

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

مهدی بیدآبادی<sup>۱</sup> و فاطمه ابراهیمی نسب<sup>۲</sup>

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.Ebrahimasab@gmail.com

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

در این کار، به صورت 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 زدویچ (فرم بی بعد انرژی فعالسازی مخلوط واکنشگر) به عنوان پارامترهای اساسی در نظر گرفته شده اند، 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.

کلیدواژگان: اتلاف حرارت، ذرات ارگانیک، عدد دامکولر، سرعت سوزش

### مقدمه

مطالعه بر روی احتراق ابر ذرات ارگانیک از نظر مفهومی و کاربردی بسیار مهم است؛ از این منظر که با تحلیل ساختار این گونه ابر ذرات، می توان ایمنی دستگاه های 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 آتش های درون سوز مخازن و یا انفجار ذرات بر اثر ایجاد جرقه محافظت کرد.

تئوری انتشار شعله ابر ذرات در پراکندگی یکنواخت و بدون اثر جاذبه در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱، ۲]. در این دو مرجع پراکندگی یکنواخت ذرات به صورت کلی فرض شده است. اساساً تجربیات آزمایشگاهی روی چنین سیستم هایی، به دلیل 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 کوچک تر است. با فرض اخیر از عدم پیوستگی در احتراق ذرات صرف نظر شده است.

پروست [۳، ۴] سرعت سوزش و ماکزیمم دمای شعله در چندین مخلوط احتراق پذیر از قبیل ابر ذرات لایکپودوم، 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 ناشی از خطای آزمایش و همچنین اغتشاشات پدید آمده در پیشانی شعله می داند. [۵] در مقاله خود به بیان شباهت ها و تفاوت های موجود بین انفجار ابر ذرات و گاز پرداخته است. همچنین بیدآبادی و رهبری [۶] مدلی را بر پایه اختلاف دما بین ذرات ارگانیک و گاز ارائه کرده اند. علاوه بر این، بیدآبادی و همکاران [۷] توزیع سرعت و تراکم ذرات هنگام انتشار شعله در میان ابر میکروذرات آهن را نیز به صورت تحلیلی مطالعه کردند. آن ها با در نظر گرفتن معادله لاگرانژ در دینامیک میکروذرات 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 است، و نیروی وزن و شناوری، توزیع سرعت ذره نسبت به 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 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 در نظر 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 انجام شده 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 در نظر 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 صرف نظر 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 در نظر گرفته شده است. برای تحلیل متغیرهای ساختار شعله، در هر کدام از این نواحی شرایط مرزی و سازگاری مناسب اعمال شدند. آنالیز در حالت حدی 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 پایین‌تر از نرخ واکنش باشد، روند احتراق کندتر می‌شود. عامل کنترل‌کننده 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 ( $Le \neq 1$ ) و با در نظر گرفتن نهان تبخیر است که در حقیقت این گرمای نهان به صورت یک محدودکننده عمل می‌کند، زیرا چند درصد از گرمای واکنش را می‌گیرد. در این کار از اثرات سورت و دافور<sup>۱</sup> صرف نظر شده است. این اثرات بیان می‌کنند که اگر گرادیان دما موجب سرعت نفوذ حرارتی<sup>۲</sup> شود، در نتیجه گرادیان غلظت هم می‌تواند یک شار حرارتی را فراهم کند. در اغلب نمونه‌ها این اثرات خیلی کوچک‌اند که اغلب صرف نظر می‌شوند، حتی در مواقعی که نفوذ حرارتی قابل صرف نظر کردن نیست [۹].

در این آنالیز فرض شده است که ذرات سوخت تبخیر می‌شوند و به صورت یک ترکیب گازی شناخته شده در می‌آیند و سپس اکسید می‌شوند، به طوری که عدد لوییس به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

$\lambda$  ضریب هدایت مخلوط فاز گازی،  $D_m$  ضریب نفوذ جزء معین گازی و  $\rho$  چگالی مخلوط واکنشگر است.

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،  $T_f$  و  $T_u$  به ترتیب دمای شعله و دمای مخلوط سوخته نشده است.

برای ساده سازی فرض شده که دمای ذرات تقریباً با دمای گاز برابر است و سینتیک شیمیایی با یک واکنش گرماده کلی

تک مرحله‌ای بر مبنای قانون آرنیوس بیان می‌شود.



1. Soret and Dufour  
2. Thermal diffusion

که  $V_{prod}$  و  $V_{O_2}$ ،  $V_f$  به ترتیب ضرایب استوکیومتری سوخت، اکسند و محصولات اند. همچنین  $[F]$ ،  $[O_2]$  و  $[P]$  به ترتیب معرف اجزای سوخت، اکساینده و محصولات اند. معادلات بقا به صورت زیر در نظر گرفته شد [۱۰]:

- 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  $\rho$  چگالی مخلوط است. همچنین  $x$  از جنس فاصله و برابر طول مورد بررسی در سیستم احتراق ذرات است.  $\dot{\omega}_{vap}$  نرخ تبخیر ذرات ریز ارگانیک است:

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

زمان ثابت مشخصه تبخیر ذرات،  $H$  تابع هویساید،  $T$  و  $T_v$  به ترتیب دمای مخلوط و دمای آغاز تبخیر ذرات است.

