

تأثیر اتلاف حرارت بر سرعت سوزش در انتشار شعله ابر ذرات ارگانیک

مهدى بيدآبادى' و فاطمه ابراهيمىنسب'

۱ – استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق، Bidabadi@iust.ac.ir ۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق (نویسنده مخاطب)، F.Ebrahiminasab@gmail.com

(دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۱ ، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۲/۲/۲ ، پذیرش: ۹۲/۴/۱۳)

در این کار، بهصورت تحلیلی، به مطالعه اثر اتلاف حرارت بر روی انتشار شعله پیش مخلوط پرداخته شده است. از یک مدل جدید نفوذی حرارتی، که در آن ساختار شعله به چهار ناحیه تقسیم شده و عدد دامکولر (نسبت نرخ واکنش شیمیایی به نرخ تبخیر ذرات ریز) و عدد زلدویچ (فرم بی بعد انرژی فعالسازی مخلوط واکنشگر) به عنوان پارامترهای اساسی درنظر گرفته شدهاند، برای بررسی تأثیر اتلاف حرارت در انتشار شعله در میان پیش مخلوط ذرات سوخت ارگانیک با توزیع یکنواخت استفاده شده است. در نهایت، با حل حالت پایدار، نتایج برای سرعت سوزش در شرایط متفاوت ارائه شده است و همان طور که انتظار می رفت اتلاف حرارت در کلیه موارد باعث کاهش سرعت سوزش شد که این کاهش به طور میانگین ۱۸ درصد محاسبه شد. در پایان، صحت نتایج با نتایج آزمایشگاهی موجود ارزیابی شده و با اختلاف ۳۱ درصد مورد قبول واقع شد.

كليدواژگان: اتلاف حرارت، ذرات ارگانيك، عدد دامكلر، سرعت سوزش

مقدمه

مطالعه برروی احتراق ابر ذرات ارگانیک از نظر مفهومی و کاربردی بسیار مهم است؛ از این منظر که با تحلیل ساختار اینگونه ابر ذرات، میتوان ایمنی دستگاههای مکش پنوماتیک انتقال خاک اره، خرده چوب، سایر ذرات احتراق پذیر و صنایعی چون نساجی، پوشاک، خوراک دام و عملیات شیمیایی و پلاستیکسازی را در برابر آتش های درونسوزِ مخازن و یا انفجار ذرات بر اثر ایجاد جرقه محافظت کرد.

تئوری انتشار شعلهٔ ابر ذرات در پراکندگی یکنواخت و بدون اثر جاذبه در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است[۲،۱]. در این دو مرجع پراکندگی یکنواخت ذرات بهصورت کلی فرض شده است. اساساً تجربیات آزمایشگاهی روی چنین سیستمهایی، بهدلیل رسوب ذرات در میدان گرانشی زمین، مشکل است. از این رو در این دو تحقیق فرض بر این است که مخلوط ذرات ریز جامد و هوا در شرایط فشار استاندارد و فاصله بین ذرات از طول نفوذی-واکنشی کوچکتر است. با فرض اخیر از عدم پیوستگی در احتراق ذرات صرفنظر شده است.

پروست[۴،۳] سرعت سوزش و ماکزیمم دمای شعله در چندین مخلوط احتراق پذیر از قبیل ابر ذرات لایکُپودیوم، ابر ذرات نشاسته و ابر ذرات سولفور با هوا را بر طبق یک کار تجربی بررسی کرده است و نتایج کار را با نتایج تئوری موجود مقایسه کرده و علت اختلافات موجود در مقادیر را ناشی از خطای آزمایش و همچنین اغتشاشات پدیدآمده در پیشانی شعله میداند. اِخوف[۵] در مقالهٔ خود به بیان شباهتها و تفاوتهای موجود بین انفجار ابر ذرات و گاز پرداخته است. همچنین بیدآبادی و رهبری[۶] مدلی را بر پایهٔ اختلاف دما بین ذرات ارگانیک و گاز ارائه کردهاند. علاوه بر این، بیدآبادی و همکاران[۷] توزیع سرعت و تراکم ذرات هنگام انتشار شعله در میان ابر میکروذرات آهن را نیز بهصورت تحلیلی مطالعه کردند. آنها با درنظر گرفتن معادله لاگرانژ در دینامیک میکروذرات آهن هنگام پیشروی شعلهٔ بالارونده در یک کانال و سپس با اعمال نیروهای متعدد وارد بر ذره، ازجمله نیروی ترموفورتیک، که بهدلیل گرادیان دمای حاصل از احتراق است، و نیروی وزن و شناوری، توزیع سرعت ذره نسبت به فاصله از جبههٔ شعله را تعیین کردند.

اتلاف حرارت به محیط موضوعی است که در بسیاری از تجهیزات احتراقی نقش بسیار مهمی در خاموشی شعله، محدودیتهای اشتعالپذیری و سرعت سوزش ایفا میکند. نقش ضخامت لوله روی خاموشی در انتشار شعله پیشمخلوط موضوعی بود که باریوز و همکارانش با یک مدل نفوذی-حرارتی به صورت عددی مطالعه کردند[۸]. در این کار اتلاف حرارت هدایتی به دیوارههای کانال درنظر گرفته شد و اثرات رابطه بین ضخامت و قطر لوله با انتشار سرعت شعله مطالعه شد و شرط خاموشی به عنوان تابعی از متغیر اتلاف حرارت به دست آورده شد.

