

# رفتار اسفنج سخت پلی یورتان و دیواره‌های ساندویچی پلی یورتانی فلزپوش در برابر آتش و ارزیابی خطر مشارکت آنها در آتش سوزی

سعید بختیاری<sup>۱\*</sup>، لیلا تقی اکبری<sup>۱</sup>، مهدی باریکانی<sup>۲</sup>

۱- تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، صندوق پستی ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

دریافت: ۸۷/۲/۱۲، پذیرش: ۸۷/۵/۱۷

## چکیده

واکنش در برابر آتش اسفنج سخت پلی یورتان (PUR) کندسوز شده (پلی یورتان حاوی مواد بازدارنده اشتعال) و دو نوع دیواره ساندویچی مورد استفاده در ساختمان با استفاده از گرماسنج مخروطی بررسی شد. ارزیابی رفتار اسفنج و دیواره‌ها در برابر آتش زیر تابش‌های گرمایی مختلف از ۱۵ تا ۷۵ kW/m<sup>۲</sup> انجام شد. اثر شدت تابش گرما روی پارامترهای گرمایی واکنش در برابر آتش شامل زمان افروزش (TTI)، حداکثر شدت رهایش گرما (PRHR)، کل رهایش گرما (THR)، میانگین شدت رهایش گرما (Av.RHR) و میانگین گرمای مؤثر سوختن بررسی شد. روند ملایم وابستگی PRHR به چگالی اسفنج مشاهده شد که می‌تواند به دلیل رفتار زغال شدگی سطح اسفنج حین سوختن باشد. نتایج نشان داد، زمان افروزش برای اسفنج PUR با چگالی‌های مختلف، حتی در ترازهای تابشی مختلف بسیار کوتاه است و اسفنج به سرعت مشتعل می‌شود. اما، در دیواره‌های ساندویچی، وجود روکش فولادی از اسفنج در برابر برخورد مستقیم تابش محافظت کرده و افروزش را به تأخیر می‌اندازد. با افزایش شدت تابش، PRHR در اسفنج مغزه، به طور مرتب افزایش می‌یابد و روند افزایش آن تقریباً منظم است. ولی، برای Av.RHR نوساناتی دیده می‌شود. وابستگی زمان افروزش به شدت تابش برای اسفنج بررسی و معادله‌ای ارائه شد. خطر مشارکت در گسترش آتش سوزی بر اساس پارامترهای TTI، PRHR و THR و نیز با در نظر گرفتن چگالی اسفنج، با استفاده از دو روش مختلف ارزیابی و نشان داده شد که خطر اسفنج پلی یورتان سخت و دیواره‌های ساندویچی آن، از نظر رسیدن اتاق به شرایط بحرانی گرگرفتگی، زیاد اما از نظر مشارکت آن در طولانی‌تر شدن و گسترش آتش سوزی، متوسط است. این موضوع به علت زمان افروزش کوتاه، مقدار نسبتاً زیاد PRHR و مقدار متوسط THR است. کاهش چگالی اسفنج، گرمای نهایی آزاد شده را کاهش می‌دهد، اما در کاهش خطر رسیدن به نقطه بحرانی گرگرفتگی چندان مؤثر نیست.

## واژه‌های کلیدی

پلی یورتان،  
دیواره ساندویچی، آتش،  
شدت رهایش گرما، ساختمان

\*مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

[bakhtiyari@bhrc.ac.ir](mailto:bakhtiyari@bhrc.ac.ir)

## Fire Behavior of Rigid Polyurethane Foam and Metal Faced Polyurethane Sandwich Panels and Its Fire Hazard Assessment

S. Bakhtiyari<sup>1\*</sup>, L. Taghiakbari<sup>1</sup>, and M. Barikani<sup>2</sup>

1. Building and Housing Research Center, P.O. Box: 13145-1696, Tehran, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965-115, Tehran, Iran

Received 2 May 2009, accepted 8 August 2009

## Abstract

Reaction to fire of fire-retarded rigid PUR foams and two types of metal faced rigid polyurethane foam core sandwich panel was evaluated by using cone calorimeter test method. The tests were carried out in various radiative heat fluxes from 15 to 75 kW/m<sup>2</sup>. The radiation rate effect on reaction to fire parameters, including time to ignition (TTI), peak of heat release rate (PRHR), total heat release (THR), average heat release rate (Av.RHR) and average heat of combustion (Av.EHC) was investigated. The phenomenon of char forming, when the foam is exposed to heat, leads to the formation of a protective layer on the surface of foam and hence no direct relation exists between Av.RHR and average specific mass loss rate (Av.Spec.MLR) of foam with increased radiation rate. In addition, the increased PRHR with foam density was also very smooth. The relation between TTI and heat flux was investigated for the foam and its corresponding correlation has been achieved with a specified density. Fire hazard assessment of foams and sandwich panels was carried out by adopting Petrella and Richardson fire risk classification methods. The assessment results showed that rigid PUR foam and PUR sandwich panels may have a high contribution to bring the room to critical flashover condition, but the risk is intermediate from the viewpoint of fire endurance. The reasons of these risk levels are attributed to a very short TTI, relative high PRHR and an intermediate amount of THR. Decrease in foam density reduces heat release but it shows no significant effect on reducing flashover hazard.

## Key Words

polyurethane,  
sandwich panel, fire,  
heat release rate, building

(\* ) To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [bakhtiyari@bhrc.ac.ir](mailto:bakhtiyari@bhrc.ac.ir)

## مقدمه

فراورده‌های ساختمانی بر پایه پلی یورتان (PUR) به دلیل داشتن خاصیت عایق گرمایی بسیار خوب و در نتیجه صرفه جویی در مصرف انرژی، در صنعت ساختمان کاربرد گسترده‌ای دارند. اسفنج سخت PUR، مشابه سایر اسفنج‌های پلیمری قابل سوختن است و در معرض شعله به سرعت شعله ور می‌شود. اما، به دلیل گرماسخت بودن، ذوب نمی‌شود و لایه‌ای زغال روی سطح آن تشکیل می‌شود که می‌تواند به عنوان لایه محافظ عمل کند و تا حدودی گسترش آتش به لایه‌های داخلی اسفنج را با تأخیر مواجه سازد. رفتار گرمایی اسفنج PUR در برابر آتش را می‌توان به کمک کندسوزکننده‌ها و اصلاح ساختار اسفنج (کاربرد اسفنج پلی ایزوسیاناترات (PIR) بهبود بخشید.

استفاده از روکش‌های فلزی روی اسفنج در دیواره‌های ساندویچی (SWP)، علاوه بر تأمین خواص مکانیکی لازم برای دیواره، رفتار محصول را در برابر آتش به دلیل عدم قرارگرفتن مستقیم اسفنج در معرض منبع آتش، به نحو قابل توجهی بهبود می‌بخشد. به طوری که طبق نتایج ارائه شده در برخی مراجع، دیواره‌های ساندویچی با روکش فلزی و مغزه PUR/PIR از نظر رفتار واکنش در برابر آتش می‌توانند در طبقه اروپایی B S<sub>2</sub> d<sub>0</sub> قرار گیرند [۱].

رفتار در برابر آتش اسفنج سخت PUR و دیواره‌های ساندویچی با مغزه اسفنج سخت PUR، با استفاده از آزمون‌های واکنش در برابر آتش توسط برخی پژوهش‌گران بررسی شده است که از جمله کارهای انجام شده به وسیله Chow [۲]، Babrauskas [۳]، Peterella [۴]، Checcin [۵] و دیگران [۶-۹] را می‌توان نام برد. مدل‌هایی برای برقراری ارتباط بین داده‌های گرماسنج مخروطی با آزمون مقیاس کامل ارائه شده است که نشان می‌دهد گرماسنج مخروطی ابزار مناسبی برای ارزیابی زمان گرگرفتگی سراسری (flashover) در آزمون مقیاس بزرگ است [۴، ۸، ۱۰]. در این روش‌ها، زمان گرگرفتگی سراسری بر اساس پارامترهای زمان آفرزش (TTI)، چگالی، حداکثر شدت رهایش گرما (PRHR) و کل رهایش گرما (THR) محاسبه می‌شود.

Chow [۲] نیز در بررسی خود روی خطر آتش‌سوزی دیواره ساندویچی پلی یورتان با روکش فلزی، مورد استفاده در ساختمان‌های موقت، از این مدل‌ها استفاده کرده است. هم‌چنین، وی از داده‌های مربوط به دود برای ارزیابی دوز مؤثر جزئی (fractional effective dose, FED) برای پیش‌بینی خطر سمیت این فراورده استفاده کرد. این مدل‌ها برای کاربرد آزمون‌های گرماسنجی به عنوان ابزار پیش‌بینی در اهداف طراحی ساختمان مفید هستند.

پژوهش حاضر در ادامه مطالعات قبلی به ویژه کار Chow [۲] است، با این تفاوت که در بررسی‌های قبلی، آزمون‌های گرماسنجی روی یک

نوع دیواره یا یک نوع اسفنج سخت PUR انجام و با سایر مواد مقایسه شده است. مثلاً در بررسی‌های Chow تنها یک نوع دیواره با ضخامت مشخص انتخاب شد و شرایط قرار گرفتن آزمون‌ها نیز به شکل لبه آزاد بود. به این معنا که لبه‌های دیواره که اسفنج سخت PUR را شامل می‌شد، در معرض هوای آزاد و تابش مخروط قرار داشت.

