

بررسی ایمنی مصالح ساختمانی در برابر آتش به کمک مدل‌سازی گسترش شعله

فرزانه کاظمی قلعه جوق^۱، آرش نجفی^۲، علی نعمت اله زاده^۳

گروه مهندسی شیمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی

(*arash_najafi@hotmail.com)

چکیده

گسترش شعله‌ی رو به بالا یکی از خطرناک‌ترین انواع گسترش شعله است که سرعت و نحوه گسترش آن به جنس ماده و شرایط محیطی بستگی دارد و عدم کنترل شعله‌ی در حال گسترش، ممکن است منجر به انفجار گردد. در این مقاله به کمک داده‌های تجربی احتراقی مواد در مقیاس آزمایشگاهی برای تخمین رشد آتش سوزی‌ها در مقیاس واقعی استفاده می‌شود. به کمک مدل‌سازی حرارتی و با به دست آوردن معادلات ریاضی سرعت گسترش شعله، طول پیرولیز، طول شعله و گرمای حاصل از احتراق، همچنین با مطالعه توزیع سرعت و نحوه گسترش شعله در چند نمونه از مصالح ساختمانی، ایمنی آن‌ها در برابر آتش سوزی بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: گسترش شعله‌ی رو به بالا-مدل‌سازی گسترش شعله-ایمنی مصالح ساختمانی-مقاومت احتراقی

۱- مقدمه

گسترش شعله‌ی رو به بالا سریعترین و خطرناک‌ترین نوع گسترش شعله بر روی دیواره‌ی عمودی است و در نتیجه از توجه زیادی در زمینه‌ی ایمنی آتش برخوردار است. اکثر آتش‌های ساختمانی، سوختن دیواره‌های عمودی متشکل از مواد قابل احتراق نظیر صفحات چوبی، ورقه‌های پلاستیکی تزئینی و یا مواد کامپوزیتی را در بر دارد. تحقیقات نشان می‌دهند در صورتی که شعله توسط منبع تابشی خارجی تقویت شود، حتی مواد مطمئنی مانند چوب که گسترش شعله‌ی رو به بالا را در غیاب فلاکس تابشی خارجی تقویت نمی‌کنند نیز دیگر مطمئن نبوده و گسترش شعله‌ی قابل تاملی خواهند داشت. همچنین موادی که به صورت معمول گسترش شعله‌ی رو به بالا نشان می‌دهند، افزایش قابل توجهی در گسترش شعله و رشد آتش در حضور تابش خارجی خواهند داشت [۱].

شناخت کافی گسترش شعله روی مواد دیواره مانند پوشش‌های رنگی، برای توسعه‌ی طراحی مهم است. گسترش شعله در شناخت سایر پارامترهای ارزیابی آتش نظیر شدت آزادسازی حرارت اتاق، زمان انفجار در فضا و زمان ایمنی خروج ساکنین نقش مهمی را ایفا می‌کند [۲].

شدت گسترش آتش، به اینکه شعله با چه سرعتی بتواند از نقطه‌ی اشتعال تا گرم کردن ناحیه‌ی در حال افزایش ماده‌ی قابل اشتعال پیش برود، بستگی خواهد داشت. بنابراین گسترش شعله بر روی سطوح جامد قابل اشتعال موضوع جالب توجه و مهمی در ایمنی آتش است، به این علت که بر توسعه‌ی اولیه‌ی آتش و شدت رهائش حرارت تأثیر می‌گذارد [۳، ۴].

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۲ - نویسنده‌ی مخاطب، استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۳ - استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

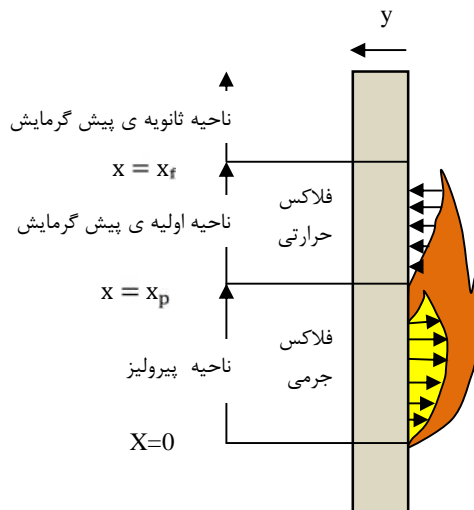
در گسترش شعله‌ی رو به بالا، شعله در طول فرایند پیرولیز و گرمایش، المان جامد را پوشش می‌دهد و سوخت پیرولیز شده به سرعت توسط شعله مشتعل می‌شود، بنابراین، دو پارامتر بسیار مهم که محرک نرخ گسترش هستند، طول شعله و انتقال حرارت به سطح نسوخته است. مکانیزم محرک برای گسترش رو به بالا به عنوان انتقال حرارت درون ناحیه‌ای که پیش‌گرمایش شده، تفاضل طول شعله و طول پیرولیز را مقیاس طول مشخصه مشابه پیشنهاد می‌کند [۵،۳].