مطالعه تحلیلی انجامشده در اینجا در چارچوب یک مدل نفوذی-حرارتی با فرض عدد لوییس غیرواحد است که با به کار بردن قانون فوریه و فیک برای نفوذ حرارت و جرم، معادلات حاکم بر سیستم احتراق ابر ذرات ارگانیک و با درنظر گرفتن اثر تلفات حرارتی و گرمای نهان تبخیر نوشته شده است. در اینجا ساختار شعله به چهار ناحیه تقسیم شده است؛ شامل یک ناحیه پیشگرم که در آن از نرخ واکنش صرفنظر شده است؛ یک ناحیه عریض تبخیر ذرات؛ یک ناحیه نازک حدی واکنش که جمله جابهجایی و جمله تبخیر ذرات سوخت مقدار کوچکی هستند و در آخر ناحیه پس از واکنش درنظر گرفته شده است. برای تحلیل متغیرهای ساختار شعله، در هر کدام از این نواحی شرایط مرزی و سازگاری مناسب اعمال شدند. آنالیز در حالت حدّی صورت گرفته و نتایج برای سرعت سوزش در شرایط متفاوت ارائه شده است.

مدل تئوری برای احتراق ذرات ارگانیک

در احتراق ذرات اگر نرخ تبخیر پایین تر از نرخ واکنش باشد، روند احتراق کند تر می شود. عامل کنترل کننده در اینجا نرخ تبخیر ذرات است. فرایند احتراق در سیستمهای شامل ذرات، یک فرایند تبخیری-نفوذی است نه یک فرایند واکنشی-نفوذی. توجه ویژه در این قسمت بررسی یک نمونه با عدد لوییس غیرواحد ($t \neq 1$) و با درنظر گرفتن گرمای نهان تبخیر است که در حقیقت این گرمای نهان به صورت یک محدودکننده عمل می کند، زیرا چند درصد از گرمای واکنش را می گیرد. در این کار از اثرات سورت و دافور ⁽ صرفنظر شده است. این اثرات بیان می کنند که اگر گرادیان دما موجب سرعت نفوذ حرارتی ^۲ شود، در نتیجه گرادیان غلظت هم می تواند یک شار حرارتی را فراهم کند. در اغلب نمونه ها این اثرات خیلی کوچکاند که اغلب صرفنظر می شوند، حتی در مواقعی که نفوذ حرارتی قابل صرفنظر کردن نیست [۹].

در این آنالیز فرض شده است که ذرات سوخت تبخیر میشوند و به صورت یک ترکیب گازی شناخته شده در می آیند و سپس
اکسید می شوند، به طوری که عدد لوییس به صورت زیر تعریف می شود:
(۱)

$$A$$
 ضریب هدایت مخلوط فاز گازی، D_m ضریب نفوذ جزء معین گازی و ρ چگالی مخلوط واکنشگر است.
 A ضریب هدایت مخلوط فاز گازی، T_m ضریب نفوذ جزء معین گازی و ρ چگالی مخلوط واکنشگر است.
 $R = \frac{E(T_f - T_u)}{RT_f^2}$
(۲)
 $Z = \frac{E(T_f - T_u)}{RT_f^2}$ معتد تمین دمای شواه و دمای مخلوط سوخته نشده است.

انرژی فعال سازی، R تابت جهانی کازها، f_{I} و $_{u}$ به ترتیب دمای شعله و دمای مخلوط سوخته نشده است. برای ساده سازی فرض شده که دمای ذرات تقریبا با دمای گاز برابر است و سینتیک شیمیایی با یک واکنش گرماده کلی تک مرحله ای بر مبنای قانون آرنیوس بیان می شود. $v_{F}[F] + v_{0,}[O_{2}] \rightarrow v_{prod}[P]$ (7)

1. Soret and Dufour

2. Thermal diffusion

$$\begin{split} \begin{split} \begin{split} & \sum_{n < 1} Q_n (P_n) (P_n$$

که ho و ho_s بهترتیب برابر چگالی مخلوط و چگالی ذرات سوختاند. همچنین r_p شعاع ذره جامد و n_s تعداد متوسط ذرات بر واحد حجم درنظر گرفته می شود.

^{1.} Pre-exponential

بىبعدسازى معادلات حاكم

برای بیبعد کردن معادلات حاکم میبایست که چند متغیر بیبعد درنظر گرفته شود. در ابتدا دمای بیبعد θ بهصورت زیر تعریف میشود:

$$\theta = \frac{T - T_u}{T_f - T_u} \tag{11}$$

که در آن T_f بیشینه دمای شعله در ناحیه واکنش است. اگر $\theta = 0$ باشد دمای مخلوط برابر دمای مخلوط نسوخته، و اگر $\theta = 1$ باشد آنگاه دمای مخلوط برابر بیشینه دمای شعله است. همچنین سرعت سوزش بیبعد، که برابر با نسبت سرعت سوزش مخلوط ذرات و هوا (U_f) به سرعت سوزش محاسبه شده در حالت صرفنظر کردن از گرمای نهان تبخیر ذرات سوخت (u_u) است به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{split} \hat{U}_{f} = & \frac{U_{f}}{U_{u}} \end{split} \tag{17} \\ & \text{algo} \\ & \text{algo} \\ \hat{x} = & \frac{x}{D_{h}/U_{u}} \quad , \quad \hat{t} = & \frac{t}{D_{th}/U_{u}^{2}} \end{aligned} \tag{17} \\ & \text{algo} \\ & \text{algo$$