در بررسی‌های Peterella [۴] نیز رفتار اسفنج نرم PUR در تابش‌های مختلف و رفتار اسفنج سخت PUR تنها زیر تابش ۵۰ kW/m<sup>۲</sup> مطالعه شده است و دیواره‌های ساندویچی را شامل نمی‌شود. افزون بر این، در مطالعات قبلی اثر چگالی اسفنج روی رفتار در برابر آتش با آزمون گرماسنجی بررسی نشده است. اما در پژوهش حاضر، رفتار اسفنج سخت PUR کندسوز شده و نیز دو نوع دیواره ساندویچی با مغزه PUR با روکش فولادی (مجموعه‌های ۱ و ۲) مورد استفاده در ساختمان، با استفاده از گرماسنج مخروطی در ترازهای تابشی مختلف بررسی و روی پارامترهای گرمایی شامل زمان آفرزش، شدت رهایش گرما و کل رهایش گرما بحث شده است. هم‌چنین، اثر چگالی اسفنج بر پارامترهای گرمایی واکنش در برابر آتش بررسی شده است. به علاوه، با استفاده از نتایج حاصل و مدل‌های موجود، شامل تحلیل پارامتر میل به گرگرفتگی سراسری و روش Richardson، ارزیابی خطر مشارکت این مواد در گسترش آتش‌سوزی انجام و با نتایج موجود مقایسه شده است. این بررسی‌ها توسط پژوهش‌گران قبلی انجام نشده است.

## تجربی

### مواد

نمونه‌های دیواره ساندویچی و اسفنج مغزه PUR کندسوز شده از منابع تجاری معتبر تهیه شد. نمونه‌های دیواره از دو منبع مختلف تهیه شد که اسفنج مغزه آنها از نظر کندسوزشدگی متفاوت بود. ضخامت میانگین دیواره‌های مجموعه ۱، حدود ۴۰ mm و برای دیواره‌های مجموعه ۲، حدود ۵۰ mm بود. میانگین ضخامت روکش در دیواره‌های مجموعه ۱، ۰/۷۵ mm و در دیواره‌های مجموعه ۲، ۰/۶۳ mm بود. میانگین چگالی اسفنج مغزه PUR در دیواره‌های ساندویچی حدود ۳۵/۵ kg/m<sup>۳</sup> بود. اسفنج سخت PUR کندسوز آزمون شده، همان اسفنج به کار رفته در مغزه دیواره ساندویچی مجموعه ۲ بود، اما چگالی آن کمی بیشتر (حدود ۴۰ kg/m<sup>۳</sup>) و ضخامت آن حدود ۳۰ mm بود. پلی‌ال موجود در اسفنج سخت PUR از نوع پلی‌اتر بود. چگالی‌های ۳۵ تا ۴۰ kg/m<sup>۳</sup> برای اسفنج مغزه، اعداد رایج در ایران برای دیواره‌های ساندویچی پلی یورتان است.

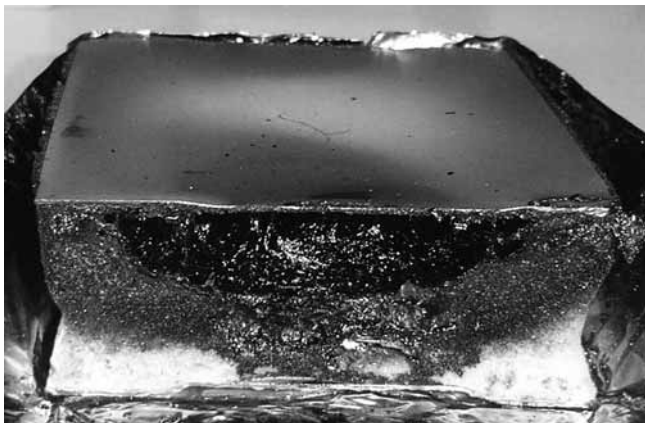


شکل ۱ - تصویری از تجهیزات به کار گرفته شده برای انجام آزمون.

## نتایج و بحث

### مشخصات اشتعال ماده و رابطه آن با شدت گرمای تابشی

نتایج آزمون روی دو نوع دیواره ساندویچی پلی یورتان در ترازهای تابشی مختلف در جدول‌های ۱ و ۲ و برای اسفنج سخت PUR کندسوز شده مغزه در جدول ۳ ارائه شده است. آزمون‌ها در چند تراز تابشی از ۱۵ تا  $75 \text{ kW/m}^2$  انجام شد. Babrauskas [۱۴] در باره ترازهای تابشی برای آزمون‌های گرماسنجی بحث کرده است. طبق استاندارد ISO 5660-1 [۱۱] برای به دست آوردن نتایج قابل اعتماد، تراز تابشی به کار رفته در آزمون باید به مقدار مناسب (حدود  $10 \text{ kW/m}^2$ ) بیشتر از حداقل شار گرمایی لازم برای افروزش نمونه باشد که پژوهش‌های Babrauskas [۱۴] آن را تأیید می‌کند. طبق مطالعات او، شار گرمایی کمتر از  $35 \text{ kW/m}^2$  در آتش سوزی‌ها کمتر دیده شده و شارهای گرمایی کمتر از



شکل ۲ - یک نمونه دیواره ساندویچی پلی یورتان پس از انجام آزمون.

## دستگاه‌ها و روش آزمون

آزمون‌ها به وسیله دستگاه گرماسنج مخروطی مطابق استاندارد بین‌المللی ISO 5660-1 [۱۱] انجام شد. دستگاه آزمون از لحاظ نظری بر اساس اصل اکسیژن مصرف شده طراحی شده است. این اصل بار اول در سال ۱۹۱۷ توسط Thoronton [۱۲] مطرح شد. وی نشان داد که برای تعداد زیادی از مایعات و گازهای آلی، تقریباً مقداری ثابت گرما به ازای واحد جرم اکسیژن مصرف شده آزاد می‌شود. در سال ۱۹۸۰، Huggett دریافت که این موضوع برای جامدهای آلی نیز صحت دارد و مقدار میانگین  $13/1 \text{ MJ/kg}$  اکسیژن را برای آنها به دست آورد [۱۳]. با استفاده از این دستگاه، زمان افروزش مشاهده شده و شدت رهایش گرما با استفاده از اندازه‌گیری اکسیژن مصرف شده و معادلات مربوط به دست می‌آید. سایر پارامترها با استفاده از این نتایج قابل استنتاج است. از جمله کل رهایش گرما از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$\text{THR} = \int_0^t q(t) \cdot dt \quad (1)$$

که در آن THR، کل رهایش گرما به ازای واحد سطح آزمون ( $\text{MJ/m}^2$ )،  $q(t)$  شدت رهایش گرما به ازای واحد سطح آزمون در زمان  $t$  ( $\text{kW/m}^2$ ) و  $t_f$  زمان پایان آزمون (s) است.

نمونه در ابعاد  $10 \times 10 \text{ cm}$  با ضخامت متغیر مورد نظر (حداکثر ۵ cm) در قاب نگه‌دارنده خاصی آزمایش می‌شود. تصاویری از نمونه و تجهیزات حین آزمون در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

در استاندارد ISO 5660-1 [۱۱] تکرارپذیری روش آزمون برای زمان افروزش، حداکثر شدت رهایش گرما و کل رهایش گرما، بر اساس آزمون‌های بین‌آزمایشگاهی، به شرح زیر ارائه شده است که در آنها R مقادیر تکرارپذیری آزمون در محدوده‌های داده شده است:

تکرارپذیری برای زمان افروزش در محدوده ۵ تا  $150 \text{ s}$ :

$$R = 4/1 + 0/25 \text{ TTI} \quad (2)$$

تکرارپذیری برای شدت رهایش گرما در محدوده ۷۰ تا  $1120 \text{ kW/m}^2$ :

$$R = 13/3 + 0/31 \text{ PRHR} \quad (3)$$

تکرارپذیری برای کل رهایش گرما در محدوده ۵ تا  $720 \text{ MJ/m}^2$ :

$$R = 7/4 + 0/68 \text{ THR} \quad (4)$$

جدول ۱ - نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی SWP PUR (مجموعه ۱) در ترازهای تابشی مختلف.

SWP-4	SWP-3	SWP-2	SWP-1	پارامتر
۷۵	۵۰	۳۵	۲۵	تراز تابشی ( $\text{kW/m}^2$ )
۴۱۴۲	۴۱۸۲	۴۱۰۵	۴۱۴۵	t (mm)
۳۱	۴۵	-	-	TTI (s)
۹۷۰	۸۱۷	-	-	FO (s)
۱۳۴	۱۳۲	۱۰۰	۰/۶۱	Av.Spec MLR ( $\text{g/m}^2\text{s}$ )
۶۷/۹۸	۴۹/۷۲	۹/۳۵	۵/۳۱	PRHR ( $\text{kW/m}^2$ )
۵۶	۲۱۸	۸۲	۸۲	T PRHR (s)
۲۰/۸۳	۲۰/۱۷	۴/۳۱	۱/۹۴	Av.RHR ( $\text{kW/m}^2$ )
۱۵/۵۱	۱۵/۲۵	۴/۳۱	۳/۱۶	Av.EHC (MJ/kg)
۲/۲	۱/۱	-	-	x ( $\text{kW/m}^2\text{s}$ )
متوسط	متوسط	کم	کم	ارزیابی خطر بر اساس x
۱۹/۶	۱۵/۶	۲/۶	۱/۲	THR ( $\text{MJ/m}^2$ )
متوسط	متوسط	کم	کم	ارزیابی خطر THR
-	۱۶/۹	-	-	THR <sub>900s</sub> در ( $\text{kW/m}^2$ ) ۵۰
۲				طبقه مطابق روش Richardson

جدول ۲ - نتایج آزمون گرماسنج مخروطی روی SWP PUR (مجموعه ۲) در ترازهای تابشی مختلف.

