

محافظة سازه‌ها در برابر حريق به وسيله برخی اندودهای مقاوم در برابر آتش

فاطمه جعفر پور
مربی پژوهشيار

سعید بختیاری
مربی پژوهشی

فهیمة فیروزیار
کارشناس

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

چکیده

در این مقاله نتایج تحقیقات در زمینه اندودهای مقاوم در برابر آتش که در آزمایشگاه‌های مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به صورت آزمایشگاهی تولید شده اند ارائه شده است. اندودهای مختلف با استفاده از نسبت‌های متفاوت از چسباننده گچ، و سبکدانه‌های لیکا، پرلیت، میکروسیلیس، پوکه معدنی و سرباره ساخته شده و مشخصات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آنها آزمایش و مورد مطالعه قرار گرفت. برای ارزیابی مقاومت نمونه‌ها در برابر آتش اساساً از روش‌های آنالیز حرارتی و بررسی رفتار آنها در کوره‌های آزمایشگاهی استفاده شد. همچنین با توجه به اهمیت حفظ خواص فیزیکی و مکانیکی مطابق حدود مشخص شده در استانداردها، خواص وزن مخصوص، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه‌ها آزمایش شده و با استانداردها مقایسه شده است. نمونه‌های ساخته شده با پرلیت خواص مناسبی از نظر حرارتی، فیزیکی و مکانیکی نشان دادند و با در نظر گرفتن جمیع جهات رفتار بهتری از سایر نمونه‌ها داشتند. در مورد لیکا بروز خواص حرارتی مطلوب با کاهش سریع خواص مکانیکی همراه بود. نقطه ضعف اصلی سرباره، وزن مخصوص بالای سرباره تولید ذوب آهن اصفهان می‌باشد و مانند بسیاری از پژوهش‌های دیگر لزوم مطالعه جهت تغییر فرآیند تولید سرباره به منظور کاهش وزن مخصوص آن را نشان می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده با پوکه معدنی و میکروسیلیس نسبت به سایر نمونه‌ها خواص مطلوبی از خود نشان ندادند.

کلمات کلیدی

مقاومت در برابر آتش، حفاظت در برابر آتش، اندودهای مقاوم در برابر آتش، گچ، لیکا، پرلیت، میکروسیلیس، پوکه معدنی، سرباره.

Fire Protection of Structural Elements With Fire Resistant Plasters

S. B. Bakhtiyari
Lecturer

F. Jafarpoor
Lecturer

F. Firoozyar
Research Assistant

Building and Housing Research Center

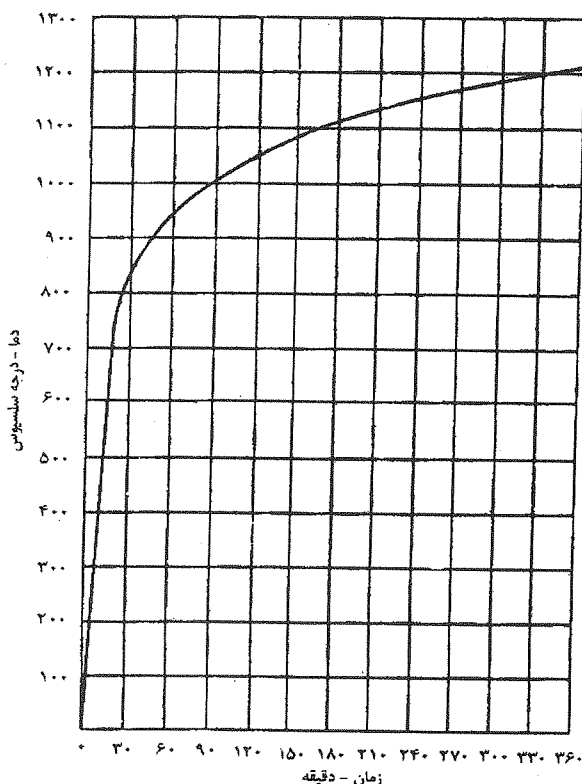
Abstracts

In this Paper the formulation and properties of Fire-resistant coatings, which were made and tested in the Building and Housing Research Center laboratories (BHRC), are reported. Different samples were produced from gypsum, perlite, LECA, blast furnace slag, pumice, and silica fume. In the absence of fire resistance test furnaces, the basic concepts related to fire resistance performance of materials have been used to plan the test setting and analyse the behaviour of formulated materials. Thermal properties of the samples were examined with the thermal analysis equipment, including DTA, TG and dilatometry methods. The effect of high temperatures on the behaviour of samples was also studied by means of laboratory furnaces. In addition, the physical and mechanical properties of samples were tested and compared with standard specifications of plasters.

Keywords

Fire-resistance, fire protection, plasters, gypsum, LECA, Perlite, Microsilica, Pumice, blast furnace slag.

دچار ترک و شکاف نشود تا از انتقال حرارت و دود به فضاهای مجاور جلوگیری گردد.
ج - نارسانایی: جزء مورد نظر باید حتی الامکان عایق باشد تا موجب انتقال سریع حرارت به فضاهای مجاور نشود.



شکل (۱) منحنی استاندارد دما - زمان برای آزمایش

مقاومت در برابر آتش [۲].

۲- پوشش های محافظت کننده در برابر آتش

طبق تعریف ASTM E176 «مواد تأخیر انداز آتش» موادی هستند که دارای نقطه اشتعال بالا بوده یا پیشروی سطحی شعله بر روی آنها اندک است، و یا اینکه این خواص را برای سایر مواد ایجاد می نمایند. ضخامت پوشش های محافظت کننده در برابر آتش، یاب به اختصار پوشش های محافظ حریق، بستگی به کاربرد مورد نظر داشته و اساساً با توجه به خواص پشت کار تعیین می گردد. لایه های نازک که معمولاً با نام «تأخیر انداز حریق» خوانده می شوند، عموماً برای کاستن از قابلیت اشتعال چوب یا کاهش پیشروی شعله بر روی آن به کار می روند، در حالیکه پوشش های ضخیم اکثراً برای تأمین مقاومت حریق سازه های فولادی استفاده می شوند. در حقیقت برای افزایش نرخ مقاومت حریق این سازه ها، سعی می شود تا در ابتدا انتقال حرارت به سازه به حداقل برسد.