درنهایت معادلههای بقای جرم و انرژی، یعنی معادلههای (۴) تا (۸)، با اعمال پارامترهای بیبعد مذکور بیبعد شده و بهصورت زیر در میآیند:

$$\frac{\partial Y_s}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial Y_s}{\partial \hat{x}} = -\hat{\omega}_{vap} \tag{19}$$

$$\frac{\partial Y_s}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial Y_g}{\partial \hat{x}} = \frac{1}{Le} \frac{\partial^2 Y_g}{\partial \hat{x}^2} + \hat{\omega}_{vap} - \hat{\omega}_{chem} \tag{19}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial \theta}{\partial \hat{x}} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \hat{x}^2} + \hat{\omega}_{chem} - q \hat{\omega}_{vap} - \frac{D}{U_u^2} \theta \tag{11}$$

$$\hat{\omega}_{chem} = \frac{D_{th}}{U_u^2} k Y_g \exp\left[\frac{-Ze(1-\theta)}{1-\alpha(1-\theta)}\right] \tag{19}$$

$$\dot{\omega}_{vap} = \frac{s}{Da} H(\theta - \theta_{v})$$

$$q = \frac{Q_{v}}{Q}$$
((1))

$$D' = \left(\frac{\lambda}{\rho C d}\right)^2 b' \tag{17}$$

$$Da = rac{\dot{\omega}_{chem}}{\dot{\omega}_{vap}} = rac{ au_{vap}}{ au_{chem}}$$

$$\alpha$$
 در معادلهٔ (۱۹) بیانگر نسبت دمایی است که به صورت زیر تعریف می شود:
$$\alpha = \frac{T_f - T_u}{T_f}$$

در معادله (۲۰)، θ به صورت زیر درنظر گرفته می شود:

$$\theta_{v} = \frac{T_{v} - T_{u}}{T_{f} - T_{u}} \tag{Y\Delta}$$

در این دمای بیبعد شده تبخیر ذرات ریز جامد ارگانیک شروع می شود. شایان ذکر است که در این مقاله برای ساده کردن محاسبات $U_f = U_u$ یعنی $U_f = U_f$ فرض می شود. در معادلهٔ (۱۹)، k نرخ کلی ثابت واکنش و برابر ($\hat{U}_f = I RT_f$ است. مرتبهٔ بزرگی عدد دامکولر تابع شدیدی از اندازهٔ ذرات است. مهم ترین محدودیت این مدل 1> Da یا ذرات بسیار ریز است که مرتبهٔ بزرگی عدد دامکولر تابع شدیدی از اندازهٔ ذرات است. مهم ترین محدودیت این مدل 1> مع یا ذرات بسیار ریز است که مرتبهٔ بزرگی عدد دامکولر تابع شدیدی از اندازهٔ ذرات است. مهم ترین محدودیت این مدل 1> مع یا ذرات بسیار ریز است که مرتبهٔ بزرگی عدد دامکولر تابع شدیدی از اندازهٔ ذرات است. مهم ترین محدودیت این مدل 1> مع یا ذرات بسیار ریز است که این فرض اخیر بر این امر دلالت می کند که ذرات زودتر در ناحیهٔ نسوخته تبخیر می شوند، در حالی که هنوز انبساط گاز یعنی مرحلهٔ واکنش شیمیایی ضعیف است. عدد دامکولر کوچکتر از واحد بیانگر این مطلب است که نرخ تبخیر مم مراتب بزرگ تر از نرخ واکنش شیمیایی است و در این صورت واکنش به علم کنترل کننده واکنش یعنی نرخ تبخیر محدود می زرخ می شود.

حل پایای معادلات بیبعد حاکم

در ادامه حل پایدار معادلات بیبعد بقای سیستم، یعنی معادلات (۱۶) تا (۱۸)، ارائه میشود:

برای آنالیز تحلیلی ساختار شعلهٔ ابر ذرات ریز ارگانیک، چهار ناحیه پیوسته به ترتیب زیر درنظر گرفته شده است (قابل توجه آنکه در حالت حدی $\infty + - Ze$ ، نرخ واکنش در تمام نواحی درنظر گرفته شده برای ساختار شعلهٔ ابر ذرات ریز ارگانیک مقدار بسیار کوچکی است که از آن صرفنظر می شود، مگر در یک ناحیهٔ حدی کوچک در مجاورت x = 0 که در آن ناحیه $\theta = 1$ است):

ناحیه I:
$$\{\hat{x}, -\infty - \hat{x}\}$$
، که \hat{x}_{ν} نقطهٔ بی بعد آغازِ تبخیر در دمای بی بعد θ است.
ناحیه II: $\{\hat{x}, \leq \hat{x} < \hat{x}\}$ ، فرض بر این است که تبخیر ذرات ریز ارگانیک در حال انجام است.
ناحیه III: $\{\hat{x}, \leq \hat{x} < 0^-\}$ ، ناحیه حدی نازکی است که در آن احتراق صورت می گیرد. جملههای تبخیر و جابهجایی در
مقایسه با جملههای واکنش و نفوذ کوچک فرض می شوند. سرعت سوزش از آنالیزکردن ساختار این ناحیه به دست می آید.
ناحیه IV: $\{P^+ < \hat{x} < 0^+\}$ ، ناحیهٔ پس از واکنش که گازهای سوخته شده در حال تعادل می باشند.
شکل ۱ نواحی درنظر گرفته شده برای ساختار شعلهٔ ابر ذرات ریز ارگانیک را نشان می دهد.



شکل ۱- ساختار شعله ابر ذرات ارگانیک (منحنیهای ۲ و ۲ بیانکننده تغییرات دما و کسرجرمی سوخت در مسیر انتشار شعلهاند.)