- معادله بقای جرم سوخت فاز گازی حاصل از تبخیر ذرات ریز جامد ارگانیک:

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

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

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

که  $B$  یک ضریب ثابت و در واقع ضریب پیش‌نمایی<sup>۱</sup> نرخ واکنش سوخت گازی است [۱۱].

- 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 است. همچنین،  $Q_L$  میزان تلفات حرارتی است که به صورت هدایت از مخلوط هوا و ذرات به دیواره منتقل می‌شود و دیواره در دمای ثابت محیط،  $T_u$  فرض شده است. این اتلاف حرارت به صورت زیر تعریف شده است:

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

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

جمله اتلاف حرارت  $Q_L$  در معادله (۸) بیان‌کننده اتلاف حرارتی است که به صورت هدایت حرارتی از مخلوط هوا و ذرات به دیواره منتقل می‌شود. دیواره در دمای ثابت محیط  $T_u$  فرض شده است.

در روابط بالا  $b'$  ضریب اتلاف حرارت و  $d$  فاصله خاموشی است که عبارت است از حداقل فاصله‌ای که در آن شعله بدون خاموشی انتشار دارد و در کمتر از آن فاصله شعله خاموش می‌شود.  $C$  ظرفیت حرارتی مخلوط است که از ترکیب ظرفیت حرارتی فاز گازی ( $C_p$ ) و ظرفیت حرارتی ذره ریز جامد ( $C_s$ ) به صورت زیر به دست می‌آید [۱۰]:

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

که  $\rho_s$  و  $\rho$  به ترتیب برابر چگالی مخلوط و چگالی ذرات سوخت اند. همچنین  $r_p$  شعاع ذره جامد و  $n_s$  تعداد متوسط ذرات بر واحد حجم در نظر گرفته می‌شود.

1. Pre-exponential

### بی‌بعدسازی معادلات حاکم

برای بی‌بعد کردن معادلات حاکم می‌بایست که چند متغیر بی‌بعد در نظر گرفته شود. در ابتدا دمای بی‌بعد  $\theta$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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 صرف نظر کردن از گرمای نهان تبخیر ذرات سوخت ( $U_u$ ) است به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

علاوه بر این متغیرهای بی‌بعد مکان و زمان به صورت زیر تعریف شده‌اند:

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

که

$$D_{th} = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (15)$$

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

$$\frac{\partial Y_s}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial Y_s}{\partial \hat{x}} = -\hat{\omega}_{vap} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Y_g}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial Y_g}{\partial \hat{x}} = \frac{1}{Le} \frac{\partial^2 Y_g}{\partial \hat{x}^2} + \hat{\omega}_{vap} - \hat{\omega}_{chem} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \hat{t}} + \hat{U}_f \frac{\partial \theta}{\partial \hat{x}} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \hat{x}^2} + \hat{\omega}_{chem} - q \hat{\omega}_{vap} - \frac{D'}{U_u^2} \theta \quad (18)$$

که

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

$$\hat{\omega}_{vap} = \frac{Y_s}{Da} H(\theta - \theta_v) \quad (20)$$

$$q = \frac{Q_v}{Q} \quad (21)$$

$$D' = \left( \frac{\lambda}{\rho C d} \right)^2 b' \quad (22)$$

در رابطه (۲۰) عدد دامکولر ( $Da$ ) برابر است با:

$$Da = \frac{\hat{\omega}_{chem}}{\hat{\omega}_{vap}} = \frac{\tau_{vap}}{\tau_{chem}} \quad (23)$$

$\alpha$  در معادله (۱۹) بیانگر نسبت دمایی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در معادله (۲۰)،  $\theta_v$  به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\theta_v = \frac{T_v - T_u}{T_f - T_u} \quad (25)$$

در این دمای بی‌بعد شده تبخیر ذرات ریز جامد ارگانیک شروع می‌شود. شایان ذکر است که در این مقاله برای ساده کردن محاسبات  $U_f = U_u$  یعنی  $\hat{U}_f = 1$  فرض می‌شود. در معادله (۱۹)،  $k$  نرخ کلی ثابت واکنش و برابر  $B \exp(-E / RT_f)$  است. مرتبه بزرگی عدد دامکولر تابع شدیدی از اندازه ذرات است. مهم‌ترین محدودیت این مدل  $Da < 1$  یا ذرات بسیار ریز است که این فرض اخیر بر این امر دلالت می‌کند که ذرات زودتر در ناحیه نسوخته تبخیر می‌شوند، در حالی که هنوز انبساط گاز یعنی مرحله واکنش شیمیایی ضعیف است. عدد دامکولر کوچک‌تر از واحد بیانگر این مطلب است که نرخ تبخیر به مراتب بزرگ‌تر از نرخ واکنش شیمیایی است و در این صورت واکنش به‌علت عامل کنترل‌کننده واکنش یعنی نرخ تبخیر محدود می‌شود.

