

تأثیر اتلاف حرارت بر انتشار شعله ابر ذرات ارگانیک

مهدی بیدآبادی^۱، فاطمه ابراهیمی نسب^{۲*}

تهران - نارمک - خیابان فرجام - دانشگاه علم و صنعت - آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق

*F.Ebrahimi@ gmail.com

چکیده

در این مقاله به صورت تحلیلی به مطالعه‌ی اثر اتلاف حرارت بر روی انتشار شعله‌ی پیش مخلوط پرداخته شده است. و 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 بی‌بعد انرژی فعال سازی مخلوط واکنشگر) به عنوان پارامترهای اساسی در نظر گرفته شده است 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 گردیده است و صحت نتایج با منابع آزمایشگاهی موجود برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: اتلاف حرارت، ذرات ارگانیک، عدد دامکولر، سرعت سوزش

۱- مقدمه

مطالعه بر روی احتراق ابر ذرات ارگانیک از نظر مفهومی و کاربردی بسیار مهم می‌باشد. 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 پلاستیک سازی را در برابر آتش‌های درون‌سوز مخازن و یا انفجار ذرات بر اثر ایجاد جرقه محافظت نمود. اخیراً احتراق ذرات بسیار ریز، تبدیل به یک تکنیک جایگزین برای کاهش انتشار NO_x شده است [۱].

تئوری انتشار شعله ابر ذرات در پراکندگی یکنواخت و بدون اثر جاذبه در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۲-۳]. پراکندگی یکنواخت ذرات به صورت کلی در این مدل فرض می‌شود. اساساً تجربیات آزمایشگاهی روی چنین سیستم‌هایی به دلیل رسوب ذرات در میدان گرانشی زمین مشکل می‌باشد. در این تحقیق فرض بر این است که مخلوط ذرات ریز جامد و هوا در شرایط فشار استاندارد و فاصله بین ذرات از طول نفوذی واکنشی کوچکتری باشد. با فرض اخیر از عدم پیوستگی در احتراق ذرات صرف نظر کرده‌ایم.

پروست [۴-۵] سرعت سوزش و ماکزیمم دمای شعله را در چندین مخلوط احتراق پذیر از قبیل ابر ذرات لایکپودیوم، ابر ذرات نشاسته و ابر ذرات سولفور با هوا را بر طبق یک کار تجربی مورد بررسی قرار داده است. [خوف [۶] در مقاله خود به بیان شباهت‌ها و تفاوت‌های موجود بین انفجار ابر ذرات و گاز پرداخته است. همچنین بیدآبادی و رهبری [۷] مدلی را بر پایه اختلاف دما بین ذرات ارگانیک و گاز ارائه کرده‌اند. علاوه بر این بیدآبادی و همکاران [۸] پروفیل سرعت و تراکم ذرات هنگام انتشار شعله در میان ابر میکرو ذرات آهن را بصورت تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. آنها با در نظر گرفتن معادله لاگرانژ در دینامیک میکرو ذرات آهن هنگام پیشروی شعله بالارونده در یک کانال و سپس با اعمال نیروهای متعدد وارد بر ذره از جمله نیروی ترموفورتیک که به دلیل گرادیان دمای حاصل از احتراق می‌باشد، و نیروی وزن و شناوری، پروفیل سرعت ذره نسبت به

۱- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

فاصله از جبهه شعله را تعیین کردند.

اتلاف حرارت به محیط موضوعی است که در بسیاری از تجهیزات احتراقی نقش بسیار مهمی در خاموشی شعله، محدودیت‌های اشتعال پذیری و سرعت سوزش ایفا می‌کند. بیدآبادی و جبرئیلی در یک کار تحلیلی دیگر و با استفاده از یک مدل ریاضی اثرات اتلاف حرارت داخلی را روی سرعت شعله و پروفیل دما در احتراق ذرات آلومینیوم به صورت تحلیلی بررسی کردند [۹]. نقش ضخامت لوله روی خاموشی در انتشار شعله پیش مخلوط موضوعی بود که باریوز^۱ و همکارانش با یک مدل نفوذی حرارتی به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. در این کار اتلاف حرارت هدایتی به دیواره‌های کانال در نظر گرفته شد و اثرات رابطه‌ی بین ضخامت و قطر لوله با انتشار سرعت شعله مورد مطالعه قرار گرفت و شرط خاموشی به عنوان تابعی از پارامتر اتلاف حرارت بدست آورده شد. مطالعه‌ی تحلیلی ما در اینجا در چارچوب یک مدل نفوذی حرارتی با فرض عدد لوییس غیر واحد می‌باشد که با بکار بردن قانون فوریه و فیک برای نفوذ حرارت و جرم، معادلات حاکم بر سیستم احتراق ابر ذرات ارگانیک و با در نظر گرفتن اثر تلفات حرارتی و گرمای نهان تبخیر نوشته شده است. در اینجا ساختار شعله به چهار ناحیه تقسیم می‌شود، که شامل یک ناحیه پیش گرم است که در آن از نرخ واکنش صرف نظر می‌شود، یک ناحیه عریض تبخیر ذرات، یک ناحیه نازک حدی واکنش که ترم جابجایی و ترم تبخیر ذرات سوخت مقدار کوچکی می‌باشند و در آخر ناحیه پس از واکنش در نظر گرفته می‌شود. برای تحلیل متغیرهای ساختار شعله، در هر کدام از این نواحی شرایط مرزی و سازگاری مناسب اعمال می‌شوند. آنالیز در حالت حدی صورت می‌گیرد و نتایج برای سرعت سوزش در شرایط متفاوت ارائه گردیده است.