در مرزهای این نواحی، شرایط مرزی و شرایط سازگاری ⁽ درنظر گرفته شده است که در ادامۀ روند تحلیل ساختار شعله،
شرایط مرزی و سازگاری برای مرز نواحی چهارگانه بهصورت زیر ارائه میشود.
برای مرز چپ ناحیۀ I شرایط مرزی موجود برابر است با:
(۲۶)
(۲۶)

$$at \hat{x} = \hat{x}, = 0, \theta = 0$$

 $((73))$
 $b = 0, \theta = 0, \theta = 0$
 (74)
 $b = 0, \theta = 0$
 (74)
 (74)
 (74)
 (75)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (75)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 (74)
 $($

میدان دما:

میدان دما: از آنجا که جمله واکنش نسبت به جملههای جابهجایی و نفوذ در نواحی I و II قابل صرفنظر است از این رو با حل معادله از شهر داری. انرژی داریم:

$$\theta = c_1 \exp(\kappa'_1 \hat{x}) + c_2 \exp(\kappa'_2 \hat{x})$$

$$\begin{cases} \hat{x} \to -\infty \Rightarrow \theta = 0 \\ \hat{x} = \hat{x}_v \Rightarrow \begin{cases} \theta = \theta_v \\ [\frac{d\theta}{d\hat{x}}] = 0 \end{cases} \begin{cases} c_2 = 0 \\ c_1 = d_1 - \frac{(\frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)})(1/Da + \kappa'_2)}{(\sqrt{1 + 4(D'/U_u^2)})\exp(\kappa'_1 \hat{x}_v)} \end{cases}$$

$$(\ref{eq:constraint})$$

که

$$\kappa_{1}' = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(D'/U_{u}^{2})}}{2} \tag{(1)}$$

$$\kappa_{2}' = \frac{1 - \sqrt{1 + 4(D'/U_{u}^{2})}}{2} \tag{(77)}$$

1. Matching condition

$$d_{1} = 1 - \left(\frac{q / Da}{(1 / Da)^{2} + (1 / Da) - (D' / U_{u}^{2})}\right) \exp(\hat{x}_{v} / Da) + \frac{\left(\frac{q / Da}{(1 / Da)^{2} + (1 / Da) - (D' / U_{u}^{2})}\right)(1 / Da + \kappa_{1}')}{\sqrt{1 + 4(D' / U_{u}^{2})}}\exp(\kappa_{2}'\hat{x}_{v})}$$
(77)
$$(1 / Da)^{2} + (1 / Da) - (D' / U_{u}^{2}) \exp(\hat{x}_{v} / Da) + \frac{(1 / Da)^{2} + (1 / Da) - (D' / U_{u}^{2})}{\sqrt{1 + 4(D' / U_{u}^{2})}}\exp(\kappa_{2}'\hat{x}_{v})}$$

$$\theta = c_1 \exp(\kappa_1' \hat{x}) = c_1 \exp(\kappa_1' \cdot \frac{\rho U_f C}{\lambda} x)$$
(34)

با استفاده از شرط مرزی (۲۷) نقطهای که تبخیر ذرات آغاز میشود برابر است با:

$$\hat{x}_{v} = (1/\kappa_{1}')\ln(\theta_{v}/c_{1})$$
(70)
$$(\pi)$$

$$(\pi$$

کسر جرمی سوحت فاز گازی در این ناحیه، با صرفنظر کردن از جملههای تبحیر و واکنش درمعادله (۱۷) و در نهایت
حل آن بهدست میآید:
$$Y_a = c_1 + c_2 \exp(Le.\hat{x})$$

با توجه به شرط مرزی (۲۶) مقدار $c_1=0$ می شود و مقدار c_2 از شرط سازگاری مرز نواحی اول و دوم در ادامه روند حل حاصل خواهد شد.

ناحيهٔ II (ناحيه تبخير ذرات)

در این ناحیه فرض بر این است که ذرات سوخت ابتدا تبخیر میشوند و بهصورت یک ترکیب گازی شناخته شده در میآیند و سپس اکسید میشوند. همچنین، همانطور که گفته شد، در این ناحیه از جمله واکنش در مقایسه با جملههای جابهجایی و نفوذ و ترم تبخیر صرفنظر میشود. از این رو برای میدان دما در این ناحیه داریم:

$$\theta = c_3 \exp(\kappa_1' \hat{x}) + c_4 \exp(\kappa_2' \hat{x}) + \left(\frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)}\right) \exp(-(\hat{x} - \hat{x}_v)/Da)$$

$$\begin{cases} \hat{x} \to 0^- \Rightarrow \theta = 1 \\ \hat{x} = \hat{x}_v \Rightarrow \theta = \theta_v \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_4 = -\frac{(\frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)})(1/Da + \kappa_1')}{\sqrt{1 + 4(D'/U_u^2)}} \exp(\kappa_2' \hat{x}_v) \\ c_3 = 1 - (\frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)})\exp(\hat{x}_v/Da) - c_4 \end{cases}$$
(7%)

با توجه به معادلات (۱۶) و (۲۰) و خاصیت تابع هویساید، کسر جرمی ذرات ریز جامد در این ناحیه برابر است با:
$$Y_s = \exp\left\{-\frac{(\hat{x}-\hat{x}_v)}{Da}\right\}$$
(۳۹)

است. $(\hat{x}_s = 0^-)$ است. احیهٔ واکنش و ناحیهٔ تبخیر ($\hat{x}_s = 0^-$) مفر نیست و برابر با

علاوه بر این، در این ناحیه با جایگذاری معادله (۳۹) در رابطهٔ (۲۰) و قراردادن عبارت حاصل در معادله (۱۷) و حذف جمله واکنش از معادلهٔ مذکور، کسر جرمی سوخت گازی حاصل از تبخیر ذرات مطابق رابطه (۴۰) حاصل میشود.