SWP-7	SWP-6	SWP-5	پارامتر
۷۵	۳۵	۲۵	تراز تابشی ( $\text{kW/m}^2$ )
۴۸۳	۵۷۰	۴۹۷	t (mm)
۳۵	۱۰۰	-	TTI (s)
۲۹۱	۷۵۲	-	FO (s)
۴/۶۳	۱/۵۴	۰/۶۴	Av.Spec MLR ( $\text{g/m}^2\text{s}$ )
۲۴۷/۱۰	۸۲/۷۲	۴/۹۵	PRHR ( $\text{kW/m}^2$ )
۹۲	۲۵۴	۵۲	T PRHR (s)
۹۸/۳۷	۳۵	۱/۹۸	Av.RHR ( $\text{kW/m}^2$ )
۲۱/۲۵	۲۲/۶۹	۳/۰۸	Av.EHC (MJ/kg)
۷/۱	۰/۸	-	x ( $\text{kW/m}^2\text{s}$ )
متوسط	کم	کم	ارزیابی خطر بر اساس x
۲۵/۲	۲۲/۸	۱/۲	THR ( $\text{MJ/m}^2$ )
متوسط	متوسط	کم	ارزیابی خطر THR
۲۸/۶	۲۲/۸	-	THR <sub>900s</sub> در ( $\text{kW/m}^2$ ) ۵۰
۳			طبقه مطابق روش Richardson

$25 \text{ kW/m}^2$  تقریباً وجود ندارد.

در برنامه پژوهشی اروپایی با عنوان EUREFIC [۱۵] از تابش های ۲۵، ۳۵، ۵۰ و  $75 \text{ kW/m}^2$  طبق برنامه مشخصی برای آزمون استفاده شده است. در عین حال، اسفنج PUR ماده ای بسیار اشتعال پذیر است و در تراز  $35 \text{ kW/m}^2$  به سادگی مشتعل می شود. آزمایش روی اسفنج ها در شارهای گرمایی کمتر نیز انجام شده است، از جمله نتایج Parker که توسط Rowen [۱۶] مرور شده یا کارهای Chow [۲] را می توان نام برد. ضمن این که نتایج زمان افروزش در تابش های گرمایی کم، دقت بهتری دارد [۸]. به همین دلیل، آزمایش در ترازهای ۱۵ و  $25 \text{ kW/m}^2$  در برنامه این پژوهش نیز در نظر گرفته شد. بحث و بررسی روی نتایج آزمون در ادامه آمده است.

### زمان افروزش (TTI)

اسفنج پلی یورتان سخت، ماده ای بسیار اشتعال پذیر است و به سرعت مشتعل می شود. طبق نتایج حاصل با افزایش شدت تابش، زمان افروزش (TTI) هم در دیواره و هم در اسفنج کمتر می شود، با این تفاوت که زمان افروزش در اسفنج سخت PUR بسیار کوتاه است و با افزایش

شدت تابش، افروزش در همان ثانیه اول آزمون رخ می دهد. اما در دیواره های ساندویچی، روکش فولادی از اسفنج مغزه در مقابل برخورد مستقیم تابش محافظت می کند و افروزش را به تأخیر می اندازد. در آزمون روی اسفنج PUR، زیر تابش  $15 \text{ kW/m}^2$  افروزش رخ نداد. اگرچه تا  $120 \text{ s}$  پس از شروع آزمون، شعله زنی های پی در پی روی سطح آزمون مشاهده شد که تا حدود ۱ min ادامه داشت. با افزایش شدت تابش تا  $25 \text{ kW/m}^2$ ، اسفنج در مدت ۸s مشتعل شد. اما در دیواره های ساندویچی زیر این تابش، در طول آزمون (۱۰ min) اصلاً افروزشی رخ نداد. حتی دیواره ساندویچی مجموعه ۱ در تابش  $35 \text{ kW/m}^2$  نیز مشتعل نشد. اسفنج مغزه در هر دو نوع دیواره ساندویچی از نوع کندسوز شده بود. اما، نمونه های مجموعه ۱ رفتار بهتری در برابر آتش نشان دادند که به علت درجه بالاتر کندسوزی آنها بود. در تراز تابشی  $75 \text{ kW/m}^2$ ، میانگین زمان افروزش برای دیواره های ساندویچی آزمون شده بین ۳۱ تا ۳۵ s بود. اما برای برای اسفنج سخت PUR، افروزش در اولین ثانیه رخ داد. مقایسه نتایج دیواره های ساندویچی مجموعه ۲ (جدول ۲) با نتایج اسفنج مغزه (جدول ۳) مقدار اثر ورق فولادی در محافظت از اسفنج مغزه را نشان می دهد. شکل ۳ زمان افروزش در ترازهای تابشی

جدول ۳ - پارامترهای آتش برای مغزه اسفنج سخت PUR با چگالی  $40 \text{ kg/m}^3$  و ضخامت  $30 \text{ mm}$  در ترازهای تابشی مختلف.

F5	F4	F3	F2	F1	کد نمونه
۷۵	۵۰	۳۵	۲۵	۱۵	تراز تابشی ( $\text{kW/m}^2$ )
۱	۲	۵	۸	-	TTI (s)
۳۰۲	۳۴۲	۲۴۵	۳۲۰	-	FO (s)
۳/۸۷	۳/۳۴	۳/۷۸	۲/۳۹	۰/۳۷	Av.Spec MLR ( $\text{g/m}^2\text{s}$ )
۳۰۶/۴۹	۲۱۴/۴۰	۱۷۹/۱۴	۱۴۲/۸۱	۳/۸۸	PRHR ( $\text{kW/m}^2$ )
۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۳۴۰	T PRHR (s)
۷۲/۷۹	۶۴/۸۰	۷۵/۰۱	۳۹/۹۹	۷۱۵	Av.RHR ( $\text{kW/m}^2$ )
۱۸۷۷	۱۹۳۸	۱۹/۸۷	۱۶/۷۰	۳/۰۶	Av.EHC (MJ/kg)
۳۰۶/۴۹	۱۰۷/۲	۳۵/۸۳	۱۷/۸۵	-	x ( $\text{kW/m}^2\text{s}$ )
زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	ارزیابی خطر بر اساس x
۲۲/۱	۲۲/۱	۱۸/۳	۱۲/۶	۰/۷	THR ( $\text{MJ/m}^2$ )
متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	خیلی کم	ارزیابی خطر THR
-	۲۴/۹۵	-	-	-	THR <sub>900s</sub>
۴					طبقه مطابق روش Richardson

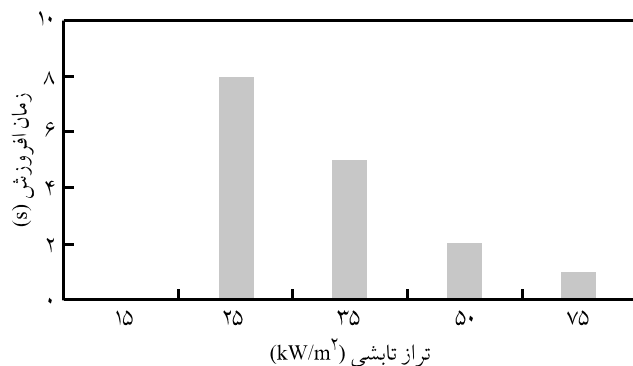
را برای محاسبه زمان افروزش مواد ارائه کرده‌اند. در این معادلات از تعریفی به نام طول مشخصه رسانایی گرمایی به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta = \sqrt{\alpha t_i} = \sqrt{\frac{kt_i}{\rho c}} \quad (5)$$

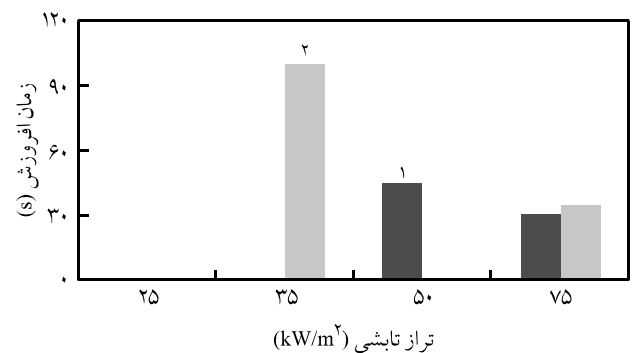
که در آن  $\alpha$  ضریب نفوذ گرما،  $\rho$  چگالی،  $c$  گرمای ویژه،  $k$  ضریب رسانایی گرمایی و  $t_i$  زمان افروزش است. طول مشخصه رسانایی گرمایی نقش مهمی در معادلات زمان افروزش دارد. برای اجسام ضخیم

مختلف را برای دو مجموعه SWP و شکل ۴ زمان افروزش در اسفنج مغزه PUR را نشان می‌دهد.