### حل پایای معادلات بی‌بعد حاکم

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

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

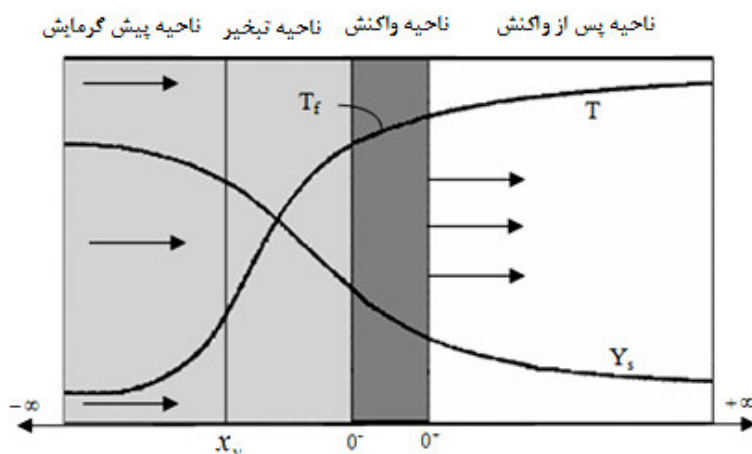
ناحیه I:  $\{\hat{x} | -\infty < \hat{x} < \hat{x}_v\}$ ، که نقطه بی‌بعد آغاز تبخیر در دمای بی‌بعد  $\theta_v$  است.

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 می‌گیرد. جمله‌های تبخیر و جابه‌جایی در مقایسه با جمله‌های واکنش و نفوذ کوچک فرض می‌شوند. سرعت سوزش از آنالیز کردن ساختار این ناحیه به دست می‌آید.

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

شکل ۱ نواحی در نظر گرفته شده برای ساختار شعله ابر ذرات ریز ارگانیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار شعله ابر ذرات ارگانیک (منحنی‌های  $T$  و  $Y_s$  بیان‌کننده تغییرات دما و کسر جرمی سوخت در مسیر انتشار شعله‌اند).

در مرزهای این نواحی، شرایط مرزی و شرایط سازگاری<sup>1</sup> در نظر گرفته شده است که در ادامه روند تحلیل ساختار شعله، شرایط مرزی و سازگاری برای مرز نواحی چهارگانه به صورت زیر ارائه می شود.

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

$$\hat{x} \rightarrow -\infty \Rightarrow Y_s = 1, Y_g = 0, \theta = 0 \quad (26)$$

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

$$\begin{aligned} at \hat{x} = \hat{x}_v \\ \theta = \theta_v \\ [Y_s] = [Y_g] = \left[ \frac{dY_g}{d\hat{x}} \right] = \left[ \frac{d\theta}{d\hat{x}} \right] = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

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

$$\begin{aligned} at \hat{x} = 0^- \Rightarrow Y_g = 0 \\ [\theta] = [Y_g] = \left[ \frac{dY_g}{d\hat{x}} \right] = \left[ \frac{d\theta}{d\hat{x}} \right] = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

که در مرز این نواحی همه کمیت‌ها پیوسته‌اند. با صرف نظر کردن از جمله‌های جابه‌جایی و تبخیر نسبت به جمله واکنش شیمیایی در ناحیه واکنش در معادلات بقای فاز گازی و انرژی، شرط سازگاری زیر حاصل می شود:

$$\left[ \frac{d\theta}{d\hat{x}} + \frac{1}{Le} \frac{dY_g}{d\hat{x}} \right]_{0^-} = \left[ \frac{d\theta}{d\hat{x}} + \frac{1}{Le} \frac{dY_g}{d\hat{x}} \right]_{0^+} \quad (29)$$

بنابراین، حل پایای معادلات بی بعد حاکم بر ساختار شعله ابر ذرات، با انتگرال گیری ناحیه به ناحیه و اعمال شرایط مرزی و سازگاری، به دست می آید.