۲- مدل تئوری برای احتراق ذرات ارگانیک

در احتراق ذرات اگر نرخ تبخیر پایین‌تر از نرخ واکنش باشد، روند احتراق کندتر می‌شود. عامل کنترل کننده در اینجا نرخ تبخیر ذرات می‌باشد. فرآیند احتراق در سیستم‌های شامل ذرات، یک فرآیند تبخیری-نفوذی است نه یک فرآیند واکنشی-نفوذی. توجه ویژه در این قسمت بررسی یک نمونه با عدد لوییس غیرواحد ($Le \neq 1$) و با در نظر گرفتن نهان تبخیر می‌باشد. که در حقیقت این گرمای نهان بصورت یک محدود کننده عمل می‌کند، زیرا چند درصد از گرمای واکنش را می‌گیرد. در این کار از اثرات سورت و دافور^۲ صرف نظر شده است. این اثرات بیان می‌کنند که اگر گرادیان دما موجب سرعت نفوذ حرارتی^۳ شود، در نتیجه گرادیان غلظت هم می‌تواند یک شار حرارتی را فراهم کند. در اغلب نمونه‌ها این اثرات خیلی کوچک اند که اغلب صرف نظر می‌شوند، حتی در مواقعی که نفوذ حرارتی قابل صرف نظر کردن نمی‌باشد [۱۱]. در این آنالیز فرض شده است که ذرات سوخت تبخیر می‌شوند و به فرم یک ترکیب گازی شناخته شده در می‌آیند و سپس اکسید می‌شوند بطوریکه عدد لوییس بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Le = \frac{\lambda}{\rho C D_m} \quad (1)$$

λ ضریب هدایت مخلوط فاز گازی، D_m ضریب نفوذ جزء معین گازی و ρ چگالی مخلوط واکنشگر می‌باشد. همچنین فرم بی-بعد انرژی فعال سازی مخلوط واکنشگر با عدد زلدویچ (Ze) تعریف می‌شود:

$$Ze = \frac{E(T_f - T_u)}{RT_f^2} \quad (2)$$

E انرژی فعال سازی، R ثابت جهانی گازها، T_u و T_f به ترتیب دمای شعله و دمای مخلوط سوخته نشده می‌باشد.

¹ Barrios

² Soret and Dufour

³ thermal diffusion

برای ساده سازی فرض می‌شود که دمای ذرات تقریباً با دمای گاز برابر است و سینتیک شیمیایی به یک واکنش گرماده کلی تک مرحله‌ای کاهیده می‌شود، که با قانون آرهینوس بیان می‌گردد.

$$v_f[F] + v_{O_2}[O_2] \rightarrow v_{prod}[P] \quad (3)$$

که v_f , v_{O_2} و v_{prod} به ترتیب ضرایب استوکیومتری سوخت، اکساینده و محصولات می‌باشد. همچنین $[F]$ ، $[O_2]$ و $[P]$ به ترتیب معرف اجزای سوخت، اکساینده و محصولات است. معادلات بقا را به فرم زیر می‌نویسیم:

معادله بقای جرم ذرات سوخت جامد:

$$\rho \frac{\partial Y_s}{\partial t} + \rho U_f \frac{\partial Y_s}{\partial x} = -\rho \dot{\omega}_{vap} \quad (4)$$

که Y_s کسر جرمی ذرات ریز جامد، U_f سرعت سوزش مخلوط و ρ چگالی مخلوط می‌باشد. همچنین x از جنس فاصله و برابر طول ساختار سیستم احتراق ذرات است. نرخ تبخیر ذرات ریزرگانیکی می‌باشد:

$$\dot{\omega}_{vap} = \frac{Y_s}{\tau_{vap}} H(T - T_v) \quad (5)$$

τ_{vap} زمان ثابت مشخصه تبخیر ذرات، H تابع هویساید، T و T_v به ترتیب دمای مخلوط و دمای آغاز تبخیر ذرات می‌باشد. معادله بقای جرم سوخت فازگازی حاصل از تبخیر ذرات ریز جامد ارگانیکی:

$$\rho \frac{\partial Y_g}{\partial t} + \rho U_f \frac{\partial Y_g}{\partial x} = \rho D_m \frac{\partial^2 Y_g}{\partial x^2} + \rho \dot{\omega}_{vap} - \rho \dot{\omega}_{chem} \quad (6)$$

