



FCCI2012-6020



بررسی نحوه انجام شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی روی اجسام جامد

علی صادقیان جهرمی^۱، رضا مهربار^۲

دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا - دانشگاه صنعتی شیراز

(علی صادقیان جهرمی: asadeghi63@yahoo.com)

چکیده

امروزه ایمنی آتش در طراحی ساختمان‌ها و مکان‌های بسته از اهمیت زیادی برخوردار است. گسترش آتش یکی از مباحثی است که در این زمینه اهمیت بسزایی دارد. معمولاً برای انجام شبیه‌سازی آتش‌سوزی و توزیع دود از یک منبع حرارتی با ابعاد ثابت استفاده می‌شود. این در حالی است که اغلب آتش‌سوزی از یک نقطه شروع و به نقاط دیگر سرایت می‌کند. در این مقاله به منظور دستیابی به نحوه شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی از داده‌های یک آزمایش استفاده شده است. در این آزمایش شش کابل به طول شش متر درون یک کانال با ارتفاع محدود قرار گرفته است و آتش‌سوزی از ابتدای کابل‌ها شروع شده و تا انتها گسترش می‌یابد. بدین ترتیب با تغییر برخی پارامترهای موثر در آتش‌سوزی مانند گرمای احتراق، دمای اشتعال و ... روشی مناسب برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی همراه با اثر پارامترهای مختلف تعیین گردیده است.

واژه‌های کلیدی: گسترش آتش‌سوزی - شبیه‌سازی عددی - ایمنی آتش - جسم جامد - کابل

۱- مقدمه

گسترش آتش پدیده‌ای است که امروزه بسیار مورد توجه افرادی است که در مباحث مربوط به ایمنی آتش مطالعه می‌کنند. این پدیده، شامل طیف وسیعی از آتش‌سوزی‌ها اعم از سوختن آرام و بدون شعله (smoldering) اجسامی مانند سیگار تا آتش‌سوزی‌های لجام‌گسیخته و وسیع جنگل‌ها می‌باشد [۱]. گسترش آتش‌سوزی یک عامل مهم در توسعه آتش‌های بزرگ است که صدمات جانی و مالی زیادی در بر دارد. محاسبه سرعت گسترش آتش در مکان‌های بسته و ساختمان‌ها این امکان را فراهم می‌کند تا برآورد مناسبی از مدت زمان موجود برای تخلیه محل انجام گیرد.

حرارت به صورت‌های مختلف از جمله هدایت، جابجایی و تابش از درون شعله به مواد قابل اشتعال اطراف انتقال می‌یابد و موجب افزایش دمای اجسام و رسیدن آنها به دمای اشتعال می‌شود. لذا با در نظر گرفتن میزان حرارت خالص انتقالی از آتش به مواد قابل اشتعال، q (W/m^2)، نرخ گسترش آتش، V (m/s)، با استفاده از اصل بقای انرژی از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\rho V \Delta h = q \quad (1)$$

در این معادله ρ چگالی سوخت و Δh اختلاف انتالپی گرمایی (بر واحد جرم) بین سوخت در دمای احتراق آن و سوخت در دمای اولیه می‌باشد. این رابطه را می‌توان معادله اساسی گسترش آتش نامید [۱].

در همین راستا در تحقیق انجام‌شده توسط Williams [۱] مکانیزم‌های گسترش آتش ارائه گردیده است که در آن یک معادله برای بالانس گرما پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این بررسی منجر به ارائه روابط حاکم بر گسترش شعله در حالت‌های مختلف مانند گسترش آتش در جریان‌های موافق و مخالف گردید. علاوه بر این، Williams گسترش شعله روی مواد غیر ساده مانند یک ردیف چوب کبریت و موادی که در طول گسترش ذوب می‌شوند و به صورت قطره قطره از جسم جدا می‌گردند

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز

۲- استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز

FCCI2012-6020

نیز ارائه کرده است. در یک تحقیق دیگر، Quintiere [۲] به بررسی اصول اولیه آتش و معادلات حاکم و چگونگی ایجاد و رشد و گسترش آتش در محیط‌های مختلف جامد و مایع پرداخته و نحوه گسترش آتش روی سطوح را بیان کرده است. او همچنین با استفاده از دیگرام مدل گسترش شعله، روابطی برای گسترش شعله روی سطوح اجسام از نظر حرارتی نازک و از نظر حرارتی ضخیم بدست آورده است. Orloff و همکاران [۳] نیز نرخ گسترش رو به بالای آتش را برای ماده پلی‌متیل‌متاکریلیت (PMMA) به روش آزمایشی بررسی کردند. با آزمایش یک قطعه عمودی از جنس PMMA با ضخامت ۴/۵ سانتیمتر، عرض ۴۱ سانتیمتر و ارتفاع ۱۵۷ سانتیمتر، آنها مشاهده کردند که سرعت گسترش شعله هنگامی که موقعیت تجزیه جسم بوسیله گرما^۱ (H_p) در فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر می‌باشد نسبتاً ثابت بوده و بعد از آن تقریباً متناسب با H_p مطابق با رابطه (۲) افزایش می‌یابد:

$$V_p = 0.00441H_p^{0.964} \quad (2)$$

با توسعه سریع عملکرد رایانه‌ها، توجه زیادی به مدل‌های میدانی برای شبیه‌سازی آتش یا همان مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) شده است. کارهای زیادی در رابطه با شبیه‌سازی گسترش شعله انجام شده است. Kwon [۴] در پایان‌نامه خود، گسترش رو به بالای شعله روی یک قطعه از ماده پلی‌متیل‌متاکریلیت (PMMA) به ضخامت ۲/۵ سانتیمتر، عرض ۵۸ سانتیمتر و ارتفاع ۵ متر که به صورت قائم قرار گرفته است را شبیه‌سازی کرده است و نرخ گسترش شعله را محاسبه کرده است و با نتایج آزمایشات انجام‌شده بوسیله FMRC [۵] مقایسه کرده است. Kuldeep Prasad و همکاران [۶] گسترش شعله را روی یک قطعه اسفنج از جنس پلی‌اورتان^۲ شبیه‌سازی و بررسی کرده‌اند. اسفنج پلی‌اورتان ماده‌ای است که اغلب به عنوان بالستک نرم در صندلی‌های مبل‌مان خانه و در تشک‌ها یافت می‌شود. آزمایشات روی ماده پلی‌اورتان نشان می‌دهند که پیوندهای اوره و اورتان در بالای ۲۰۰ °C می‌شکنند و تولوئن‌دی‌ایزوسایانیت^۳ (TDI) همزمان با پولیول^۴ تولید می‌شود. شیمی پلیمر نشان می‌دهد که TDI در حدود ۲۵۰ °C می‌جوشد در حالی که پولیول باقی می‌ماند و یک استخر مذاب به جا می‌گذارد. پولیول در دماهای بالاتر ۳۲۰-۳۵۰ °C تجزیه می‌شود. همچنین اسفنج‌ها معمولاً از واکنش بین TDI و پولیول شکل می‌گیرند و ۳۳٪ جرم آن شامل TDI، ۶۶٪ جرم آن شامل پولیول و ۱٪ شامل مواد دیگر می‌شود. آنها گسترش شعله را به چند حالت شبیه‌سازی کردند تا به بهترین تطابق با نتایج آزمایش برسند. شرکت VTT آزمایش‌های زیادی روی گسترش آتش انجام می‌دهد که در این میان Hietaniemi و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۷] با استفاده از بعضی اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، صحت نتایج حاصل از یک شبیه‌سازی عددی را تایید کردند.

در این تحقیق نیز به منظور دست‌یابی به نحوه انجام شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی روی اجسام جامد، ضمن استفاده از یک نرم‌افزار مخصوص آتش‌سوزی، سرعت گسترش آتش و میزان حرارت آزادشده درون یک کانال حاوی کابل‌های الکتریکی، بررسی گردیده و نتایج حاصله با داده‌های آزمایش انجام شده توسط شرکت VTT [۷] مقایسه و شرایط لازم برای انجام شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی روی اجسام دیگر فراهم گردیده است.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- مدل هیدرودینامیکی

معادله بقای جرم اغلب بر حسب کسر جرمی گونه‌های گازی، Y_α ، نوشته می‌شود [۸]:

¹ pyrolysis height

² polyurethane foam (PUF)

³ toluene diisocyanate (TDI)

⁴ polyol

FCCI2012-6020

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_\alpha''' \quad (3)$$

در این معادله، D_α ضریب نفوذ گونه گازی α و \dot{m}_α''' نرخ تولید جرم بر واحد حجم گونه گازی می‌باشد. جمع کردن این معادلات روی تمام گونه‌ها منجر به معادله بقای جرم اصلی می‌شود. طبق تعریف $\sum Y_\alpha = 1$ و $\sum \dot{m}_\alpha''' = 0$ است و همچنین فرض می‌شود $\sum \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha = 0$ که به صورت کلی صحیح نیست. بدین ترتیب معادله بقای جرم به شکل معادله (۴) نوشته خواهد شد [۹].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (4)$$

علاوه بر این، معادلات بقای مومنتوم و انرژی برای یک سیال نیوتنی نیز به صورت زیر نوشته می‌شوند:
بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla p = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (5)$$

انتقال انتالپی محسوس [۹]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \vec{q}'' + \varepsilon \quad (6)$$

معادله حالت برای گاز کامل [۹]:

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (7)$$

معادلات فوق یک مجموعه از معادلات دیفرانسیل جزئی هستند که از شش معادله و شش مجهول شامل چگالی ρ ، سه مولفه سرعت $\vec{u} = [u, v, w]^T$ ، دما T و فشار p ، که همگی تابع زمان و مکان هستند، تشکیل شده اند [۹]. در معادله مومنتوم، ترم $\vec{u} \vec{u}$ یک تانسور دیادیک است. در نماد ماتریسی، با $\vec{u} = [u, v, w]^T$ دیادیک بوسیله ضرب تانسوری بردارهای \vec{u} و \vec{u}^T بدست می‌آید. بنابراین ترم $\nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u}$ یک بردار شکل گرفته بوسیله اعمال عملگر برداری $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ به تانسور تنش τ_{ij} به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \vec{u}) \right) \quad (8)$$

که در آن

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

ترم S_{ij} تانسور متقارن نرخ کرنش می‌باشد. نماد μ لزجت دینامیکی سیال است [۹]. در معادله انتالپی محسوس، ترم \dot{q}''' حرارت آزاد شده بر واحد حجم از یک واکنش شیمیایی است. ترم \vec{q}'' نشان دهنده شارهای حرارتی هدایتی و تابشی می‌باشد و از معادله (۱۱) بدست می‌آید:

$$\vec{q}'' = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \vec{q}_r'' \quad (11)$$

که k ضریب هدایت گرمایی، \vec{q}_r'' شار حرارتی تابشی و $h_{s,\alpha}$ انتالپی گونه α می‌باشد. ترم ε در معادله انتالپی محسوس به عنوان نرخ اتلاف شناخته می‌شود. این نرخ است که در آن به علت لزجت سیال، انرژی جنبشی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود [۹]:

$$\varepsilon \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla u = \mu \left(2S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right) = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (12)$$

این ترم معمولاً قابل چشم‌پوشی است زیرا نسبت به نرخ حرارت آزاد شده آتش بسیار کوچک است. یک راه مناسب برای مدل کردن اغتشاش، استفاده از شبیه‌سازی گردابه بزرگ^۱ می‌باشد که طبق آن ضرایب معادله مومنتم در معادلات بقا تصحیح گردیده و با روابط ارائه‌شده توسط Smagorinsky جایگزین می‌گردند [۱۰].