### ناحیه I (ناحیه پیش گرم)

میدان دما:

از آنجا که جمله واکنش نسبت به جمله‌های جابه‌جایی و نفوذ در نواحی I و II قابل صرف نظر است از این رو با حل معادله انرژی داریم:

$$\begin{aligned} \theta = c_1 \exp(\kappa'_1 \hat{x}) + c_2 \exp(\kappa'_2 \hat{x}) \\ \begin{cases} \hat{x} \rightarrow -\infty \Rightarrow \theta = 0 \\ \hat{x} = \hat{x}_v \Rightarrow \begin{cases} \theta = \theta_v \\ \left[ \frac{d\theta}{d\hat{x}} \right] = 0 \end{cases} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_2 = 0 \\ c_1 = d_1 - \frac{(q/Da)(1/Da + \kappa'_2)}{(\sqrt{1+4(D'/U_u^2)}) \exp(\kappa'_1 \hat{x}_v)} \end{cases} \end{aligned} \quad (30)$$

که

$$\kappa'_1 = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(D'/U_u^2)}}{2} \quad (31)$$

$$\kappa'_2 = \frac{1 - \sqrt{1 + 4(D'/U_u^2)}}{2} \quad (32)$$

1. Matching condition

$$d_1 = 1 - \left( \frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)} \right) \exp(\hat{x}_v/Da) + \frac{\left( \frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)} \right) (1/Da + \kappa'_1)}{\sqrt{1 + 4(D'/U_u^2) \exp(\kappa'_2 \hat{x}_v)}} \quad (33)$$

با جایگذاری ضرایب ثابت در سرتاسر ناحیه پیش گرم و ناحیه تبخیر یعنی در  $-\infty < \hat{x} < 0^-$  داریم:

$$\theta = c_1 \exp(\kappa'_1 \hat{x}) = c_1 \exp(\kappa'_1 \cdot \frac{\rho U_f C}{\lambda} x) \quad (34)$$

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

$$\hat{x}_v = (1/\kappa'_1) \ln(\theta_v/c_1) \quad (35)$$

برای اجزای موجود در این ناحیه، یعنی  $-\infty < \hat{x} < \hat{x}_v$ ، از آنجایی که تبخیر ذرات حدوداً صفر است (به دلیل  $\theta < \theta_v$ )، در نتیجه کسر جرمی ذرات به صورت زیر تعبیر می‌شود:

$$Y_s = 1 \quad (36)$$

کسر جرمی سوخت فاز گازی در این ناحیه، با صرف نظر کردن از جمله‌های تبخیر و واکنش در معادله (۱۷) و در نهایت حل آن به دست می‌آید:

$$Y_g = c_1 + c_2 \exp(Le \cdot \hat{x}) \quad (37)$$

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

### ناحیه II (ناحیه تبخیر ذرات)

در این ناحیه فرض بر این است که ذرات سوخت ابتدا تبخیر می‌شوند و به صورت 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 صرف نظر می‌شود. از این رو برای میدان دما در این ناحیه داریم:

$$\theta = c_3 \exp(\kappa'_1 \hat{x}) + c_4 \exp(\kappa'_2 \hat{x}) + \left( \frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)} \right) \exp(-(\hat{x} - \hat{x}_v)/Da)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x} \rightarrow 0^- \Rightarrow \theta = 1 \\ \hat{x} = \hat{x}_v \Rightarrow \theta = \theta_v \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} c_4 = - \frac{\left( \frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)} \right) (1/Da + \kappa'_1)}{\sqrt{1 + 4(D'/U_u^2) \exp(\kappa'_2 \hat{x}_v)}} \\ c_3 = 1 - \left( \frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)} \right) \exp(\hat{x}_v/Da) - c_4 \end{array} \right. \quad (38)$$

با توجه به معادلات (۱۶) و (۲۰) و خاصیت تابع هویساید، کسر جرمی ذرات ریز جامد در این ناحیه برابر است با:

$$Y_s = \exp\left\{ - \frac{(\hat{x} - \hat{x}_v)}{Da} \right\} \quad (39)$$

$Y_s$  دقیقاً در مرز بین ناحیه واکنش و ناحیه تبخیر ( $\hat{x} = 0^-$ ) صفر نیست و برابر با  $\exp(\hat{x}_v/Da)$  است. علاوه بر این، در این ناحیه با جایگذاری معادله (۳۹) در رابطه (۲۰) و قراردادن عبارت حاصل در معادله (۱۷) و حذف جمله واکنش از معادله مذکور، کسر جرمی سوخت گازی حاصل از تبخیر ذرات مطابق رابطه (۴۰) حاصل می‌شود.

$$Y_g = b_1 + b_2 \exp(Le \cdot \hat{x}) - \frac{1}{(1 + 1/Le \cdot Da)} \exp\left( - \frac{\hat{x} - \hat{x}_v}{Da} \right) \quad (40)$$

همچنین، با استفاده از رابطه (۳۷) و اعمال شرط سازگاری نواحی اول و دوم در نقطه  $\hat{x} = \hat{x}_v$  برای  $Y_g$  و  $dY_g/d\hat{x}$ ، دو رابطه جدید حاصل می‌شود که با در نظر گرفتن رابطه (۴۰) با حل دستگاه سه معادله سه مجهول ضرایب ثابت مطابق زیر تعیین می‌شوند:

$$b_1 = 1 \quad (41)$$

$$b_2 = (1 + 1/Le.Da)^{-1} \cdot \exp(\hat{x}_v/Da) - 1 \quad (42)$$

$$c_2 = \exp(-Le.\hat{x}_v) \{ 1 - (1 + 1/Le.Da)^{-1} + \exp(Le.\hat{x}_v) \times \langle -1 + (1 + 1/Le.Da)^{-1} \exp(\hat{x}_v/Da) \rangle \} \quad (43)$$