Y_g کسر جرمی سوخت گازی حاصل از تبخیر ذرات ریز و $\dot{\omega}_{chem}$ نرخ واکنش شیمیایی می‌باشد:

$$\dot{\omega}_{chem} = \rho Y_g B \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

که B یک ضریب ثابت (فاکتور فرکانسی) می‌باشد. معادله بقای انرژی مخلوط:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho U_f C \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q \rho \dot{\omega}_{chem} - Q_v \rho \dot{\omega}_{vap} - \rho Q_L \quad (8)$$

Q_v گرمای نهان تبخیر ذرات و Q گرمای واکنش می‌باشد. همچنین Q_L میزان حرارت تلف شده است و به صورت مدل زیر تعریف می‌شود:

$$Q_L = K(T - T_u) \quad (9)$$

$$K = \frac{b'\lambda}{d^2} \quad (10)$$

در روابط بالا b' و d به ترتیب ضریب اتلاف حرارت و فاصله ی بین صفحات خاموشی هستند. C ظرفیت حرارتی مخلوط می- باشد که از ترکیب ظرفیت حرارتی فازگازی (C_p) و ظرفیت حرارتی ذره ریز جامد (C_s) به صورت زیر بدست می آید:

$$C = C_p + \frac{4\pi r_p^3 C_s \rho_s n_s}{3\rho} \quad (11)$$

که ρ دو ρ_s به ترتیب برابرچگالی مخلوط و چگالی ذرات سوخت می باشند. همچنین r_p شعاع ذره جامد و n_s تعداد متوسط ذرات بر واحد حجم در نظر گرفته می شود.

۲-۱- بی بعدسازی معادلات حاکم

برای بی بعد کردن معادلات حاکم می بایست که چند متغیر بی بعد در نظر گرفته شود. در ابتدا دمای بی بعد θ به فرم زیر تعریف می شود:

$$\theta = \frac{T - T_u}{T_f - T_u} \quad (12)$$

که در آن T_f ماکزیمم دمای شعله در ناحیه ی واکنش می باشد. اگر $\theta = 0$ باشد دمای مخلوط برابر دمای مخلوط نسوخته، و اگر $\theta = 1$ باشد آنگاه دمای مخلوط برابر ماکزیمم دمای شعله می باشد. همچنین سرعت سوزش بی بعد که برابر با نسبت سرعت سوزش مخلوط ذرات و هوا به سرعت سوزش محاسبه شده در حالت صرف نظر کردن از گرمای نهان تبخیر ذرات سوخت می باشد به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{U}_f = \frac{U_f}{U_u} \quad (13)$$

علاوه براین متغیرهای بی بعد مکان و زمان را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$\hat{x} = \frac{x}{D_{th}/U_u}, \quad \hat{t} = \frac{t}{D_{th}/U_u^2} \quad (14)$$

در نهایت معادله های بقا جرم و انرژی یعنی معادله های (۴) - (۸) با اعمال پارامترهای بی بعد مذکور بی بعد شده و به فرم زیر در می آیند:

$$\frac{\partial Y_s}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial Y_s}{\partial \hat{x}} = -\hat{\omega}_{vap} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Y_g}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial Y_g}{\partial \hat{x}} = \frac{1}{Le} \frac{\partial^2 Y_g}{\partial \hat{x}^2} + \hat{\omega}_{vap} - \hat{\omega}_{chem} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial \theta}{\partial \hat{x}} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \hat{x}^2} + \hat{\omega}_{chem} - q \hat{\omega}_{vap} - \frac{D'}{U_u^2} \theta \quad (17)$$

که،

$$\hat{\omega}_{chem} = \frac{D_{th}}{U_u^2} k Y_g \exp\left[\frac{-Ze(1-\theta)}{1-\alpha(1-\theta)}\right] \quad (18)$$

$$\hat{\omega}_{vap} = \frac{Y_s}{Da} H(\theta - \theta_v) \quad (19)$$

$$q = \frac{Q_v}{Q} \quad (20)$$

$$D' = \left(\frac{\lambda}{\rho C d}\right)^2 b' \quad (21)$$

در رابطه‌ی (۱۹) عدد دامکولر (Da) برابر است با:

$$Da = \frac{\dot{\omega}_{chem}}{\dot{\omega}_{vap}} = \frac{\tau_{vap}}{\tau_{chem}} \alpha \quad (22)$$