یکی از نکات مهم که در طراحی و اجرای ساختمان ها باید در نظر گرفته شود، مقاومت اجزای ساختمانی در برابر آتش است. مقدار لازم برای مقاومت اجزای ساختمان در برابر آتش به کاربری و ابعاد ساختمان بستگی داشته و برای کاربری های مختلف در مقررات و دستورالعمل های ساختمانی ارائه می شوند. بدیهی است هر چه اهمیت ساختمان از نظر نوع تصرف بیشتر بوده و تعداد بهره برداران بیشتر باشد و یا وضعیت جسمی و حرکتی افراد ساکن محدودتر باشد (نظیر بیمارستانها)، به همان نسبت خطرپذیری جانی و مالی حریق در ساختمان بیشتر بوده و سطح الزامات مقاومت در برابر آتش در مقررات مربوطه افزایش نشان می دهد.

۱- مقاومت در برابر آتش

اغلب اوقات واژه مقاومت در برابر آتش به اشتباه به بالا بودن دمای اشتعال یا غیر قابل اشتعال بودن مواد تعبیر می گردد، در حالیکه این واژه در مفهوم علمی آن برای مواد به تنهایی کاربری نداشته بلکه به رفتار اجزای ساختمان در برابر آتش مربوط می شود. طبق تعریف توانایی یک عنصر ساختمانی برای ادامه وظیفه خود وقتی که در معرض حرارت و دمای بالا قرار می گیرد، مقاومت آن در برابر آتش خوانده می شود و اکثراً برحسب زمان اندازه گیری می گردد [۱].

ارزیابی مقاومت اجزای ساختمانی در برابر آتش برحسب شکل آن با استفاده از کوره های مخصوص این آزمایش انجام می گیرد. برای اجزای افقی مانند کف ها، سقف ها و همینطور تیرها از کوره افقی با ابعاد با دهانه $4(m) \times 3(m)$ ، برای اجزای قائم مانند دیوارها، تیغه ها، درها و غیره از کوره عمودی با ابعاد $3(m) \times 2(m)$ و برای ستونها از کوره ستونی به ارتفاع $3(m)$ استفاده می شود. رژیم دمایی درون کوره بر اساس استاندارد بریتانیایی BS476.Part20:1987 [۲] به صورت زیر می باشد (شکل ۱):

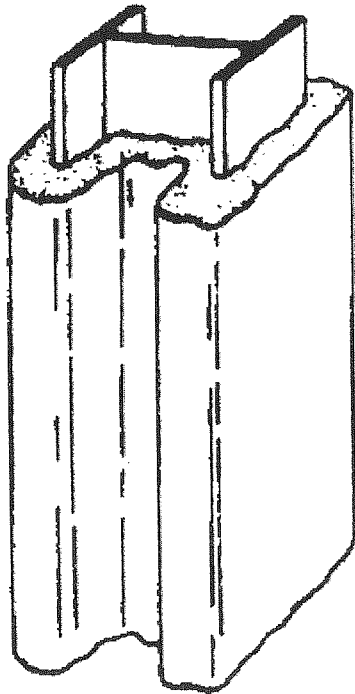
$$T = 345 \times \log(At + 1) + 20$$

که در آن T دمای کوره برحسب درجه سلسیوس و t زمان برحسب دقیقه است.

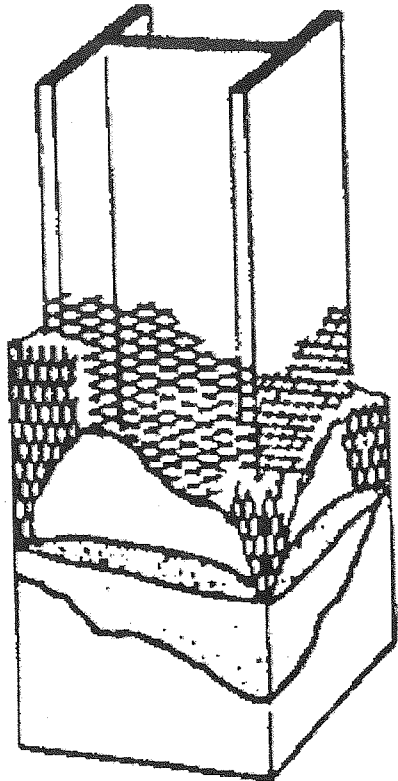
در این آزمایش در حین افزایش دما در کوره، سه مشخصه زیر در نمونه مورد ارزیابی قرار می گیرد:

- الف - پایداری: جزء مورد نظر باید پایداری خود را در برابر افزایش دما حفظ کرده، دچار گسیختگی و ریزش نشود.
- ب - یکپارچگی: این جزء باید یکپارچگی خود را حفظ نموده،

اولیه پوشش در اثر حرارت قابل انتظار است. وزن مخصوص این پوشش ها معمولاً در حدود 800 kg/m^3 می باشد.



شکل (۲- الف) مثالی از محافظت ستون ها بوسیله روش تماسی.



شکل (۲- ب) مثالی از محافظت ستون ها بوسیله روش غشایی.

استفاده وسیع از سازه های فلزی در اکثر کشورهای دنیا، باعث گسترش تولید و تنوع پوشش های محافظ حریق شده است و در کشور ما نیز نیاز به تولید این پوشش ها بیش از پیش احساس می شود. اگر چه فولاد یک مصالح غیر قابل سوختن است، اما با توجه به افت شدید مقاومت آن در دماهای بالا باید در برابر احتمال خطر حریق به وسیله پوشش های مناسب محافظت گردد. دوربندی فولاد به وسیله مصالح سنگین بنایی برای این کار باعث افزایش وزن ساختمان و بالطبع افزایش هزینه ها می گردد. ضمن اینکه آسیب پذیری ساختمان در برابر زلزله را می تواند افزایش دهد. لذا استفاده از پوشش های محافظ سبک چه از نظر اقتصادی و چه از نظر ایمنی به صرفه می باشد.

حفاظت اعضای سازه ای عمدتاً به دو طریق کلی انجام می گیرد: ۱- حفاظت تماسی یا مستقیم، ۲- حفاظت غشایی. در روش تماسی، پوشش محافظ مستقیماً بر روی اجزای سازه ای پاشیده می شود (شکل ۲- الف)، در حالیکه در حفاظت حریق غشایی یک مانع مقاوم حریق به عنوان یک لایه زیر کف یا بام قرار گرفته و یا در مورد تیرها و ستون ها به وسیله تخته های محافظ حریق دوربندی انجام می شود (شکل ۲- ب)

در کل سه نوع اصلی پوشش های محافظ حریق وجود دارد:

۱- مواد عایق، ۲- مواد جاذب انرژی، و ۳- پوشش های منبسط شونده.