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

$$Y_g = \{ 1 - (1 + 1/Le.Da)^{-1} + \exp(Le.\hat{x}_v) \langle -1 + (1 + 1/Le.Da)^{-1} \exp(\hat{x}_v/Da) \rangle \} \times \exp(Le(\hat{x} - \hat{x}_v)) \quad (44)$$

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

$$Y_g = 1 + \{ -1 + (1 + 1/Le.Da)^{-1} \exp(\hat{x}_v/Da) \} \exp(Le.\hat{x}) - (1 + 1/Le.Da)^{-1} \times \exp\left(\frac{\hat{x} - \hat{x}_v}{Da}\right) \quad (45)$$

#### ناحیه IV (ناحیه پس از واکنش)

قبل از آنکه به محاسبه ناحیه واکنش پرداخته شود، به دلیل سادگی، متغیرهای ناحیه پس از واکنش  $(0^+ < \hat{x} < +\infty)$ ، که در برگیرنده گازهای سوخته شده حاصل از احتراق است، مطابق زیر ارائه می‌شود:

$$\theta = c_5 \exp(\kappa'_1 \hat{x}) + c_6 \exp(\kappa'_2 \hat{x})$$

$$\begin{cases} \hat{x} \rightarrow \infty \Rightarrow \theta = 0 \\ \hat{x} \rightarrow 0 \Rightarrow \theta = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_5 = 0 \\ c_6 = 1 \end{cases} \quad (46)$$

$$Y_s \cong cte, \quad Y_g = 0 \quad (47)$$

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

#### ناحیه III (ناحیه واکنش)

در این مرحله از حل به تحلیل ناحیه واکنش  $(0^- \leq \hat{x} \leq 0^+)$  پرداخته می‌شود که در نهایت منجر به ارائه فرمولی برای محاسبه سرعت سوزش مخلوط ذرات ریز ارگانیک و هوا می‌شود. در این ناحیه جمله‌های جابه‌جایی و تبخیر در معادلات بقا در مقایسه با جمله‌های نفوذ و واکنش مقادیری قابل صرف نظر کردن هستند.

برای تحلیل ساختار این ناحیه و به منظور بسط آن، ابتدا عبارت‌های زیر تعریف می‌شوند:

$$\hat{x} = \varepsilon \xi, \quad Y_g = \varepsilon(s + y), \quad \theta = 1 - \varepsilon r \quad (48)$$

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

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

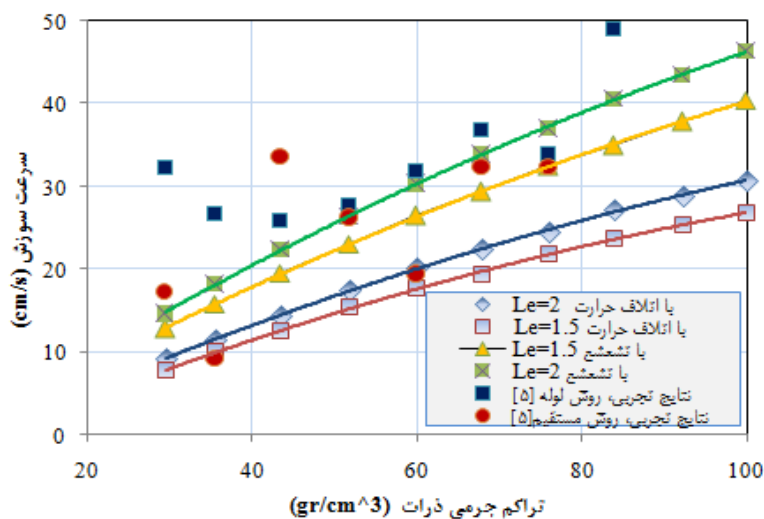
$$\frac{2\lambda B}{U_u^2 \rho C Ze^2} \times [Ze \langle 1 + \{ -1 + (1 + 1/Le.Da)^{-1} \exp(\hat{x}_v/Da) \} \exp(-Le.Ze^{-1}) - (1 + 1/Le.Da)^{-1} \exp\left(\frac{Ze^{-1} + \hat{x}_v}{Da}\right) \rangle + Le] \times \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - (c_3 \kappa'_1 + c_4 \kappa'_2 - \left(\frac{q/Da}{(1/Da)^2 + (1/Da) - (D'/U_u^2)}\right) (1/Da) \exp(\hat{x}_v/Da))^2 = 0 \quad (49)$$



## 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 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 می‌شود. به منظور بررسی صحت مدل جدید ارائه شده، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از تحلیل حالت پایای موجود با داده‌های آزمایشگاهی [۴] و تحلیلی [۱۰] صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، محاسبه سرعت سوزش به‌عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات با در نظر گرفتن تأثیر تلفات حرارتی تطابق قابل قبولی با اختلاف ۳۱ درصد با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط پروست [۴] در مورد ذرات ارگانیک لایکوپودیم دارد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش تراکم جرمی ذرات سرعت سوزش نیز افزایش می‌یابد.