$$Y_{g} = b_{1} + b_{2} \exp(Le.\hat{x}) - \frac{1}{(1 + 1/Le.Da)} \exp\left(-\frac{\hat{x} - \hat{x}_{v}}{Da}\right)$$
(*•)

www.SID.ir

همچنین، با استفاده از رابطهٔ (۳۷) و اعمال شرط سازگاری نواحی اول و دوم در نقطهٔ $\hat{x} = \hat{x}_v$ برای $Y_g/d\hat{x}$ و $d\hat{x}_g/d\hat{x}$ ، دو رابطهٔ جدید حاصل می شود که با درنظر گرفتن رابطهٔ (۴۰) با حل دستگاه سه معادله سه مجهول ضرایب ثابت مطابق زیر تعیین می شوند:

$$b_1 = 1 \tag{(f1)}$$

$$b_2 = (1 + 1/Le.Da)^{-1} \cdot \exp(\hat{x}_v/Da) - 1$$
(F7)

$$c_{2} = \exp(-Le\,\hat{x}_{v})\{1 - (1 + 1/Le\,.Da)^{-1} + \exp(Le\,\hat{x}_{v}) \times \left\langle -1 + (1 + 1/Le\,.Da)^{-1}\exp(\hat{x}_{v}/Da) \right\rangle\}$$
(FT)

حال، با گذاشتن رابطهٔ (۴۳) در عبارت (۳۷)، کسر جرمی سوخت فاز گازی در ناحیهٔ اول برابر است با:

$$Y_{g} = \{1 - (1 + 1/Le.Da)^{-1} + \exp(Le.\hat{x}_{v}) \langle -1 + (1 + 1/Le.Da)^{-1} \exp(\hat{x}_{v}/Da) \rangle \} \times \exp(Le(\hat{x} - \hat{x}_{v}))$$
(۴۴)

همچنین، با جایگذاری روابط (۴۱) و (۴۲) در عبارت (۴۰)، کسر جرمی سوخت فاز گازی در ناحیهٔ دوم بهصورت زیر است:

$$Y_{g} = 1 + \{-1 + (1 + 1/Le.Da)^{-1} \exp(\hat{x}_{v}/Da)\} \exp(Le.\hat{x}) - (1 + 1/Le.Da)^{-1} \times \exp\left(-\frac{\hat{x} - \hat{x}_{v}}{Da}\right)$$
(۴۵)

ناحيه IV (ناحيه پس از واکنش)

قبل از آنکه به محاسبهٔ ناحیهٔ واکنش پرداخته شود، بهدلیل سادگی، متغیرهای ناحیهٔ پس از واکنش (∞+ > x̂ < +[∞])، که در برگیرندهٔ گازهای سوختهشدهٔ حاصل از احتراق است، مطابق زیر ارائه میشود:

$$\theta = c_5 \exp(\kappa_1'\hat{x}) + c_6 \exp(\kappa_2'\hat{x})$$

$$\begin{cases} \hat{x} \to \infty \Rightarrow \theta = 0 \\ \hat{x} \to 0 \Rightarrow \theta = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_5 = 0 \\ c_6 = 1 \end{cases}$$

$$Y_{-} \cong cte , Y_{-} = 0$$

$$(fy)$$

 Y_s از شرط سازگاری نتیجه گرفته می شود که کسر جرمی ذرات جامد در ناحیه پس از واکنش تقریباً برابر است با مقدار x_s در پایان ناحیه تبخیر ($\hat{x} = 0^-$).

ناحية III (ناحيه واكنش)

در این مرحله از حل به تحلیل ناحیهٔ واکنش ($\hat{x} \leq 0^+ > \hat{x} \geq 0$) پرداخته می شود که در نهایت منجر به ارائه فرمولی برای محاسبهٔ سرعت سوزش مخلوط ذرات ریز ارگانیک و هوا می شود. در این ناحیه جمله های جابه جایی و تبخیر در معادلات بقا در مقایسه با جمله های نفوذ و واکنش مقادیری قابل صرفنظر کردن هستند. مرای تحلیل ساختار این ناحیه و به منظور بسط آن، ابتدا عبارت های زیر تعریف می شوند: $\hat{x} = \mathcal{E}\xi$, $Y_e = \mathcal{E}(s+y)$, $\theta = 1 - \mathcal{E}r$

که
$$S = Y_g \Big|_{\hat{x}=0^-} / \varepsilon$$
 و $\mathcal{E} = 1/Ze$ پارامتر بسط و مقدار بسیار کوچکی هستند.

در نهایت با استفاده از عبارتهای (۴۸) و جایگذاری مقادیر $k, \varepsilon, D_{th} = \lambda / \rho C$ ، که پیش از این دربارهٔ مقادیر آنها بحث شد، سرعت سوزش مخلوط ابر ذرات ریز ارگانیک و هوا طبق رابطهٔ ضمنی (۴۹) تعیین می شود.

$$\frac{2\lambda B}{U_u^2 \rho C Z e^2} \times [Ze \langle 1 + \{-1 + (1 + 1/Le . Da)^{-1} \exp(\hat{x}_v / Da)\} \exp(-Le . Ze^{-1}) - (1 + 1/Le . Da)^{-1} \exp\left(\frac{Ze^{-1} + \hat{x}_v}{Da}\right) \rangle + Le] \times \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - (c_3 \kappa_1' + c_4 \kappa_2' - (\frac{q / Da}{(1 / Da)^2 + (1 / Da) - (D' / U_u^2)})(1 / Da) \exp(\hat{x}_v / Da))^2 = 0 \quad (\$9)$$

بررسي و تفسير نتايج

در این قسمت به ارائه نتایج حالت پایا برای متغیرهای ساختار شعله پرداخته می شود و تأثیر تلفات حرارتی بر روی دمای بیبعد مخلوط، کسر جرمی سوخت در فاز جامد، کسر جرمی سوخت در فاز گازی حاصل از تبخیر ذرات و سرعت سوزش ارائه و صحت نتایج با منابع موجود سنجیده می شود. به منظور بررسی صحت مدل جدید ارائه شده، مقایسه ای بین نتایج به دست آمده از تحلیل حالت پایای موجود با دادههای آزمایشگاهی[۴] و تحلیلی[۱۰] صورت می گیرد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، محاسبهٔ سرعت سوزش به عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات با درنظر گرفتن تأثیر تلفات حرارتی تطابق قابل قبولی با اختلاف ۳۱ درصد با دادههای آزمایشگاهی ارائهشده توسط پروست[۴] در مورد ذرات ارگانیک لایکوپودیم دارد. این نمودار نشان میدهد که با افزایش تراکم جرمی ذرات سرعت سوزش نیز افزایش می یابد.