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left(2\bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

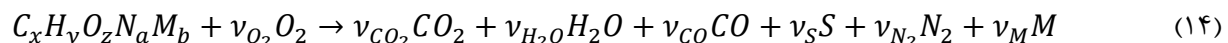
که C_s یک ثابت تجربی است و Δ (اندازه فیلتر) یک طول از مرتبه اندازه یک سلول شبکه می‌باشد. معادلات ارائه‌شده پایه‌های کاربردهای مهندسی وسیعی را شکل می‌دهند، اما همراه با کاربرد فرضیات ساده‌کننده منحصر به فرد در هر زمینه. تنها فرضیات استفاده‌شده این است که سیال یک گاز کامل است، تنش به طور خطی به کرنش وابسته است، گرما بر اساس قانون فوریه به صورت هدایت انتقال می‌یابد و گونه‌های گازی بر اساس قانون فیک نفوذ می‌کنند که مشابه با قانون فوریه در انتقال حرارت هدایت می‌باشد.

۲-۲- مدل احتراق

مدل‌های احتراق انواع مختلفی دارند. یک نوع رایج آن، استفاده از کمیتی به نام کسر مخلوط^۲ می‌باشد که نشان‌دهنده میزان سوخت و محصولات احتراق می‌باشد. برای این مدل، گونه‌های گازی منحصر به فرد بر اساس پارامترهای مشخص‌شده واکنش آرنیوس واکنش می‌دهند. این مدل اغلب در شبیه‌سازی عددی مستقیم استفاده می‌شود که در آن نفوذ سوخت و اکسیژن می‌تواند به طور مستقیم مدل شود. البته در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جایی که شبکه برای حل کردن نفوذ سوخت و اکسیژن به اندازه کافی ریز نیست، مدل احتراق بر اساس کسر مخلوط استفاده می‌شود.

در یک حجم داده‌شده شامل مخلوط گونه‌های گازی، یک کسر مخلوط می‌تواند تعریف شود که آن نسبت جرم یک زیرمجموعه گونه‌ها به جرم کلی موجود در حجم می‌باشد. در احتراق، کسر مخلوط یک کمیت دارای بقا است که اصطلاحاً به عنوان کسر (جرمی) مخلوط گاز که از جریان سوخت سرچشمه می‌گیرد تعریف می‌شود. بنابراین، در سطح مشعل، کسر مخلوط برابر با یک و در هوای تازه برابر با صفر می‌باشد. در ناحیه‌ای که احتراق اتفاق افتاده است این کسر شامل سوخت غیرمشعل و آن قسمت محصولات احتراق که از سوخت آمده‌اند خواهد بود. کسر مخلوط تابع مکان و زمان است و معمولاً با $Z(x, t)$ مشخص می‌شود. اگر بتوان فرض کرد که به محض مخلوط شدن، واکنش سوخت و اکسیژن به سرعت و کامل اتفاق می‌افتد، فرآیند احتراق به عنوان "کنترل‌شده به وسیله مخلوط شدن"^۳ شناخته می‌شود. این مطلب بیان می‌کند که تمام گونه‌های دلخواه به تنهایی می‌توانند بر حسب کسر مخلوط توصیف شوند. ارتباط بین کسر جرمی یک گونه منحصر به فرد و کسر مخلوط، "رابطه حالت" نامیده می‌شود.

واکنش یک مرحله‌ای ساده سوخت و اکسیژن را در نظر بگیرید:



توجه کنید که فرض می‌شود نیتروژن در مولکول سوخت تنها به فرم N_2 می‌باشد. گونه‌های محصول اضافه می‌توانند به صورت تعدادی از مول‌های یک گونه وزن مولکولی میانگین M مشخص شوند. فرض می‌شود که این محصولات در زمان شکل-

¹ Large Eddy Simulation (LES)

² mixture fraction

³ mixing-controlled

FCCI2012-6020

گیری، اکسیژن مصرف نمی‌کنند. فرض می‌شود که دوده یک ترکیب کربن و هیدروژن با کسر اتمی هیدروژن X_H می‌باشد. ضریب استوکیومتری، ν_S ، نشان‌دهنده مقدار سوختی است که به دوده تبدیل شده است.

کسر مخلوط، Z ، می‌تواند بر حسب کسر جرمی سوخت و محصولات احتراق حامل کربن تعریف شود:

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S \quad (15)$$

کسر مخلوط، معادله بقای زیر را ارضا می‌کند:

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \quad (16)$$

اگر فرض شود که احتراق طوری سریع روی می‌دهد که سوخت و اکسیژن نمی‌توانند همزمان وجود داشته باشند، در سطح شعله هر دو به طور همزمان محو می‌شوند:

$$Z(x, t) = Z_f \quad (17)$$

$$Z_f = \frac{Y_{O_2}^\infty}{sY_F + Y_{O_2}^\infty} \quad (18)$$

و تمام گونه‌ها می‌توانند از طریق "روابط حالت" به Z مرتبط شوند [۸].

