۰	۰	۳۴۸	۴۰	۳۱
FO (s)	۰	۰	۵۱۲	۳۰۷	۴۱۱
Av. RHR (kW/m <sup>2</sup> )	۳/۱۳	۳/۵۶	۶/۸۶	۷۶/۳۷	۳۳/۸۷
PRHR (kW/m <sup>2</sup> )	۵/۲۹	۶/۰۶	۱۵۵/۴۰	۱۹۳/۹۶	۲۵۲/۸۹
Av. EHC (MJ/kg)	۳/۴۰	۱۲/۲۶	۳۶/۱۴	۳۲/۹۲	۳۹/۱۴
THR (MJ/m <sup>2</sup> )	۰/۲	۰/۲	۱۳/۶۵	۲۰/۷	۱۳/۳
Av. SEA (m <sup>2</sup> /kg)	-	۳۲/۰۹	۴۵۲/۰۱	۸۶۲/۲۷	۶۹/۸۳
Av. CO <sub>Y</sub>	۱/۷۹۸	۱/۷۷۶	۳/۷۹	۳/۹۵	۵/۱۵
Av. COY	-	-	۰/۰۷۰۲	۰/۰۶۰۵	۰/۱۱۷۷



شکل ۹- رابطه بین میانگین شدت آزادسازی گرما با چگالی برای نمونه های EPS کندسوز شده در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

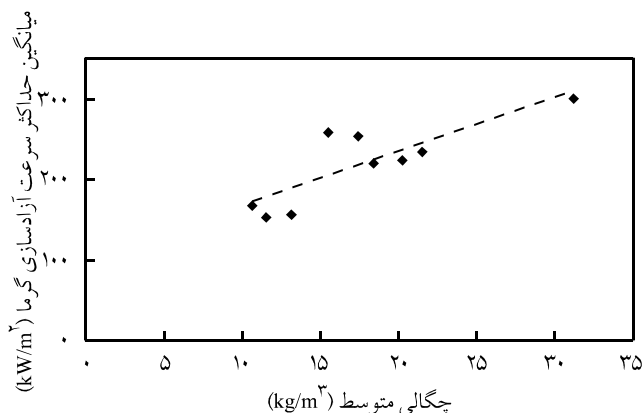


شکل ۷- ارتباط بین آزادسازی گرمای کل و چگالی اسفنج پلی استیرن در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

حدود  $10 \text{ kg/m}^3$  تا  $30 \text{ kg/m}^3$ ، عدد  $32/34 \text{ MJ/kg}$  به عنوان میانگین گرمای مؤثر سوختن به دست آمد. علت ثابت بودن این پارامتر، شرایط گرمایی آزمون است که طی آن، تابش گرما به طرف سوخت ادامه دارد. در چنین شرایطی ماده ای مانند EPS به طور کامل می سوزد. بنابراین، گرمای مؤثر سوختن برای چگالی های مختلف EPS تغییری نشان نداده و مقدار یکسانی به دست می آید.

#### سرعت آزادسازی گرما (RHR)

رابطه بین میانگین سرعت آزادسازی گرما با چگالی اسفنج پلی استیرن در شکل ۹ و رابطه بین حداکثر سرعت آزادسازی گرما با چگالی اسفنج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که هم میانگین و هم حداکثر سرعت آزادسازی گرما با بیشتر شدن چگالی افزایش می یابد.



شکل ۱۰- رابطه بین حداکثر شدت آزادسازی گرما با چگالی EPS در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .

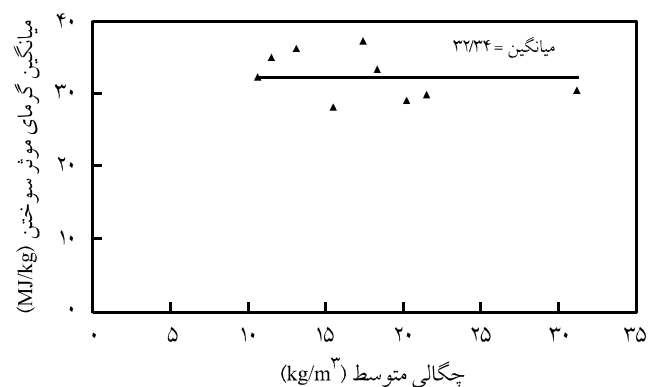
قابل اشتعال، رفتار آزمون در برابر آتش بدتر شود. در زیر این مسئله بررسی شده است.

#### مقدار کل آزادسازی گرما (THR)

رابطه بین کل آزادسازی گرما با چگالی برای اسفنج های کندسوز شده در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به شکل می توان گفت که به طور کلی آزادسازی گرما با بالا رفتن چگالی افزایش می یابد. این موضوع با توجه به این که با ازدیاد چگالی، جرم قابل دسترس برای فرایند سوختن افزایش می یابد، قابل توجیه است.