شایان ذکر است که ذره لایکوپودیم بهدلیل خاصیت تکسایزی (بودن بهعنوان مرجع در احتراق ذرات ارگانیک استفاده می شود؛ به این معنی که بازه قطر ذرات آن بسیار کوچک است. برخی از خصوصیات این ذره در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- مقایسه بین سرعت سوزش بهدست آمده از مدل تحلیلی حاضر با درنظر گرفتن اثر تشعشع حرارتی[۱۲] و تلفات و نتایج آزمایشگاهی انتشاریافته در مرجع [۴] به صورت تابعی از تراکم جرمی ذرات لایکوپودیم

| جدول ۱- مقایسه برخی خصوصیات دره لایکوپودیم | | | | |
|--|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------|
| متوسط قطر | چگالی | ضريب هدايت حرارتي | ظرفیت گرمایی | دمای اشتعال |
| $\mathfrak{r} \cdot - \mathfrak{r} \mathfrak{r} (\mu m)$ | $\Delta \cdot \cdot (\text{ gr/m}^3)$ | $\tau/\Delta e^{-4}$ (cal/cm.s.k) | ۰/۳۱ (cal/gr.k) | ۸۹·(°C) |

تأثیر تلفات حرارتی بر ساختار شعله

شکل ۳ نشان میدهد که سرعت سوزش بهعنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات با افزایش عدد لوییس از ۰/۷ به ۱/۵ افزایش مییابد. همانطور که در قسمت قبل هم بیان شد، این موضوع با توجه به تعریف عدد لوییس بهصورت نسبت ضریب نفوذ حرارت به نفوذ جرم توجیه میشود، اما آنچه در این شکل بیشتر قابل توجه است بررسی تأثیر اتلاف حرارت بر سرعت سوزش و مقايسه آن با تأثير تشعشع [١٢] بهعنوان يك عامل موثر است. همان طور كه انتظار مىرود، اتلاف حرارت باعث كاهش سرعت سوزش می شود. این کاهش برای حالتی که عدد لوئیس ۰/۷ درنظر گرفته شده است، برابر ۸ درصد و برای عدد لوئیس ۱/۵

^{1.} Monodispersed

برابر ۲۰ درصد است، که البته به ضریب اتلاف حرارت که با [']b نشان داده می شود هم بستگی خواهد داشت. به عبارتی، با کاهش این ضریب، اتلاف حرارت اهمیت کمتری پیدا کرده و به نسبت سرعت سوزش هم کمتر کاهش می یابد، چنانکه برای ضریب اتلاف حرارت ^{'b} برابر ۲۵، در حالتی که عدد لوئیس ۱/۵ است، مقدار کاهش سرعت سوزش ۱۵ درصد می شود. مقدار کاهش سرعت سوزش با درنظر گرفتن ضریب ^{'b} برابر ۱۵۰ و دقیقاً برای همان عدد لوئیس ۱/۵ برابر ۲۰ درصد می شود و می توان گفت که میزان کاهش سرعت سوزش برای ^b برابر ۱۵۰، ۵ درصد کمتر است.



شکل ۳- بررسی اثر تشعشع حرارتی[11] و تلفات بر روی سرعت سوزش مخلوط بهصورت تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک بهازای اعداد لوییس متفاوت در حالت 0.2 , Da = 0.2 م او سرعت سوزش می او او سرع او سرع او تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک

همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، روند نمودار سرعت سوزش به عنوان تابعی از غلظت ذرات با افزایش عدد دامکولر از ۰/۱ به ۰/۹ در 0.5 = 0.4, Le = 0.4, Le = 1.5 شکل نزولی به خود می گیرد، دلیل آن این است که افزایش عدد دامکلر بیان کننده افزایش نرخ واکنش است و با توجه به تعریف عدد دامکولر تبخیر به درستی صورت نمی گیرد. پس سوخت گازی حاصل از تبخیر ذرات ارگانیک نمی تواند تأمین کننده نرخ بالای واکنش باشد و جریان واکنشی موجود با نرخ تبخیر کنترل و سرعت سوزش کاهش می یابد. همان طور که قابل مشاهده است، اتلاف حرارت موجب کاهش سرعت سوزش در حدود ۱۲ درصد می شود.