برای بالا بردن ایمنی در مقابل پدیده‌ی آتش سوزی، علاوه بر نحوه‌ی گسترش شعله روی مواد دیواره، بررسی احتمال وقوع انفجار (Flash over) نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. انفجار پدیده مهمی در آتش سوزی ساختمان هاست که احتمال وقوع آن در برخی از آتش سوزی‌های ساختمانی وجود دارد. در صورتی که تابش حرارتی از شعله‌های آتش، گازهای داغ و دیواره‌های داغ ساختمان و تولید محصولات قابل اشتعال طی پیرولیز سطوح قابل احتراق داخل ساختمان، منجر به گذراناگهانی آتش در حال رشد به آتش کاملاً توسعه یافته شود، پدیده‌ی انفجار رخ داده است، و در طی آن یک آتش نسبتاً کوچک و محدود بطور ناگهانی افزایش سریع در نرخ رشد و شدت تجربه می‌کند و آتش سریعاً در سراسر فضا گسترش می‌یابد. در یکساختمان، انفجار بصورت یک افزایش شدید هم در نرخ آتش و هم در دمای لایه گاز داغ دیده می‌شود [۷،۶].

در این تحقیق با هدف معرفی جنس ایمن تر در بین موادی که به عنوان مصالح ساختمانی به کار می‌روند، با مدلسازی ریاضی روابط تحلیلی گسترش شعله‌ی رو به بالا، مقاومت احتراقی آنها به دست آمدند و منحنی‌های مختلف برای مواد متفاوت تحت شرایط یکسان رسم شدند. در نهایت، با بررسی سرعت گسترش شعله و گرمای حاصل از احتراق مواد با توجه به مقاومت احتراقی به ترتیب ایمنی‌دسته بندی شدند.

۲- مدلسازی ریاضی

با توجه به اینکه گرمای حاصل از احتراق توسط هدایت به لایه‌های زیرین سوخت نفوذ می‌کند، لذا از معادله‌ی عمومی هدایت حرارتی در جهت عمق ماده برای سیستمی مشابه شکل ۱ داریم :



شکل ۱- گسترش شعله‌ی رو به بالا

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن $T(K \text{ or } ^\circ C)$ دما، $\Gamma (m^2/s)$ پخشندگی گرمایی، $y(m)$ عمق ماده‌ی در حال احتراق و $t(s)$ زمان است.

با اعمال شرط اولیه ی $T(y,0) = T_0$ و شرط مرزی $q''(0,t) = -k \frac{dT}{dy}$ و با فرض ضخیم بودن ماده از لحاظ حرارتی

$T(\infty,t) = T_0$ و با صرف نظر کردن از اتلافات حرارتی سطح به طور کامل:

$$T(0,t) - T_0 = 2q''_e \sqrt{\frac{t}{fk...c}} \quad (2)$$

حرارتی جامد، (SI) ... چگالی ماده و $C(SI)$ ظرفیت حرارتی ویژه هستند.

با در نظر گرفتن $T(0,t) = T_{ig}$ در معادله ی (۲)، معادله ی زمان اشتعال برای سطح [۱۲،۸] به دست خواهد آمد:

$$t_{ig} = \frac{fk...c(T_{ig} - T_0)^2}{4q''_e} \quad (3)$$

طول ناحیه ی پیرولیز $x_p(m)$ است و از رابطه ی زیر [۱۱،۱۰،۹،۸] به دست می آید:

$$x_p(t) = K \dot{Q}_b + \int_0^t v_p(t_p) dt_p \quad (4)$$

فوق، بستگی به موقعیت آتش دارد که می تواند زیر سقف یا در یک گوشه یا بر روی دیوار باشد. مشعل یک تولید کننده ی حرارت یا یک منبع حرارتی خارجی است که مقدار حرارت تولید شده توسط آن برای تولید شعله ثابت فرض شده و با $\dot{Q}_b(kw)$ نشان داده می شود.