افروزش جزو پارامترهای اولیه برای تحلیل خطرپذیری حریق است و به علاوه مشخصه سرعت پیش روی سطحی شعله نیز به آن وابسته است. برای ارتباط دادن بین پارامترهای افروزش با مشخصات فیزیکی و گرمایی مواد، کارهای زیادی انجام شده است. در برخی از این پژوهش‌ها با فرض این که نظریه‌های پایه لازم برای این ارتباط وجود ندارد، مدل‌های تجربی با استفاده از آزمایش‌ها تهیه شده است. اما Mikkola و Wichman [۱۷] با استفاده از معادلات انتقال گرما، معادلاتی



شکل ۴ - زمان افروزش اسفنج پلی یورتان در تابش‌های مختلف.



شکل ۳ - زمان افروزش دیواره‌ها در ترازهای تابشی مختلف.

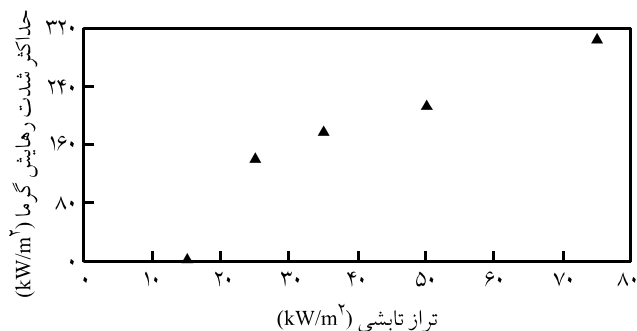
$$t_i = 5487/q^2 \quad (8)$$

یعنی با افزایش شدت تابش، زمان افروزش اسفنج سخت PUR با سرعت بسیار بیشتری (متناسب با عکس مجذور شدت تابش و به ویژه با توجه به این که  $q^2$  بسیار بزرگ‌تر از عدد 5487 موجود در صورت معادله است) کاهش می‌یابد. برای درک بهتر اهمیت اثر پارامترهای چگالی، رسانایی گرمایی و گرمای ویژه در این موضوع، می‌توان مقدار  $\rho c k$  برای پلی‌یورتان و چوب بلوط را با استفاده از داده‌های مراجع مقایسه کرد که برای این نوع چوب حدوداً 200 برابر یک پلی‌یورتان سخت با چگالی  $40 \text{ kg/m}^3$  است. بنابراین می‌توان تصور کرد، این پارامترها تا چه حد در کاهش زمان افروزش پلی‌یورتان سخت مؤثر هستند. باید توجه کرد، معادله (5) برای اسفنجی با مشخصات فیزیکی و کندسوزی مشخص به دست آمده است.

### رهایش گرما

شدت رهایش گرمای ناشی از سوختن ماده، مهم‌ترین پارامتر ارزیابی رفتار در برابر آتش تلقی می‌شود [8, 20]. طبق داده‌های جدول 3، با افزایش شدت تابش، حداکثر شدت رهایش گرما (PRHR) در اسفنج، به طور مرتب افزایش می‌یابد و از  $142 \text{ kW/m}^2$  زیر تابش 35 به  $306 \text{ kW/m}^2$  زیر تابش  $75 \text{ kW/m}^2$  می‌رسد. زمان رسیدن به PRHR برای هر سه نمونه (در تابش‌های 50، 35 و  $75 \text{ kW/m}^2$ ) یکسان (10 s) پس از شروع آزمون) رخ داده است.

همان‌طور که در شکل 6 دیده می‌شود، روند افزایش PRHR در اثر افزایش شدت گرمای برخورد، الگوی تقریباً مشخصی نشان می‌دهد، اما رابطه میانگین شدت رهایش گرما (Av.RHR) با افزایش تابش (یا دمای آزمون) این‌طور نیست و نوساناتی دیده می‌شود (شکل 7). ضمن این که پس از افزایش نسبتاً سریع، مقدار آن تقریباً ثابت است. این موضوع به دلیل تشکیل زغال روی پلی‌یورتان قابل توجیه است.



شکل 6 - رابطه PRHR اسفنج PUR با شدت تابش گرما.

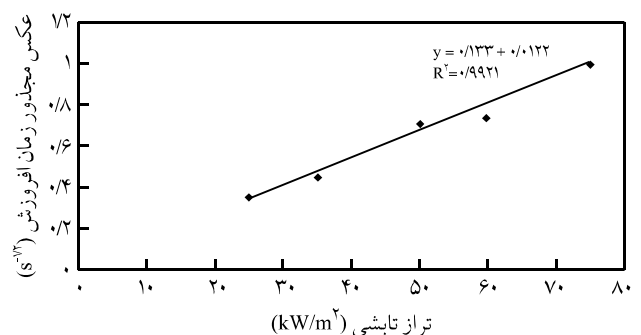
گرمایی، یعنی اجسامی که برای آنها دلتا خیلی کوچک‌تر از ضخامت نمونه است (مثلاً ضخامت نمونه در حد چند سانتی‌متر است)، Mikkola رابطه بین زمان افروزش و مشخصات فیزیکی و گرمایی را به شرح زیر ارائه داده است:

$$t_i = \rho.c.k \left[ \frac{T_i - T_0}{q_{\text{net}}} \right]^2 \quad (6)$$

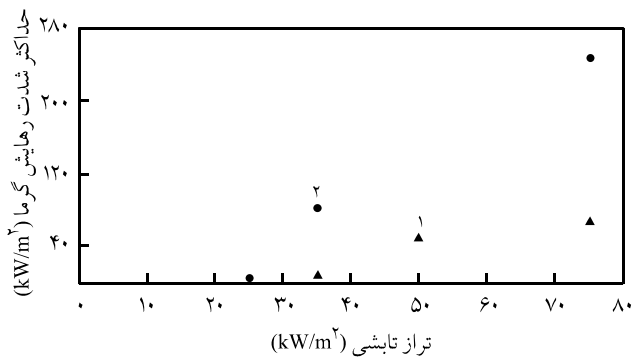
که در آن  $T_i$  دمای افروزش،  $T_0$  دمای اولیه نمونه و  $q_{\text{net}}$  گرمای تابشی خالصی است که روی نمونه وارد می‌شود. با استفاده از داده‌های مراجع مختلف، مانند Wickström [18] یا Hobbs [19] برای مقادیر رسانایی گرمایی و گرمای ویژه پلی‌یورتان سخت، معادله (6) برای زمان افروزش این ماده، مقادیر بسیار اندک در حد کمتر از یک ثانیه می‌دهد که به طور عمده به دلیل مقادیر کم چگالی و رسانایی گرمایی است. این دو عامل باعث می‌شود تا صورت کسر در معادله (6)، نسبت به مخرج بسیار اندک باشد. تفسیر فیزیکی موضوع به این ترتیب است که چگالی و رسانایی گرمایی بسیار کم این ماده، همراه با گرماسخت بودن آن، باعث می‌شود تا سطح ماده به سرعت به دمای افروزش برسد. با این وجود، با استفاده از مفهوم معادله (6)، نمودار عکس مجذور زمان افروزش در برابر تراز تابش رسم شد (شکل 5). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج، هم‌بستگی خوبی با مقدار ضریب هم‌بستگی  $r_2 = 0.9921$  نشان می‌دهد. بنابراین، معادله تجربی (7) برای پیش‌بینی زمان افروزش بر اساس شدت تراز تابش برای اسفنج سخت PUR به دست آمد:

$$1/\sqrt{t_i} = 0.133 + 0.0122 q \quad (7)$$

معکوس کردن معادله، مفهوم آن را به شکل بهتری نشان می‌دهد:



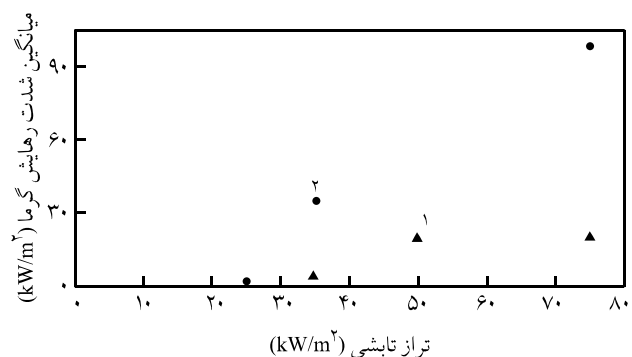
شکل 5 - رابطه عکس مجذور افروزش برای اسفنج سخت PUR با شدت تابش گرمایی.



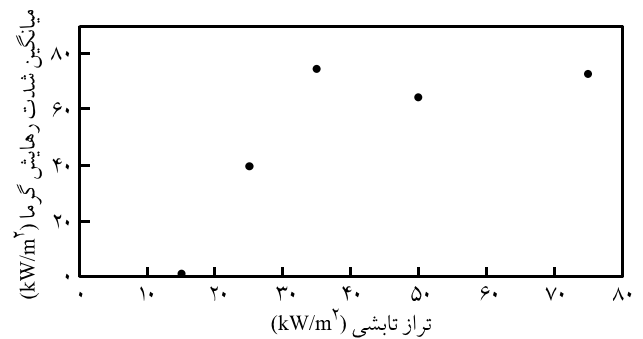
شکل ۸- رابطه PRHR با شدت تابش گرما برای دیواره‌های پلی یورتان (مجموعه‌های ۱ و ۲).