نکته دیگری که میتوان از مقایسه دو شکل ۴ و ۳ به آن رسید اهمیت تغییر عدد دامکولر و عدد لوییس است. به بیان روشن تر، با افزایش عدد دامکلر از ۲/۱ به ۹/۹ و عدد لوییس از ۲۷/۵ به ۱۸/۵ که تقریباً به یک میزان افزایش مییابند، مشاهده میشود که میزان کاهش سرعت سوزش در حالت اول از میزان افزایش سرعت سوزش در حالت دوم ۸ درصد کمتر است. میشود که میزان کاهش سرعت سوزش در حالت اول از میزان افزایش سرعت سوزش در حالت دوم ۹ درصد کمتر است. افزایش عدد دامکلر از ۲/۱ به ۲/۵ به در حالت اول از میزان افزایش مییابند، مشاهده میشود که میزان کاهش سرعت سوزش در حالت اول از میزان افزایش سرعت سوزش در حالت دوم ۹ درصد کمتر است. چنانکه با افزایش عدد لوئیس از ۲/۱ به ۲/۵ به ۱۸ درصد کمتر است. افزایش عدد دامکلر از ۲/۱ به ۲/۱ به مان خریب اتلاف حرارت ۱۵۰ میزان افزایش سرعت سوزش ۴ درصد و با افزایش عدد دامکلر از ۲/۱ به ۲/۱ به مان خریب اتلاف حرارت ۱۵۰ میزان کاهش سرعت سوزش ۴ درصد است، که خود افزایش عدد دامکلر از ۲/۱ به ۲/۱ به مان خریب اتلاف حرارت ۱۵۰ میزان کاهش سرعت سوزش ۴ درصد است، که خود بیان کننده اهمیت نسبت نفوذ حرارت و نفوذ جرم است در مقابل نسبت نرخ واکنش به نرخ تبخیر در سرعت سوزش.

در ادامه اثر دمای بیبعد در نقطهٔ آغاز تبخیر بر روی سرعت سوزش بهعنوان تابعی از غلظت جرمی ذرات با درنظر گرفتن جملههای اتلاف حرارت در شکل ۵ بررسی میشود. مطابق با این شکل، اتلاف حرارت در این حالت به طور میانگین موجب کاهش سرعت سوزش در حد ۱۶ درصد میشود. نکته دیگر اینکه با افزایش _۴٫۵ از ۰/۱ به ۲/۴ سرعت سوزش ۷ درصد کاهش میابد، زیرا همانطور که در قسمت قبل بیان شد افزایش دمای بیبعد آغاز تبخیر ذرات این مفهوم را میرساند که برای شروع تبخیر احتیاج به دمای بالاتری است. این موضوع باعث نزدیکشدن نقطهٔ آغاز تبخیر به ناحیهٔ واکنش میشود که با این اتفاق دیگر فرصت چندانی برای تبخیر ذرات و تأمین سوخت گازی کافی برای واکنش وجود ندارد که این سری از عوامل موجب کاهش سرعت سوزش میشود. از نکات دیگر مشهود در این شکل اینکه با درنظر گرفتن تشعشع حرارتی[۱۲] القاشده از مرز شعله به درون نواحی نسوخته U_f در θ ثابت افزایش مییابد. در حقیقت پیشگرمایش تششع حرارتی موجب بهبود روند تبخیر ذرات ارگانیک میشود. دیگر آنکه درنظر گرفتن اتلاف حرارت به دلیل مقدار گرمایی که به محیط منتقل میشود باعث بهتأخیر افتادن آغاز فرآیند تبخیر و در نتیجه کاهش سرعت سوزش میشود.



شکل ۴- بررسی اثر تشعشع حرارتی[17] و تلفات بر روی سرعت سوزش مخلوط بهصورت تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک بهازای اعداد دامکولر متفاوت و در حالت $0.4 = 1.5, \; heta_{\mu} = 0.4$



شکل ۵- بررسی اثر تشعشع حرارتی[۱۲] و تلفات بر روی سرعت سوزش مخلوط بهصورت تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک برای اعداد متفاوت در دمای بیبعد آغاز تبخیر در حالت 10.9 *Le* 2, *Da*

دمای بیبعد مخلوط بهعنوان تابعی از طول بیبعد ساختار شعله در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق با این شکل درنظر گرفتن اتلاف حرارت باعث افت ده درصدی توزیع دما در نواحی پیش گرم و تبخیر ($\hat{x} \leq 0 = \hat{x} > \infty$) می شود در مقایسه با دمای مخلوطی که اثر اتلاف حرارت در آن اعمال نشده است.



شکل ۶- بررسی تلفات و تشعشع حرارتی[۱۲] بر روی دمای بیبعد مخلوط در طول بیبعد ساختار شعله

در شکل ۷ اثر اتلاف حرارت بر روی کسر جرمی ذرات سوخت ارگانیک در طول بیبعد ساختار شعله با حالتی که از جمله اتلاف حرارت صرفنظر شده[۶] و همچنین حالتی که اثر تشعشع حرارتی درنظر گرفته شده[۱۲] مقایسه شده است. همانطور که پیش از این در شکل ۶ ذکر شد، با درنظر گرفتن اتلاف حرارت توزیع دما در طول ساختار شعله در نواحی نسوخته دچار افت میشود. از این رو شروع تبخیر ذرات ارگانیک کندتر صورت می گیرد و از نظر مکانی به ناحیه واکنش نزدیکتر می شود.



شکل ۷- بررسی تشعشع حرارتی[۱۲] و تلفات بر روی کسر جرمی سوخت در فاز جامد در طول بیبعد ساختار شعله در شرایط $heta_v=0.25$, Da=0.5

۴- جمعبندی و نتیجه گیری

در این کار، بهصورت تحلیلی به مطالعه تأثیر اتلاف حرارت بر انتشار شعله پرداخته شده است. در بخش نخست این بررسی، یک مدل ریاضی در چارچوب مدل نفوذی-حرارتی ارائه شد؛ معادلات حاکم بر سیستم احتراق ابر ذرات نوشته شد و اثرات اتلاف حرارت به محیط و گرمای نهان تبخیر نیز در نظر گرفته شد. در پایان، با حل حالت پایا، نتایج برای کسر جرمی سوخت در فاز جامد، کسر جرمی سوخت در فاز گازی حاصل از تبخیر ذرات و سرعت سوزش ارائه شد و صحت نتایج با نتایج انتشاریافته توسط دیگر محققان بررسی شد. در زیر خلاصهای از نتایج بهدست آمده بیان می شود.