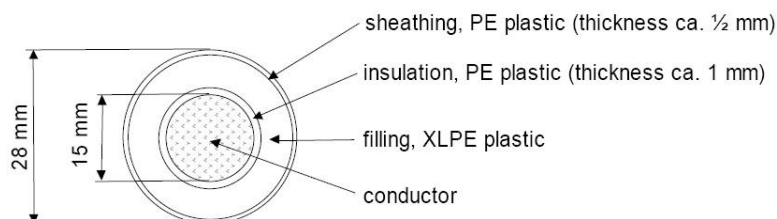
در نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی، محیط شبیه‌سازی شبکه‌بندی می‌شود و معادلات بالا در هر گره شبکه به صورت عددی حل می‌شوند.

۳- مشخصات هندسه مدل

به منظور ارزیابی مدل مورد استفاده، شبیه‌سازی آتش با یک نمونه آزمایشی مقایسه شده است. در آزمایش مورد نظر، آتش‌سوزی کابل درون یک محفظه بسته به طول ۶ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۰/۶ متر آزمایش شده است که مرزهای آن از یک تخته غیر قابل اشتعال با ضخامت ۱۲ میلی‌متر با ضریب هدایت گرمایی ۰/۵ W/m.K و ضریب نفوذ گرمایی $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ساخته شده است. محفظه بوسیله میله‌های فولادی محکم شده است (شکل ۱) [۷].



شکل ۱- نصب کابل‌ها بوسیله بستن آنها روی شبکه فولادی [۷]



شکل ۲- سطح مقطع کابل [۷]

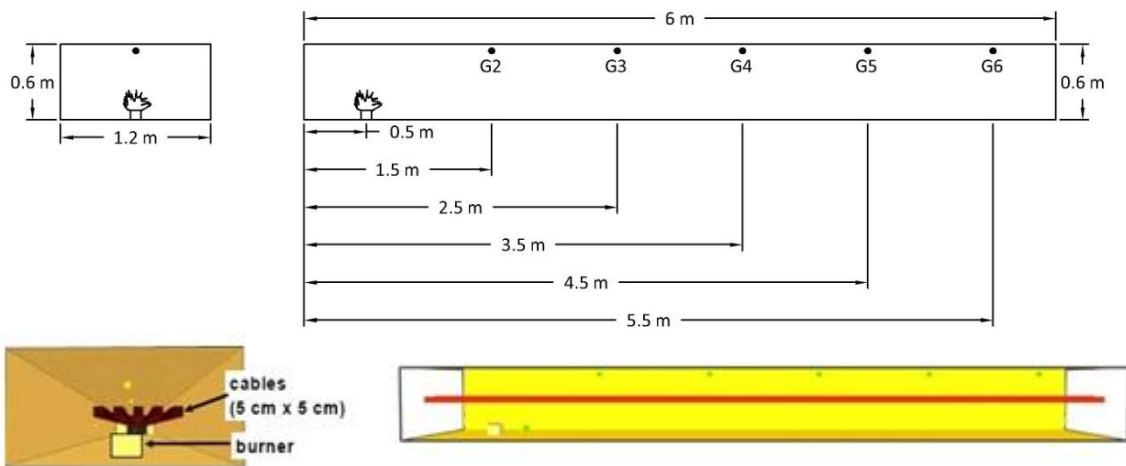
مطابق با شکل ۲ کابل‌ها دارای قطر خارجی ۲۸ میلی‌متر و طول ۶ متر و دارای پوشش و عایقی از جنس پلی‌اتیلن (PE) می‌باشند. ماده پرکننده بین آنها از یک نوع پلاستیک پلی‌اتیلن به نام XLPE^۱ ساخته شده است. گرمای احتراق^۲ PE و XLPE مقدار ۴۳/۶ MJ/kg گرفته شده است. وزن مواد سوختنی یک کابل بر واحد طول، ۰/۳۷۸ kg/m و مساحت قرار گرفته در معرض آتش ۰/۰۸۸ m²/m می‌باشد. آزمایشات در دو بخش انجام شده است، یکی با شش کابل و دیگری با ۱۰ کابل که در اینجا تنها نتایج مربوط به آزمایش با ۶ کابل ارائه و بحث شده است.

برای انجام شبیه‌سازی، و با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزار مورد استفاده در تعریف اجسام هندسی با مقطع دایره‌ای، کابل‌ها به صورت اجسام جامد از جنس پلی‌اتیلن با سطح مقطع مربعی به ابعاد ۵ سانتیمتر در ۵ سانتیمتر مدل شده‌اند. کابل‌ها دارای پوشش پلی‌اتیلن با ضخامت ۰/۰۱ متر می‌باشد که در واقع، تنها پوشش پلی‌اتیلن می‌سوزد و دود و گرما تولید می‌کند. با استفاده از این ضخامت و مقدار ۹۲۰ kg/m³ برای چگالی پلی‌اتیلن، جرم بر واحد طول و مساحت قابل احتراق در معرض آتش کابل‌های مدل شده کاملاً مشابه با شرایط آزمایش در نظر گرفته می‌شود. مشخصات آتش در آزمایشات و در شبیه‌سازی در جدول ۱ داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود مقادیر بار آتش^۳ و مساحت در معرض آتش در شبیه‌سازی و در آزمایش بسیار به هم نزدیک هستند [۷].