شدت رهائش گرما (شکل ۹) یا کل رهائش گرما، چنین موضوعی صدق نمی‌کند. احتمالاً به دلیل این که در نهایت جرم نسبتاً یکسانی به طور کامل (یا مشابه) سوخته و گرمای نسبتاً یکسانی آزاد شده است. اهمیت این موضوع در تفسیر خطرپذیری اسفنج و دیواره ساندویچی پلی یورتان در آتش سوزی است. ورق فولادی باعث می‌شود تا خطر شدت حریق تا حدودی (بسته به شرایط) کاهش یابد. اما در نهایت، گرمایی که به سامانه اضافه می‌شود، می‌تواند یکسان باشد. البته این گرما در دیواره در زمان طولانی‌تری نسبت به اسفنج آزاد می‌شود. در این باره در بخش‌های بعدی مقاله بیشتر بحث می‌شود.

در مجموعه اول، نمونه‌های SWP-1 و SWP-2 دچار افروزش نشدند. از این رو، PRHR آنها بسیار کم و اصولاً با صفر تفاوت چندانی ندارد و TPRHR نیز برای آنها چندان معنی دار نیست. نمونه SWP-3 در  $35 \text{ kW/m}^2$  آزمون شده و زمان افروزش آن ۴۵ s بوده است. شدت رهائش گرما برای آن اندک بود و در نتیجه TPRHR نیز برای آن نسبتاً دارای تأخیر است. با افزایش تابش برای SWP-4 زمان افروزش کوتاه شده، شدت سوختن افزایش و TPRHR نیز کاهش یافته



شکل ۹ - رابطه Av.RHR با شدت تابش گرما برای دیواره‌های پلی یورتان (مجموعه‌های ۱ و ۲).



شکل ۷- رابطه Av.RHR اسفنج PUR با شدت تابش گرما.

حداکثر شدت رهائش گرما در همان اوایل آزمون، تقریباً بلافاصله پس از افروزش رخ می‌دهد. بنابراین، هنوز زغال چندانی روی سطح تشکیل نشده و مزاحمت خاصی به وجود نمی‌آورد. به همین دلیل در روند افزایشی این پارامتر با افزایش گرمای برخورد، نوسانی رخ نمی‌دهد. اما با بیشتر شدن زمان آزمون و تشکیل زغال روی سطح، واکنش‌ها دچار اختلال شده و رهائش گرما نمی‌تواند با شدت قبلی ادامه یابد. بنابراین به علت این مزاحمت‌های فیزیکی و نوساناتی که در فرایند سوختن رخ می‌دهد، الگوی خاص افزایش برای میانگین شدت رهائش گرما (که نه فقط به لحظات اولیه بلکه به کل فرایند سوختن وابسته است) مشاهده نمی‌شود.

درباره کل رهائش گرما نیز مقادیر به دست آمده در تابش‌های ۵۰ و  $75 \text{ kW/m}^2$  برابر با یک دیگر (معادل  $221 \text{ MJ/m}^2$ ) و نزدیک به عدد به دست آمده در تابش  $35 \text{ kW/m}^2$  است. علت این موضوع نیز سوختن جرم آزمون تقریباً به طور کامل (با در نظر داشتن رفتار خاص پلی یورتان سخت) است که البته زمان آزمون متفاوت است و در تابش کمتر در زمان طولانی‌تری رخ می‌دهد. Peterella [۴] نیز نشان داده است که با افزایش شدت گرمای تابشی، شاخص میل به گرگرفتگی (که وابسته به حداکثر شدت رهائش گرماست) می‌تواند به شدت افزایش یابد، اما مقدار کل رهائش گرما نسبتاً ثابت می‌ماند. در واقع اثر اصلی افزایش شدت تابش، کوتاه شدن زمان افروزش و افزایش پارامترهای شدت رهائش گرماست.

نتایج شدت رهائش گرما برای دیواره‌ها نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. روند افزایشی شدت رهائش گرما بر حسب شار تابشی با شدت کمتری نسبت به اسفنج مشاهده می‌شود. مقایسه نتایج جدول‌های ۲ و ۳ برای تابش  $75 \text{ kW/m}^2$  نشان می‌دهد که وجود ورق فولادی در دیواره ساندویچی، باعث کاهش حدود ۲۰ درصد در حداکثر شدت رهائش گرما شده است. این اثر در تابش‌های کم بیشتر است، به طوری که این کاهش در تابش  $35 \text{ kW/m}^2$  بیش از ۶۰ درصد است. اما، درباره میانگین

### اثر چگالی اسفنج مغزه

نتایج آزمون برای اسفنج های سخت PUR کند سوز شده با چگالی های مختلف در محدوده  $۵۵-۲۰ \text{ kg/m}^3$  در تراز تابشی  $۳۵ \text{ kW/m}^2$  در جدول ۴ ارائه شده است. ضخامت آزمون ها مشابه و حدود  $۱ \pm ۴۰ \text{ mm}$  بود. نتایج نشان می دهند که با وجود تغییر چگالی نمونه های اسفنج، زمان افروزش آنها ثابت و حدود ۵ s است. رسیدن به PRHR نیز برای تمام آزمون ها تقریباً در بازه زمانی ۱۲-۱۰ s رخ می دهد. اما، با افزایش چگالی و در نتیجه افزایش جرم سوختنی، روند افزایشی در PRHR مطابق شکل ۱۰ مشاهده می شود، هر چند این روند خیلی محسوس و قابل توجه نیست. به علاوه شدت کاهش جرم (Av.Spec MLR) در تمام آزمون ها مشابه با یک دیگر است که در پی آن مقدار گرمای مؤثر سوختن نیز در چگالی های مختلف تقریباً مشابه است. در شکل ۱۱ منحنی کل رهایش گرمای ناشی از سوختن اسفنج های PUR بر حسب چگالی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، روند افزایش در این حالت کاملاً محسوس است، زیرا با افزایش چگالی و افزایش جرم سوختنی زمان شعله وری طولانی تر شده و کل گرمایی که طی فرایند سوختن آزاد می شود، نیز افزایش می یابد.

### ارزیابی خطر

روش های مختلفی برای ارزیابی خطر حریق مواد و مصالح وجود دارد.

جدول ۴ - پارامترهای آتش برای اسفنج سخت PUR با چگالی های مختلف در تراز تابشی  $۳۵ \text{ kW/m}^2$ .

F-M14	F-M13	F-M12	F-M11	پارامتر
۵۵/۳	۳۸/۷۹	۳۰/۹۵	۱۹/۹	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$
۴۰/۵۱	۴۰/۶۸	۴۰/۱۷	۳۹/۹۸	t (mm)
۵	۵	۵	۵	TTI (s)
۴۶۵	۳۳۴	۲۹۷	۱۴۵	FO (s)
۴/۱۶	۳/۸۲	۳/۵۴	۴/۶۱	Av.Spec MLR ( $\text{g/m}^2\text{s}$ )
۸۴/۵	۷۷/۶۹	۶۳/۷۱	۶۹/۷۱	Av.RHR ( $\text{kW/m}^2\text{)}$
۱۹۵/۰۳	۱۷۷/۵۱	۱۸۰/۶۴	۱۶۰/۶۷	PRHR ( $\text{kW/m}^2\text{)}$
۱۲	۱۰	۱۰	۱۲	T PRHR (s)
۲۰/۳۳	۲۰/۴۰	۱۷/۹۷	۱۵/۰۹	Av.EHC (MJ/kg)
۳۹/۰۱	۳۵/۵	۳۶/۱۳	۳۲/۱۳	x ( $\text{kW/m}^2\text{s}$ )
زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	ارزیابی خطر بر اساس x
۳۹/۰	۲۵/۹	۱۷/۸	۱۰/۰	THR ( $\text{MJ/m}^2\text{)}$
متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	ارزیابی خطر THR

است. این موضوع برای مجموعه دوم نیز صادق است و به همین دلیل برای SWP-6 نیز TPRHR بیشتری مشاهده می شود.

Checchin [۵]، انواع اسفنج سخت PUR با کندسوزکننده های مختلف را بررسی کرده است. ضخامت آزمون ها ۲۵ mm و محدوده چگالی  $۴۵-۴۰ \text{ kg/m}^3$  بوده است. در نتایج ارائه شده توسط این پژوهش گر، برای اسفنج سخت PUR از نوع معمولی زیر تابش  $۴۰ \text{ kW/m}^2$  مقدار PRHR برابر با  $۲۹۴ \text{ kW/m}^2$  در زمان ۱۴ s و برای دو نوع اسفنج سخت کندسوز شده  $۱۶۲ \text{ kW/m}^2$  در زمان ۱۲ s و  $۲۲۳ \text{ kW/m}^2$  در زمان ۱۰ s بوده است. مقادیر داده شده توسط Checchin با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. اما مقادیر PRHR که برای دیواره های ساندویچی پلی یورتان سخت توسط Chow [۲] گزارش شده است، بیشتر از مقادیر به دست آمده کار فعلی است که آن را می توان به در معرض بودن لبه های دیواره (اسفنج PUR) در آزمون های Chow یا متفاوت بودن کندسوزی نمونه ها نسبت داد.