شایان ذکر است که ذره لایکوپودیم به دلیل خاصیت تک‌سایزی<sup>۱</sup> بودن به‌عنوان مرجع در احتراق ذرات ارگانیک استفاده می‌شود؛ 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 به دست آمده از مدل تحلیلی حاضر با در نظر گرفتن اثر تشعشع حرارتی [۱۲] و تلفات و نتایج آزمایشگاهی انتشار یافته در مرجع [۴] به صورت تابعی از تراکم جرمی ذرات لایکوپودیم

جدول ۱- مقایسه برخی خصوصیات ذره لایکوپودیم

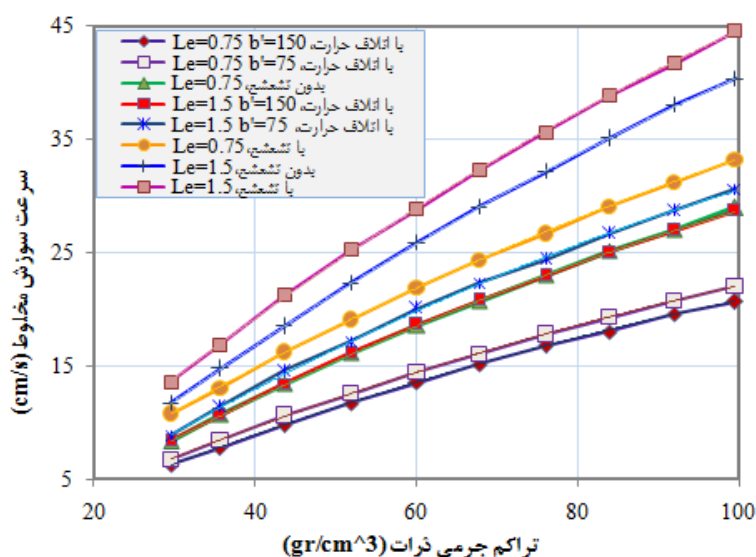
دمای اشتعال	ظرفیت گرمایی	ضریب هدایت حرارتی	چگالی	متوسط قطر
۸۹۰ (°C)	۰/۳۱ (cal/gr.k)	۳/۵e <sup>-4</sup> (cal/cm.s.k)	۵۰۰ (gr/m <sup>3</sup> )	۳۰-۳۲ (µm)

## تأثیر تلفات حرارتی بر ساختار شعله

شکل ۳ نشان می‌دهد که سرعت سوزش به‌عنوان تابعی از تراکم جرمی ذرات با افزایش عدد لویییس از ۰/۷ به ۱/۵ افزایش می‌یابد. همان‌طور که در قسمت قبل هم بیان شد، این موضوع با توجه به تعریف عدد لویییس 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 آن با تأثیر تشعشع [۱۲] به‌عنوان یک عامل موثر است. همان‌طور که انتظار می‌رود، اتلاف حرارت باعث کاهش سرعت سوزش می‌شود. این کاهش برای حالتی که عدد لویییس ۰/۷ در نظر گرفته شده است، برابر ۸ درصد و برای عدد لویییس ۱/۵

1. Monodispersed

برابر ۲۰ درصد است، که البته به ضریب اتلاف حرارت که با  $b'$  نشان داده می‌شود هم بستگی خواهد داشت. به عبارتی، با کاهش این ضریب، اتلاف حرارت اهمیت کمتری پیدا کرده و به نسبت سرعت سوزش هم کمتر کاهش می‌یابد، چنانکه برای ضریب اتلاف حرارت  $b'$  برابر ۷۵، در حالتی که عدد لوئیس  $1/5$  است، مقدار کاهش سرعت سوزش ۱۵ درصد می‌شود. مقدار کاهش سرعت سوزش با در نظر گرفتن ضریب  $b'$  برابر ۱۵۰ و دقیقاً برای همان عدد لوئیس  $1/5$  برابر ۲۰ درصد می‌شود و می‌توان گفت که میزان کاهش سرعت سوزش برای  $b'$  برابر ۱۵۰، ۵ درصد کمتر است.