جدول ۱- مشخصات بار آتش در آزمایش و شبیه‌سازی [۷]

مشخصات ماده قابل اشتعال	آزمایش	شبیه‌سازی
جرم قابل احتراق (kg)	۱۳/۶	۱۳/۸
بار آتش (با استفاده از ۴۳/۶ MJ/kg) (MJ)	۵۹۰	۶۰۰
مساحت در معرض آتش (m ²)	۳/۲	۳/۰

در هنگام آزمایش کابل‌ها بوسیله یک مشعل که زیر کابل‌ها در ۵۰ سانتیمتری از جلوی محفظه قرار گرفته است، مشتعل می‌شوند (شکل ۳). مشعل به مدت ۲۴۰ ثانیه حرارتی به میزان ۵۰ kW آزاد می‌کند و بعد از آن خاموش می‌شود [۷].



شکل ۳- محل اندازه‌گیری دما

^۱ cross-linked PE

^۲ heat of combustion

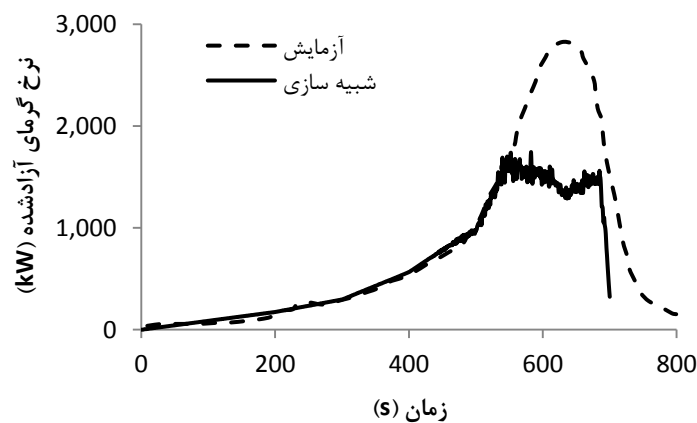
^۳ fire load

محل اندازه‌گیری دما در شکل ۳ نشان داده شده است. G2 تا G6 ترموکوپل هایی هستند که دمای گاز را در ۵ سانتیمتری زیر سقف محفظه در مکان های ۱/۵ متر (G2)، ۲/۵ متر (G3)، ۳/۵ متر (G4)، ۴/۵ متر (G5) و ۵/۵ متر (G6) از جلوی محفظه اندازه گیری می‌کنند [۷].

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای مدل‌سازی کابل به پارامترهای دیگری از جمله گرمای واکنش^۱ و دمای مرجع^۲ ماده پلی‌اتیلن نیاز است. گرمای واکنش مقدار گرمایی است که ماده لازم دارد تا واکنش سوختن را انجام دهد که معمولاً نزدیک به گرمای تبخیر ماده است. منظور از دمای مرجع دمایی است که در آن کسر جرمی ماده با نرخ 0.1 s^{-1} کاهش می‌یابد^۳. این دو پارامتر برای مواد مختلف به ندرت در مراجع ارائه شده‌اند، لذا به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول، شبیه‌سازی آتش‌سوزی در چندین حالت و برای مقادیر مختلف از این دو پارامتر انجام شده است. همچنین امکان تعریف مقدار گرمای احتراق مربوط به انجام واکنش به صورت ایده‌آل یا غیرایده‌آل نیز می‌باشد. حالت ایده‌آل زمانی است که دوده تولید نمی‌شود. اگر گرمای واکنش وارد شده مربوط به حالت ایده‌آل باشد خود نرم‌افزار گرمای واکنش حالت غیرایده‌آل را محاسبه می‌کند که کمتر از حالت ایده‌آل است. بدین ترتیب می‌توان شبیه‌سازی را در حالات مختلف انجام داد. در ادامه این حالات بررسی گردیده‌اند.

یکی از راه‌های شبیه‌سازی این است که برای تطابق کامل منحنی نرخ گرمای آزاد شده، برای ماده مقدار گرمای آزاد شده بر واحد سطح به صورت یک تابع بر حسب زمان تعریف شود که بر این اساس، تابع ورودی بر حسب زمان از مقدار صفر در زمان صفر تا مقدار ماکزیمم 1500 kW/m^2 در زمان ۵۵۰ ثانیه افزایش می‌یابد و به مدت ۱۰۰ ثانیه در همین مقدار باقی می‌ماند و سپس کاهش می‌یابد. مقدار گرمای تبخیر ماده برابر با 1750 kJ/kg و دمای احتراق ماده نیز برابر با 370 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است و واکنش احتراق به صورت ایده‌آل انجام می‌شود. نمودار نرخ گرمای آزاد شده^۴ با زمان برای این شبیه‌سازی در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴- مقایسه منحنی نرخ گرمای آزاد شده آزمایش با منحنی نرخ گرمای آزاد شده محاسبه شده با استفاده از شبیه‌سازی، تعریف مقدار گرمای آزاد شده بر واحد سطح به صورت یک تابع بر حسب زمان برای ماده

¹ heat of reaction

² reference temperature

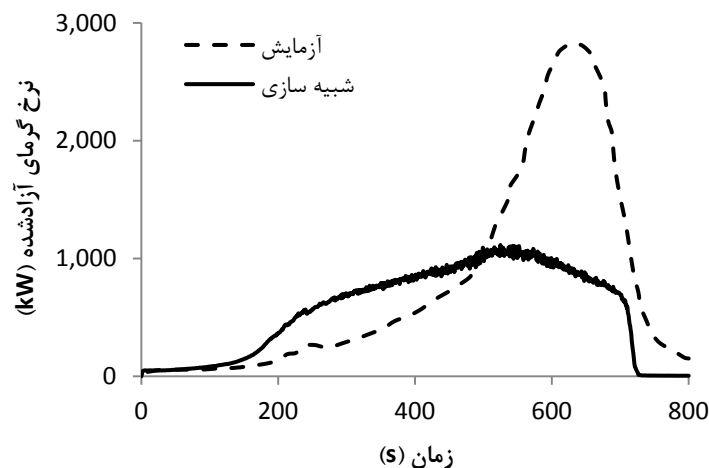
^۳ دمای مرجع با دمای احتراق متفاوت است اما به دمای احتراق نزدیک است.