در حضور اتلاف حرارت، مقدار گرمایی که به محیط منتقل میشود باعث بهتأخیر افتادن آغاز فرآیند تبخیر و در نتیجه کاهش سرعت سوزش میگردد که البته این موضوع به ضریب اتلاف حرارت نیز بستگی خواهد داشت. به عبارتی با افزایش این ضریب، اتلاف حرارت اهمیت بیشتری پیدا کرده و به نسبت سرعت سوزش نیز بیشتر کاهش پیدا میکند.

اعداد لوییس و دامکولر عواملی تاثیرگذار بر روی احتراق ابر ذرات ارگانیکاند. براساس تعریف عدد دامکولر، که نسبتی بین نرخ واکنش و نرخ تبخیر ذرات است، با افزایش عدد دامکولر، سهم واکنش از تبخیر ذرات بالاتر میرود. در نتیجه میزان سوخت گازی حاصل از تبخیر ذرات قادر به تأمین نرخ بالای واکنش نخواهد بود و جریان واکنشی موجود با نرخ تبخیر کنترل و سرعت سوزش به میزان ۱۷ درصد کاهش مییابد. همچنین، با افزایش عدد لوییس، مقدار سرعت سوزش افزایشی در حد ۱۲درصد پیدا میکند، چراکه با افزایش عدد لوییس سهم پخش حرارت مقدار قابل توجهی میشود که این حالت خود موجب بهبود تبخیر ذرات و ارتقای سرعت سوزش میشود.

با افزایش دمای بیبعد آغاز تبخیر ذرات ($heta_{v}$) مقدار سرعت سوزش به میزان ۷ درصد کاهش پیدا میکند، چراکه افزایش دمای بیبعد آغاز تبخیر ذرات این مفهوم را میرساند که برای شروع تبخیر به دمای بالاتری احتیاج است. این موضوع باعث نزدیکشدن نقطهٔ آغاز تبخیر به ناحیهٔ واکنش میشود که با این اتفاق دیگر فرصت چندانی برای تبخیر ذرات و تأمین سوخت گازی کافی برای واکنش وجود ندارد که این مسئله موجب کاهش سرعت سوزش میشود.

منابع

- O. S. Han, M. Yashima, T. Matsuda, H. Matsui, A. Miyake and T. Ogawa, "Behaviour of Flame Propagating through Lycopodium Dust Clouds in a Vertical Duct," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13, 2000, pp. 449-457.
- 2. M. Bidabadi and A. Rahbari, "Modeling Combustion of Lycopodium Particles by Considering the Temperature Difference Between the Gas and the Particles," *Combustion Eexplosion and Shock Waves*, 45, 2009, pp. 49-57.
- 3. C. Proust, "A Few Fundamental Aspects about Ignition and Flame Propagation in Dust Clouds," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 2006, pp. 104-120.
- 4. C. Proust, "Flame Propagation and Combustion in Some Dust-Air Mixtures," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 2006, pp. 89-100.
- 5. R. K. Eckhoff, "Differences and Similarities of Gas and Dust Explosions: A Critical Evaluation of the European 'ATEX' Directives in Relation to Dusts," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 2006, pp. 553-560.
- 6. M. Bidabadi and A. Rahbari, "Novel Analytical Model for Predicting the Combustion Characteristics of Premixed Flame Propagation in Lycopodium Dust Particles," *J. Mech. Sci. Technol.*, 23, 2009, pp. 2417-2423.
- M. Bidabadi, A. Haghiri and A. Rahbari, "Mathematical Modeling of Velocity and Number Density Profiles of Particles Across the Flame Propagation through a Micro-Iron Dust Cloud," *Journal of Hazardous Materials*, 176, 2010, pp. 146-153.
- 8. E. Barrios, J. Prince and C. Trevino, "The Role of Duct Thickness on the Quenching Process of Premixed Flame Propagation," *Combustion Theory and Modelling*, 12, 2008, pp. 115-133.
- 9. F. Williams, Combustion Theory, 2th Edn, Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1985.
- 10. K. Seshadri, A. L. Berlad and V. Tangirala, "The Structure of Premixed Particle-Cloud Flames," *Combustion and Flame*, 89, 1992, pp. 333-342.
- J. Daou and M. Matalon, "Influence of Conductive Heat-Losses on the Propagation of Premixed Flames in Channels," Combustion and Flame, 128, 2002, pp. 321-339.
- 12. A. Haghiri and M. Bidabadi, "Modeling of Laminar Flame Propagation through Organic Dust Cloud with Thermal Radiation Effect," *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 2010, pp. 1446-1456.

Influence of Heat Loss on the Burning Velocity of Flame Propagation through Organic Dust Particles

Mehdi Bidabadi and Fatemeh Ebrahiminasab

Department of Mechanical Engineering, Combustion Research Laboratory, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

(Received: 2012.5.11, Received in revised form: 2013.4.22, Accepted: 2013.7.4)

This paper presents the influence of heat-loss on the structure of flame during propagation through two-phase mixture including micro-organic particles and air in the framework of thermal-diffusive model with non-unity Lewis number and Damköhler number (ratio of chemical reaction rate to vaporization rate). Then, burning velocity as a combustion parametere is analytically characterized with heat-loss impact. The model predictions are validated with both published experimental data and previous theoretical models, and reasonable agreement is achieved. The obtained results demonstrate that heat-loss plays a significant role in the reduction of the burning velocity.

Keywords: Heat loss effect, Organic dust particles, Damköhler number, Burning velocity