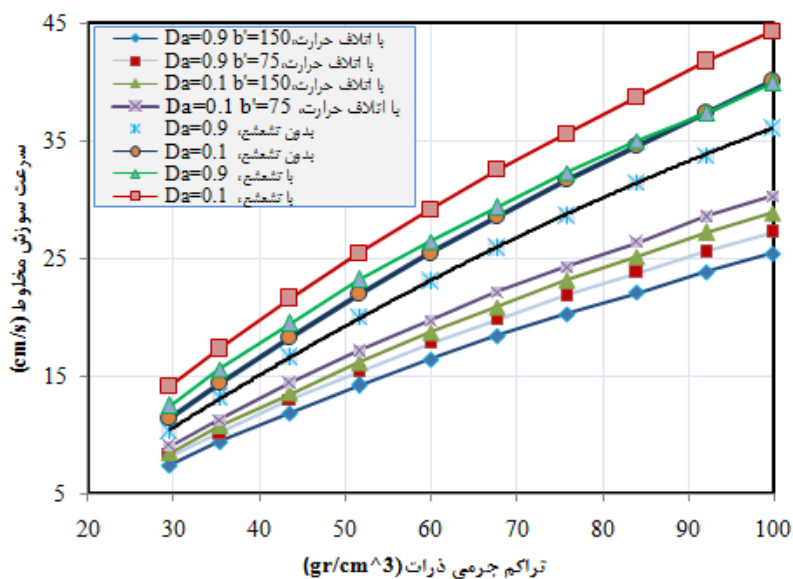
شکل ۳- بررسی اثر تشعشع حرارتی [۱۲] و تلفات بر روی سرعت سوزش مخلوط به صورت تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک به ازای اعداد لوئیس متفاوت در حالت  $\theta_v = 0.25, Da = 0.2$

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 در  $\theta_v = 0.4, Le = 1.5$  شکل نزولی به‌خود می‌گیرد، دلیل آن این است که افزایش عدد دامکولر بیان‌کننده افزایش نرخ واکنش است و با توجه به تعریف عدد دامکولر تبخیر به‌درستی صورت نمی‌گیرد. پس سوخت گازی حاصل از تبخیر ذرات ارگانیک نمی‌تواند تأمین‌کننده نرخ بالای واکنش باشد و جریان واکنشی موجود با نرخ تبخیر کنترل و سرعت سوزش کاهش می‌یابد. همان‌طور که قابل مشاهده است، اتلاف حرارت موجب کاهش سرعت سوزش در حدود ۱۷ درصد می‌شود.

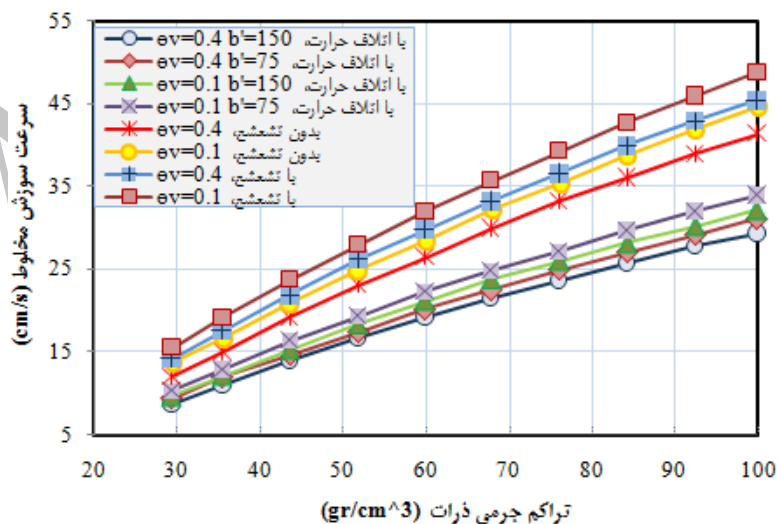
نکته دیگری که می‌توان از مقایسه دو شکل ۴ و ۳ به آن رسید اهمیت تغییر عدد دامکولر و عدد لوئیس است. به بیان روشن‌تر، با افزایش عدد دامکولر از ۰/۱ به ۰/۹ و عدد لوئیس از ۰/۷۵ به ۱/۵، که تقریباً به یک میزان افزایش می‌یابند، مشاهده می‌شود که میزان کاهش سرعت سوزش در حالت اول از میزان افزایش سرعت سوزش در حالت دوم ۸ درصد کمتر است. چنانکه با افزایش عدد لوئیس از ۰/۷ به ۱/۵ و برای ضریب اتلاف حرارت ۱۵۰ میزان افزایش سرعت سوزش ۱۲ درصد و با افزایش عدد دامکولر از ۰/۱ به ۰/۹ با همان ضریب اتلاف حرارت ۱۵۰ میزان کاهش سرعت سوزش ۴ درصد است، که خود بیان‌کننده اهمیت نسبت نفوذ حرارت و نفوذ جرم است در مقابل نسبت نرخ واکنش به نرخ تبخیر در سرعت سوزش.