بسیاری از مواد رایج در حقیقت به نوعی باسازوکار ترکیبی از انواع (۱) و (۲) مذکور در فوق عمل می نمایند و حاوی ترکیبی از هر دو گروه مواد عایق و جاذب انرژی می باشند. بیشترین مصرف مواد عایق که دارای خواص حرارتی عالی هستند مربوط به سنگدانه های منبسط شونده نظیر پرلیت و ورمیکولیت می باشد. از مواد رایج با مکانیسم جذب انرژی نیز می توان به عنوان مثال گچ را نام برد که در حین گرمایش، بخار آب آزاد می نماید. انواع اصلی معدنی مواد پاششی محافظ حریق دارای سنگدانه های منبسط شده نظیر پرلیت، ورمیکولیت و چسباننده های هیدرولیک نظیر گچ یا رس و یک عامل کفزا می باشد. وزن مخصوص خشک چنین موادی حتی می تواند تا 200 kg/m^3 کاهش یابد.

پوشش های ماستیک منبسط شونده با ضخامت حداکثر ۶ میلی متر اجرا می شوند. این مواد هنگامی که در معرض حرارت بالا قرار می گیرند، به علت وقوع یک سری واکنش های شیمیایی، گازهای خنک کننده ای آزاد نموده و با حرارت مقابله می نماید. ضمن اینکه از طرف دیگر یک لایه عایق ضخیم زغال تولید می نمایند. افزایش ضخامت بین ۵ تا ۱۰ برابر ضخامت

۳- اندوذهای سبک گچ-پرلیت و گچ-ورمیکولیت

گچ یک ماده معدنی مرکب از سولفات کلسیم و ۲۱٪ آب مولکولی با فرمول $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ است. نکات زیر باعث می شود که گچ به عنوان یک ماده نسبتاً مقاوم در برابر آتش ارزیابی گردد:

الف- وجود ۲۱٪ آب شیمیایی که تا دماهای حدود $(^{\circ}\text{C}) 230$ آزاد می شود باعث می گردد تا قسمتی از انرژی حریق صرف این واکنش شده و همزمان از انتقال حرارت به لایه های زیرین جلوگیری گردد،

ب- لایه گچ کلسینه شده علیرغم از دست رفتن ۲۱٪ از وزن آن، از نظر مکانیکی پایدار مانده و چسبندگی آن به لایه زیرین کماکان به خوبی حفظ می شود.

پ- گچ پس از دست رفتن آب شیمیایی خود با بالا رفتن دما، انقباض حرارتی نشان می دهد. اما میزان این انقباض و اثر آن تنها در دماهای خیلی بالا دیده می شود.

در عین حال اندوذهای گچی سبک شامل گچ-پرلیت و گچ-ورمیکولیت علاوه بر اینکه مقاومت های بالاتر را در برابر آتش تأمین می نمایند، از وزن مخصوص بسیار پائین تری برخوردار هستند. بنابراین استفاده از آنها در ساختمان در بسیاری از کشورها رواج قابل توجهی دارد. این اندوذهای می توان بر روی زیر کاری های مختلف استفاده نمود و سیستم مناسب برای اجرا بستگی به نوع زیرکار دارد. همچنین ضخامت کلی لایه های اندود به مقدار مقاومت لازم در برابر آتش بستگی دارد.

جزئیات اجرایی و میزان مقاومت حریق اندوذهای یا تخته های گچی سبک برای ضخامت های مختلف را می توان در کتب مختلف، آئین کارها و راهنماهای مقررات ساختمانی یافت. به عنوان مثال چند نمونه در جدول (۱) همراه با مقایسه ای با محافظت به وسیله بتن مسلح و بتن سبک مسلح آورده شده است. همانگونه که در این جدول دیده می شود پوشش های گچ-پرلیت و گچ-ورمیکولیت علاوه بر سبکی حتی حفاظت بهتری را نسبت به بتن ارائه می نمایند.

۴- تحقیقات انجام شده در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

۴-۱- سابقه

باتوجه به نیازی که در حال حاضر در کشور برای تهیه پوشش های محافظ حریق خصوصاً برای ساختمان های مهم دولتی یا ساختمان های بلند و انبوه سازی ها وجود دارد، تحقیقات در زمینه تهیه محصولات سبک گچی مقاوم در برابر آتش در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن از مدتی پیش آغاز شده و ادامه دارد.

باتوجه به مطالعات انجام شده وسوابق موجود در سایر کشورها، سبکدانه های پرلیت منبسط و لیکا که هر دو در ایران تولید می شوند در برنامه مطالعات قرار گرفتند. همچنین باتوجه به مشخصات و نحوه تولید میکروسیلیس و سرباره کوره آهنگدازی و نیز نحوه تشکیل پوکه معدنی، این مواد نیز در برنامه تحقیقاتی گنجانده شدند. از آنجایی که هنوز در کشورمان آزمایشگاه های استاندارد آتش وجود ندارد، بالاجبار از آزمایش های مقیاس کوچک، که شرح آنها در زیر خواهد آمد، برای مقایسه خواص نمونه ها در برابر آتش استفاده گردید.

۴-۲- ترکیب و عمل آوری نمونه ها

ترکیب نمونه های ساخته شده در جدول شماره (۲) ارائه گردیده است. برای عمل آوری نمونه ها از روش زیر استفاده گردید:

- ۱- خشک شدن در دمای محیط برای سه یا چهار روز،
 - ۲- متعاقباً خشک شدن در دمای $(^{\circ}\text{C}) 45$ به مدت سه روز.
- کارنی [۴] روش های مختلف عمل آوری گچ را بررسی و اثر آن را بر مقاومت نهایی نمونه ها گزارش نموده است. نتایج ارائه شده توسط وی، شرایط عمل آوری مذکور در فوق را تأیید می نماید.

۴-۳- نتایج و بحث

۴-۳-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی

در جدول شماره (۲) وزن مخصوص، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه ها نشان داده شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی لازم برای اندوذهای سبک گچی در استانداردهای ASTM:C28 [۵] و BS1191:Part2 [۶] ارائه گردیده است.