⁴ heat release rate (HRR)

FCCI2012-6020

همان گونه که مشاهده می شود با وجود تعریف منحنی گرمای آزاد شده در آزمایش به عنوان ورودی برنامه، محدودیت احتراق کابل باعث عدم دسترسی به ماکزیمم گرمای آزاد شده گردیده است. علاوه بر این، در این حالت، گسترش شعله وجود ندارد و تمام کابل شعله ور می شود که به همین علت، دمای بدست آمده از شبیه سازی بالاتر از دمای اندازه گیری شده در آزمایش می باشد. بنابراین، شبیه سازی به این روش مناسب نمی باشد.

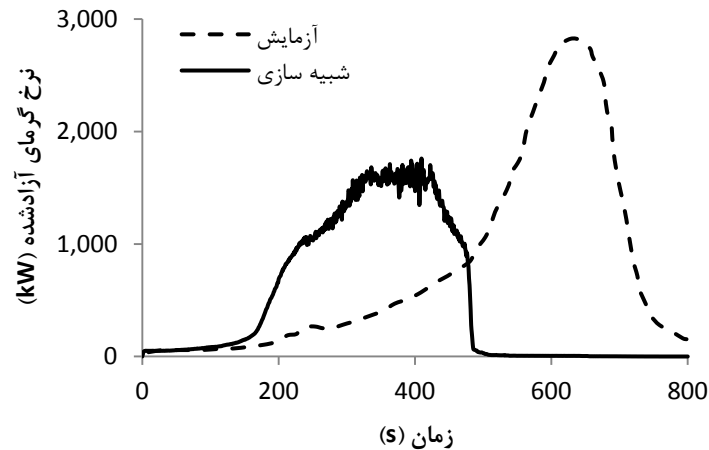
به دلیل عدم گسترش شعله در شبیه سازی اول، در حالت دوم، با وارد کردن گرمای واکنش و دمای مرجع، شعله بر روی کابل گسترش می یابد. در این حالت، مقدار گرمای واکنش و دمای مرجع به ترتیب برابر با گرمای تبخیر و دمای احتراق ماده پلی اتیلن یعنی 1750 و 370 kJ/kg درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است و واکنش احتراق به صورت غیر ایده آل لحاظ شده است. نمودار نرخ گرمای آزاد شده با زمان برای این شبیه سازی در شکل ۵ آمده است که روند افزایش گرمای آزاد شده و مقدار ماکزیمم آن اختلاف زیادی با داده های آزمایش دارد و بنابراین نیازی به بررسی داده های دما نمی باشد.



شکل ۵- مقایسه منحنی نرخ گرمای آزاد شده آزمایش با منحنی نرخ گرمای آزاد شده محاسبه شده با استفاده از شبیه سازی، گرمای واکنش برابر با گرمای تبخیر معادل با 1750 kJ/kg ، دمای مرجع برابر با دمای احتراق معادل با 370 $^{\circ}\text{C}$ و واکنش غیر ایده آل

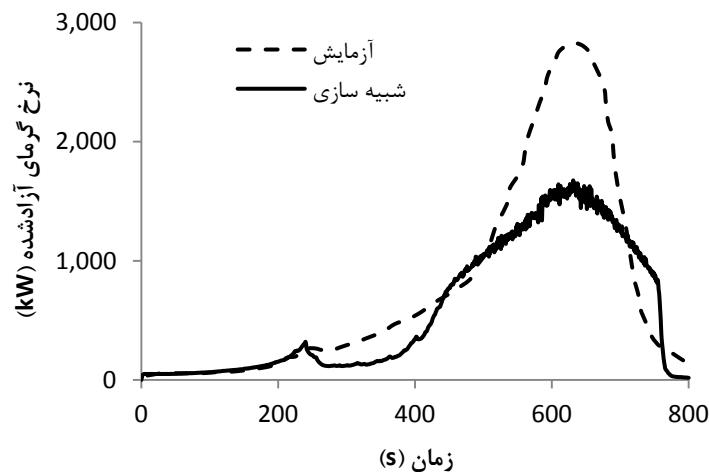
در حالت سوم شرایط شبیه سازی مشابه با حالت قبل در نظر گرفته می شود با این تفاوت که واکنش احتراق به صورت ایده آل انجام می شود که این امر باعث افزایش نرخ گرمای آزاد شده می شود. نمودار نرخ گرمای آزاد شده با زمان برای این شبیه سازی در شکل ۶ آمده است.

چنانچه مشاهده می شود با وجود افزایش مقدار ماکزیمم نرخ گرمای آزاد شده در این حالت نسبت به حالت دوم، زمان شروع آتش سوزی و افزایش گرمای آزاد شده به مراتب سریع تر از آزمایش پیش بینی گردیده است و اختلاف زیادی با داده های آزمایش دارد.