طول شعله $x_f(m)$ است و از رابطه ی زیر [۸] به دست می آید:

$$x_f(t) = K \dot{Q}_{tot}(t) = K(\dot{Q}_b + \dot{Q}_c(t)) = K(\dot{Q}_b + x_p(t)w \dot{Q}''(t)) \quad (5)$$

که در آن $\dot{Q}_{tot}(kw)$ حرارت کلی حاصل از احتراق، $\dot{Q}''(kw m^{-2})$ حرارت آزاد شده در واحد سطح توسط ماده در حال احتراق و $w(m)$ عرض قسمت جلوی شعله است که همان عرض مشعل فرض شده است. $\dot{Q}_c(kw)$ در رابطه ی فوق حرارت آزاد شده توسط ماده ی در حال احتراق است و از رابطه ی زیر [۸] به دست می آید:

$$\dot{Q}_c(t) = K \dot{Q}_b \dot{Q}'' e^{-\lambda t} + \int_0^t \dot{Q}'' e^{-\lambda(t-t_p)} v(t_p) dt_p \quad (6)$$

باجاگذاری روابط (۴) و (۵) در رابطه ی $v = (x_f - x_p)/t$ و با استفاده از رابطه ی [۱۲،۱۰،۸] $\dot{Q}''(t) = \dot{Q}''_{max} \cdot e^{-\lambda t}$ که در آن $\dot{Q}''_{max}(SI)$ حداکثر حرارت آزاد شده به ازای واحد سطح سوخت و آضریب خاموشی ماده است که هر دو با کالریمتر مخروطی اندازه گیری می شوند؛ و با استفاده از تبدیلات لاپلاس، می توان مقدار $v(m/s)$ را به دست آورد.

برای حالتی که $\lambda > (1 + \sqrt{a})^2$ و $\lambda < (1 - \sqrt{a})^2$:

$$v(t) = \frac{c_1}{s_2 - s_1} \cdot (s_2 e^{s_2 t} - s_1 e^{s_1 t}) \quad (7)$$

که در آن:

$$a = K \dot{Q}''_{\max}$$

$$\ddagger = 113 \left(\frac{\dots}{q''_{fs}{}^2} \right)$$

$$\Delta = \frac{1}{\ddagger^2} (1 - a + \ddagger)^2 - 4 \frac{\}}{\ddagger}$$

$$c_1 = K \dot{Q}''_{\max} \frac{x_{p0}}{\ddagger}$$

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2\ddagger} (\ddagger - a + 1) \pm \frac{\sqrt{\Delta}}{2}$$

و برای حالتی که $(1 - \sqrt{a})^2 < \ddagger < (1 + \sqrt{a})^2$:

$$r = -\frac{1}{2\ddagger} (1 - a + \ddagger) \quad \text{در آن} \quad v(t) = \frac{c_1 e^{rt}}{s} (r \sin(st) + s \cos(st)) \quad (8)$$

$$\begin{cases} s = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta} & \text{if } \Delta > 0 \\ s = \frac{1}{2} \sqrt{-\Delta} & \text{if } \Delta < 0 \end{cases}$$

با جایگذاری روابط (۷) و (۸) در رابطه ی (۶) حرارت آزاد شده توسط ماده ی در حال احتراق به دست می آید.

برای حالتی که $\ddagger < (1 - \sqrt{a})^2$ و $\ddagger > (1 + \sqrt{a})^2$:

$$\dot{Q}_c(t) = x_{p0} \dot{Q}'' e^{-\lambda t} w + \frac{c_1}{s_2 - s_1} w \dot{Q}'' \left[\frac{s_2 (e^{s_2 t} - e^{-\lambda t})}{s_2 + \}} - \frac{s_1 (e^{s_1 t} - e^{-\lambda t})}{s_1 + \}} \right] \quad (9)$$

و برای حالتی که $(1 - \sqrt{a})^2 < \ddagger < (1 + \sqrt{a})^2$:

$$\dot{Q}_c(t) = x_{p0} \dot{Q}'' e^{-\lambda t} w + c_1 c_2 w \dot{Q}'' \left[e^{rt} (\cos(st) + \frac{c_3}{s} \sin(st)) - e^{-\lambda t} \right] \quad (10)$$

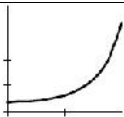



$$c_2 = \frac{\}}{(r + \})^2 + s^2}, \quad c_3 = \frac{r^2 + r\} + s^2}{\}}$$

طول پیرولیز از جایگذاری روابط (۷) و (۸) در رابطه ی (۴) و طول شعله از جایگذاری روابط (۹) و (۱۰) در رابطه ی (۵) به دست می آیند.

نحوه ی گسترش شعله بر روی مواد مختلف، به ویژگی های ماده نظیر چگالی و ضریب خاموشی (decay) آن ماده بستگی دارد که این ویژگی ها بر مقدار \ddagger ماده موثر هستند، با داشتن \ddagger می توان ناحیه ی گسترش شعله را برای هر ماده تعیین کرد. براساس مقادیر \ddagger و a ، ۴ ناحیه ی گسترش شعله خواهیم داشت که جزئیات در جدول ۱ آورده شده است. در این