همانگونه که در جدول دیده می شود وزن مخصوص نمونه ها با افزایش سبکدانه های پرلیت، لیکا، میکروسیلیس و پوکه معدنی کاهش می یابد. بیشترین کاهش از این نظر مربوط به پرلیت بوده است و این در حالی است که به علت سبکی زیاد پرلیت منبسط (وزن مخصوص فضایی بین $0.4 - 0.3$ / 0.5)، اختلاط آن با گچ به صورت درصد حجمی انجام گرفت. در مرحله دوم لیکا در سبک کردن نمونه ها عملکرد بهتری از سایر سبکدانه ها داشته است. کلاً افزودن پرلیت، لیکا و پوکه معدنی با نسبت های بالاتر از حدود ۱:۲ باعث کاهش وزن مخصوص به پائین تر از $(\text{kg/m}^3) 1000$ شده و بررسی بیشتر آنها را از نظر دستیابی به محصولات سبک قابل تأمل می سازد. در عین حال با توجه به نحوه تولید

جدول (۱) مقایسه بین چند نمونه محافظت تیر فولادی در برابر آتش به وسیله پوشش های مختلف [۳].

حداقل ضخامت لازم (mm) برای رسیدن به مقاومت آتش مورد نظر									ساختار و مصالح
مقاومت آتش ۲۴۰ دقیقه			مقاومت آتش ۱۲۰ دقیقه			مقاومت آتش ۶۰ دقیقه			
ضریب مقطع (m^{-1})			ضریب مقطع (m^{-1})			ضریب مقطع (m^{-1})*			
<۹۰	۹۰-۱۴۰	>۱۴۰	<۹۰	۹۰-۱۴۰	>۱۴۰	<۹۰	۹۰-۱۴۰	>۱۴۰	
									حفاظت تماسی به وسیله بتن با مخلوط قویتر از ۱:۲:۴ و سنگدانه های سیلیسی یا کربناتی
۵۰	۵۰	۶۳	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	الف- غیرباربر
۷۵	۷۵	۷۵	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	ب- باربر
۶۰	۶۰	۶۰	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	حفاظت تماسی به وسیله بتن سبک تقویت شده، با مخلوط قویتر از ۱:۲:۴ و غیرباربر
۴۴	۵۰	۵۰	۲۰	۲۰	۲۵	۱۳	۱۳	۱۸	حفاظت غشایی به وسیله اندود سبک گچ - پرلیت یا گچ - ورمیکولیت با توری فلزی
نتایج در دسترس نبود	نتایج در دسترس نبود	نتایج در دسترس نبود	۳۰	۴۰	۴۲	۱۳	۱۵	۲۵	حفاظت غشایی با تخته های گچ - ورمیکولیت مسلح به الیاف با وزن مخصوص $۸۵۰-۹۵۰ (kg/m^3)$
۵۵	۵۹	۶۳	۲۸	۳۱	۳۲	۱۵	۱۶	۱۷	حفاظت تماسی پروفیلی با اندودپاشی گچ - ورمیکولیت با وزن مخصوص $۷۰۰-۷۵۰ (kg/m^3)$

* ضریب مقطع برابر با نسبت محیط آن قسمت از مقطع عضو فولادی که در معرض آتش است تقسیم بر سطح مقطع آن می باشد و دارای واحد m^{-1} است.

نمونه های مورد نظر یافت نشد. در عین حال نتایج نشان می دهد که درصد کاهش مقاومت خمشی نمونه ها تقریباً معادل یا در حدود درصد کاهش مقاومت فشاری آنها می باشد. در اینجا نیز بهترین نتایج مربوط به درصد های پائین پرلیت و سرباره است و بیشترین کاهش در نمونه های حاوی لیکا مشاهده می گردد.

۲-۳-۴- خواص حرارتی

خواص حرارتی نمونه ها شامل رفتار حرارتی تحت DTA-TG و دیلاتومتري به وسیله دستگاه آنالیز حرارتی همزمان (STA) مورد بررسی قرار گرفت. محدوده دمایی برای آزمایش DTA-TG و دیلاتومتري از دمای اتاق تا حدود $۱۰۰۰^{\circ}C$ و با شدت افزایش دمای به ترتیب ۲ و ۵ درجه سلسیوس بر دقیقه در نظر گرفته شد. در مورد رابطه خواص حرارتی مواد

سرباره در ذوب آهن اصفهان، این محصول از وزن مخصوص نسبتاً بالایی برخوردار بوده و در مقایسه با سایر نمونه ها سنگین تر است.

افزودن مواد فوق به گچ در تمام موارد باعث کاهش مقاومت های مکانیکی شده است و با افزایش سنگدانه ها این کاهش بیشتر نیز می شود. بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به دانه های لیکا است. استاندارد BS برای اندود های گچی سبک حداقل مقاومت فشاری لازم را $۱/۰۰ (MPa)$ ذکر نموده است که از این نظر نمونه شماره ۷، مربوط به گچ: لیکا با نسبت ۱:۳ مردود خواهد بود. استاندارد ASTM حداقل مقاومت فشاری اندود های گچ / پرلیت برای مصارف مختلف را بین $۲/۸$ تا $۴/۱$ مگاپاسگال ذکر نموده است که کلیه نمونه های ساخته شده بالاتر از آن می باشند. در مورد مقاومت خمشی، ویژگی استاندارد برای

جدول شماره (۲) ترکیب نمونه های ساخته شده و خواص فیزیکی و مکانیکی آنها.