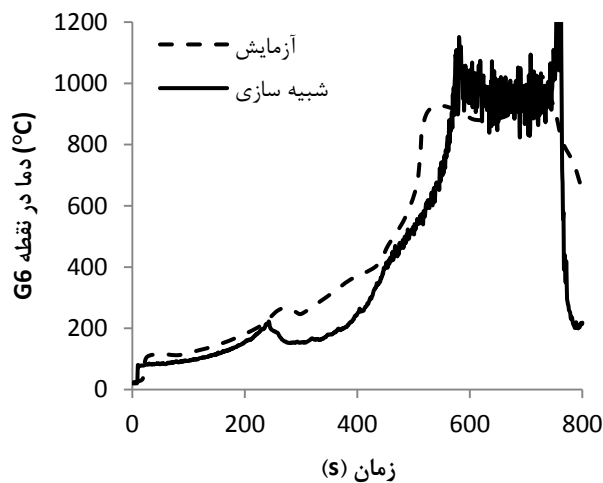
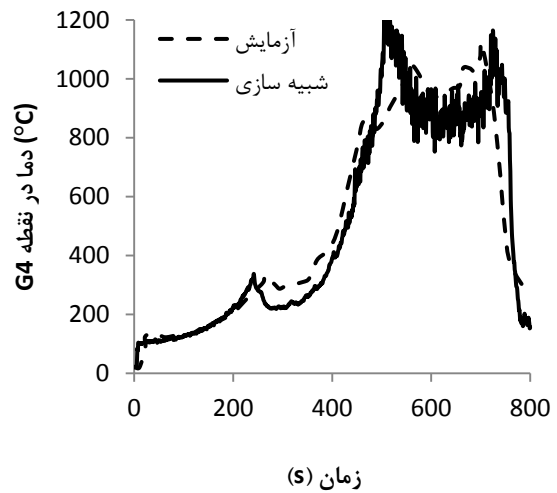
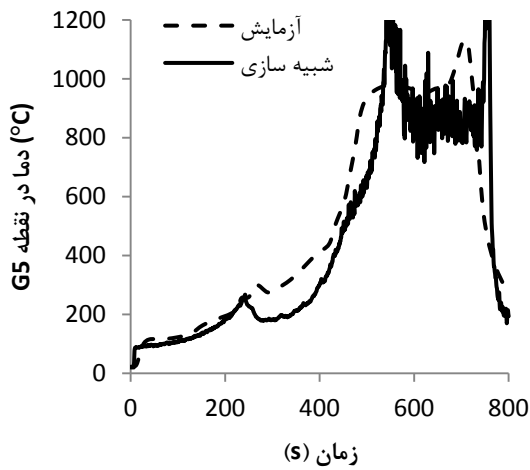
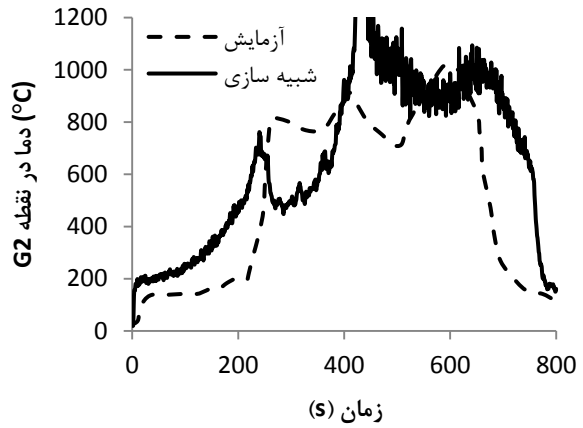
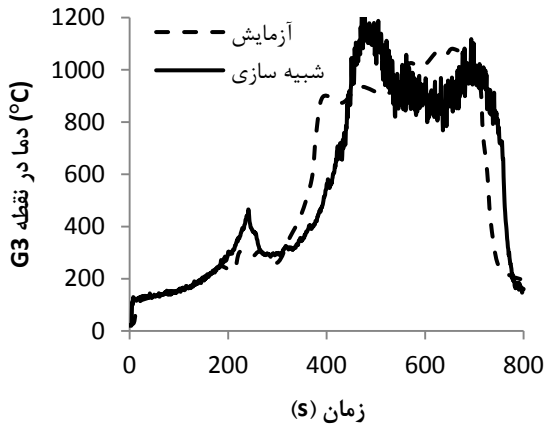


شکل ۶- مقایسه منحنی نرخ گرمای آزاد شده آزمایش با منحنی نرخ گرمای آزاد شده محاسبه شده با استفاده از شبیه‌سازی، گرمای واکنش برابر با گرمای تبخیر معادل با 1750 kJ/kg ، دمای مرجع برابر با دمای احتراق معادل با 370°C و واکنش ایده‌آل

از آنجایی که افزایش شدید نرخ گرمای آزاد شده و رسیدن به شرایط اشتعال ناگهانی (flash over) به معنی رسیدن مواد قابل اشتعال به دمای اشتعال می‌باشد، با بررسی نمودارهای شکل ۵ و شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که دمای اشتعال در آزمایش در مقایسه با شبیه‌سازی بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب برای انجام شبیه‌سازی در حالت چهارم، دمای مرجع بیش از دمای احتراق در حالات قبل در نظر گرفته شده است. روند رشد نرخ گرمای آزاد شده در شبیه‌سازی با رشد آن در حالت آزمایش مطابقت می‌نماید. در این شرایط دمای مرجع برابر با 410 درجه سانتیگراد گردیده است. در شکل ۷ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در شرایطی که گرمای واکنش برابر با 1875 kJ/kg می‌باشد و به صورت ایده‌آل اتفاق می‌افتد نشان داده شده است. در این شرایط با توجه به یکسان شدن روند رشد گرمای آزاد شده با شرایط موجود در آزمایش و با وجود اختلاف در حداکثر نرخ گرمای آزاد شده، منحنی تغییرات دما نیز در نقاط مختلف با نتایج آزمایش مقایسه گردیده که نتایج حاصل از آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷- مقایسه منحنی نرخ گرمای آزاد شده آزمایش با منحنی نرخ گرمای آزاد شده محاسبه شده با استفاده از شبیه‌سازی، گرمای واکنش معادل با 1875 kJ/kg ، دمای مرجع معادل با 410°C و واکنش ایده‌آل