تحقیق، برای ۱۳ نوع ماده ی متفاوت با استفاده از داده های جدول ۳ و تحت شرایط یکسان (جدول ۲)، با محاسبه ی مقادیر $\{a$ و \dagger ، بر اساس محدوده های ارائه شده در جدول ۱ نواحی گسترش شعله تعیین شدند و احتمال وقوع انفجار تحت شرایط مشابه بررسی شد. با تعیین ناحیه ی گسترش شعله برای شرایط مشخص (جدول ۲) می توان با استفاده از روابط ۴ تا ۱۰، سرعت گسترش شعله، طول پیرولیز، طول شعله و حرارت آزاد شده توسط ماده ی در حال احتراق را محاسبه کرد. برای افزایش سرعت و دقت در محاسبات می توان محاسبات را به کمک کد نویسی توسط نرم افزارهای عام ریاضی نظیر (matlab) و سایر نرم افزارها انجام داد، با توجه به آشنایی نویسندگان در این مطالعه از نرم افزار (maple) که یک نرم افزار قدرتمند ریاضی با توانایی حل معادلات پیچیده ی ریاضی و رسم انواع نمودارها می باشد، استفاده شده است. با استفاده از داده های جدول ۲ و روابط ریاضی به دست آمده، برای هر یک از ۱۳ نوع ماده که به عنوان مصالح ساختمانی کاربرد دارند و خواص مورد نیاز آن ها در جدول ۳، آمده است، ناحیه ی گسترش شعله با کد نویسی توسط نرم افزار (maple) تعیین شد و نمودارهای سرعت گسترش شعله و حرارت کلی حاصل از احتراق برای تمام مواد با توجه به ناحیه ی گسترش شعله و با استفاده از روابط مربوط به همان ناحیه در شکل های ۲ تا ۹ ارائه شده اند.

جدول ۱. نواحی گسترش شعله [۸]

شکل منحنی	انفجار	محدوده	ناحیه
	رخ می دهد.	$\dagger < (1 - \sqrt{a})^2$	۱
	ممکن است رخ دهد.	$(1 - \sqrt{a})^2 < \dagger < (a - 1)$	۲
	رخ نمی دهد.	$(a - 1) < \dagger < (1 + \sqrt{a})^2$	۳
	رخ نمی دهد.	$\dagger > (1 + \sqrt{a})^2$	۴

جدول ۲. حداقل مقادیر ورودی اندازه گیری شده توسط روش SBI [۸]

متغیر ورودی	مقدار	واحد
f	۰.۵۵	(-)
q''_{fs}	۱۰	kwm^{-2}
q''_{start}	۳۰	kwm^{-2}
K	۰.۰۲	m^2kw^{-2}
Q_b	۳۰	kw

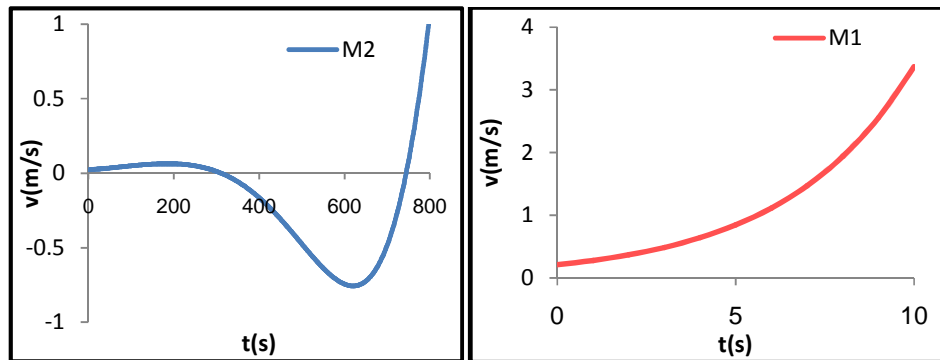
جدول ۳. خواص مواد به دست آمده از آزمایش کالریمتر مخروطی [۸]

شماره ی ماده	نام ماده	$\dots (kgm^{-3})$	$Q_{max} (kwm^{-2})$	$\dots (s^{-1})$
--------------	----------	--------------------	----------------------	------------------