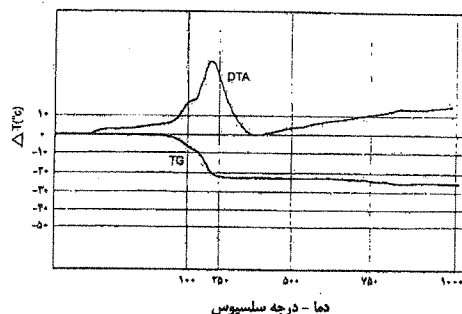
شماره نمونه	درصد وزنی یا (درصد حجمی مواد) *							مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت خمشی (MPa)
	گچ	پرلیت	لیکا	سرباره	دوده سیلیسی	پوکه معدنی	چگالی (kg/M ³)		
۱	۱۰۰	-	-	-	-	-	۱۴۱۰	۱۵/۶	۶/۳
۲	(۵۰)	(۵۰)	-	-	-	-	۱۰۶۰	۱۲/۱	۴/۲
۳	(۳۳/۳)	(۶۶/۷)	-	-	-	-	۸۱۰	۶/۱	۲/۵
۴	(۲۵)	(۷۵)	-	-	-	-	۷۰۰	۳/۲	۱/۴
۵	۵۰	-	۵۰	-	-	-	۱۰۶۰	۵	۱/۴
۶	۲۲/۳	-	۶۶/۷	-	-	-	۹۸۰	۲/۳	۱
۷	۲۵	-	۷۵	-	-	-	۸۴۰	۰/۱۸۷	۰/۵
۸	۵۰	-	-	۵۰	-	-	-	۱۲/۱	۵/۴
۹	۳۳/۳	-	-	۶۶/۷	-	-	۱۵۲۰	۴/۲	۲/۱
۱۰	۲۵	-	-	۷۵	-	-	-	۱/۸	۱/۲
۱۱	۵۰	-	-	-	(۵۰)	-	۱۲۸۰	۸/۵	۳/۴
۱۲	۳۳/۳	-	-	-	(۶۶/۷)	-	۱۱۸۰	۳/۸	۲/۸
۱۳	۲۵	-	-	-	(۷۵)	-	۱۱۴۰	۲/۳	۰/۵
۱۴	۵۰	-	-	-	-	۵۰	۱۱۲۰	۸/۹	۲/۸
۱۵	۳۳/۳	-	-	-	-	۶۶/۷	۹۷۸	۲/۹	۱/۷
۱۶	۲۵	-	-	-	-	۷۵	۸۰۵	۱/۷	۰/۸

* اعداد داخل پرانتز درصد حجمی می باشد.

و عملکرد آنها در برابر حریق در مراجع شماره های ۷ و ۸ توضیح داده شده است.

الف - منحنی های DTA-TG

منحنی DTA-TG گچ ساختمانی (دارای نیم مولکول آب) در شکل ۳ نشان داده شده است. رفتار حرارتی گچ یک رفتار شناخته شده است. سولفات کلسیم در سه حالت هیدراته وجود دارد: گچ که دارای دو مولکول آب است، گچ ساختمانی یا همی هیدرات با ۰/۵ مولکول آب و انیدرید که فاقد آب تبلور است. از دست رفتن آب تبلور گچ در دو مرحله گرماگیر رخ می دهد، لذا در منحنی مربوطه دو قله گرماگیر در دماهای حدود (۱۷۰ °C) و (۲۲۵ °C) مشاهده می شود. در این دماها تغییر حالت گچ به ترتیب به $\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ و CaSO_4 رخ می دهد. تجزیه سولفات کلسیم به CaO ، SO_2 و O_2 در دماهای بالاتر (از ۹۰۰ °C به بالا) رخ می دهد.



شکل (۳) رفتار گچ ساختمانی (با نیم مولکول آب هیدراته)

تحت آزمایش DTA-TG.

در مورد پرلیت منسب و لیکا با توجه به اینکه هر دو در دماهای بالا تولید شده اند واکنش خاصی انتظار نمی رود و در عمل نیز هیچ گونه افت و خیزی در منحنی انرژی یا جرمی آنها مشاهده نمی شود. منحنی مربوط به پرلیت در شکل (۴) نشان داده شده است. در منحنی مربوط به سرباره یک قله گرماگیر در دماهای حدود (۸۵۰ °C) مشاهده شد بدون اینکه هیچگونه تغییر قابل توجهی در وزن نمونه رخ داده باشد. این موضوع نشان می دهد که در این حدود دمایی، تغییری در ساختار بلوری اجزای تشکیل دهنده سرباره باید پدید آمده باشد. منحنی مربوط به SF در کل، رفتار نسبتاً مشابهی با لیکا و پرلیت دارد اما یک پیک کوتاه و با دامنه نسبتاً وسیع مشاهده گردید که افت اصلی آن در دمای حدود (۵۰۰ °C) است. ضمناً شروع یک افت وزنی نیز از نزدیکی همین دما مشاهده می شود که نهایتاً به ۵٪ وزن اولیه می رسد. این تغییر وزن می تواند به دلیل تجزیه کانی های کربناتی موجود در آن باشد. تجزیه شیمیایی SF این موضوع را تأیید می نماید. منحنی DTA-TG پوکه معدنی مشابه با SF دارای یک ΔT منفی در دامنه وسیعی از دما بود و افت وزنی که از آن بتوان به عنوان یک پیک یاد کرد مشاهده نشد. اما همراه با همین افت ملایم و ناچیز در منحنی DTA، یک افت حدوداً ۷ درصدی در منحنی جرمی مشاهده می گردد که به دلیل تجزیه کانی های کربناتی و احتمالاً از دست رفتن آب شیمیایی برخی کانی های سازنده است.

مطالعه بر روی ترکیبات دو جزئی ساخته شده از گچ / پرلیت و گچ / لیکا نشان می دهد که هیچ گونه پیک جدیدی در

این دو منحنی مشاهده نمی شود و هر یک از سازنده ها اثرات خود به صورت منفرد را به ترکیب نیز منتقل می نماید. به عبارت دیگر همانگونه که انتظار می رفت هیچگونه اندرکنش خاص شیمیایی یا تغییر ساختار بلوری در ترکیب مشاهده نمی شود. در ترکیبات بعدی نیز کم و بیش اثرات مشابهی دیده می شود. منحنی DTA-TG مربوط به ترکیب گچ / پرلیت با نسبت ۱:۲ در شکل (۵) نمایش داده شده است.

از نظر مقایسه رفتار TG نمونه ها باید گفت که بیشترین افت وزنی مربوط به گچ با ۲۱٪ کاهش وزن می باشد (قبل از تجزیه شیمیایی سولفات کلسیم). بیشترین افت وزنی در بین سایر نمونه ها مربوط به گچ / پرلیت و کمترین مربوط به نمونه های گچ / سرباره بوده است که می تواند به علت تخلخل موجود در پرلیت باشد.