### گرمای مؤثر سوختن

مقادیر میانگین گرمای مؤثر سوختن در اسفنج مغزه، به رفتار اسفنج سخت PUR در برابر آتش مربوط است و در عین حال به شرایط آزمون نیز بستگی دارد. میانگین گرمای مؤثر سوختن برای اسفنج در تراز  $۲۵ \text{ kW/m}^2$  نسبت به سایر ترازها مقداری کمتر است که به علت کمتر بودن مقدار واکنش های احتراق در این تراز تابشی است. با بالا رفتن تراز تابشی، مقدار گرمای مؤثر سوختن افزایش می یابد، اما برای ترازهای مختلف تقریباً ثابت است (با متوسط معادل  $۱۷۶۸ \text{ MJ/m}^2$ ). این موضوع با توجه به مقدار میانگین شدت کاهش جرم برای نمونه ها در ترازهای مختلف قابل توجه است. با وجود افزایش شدت تابش گرمایی و دمای آزمون، میانگین شدت کاهش جرم ویژه در تابش های ۳۵ تا  $۷۵ \text{ kW/m}^2$  تقریباً ثابت و حدود  $۳۷ \text{ g/m}^2\text{s}$  است. این موضوع به دلیل رفتار زغال شدن پلی یورتان سخت قابل توجه است.

زغال شدن باعث محدود شدن کاهش جرم حتی با افزایش دما شده و مقدار آن را در میانگین مشخصی محدود می کند. برای مقایسه، اعداد به دست آمده برای گرمای مؤثر سوختن کمتر از مقادیر مربوط به پلی استیرین انبساط یافته است که توسط بختیاری و همکاران گزارش شده است [۲۱، ۲۲]. این موضوع می تواند به دلیل تفاوت ماهیت این دو ماده عایق باشد. به این ترتیب که پلی استیرین انبساط یافته بلافاصله پس از قرار گرفتن در معرض آتش، ذوب می شود و به راحتی تا انتها می سوزد، اما سطح پلی یورتان پس از شروع فرایند سوختن، زغالی شده و از لایه های زیرین محافظت می کند.



آزاد شده از آنها برابر با  $25 \text{ MJ/m}^2$  و حداکثر شدت گرمای آزاد شده نیز  $100 \text{ kW/m}^2$  باشد.

طبقه ۳ - کل گرمای آزاد شده  $50 \text{ MJ/m}^2$  یا کمتر و حداکثر شدت گرمای آزاد شده  $150 \text{ kW/m}^2$  است.

طبقه ۴ - کل گرمای آزاد شده حداکثر  $100 \text{ MJ/m}^2$  و حداکثر شدت آن  $300 \text{ kW/m}^2$  است.

طبقه ۵ - کل گرمای آزاد شده بیش از  $100 \text{ MJ/m}^2$  و حداکثر شدت آن بیش از  $300 \text{ kW/m}^2$  است.

مواد طبقات ۴ و ۵ جزو مواد خطرناک و خیلی خطرناک تشخیص داده می‌شوند و معمولاً طبق مقررات ساختمانی برای استفاده از چنین موادی باید از یک لایه پوشش محافظت‌کننده مانند یک لایه تخته گچی با ضخامت حداقل  $12/5 \text{ mm}$  استفاده کرد.

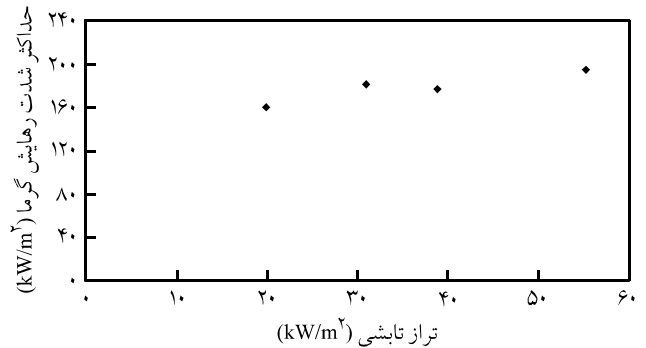
تلاش‌های زیادی برای ایجاد ارتباط بین داده‌های آزمایش‌های مقیاس کوچک با آزمون‌های مقیاس بزرگ و نیز ارزیابی خطر گسترش آتش سوزی بر اساس آن انجام شده است. از جمله مفیدترین آنها، ایجاد ارتباط بین نتایج گرمایی آزمون‌های مقیاس کوچک با نقطه گرگرفتگی است. نقطه گرگرفتگی، زمانی است که کل اتاق آزمون (در ابعاد  $2/4 \times 2/4 \times 3/6 \text{ m}$ ) از شعله‌های آتش پر شده و شعله‌ها از بازشوی اتاق آزمون بیرون می‌زنند. برای ایجاد این ارتباط از پارامترهای مختلفی نظیر کل رهایش گرما، شدت رهایش گرما یا زمان افروزش استفاده شده است. برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که چگالی ماده نیز باید در معادلات در نظر گرفته شود [۸].

Nussbaum و Östman [۸] ارتباط بین پارامترها را بررسی و معادلاتی بر این اساس ارائه کرده‌اند. اما Östman و [۹] Tsantaridis معادله مزبور را اصلاح و معادله (۶) را ارائه کردند که در آن زمان افروزش، کل رهایش گرما و چگالی به عنوان پارامترهای مؤثر در محاسبه زمان گرگرفتگی سراسری در نظر گرفته شده‌اند:

$$t_{fo} = 0.07 \frac{TTI_{50}^{0.25} \rho^{1.7}}{THR_{300}^{1.3}} + 60 \quad (9)$$

که در آن  $t_{fo}$  زمان گرگرفتگی سراسری (s) در آزمون استاندارد آتش اتاق در مقیاس کامل،  $TTI_{50}$  زمان افروزش (s) در  $50 \text{ kW/m}^2$ ،  $\rho$  چگالی متوسط نمونه ( $\text{kg/m}^3$ ) و  $THR_{300}$  کل رهایش گرما ( $\text{MJ/m}^2$ ) در  $300 \text{ s}$  پس از افروزش در  $50 \text{ kW/m}^2$  است.

بررسی‌های برخی پژوهش‌گران نیز نشان داده است، به علت نسبت مستقیم چگالی و رسانایی گرمایی، نیاز به وارد کردن هر دوی آنها در مدل‌ها نیست [۲۵].

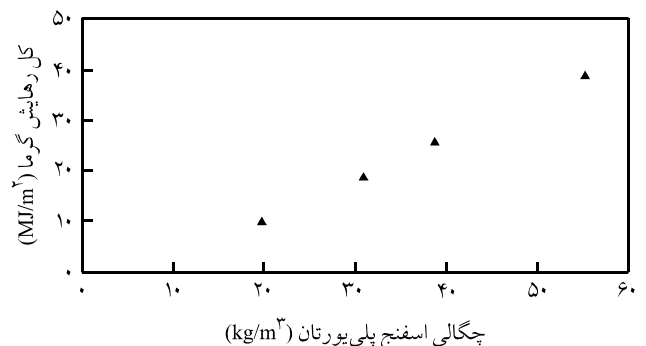


شکل ۱۰ - اثر چگالی اسفنج PUR روی PRHR.

معمولاً هدف از این روش‌ها تعیین خطر مواد از نظر مشارکت آنها در گسترش آتش سوزی است. هر چه یک ماده ساده‌تر مشتعل شود یا گرمای بیشتری آزاد کند، خطر گسترش آتش سوزی را افزایش می‌دهد. برخی از این روش‌ها مانند روش پیشنهادی Wichström و Göransson [۲۳] نیاز به امکانات آزمایشگاهی مقیاس بزرگ دارد. برای روش طبقه‌بندی اروپایی نیز که مصالح را بر اساس رفتار واکنشی آنها در برابر آتش به طبقات A تا F طبقه‌بندی می‌کند، نیاز به چند دستگاه آزمایشگاهی است. در این طبقه‌بندی، گروه A نشان‌گر مواد و مصالح غیرمؤثر در آتش سوزی و گروه F نشان‌گر بدترین دسته با واکنش غیرقابل قبول در برابر آتش (یا مواد آزمایش نشده) است.

Richardson [۲۴] بر اساس نتایج گرماسنج مخروطی و با استفاده از دو پارامتر حداکثر شدت رهایش گرما و کل رهایش گرما در  $15 \text{ min}$  ابتدای آزمون زیر تابش  $50 \text{ kW/m}^2$ ، طبقه‌بندی زیر را ارائه کرده است: طبقه ۱ - موادی که زیر تابش  $50 \text{ kW/m}^2$  در مدت  $15 \text{ min}$  به مقدار  $5 \text{ kW/m}^2$  یا کمتر گرمای آزاد می‌کنند و حداکثر شدت گرمای آزاد شده از آنها نیز  $10 \text{ kW/m}^2$  است. این طبقه تقریباً نشان‌گر مصالح غیرقابل سوختن است.

طبقه ۲ - موادی که زیر تابش  $50 \text{ kW/m}^2$  در مدت  $15 \text{ min}$  کل گرمای



شکل ۱۱ - اثر چگالی اسفنج PUR روی THR.

می‌شود. به این معنی که اسفنج PUR آزمایش شده، خطر زیادی از نظر رسیدن اتاق به حالت گرگرفتگی ایجاد می‌کند و از نظر کل گرمایی که در آتش‌سوزی به مشارکت می‌گذارد، شرایط متوسطی دارد. اسفنج سخت PUR کندسوز شده مورد استفاده در مغزه دیواره، طبق روش Richardson نیز در طبقه ۴ قرار می‌گیرد که جزو مواد خطرناک تشخیص داده می‌شود و طبق مقررات ساختمان برای کاربرد آن باید از لایه پوشش محافظت کننده استفاده کرد.