در معادله (۱۸) بیانگر نسبت دمایی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{T_f - T_u}{T_f} \quad (23)$$

در معادله (۱۹) θ_v به فرم زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\theta_v = \frac{T_v - T_u}{T_f - T_u} \quad (24)$$

در این دمای بی‌بعد شده تبخیر ذرات ریز جامد ارگانیک شروع می‌شود. لازم به ذکر است که در این مقاله $U_f = U_u$ یعنی $\hat{U}_f = 1$ فرض می‌شود. در معادله (۱۸) k نرخ کلی ثابت واکنش و برابر $B \exp(-E / RT_f)$ می‌باشد. مرتبه بزرگی عدد دامکولر تابع شدیدی از اندازه ذرات می‌باشد. مهمترین محدودیت این مدل $Da < 1$ یا ذرات بسیار ریز می‌باشد که این فرض اخیر بر این امر دلالت می‌کند که ذرات زودتر در ناحیه سوخته تبخیر می‌شوند در حالی که هنوز انبساط گاز یعنی مرحله واکنش شیمیایی ضعیف می‌باشد. عدد دامکولر کوچکتر از واحد بیانگر این مطلب می‌باشد که نرخ تبخیر به مراتب بزرگتر از نرخ واکنش شیمیایی است و در به این صورت واکنش به علت عامل کنترل کننده واکنش یعنی نرخ تبخیر محدود می‌شود.

۲-۲- حل پایدار معادلات بی بعد حاکم

در ادامه حل پایدار معادلات بی بعد بقای سیستم، یعنی معادلات (۱۵)-(۱۷) ارائه می شود:

برای آنالیز تحلیلی ساختار شعله ابر ذرات ریز ارگانیک، چهار ناحیه پیوسته را به ترتیب زیر در نظر می گیریم: (قابل توجه آنکه در حالت حدی $Z_e \rightarrow +\infty$ ، نرخ واکنش در تمام نواحی در نظر گرفته شده برای ساختار شعله ابر ذرات ریز ارگانیک مقدار بسیار کوچکی است که از آن صرف نظر می شود، مگر در یک ناحیه حدی کوچک در مجاورت $x = 0$ که در آن ناحیه $\theta = 1$ می باشد).

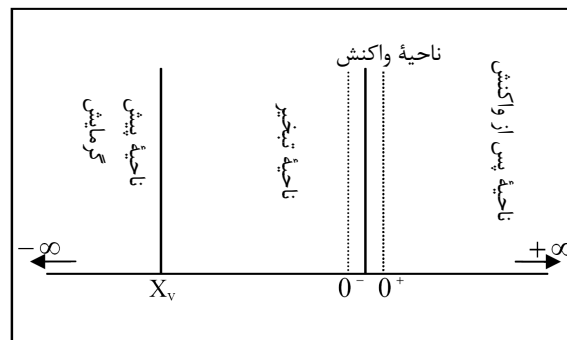
ناحیه I: $\{\hat{x} | -\infty < \hat{x} < \hat{x}_v\}$ ، که نقطه بی بعد آغاز تبخیر، در دمای بی بعد θ_p می باشد.

ناحیه II: $\{\hat{x} | \hat{x}_v \leq \hat{x} < 0^-\}$ ، فرض بر این است که تبخیر ذرات ریز ارگانیک در حال انجام است.

ناحیه III: $\{\hat{x} | 0^- \leq \hat{x} \leq 0^+\}$ ، ناحیه حدی نازکی است که در آن احتراق صورت می گیرد. ترم های تبخیر و جابجایی در مقایسه با ترم های واکنش و نفوذ کوچک فرض می شوند. سرعت سوزش از آنالیز کردن ساختار این ناحیه بدست می آید.

ناحیه IV: $\{\hat{x} | 0^+ < \hat{x} < +\infty\}$ ، ناحیه پس از واکنش که گازهای سوخته شده در حال تعادل می باشند.