ب - نتایج آزمایش های دیلاتومتری

تغییر طول نمونه های مورد نظر که به وسیله آزمایش دیلاتومتری اندازه گیری شده است در جدول شماره (۳) نمایش داده شده است. همانگونه که از جدول مشاهده می شود گچ در ابتدا با افزایش دما تا دماهای حدود $(^{\circ}\text{C}) 100$ تا حدودی منبسط شده و افزایش طول نشان می دهد. سپس در بین دمای 100 تا 200 درجه سلسیوس این روند معکوس می شود که به علت تغییرات ساختاری گچ و از دست رفتن آب مولکولی آن است. همانطور که از جدول (۳) مشاهده می گردد این تغییر طول به طور پیوسته در دماهای بالاتر نیز دامه داشته و خصوصاً در دماهای حدود $(^{\circ}\text{C}) 800$ افزایش می یابد. این موضوع اساساً به دو علت می تواند باشد: (۱) ماهیت آزمایش دیلاتومتری دینامیک است که امکان ایجاد

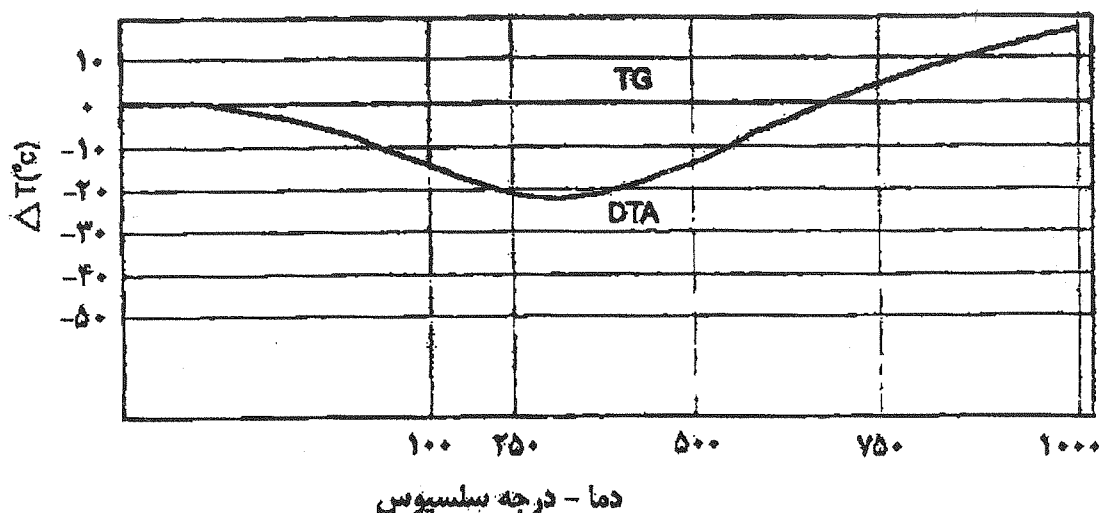
شرایط پایدار را غیر ممکن ساخته و برخی از تغییرات را احتمالاً به دماهای بالاتر منتقل می نماید، و (۲) احتمالاً تجزیه CaSO_4 (یا برخی ناخالصی های کربناتی) در دماهای بالا و نزدیک به $(^{\circ}\text{C}) 900$ رخ داده و انقباض بیشتر را باعث می گردد.

در تمام نمونه ها با افزایش نسبت سنگدانه سبک، از نظر میزان تغییرات طولی، وضعیت مطلوبتری نسبت به گچ تنها مشاهده می شود. این موضوع به این علت است که مواد فوق نسبت به گچ تغییر طول کمتری دارند و کاهش درصد گچ در نمونه باعث کاهش اثر آن در تغییر طول نمونه می شود.

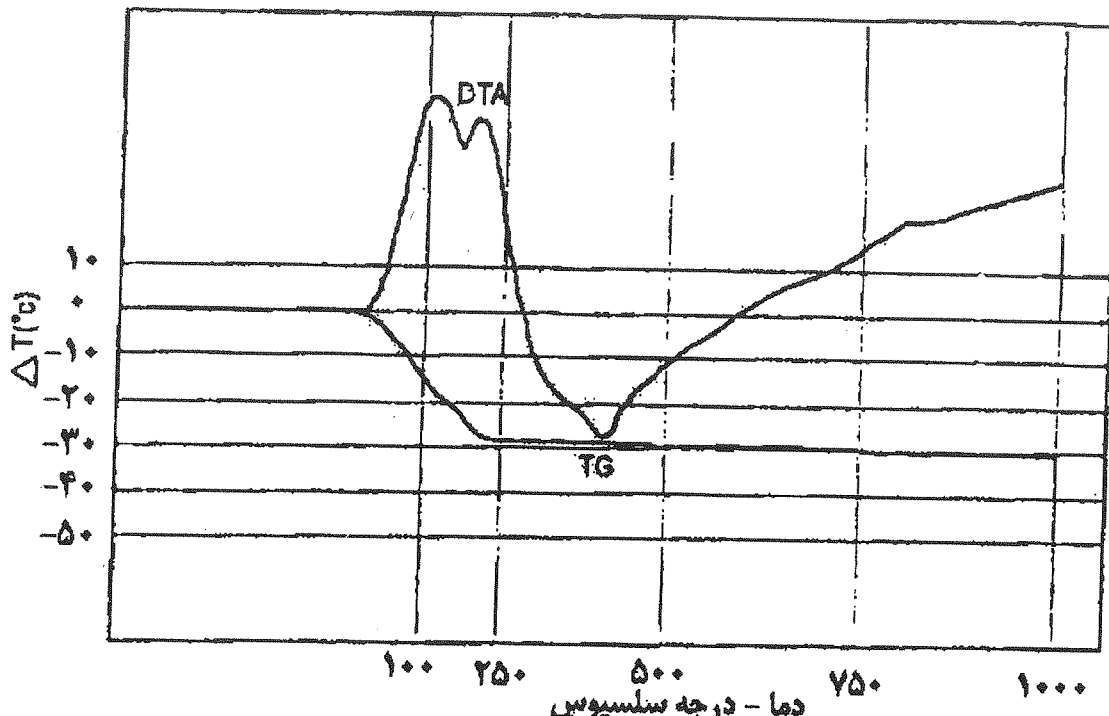
با بررسی رفتار نمونه های حاوی پرلیت و لیکا مشاهده می شود که رفتار نمونه های با نسبت ۱:۲ و ۱:۳ از این سنگدانه ها (هر کدام به طور مجزا) به یکدیگر نزدیک بوده و بهبود قابل توجهی نسبت به نمونه های ۱:۱ نشان می دهد. توجه به این موضوع در متعادل و بهینه ساختن رفتارهای فیزیکی - مکانیکی و حرارتی کمک می نماید. ضمناً انتظار می رود که از نمونه هایی که دارای تغییر طولی نسبی کمتری هستند پایداری بهتری در برابر حرارت مشاهده گردد.