#### گرمای مؤثر سوختن (Av. EHC)

گرمای مؤثر سوختن برای نمونه های با چگالی های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. این مقدار برای تمام نمونه ها تقریباً ثابت بوده و از



شکل ۸- میانگین گرمای مؤثر سوختن برای آزمون های EPS با چگالی های مختلف در سطح تابش  $35 \text{ kW/m}^2$ .



همان گونه که مشاهده می شود با اضافه شدن ضخامت آزمون، زمان افروزش افزایش می یابد، به طوری که زمان افروزش برای ضخامت حدود 21 mm برابر با 47 s و برای ضخامت حدود 40 mm برابر با 159 s بوده است. این موضوع به علت رفتار خاص EPS در برابر گرماست. اسفنج پلی استیرین در دمای بیش از حدود 95°C در اثر گرما جمع شده و از منبع گرما دور می شود. این رفتار باعث می شود که آزمون در شرایط آزمایش گرمای کمتری از مقدار تنظیم شده دریافت کند. در بررسی های انجام گرفته معلوم شد مقدار تابش دریافتی پس از ذوب و عقب نشینی اسفنج در فاصله 65 mm از منبع تابش (یعنی برای آزمون ای با ضخامت 40 mm) حدود 19 kW/m<sup>2</sup> است که بسیار کمتر از مقدار تنظیم شده (40 mm) برای آزمایش است. بنابراین آزمون، شار گرمایی کمتری دریافت کرده و دیرتر مشتعل می شود. این تأخیر حتی در رسیدن به بیشینه آزادسازی گرما (TPRHR) نیز دیده شد که در جدول 5 ارائه شده است.

اما، در عین حال با اضافه شدن ضخامت نمونه، جرم قابل دسترس برای واکنش های احتراق بیشتر می شود که به نوبه خود باعث می شود تا کل آزادسازی گرما (THR) افزایش یابد. این افزایش برای میانگین های سرعت آزادسازی گرما برای زمان های 180 s و 300 s پس از افروزش ( $q''_{180}$  و  $q''_{300}$ ) نیز دیده می شود که به همان علت پیش گفته، یعنی افزایش جرم ماده سوختی است. کل دود رها شده در اثر سوختن نیز در نهایت به همین علت بیشتر می شود. در واقع در این جا دو اثر دور شدن از منبع گرما و افزایش جرم در برابر یکدیگر قرار گرفته و اثر معکوس دارند، که عمده اثر اولی در عقب افتادن رخدادها و عمده اثر دومی در افزایش محصولات احتراق بروز می یابد.

قابل ذکر است که آثار چگالی و ضخامت اسفنج در رفتار آن در برابر آتش توسط هیچ یک از مراجع مطالعه شده بررسی نشده بود، در حالی که دیده می شود، این مسائل در رفتار این ماده بسیار مؤثر بوده و این مسائل حتماً باید در تحلیل نتایج آزمون و مقایسه نتایج با یکدیگر در نظر گرفته شوند.

## نتیجه گیری

مطالعات و آزمایش های گسترده ای در باره رفتار اسفنج پلی استیرین در برابر آتش انجام شد. رفتار نمونه های معمولی و کندسوز شده با هم مقایسه شد. همچنین آثار سطح تابش، چگالی و ضخامت اسفنج روی رفتار نمونه در برابر آتش بررسی شد. نتایج به دست آمده با نتایج مراجع معتبر [4-8] مقایسه شد. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:  
- آزمایش ها نشان داد که تفاوت خاصی از نظر گرمای آزاد شده کل

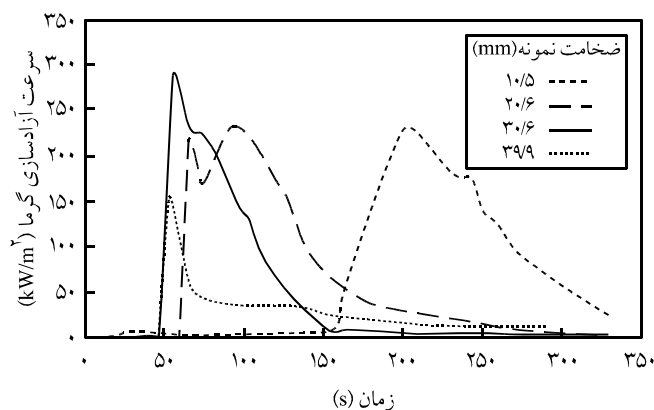
جدول 5 - خواص آزمون های EPS با ضخامت های مختلف در برابر آتش.

شماره آزمون	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	23/8	24/3	27/9	27/5
t (mm)	10/5	20/6	30/6	39/9
TTI (s)	49	47	63	159
FO (s)	270	160	271	348
$q''_{180}$ (kW/m <sup>2</sup> )	36/4	79/5	102/3	119/3
$q''_{300}$ (kW/m <sup>2</sup> )	26/8	57/4	68/7	88/2
PRHR (kW/m <sup>2</sup> )	157/04	294/6	230/55	232/76
T PRHR EHC	54	56	94	204
Av. EHC	35/36	28/39	29/39	29/79
THR (MJ/m <sup>2</sup> )	7/3	14/1	19/4	22/2
TSR	1770	564/5	664/6	790

که دلیل اصلی آن افزایش مقدار جرم قابل سوختن است. این موضوع باعث می شود تا جرم بیشتری در واحد زمان وارد واکنش احتراق شده و گرما با سرعت بیشتری آزاد شود.