شکل (۱) نواحی در نظر گرفته شده برای ساختار شعله ابر ذرات ریز ارگانیک را نشان می دهد:



شکل ۱- نواحی چهارگانه ساختار شعله ابر ذرات ارگانیک

در مرزهای این نواحی، شرایط مرزی و شرایط سازگاری^۱ در نظر گرفته می شود. در ادامه روند تحلیل ساختار شعله، شرایط مرزی و سازگاری برای مرز نواحی چهارگانه مطابق زیر ارائه می شود:

برای مرز چپ ناحیه I شرایط مرزی موجود برابر است با:

$$\hat{x} \rightarrow -\infty \Rightarrow Y_s = 1, Y_g = 0, \theta = 0 \quad (25)$$

در مرز بین نواحی I و II شرایط مرزی و سازگاری مطابق زیر است:

¹ Matching condition

$$at \hat{x} = \hat{x}_v$$

$$\theta = \theta_v$$

$$[Y_s] = [Y_g] = \left[\frac{dY_g}{d\hat{x}} \right] = \left[\frac{d\theta}{d\hat{x}} \right] = 0$$

(۲۶)

در این سطح مشترک همه کمیت‌ها به غیر از اولین مشتق Y_s پیوسته می‌باشند. در مرز نواحی II و III شرایط مرزی و سازگاری زیر برقرار است:

$$at \hat{x} = 0^- \Rightarrow Y_g = 0$$

$$[\theta] = [Y_g] = \left[\frac{dY_g}{d\hat{x}} \right] = \left[\frac{d\theta}{d\hat{x}} \right] = 0$$

(۲۷)

که در مرز این نواحی همه کمیت‌ها پیوسته هستند. با صرف نظر کردن از ترم‌های جابجایی و تبخیر نسبت به ترم واکنش شیمیایی در ناحیه واکنش در معادلات بقای فاز گازی و انرژی، شرط سازگاری زیر حاصل می‌شود:

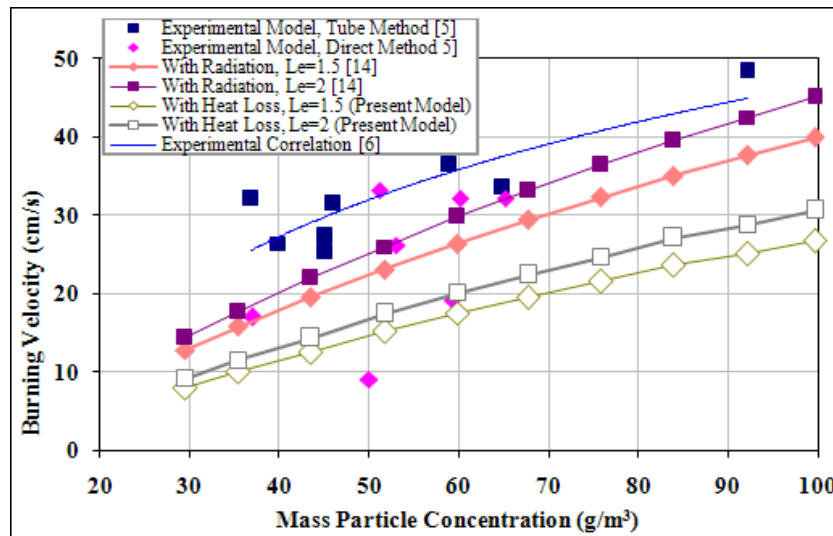
$$\left[\frac{d\theta}{d\hat{x}} + \frac{1}{Le} \frac{dY_g}{d\hat{x}} \right]_{0^-} = \left[\frac{d\theta}{d\hat{x}} + \frac{1}{Le} \frac{dY_g}{d\hat{x}} \right]_{0^+}$$

(۲۸)

بنابراین حل پایدار معادلات بی‌بعد حاکم بر ساختار شعله ابر ذرات، با انتگرال‌گیری ناحیه به ناحیه و اعمال شرایط مرزی و سازگاری بدست می‌آید.