۳-۳-۴. پایداری در دمای بالا

این آزمایش با هدف مقایسه پایداری نمونه ها در دمای بالا صورت گرفت. به این منظور نمونه ها در ابعادی برابر با ابعاد دهانه یک کوره آزمایشگاهی $(20\text{ cm}) \times (20\text{ cm})$ و در دو ضخامت ۷ و ۱۵ میلی متر ساخته شده و در محل دهانه کوره قرار داده شدند. سپس دمای کوره از دمای محیط تا دمای حدود $(^{\circ}\text{C}) 1050$ افزایش داده شد و پایداری نمونه ها



شکل (۴) رفتار پرلیت منبسط تحت آزمایش DTA-TG.



شکل (۵) رفتار ترکیب گچ / پرلیت با نسبت ۲:۱ تحت آنالیز حرارتی DTA-TG.

جدول (۳) تغییر طول نسبی نمونه ها در دماهای مختلف (mm/m.ΔT)

دما (درجه سانتی گراد)											شماره
۱۰۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	نمونه
*	*	-۵۵/۲	-۳۸/۱	-۲۸/۸	-۲۵/۷	-۱۹/۹	-۱/۸	-۰/۲	۱/۲	-۱/۳	۱
*	-۴۶	-۲۹/۳	-۲۳/۱	-۱۶/۹	-۱۴/۴	-۱۱/۶	-۱/۵	-۰/۶	۰/۷	-۱/۳	۲
*	-۳۳/۳۱	-۲۰/۱	-۱۵/۳	-۱۱/۳	-۹/۴	-۶/۸	-۰/۳	۰/۸	۱/۳	-۱/۳	۳
*		-۲۰/۳	-۱۴/۶	-۱۰/۶	-۸/۶	-۶/۴	-۰/۲	۰/۸	۱/۲	-۱/۳	۴
*	*	-۴۱/۸	-۳۲/۷	-۲۲/۵	-۱۸/۱	-۱۶/۳	-۳/۳	-۰/۱	۱/۵	-۱/۸	۵
-۳۵/۵	-۳۴/۵	-۱۳/۱	-۷/۲	-۴/۱	-۲/۸	-۳/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۷	-۱/۳	۶
-۶۹/۴	-۴۰/۵	-۱۶	-۹/۴	-۶/۱	-۵/۵	-۵/۳	-۱/۱	-۱/۲	۰/۷	-۱/۳	۷
*	-۳۰/۹	-۲۳/۳	-۱۴/۷	-۹/۷	-۸/۳	-۵/۳	۰/۰۱	۰/۳	۱/۳	-۱/۳	۸
*	-۶۹/۹	-۵۰/۳	-۱۵/۹	-۹/۳	-۶/۸	-۶/۰	۱/۱	۱/۳	۰/۷	-۱/۳	۹
*	*	-۴۸	-۱۵/۳	-۵/۳	-۳/۱	-۲/۹	۰/۱	-۰/۱	۱/۴	-۱/۳	۱۰
*	*	-۲۷/۱	-۱۹/۴	-۱۸	-۱۶/۵	-۸/۶	-۱/۶	-۰/۲	۱/۹	۱	۱۱
*	-۴۰/۲	-۱۸/۷	-۱۵/۹	-۱۵/۵	-۱۵/۸	-۸		۰/۷	۰/۶	-۱/۳	۱۲
*	-۳۵	-۱۶/۳	-۱۳	-۱۲/۸	-۱۲/۸	-۴/۱	-۲/۶	-۰/۱	۰/۶	-۱/۳	۱۳
*	-۴۴/۶	-۳۶/۶	-۳۲/۴	-۲۳/۱	-۲۰	-۱۴/۵	-۲/۴	۰/۱	۱/۱	-۱/۶	۱۴
*	-۷۵/۶	-۵۳/۸	-۲۷/۹	-۲۱/۶	-۱۸/۳	-۱۴/۷	-۲/۵	۰/۲	۰/۷	-۱/۳	۱۵
*	-۵۰/۲	-۲۶/۵	-۲۴	-۲۰/۷	-۱۸/۲	-۱۴/۸	-۵/۴	-۰/۸	۰/۷	-۱/۳	۱۶

* انقباض نمونه بیش از حداکثر حد قابل اندازه گیری دستگاه بوده است.

در این محدوده دمایی بررسی گردید. باید توجه نمود که به خاطر سرعت افزایش دمای کوره، دمای نمونه‌ها نسبت به آن عقب‌تر خواهد بود که این موضوع را در بررسی نتایج باید در نظر داشت. برای برطرف کردن نسبی این نقص، دمای کوره در دو دمای ۷۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۵ دقیقه ثابت نگاه داشته شد. در بررسی نمونه‌ها دمای ایجاد اولین ترک‌ها و نحوهٔ ازدیاد و گسترش آنها در دماهای بالاتر مدنظر قرار گرفت.

به طور مشخص نمونه‌های حاوی لیکا و پرلیت رفتار بسیار بهتری از گچ نشان دادند. همانطور که از آزمایش دیلاتومتری هم پیش بینی شده بود نمونه‌های با نسبت ۱:۲ و ۱:۳ رفتار بسیار بهتری از نمونه‌های ۱:۱ داشتند. در نمونه گچ/پرلیت با نسبت ۱:۲ اولین ترک در دمای (°C) ۷۰۰ و برای نسبت ۱:۳ اولین ترک در دمای حدود (°C) ۹۶۰ مشاهده شد. نمونه‌های حاوی لیکا از این نظر تا حدودی رفتار بهتری نشان دادند و در نمونه با ضخامت (mm) ۱۵ و با نسبت ۱:۳ تا پایان آزمایش ترکی مشاهده نگردید. نمونه‌های حاوی سرباره نیز از این نظر رفتار بسیار خوبی نشان ندادند به طوری که در ضخامت ۷ میلی‌متر تنها نمونه‌ای که تا پایان آزمایش سالم و بدون ترک باقی ماند نمونه حاوی سرباره با نسبت ۱:۳ بود. نمونه‌های مربوط به میکروسلیس و پوکه معدنی رفتار چندان مناسبی نشان ندادند و حتی گاهی اوقات از خود گچ تنها نیز ضعیف‌تر عمل نمودند.