مقدار  $x$  برای هر دو نوع دیواره ساندویچی زیر تراز تابشی  $25 \text{ kW/m}^2$  در محدوده  $0.1-0.7$  قرار دارد که نشان‌دهنده میل کم به گرگرفتگی سراسری است. برای دیواره‌های مجموعه ازیر تابش گرمایی  $35 \text{ kW/m}^2$  نیز درجه میل به گرگرفتگی سراسری کم است. اما، برای دیواره‌های مجموعه ۲ زیر همین تابش، درجه متوسط به دست آمد.

در ترازهای تابشی بیش از  $50-75 \text{ kW/m}^2$  میل به گرگرفتگی سراسری در هر دو نوع دیواره، متوسط ارزیابی شد. مقدار THR دیواره‌های مجموعه ۱، در محدوده  $10-70 \text{ MJ/m}^2$  است و در نتیجه کم خطر ارزیابی می‌شود. برای دیواره‌های مجموعه ۲، THR فقط در تابش  $25 \text{ kW/m}^2$  در این محدوده قرار دارد و کم خطر ارزیابی می‌شود. دیواره‌های مجموعه ۱ زیر تابش‌های گرمایی  $50-75 \text{ kW/m}^2$  و دیواره‌های مجموعه ۲ زیر تابش گرمایی  $35-75 \text{ kW/m}^2$  با خطر متوسط ارزیابی می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت، دیواره‌های ساندویچی پلی یورتان سخت (با هر دو نوع درجه کندسوزی آزمون شده) در شرایط آتش‌سوزی واقعی در اتاق (که می‌توان انتظار تابش‌های  $50 \text{ kW/m}^2$  را داشت)، خطر متوسطی هم برای رسیدن اتاق به شرایط گرگرفتگی و هم از نظر مشارکت گرمایی در آتش‌سوزی دارند.

مقایسه نتایج با بررسی‌های Chow نیز نشان می‌دهد، مقدار  $x$  به دست آمده در حالت استفاده از قاب نگه‌دارنده (یا به عبارتی در معرض نبودن اسفنج مغزه) بسیار کمتر است. تحلیل کاربردی موضوع این است که در صورت خمیدگی دیواره‌های ساندویچی پلی یورتان یا تغییر شکل لبه‌های آنها حین آتش‌سوزی، مشارکت دیواره‌ها در گسترش آتش‌سوزی می‌تواند به شدت تغییر کرده و وضعیت بدتری را در اتاق ایجاد کند. این موضوع باید در شرایط نصب یا محافظت دیواره‌ها در برابر آتش به شکل جدی در نظر گرفته شود. اگرچه در طبقه‌بندی Richardson برای دیواره‌های ساندویچی مجموعه‌های ۱ و ۲، به ترتیب طبقات ۲ و ۳ به دست آمده است. اما، همین تحلیل را باید برای آن نیز مدنظر داشت.

برای دیواره‌های مجموعه ۲، داده‌های آزمون زیر  $50 \text{ kW/m}^2$  (به منظور استفاده از آن در روش طبقه‌بندی به روش Richardson) در دسترس نبود. اما با توجه به داده‌های حاصل در ترازهای تابشی  $35$  و  $75 \text{ kW/m}^2$

یکی از پارامترهای مهم ارائه شده، نسبت حداکثر شدت رهایش گرما به زمان افروزش است که به عنوان شاخص میل به گرگرفتگی به شکل زیر تعریف شده است [۲]:

$$x = \text{PRHR}/\text{TTI} \quad (10)$$

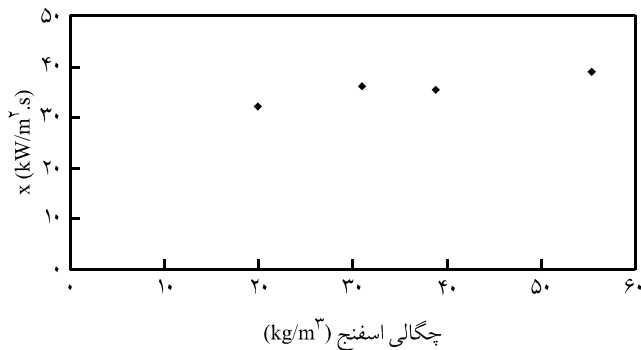
هر چه مقدار حداکثر شدت رهایش گرما بیشتر و زمان افروزش کوتاه‌تر باشد، مقدار  $x$  بزرگ‌تر است و احتمال رسیدن به نقطه گرگرفتگی در آتش‌سوزی بیشتر است. Peterella [۴] این موضوع را برای تعداد زیادی از مواد بررسی کرد و به این نتیجه رسید که اگر چه میل به گرگرفتگی سراسری ( $x$ ) پارامتر مفیدی برای ارزیابی رفتار در برابر آتش یک ماده در مقیاس کامل است، اما این پارامتر ناقص است و باید THR را نیز در نظر گرفت. زیرا ماده‌ای با THR کم، در نهایت انرژی زیادی را وارد آتش‌سوزی نمی‌کند و برعکس.

در جدول ۵، مقیاس ارائه شده توسط Peterella برای درجه‌بندی مواد از نظر میل به گرگرفتگی نشان داده شده است، Chow [۲] نیز در بررسی‌های خود از آن استفاده کرده است. طبقه ۵ در روش Richardson با بدترین طبقه در روش Peterella مطابقت دارد و از این نظر یک دیگر را تایید می‌کنند. اما، در طبقات میانی به نظر می‌آید که روش Richardson کمی دقیق‌تر است.

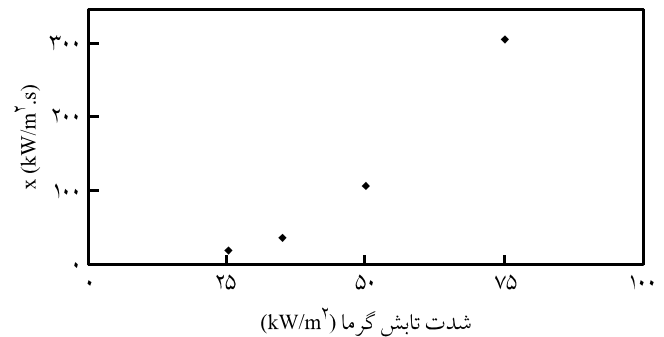
با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، ارزیابی خطر گسترش آتش‌سوزی برای مواد آزمون شده طبق روش‌های Richardson و Peterella انجام شد که نتایج آن در ردیف‌های آخر جدول‌های ۱ تا ۴ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار  $x$  در اسفنج سخت PUR در تابش‌های بیش از  $25 \text{ kW/m}^2$  زیاد است و به ویژه در تابش‌های بیشتر از  $50 \text{ kW/m}^2$ ، مقدار  $x$  بیش از ۱۰۰ است که به دلیل زمان افروزش بسیار کوتاه و PRHR نسبتاً زیاد است. بنابراین، تمایل این ماده به گرگرفتگی زیاد است. اما، در همین مقیاس با توجه به این که مقدار THR اسفنج حدود  $20 \text{ MJ/m}^2$  است، طبقه خطر اسفنج از نظر THR، متوسط ارزیابی

جدول ۵ - مرزبندی مواد بر اساس پارامترهای  $x$  و THR [۴].

$x$ ( $\text{kW/m}^2\text{s}$ )	ارزیابی خطر (نسبت به $x$ )	THR ( $\text{MJ/m}^2$ )	ارزیابی خطر (نسبت به THR)
0.1-0.7	کم	0.1-0.7	خیلی کم
0.7-1.0	متوسط	0.7-1.0	کم
1.0-10.0	زیاد	1.0-10.0	متوسط
-	-	10.0 به بالا	زیاد



شکل ۱۳ - تغییر x با چگالی در اسفنج سخت PUR زیر تابش ۳۵ kW/m<sup>2</sup>.



شکل ۱۲ - تغییر x با شدت تابش گرما در اسفنج سخت PUR.

### نتیجه گیری

نمونه‌های دیواره ساندویچی با مغزه پلی یورتان سخت و اسفنج پلی یورتان سخت از نظر خطر مشارکت آنها در گسترش آتش سوزی در یک اتاق ارزیابی و پارامترهای مؤثر بر آن شامل تراز تابشی و چگالی اسفنج بررسی شد. از آن جا که امکانات آزمون مقیاس بزرگ در دسترس نبود، از آزمون گرماسنجی در مقیاس کوچک استفاده شد. زمان افروزش برای اسفنج پلی یورتان با چگالی‌های مختلف و حتی ترازهای تابشی مختلف بسیار کوتاه است و اسفنج به سرعت مشتعل می‌شود. اما در دیواره‌های ساندویچی، وجود روکش فولادی از اسفنج در برابر برخورد مستقیم تابش محافظت کرده، افروزش را به تأخیر می‌اندازد. ارزیابی خطر بر اساس پارامترهای TTI، PRHR و THR و نیز با در نظر گرفتن چگالی اسفنج و با استفاده از روش‌های Peterella و Richardson، نشان می‌دهد که خطر اسفنج پلی یورتان سخت و دیواره‌های ساندویچی آن، برای رسیدن اتاق به شرایط بحرانی گرگرفتن زیاد و از نظر مشارکت آن در طولانی‌تر شدن و بزرگ‌تر شدن آتش سوزی متوسط است. وجود ورق فولادی روی اسفنج در دیواره‌های ساندویچی در کاهش خطر مؤثر است. اما، با خم شدن یا تغییر شکل دیواره یا لبه‌های آن و در معرض قرارگیری اسفنج، خطر به سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج آزمون و بررسی‌ها، محافظت به وسیله مانع گرمایی (مانند تخته گچی) در ساختمان‌ها ضروری است. کاهش چگالی اسفنج، گرمای نهایی آزاد شده را کاهش می‌دهد، اما در کاهش خطر تمایل به رسیدن به نقطه بحرانی گرگرفتنی چندان مؤثر نیست.