۳- بررسی و تفسیر نتایج

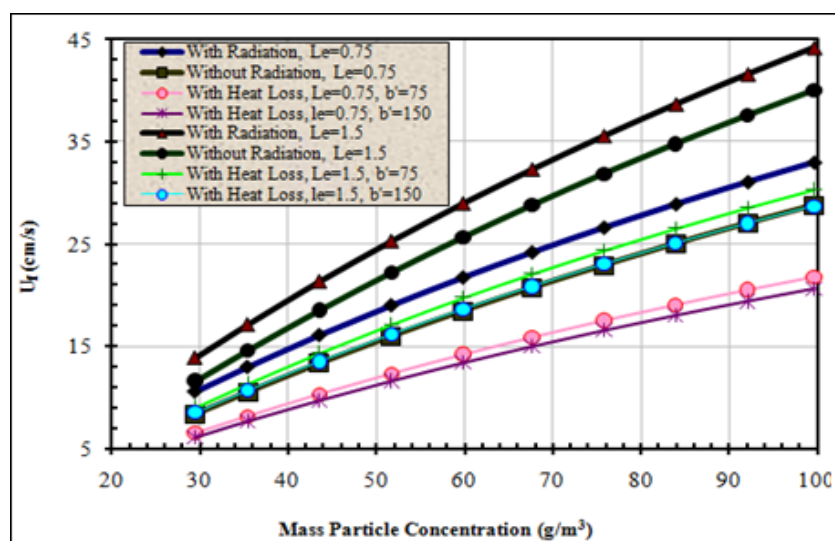
در این قسمت به ارائه نتایج حالت پایا برای متغیرهای ساختار شعله پرداخته می‌شود. و تأثیر تلفات حرارتی بر روی دمای بی-بعد مخلوط، کسر جرمی سوخت در فاز جامد، کسر جرمی سوخت در فاز گازی حاصل از تبخیر ذرات و سرعت سوزش ارائه و صحت نتایج با منابع موجود سنجیده می‌شود. به منظور بررسی صحت مدل جدید ارائه شده، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده از تحلیل حالت پایای موجود با داده‌های آزمایشگاهی [۵] و تحلیلی [۱۳] انتشار یافته صورت می‌گیرد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، محاسبه سرعت سوزش به‌عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط پروست [۵] در مورد ذرات ارگانیک لایکوپودیم دارد. این نمودار بیان می‌دارد که با افزایش تراکم جرمی ذرات سرعت سوزش نیز افزایش می‌یابد. در ادامه مقایسه‌ای با مطالعه تحلیلی انجام شده توسط سشادری [۱۳] در پیشروی شعله حالت پایا در میان ابر ذرات لایکوپودیم و هوا صورت می‌گیرد.



شکل ۲- مقایسه بین سرعت سوزش بدست آمده از مدل تحلیلی حاضر با در نظر گرفتن اثر تلفات و تشعشع حرارتی و نتایج آزمایشگاهی انتشار یافته در مرجع [۵] به عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات لایکوپودی

۳-۱- تأثیر تلفات حرارتی بر ساختار شعله

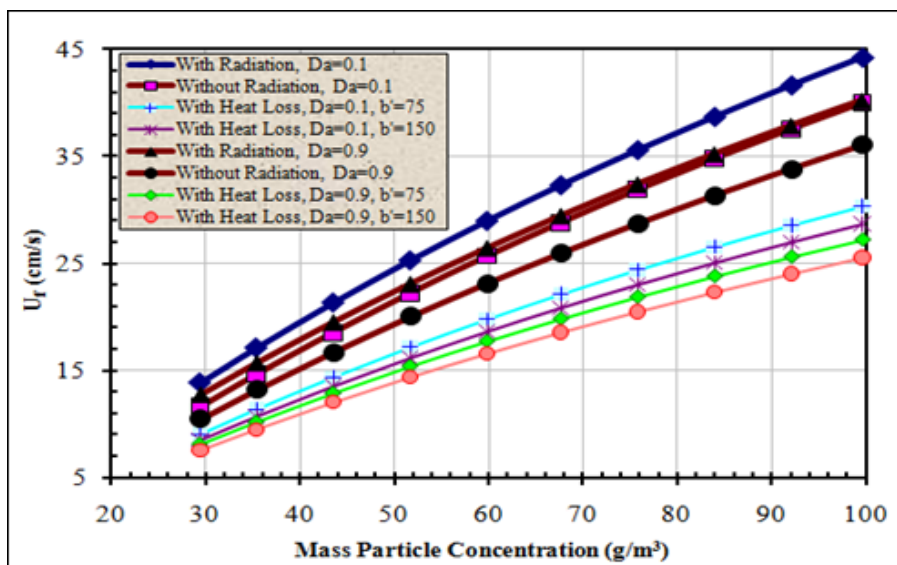
شکل (۳) نشان می‌دهد که سرعت سوزش به عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات با افزایش عدد لوییس از ۰.۷ به ۱.۵ افزایش می‌یابد. همان طور که در قسمت قبل هم بیان شد این موضوع با توجه به تعریف عدد لوییس به صورت نسبت ضریب نفوذ حرارت به نفوذ جرم توجیه می‌شود اما آنچه در این شکل بیشتر قابل توجه است بررسی تأثیر اتلاف حرارت بر سرعت سوزش و مقایسه ی آن با تأثیر تشعشع به عنوان یک عامل موثر است. همان طور که انتظار می‌رود اتلاف حرارت باعث کاهش سرعت سوزش می‌شود که البته به ضریب اتلاف حرارت که با b' نشان داده می‌شود هم بستگی خواهد داشت. به عبارتی با افزایش این ضریب، اتلاف حرارت اهمیت بیشتری پیدا کرده و به نسبت سرعت سوزش هم بیشتر کاهش می‌یابد. جالب آنکه تأثیر اتلاف حرارت در کاهش سرعت سوزش بیشتر است از تأثیر تشعشع در افزایش سرعت سوزش که خود بیان کننده ی اهمیت در نظر گرفتن اتلاف حرارت به عنوان یک عامل منفی است در مقابل تشعشع به عنوان یک عامل مثبت.