شکل ۸- مقایسه داده های دمای ترموکوپل G2 تا G6 آزمایش با نتایج محاسبه شده با استفاده از شبیه سازی، گرمای واکنش معادل با 1875 kJ/kg ، دمای مرجع معادل با 410°C و واکنش ایده آل



FCCI2012-6020

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمودار نرخ گرمای آزاد شده و تغییرات دما در نقاط مختلف در ثانیه ۲۴۰ به مقدار کمی کاهش می‌یابند که به دلیل خاموش شدن مشعل در این لحظه و در نتیجه کاهش حرارت دریافت شده توسط مواد قابل اشتعال است و در نتیجه افت لحظه‌ای نرخ گرمای آزاد شده را در بر دارد. به دلیل اینکه نرخ گرمای آزاد شده در شبیه‌سازی کمتر از نرخ گرمای آزاد شده در آزمایش است، دمای حاصل از شبیه‌سازی در برخی نقاط کمی کمتر از دمای حاصل از آزمایش است. مقایسه بین داده‌های بدست آمده در آزمایش احتراق کابل و نتایج شبیه‌سازی در چهار حالت نشان می‌دهد که حالت ۴ بهترین مدل برای این آزمایش است. تطابق کلی بین داده‌ها و نتایج شبیه‌سازی در این حالت بطور قابل ملاحظه‌ای مناسب است. در این حالت، منحنی نرخ گرمای آزاد شده محاسبه شده، رشدی همانند رشد نرخ گرمای آزاد شده اندازه‌گیری شده دارد اما در مقدار ماکزیمم نرخ گرمای آزاد شده تفاوت وجود دارد: ماکزیمم نرخ گرمای آزاد شده اندازه‌گیری شده $2/8$ MW و ماکزیمم مقدار نرخ گرمای آزاد شده در نتایج شبیه‌سازی، $1/675$ MW می‌باشد. با وجود این، توزیع دما با چند استثناء کوچک بطور بسیار مناسبی با شبیه‌سازی در حالت ۴ مطابقت دارد.

۵- نتیجه‌گیری

گسترش آتش‌سوزی اهمیت زیادی در بحث ایمنی آتش دارد. در این مقاله به کمک شبیه‌سازی، گسترش آتش روی ۶ کابل که طول هر کدام ۶ متر می‌باشد و در یک محیط بسته قرار گرفته‌اند بررسی شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمایش مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که تعریف نرخ حرارت آزاد شده به عنوان ورودی برنامه شبیه‌ساز ممکن است ولی در عمل امکان مشاهده گسترش آتش‌سوزی از یک نقطه به نقطه دیگر میسر نمی‌باشد. در این حالت با دانستن میزان نرخ حرارت آزاد شده می‌توان نحوه توزیع دما و انتشار دود را بررسی نمود. اما با در نظر گرفتن ماده‌ای با جرم مشخص و با تعریف مناسب خواص احتراقی ماده می‌توان گسترش آتش از یک نقطه به نقطه دیگر جسم را بررسی و مشاهده نمود. در این تحقیق نیز با افزایش دمای مرجع که بیانگر دمای شروع اشتعال جسم می‌باشد، روند افزایش حرارت آزاد شده با زمان بطور کاملاً مشابه با آزمایش حاصل گردیده است. بنابراین در محیط‌های مختلف که بحث ایمنی آتش اهمیت دارد می‌توان گسترش آتش را شبیه‌سازی کرد. بدین ترتیب با روش استفاده شده در این مقاله می‌توان گسترش آتش‌سوزی روی سطوح مشابه را شبیه‌سازی نموده و بجای در نظر گرفتن تنها یک چشمه حرارتی، توزیع دما و انتشار دود را همزمان با گسترش آتش-سوزی مورد بررسی قرار داد.

مراجع

- 1- Williams, F.A., "Mechanisms of fire spread" Symposium (International) on Combustion (Elsevier B.V.) 16, no. 1 (1997): 1281-1294.
- 2- Quintiere, James G., "Fundamentals of fire phenomena" (John Wiley & Sons, LTD), 2006.
- 3- Orloff, L., de Ris, J., and Markstein, G.H., "Upward Turbulent Fire Spread and Burning of Fuel Surface" in 15th Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, PA, USA, 1974, pp.183-192.
- 4- Kwon, Jae-Wook, "Evaluation of FDS V.4: Upward Flame Spread", A Thesis Submitted to the Faculty of the WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Fire Protection Engineering, August 2006.
- 5- Wu, P.K., Orloff, L., and Tewarson A., "Assessment of Material Flammability with the FSG Propagation Model and Laboratory Test Methods", 13th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, NIST, USA, 1996.



چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



FCCI2012-6020

- 6- Prasad, Kuldeep, Kramer, Roland, Marsh, Nathan, Nyden, Marc, Ohlemiller, Tom, and Zammarano Mauro, "Numerical Simulation of Fire Spread on Polyurethane Foam Slabs", National Institute of Standard and Technology, USA, 2009.
- 7- Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, and Vaari, Jukka, "FDS simulation of fire spread-comparison of model results with experimental data", Published by VTT. 2004.
- 8- Turns, Stephen R., "An Introduction to Combustion, Concepts and Applications", Second Edition, McGraw-Hill, 2000.
- 9- Tannehill, John C., Anderson Dale A., and Pletcher, Richard H., "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", Second Edition (Taylor & Francis Publishers), 1997.
- 10- Smagorinsky J., "General Circulation Experiments with the Primitive Equations I. The Basic Experiment", Monthly Weather Review, Volume 91, Number 3, 1963.