رفتارهای گرمایی اسفنج و دیواره ساندویچی طی آتش سوزی و بستگی پارامترهای مختلف بررسی و ارائه شد. از جمله آثار زغال شدن

فرض بر این شد که داده‌های ۵۰ kW/m<sup>2</sup> بین این دو تراز قرار می‌گیرند که با توجه به نتایج مربوط به دیواره‌های مجموعه ۱، فرضی منطقی به نظر می‌رسد.

پارامتر x محاسبه شده برای اسفنج‌های PUR با چگالی‌های مختلف زیر تابش ۳۵ kW/m<sup>2</sup> میل زیاد به گرگرفتنی سراسری را نشان می‌دهد که با افزایش چگالی اسفنج، افزایش می‌یابد. مقدار THR برای بیشترین چگالی زیر این تابش گرمایی به ۳۹ MJ/m<sup>2</sup> می‌رسد و طبق مقیاس Peterella، خطر آن با درجه متوسط ارزیابی می‌شود. با این وجود، با مقایسه مقادیر x در جدول‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود که اثر شدت تابش گرمایی روی پارامتر x در اسفنج با چگالی ثابت، بسیار قابل توجه‌تر است. زیرا با توجه به معادله (۷)، ضمن افزایش شدید PRHR، مقدار TTI نیز بسیار کم می‌شود. در حالی که برای اسفنج PUR با چگالی‌های مختلف، تنها مقدار PRHR افزایش می‌یابد که شدت افزایش آن زیاد نیست. ضمن این که مقدار TTI نیز ثابت است و در نتیجه x روند افزایشی کندی را (کاملاً شبیه به روند PRHR) نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ منحنی x بر حسب شدت تابش و شکل ۱۳ منحنی x بر حسب چگالی اسفنج PUR را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، اگرچه با افزایش چگالی مغزه، مشارکت گرمایی اسفنج PUR در آتش سوزی افزایش می‌یابد و به طولانی‌تر شدن و بزرگ‌تر شدن حریق کمک بیشتری می‌کند، اما اسفنج سبک در رسیدن به نقطه گرگرفتنی در اتاق می‌تواند به اندازه اسفنج سنگین‌تر خطرناک باشد.

معادله Tsantaridis-Ostman (معادله ۶) نیز این موضوع را از نظر ارتباط چگالی با زمان گرگرفتنی تأیید می‌کند. زیرا با کم بودن جمله اول معادله و تعدیل اثر چگالی با THR در این جمله، اثر چگالی تقریباً محو می‌شود، اگرچه معادله (۶) با توجه به جمله دوم آن (عدد ۶۰) چندان برای PUR مناسب به نظر نمی‌آید و به نظر سریع‌تر از این مقدار می‌تواند رخ دهد.

total heat release، (MJ/m<sup>2</sup>) گرما کل رهایش THR  
 peak rate of heat release، (kW/m<sup>2</sup>) گرما حداکثر شدت رهایش PRHR  
 TPRHR زمان رسیدن به حداکثر شدت رهایش گرما (s)،  
 time to peak rate of heat release  
 average rate، (kW/m<sup>2</sup>) گرما میانگین شدت رهایش Av.RHR  
 of heat release  
 average effective heat، (MJ/kg) گرما مؤثر سوختن Av. EHC  
 of combustion  
 average specific، (g/m<sup>2</sup>s) گرما ویژه Av. Spec MLR  
 میانگین شدت کاهش جرم ویژه  
 mass loss rate  
 flashover، (kW/m<sup>2</sup>s) پارامتر میل به گرگرفتگی سراسری x  
 propensity parameter

سطح اسفنج در مراحل ابتدایی اشتعال نشان داده شد که باعث می شود تا میانگین شدت رهایش گرما (Av.RHR) و شدت کاهش جرم ویژه (Av.Spec MLR) رابطه مستقیمی با افزایش تابش (دمای آزمون) نداشته باشد. به علاوه روند ملایم وابستگی حداکثر شدت رهایش گرما به چگالی نیز مشاهده شد که در مقایسه با رفتار متفاوت عایق‌های گرمانرم مانند پلی استیرن انبساط یافته [۲۱] این نیز باید به دلیل رفتار زغال شدگی سطحی اسفنج باشد.

## اختصارات

ρ چگالی مغزه (kg/m<sup>3</sup>)  
 t ضخامت آزمون (mm)  
 TTI زمان افروزش (s)  
 F.O زمان خاموش شدن شعله (s)

## مراجع

- ISOPA, Fact Sheet, Reaction to Fire Behaviour of Metal-faced Polyurethane Sandwich Panels in Room Corner Tests, 2003.
- Chow W.K., Fire Hazard Assessment on Polyurethane Sandwich Panels for Tempory Accommodation Units, *Polym. Test.*, **23**, 973-977, 2004.
- Babrauskas V., Sandwich Panel Performance in Full-scale and Bench-scale Fire Tests, *Fire Mater.*, **21**, 53-65, 1997.
- Petrella R.V., The Assessment of Full-scale Fire Hazards from Cone Calorimeter Data, *J. Fire Sci.*, **12**, 14-42, 1994.
- Checchini M., Cecchini C., Cellarosi B., and Sam F.O., Use of Cone Calorimeter for Evaluating Fire Performances of Polyurethane Foams, *Polym. Degrad. Stab.*, **64**, 573-576, 1999.
- Wittbecker W., Daems D., and Werther U., Performance of Polyurethane (PUR) Building Products in Fires, European Iso-cyanate Producers Association, ISOPA Brochure, 17-19 1999, [http://www.isopa.org/htdocs/isopa\\_site/broch.htm](http://www.isopa.org/htdocs/isopa_site/broch.htm).
- Harwood J. and Hume B., Fire Safety of Sandwich Panels, Summary Report, Scottish Central Fire Brigades Advisory Council, Joint Committee on Fire Research, Research Report No 76, 1997.
- Östman B.A.L. and Nussbaum R.M., Correlation between Small-scale Rate of Heat Release and Full-scale Room Flashover for Surface Linings, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Fire Safety Science*, Tokyo, 823-832, 1988.
- Östman B.A.L. and Tsantaridis L.d, Correlation between Cone Calorimeter Data and Time to Flashover in the Room Fire Test, *Fire Mater.*, **18**, 205-209, 1994.
- Wickstrom U. and Goransson U., Full-scale and Bench-scale Correlations of Wall and Ceiling Linings, *Fire Mater.*, **16**, 15-22, 1992.
- Standard Test Method for Reaction to Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method), ISO 5660-1, 2002.
- Thornton W., The Relation of Oxygen to Heat of Combustion of Organic Compounds, *Philos. Mag. J. Sci.*, **33**, 196-203, 1917.
- Huggett C., Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption, *J. Fire Flammability*, **12**, 61-65, 1980.
- Babrauskas V., Speciman Heat Fluxes for Bench-scale Heat Release Rate Testing, Franks C.A. (Ed.), *Proceedings of Inter-flam 93, International Fire Conference*, London, England, 1993.
- Thureson P., *EUREFIC: Cone Calorimeter Test Results*, SP Report, Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, 24, 112, 1991.
- Rowen J.W. and Lyons J.W., The Importance of Externally Imposed Heat Flux on the Burning Behavior of Materials, *J. Cellular Plastic.*, **14**, 25-32, 1978.
- Mikkola E. and Wichman I.S., On the Thermal Ignition of Combustible Materials, *Fire Mater.*, **14**, 87-96, 1989.

18. Wickstrom U., Fire Physics and Chemistry, Bakhtiyari S. (Ed.), *Proceedings of the 2nd Conference of Fire Protection of Buildings*, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, 3-28, 20-21 February, 2007.
19. Hobbs M.L. and Lemmon G.H., Polyurethane Foam Response to Fire in Practical Geometries, *Polym. Degrad. Stab.*, **84**, 183-197, 2004.
20. Babrauskas V. and Peacock R.D., Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard, *Fire Safety J.*, **18**, 255-272, 1992.
21. Bakhtiyari S. and Taghiakbari L., Experimental Investigation on Fire Behavior of Expanded Polystyrene, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (in Persian)*, **20**, 235-245, 2007.
22. Bakhtiyari S. Taghiakbari L., and Barikani M., The Effective Parameters for Reaction-to-Fire Properties of Expanded Polystyrene Foams in Bench Scale, *Iran. Polym. J.*, Submitted, 2009.
23. Wichstrom U. and Goransson U., Prediction of Heat Release Rates of Surface Materials in Large-scale Fire Test based on Cone Calorimeter Results, *J. Test. Evaluation*, **15**, 370-376, 1987.
24. Richardson L.R. and Brooks M.E., Combustibility of Building Materials, *Fire Mater.*, **15**, 131-136, 1991.
25. Bullen M.L., A Comparison of Flashover Times in Small Scale Fires Using Test Data, *Fire Mater.*, **1**, 74-75, 1976.