## اثر ضخامت اسفنج

اثر ضخامت اسفنج بر رفتار آن در برابر آتش بررسی شد که نتایج به دست آمده در جدول 5 ارائه شده است. منحنی های سرعت آزادسازی گرما برای این نمونه ها نیز در شکل 11 نمایش داده شده است. هر چهار نمونه از نوع کندسوز شده و از یک منبع یکسان بودند. همچنین، چگالی تمام آنها تقریباً حدود 23 kg/m<sup>3</sup> بوده و همگی در سطح تابش 35 kW/m<sup>2</sup> آزمایش شدند تا کلیه شرایط آنها، به غیر از ضخامت نمونه، یکسان باشد.



شکل 11 - تغییرات منحنی سرعت آزادسازی گرما بر حسب زمان برای ضخامت های مختلف آزمون.

اضافه شدن ضخامت، جرم قابل دسترس برای سوختن افزایش می یابد که به نوبه خود باعث می شود تا گرمای آزاد شده افزایش یابد. در واقع در این جا دو اثر دور شدن از منبع گرما و افزایش جرم در برابر هم قرار گرفته و اثر عکس روی یکدیگر دارند.

- نتایج آزمایش های آتش ارائه شده در برخی مراجع معتبر علمی [۴-۸] که شامل یک استاندارد بریتانیا [۷] نیز می شود، بدون توجه به آثار چگالی و ضخامت نمونه روی رفتار EPS در برابر آتش بوده است، در حالی که نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که این مشخصات در رفتار EPS در برابر آتش بسیار مؤثر هستند.

### علائم و اختصارات

در این مقاله از علائم اختصاری زیر استفاده شده است:

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>): چگالی آزمونه

t (mm): ضخامت آزمونه

TTI (s): زمان افروزش

FO (s): زمان خاموشی شعله

THR (MJ/m<sup>2</sup>): کل آزادسازی گرما

$q''_{180}$  (kW/m<sup>2</sup>): میانگین سرعت آزادسازی گرما، ۱۸۰ s پس از

افروزش

$q''_{300}$  (kW/m<sup>2</sup>): میانگین سرعت آزادسازی گرما، ۳۰۰ s پس از

افروزش

Av. RHR (kW/m<sup>2</sup>): میانگین سرعت آزادسازی گرما

PRHR (kW/m<sup>2</sup>): حداکثر سرعت آزادسازی گرما

T PRHR (s): زمان رسیدن به حداکثر سرعت آزادسازی گرما

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

TSR (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>): کل تولید دود

PSR (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.s): حداکثر سرعت آزادسازی دود

T PSR (s): زمان رسیدن به حداکثر سرعت تولید دود

Av. SEA (m<sup>2</sup>/kg): میانگین سطح تیرگی ویژه

Av. COY (kg/kg): میانگین بازده تولید کربن مونوکسید

### مراجع

1. ISO 1182, *Reaction to Fire Tests for Building Products-Non-combustibility Test*, International Standard Organisation, Switzerland, 2002.
2. Thureson P., *The Report of Project 4 of the EUREFIC Fire Research Programm*, Swedish National Testing and Research Institute, Boras, 1991.
3. Wickström U. and Göransson U., Full-Scale/Bench-Scale Correlations of Wall and Ceiling Linings, *J. Fire Mater.*, **16**, 15-22, 1992.
4. Scudamore M.J., Briggs P.J. and Prager F.H., Cone Calorimetry- A Review of Tests Carried out on Plastics for the Association of Plastics Manufacturers in Europe, *J. Fire Mater.*, **15**, 65-84, 1991.

5. Collier P.C.R. and Baker G.B., *Improving the Fire Performance of Polystyrene Insulated Panels in New Zealand, Research Report*, Building Research Association of New Zealand, 2004.
6. EUMEPS, *Behaviour of EPS in Case of Fire*, European Manufacturers of EPS, Brussels, 2002.
7. BS 6203., *Guide to Fire Characteristics and Fire Performance of Expanded Polystyrene Materials (EPS and XPS) Used in Building Application*, British Standard Institute, UK, 2003.
8. EPSASA, *Selection Guide Introducing Expanded Polystyrene*, Expanded Polystyrene Association of South Africa, Midrand, 2002.
9. Warrington Fire Research, *Throwing Some Light on a Potential Fire Hazard*, www.wfrc.co.uk, 1999.
10. Hugget C., Estimation of Heat Release by means of Oxygen Consumption Measurements, *J. Fire Mater.*, **4**, 61-65, 1980.