در ادامه اثر دمایی بعد از نقطه آغاز تبخیر بر روی سرعت سوزش به‌عنوان تابعی از غلظت جرمی ذرات با در نظر 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  $\theta_v$  از ۰/۱ به ۰/۴ سرعت سوزش ۷ درصد کاهش می‌یابد، زیرا همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد افزایش دمایی بعد از 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 می‌شود. از نکات دیگر مشهود در این شکل اینک با در نظر گرفتن تشعشع حرارتی [۱۲] القاشده از مرز شعله به درون نواحی نسوخته  $U_f$  در  $\theta_v$  ثابت افزایش می‌یابد. در حقیقت پیش‌گرمایش تشعشع حرارتی موجب بهبود روند تبخیر ذرات ارگانیک می‌شود. 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.

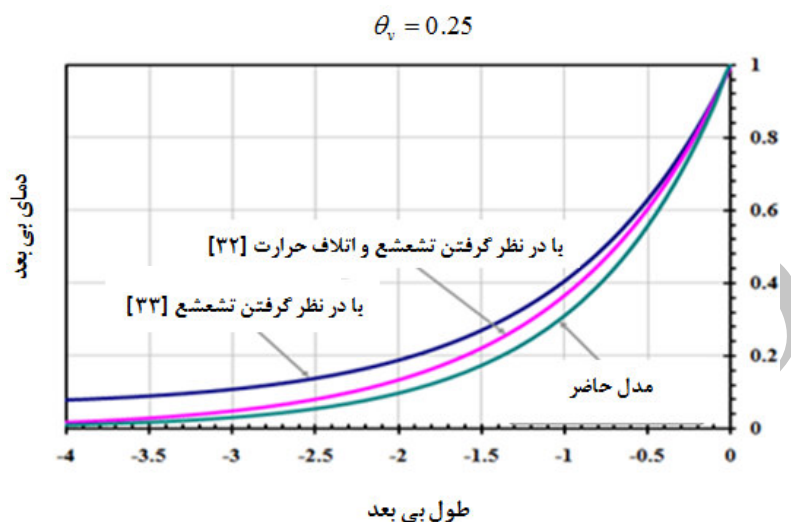


شکل ۴- بررسی اثر تشعشع حرارتی [۱۲] و تلفات بر روی سرعت سوزش مخلوط به صورت تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک به ازای اعداد دامکولر متفاوت و در حالت  $Le = 1.5$ ,  $\theta_v = 0.4$



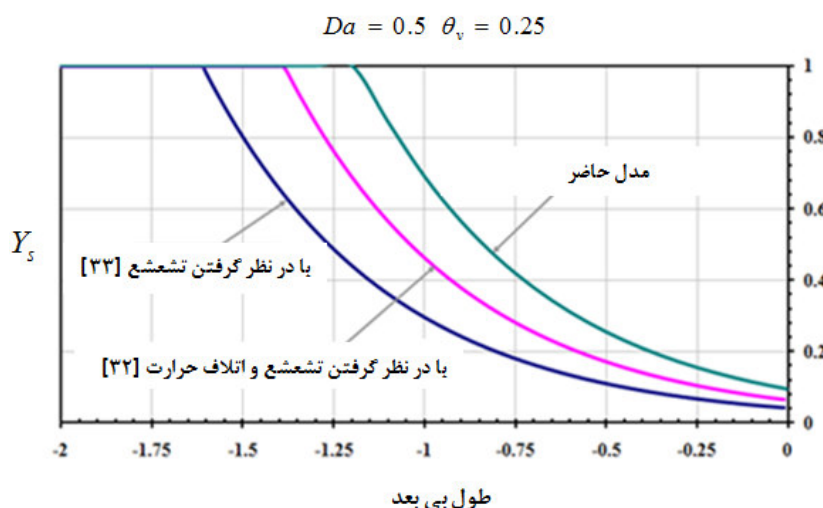
شکل ۵- بررسی اثر تشعشع حرارتی [۱۲] و تلفات بر روی سرعت سوزش مخلوط به صورت تابعی از تراکم جرمی ذرات ارگانیک برای اعداد متفاوت در دمای بی بعد آغاز تبخیر در حالت  $Le = 2$ ,  $Da = 0.9$

دمای بی بعد مخلوط به عنوان تابعی از طول بی بعد ساختار شعله در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق با این شکل در نظر گرفتن اتلاف حرارت باعث افت ده درصدی توزیع دما در نواحی پیش گرم و تبخیر ( $-\infty < \hat{x} \leq 0^-$ ) 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 بی بعد مخلوط در طول بی بعد ساختار شعله

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



شکل ۷- بررسی تشعشع حرارتی [۱۲] و تلفات بر روی کسر جرمی سوخت در فاز جامد در طول بی بعد ساختار شعله در شرایط

$$\theta_v = 0.25, Da = 0.5$$

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

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 می‌شود.

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 تأثیرگذار 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 ۱۲ درصد 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 ( $\theta_p$ ) 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 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 مسئله موجب کاهش سرعت سوزش می‌شود.

#### منابع

1. 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 Explosion 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.
7. 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.
11. 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.

## English Abstract

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

Mehdi Bidabadi and Fatemeh Ebrahimi Nasab

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 parameter 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

Archive of SID