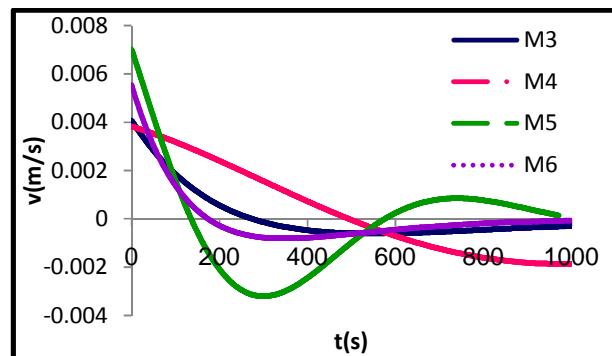
M_1	FR extruded polystyrene board	۳۰	۵۴۵/۶۸	۰/۰۱۵
M_2	PUR foam panel with Al. foil faces	۵۷	۱۰۴/۷۴۰	۰/۰۰۵۵
M_3	melamine faced MDF board	۷۶۷	۲۶۷/۴۸۰	۰/۰۱۲
M_4	melamine faced particle board	۷۱۰	۲۳۲/۵۰۰	۰/۰۰۶
M_5	phenolic foam	۵۹	۴۳/۳۲۰	۰/۰۰۴
M_6	unvarnished mass timber spruce	۴۵۱	۲۱۳/۸۱۰	۰/۰۱۷۵
M_7	Chipboard	۷۸۹	۱۱۰/۵۸۰	۰/۰۱۲
M_8	varnished mass timber, pine	۴۵۵	۲۲۷/۹۰۰	۰/۰۰۲
M_9	plasterboard on polystyrene	۷۲۴	۱۲۶/۱۵۰	۰/۰۰۵
M_{10}	Plasterboard	۷۱۶	۱۰۳/۹۳۰	۰/۰۱۵
M_{11}	plastic faced steel sheet on mineral wool	۶۲۰	۱۱۴/۴۴۰	۰/۰۰۷۵
M_{12}	pvc wall carpet on plasterboard	۸۱۱	۱۵۹/۷۸۰	۰/۰۱۷۵
M_{13}	Pvc	۱۴۵۳	۳۵۶/۳۳۰	۰/۰۰۴

۳- نتایج و بحث

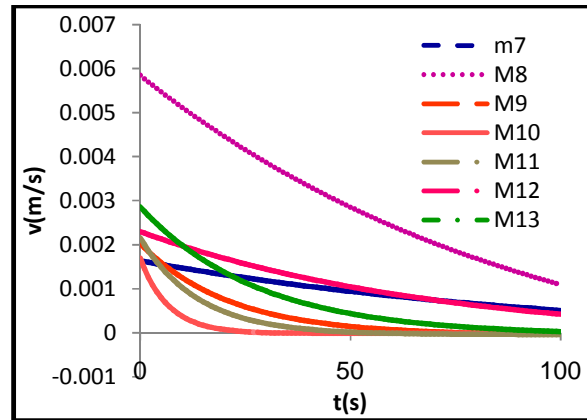
همانطور که در بخش مدلسازی ریاضی به تفصیل بیان گردید، پس از به دست آوردن روابط ریاضی و انجام محاسبات، منحنی های سرعت گسترش شعله و حرارت کلی حاصل از احتراق برای تمام مواد ترسیم شدند. با بررسی این منحنی ها که در شکل های ۲ تا ۹ ارائه شده اند، می توان درباره ی نحوه ی احتراق مصالح متفاوت بحث کرد.



شکل ۲- تغییرات سرعت گسترش شعله برای مواد در ناحیه ۳- تغییرات سرعت گسترش شعله برای مواد در ناحیه ۲