شکل ۳- بررسی اثر تلفات و تشعشع حرارتی بر روی سرعت سوزش مخلوط به عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک به ازای اعداد لوییس متفاوت در حالت $\theta_v = 0.25$, $Da = 0.2$

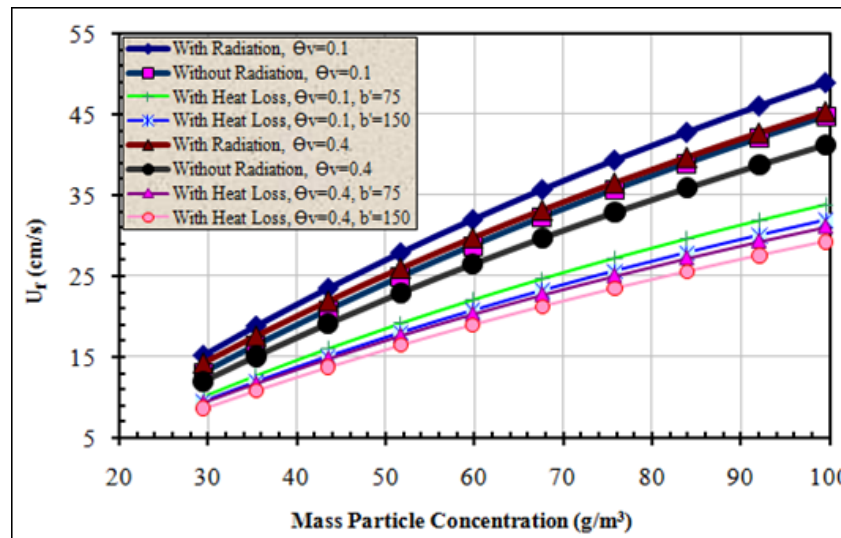
همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود روند نمودار سرعت سوزش به‌عنوان تابعی از غلظت ذرات با افزایش عدد دامکولر از ۰.۱ به ۰.۹ و با توجه به تعریف عدد دامکولر تبخیر به درستی صورت نمی‌گیرد. دلیل آن اینکه افزایش عدد دامکولر بیان کننده ی افزایش نرخ واکنش است و با توجه به تعریف عدد دامکولر تبخیر به درستی صورت نمی‌گیرد. پس سوخت گازی حاصل از تبخیر ذرات ارگانیک نمی‌تواند تأمین کننده ی نرخ بالای واکنش باشد و جریان واکنشی موجود با نرخ تبخیر کنترل و سرعت سوزش کاهش می‌یابد. و همانطور که قابل مشاهده است اتلاف حرارت موجب کاهش سرعت سوزش می‌شود.

نکته ی دیگری که می‌توان از مقایسه ی دو شکل (۴) و (۳) به آن رسید اهمیت تغییر عدد دامکولر و عدد لوییس است. به بیان روشن تر با افزایش عدد دامکولر از ۰.۱ به ۰.۹ و عدد لوییس از ۰.۷۵ به ۱.۵ 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 خیلی کمتر است که خود بیان کننده ی اهمیت نسبت نفوذ حرارت و نفوذ جرم است در مقابل نسبت نرخ واکنش به نرخ تبخیر در سرعت سوزش.



شکل ۴- بررسی اثر تلفات و تشعشع حرارتی بر روی سرعت سوزش مخلوط به‌عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک به ازای اعداد دامکولر متفاوت و در حالت $Le = 1.5, \theta_v = 0.4$

در ادامه اثر دمای بی‌بعد در نقطه آغاز تبخیر بر روی سرعت سوزش به‌عنوان تابعی از غلظت جرمی ذرات با در نظر گرفتن ترم-های اتلاف حرارت و تشعشع در شکل (۵) بررسی می‌گردد. مطابق با این شکل افزایش θ_v منجر به کاهش قابل توجهی در سرعت سوزش می‌شود 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 نزدیک شدن نقطه آغاز تبخیر به ناحیه 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 می‌گردد. از نکات دیگر مشهود در این شکل اینک با در نظر گرفتن تشعشع حرارتی القا شده از مرز شعله به درون نواحی نسوخته U_T در θ_v ثابت افزایش می‌یابد. در حقیقت پیش گرمایش تشعشع حرارتی موجب بهبود روند تبخیر ذرات ارگانیک می‌گردد. دیگر آنکه در نظر گرفتن اتلاف حرارت به دلیل مقدار گرمایی که به محیط منتقل می‌شود باعث به تأخیر افتادن آغاز فرآیند تبخیر و در نتیجه کاهش سرعت سوزش می‌شود. و همانطور که قبلاً نیز بیان شد میزان کاهش سرعت سوزش بر اثر اتلاف حرارت از افزایش سرعت سوزش بر اثر تشعشع بیشتر است.