نکته قابل توجه اینکه صرفاً از نظر یک مقایسه شهودی اندود ماسه سیمان با نسبت یک وزن سیمان به سه وزن ماسه نیز در این آزمایش بررسی شد که نتایج ضعیف‌تری نسبت به کلیه نمونه‌ها از خود نشان داد، به طوری که در ضخامت (mm) ۷ در دمای (°C) ۱۹۰ ترک‌ها در سطح نمونه شروع به گسترش نمود. در ضخامت (mm) ۱۵ نیز در دمای (°C) ۶۵۰ (یعنی حدوداً (°C) ۸۰ قبل از نمونه گچ) ترک‌ها پدیدار و شروع به گسترش کرد.

۵- نتیجه گیری

الف - دلایل مقاومت نسبتاً خوب گچ در برابر آتش نسبت به سایر چسباننده‌های متداول (از جمله سیمان) توسط آزمایش‌های DTA-TG و دیلاتومتری نشان داده شد. وجود ۲۱٪ وزنی آب شیمیایی و پایداری گچ علیرغم از دست دادن آب شیمیایی و انقباض حرارتی قابل قبول آن تا دماهای بالا از دلایل مهم این موضوع می‌باشد. ب - افزودن پرلیت منبسط به گچ بخصوص در نسبت‌های حدود ۱:۲ تا ۱:۳ باعث دستیابی به خواص مطلوبی از نظر سبکی و مقاومت در برابر آتش می‌گردد. افزودن

۷۵٪ حجمی پرلیت به گچ باعث کاهش وزن محصول به میزان ۵۰٪ می‌شود که از نظر مصارف ساختمانی بسیار مطلوب است. در عین حال مقاومت‌های مکانیکی محصول طبق استانداردهای خارجی موجود در این زمینه قابل قبول است. از طرف دیگر مقاومت محصول در برابر آتش به مراتب بهتر از گچ می‌باشد و برای محافظت سازه می‌توان از ضخامت‌های کمتری استفاده نمود. از دلایل مهم این موضوع کاهش تغییرات طولی محصول نسبت به افزایش دما می‌باشد. همچنین پرلیت باعث کاهش هدایت حرارتی و در نتیجه کند شدن انتقال حرارت به پشت کار می‌گردد.

پ - افزودن لیکا نیز مانند پرلیت باعث بهبود رفتار حرارتی اندود و افزایش مقاومت آن در برابر آتش می‌گردد. در عین حال افت مقاومت‌های مکانیکی اندود با افزایش لیکا بیشتر و سریعتر از پرلیت است و در نسبت‌های بالاتر از ۱:۲ که خواص مطلوب حرارتی آغاز می‌گردد، افت خواص مکانیکی بیشتر از حد قابل قبول است. این موضوع استفاده از اندود سبک گچ/لیکا را نسبت به گچ/پرلیت دچار تردید می‌نماید. ضریب هدایت حرارتی این اندود در دمای بالا نیز نسبت به گچ/پرلیت بیشتر است. البته شرایط پایداری آزمایش ضریب هدایت حرارتی با شرایط متغیر حریق متفاوت بوده و عواملی نظیر اثر C_p نیز نیاز به بررسی دارد.

ت - نمونه‌های حاوی سرباره از نظر حرارتی و مکانیکی خواص تقریباً مطلوبی از خود نشان دادند. اما نقطه ضعف اصلی سرباره تولیدی در ایران وزن مخصوص نسبتاً بالای آن است که آن را برای تولید اندود سبک مردود می‌نماید. مانند بسیاری از پژوهش‌های دیگر که در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن روی مصارف سرباره در سیمان و بتن انجام شده است، مشاهده می‌شود که مطالعه بر روی تغییر فرایند جهت تولید سرباره سبک در ذوب آهن اصفهان، با ارزش است.

ث - نمونه‌های حاوی میکروسلیس و پوکه معدنی نسبت به سایر نمونه‌ها خواص قابل توجهی نشان ندادند و در هر دو دسته خواص مکانیکی و حرارتی ضعف‌هایی مشاهده شد.

ج - با توجه به موارد فوق تولید اندود گچ/پرلیت از جوانب مختلف مناسب می‌نماید. در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به منظور رسیدن به دانش فنی تولید و اجرای این محصول از جمله ترکیب درصد مناسب مواد، بهبود خواص مختلف به وسیله افزودنی‌ها و دستیابی به استانداردها و آئین کارهای مورد نیاز، ادامه دارد.

مراجع

- plasters”, British Standard Inst., 1973.
- [6] ASTM C 28-86, “ Standard Specification for gypsum plasters”, ASTM Annual Book, Vol.04-01, 1998.
- [7] بختیاری، سعید؛ جعفرپور، فاطمه؛ فیروزیار، فهیمه. «اندوهای مقاوم در برابر آتش بر پایه گچ». مجموعه مقالات اولین کنفرانس علمی- تخصصی انجمن مهندسان راه و ساختمان ایران، مهر ۱۳۷۸، ص ۶۱۹-۶۳۱.
- [8] Harmathy, T.S., “Properties of building materials : Bases for fire safety design”, in: P.D. Anchor M.L. Malhotra, and J.A. Purkiss (editors), Design of structures against fire, Elsevier Appl. Sci. Pub, London, 1986.
- [۱] استولارد، پاول؛ آبرامز، جان. «اصول ایمنی حریق در ساختمان‌ها». ترجمه عبدالصمد زرین قلم و سعید بختیاری، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۶، ص ۱۲۰.
- [2] BS 476. Part 20: 1987. “Test methods and criteria for the fire resistance of elements of building construction”. British Standard Institution, 1987.
- [3] LPC, Code of practice for the Construction of Buildings, 1992.
- [4] Karni, J. and Karni, E, Gypsum in Construction: Origin and Properties, Journal of Materials and Structures, 1995, 28, 92-100.
- [5] BS 1191-2, “Specification for gypsum building