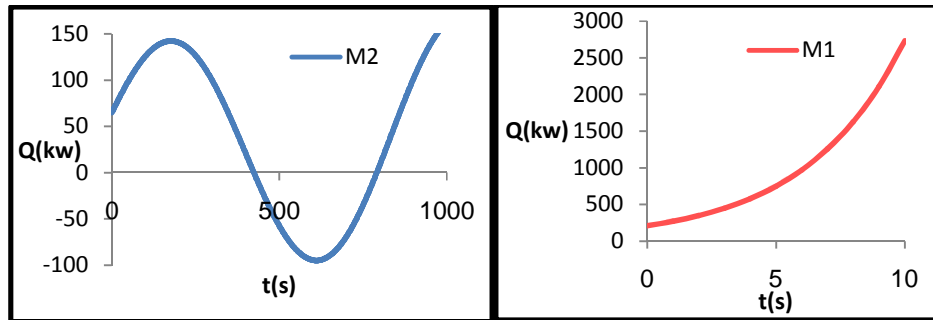


شکل ۴- تغییرات سرعت گسترش شعله برای مواد در ناحیه ۳

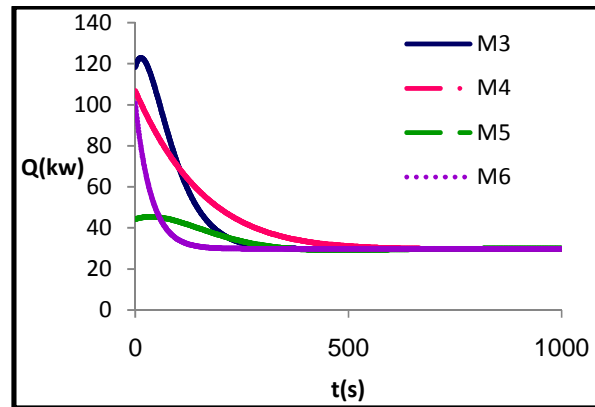


شکل ۵- تغییرات سرعت گسترش شعله برای مواد در ناحیه ۴

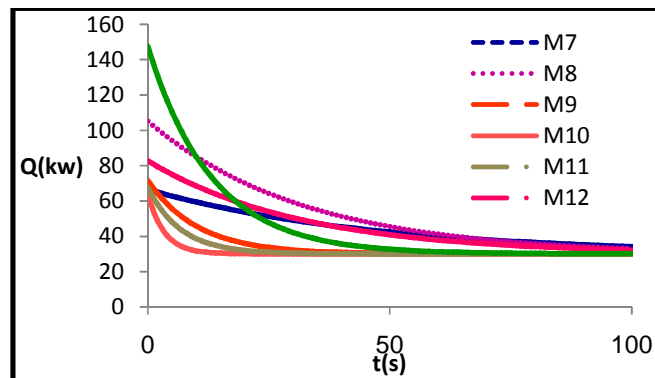
از شکل ۲ مشهود است که ماده ی M_1 دارای سرعت گسترش کاملاً صعودی است، بنابراین در ناحیه ی اول است و به شدت افزایش سرعت نشان می دهد که در نتیجه فضای اتاق در زمان بسیار کوتاه درگیر گسترش سریع حریق خواهد شد و به دنبال آن گازهای قابل احتراق توسط فرایند پیرولیز در محیط افزایش می یابند، با وجود حجم زیادی از گازهای قابل اشتعال به علت دمای بالای اتاق در صورت حضور هوای مورد نیاز وقوع انفجار حتمی است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تغییرات سرعت گسترش برای ماده ی M_2 در ابتدا به صورت نوسانی است و در نهایت به "صفر" میل می کند، بنابراین در ناحیه ی دوم است و احتمال وقوع انفجار وجود دارد. مطابق شکل ۴ برای مواد M_3, M_4, M_5, M_6 ، سرعت های گسترش در ابتدا به صورت نوسانی تغییر می کنند اما در نهایت به "صفر" میل می کنند، بنابراین در ناحیه ی سوم هستند و احتمال وقوع انفجار وجود ندارد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برای مواد $M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}, M_{12}, M_{13}$ سرعت های گسترش روند نزولی دارند، بنابراین در ناحیه ی چهارم هستند و به علت کاهش سرعت، تولید گازهای قابل احتراق بر اثر فرایند پیرولیز با گذشت زمان کاهش می یابد بنابراین تجمع گاز در محیط صورت نگرفته لذا احتمال وقوع انفجار وجود ندارد. بنابراین با توجه به احتمال وقوع انفجار، می توان گفت که در بین این مواد، ماده ی M_1 ، و بعد از آن M_2 خطرناک ترین مواد هستند. برای موادی که تغییرات سرعت نوسانی دارند، تا زمانی که منحنی اولین بار به "صفر" برسد و محور زمان را قطع کند داده ها معتبرند، یعنی پس از منفی شدن سرعت دیگر داده ها مفهومی ندارند و صرفاً ناحیه ی گسترش شعله را نشان می دهند. براین اساس با توجه به زمان "صفر" شدن سرعت در شکل ۴ مواد را به ترتیب از پرخطر به کم خطر می توان به صورت M_4, M_3, M_6, M_5 معرفی کرد. به همین ترتیب بر اساس زمان "صفر" شدن سرعت و شیب منحنی های شکل ۵ مواد را به ترتیب از پرخطر به کم خطر می توان به صورت $M_7, M_{12}, M_8, M_{13}, M_9, M_{11}, M_{10}$ معرفی کرد.



شکل ۶- تغییرات گرمای حاصل از احتراق برای مواد در ناحیه ۱ شکل ۷- تغییرات گرمای حاصل از احتراق برای مواد در ناحیه ۲



شکل ۸- تغییرات گرمای حاصل از احتراق برای مواد در ناحیه ۳



شکل ۹- تغییرات گرمای حاصل از احتراق برای مواد در ناحیه ۴

از شکل ۶ مشهود است که گرما به شدت در حال افزایش است، از آنجایی که گرما مهمترین عامل در گسترش شعله و ایجاد انفجار است و با توجه به حضور اکسیژن و سوخت در محیط، با افزایش شدید و ناگهانی گرما وقوع انفجار با توجه به مثلث آتش حتمی خواهد بود. شکل ۷، همانند شکل ۳ یک منحنی سینوسی افزایش یابنده را نشان می دهد، نوسان منحنی گرمای حاصل از احتراق نسبت به منحنی سرعت گسترش شعله شدیدتر می باشد و این نشان می دهد که کاهش و به صفر رسیدن

سرعت در ناحیه ی دوم، قابلیت اعتماد از نظر استانداردهای ایمنی را ندارد. شکل ۸ نشان می دهد که نوسان منحنی های گرمای حاصل از احتراق، نسبت به منحنی سرعت گسترش شعله، میرایی شدیدتری دارند و این نشان می دهد که بر خلاف ناحیه ی دوم، نمودارهای سرعت در ناحیه ی سوم، قابلیت اعتماد از نظر استانداردهای ایمنی را دارند. شکل ۹ نشان می دهد که منحنی ها بدون هیچ نوسانی و به سرعت میرا می شوند و این مسئله می تواند نتیجه ی حاصل از بررسی شکل ۵ مبنی بر عدم وقوع انفجار را تصدیق کند.