شکل ۵- بررسی اثر تلفات و تشعشع حرارتی بر روی سرعت سوزش مخلوط به عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک برای اعداد متفاوت در دمای بی بعد آغاز تبخیر در حالت $Le = 2, Da = 0.9$

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این کار به صورت تحلیلی به مطالعه‌ی تأثیر اتلاف حرارت بر انتشار شعله پرداخته شد. در بخش نخست این بررسی، یک مدل جدید 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 در نظر گرفته شده و در آن‌ها اعمال شدند و در پایان با حل حالت پایدار، نتایج برای کسر جرمی سوخت در فاز جامد، کسر جرمی سوخت در فاز گازی حاصل از تبخیر ذرات و سرعت سوزش ارائه گردید و صحت نتایج با منابع انتشار یافته توسط دیگر محققان مورد بررسی قرار گرفت.

با وجود اتلاف حرارت، مقدار گرمایی که به محیط منتقل می‌شود باعث به تأخیر 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. با توجه به نتایج بدست آمده مشهود است که تأثیر اتلاف حرارت در کاهش سرعت سوزش از تأثیر تشعشع در افزایش سرعت سوزش بیشتر است که خود بیان کننده‌ی اهمیت در نظر گرفتن اتلاف حرارت به عنوان یک عامل منفی است.

اعداد لوییس و دامکولر عواملی تأثیر گذار بر روی احتراق ابر ذرات ارگانیک می‌باشند. با افزایش عدد دامکولر سهم واکنش از تبخیر ذرات بالاتر می‌رود. نتیجتاً میزان سوخت گازی شکل حاصل از تبخیر ذرات قادر به تأمین نرخ بالای واکنش نخواهد بود و جریان واکنشی موجود با نرخ تبخیر کنترل و سرعت سوزش کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد لوییس مقدار سرعت سوزش افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. چراکه با افزایش عدد لوییس سهم پخش حرارت مقدار قابل توجهی می‌گردد که این حالت خود موجب بهبود تبخیر ذرات و ارتقای سرعت سوزش می‌گردد.

با کاهش شعاع ذرات ارگانیک و افزایش تراکم جرمی ذرات، افزایش قابل توجهی در سرعت سوزش حاصل می‌شود. علاوه بر این با افزایش دمای بی بعد آغاز تبخیر ذرات (θ_v) مقدار سرعت سوزش کاهش پیدا می‌کند چراکه افزایش دمای بی بعد آغاز تبخیر ذرات این مفهوم را می‌رساند که برای شروع تبخیر احتیاج به دمای بالاتری می‌باشد. این موضوع باعث نزدیک شدن نقطه آغاز تبخیر به ناحیه 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 می‌گردد.

مراجع

- [1] Y.Zhao, H.Y.Kim, S.S.Yoon,"Transient group combustion of the pulverized coal particles in spherical cloud", Fuel, 86, 1102-1111. (2006)
- [2] 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, 449-457. (2000)
- [3] M.Bidabadi, A. Rahbari "Modeling combustion of lycopodium particles by considering the temperature difference between the gas and the particles", Combustion Explosion and Shock Waves, 45, 49-57.(2009)
- [4] C.Proust, "A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 104-120. (2006)
- [5] C.Proust, "Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 89-100. (2006)
- [6] 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, 553-560. (2006)
- [7] Bidabadi M., Rahbari A., "Novel analytical model for predicting the combustion characteristics of premixed flame propagation in lycopodium dust particles", J. Mech. Sci. Technol. 23 (2009) 2417-2423.
- [8] 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, in press.
- [9] M.Bidabadi, A.Jebreyli, "Investigate the effect of internal heat losses on aluminum dust cloud combustion with continues reaction rate", Applied Sciences Research, 5, 2194-2202. (2009)
- [10] E.Barrios, J.Prince, C.Trevino, "The role of duct thickness on the quenching process of premixed flame propagation", Combustion Theory and Modelling, 12, 115-133. (2008)
- [11]F. Williams, Combustion Theory (2th edn), Addison-Wesley, Redwood City, CA. (1985)
- [12] M Bidabadi M., Haghiri A., Rahbari A., "The effect of Lewis and Damköhler numbers on the flame propagation through micro-organic dust particles, Int. J. Thermal Sciences, 49 (2010) 534-542.
- [13]K.Seshadri, A.L.Berlad, V.Tangirala, "The structure of premixed particle-cloud flames", Combustion and Flame, 89, 333-342. (1992)
- [14]A. Haghiri, M. Bidabadi, Int. J. Thermal Sciences, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2010.03.013. (2010)