با استفاده از منحنی های ۲ تا ۵ که برای سرعت گسترش شعله و منحنی های ۶ تا ۹ که برای گرمای حاصل از احتراق ارائه شده اند، می توان بر اساس احتمال وقوع انفجار، زمان به "صفر" رسیدن سرعت گسترش شعله و مقدار حرارت تولیدی بر اثر احتراق ماده، مواد را از نظر میزان ایمنی در برابر آتش سوزی مقایسه کرد. به این منظور جدول ۴ برای مقایسه ی پارامترهای مورد نظر ارائه شده است.

جدول ۴. مقایسه ی رفتار احتراقی مواد از نظر ایمنی در برابر آتش سوزی (مقاومت احتراقی)

شماره ی ماده	نام ماده	ناحیه	انفجار	$t(s)$ at $v = 0$	$Q_t(kw)$ at $v = 0$
M_1	FR extruded polystyrene board	۱	حتمی است.	(-)	(-)
M_2	PUR foam panel with Al. foil faces	۲	ممکن است.	۳۰۹	۹۳/۳۵۷۹۲
M_3	melamine faced MDF board	۳	رخ نمی دهد.	۲۷۴	۳۱/۵۵۱۱
M_4	melamine faced particle board	۳	رخ نمی دهد.	۴۹۳	۳۱/۲۷۶۱
M_5	phenolic foam	۳	رخ نمی دهد.	۱۶۴	۳۸/۷۸۲۲۶
M_6	unvarnished mass timber spruce	۳	رخ نمی دهد.	۱۶۶	۳۰/۵۶۴۶
M_7	chipboard	۴	رخ نمی دهد.	۲۳۷	۳۰/۱۸۵۱۳
M_8	varnished mass timber.pine	۴	رخ نمی دهد.	۱۵۷	۳۰/۳۶۰۱۴
M_9	plasterboard on polystyrene	۴	رخ نمی دهد.	۷۸	۳۰/۰۲۰۵
M_{10}	plasterboard	۴	رخ نمی دهد.	۳۲	۳۰/۰۰۲۴۸
M_{11}	plastic faced steel sheet on mineral wool	۴	رخ نمی دهد.	۵۵	۳۰/۰۱۱۳
M_{12}	pvc wall carpet on plasterboard	۴	رخ نمی دهد.	۱۸۵	۳۰/۱۲۸۶۷
M_{13}	Pvc	۴	رخ نمی دهد.	۱۱۳	۳۰/۰۲۰۴۵

برای شرایط ارائه شده در جدول ۲ که برای تمام مواد یکسان است، همانطور که در جدول ۴ دیده می شود، در بین ۱۳ ماده ی مورد مطالعه، در صورت وقوع آتش سوزی، وقوع پدیده ی انفجار برای ماده ی M_1 حتمی است، بنابراین خطرناک ترین ماده در بین مواد مورد مطالعه است. احتمال وقوع پدیده ی انفجار برای ماده ی M_2 نیز وجود دارد، علاوه بر آن اینماده گرمای بسیار بیشتری در مقایسه با سایر مواد تولید می کند، بنابراین می تواند در بین مواد مورد مطالعه به عنوان دومین ماده ی خطرناک معرفی شود. برای مقایسه ی مواد M_3 تا M_{13} همانطور که در جدول ۴ مشخص است، مقادیر گرمای حاصل از احتراق تمام مواد به استثنای ماده ی M_5 به میانگین مقدار گرمای حاصل از احتراق مواد تحت بررسی (۳۱/۱۷۲۹۸ kw) بسیار نزدیک است، بنابراین هنگام مقایسه ی آن ها می توان از تاثیر گرمای حاصل از احتراق در مقابل زمان "صفر" شدن سرعت گسترش شعله صرف نظر کرد، درحالیکه گرمای حاصل از احتراق ماده ی M_5 حدود ۲۴٪ با میانگین مقدار گرمای حاصل از احتراق مواد اختلاف دارد، بنابراین هنگام مقایسه در مورد موادی که زمان "صفر" شدن سرعت آن ها نزدیک به زمان "صفر" شدن سرعت ماده ی M_5 است، نمی توان تاثیر گرمای حاصل از احتراق را نادیده گرفت. بنابراین علیرغم کمتر بودن

زمان "صفر" شدن سرعت گسترش شعله ی ماده ی M_5 در مقایسه با ماده ی M_6 ، با توجه به اختلاف گرمای حاصل از احتراق این مواد، ماده ی M_5 خطرناک تر از ماده ی M_6 می باشد. برای سادگی جدول ۵ که در آن مواد به ترتیب از پر خطر به ایمن مرتب شده اند، ارائه شده است.

جدول ۵. ترتیب مواد از پرخطر به ایمن

شماره ی ماده	نام ماده
M_1	FR extruded polystyrene board
M_2	PUR foam panel with Al. foil faces
M_4	melamine faced particle board
M_3	Melamine faced MDF board
M_7	Chipboard
M_{12}	pvc wall carpet on plasterboard
M_5	Phenolic foam
M_6	unvarnished mass timber spruce
M_8	varnished mass timber, pine
M_{13}	Pvc
M_9	plasterboard on polystyrene
M_{11}	plastic faced steel sheet on mineral wool
M_{10}	Plasterboard

۴ - نتیجه گیری

با توجه به اهمیت بسیار زیاد آتش سوزی در ساختمان ها به خصوص ساختمان هایی که در ساخت آن ها مصالح قابل اشتعال به کار رفته است، بررسی قابلیت آتش گیری و مقاومت احتراقی مصالح ساختمانی می تواند تاثیر به سزایی در بالا بردن ایمنی ساختمان داشته باشد.

در این تحقیق به کمک مدلسازی حرارتی، معادلات ریاضی سرعت گسترش شعله، طول پیرولیز، طول شعله و گرمای حاصل از احتراق مواد به دست آمد و با مطالعه ی تاثیر جنس ماده بر سرعت و نحوه ی گسترش شعله، احتمال وقوع انفجار و حرارت حاصل از احتراق برای ۱۳ نوع ماده که به عنوان مصالح ساختمانی کاربرد دارند، ایمنی آن ها در برابر آتش سوزی بررسی شد.

استفاده از روند مطالعه ی انجام شده در این تحقیق و تنظیم جدولی مشابه جدول ۵ با هدف بررسی مقاومت احتراقی جنس ماده در برابر سرعت گسترش شعله و تعیین ایمنی مواد متفاوت، می تواند در کنار توجه به پارامترهایی مانند مقاومت مصالح، امکان دسترسی و عوامل اقتصادی به انتخاب بهترین ماده در بین مواد با کاربرد مشابه، در یک طرح ساختمانی خاص کمک کند.

مراجع

- 1- E.G. Brehob, C.I. Kim, A.K. Kulkarni, "Numerical model of upward flame spread on practical wall materials", Fire Safety Journal, Vol. 36, pp. 225-240, 2001.



- 2- C.W. Leung, W.W. Yuen, W.K. Chow, "A practical model on flame spreading over materials", The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Mar 16-20, 2003.
- 3- J.L. Consalvi, Y. Pizzo, B. Porterie, J.L. Torero, "On the flame height definition for upward flame spread", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 384-392, 2007.
- 4- W.G. Weng, R. Yang, H.Y. Yuan, "A New Approach for Predicting Flame Spread along Combustible Solid based on Cellular Automaton", Journal of Fire Sciences, Vol. 25, pp. 383-401, 2007.
- 5- Y.Pizzo, J.L.Consalvi, P.Querre, M.Coutin, B.Porterie, "Width effects on the early stage of upward flame spread over PMMA slabs: experimental observations", Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 407-414, 2009.
- 6- S. R. Bishop, P. G. Holborn, A. N. Beard, D. D. Drysdale, "Dynamic modelling of building fires", Appl. Math. Modelling, Vol. 17, pp. 170-183, 1993.
- 7- Patrick M. Kennedy, Kathryn C. Kennedy, "Flashover and fire analysis", John A. Kennedy and Associates, Inc., Investigations Institute, 2003.
- 8- Gregory North, Bjorn Karlsson, Daniel Gojkovic, Patrick van Hees, "Simple analytical and numerical techniques for modelling flame spread on solids", report 7014, Lund university, Sweden, 2001. ISSN: 1402-3504
- 9- Jorgen Carlsson, "Computational strategies in flame spread modelling involving wooden surfaces", report 1028, Lund university, Sweden, 2003. ISSN: 1402-3504
- 10- C.W. Leung, "A brief review on eight flame spread models", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Number 1, p.23-41, 2009.
- 11- Lee, Cheol Ho, "Investigation of a model for upward flame spread: transient ignitor and burning rate effects", Msc thesis, university of Maryland, 1996.
- 12- Graham S. Cowles, Ed Soja, "Flame spread classification method for exterior wall claddings", 8th International Fire Science and Engineering Conference, Edinburgh, Scotland, June 29 - July 2, 1999.